



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλάσσιων Μεταφορών

Διπλωματική Εργασία

***Πιθανοτική Αξιολόγηση του Κριτηρίου
Δυναμικής Ευστάθειας Δεύτερης Γενιάς
“Level 2 Deadship Condition failure mode”***

Παναγιώτης Κυριακόπουλος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Σπύρου, καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκε και ταυτόχρονα αξιολογήθηκε πιθανοτικά το κριτήριο άθικτης ευστάθειας δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”. Πιο συγκεκριμένα, αφού προηγήθηκε αναφορά στο υπόβαθρο του εν λόγω κριτηρίου και διατυπώθηκαν τόσο η αρχική μη γραμμική όσο και η γραμμικοποιημένη εξίσωση επί της οποίας στηρίζεται το κριτήριο, εφαρμόστηκε η διαδικασία που προβλέπεται στο κριτήριο, προς υπολογισμό του (αντιπροσωπευτικού της ευστάθειας) πιθανοτικού δείκτη ευπάθειας C. Μελετήθηκαν τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης συγκεκριμένου σύγχρονου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη C και συγκρίθηκαν με την οριακή επιτρεπόμενη τιμή $R=0.06$. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν μέσω των δύο αντιπαρατιθέμενων μαθηματικών μοντέλων (του μη γραμμικού και του γραμμικοποιημένου). Ειδικότερα, διενεργήθηκαν μαζικές προσομοιώσεις διατοιχισμού του πλοίου εξαιτίας της συνδυασμένης επίδρασης ανέμου και κυματισμών. Οι διεγέρσεις αυτές εκφράστηκαν μέσω μοντέλων τυχαίας φάσης (Random Phase Model - RPM) και εξήχθησαν δεδομένα προς στατιστική ανάλυση επικεντρωμένα στο στατιστικά μόνιμο στάδιο της απόκρισης διατοιχισμού. Από αυτά τα δεδομένα κατασκευάστηκαν ιστογράμματα απόκρισης προς τα οποία προσαρμόστηκαν κατάλληλες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (*Probability Density Functions- PDFs*). Για την περίπτωση του γραμμικοποιημένου μοντέλου, αυτό το εγχείρημα πραγματοποιήθηκε προς επικύρωση της ακολουθούμενης διαδικασίας, δεδομένου ότι είναι γνωστό πως, για διέγερση που ακολουθεί την κανονική («γκαουσιανή») κατανομή, η απόκριση θα ακολουθεί την ίδια μορφή κατανομής. Σημειώνεται ότι, στο πλαίσιο του εξεταζόμενου κριτηρίου δεύτερης γενιάς, οι κυματισμοί εκφρασμένοι από την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και ο άνεμος εκφρασμένος από την ταχύτητα ριπών ανέμου, θεωρούνται πως ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για την περίπτωση του μη γραμμικού μοντέλου, αξιολογήθηκε η διαφοροποίηση της κατανομής της απόκρισης από την κανονική κατανομή. Για την κατασκευή των ιστογραμμάτων, σε πρώτη φάση αμελήθηκαν οι χρονοσειρές/προσομοιώσεις κατά τις οποίες το σύστημα απειρίζεται. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο σε αναφορά με το μη γραμμικό μοντέλο διατοιχισμού. Έτσι, μέσω της στατιστικής ανάλυσης, υπολογίστηκαν σημαντικά στατιστικά μεγέθη των κατανομών όπως μέση τιμή απόλυτης γωνίας διατοιχισμού, διακύμανση-τυπική απόκλιση κ.α. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη, σε αντίθεση με την περίπτωση των ιστογραμμάτων, τις διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος, παρήχθησαν ημι-λογαριθμικά διαγράμματα πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών (statistical probabilities of exceedance) και για τα δύο μοντέλα. Εδώ, κρίνεται αναγκαίο να τονισθεί ότι για κάθε κατάσταση φόρτωσης μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διέγερσης που αντιπροσωπεύονται από το ίδιο σημαντικό ύψος κύματος H_s και από διαφορετική μέση περίοδο κυματισμών T_z . Πιο συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τόσο σενάρια διέγερσης, των οποίων η συχνότητα κορυφής του αντιπροσωπευτικού φάσματος κυματισμού Bretschneider συνέπιπτε στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης όσο και σενάρια κατά τα οποία η περίοδος κορυφής των εν λόγω φασμάτων είτε βρισκόταν σχετικά μακριά είτε απλώς δε συνέπιπτε από την ιδιοπερίοδο. Η επίδραση των δεδομένων σεναρίων παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον κύριως για τη περίπτωση της μη γραμμικής μοντελοποίησης του συστήματος. Ωστόσο, οι περισσότερες καταστάσεις διέγερσης που αναλύθηκαν αποτελούν ρεαλιστικά σενάρια και επιλέχθηκαν από τον γνωστό πίνακα Wave Scatter Table (IACS, 2011)[4] προκειμένου η πιθανότητα εμφάνισής τους σε 100000 παρατηρήσεις να μην καθίσταται αμελητέα. Αφού συγκρίθηκαν τα στατιστικά αποτελέσματα των δύο μοντέλων, έλαβε χώρα συγκεντρωτική αποτίμηση, αξιολόγηση καθώς και συσχέτισή τους με το συναφές κριτήριο δεύτερης γενιάς.

Πιθανοτική αξιολόγηση του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”

Τέλος, παρατέθηκαν συμπεράσματα και σχόλια σχετικά με τα προκύπτοντα αποτελέσματα και ευρήματα της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

Abstract

In the present thesis, the second generation intact stability criterion known as “Level 2 Deadship Condition failure mode criterion” was studied and evaluated probabilistically. The scientific background of this specific criterion has been considered and, in particular, the original nonlinear differential equation of roll motion and the respective linearized, on which the criterion is based. The assessment procedure stipulated in the criterion has been applied in order to estimate the, representative of stability, probabilistic vulnerability index C . Four loading conditions of a specific modern containership were studied, the corresponding values of the index C were calculated and they were compared against the permitted limit value $R=0.06$. Furthermore, a statistical analysis of data, which were obtained from the two juxtaposed mathematical models, nonlinear and linearized, was carried out. Specifically, massive simulations of ship’s roll behaviour due to the simultaneous action of wind and waves were conducted. These excitations were expressed via the Random Phase Model- RPM. Then, statistical data, corresponding to the ship’s steady-state roll, were extracted. From these data, histograms were produced and Probability Density Functions (PDFs) were fitted to them. In the case of the linearized model, this was done for verifying the calculation procedure considering that, for excitation following the Normal (Gaussian) distribution, the response will follow the same distribution. In the context of the examined criterion, it should be pointed that the waves, which are expressed by the sea surface’s elevation, and the wind, which is expressed by the gust wind’s speed, are considered to follow the Normal distribution. In the case of nonlinear model, the distinction between response’s distribution and Normal distribution was evaluated. The histograms were produced neglecting time-series/simulations in which the system escaped to infinity. This can happen only in reference to the non-linear model of roll motion. Thus, via statistical analysis, important statistical values such as mean value, variance-standard deviation and others were calculated. Afterwards, accounting also for the escape cases of the nonlinear system, semi-logarithmic diagrams of statistical probability of exceedance of rolling angles were produced. In that point, it should be highlighted that three different cases of excitation were subjected for each loading condition, represented by the same significant wave height H_s and by a different mean zero up-crossing period T_z . More specifically, excitation scenarios where the peak frequency of representative Bretschneider Wave Spectrum coincided with the natural frequency of the system, for each loading condition; and also, other excitation scenarios in which the peak period of the spectrum was relatively far apart from the natural period (or it simply didn’t coincide) were analyzed. The effect of the last one mentioned excitation scenarios presents a strong interest mainly in the case of non-linear modelling of the system. However, most of the excitation cases analyzed, constitute realistic scenarios and they were selected from the well-known Wave Scatter Table (IACS, 2011)[4] in order that the possibility of occurring in 100000 observations not to be negligible. Following the comparison between the statistical results of the linearized and the counterparts of the nonlinear model, aggregate assessment was conducted, in which, among others, statistical results were correlated with the vulnerability indices of relevant second generation criterion. Finally, summaries and brief comments regarding the significant results and findings of this investigatory thesis were quoted.

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ‘θελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα και μέντορά μου, καθηγητή Κ.Σπύρου, τόσο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος διπλωματικής εργασίας όσο και για τις πολύτιμες συμβουλές και ιδέες που μου έδωσε εντός των πλαισίων της παρούσας έρευνας. Ήταν συνοδοιπόρος μου καθ’όλης της διάρκειας της εκπόνησης του θέματος και χωρίς την βοήθειά του η υλοποίησή του θα φάνταζε απροσπέλαστη.

Στη συνέχεια, πολύτιμη και αξιοσέβαστη ήταν η βοήθεια, ομοίως τα σχόλια καθώς και οι συμβουλές του Υποψήφιου Διδάκτορα Παναγιώτη Αναστόπουλου όσον αφορά στο κεφάλαιο της στατιστική ανάλυσης. Τον ευχαριστώ από τα βάθη της ψυχής μου.

Τέλος, δε θα μπορούσα σε καμία περίπτωση να αμελήσω να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, οι οποίοι ήταν δίπλα μου, με υποστήριζαν και με ενθάρρυναν δίνοντας μου κουράγιο, δύναμη και ελπίδα καθ’ όλη τη διάρκεια του παρόντος εγχειρήματος.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	1
Κατάλογος Πινάκων.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 2: Κριτική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας και Στόχοι Ερευνητικού Έργου	8
2.1 Κριτική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	8
2.2 Στόχοι Ερευνητικού Έργου	12
Κεφάλαιο 3: Κριτήριο δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”	14
3.1 Φυσικό Υπόβραθρο	14
3.2 Γραμμικοποιημένο και Μη Γραμμικό Μοντέλο	15
3.2.1 Μη γραμμικό μοντέλο	18
3.2.2 Γραμμικοποιημένο μοντέλο	19
3.3 Αναλυτική λύση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού.....	20
3.3.1 Μοντελοποίηση με την απόλυτη γωνία διατοιχισμού	20
3.3.2 Μοντελοποίηση με τη σχετική γωνία διατοιχισμού	23
3.4 Καθορισμός δείκτη ευπάθειας C_s, i	24
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”	29
4.1 Χαρακτηριστικά καταστάσεων φόρτωσης πλοίου.....	29
4.2 Εφαρμογή	34
Κεφάλαιο 5: Στατιστική Σύγκριση Μη Γραμμικού και Γραμμικοποιημένου Μοντέλου. 38	
5.1 Γενικά.....	38
5.2 Περιγραφή της διαδικασίας εξαγωγής των στατιστικών τιμών	38
5.3 Εξαγωγή και σχολιασμός στατιστικών αποτελεσμάτων	41
5.3.1 Κατάσταση Φόρτωσης 18.....	42
5.3.2 Κατάσταση Φόρτωσης 22.....	63
5.3.3 Κατάσταση Φόρτωσης 27.....	80
5.3.4 Κατάσταση Φόρτωσης 31.....	97
Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	115
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.....	122
Βιβλιογραφία.....	124
Παράρτημα.....	125

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1.1: ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΓΕΝΙΑΣ (ΙΜΟ- SDC 7/WP.6, 2020) [8].....	7
ΣΧΗΜΑ 3.1: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΕΝΑΡΙΟΥ “DEADSHIP CONDITION FAILURE MODE”	14
ΣΧΗΜΑ 3.2: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ “LEVEL 2 DEADSHIP CONDITION FAILURE MODE” (ΙΜΟ- SDC 7/WP.6, 2020) [8].....	15
ΣΧΗΜΑ 3.3: ΜΟΧΛΟΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ, ΓΩΝΙΕΣ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ-ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ. (ZHENWANG, KUN, & XINMENG, 2016) [14].....	25
ΣΧΗΜΑ 4.1: ΣΧΕΔΙΟ “BODY LINES-PLAN”	29
ΣΧΗΜΑ 4.2: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ - ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΜΟΧΛΟΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 18.....	31
ΣΧΗΜΑ 4.3: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ - ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΜΟΧΛΟΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 22.....	31
ΣΧΗΜΑ 4.4: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΜΟΧΛΟΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 27.....	32
ΣΧΗΜΑ 4.5: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΜΟΧΛΟΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ 31.....	33
ΣΧΗΜΑ 5.1: ΦΑΣΜΑ DAVENPORT ΓΙΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ $H_s=6.5\text{m}$	43
ΣΧΗΜΑ 5.2: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ($H_s=6.5\text{m}, T_z=14.5\text{s}$).....	44
ΣΧΗΜΑ 5.3: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{s}, T_z=14.5\text{s})\}$	44
ΣΧΗΜΑ 5.4: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{s}, T_z=14.5\text{s})\}$	45
ΣΧΗΜΑ 5.5: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=14.5\text{s})\}$	46
ΣΧΗΜΑ 5.6: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=14.5\text{s})\}$	49
ΣΧΗΜΑ 5.7: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ($H_s=6.5\text{m}, T_z=15.5\text{s}$).....	51
ΣΧΗΜΑ 5.8: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=15.5\text{s})\}$	51
ΣΧΗΜΑ 5.9: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=15.5\text{s})\}$	52
ΣΧΗΜΑ 5.10: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=15.5\text{s})\}$	53
ΣΧΗΜΑ 5.11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=15.5\text{s})\}$	56
ΣΧΗΜΑ 5.12: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ($H_s=6.5\text{m}, T_z=9.5\text{s}$).....	58
ΣΧΗΜΑ 5.13: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=9.5\text{s})\}$	58
ΣΧΗΜΑ 5.14: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=9.5\text{s})\}$	59
ΣΧΗΜΑ 5.15: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=9.5\text{s})\}$	59
ΣΧΗΜΑ 5.16: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ $\{LC18-(H_s=6.5\text{m}, T_z=9.5\text{s})\}$	62
ΣΧΗΜΑ 5.17: ΦΑΣΜΑ DAVENPORT ΓΙΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ $H_s=8.5\text{m}$	63
ΣΧΗΜΑ 5.18: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ($H_s=8.5\text{m}, T_z=12.5\text{s}$).....	64
ΣΧΗΜΑ 5.19: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC22-(H_s=8.5\text{m}, T_z=12.5\text{s})\}$	64
ΣΧΗΜΑ 5.20: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ $\{LC22-(H_s=8.5\text{m}, T_z=12.5\text{s})\}$	65

ΣΧΗΜΑ 5.21: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}	66
ΣΧΗΜΑ 5.22: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}	68
ΣΧΗΜΑ 5.23: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=8.5m,Tz=10.5s).....	70
ΣΧΗΜΑ 5.24: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}	70
ΣΧΗΜΑ 5.25: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}	71
ΣΧΗΜΑ 5.26: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}	71
ΣΧΗΜΑ 5.27: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}	74
ΣΧΗΜΑ 5.28: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=8.5m,Tz=16.5s).....	75
ΣΧΗΜΑ 5.29: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	76
ΣΧΗΜΑ 5.30: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	76
ΣΧΗΜΑ 5.31: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	77
ΣΧΗΜΑ 5.32: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	79
ΣΧΗΜΑ 5.33: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	81
ΣΧΗΜΑ 5.34: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	82
ΣΧΗΜΑ 5.35: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	82
ΣΧΗΜΑ 5.36: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}	84
ΣΧΗΜΑ 5.37: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=8.5m,Tz=11.5s).....	86
ΣΧΗΜΑ 5.38: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}	87
ΣΧΗΜΑ 5.39: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}	87
ΣΧΗΜΑ 5.40: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}	88
ΣΧΗΜΑ 5.41: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}	91
ΣΧΗΜΑ 5.42: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=8.5m,Tz=13.5s).....	92
ΣΧΗΜΑ 5.43: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}	93
ΣΧΗΜΑ 5.44: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}	93
ΣΧΗΜΑ 5.45: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}	94
ΣΧΗΜΑ 5.46: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}	96
ΣΧΗΜΑ 5.47: ΦΑΣΜΑ DAVENPORT ΓΙΑ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟ ΥΨΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ Hs=7.5m.....	98
ΣΧΗΜΑ 5.48: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=7.5m,Tz=13.5s).....	99
ΣΧΗΜΑ 5.49: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}	99
ΣΧΗΜΑ 5.50: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}	100
ΣΧΗΜΑ 5.51: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}	100

ΣΧΗΜΑ 5.52: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}	103
ΣΧΗΜΑ 5.53: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=7.5m,Tz=16.5s).....	104
ΣΧΗΜΑ 5.54: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}	105
ΣΧΗΜΑ 5.55: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}	105
ΣΧΗΜΑ 5.56: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}	106
ΣΧΗΜΑ 5.57: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}	108
ΣΧΗΜΑ 5.58: ΦΑΣΜΑ BRETSCHNEIDER ΓΙΑ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ (Hs=7.5m,Tz=10.5s).....	109
ΣΧΗΜΑ 5.59: ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}	110
ΣΧΗΜΑ 5.60: ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ - ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}	110
ΣΧΗΜΑ 5.61: ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}	111
ΣΧΗΜΑ 5.62: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΤΗΣ {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}	113

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΛΕΤΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΛΕΤΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: WAVE SCATTER TABLE (IACS, 2011)[4]	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5: ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ LC18	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6: ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ LC22	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7: ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ LC27	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8: ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΕΙΣΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ LC31	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.9: ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΥΠΑΘΕΙΑΣ C ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΛΕΤΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΣ ΜΕΛΕΤΟΥΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: ΓΩΝΙΑ ΕΥΣΤΑΘΟΥΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ, ΓΩΝΙΑ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΜΕΛΕΤΟΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=14.5s)}	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=14.5s)}	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=15.5s)}	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=15.5s)}	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=9.5s)}	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC18-(Hs=6.5M,Tz=9.5s)}	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=12.5s)}	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=12.5s)}	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=10.5s)}	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=10.5s)}	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=16.5s)}	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC22-(Hs=8.5M,Tz=16.5s)}	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=16.5s)}	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=16.5s)}	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=11.5s)}	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=11.5s)}	91
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.20: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=13.5s)}	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC27-(Hs=8.5M,Tz=13.5s)}	97
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=13.5s)}	101
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=13.5s)}	103
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=16.5s)}	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=16.5s)}	109
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.26: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=10.5s)}	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.27: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ {LC31-(Hs=7.5M,Tz=10.5s)}	113

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ «ΥΠΕΡΟΧΗΣ» ΤΟΥ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥΣ.	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΗΣ ΓΩΝΙΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΥΠΕΡΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΒΑΣΕΩΝ ΑΠΟ ΠΛΕΥΡΑΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ.	121

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια πλόων η συνδυασμένη πλευρική επίδραση ανέμου και ανεμογεννών τυχαίων κυματισμών αποτελεί ένα αρκετά ρεαλιστικό σενάριο διέγερσης. Τέτοιες διεγέρσεις θα μπορούσαν να αποβούν δυσμενείς για την ευστάθεια του πλοίου, ειδικά αν οι επιδράσεις ανέμου και κυματισμών είναι με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και ιδιαίτερα αν προκύπτει κατάσταση συντονισμού. Το βασικό ισχύον κριτήριο άθικτης ευστάθειας (το λεγόμενο «Κριτήριο Καιρού» - “Severe Wind and Rolling Criterion”) εστιάζεται στην απόκριση του πλοίου όταν αυτό έχει απωλέσει την ικανότητα αυτοπρόωσης, εξαιτίας βλάβης της προωστήριας εγκατάστασης, ενόσω αυτό υφίσταται ταυτόχρονη επίδραση τυχαίων εγκάρσιων κυματισμών και ριπών ανέμου. Αυτή η κατάσταση, η οποία χαρακτηρίζεται ως άκρως επικίνδυνη για την επιβίωση του πλοίου καθώς αυτό μπορεί να καταστεί έρμαιο των κυματισμών και του ανέμου, ονομάζεται κοινώς «Deadship Condition». Στο πλαίσιο των κριτηρίων άθικτης ευστάθειας δεύτερης γενιάς αναπτύχθηκε το λεγόμενο “Level 2 Deadship Condition failure mode”. Το συγκεκριμένο κριτήριο αποτελεί μια μετεξέλιξη του «Κριτηρίου Καιρού» το οποίο έχει παραμείνει στο πλαίσιο των κριτηρίων δεύτερης γενιάς ως απαίτηση Επιπέδου 1 (“Level 1”). Οι απαιτήσεις που ένα πλοίο πρέπει να πληροί ώστε να τυγχάνει εφαρμογής σε αυτό το Κριτήριο Καιρού είναι οι ακόλουθες :

- $B/d < 3.5$
- $-0.3 < (KG/d-1) < 0.5$
- $T_0 < 20 \text{ sec}$

όπου B, d, KG, T_0 είναι αντίστοιχα το πλάτος, βύθισμα, κέντρο βάρους και ιδιοπερίοδος του πλοίου.

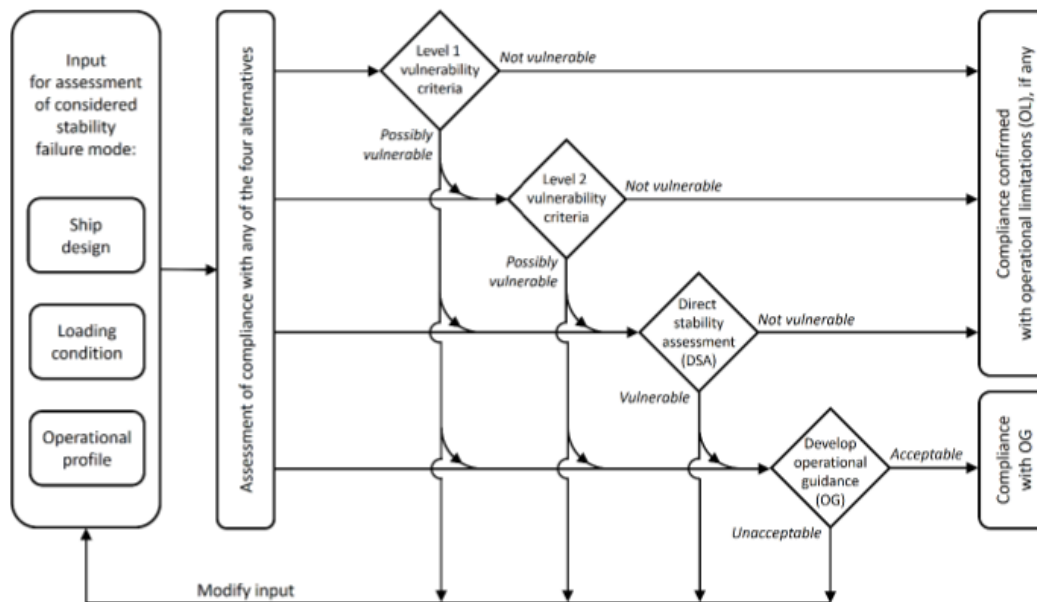
Μη ικανοποίηση οποιασδήποτε συνθήκης-απαίτησης από τις παραπάνω αποτελεί προϋπόθεση εφαρμογής του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode” το οποίο αποτελεί ένα πιο αυστηρό και λεπτομερές, ως προς τη μελέτη ευστάθειας, κριτήριο από το Κριτήριο Καιρού και βασίζεται σε εκτενέστερη πιθανοτική ανάλυση. Ακόμη, εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου το πλοίο δεν ικανοποιεί τις τεχνικές απαιτήσεις του «Κριτηρίου Καιρού». Αντιπροσωπευτικός της ευπάθειας του πλοίου, στα πλαίσια μοντελοποίησης του εν λόγω κριτηρίου, είναι ο πιθανοτικός δείκτης C. Αυτός προκύπτει από την άθροιση όλων των γινομένων των πιθανοτήτων ανατροπής/υπέρβασης μιας ορισμένης εκάστοτε υψηλής γωνίας υπό την επίδραση δεδομένων σεναρίων διέγερσης κυματισμών και ανέμων, των οποίων χαρακτηριστικά μεγέθη αποτελούν το σημαντικό ύψος κύματος H_s και η μέση περίοδος κυματισμών T_z (μέση περίοδος ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας), και των πιθανοτήτων εμφάνισης των αντίστοιχων αυτών καθ’ αυτών σεναρίων διέγερσης. Στην περίπτωση όπου το πλοίο κριθεί ευπαθές ύστερα από την υλοποίηση του κριτηρίου «Level 2 Deadship Condition failure mode», πραγματοποιείται ακόμη πιο λεπτομερής ανάλυση της συμπεριφοράς του σε διατοιχισμό μέσω της μεθόδου “Direct Stability Assessment(DSA)”.

Στο εν λόγω κριτήριο δεύτερης γενιάς, η απόσβεση του συστήματος υφίσταται στοχαστική γραμμικοποίηση μέσω της τυπικής απόκλισης του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού. Ταυτόχρονα, η επαναφορά του συστήματος θεωρείται γραμμική αμελώντας τους έντονα μη γραμμικούς όρους του αντίστοιχου μοχλοβραχίονα. Αυτές οι γραμμικοποιήσεις πραγματοποιούνται με σκοπό η απόκριση του συστήματος να αποτελεί μια Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία και κατ’ αυτόν τον τρόπο, έχοντας γνώση την κατανομή της, να υπολογιστεί η πιθανότητα ανατροπής/υπέρβασης μια καθορισμένης υψηλής γωνίας του εκάστοτε σεναρίου διέγερσης, με βάση γνωστές αναλυτικές σχέσεις. Αυτό το θέμα των γραμμικοποιήσεων των όρων απόσβεσης και επαναφοράς απετέλεσε βασικό σημείο εστιασμού για την παρούσα έρευνα. Ειδικότερα, η επίδραση της αμέλειας της ακριβούς μορφής του

μοχλοβραχίονα επαφοράς, σε συνδυασμό με τη χρήση γραμμικοποιημένης ισοδύναμης απόσβεσης, ιδίως σε μεγάλες γωνίες διατοιχισμού. Έτσι, ο υπολογισμός του, δηλωτικού της ευπάθειας, δείκτη C μπορεί να μην καθίσταται στην πραγματικότητα ακρίβης και ορθός, καθώς παραγκωνίζονται οι μη γραμμικοί όροι της ροπής επαναφοράς και απόσβεσης με αποτέλεσμα την ανακρίβεια του εν λόγω κριτηρίου. Έτσι, για να μελετηθεί η επίδραση αυτών των μη γραμμικών όρων στην απόκριση του συστήματος, επιχειρήθηκε στατιστική ανάλυση, στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, τόσο του μη γραμμικού συστήματος όσο και του γραμμικοποιημένου, το οποίο διέπει το εν λόγω κριτήριο. Εδώ επισημαίνεται ότι το εγχείρημα εξαγωγής των στατιστικών και όλων των συνεπακόλουθων αποτελεσμάτων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Ωστόσο, υπάρχει ελπίδα ότι εν συνεχεία πρόκειται να ακολουθήσουν, αν δεν έχουν πράξει ήδη τη δεδομένη στιγμή, και άλλοι ερευνητές, τα ευρήματα και πορίσματα των οποίων, σε συνδυασμό με αυτά της παρούσας μελέτης, να διαφωτίσουν περισσότερο τις πτυχές του συγκεκριμένου θέματος.

Συνοπτικά, τα κεφάλαια της παρούσας εργασίας ορίζονται ως εξής :

- Κεφάλαιο 2: Σύνομη περιγραφή και αξιολόγηση των βιβλιογραφικών πηγών και Παρουσίαση Στόχων ερευνητικού έργου
- Κεφάλαιο 3: Φυσικό Υπόβραθρο και Ανάλυση κριτηρίου δεύτερης γενιάς «Level 2 Deadship Condition failure mode»
- Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του κριτηρίου σε τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης πλοίου.
- Κεφάλαιο 5: Υλοποίηση στατιστικής ανάλυσης και σύγκριση μεταξύ της μη γραμμικής και γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης
- Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων
- Κεφάλαιο 7: Παράθεση συμπερασμάτων και σχολίων επί των πορισμάτων του ερευνητικού έργου.



Σχήμα 1.1: Απλοποιημένο σχήμα για την εφαρμογή των κριτηρίων δεύτερης γενιάς (IMO-SDC 7/WP.6, 2020) [8]

Κεφάλαιο 2: Κριτική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας και Στόχοι Ερευνητικού Έργου

2.1 Κριτική Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

Τα τελευταία χρόνια το αναπτυσσόμενο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θέμα έχει προκαλέσει αίσθηση καθώς επίσης και έντονο ενδιαφέρον σε αρκετούς ειδήμονες, επιστήμονες και επιστημονικές κοινότητες και την ίδια στιγμή έχουν καταβληθεί αλλά και συνεχίζεται να καταβάλλονται προσπάθειες αξιολόγησης και αποσαφήνισης τόσο της απόκρισης του πλοίου υπό την επίδραση του σεναρίου “Deadship Condition” όσο και του συναφούς κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2”. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προγενέστερα, συγκεκριμένα το εγχείρημα της στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων, που ανακύπτουν με τη χρήση από τη μία της γραμμικής και από την άλλη της μη γραμμικής μοντελοποίησης της εν λόγω εξίσωσης κίνησης διατοιχισμού, και ακολούθως της σύγκρισή τους, βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και αποτελεί μια καινοτομία. Έτσι, σ’ αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί αναφορά στις έρευνες, στις διεξοδικές μελέτες και στα έργα ερευνητών και ειδικών σε θέματα ευστάθειας που συνεισέφεραν στη παρούσα μελέτη.

Το κριτήριο άθικτης ευστάθειας δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode” αποτελεί μια μετεξέλιξη του κριτηρίου “Severe Wind and Rolling Criterion”, ή αλλιώς όπως αργότερα μετονομάστηκε σε “Weather Criterion” (IMO, 2006) [7]. Το Κριτήριο Καιρού στηρίζεται πάνω σε μια ενεργειακή προσέγγιση, αμελώντας την στοχαστική διέγερση των κυμάτων και του ανέμου και ταυτόχρονα τη φασματική του αναπαράστασή τους καθώς επίσης και το εγγενές φάσμα της απόκρισης. Αυτή η φασματική αναπαράσταση τόσο της διέγερσης όσο και της απόκρισης λαμβάνονται υπόψη κατά τη μοντελοποίηση του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2”. Όπως έχει προαναφερθεί ήδη, τα πλοία τα οποία δεν ικανοποιούν ορισμένες διαστασιολογικές απαιτήσεις του Κριτηρίου Καιρού, μεταβαίνουν αυτομάτως στο κριτήριο δεύτερης γενιάς “Level 2” με σκοπό την διεξοδική μελέτη τους πάνω στην ευστάθεια σε διατοιχισμό που υποβάλλονται εξαιτίας της συνδυασμένης επίδρασης ανέμου και πλευρικών τυχαίων κυματισμών, έχοντας παράλληλα μηδενική ταχύτητα πρόωσης. Εντός των πλαισίων εφαρμογής του κριτηρίου, ενδεικτικός της ευστάθειας/εμπάθειας του πλοίου καθίσταται ο δείκτης C, του οποίου η μεθοδολογία υπολογισμού αναγράφεται μέσα στις οδηγίες οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο Report του Drafting Group υπό την αιγίδα του IMO [5], [6], [8]. Ακόμη, σε αναλύσεις πάνω όχι μόνο στο Κριτήριο Καιρού αλλά και στο κριτήριο “Level 2” προχώρησαν οι καθηγητές των πανεπιστημίων της Γλασκώβης και του Στραθκλάιντ Dracos Vassalos, Andrzej Jasionowski και Jakub Cichowicz [12] και, μεταξύ άλλων, αφού πρώτα μοντελοποίησαν σύμφωνα με το Μοντέλο Τυχαίας Φάσης (Random Phase Model-RPA), την τυρβώση χρονομεταβαλλόμενη συνιστώσα ταχύτητας ανέμου, ανέλυσαν την επίδραση του τυρβώδους ανέμου πάνω στη διατοιχιστική απόκριση, ενώ ταυτόχρονα τη συνέκριναν με την επίδραση που είχε ο συνεχούς έντασης άνεμος, εκφραζόμενος μέσω της μέσης ταχύτητας ανέμου.

Περίπου 10 χρόνια πριν, το 2010, ο Bulian G. και Francescutto A. [2] ανέδειξαν τις διαφορές μεταξύ τόσο της γραμμικής και της μη γραμμικής μοντελοποίησης όσο και της μοντελοποίησης με την απόλυτη και τη σχετική γωνία διατοιχισμού. Η μη γραμμική εξίσωση και διατοιχισμού που εξέτασαν, έχοντας ως όρισμα του όρου επαναφοράς τη σχετική γωνία, είναι η ακόλουθη:

$$\ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_0^2 \frac{GZ(\varphi - \alpha_{eff}(t))}{GM} = 0 \quad \text{Model "RelN"} \quad (2.1.1)$$

όπου :

- φ η απόλυτη γωνία διατοιχισμού
- $\alpha_{eff}(t)$ η επιδρώσα κλίση κυματισμών
- $d(\dot{\varphi}) = 2\mu\dot{\varphi} + \beta\dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + \delta\dot{\varphi}^3$ η μη γραμμική ροπή απόσβεσης και οι 2μ , β , δ ο γραμμικός, τετραγωνικός και κυβικός συντελεστής απόσβεσης αντίστοιχα.
- ω_0 η ιδιοσυχνότητα
- GM το μετακεντρικό ύψος

Στη συνέχεια διατύπωσαν και την μη γραμμική εξίσωση διατοιχισμού της οποίας όλοι οι όροι είναι εκφρασμένοι μέσω της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού.

$$\ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_0^2 \frac{GZ(\varphi)}{GM} = \omega_0^2 \alpha_{eff}(t) \quad \text{Model "AbsN"} \quad (2.1.2)$$

Κατόπιν γραμμικοποίησης του όρου επαναφοράς της εξίσωσης (2.1.1) , παρέθεσαν την ακόλουθη εξίσωση κίνησης η οποία ισχύει για μικρές γωνίες απόλυτης γωνίας διατοιχισμού.

$$\ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_0^2 \varphi = \omega_0^2 \alpha_{eff}(t) \quad \text{Model "L"} \quad (2.1.3)$$

Μια εμφανής διαφορά μεταξύ των μοντελοποιήσεων ‘‘AbsN’’, ‘‘RelN’’ και ‘‘L’’ που επιχείρησαν οι συγγραφείς και της αντίστοιχης του παρόντος έργου είναι η χρήση μη γραμμικής απόσβεσης ακόμη και στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς, τη στιγμή που κατά τη γραμμική μοντελοποίηση, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, έχει χρησιμοποιηθεί ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης. Μία ακόμη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι οι δύο ερευνητές δεν έχουν λάβει υπόψη την επίδραση του ανέμου κατά την μελέτη τους. Ακόμη, τόνισαν ότι με τη μοντελοποίηση ‘‘RelN’’ υπάρχει περίπτωση εμφάνισης υποαρμονικής είτε υπεραρμονικής συμπεριφοράς λόγω της πολυχρωματικής διέγερσης, που απαρτίζεται από πολλούς διαφορετικούς κυματισμούς και κατά συνέπεια από διαφορετικές συχνότητες διέγερσης, με την ταυτόχρονη εμφάνιση μιας «μίξης συχνοτήτων» κατά την μοντελοποίηση με όρισμα του μοχλοβραχίονα επαναφοράς τη σχετική γωνία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας έμμεσης συχνότητας απόκρισης που θα βρίσκεται κοντά στην ιδιοσυχνότητα έχοντας παράλληλα ως διέγερση κυματισμούς των οποίων η συχνότητα απέχει αρκετά από την τελευταία. Επίσης, συνέκριναν την επίδραση των τριών διαφορετικών μοντελοποιήσεων, ‘‘RelN’’, ‘‘AbsN’’, ‘‘L’’ με δι-χρωματική διέγερση στην απόκριση και κατέληξαν ότι διατοιχιστική κίνηση μέσω του μοντέλου ‘‘RelN’’ παρουσιάστηκε αρκετά διαφορετική σε σχέση με την αντίστοιχη των λοιπών δύο, μέσω των οποίων, παρεμπιπτόντως, το πλοίο είχε πανομοιότυπη ταλαντωτική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση ‘‘RelN’’ έδωσε υψηλότερα επίπεδα τιμών απόκρισης σε σχέση με τις άλλες δύο μοντελοποιήσεις. Τέλος, στα πλαίσια των συγκρίσεων και αναλύσεων εξήχθησαν σχετικά πορίσματα και αποτελέσματα, τα οποία, μεταξύ άλλων, είναι η διαστρέβλωση του μετακεντρικού ύψους από την ένταξη της σχετικής γωνίας στον όρο επαναφοράς, και κατ’επέκταση από την εισαγωγή της επιδρώσας κλίσης κυματισμού, στα πλαίσια μοντελοποίησης ‘‘RelN’’.

Την επίδραση τόσο της μη γραμμικής απόσβεσης όσο και του εξίσου μη γραμμικού μοχλοβραχίονα επαναφοράς μελέτησε ο M.Taylan [9]. Η μη γραμμική διαφορική εξίσωση διατοιχισμού, βάσει της σχετικής γωνίας, που διατύπωσε είναι η ακόλουθη :

$$(I_{xx} + \delta I_{xx})\ddot{\phi} + B(\phi, \dot{\phi}) + \Delta GZ(\phi) = \omega^2 k a_m \cos(\omega t) \quad (2.1.4)$$

Εκφράζοντας το μοχλοβραχίονα επαναφοράς ως ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού, μελέτησε και συνέκρινε την επίδραση τριών διαφορετικών μοντελοποιήσεων της μη γραμμικής απόσβεσης $B(\phi, \dot{\phi})$ στο πλάτος μόνιμης απόκρισης διατοιχισμού ϕ_a σε ακόλουθους τύπους πλοίου, tanker, bulk carrier, ro-ro cargo, ro-ro passenger. Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις διαφορετικές μοντελοποιήσεις-εκφράσεις του όρου απόσβεσης ήταν οι :

$$B1(\dot{\phi}) = B_L \dot{\phi} + B_N \dot{\phi} |\dot{\phi}| \quad (2.1.5)$$

$$B2(\phi, \dot{\phi}) = B_L \dot{\phi} + B_N \phi^2 \dot{\phi} \quad (2.1.6)$$

$$B3(\dot{\phi}) = B_L \dot{\phi} + B_N \dot{\phi}^3 \quad (2.1.7)$$

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η καμπύλη της μόνιμης απόκρισης ήταν η ίδια υπό την επίδραση των τριών παραπάνω εκφράσεων της απόσβεσης, εκτός από την περιοχή των συχνοτήτων γύρω από τη μέγιστη τιμή της. Τη στιγμή όπου μέσω της χρήσης των $B1(\dot{\phi})$ και $B3(\dot{\phi})$ επιτεύχθηκαν πανομοιότυπα αποτελέσματα όσον αφορά στις μέγιστες τιμές κατά την μόνιμη απόκριση, αντιθέτως η έκφραση της ροπής απόσβεσης μέσω της εξίσωσης (2.1.6) οδήγησε στη λήψη μεγαλύτερων τιμών γωνιών διατοιχισμού. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη διαφορά μεταξύ των μεγίστων πλατών διατοιχισμού κατά τη μόνιμη απόκριση, τα οποία προέκυψαν αφενός μέσω των απόσβεσεων $B1(\dot{\phi})$, $B3(\dot{\phi})$, αφετέρου μέσω της $B2(\phi, \dot{\phi})$, βρέθηκε 74% , αντιστοιχώντας στον τύπο πλοίου bulk carrier, ενώ η ελάχιστη εντοπίστηκε ίση με 15%, αντιστοιχώντας στο ro-ro passenger. Κατόπιν, πραγματοποιώντας παρόμοιο εγχείρημα, μόνο που στην προκειμένη περίπτωση αφού μοντελοποίησε την απόσβεση μέσω της έκφρασης $B1(\dot{\phi})$, αξιολόγησε και ταυτοχρόνως συνέκρινε την επίδραση του κυβικού μοχλοβραχίονα επαναφοράς (cubic righting arm) καθώς και του αντίστοιχου πολυωνύμου του 5^{ου} βαθμού (quantic righting arm) πάνω στη μόνιμη απόκριση του πλοίου. Η πολυωνυμική αναπάρασταση 5^{ου} βαθμού προσεγγίζει με περισσότερη ακρίβεια, από εκείνη του 3^{ου} βαθμού , την πραγματική μορφή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς. Έτσι, και στις τέσσερις περιπτώσεις το πλάτος της μόνιμης απόκρισης, κυρίως οι μέγιστες τιμές του αντιστοιχώντας κορυφή της καμπύλης απόκρισης, υπολογισμένο με όρο επαναφοράς 5^{ου} βαθμού ήταν μειωμένο σε σχέση με το συναφές που προκύπτει μέσω του κυβικού μοχλοβραχίονα. Πιο συγκεκριμένα, στο tanker εντοπίστηκε η μέγιστη διαφορά στην περιοχή των μεγαλύτερων πλατών μόνιμης απόκρισης, όντας ίση με 56%. Επίσης υψηλή ήταν και στα πλοία ro-ro cargo και ro-ro passenger, 40% και 24% αντίστοιχα. Στο bulk carrier δεν αναδείχθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων μοντελοποίησης της επαναφοράς του συστήματος. Τέλος, κατέληξε πως αντίθετα της περίπτωσης όπου μεταβαλλόταν η μορφή της απόσβεσης, η αλλαγή της έκφρασης του όρου επαναφοράς προκαλεί αλλαγές στη μορφολογία της καμπύλης μόνιμης απόκρισης διαφοροποιώντας τα διαστήματα υστέρησης και τις κυρτώσεις της. Αυτό, συγκεκριμένα, εντοπίζεται στην περίπτωση του ro-ro cargo.

Εν συνεχεία, από τους πρώτους εκ των οποίων διερεύνησαν το θέμα της πιθανοτικής μελέτης κατά το μη γραμμικό διατοιχισμό ήταν οι Belenky V., Degtyarev A. και Bookhanovsky A. [1], με το άρθρο τους να δημοσιεύεται το 1996. Πιο συγκεκριμένα, , σε πρώτη φάση οι συγγραφείς του μοντελοποίησαν τους τυχαίους κυματισμούς και ακολούθως, αφού κατέγραψαν τις συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις διατοιχισμού, οι οποίες ήταν εκφρασμένες μέσω της σχετικής γωνίας διατοιχισμού, και της συναφούς κατακόρυφης του κέντρου βάρους(heave), εφάρμοσαν το μοντέλο “autoregression model of sea waves- ARM”, υποθέτοντας στοχαστική

διαδικασία Markov (Markov process)¹ στο συνεχή χρόνο. Έπειτα, ειδικεύοντας στην εξίσωση του διατοιχισμού, με γραμμική απόσβεση αλλά με μη γραμμικό, κυβικό, μοχλοβραχίονα επαναφοράς, χωρίς ωστόσο, την επενέργεια του ανέμου, προβαίνουν στο στάδιο μοντελοποίησής της και στη συνέχεια μέσω στοχαστικής ανάλυσης εντοπίζουν τις διαφορές των ιστογραμμάτων του μη γραμμικού και του γραμμικού συστήματος, αναλύοντας την επίδραση του μη γραμμικού μοχλοβραχίονα επαναφορά στην απόκριση του συστήματος και στην στατιστική ανάλυση των δεδομένων γενικότερα. Αυτό συνέδραμε αποφασιστικά και στο εγχείρημα της στατιστικής μελέτης του παρόντος έργου.

Επιπροσθέτως, παρόμοιο έργο επιχειρήθηκε λίγο αργότερα, το 2012, από τον Zhiyong Su [11], ο οποίος προσπάθησε να αποφανθεί για τη μη γραμμική απόκριση και την ευστάθεια σε διατοιχισμό εξαιτίας επίδρασης τυχαίων κυματισμών χρησιμοποιώντας στοχαστικά δυναμικά συστήματα. Ειδικότερα, αφού ανέλυσε τις στοχαστικές διεργασίες Markov καθώς και τη διαδικασία Wiener (Brownian motion) και κατέγραψε τη σχέση μεταξύ της PDF και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, παρουσίασε την εξίσωση κίνησης διατοιχισμού, χωρίς να υπογραμμίζει ωστόσο ως προς ποια γωνία, σχετική ή απόλυτη, είναι εκφρασμένη και την μοντελοποιεί στο χώρο κατάστασης. Μετέπειτα, αφού εφάρμοσε την τεχνική «φιλτραρίσματος», χρησιμοποιώντας παράλληλα τη συνάρτηση $W(t)$ ούσα ο Γκαουσιανός λευκός θόρυβος (Gaussian white noise) μηδενικής μέσης τιμής, που αποτελεί τη διέγερση του στοχαστικού δυναμικού συστήματος, μοντελοποίησε, εν τέλει, τη ροπή διέγερσης του συστήματος. Κατόπιν, εφαρμόζοντας τη μέθοδο “Cumulant Neglect Closure Method” στα στοχαστικά δυναμικά συστήματα κατέληξε σε σημαντικά πιθανοτικά/στατιστικά αποτελέσματα για ταλαντωτές π.χ. τύπου Duffing. Παρόμοια ανάλυση πραγματοποιήθηκε, το 2015, και από τους Wei Chai, Arvid Naess και Bernt J. Leira [12], κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε δεύτερης τάξης γραμμικό φίλτρο μέσω της συνάρτησης λευκού θορύβου $W(t)$ της στοχαστικής διεργασίας Wiener μηδενικής μέσης τιμής για την μοντελοποίηση της εξίσωσης «φιλτραρίσματος», εκφρασμένη στο χώρο κατάστασης. Συνδυάζοντάς την με την, ομοίως εκφρασμένη στο χώρο κατάστασης, διαφορική εξίσωση διατοιχισμού, μοντελοποιείται τελικώς το δυναμικό σύστημα κάτω από την επίδραση των τυχαίων κυματισμών.

Οι συγγραφείς, όμως, οι οποίοι κινήθηκαν πιο κοντά στο αναλυθέν στα πλαίσια του παρόντος έργου, και προσπάθησαν να μοντελοποιήσουν τη διαφορική εξίσωση κίνησης που διέπει το σενάριο “Deadship Condition” και να αποφανθούν για την άθικτη ευστάθεια του πλοίου ήταν οι Ju-hyuck Choi, Jørgen Juncher Jensen, Hans Otto Kristensen, Ulrik Dam Nielsen και Henrik Erichsen [3]. Μοντελοποιώντας, αρχικά, τις ροπές ανέμου και κυματισμών, και χρησιμοποιώντας, κατόπιν, το δείκτη αξιοπιστίας β (reliability index), όρισαν τη πιθανότητα υπέρβασης της οριακής γωνίας φ_0 ως την τιμή της Γκαουσιανής PDF με όρισμα “ $-\beta$ ” και κατόπιν διατύπωσαν την πιθανότητα υπέρβασης κατά τη διάρκεια χρόνου T . Τα παραπάνω αφορούν τη μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση FORM (First Order Reliability Method). Αντίστοιχες πιθανότητες υπολογίστηκαν και κατά τις προσομοιώσεις Monte-Carlo (MCS) και κατόπιν εντοπίστηκαν διαφορές κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντελοποιήσεων. Στη συνέχεια, αφού έγιναν αναφορές τόσο για το κρίσιμο κύμα (Critical Wave) όσο και για τα σενάρια ανέμου, οι συγγραφείς ανέδειξαν την πιο πιθανή ταλαντωτική συμπεριφορά του πλοίου σε σχέση με το χρόνο υπό την επίδραση του αντίστοιχο πιο συχνής εμφάνισης σεναρίου διέγερσης ανέμου και κυματισμών. Τέλος, προέκυψαν σχετικά αποτελέσματα εφαρμόζοντας τις δύο αντιτιθέμενες μοντελοποιήσεις, FORM και Monte-Carlo Simulations, πάνω σε ένα μικρό ferry.

¹Markov Stochastic Process: $\theta(t) = \Phi\theta(t-1) + \varepsilon(t)$, όπου $\theta(t)$ η τιμή πραγματοποίησης της στοχαστικής διαδικασίας, Φ ένας συντελεστής συσχετιζόμενος με τη χρονοϊστορία και $\varepsilon(t)$ ο στοχαστικός λευκός θόρυβος με μέση τιμή μηδέν.

Επίσης, χρήσιμη για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας κρίθηκε η συμβολή της διδακτορικής διατριβής της Adriana Oliva Remola [10] πάνω στους συντελεστές απόσβεσης. Ύστερα της ανάλυσεως που προηγήθηκε στα περισσότερα κεφάλαια του διδακτορικού της αφορώντας στην επίδραση της απόσβεσης στα επίπεδα απόκρισης του πλοίου καθώς και στην εύρεση των αντίστοιχων συντελεστών της (ενν. απόσβεσης) στα πειράματα roll decay tests, internally excited roll tests-IERT και externally excited roll tests, στο εδάφιο 6.4 μελετήθηκε η δράση τους πάνω στην άθικτη ευστάθεια τόσο στα πλαίσια της μοντελοποίησης τόσο του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 1 Deadship Condition failure mode”-“Weather Criterion” όσο και του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”. Ειδικότερα, η συγγραφέας συνέκρινε την επίδραση των όρων απόσβεσης, συγκεκριμένα γραμμικού, τετραγωνικού και κυβικού συντελεστή, πάνω στα φάσματα απόκρισης, τα οποία ήταν εκφρασμένα τόσο από την απόλυτη γωνία και όσο και από τη σχετική γωνία διατοιχισμού, έχοντας προκύψει αφενός από internally excited roll tests-IERT, αφετέρου από πειράματα ελεύθερου διατοιχισμού (roll decay tests). Κατόπιν, αναπαραστάθηκε διαγραμματικά από τη μία τόσο ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής του εν λόγω κριτηρίου όσο και η συνδεδεμένη πρωτογενώς τυπική απόκλιση της απόλυτης ταχύτητας διατοιχισμού και από την άλλη η μέση συχνότητα ανατροπής $\lambda_{fail} = 1/\bar{T}_{fail}$ και η πιθανότητα ανατροπής Cs_i (βραχυπρόθεσμος δείκτης ευπάθειας εκάστοτε σεναρίου διέγερσης) συναρτήσει του σημαντικού ύψους κύματος H_s και της μέσης περιόδου κυματισμών T_z για τους δύο ακόλουθους τρόπους εύρεσης των συντελεστών απόσβεσης, roll decay tests και IERT. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος IERT υποεκτιμά το δείκτη ευπάθειας του κριτηρίου, καθώς προέκυψαν μεγάλες διαφορές σε σχέση με τις συναφείς τιμές οι οποίες υπολογίστηκαν από τα πειράματα ελεύθερου διατοιχισμού (roll decay tests). Τέλος, όσον αφορά στη διδακτορική διατριβή της Adriana Oliva Remola, σημαντική ήταν η συνεισφορά του Παραρτήματος Ε, όπου αναλύει το φυσικό υπόβαθρο και τις βασικές πτυχές του κριτηρίου δεύτερης γενιάς Level 2 καθώς και το υπόβαθρο του δείκτη της πιθανότητας υπέρβασης καθορισμένης, μέσω φόρτωσης και διέγερσης, υψηλής γωνίας Cs_i και κατ’ επέκταση του δείκτη ευπάθειας C του συναφούς κριτηρίου.

Σημειώνεται τέλος ότι αξιοσημείωτη ήταν η συμβολή στην παρούσα εργασία του βιβλίου του καθηγητή Ε.Μ.Π. Κ. Αθανασούλη [15] «*Θεωρία Πιθανοτήτων & Στατιστική - Εφαρμογές στο Θαλάσσιο Περιβάλλον*» για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων, την ανάπτυξη Μοντέλων Τυχαίας Φάσης καθώς και τη χρήση χρονομεταβαλλόμενων τυχαίων συναρτήσεων.

Σημειώνεται ακόμη ότι, μέσω της εξίσωσης διατοιχισμού που καταγράφεται στο Κεφάλαιο 8 του βιβλίου «*Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου*» του καθηγητή Ε.Μ.Π. Κ.Σπύρου[16], υλοποιήθηκε η διαδικασία επικύρωσης της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού που χρησιμοποιείται στο παρόν έργο (Παράρτημα Α).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη εργασία δεν αποτελεί συνέχεια είτε μετεξέλιξη κάποιου άλλου έργου, καθώς αποτελεί ένα καινούριο πρόβλημα στο προσκήνιο των θεμάτων ευστάθειας. Ταυτόχρονα, οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν προς εξαγωγή αποτελεσμάτων και σχετικών πορισμάτων είναι μοναδικές κατά το στάδιο εκπόνησής της και δεν έχουν υιοθετηθεί από λοιπά συναφή έργα. Ωστόσο, όλες οι προαναφερόμενες βιβλιογραφικές πηγές καθίστανται άκρως σημαντικές και χρήσιμες, με μερικές από αυτές να αποτελούν μάλιστα και τον ακρογωνιαίο λίθο για την παραγωγή της και τελικά την περάτωσή της.

2.2 Στόχοι Ερευνητικού Έργου

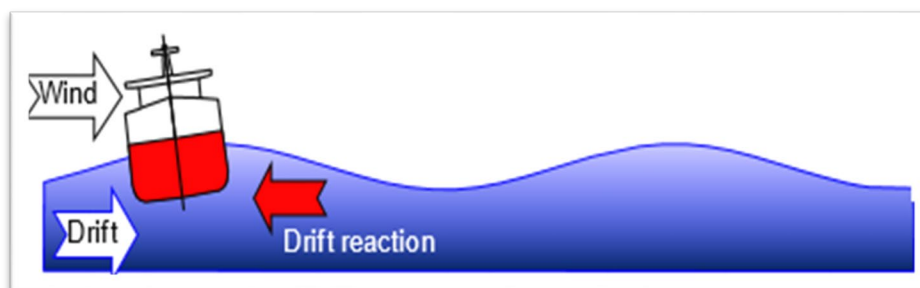
Στην δεδομένη εργασία πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode” με σκοπό τον υπολογισμό του πιθανοτικού δείκτη C , δηλωτικού της ευπάθειας (vulnerability) και της επιβίωσης του πλοίου. Ο υπολογισμός του

έλαβε χώρα αφού λήφθηκαν υπόψιν όλα τα σενάρια διέγερσης, κυματισμοί και άνεμος, που δύναται να βρεθεί, τα οποία λαμβάνονται από το Wave Scatter Table (IMO- SDC 7/WP.6, 2020)[8]. Κατόπιν, με τη διενέργεια πληθώρας προσομοιώσεων της γραμμικοποιημένης αλλά και της μη γραμμικής διαφορικής εξίσωσης διατοιχισμού εξήχθησαν τα δεδομένα και επιχειρήθηκε στατιστική ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, απώτερος στόχος αυτού του εγχειρήματος είναι ο εντοπισμός και η ανάδειξη διαφορών μεταξύ των δύο μελετούμενων μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του ισοδύναμου γραμμικοποιημένου συντελεστή απόσβεσης έναντι της μη γραμμικής και ταυτοχρόνως η γραμμική έκφραση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς έναντι της μη γραμμικής έκφρασής του, αμελώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ακριβή μορφή του, αποτελούν βασικές υποθέσεις και απλουστεύσεις του εξεταζόμενου κριτηρίου. Συνεπώς, εφόσον δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο ο, εν γένει, μη γραμμικός μοχλοβραχίονας όσο και η μη γραμμική απόσβεση για τη μοντελοποίηση του κριτηρίου και κατ' επέκταση για τον υπολογισμό του πιθανοτικού δείκτη του κριτηρίου, μπορεί εύκολα να καταστεί σαφές ότι η κατάσταση που μελετάται μέσω του κριτηρίου κάθε άλλο παρά ρεαλιστική είναι. Έτσι, γεννώνται ερωτήματα αλλά και αμφισβητήσεις όχι μόνο για την ορθολογικότητα και την ακρίβεια του πιθανοτικού δείκτη C αλλά και για το ποσοστό επιτυχίας πρόβλεψης των γωνιών διατοιχισμού, κυριώς των υψηλών, που προκύπτουν μέσω της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης. Συνοπτικά, λοιπόν, η στατιστική ανάλυση υλοποιήθηκε με σκοπό να αξιολογηθούν οι γραμμικοποιήσεις των όρων απόσβεσης και επαναφοράς, αποτελώντας ταυτόχρονα τους πυλώνες γύρω από τη μοντελοποίηση του εν λόγω κριτηρίου.

Κεφάλαιο 3: Κριτήριο δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”

3.1 Φυσικό Υπόβαθρο

Το σενάριο “Deadship Condition” υποθέτει ότι το πλοίο, έχοντας χάσει την ισχύ πρόωσής του, καθίσταται έρμαιο εγκάρσιας κατευθύνσεως κυματισμών και ριπών ανέμου για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια έκθεσης ($T_{exp}=1h$). Η υδροδυναμική δύναμη Froude - Krylov από τον προσπίπτοντα κυματισμό, που προκύπτει από την ολοκλήρωση των πιέσεων στη γάστρα του πλοίου, έχει μια αντίδραση αντίθετης κατευθύνσεως. Αυτή η υδροδυναμική αντίδραση μαζί με την αεροδυναμική δύναμη, η οποία με τη σειρά της λαμβάνεται μέσω της ολοκλήρωσης των, χρονομεταβαλλόμενων λόγω ριπών, πιέσεων ανέμου επί της προβεβλημένης πλευρικής επιφάνειας του πλοίου, συνιστούν ένα ζεύγος δυνάμεων που είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη κλίσεως και για τη διατοιχιστική του συμπεριφορά. Έτσι, το πλοίο υποβάλλεται σε διατοιχισμό υπό την ταυτόχρονη συνδυασμένη επενέργεια κυματισμών και ριπών ανέμου.



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση του σεναρίου “Deadship Condition failure mode”

Βασικές προϋποθέσεις του δεδομένου κριτηρίου είναι οι ακόλουθες :

- Το πλοίο θεωρείται πως εκτίθεται στη συνδυασμένη επίδραση τυρβώδη ανέμου και τυχαίων κυματισμών για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.
- Άνεμοι και κυματισμοί θεωρείται ότι επενεργούν κατά την ίδια κατεύθυνση.
- Θεωρείται ότι ισχύουν οι συνθήκες για βαθύ νερό, δεδομένου πως το βάθος της θάλασσας υποτίθεται πως είναι άπειρο.
- Ακόμη, υιοθετείται η θεώρηση ότι το πλοίο παραμένει σε διεύθυνση κάθετη ως προς τη διεύθυνση διάδοσης ανέμων και κυματισμών.

Σκοπός του κριτηρίου είναι ο υπολογισμός του μακροπρόθεσμου(long-term) πιθανοτικού δείκτη ευπάθειας C κάτω από τη συνδυασμένη επίδραση ανέμου και κυματισμών. Το πλοίο κρίνεται ευσταθές και όχι ευπαθές(non-vulnerable) στην κατάσταση “Deadship Condition failure mode” εάν ισχύει :

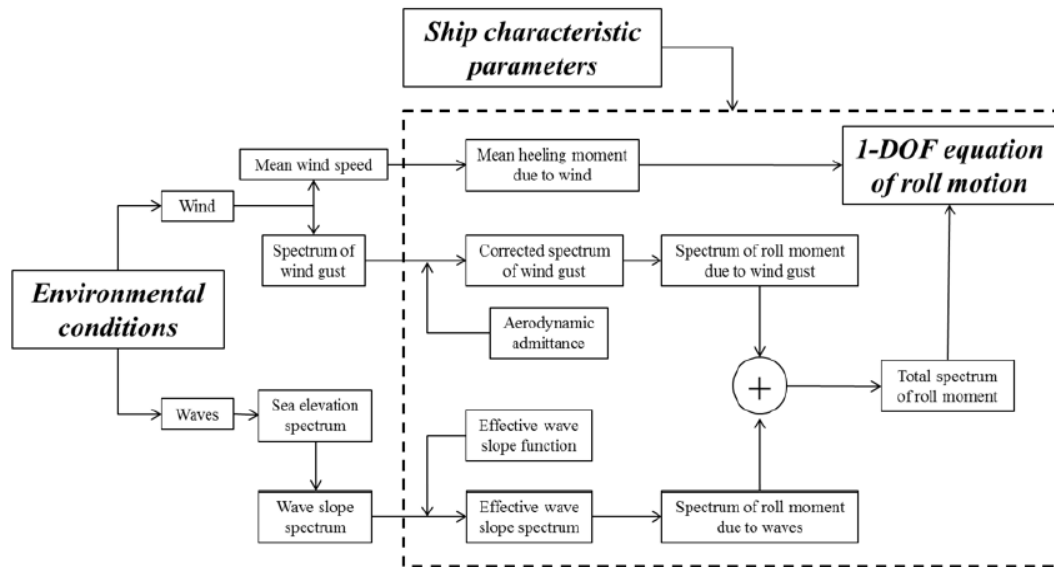
$$C \leq R_{DS0} ,$$

όπου:

- $R_{DS0} = 0.06$ η οριακή τιμή του κριτηρίου
- $C = \sum_{i=1}^N W_i(H_s, T_z) \cdot C_{s,i}$ ο μακροπρόθεσμος(long-term) πιθανοτικός δείκτης ευπάθειας του πλοίου.

Ο όρος $W_i(H_s, T_z)$ είναι ένας συντελεστής βαρύτητας που λαμβάνεται από το Wave Scatter Table (IACS, 2011) [4] και αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης της περιβαλλοντικής κατάστασης «i», η οποία αντιπροσωπεύεται από ένα δεδομένο σημαντικό ύψος κύματος H_s και συγκεκριμένη μέση περίοδο ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας T_z , και N είναι ο αριθμός των συνολικών περιβαλλοντικών σεναρίων διέγερσης στα οποία εκτίθεται το πλοίο.

Ο όρος $C_{s,i}$ είναι ο δείκτης ευπάθειας του πλοίου υπό την επίδραση του περιβαλλοντικού σεναρίου διέγερσης «i» και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα υπέρβασης μιας καθορισμένης υψηλής γωνίας, νοούμενη ταυτοχρόνως ως πιθανότητα απώλειας ευστάθειας.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της μοντελοποίησης του κριτηρίου “Level 2 Deadship Condition failure mode” (IMO- SDC 7/WP.6, 2020) [8]

3.2 Γραμμικοποιημένο και Μη Γραμμικό Μοντέλο

Για τον υπολογισμό του δείκτη ευπάθειας C του εν λόγω κριτηρίου δεύτερης γενιάς έχουν γραμμικοποιηθεί οι όροι επαναφοράς και απόσβεσης. Έτσι, κρίνεται αναγκαίο στο παρόν εδάφιο να διατυπωθούν τόσο η μοντελοποίηση του γραμμικοποιημένου, που διέπει το παρόν κριτήριο, όσο και μοντελοποίηση του μη γραμμικού συστήματος, από το οποίο μέσω γραμμικοποιήσεων ανακύπτει το πρώτο. Επίσης, επρόκειτο να αναλυθούν τα πιο σημαντικά μεγέθη των δεδομένων μοντελοποιήσεων.

Καταρχάς, επισημαίνεται πως τόσο η επίδραση της επιδρώσας κλίσης του κυματισμού όσο και η χρονικώς μεταβαλλόμενη συνιστώσα ταχύτητας ανέμου περιγράφονται ως σειρές Fourier όπως ακολούθως:

Επιδρώσα Κλίση Κυματισμών :

$$a_{eff} = \sum_{i=1}^{N_1} A_i \kappa_i r(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varepsilon_{i\kappa}) \quad \text{Μοντέλο Τυχαίας Φάσης Κυματισμών} \quad (3.2.1)$$

όπου :

- $r(\omega_i)$ η συνάρτηση επιδρώσας κλίσης κύματος (effective wave slope function) η οποία έχει υπολογιστεί βάσει της μεθοδολογίας που αναγράφεται στο Παράρτημα 3 των κριτηρίων

δεύτερης γενιάς και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 8.2 “Standard methodology for the estimation of effective wave slope function” (IMO - SDC 8/5/Add.2- Appendices, 2021) [5]. Ωστόσο, η μέθοδος υπολογισμού της αναγράφεται και στο Παράρτημα Β της παρούσας εργασίας.

- κ_i ο κυματάρθρωτος που σε συνθήκες βαθύ νερού ισούται, από τη εξίσωση διασποράς, με $\kappa_i = \frac{\omega_i^2}{g}$.
- $\varepsilon_{i\kappa}$ η διαφορά φάσης των αρμονικών συνιστωσών-κυματισμών η οποία ακολουθεί διακριτή ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,2\pi)$. Είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ισόνομα κατανεμημένες.
- N_1 το πλήθος των κυματισμών που θα συναντήσει το πλοίο σε χρόνο T_{exposure} και έχει προκύψει μέσω διακριτοποίησης του φάσματος κυματισμών Bretschneider (Bretschneider Wave Spectrum) με σταθερό βήμα διακριτοποίησης $d\omega = \frac{2\pi}{T_{\text{exp}}}$.
- A_i το πλάτος του κυματισμού που αντιστοιχεί στη συχνότητα ω_i και έχει προκύψει εξ’ ορισμού του φάσματος ως εξής : $A_i = \sqrt{2 \cdot S_{zz}(\omega_i) \cdot d\omega}$.

Χρονικά Μεταβαλλόμενη Συνιστώσα Ταχύτητας Ανέμου :

$$u_{fluct.} = \sum_{i=1}^{N_2} u_i \cos(f_i t + \varepsilon_{i_a}), \quad \text{Μοντέλο Τυχαίας Φάσης Ριπών Ανέμου} \quad (3.2.2)$$

όπου :

- ε_{i_a} : η διαφορά φάσης των συνιστωσών ριπών ανέμου η οποία ακολουθεί διακριτή ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0,2\pi)$. Είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους καθώς και ισόνομα κατανεμημένες.
- N_2 : το πλήθος των χρονικά μεταβαλλόμενων συνιστωσών ανέμου που θα συναντήσει το πλοίο σε χρόνο T_{exposure} και έχει προκύψει μέσω διακριτοποίησης του φάσματος ριπής Davenport (Davenport Gustiness Spectrum) με σταθερό βήμα διακριτοποίησης $df = \frac{2\pi}{T_{\text{exp}}}$.
- u_i το πλάτος της «i» χρονικά μεταβαλλόμενης, γύρω από τη μέση τιμή, συνιστώσας ταχύτητας ανέμου που αντιστοιχεί στη συχνότητα f_i και έχει προκύψει εξ’ ορισμού του φάσματος ως εξής : $u_i = \sqrt{2 \cdot S_{Dav}(f_i) \cdot df}$.

Το κοινό σημείο των δύο μοντέλων είναι η ροπή διέγερσης του ανέμου. Η μέση ροπή κλίσης ανέμου, $\bar{M}_{wind,tot}$, που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα ανέμου, και η στιγμιαία χρονομεταβαλλόμενη ροπή λόγω ριπών, $\delta M_{wind,tot}(t)$, καθορίζονται από το πεδίο πιέσεων $q_{tot}(t)$ της συνολικής αστρέβλωτης ταχύτητας ανέμου, το οποίο ισούται με :

$$q_{tot}(t) = \frac{1}{2} \rho_{air} (\bar{U}_w + u_{fluct.}(t))^2 = \frac{1}{2} \rho_{air} (\bar{U}_w^2 + 2u_{fluct.}(t)\bar{U}_w + u_{fluct.}(t)^2) \quad (3.2.3)$$

όπου $\rho_{air} = 1.222 \frac{kg}{m^3}$ η πυκνότητα του αέρα και $u_{fluct.}(t)$ η χρονικώς μεταβαλλόμενη συνιστώσα ταχύτητας ανέμου.

Παρεμβάλλεται εδώ ότι η μέση ταχύτητα ανέμου προκύπτει ντετερμινιστικά, συσχετιζόμενη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , από τον ακόλουθο τύπο :

$$\overline{U_w} = \left(\frac{H_s}{0.06717} \right)^{2/3} \quad (3.2.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η οι χρονομεταβαλλόμενες ταχύτητες του πεδίου ανέμου λαμβάνουν σχετικά μικρές τιμές, μπορεί να αμεληθεί χωρίς βλάβης της γενικότητας ο όρος $u_{fluct.}(t)^2$. Έτσι, η εξίσωση (3.2.3) τροποποιείται καταλλήλως και γίνεται :

$$\begin{cases} q_{tot}(t) = \bar{q} + \delta q(t) \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \\ \bar{q} = \frac{1}{2} \rho_{air} \overline{U_w}^2 \\ \delta q(t) = \rho_{air} u_{fluct.}(t) \overline{U_w} \end{cases} \quad (3.2.5)$$

Η στιγμιαία οριζόντια προκαλούμενη από το πεδίο πιέσεων του ανέμου δύναμη είναι ίση με :

$$\begin{cases} F_{wind,tot}(t) = q_{tot}(t) C_{whm} A_L = \bar{F}_{wind,tot} + \delta F_{wind,tot}(t) [N], \\ \bar{F}_{wind,tot} = \frac{1}{2} \rho_{air} \overline{U_w}^2 C_{whm} A_L \\ \delta F_{wind,tot}(t) = \rho_{air} u_{fluct.}(t) C_{whm} A_L \overline{U_w} \end{cases} \quad (3.2.6)$$

όπου $C_{whm} = 1.22$ ο συντελεστής ροπής ανέμου.

Έτσι, η στιγμιαία ολική ροπή κλίσης ανέμου προκύπτει με το πολλαπλασιασμό της ολικής στιγμιαίας οριζόντιας δύναμης ανέμου με το μοχλοβραχίονα Z , που ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του αεροδυναμικού κέντρου ασκήσεως της $F_{wind,tot}(t)$ στην επιφάνεια A_L ($A_{WINDAGE}$) και του υδροδυναμικού κέντρου ασκήσεως της επαγόμενης υδροδυναμικής δύναμης τριβής (drift), η οποία είναι αντίθετη της $F_{wind,tot}(t)$. Επειδή δεν υπάρχουν στοιχεία εύρεσης του δεδομένου κέντρου, η απόσταση Z έχει υπολογιστεί από τον τύπο $Z = Z_{windage} - d/2$, όπου d το βύθισμα και $Z_{windage}$ η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του αεροδυναμικού κέντρου ασκήσεως της $F_{wind,tot}(t)$ και τρόπιδας πλοίου, ο οποίος έχει προταθεί και από τη μεθοδολογία του Κριτηρίου Καιρού (Weather Criterion, IMO 2009b,2006) [6].

Επομένως, η συνολική ροπή ανέμου είναι ίση με :

$$\begin{aligned} M_{wind,tot}(t) &= \frac{1}{2} \rho_{air} \overline{U_w}^2 C_{whm} A_L Z + \rho_{air} C_{whm} u_{fluct.}(t) \overline{U_w} A_L Z \\ &= \bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t) [N m] \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

Ο μοχλοβραχίονας (μέσης) ροπής ανέμου ισούται με :

$$\bar{l}_{wind} = \frac{\bar{M}_{wind,tot}}{W} [m] \quad (3.2.8)$$

όπου $W = g * \Delta [N]$ το βάρος του πλοίου.

Υπό την επίδραση της μέσης ροπής ανέμου, το πλοίο λαμβάνει εγκάρσια κλίση φ_s , η οποία αποτελεί ευσταθές σημείο ισορροπίας και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$WGZ(\varphi_s) = \bar{M}_{wind,tot} \Rightarrow GZ(\varphi_s) = \frac{\bar{M}_{wind,tot}}{W} = \bar{l}_{wind} \quad (3.2.9)$$

Λόγω αυτής της νέας θέσης ισορροπίας, ο μοχλοβραχίονας χαρακτηρίζεται από διαφορετική κλίση $GM_{res} = \frac{dGZ_{res}}{d\varphi}(\varphi_s)$ και συνεπώς ανακύπτει και ελαφρώς διαφοροποιημένη ιδιοσυχνότητα $\omega_{o,e} = \sqrt{\frac{WGM_{res}}{I_{xx} + \delta I_{xx}}}$ και συνδέεται με την αρχική, χωρίς την διέγερση του ανέμου, ιδιοσυχνότητα με τη σχέση :

$$\omega_{o,e} = \omega_o \sqrt{\frac{GM_{res}}{GM}} \quad \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (3.2.10)$$

Να σημειωθεί ότι αμφότερα στις δύο μοντελοποίησης έχει χρησιμοποιηθεί η απόλυτη γωνία διατοιγισμού φ (absolute rolling angle) στους όρους απόσβεσης και αδράνειας, ενώ έχει γίνει χρήση της σχετικής γωνίας “ $\varphi - a_{eff}$ ” (relative rolling angle) στο μοχλοβραχίονα επαναφοράς στην περίπτωση της μη γραμμικής μοντελοποίησης.

Στη συνέχεια θα παρατεθούν κάτωθεν οι διαφορικές εξισώσεις διατοιγισμού που διέπουν και τα δύο μοντέλα καθώς και θα αναλυθούν οι όροι επαναφοράς και απόσβεσής τους.

3.2.1 Μη γραμμικό μοντέλο

Πριν διατυπωθεί η μη γραμμική διαφορική εξίσωση, επισημαίνεται ότι χρησιμοποιείται 3^{ου} βαθμού ροπή απόσβεσης, η οποία έχει την ακόλουθη μορφή:

$$M_D = B_1 \dot{\varphi} + B_2 \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + B_3 \dot{\varphi}^3 \quad (3.2.1.1)$$

όπου B_1, B_2, B_3 ο γραμμικός, τετραγωνικός και κυβικός συντελεστής απόσβεσης αντίστοιχα.

Έτσι, η διαφορική εξίσωση διατοιγισμού που διέπει το μη γραμμικό μοντέλο, χωρίς σύζευξη με τις μετατοπίσεις κατά τους άλλους βαθμούς ελευθερίας sway, yaw, heave κ.λ.π, είναι η ακόλουθη :

$$(I_{xx} + \delta I_{xx}) \ddot{\varphi} + B_1 \dot{\varphi} + B_2 \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + B_3 \dot{\varphi}^3 + WGZ(\varphi - a_{eff}(t)) = \bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t) \quad (3.2.1.2)$$

όπου $(I_{xx} + \delta I_{xx})$: η ολική ροπή αδράνειας του πλοίου ως προς το διαμήκη άξονα. Μέρος της αποτελεί και η επιπρόσθετη, υδροδυναμικής φύσεως, ροπή αδράνειας δI_{xx} .

Διαιρώντας με τον όρο $(I_{xx} + \delta I_{xx})$, ο και ανακαλώντας τον ορισμό της ιδιοσυχνότητας από

τη σχέση $\omega_o = \sqrt{\frac{WGM}{I_{xx} + \delta I_{xx}}} \rightarrow \frac{\omega_o^2}{GM} = \frac{W}{I_{xx} + \delta I_{xx}}$, η παραπάνω εξίσωση (3.2.1.2) γίνεται ως εξής:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu \dot{\varphi} + \beta \dot{\varphi} |\dot{\varphi}| + \delta \dot{\varphi}^3 + \frac{\omega_o^2}{GM} GZ(\varphi - a_{eff}) = \frac{\omega_o^2}{WGM} (\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (3.2.1.3)$$

όπου $2\mu = \frac{B_1}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \left[\frac{1}{s} \right]$, $\beta = \frac{B_2}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \left[\frac{1}{rad} \right]$, $\delta = \frac{B_3}{I_{xx} + \delta I_{xx}} \left[\frac{s}{rad^2} \right]$.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές $\mu[1/s]$, $\beta[1/rad]$, $\delta[s/rad^2]$ έχουν υπολογιστεί από τη μέθοδο του Ikeda (“The simplified Ikeda Method”), που αναγράφεται στα Παραρτήματα 3 των κριτηρίων δεύτερης γενιάς του Κεφαλαίου 9.2 και δεν αναλύεται στο παρόν εδάφιο (IMO -

SDC 8/5/Add.2- Appendices, 2021) [5]. Ωστόσο, στο Παράρτημα C της παρούσης εργασίας αναδεικνύεται συνοπτικά η μέθοδος υπολογισμού τους.

3.2.2 Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Η διαφορική εξίσωση, που έχει χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση του “Level 2 Dead Ship Condition failure mode”, έχει προκύψει μέσω γραμμικοποίησης του όρου επαναφοράς, κρατώντας μόνο τους πρωτοτάξιους όρους της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού, και από τη στοχαστική γραμμικοποίηση του όρου απόσβεσης. Αναφέρεται ο όρος στοχαστική διότι ο υπολογισμός του ισοδύναμου γραμμικό συντελεστή αποσβέσεως $\mu_e(\sigma_{\dot{x}})[\frac{1}{s}]$ προδιαθέτει τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού $\sigma_{\dot{x}}[\frac{rad}{s}]$, καθώς είναι συνάρτηση αυτής. Η τελευταία δίνεται από τον τύπο :

$$\sigma_x = \sqrt{\int_0^{\infty} \omega^2 S_x(\omega) d\omega} \quad (3.2.2.1)$$

όπου $S_x(\omega)$ το φάσμα του πλάτους διατοιχιστικής απόκρισης εκφρασμένο από την απόλυτη γωνία διατοιχισμού.

Μέσω στοχαστικής γραμμικοποίησης έχει προκύψει ο εξής τύπος που δίνει τον ισοδύναμο γραμμικό συντελεστή απόσβεσης :

$$\mu_e = \mu + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \beta \sigma_{\dot{x}}(\mu_e) + \frac{3}{2} \delta \sigma_{\dot{x}}(\mu_e)^2 \quad (3.2.2.2)$$

Έτσι, η μη γραμμική διαφορική εξίσωση (3.2.1.3), κατόπιν γραμμικοποίησης του όρου απόσβεσης, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu_e \dot{\varphi} + \frac{\omega_o^2}{GM} GZ(\varphi - a_{eff}) = \frac{\omega_o^2}{WGM} (\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (3.2.2.3)$$

Η διακύμανση x της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού γύρω από τη γωνία ευσταθούς ισορροπίας φ_s ισούται με:

$$x = \varphi - \varphi_s \quad (3.2.2.4)$$

Έτσι, η γραμμικοποίηση του μοχλοβραχίοντα επαναφοράς γύρω από τη γωνία ισορροπίας φ_s , αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης, γίνεται ως εξής :

$$GZ(x + \varphi_s - a_{eff}) \cong GZ(\varphi_s) + GM_{res} \cdot (x - a_{eff}(t)) \quad (3.2.2.5)$$

Επομένως, η (3.2.2.3) λόγω των (3.2.2.4) και (3.2.2.5) γίνεται:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\mu_e \dot{x} + \frac{\omega_o^2}{GM} (GZ(\varphi_s) + GM_{res} \cdot (x - a_{eff}(t))) \\ = \frac{\omega_o^2}{WGM} (\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \end{aligned} \quad (3.2.2.6)$$

Αν αντικατασταθούν οι σχέσεις (3.2.9) και (3.2.10) στην παραπάνω τότε προκύπτει ότι :

$$\begin{aligned} \ddot{x} + 2\mu_e \dot{x} + \omega_{o,e}^2 x \\ = -\frac{\omega_o^2}{GM} \bar{l}_{wind} + \omega_{o,e}^2 a_{eff}(t) + \frac{\omega_o^2}{WGM} (W \bar{l}_{wind} + \delta M_{wind,tot}(t)) \end{aligned} \quad (3.2.2.7)$$

Τελικά, η γραμμικοποιημένη εξίσωση διατοιχισμού ως προς το πλάτος-μεταβολή γύρω από την φ_s της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού, x , έχει την ακόλουθη μορφή :

$$\ddot{x} + 2\mu_e \dot{x} + \omega_{o,e}^2 x = \omega_{o,e}^2 a_{eff}(t) + \frac{\omega_o^2}{WGM} \delta M_{wind,tot}(t) \quad (3.2.2.8)$$

Εναλλακτικά, η γραμμικοποιημένη εξίσωση διατοιχισμού, εκτός από την έκφραση ως συναρτήσει της μεταβολής x της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού γύρω από τη γωνία φ_s , μπορεί να διατυπωθεί και ως προς την απόλυτη γωνία μετρούμενη από την κατακόρυφη/όρθια θέση ως εξής :

$$\ddot{\varphi} + 2\mu_e \dot{\varphi} + \omega_o^2 \varphi = \omega_o^2 a_{eff}(t) + \frac{\omega_o^2}{WGM} M_{wind,tot}(t) \quad (3.2.2.9)$$

Οι (3.2.2.8) και (3.2.2.9)² αποτελούν και τις τελικές μορφές της διαφορικής εξίσωσης του γραμμικοποιημένου μοντέλου από τις οποίες προκύπτει ως λύση η απόλυτη γωνία διατοιχισμού. Για την εξίσωση (3.2.2.8) για κάθε χρονική στιγμή η απόλυτη γωνία διατοιχισμού θα υπολογίζεται από τη σχέση $\varphi = x + \varphi_s$.

3.3 Αναλυτική λύση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού

Στο παρόν εδάφιο θα αναλυθούν τα φάσματα απόκρισης προκύπτοντας μέσω μοντελοποίησης αφενός με την απόλυτη γωνία διατοιχισμού αφετέρου δε με τη σχετική γωνία. Η μοντελοποίηση του φάσματος απόκρισης με την απόλυτη γωνία χρησιμεύει στον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού $\sigma_{\dot{x}}$ και στη συνεπαγόμενη εκτίμηση του ισοδύναμου γραμμικοποιημένου συντελεστή απόσβεσης μ_e . Από την άλλη, ο υπολογισμός του δείκτη ευπάθειας $C_{s,i}$ (short-term vulnerability index) υπό την επίδραση του σεναρίου διέγερσης «i» και κατ' επέκταση του δείκτη C (long-term vulnerability index) βασίζεται στην μοντελοποίηση του φάσματος απόκρισης με τη σχετική γωνία διατοιχισμού.

3.3.1 Μοντελοποίηση με την απόλυτη γωνία διατοιχισμού

Η λύση της εξίσωσης (3.2.2.8) μπορεί να αναλυθεί στην απόκριση λόγω των κυματισμών και στην απόκριση λόγω των ριπών ανέμου υπό την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχες ροπές τους είναι τοπικώς ασυσχέτισες παρόλο που τα φάσματά τους συνδέονται, καθώς το σημαντικό ύψος κύματος προκύπτει ντεντερμινιστικά μέσω της σχέσης (3.2.4) από την μέση ταχύτητα ανέμου. Έτσι,

$$x(t) = x_{waves}(t) + x_{wind}(t) \quad (3.3.1.1)$$

² Στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία επαλήθευσης (Verification) της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού.

Αντικαθιστώντας την (3.3.1.1) στην εξίσωση (3.2.2.8), προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{waves} + 2\mu_e \dot{x}_{waves} + \omega_{o,e}^2 x_{waves} = \omega_{o,e}^2 a_{eff}(t) \\ \ddot{x}_{wind} + 2\mu_e \dot{x}_{wind} + \omega_{o,e}^2 x_{wind} = \frac{\omega_o^2}{WGM} \delta M_{wind,tot}(t) \end{cases} \quad (3.3.1.2)$$

Η ροπή των κυματισμών εκφράζεται ως εξής :

$$M_{waves}(t) = WGM_{res} a_{eff}(t) \quad [Nm] \quad (3.3.1.3)$$

Η (3.3.1.3) μέσω της (3.2.10) γίνεται:

$$M_{waves}(t) = \frac{\omega_{o,e}^2}{\omega_o^2} WGM a_{eff}(t) \quad (3.3.1.4)$$

Λύνοντας την (3.3.1.4) ως προς την επιδρώσα κλίση κυματισμών και αντικαθιστώντας την στην εξίσωση (3.3.1.2), το σύστημα εξισώσεων λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

$$\begin{cases} \ddot{x}_{waves} + 2\mu_e \dot{x}_{waves} + \omega_{o,e}^2 x_{waves} = \frac{\omega_o^2}{WGM} M_{waves}(t) \\ \ddot{x}_{wind} + 2\mu_e \dot{x}_{wind} + \omega_{o,e}^2 x_{wind} = \frac{\omega_o^2}{WGM} \delta M_{wind,tot}(t) \end{cases} \quad (3.3.1.5)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι :

$$\hat{H}_{abs}(\omega) = \frac{1}{(\omega_{o,e}^2 - \omega^2) + 2\mu_e \omega j} \quad (3.3.1.6)$$

Έτσι, τα φάσματα των x_{waves} και x_{wind} υπολογίζονται ως εξής :

$$\begin{aligned} S_{x_{waves}}(\omega) &= |\hat{H}_{abs}(\omega)|^2 \left(\frac{\omega_o^2}{WGM} \right)^2 S_{M_{waves}}(\omega) \\ S_{x_{wind}}(\omega) &= |\hat{H}_{abs}(\omega)|^2 \left(\frac{\omega_o^2}{WGM} \right)^2 S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega) \end{aligned} \quad (3.3.1.7)$$

Τα $S_{M_{waves}}(\omega) \left[\frac{(Nm)^2}{\frac{rad}{s}} \right]$ και $S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega) \left[\frac{(Nm)^2}{\frac{rad}{s}} \right]$ είναι τα φάσματα ροπής κυματισμού και ριπών ανέμου λόγω της επιδρώσας κλίσης κυματισμών a_{eff} και της χρονικά μεταβαλλόμενης τυρβώσους συνιστώσας ταχύτητας ανέμου u_{fluct} . αντίστοιχα. Δίνονται από τους ακόλουθους τύπους :

- Φάσμα ροπής κυματισμών $S_{M_{waves}}(\omega) \left[\frac{(Nm)^2}{\frac{rad}{s}} \right]$

$$S_{M_{waves}}(\omega) = (WGM_{res})^2 S_{aa,c}(\omega) \quad (3.3.1.8)$$

όπου $S_{\alpha\alpha,c}(\omega)$ $\left[\frac{(\text{rad})^2}{\text{rad/s}}\right]$ είναι το φάσμα της επιδρώσας κλίσης κυματισμών και ισούται με :

$$S_{\alpha\alpha,c}(\omega) = \frac{\Gamma(\omega)^2 \omega^4}{g^2} S_{zz}(\omega) \quad (3.3.1.9)$$

όπου $S_{zz}(\omega)$ $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{rad}}\right]$ το φάσμα κυματισμών Bretschneider του οποίου η μαθηματική έκφραση διαφαίνεται ακολούθως :

$$S_{zz}(\omega) = \frac{H_s^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left[-\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 \cdot \omega^{-4}\right] \quad (3.3.1.10)$$

- Φάσμα ροπής ριπών ανέμου $S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega)$ $\left[\frac{(\text{Nm})^2}{\text{s}}\right]$

$$S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega) = (\rho_{air} \cdot U_w \cdot C_m \cdot A_L \cdot Z)^2 \cdot \chi(\omega)^2 \cdot S_v(\omega) \quad (3.3.1.11)$$

όπου η πυκνότητα του αέρα λαμβάνεται ίση με 1.222 kg/m^3 , το $\chi(\omega)$ είναι ένας αεροδυναμικός συντελεστής και θεωρείται ίσος με τη μονάδα και το $S_v(\omega)$ $\left[\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 / \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)\right]$ είναι το φάσμα ριπής ανέμου και δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$S_v(\omega) = 4K \cdot \frac{U_w^2}{\omega} \cdot \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (3.3.1.12)$$

$$K = 0.003, \quad X_D = 600 \cdot \frac{\omega}{\pi \cdot U_w}$$

όπου K ένας συντελεστής ανέμου και X_D ένας αεροδυναμικός συντελεστής.

Το συνολικό φάσμα απόκρισης δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$S(\omega) = S_{x_{waves}}(\omega) + S_{x_{wind}}(\omega) \quad (3.3.1.13)$$

$$= |\hat{H}_{abs}(\omega)|^2 \frac{\omega_o^4}{(WGM)^2} (S_{M_{waves}}(\omega) + S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega))$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως :

$$S_x(\omega) = H^2(\omega) \cdot S_m(\omega) \quad (3.3.1.14)$$

$$\begin{cases} H^2(\omega) = \omega_o^4 |\hat{H}_{abs}(\omega)|^2 = \frac{\omega_o^4}{(\omega_{o,e}^2 - \omega^2)^2 + (2\mu_e \omega)^2} \\ S_m(\omega) = \frac{S_{M_{waves}}(\omega) + S_{\delta M_{wind,tot}}(\omega)}{(WGM)^2} = \frac{S_{M_{total}}(\omega)}{(WGM)^2} \end{cases}$$

Η λύση της (3.3.1.14) προδιαθέτει τον υπολογισμό του ισοδύναμου γραμμικού συντελεστή απόσβεσης μ_e και συνεπώς της τυπικής απόκλισης της απόλυτης ταχύτητας διατοιχισμού $\sigma_{\dot{x}}$. Ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης $\sigma_{\dot{x}}$ επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας από την παρακάτω εξίσωση:

$$F(\sigma_{\dot{x}}) = 0$$

$$F(\sigma_{\dot{x}}) = \sigma_{\dot{x}} - \int_0^{\infty} \omega^2 S_x(\omega) d\omega = \sigma_{\dot{x}} - \int_0^{\infty} \omega^2 \frac{\omega_o^4}{(\omega_{o,e}^2 - \omega^2)^2 + (2\mu_e \omega)^2} \frac{S_{M,total}(\omega)}{(WGM)^2} d\omega \quad (3.3.1.15)$$

όπου μ_e όπως ορίστηκε μέσω της σχέσης (3.2.2.2).

3.3.2 Μοντελοποίηση με τη σχετική γωνία διατοιχισμού

Η σχετική γωνία διατοιχισμού ορίζεται ακολούθως ως :

$$\varphi_{rel}(t) = \varphi(t) - a_{eff}(t) \quad (3.3.2.1)$$

Και η μεταβολή της σχετικής γωνίας $\varphi_{rel}(t)$ γύρω από την γωνία ισορροπίας φ_s (πλάτος σχετικής γωνίας διατοιχισμού) γράφεται ως εξής :

$$x_{rel}(t) = \varphi(t) - a_{eff}(t) - \varphi_s = x(t) - a_{eff}(t) \quad (3.3.2.2)$$

Υποθέτοντας και στην προκειμένη περίπτωση ότι οι οι ροπές των κυματισμών και των ριπών ανέμου είναι τοπικώς ασυσχέτιστες, η συνολική απόκριση υπολογίζεται ως επαλληλία των αποκρίσεων $x_{waves}(t)$ και $x_{wind}(t)$ από την εξίσωση (3.3.1.1). Έτσι, η παραπάνω σχέση λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

$$\begin{aligned} x_{rel}(t) &= x_{waves}(t) - a_{eff}(t) + x_{wind}(t) \\ &= x_{rel,waves}(t) + x_{wind}(t) \end{aligned} \quad (3.3.2.3)$$

Επισημαίνεται, εδώ, πως το φάσμα του $x_{wind}(t)$ αντιστοιχεί σ' αυτό της εξίσωσης (3.3.1.7).

Το φάσμα του $x_{rel,waves}(t)$ προκύπτει μέσω της αναπαράστασης της αντιστοιχης απόκρισης στο μιγαδικό επίπεδο όπως διαφαίνεται παρακάτω :

$$\hat{x}_{rel,waves} = \hat{x}_{waves} - \hat{a}_{eff} = \sum_i (\omega_{o,e}^2 \hat{H}_{abs}(\omega) - 1) r(\omega_i) A_i \frac{\omega_i^2}{g} e^{j\omega_i t} \quad (3.3.2.4)$$

όπου :

$$\begin{cases} \hat{x}_{waves} = \sum_i \omega_{o,e}^2 \hat{H}_{abs}(\omega_i) r(\omega_i) A_i \frac{\omega_i^2}{g} e^{j\omega_i t} \\ \hat{a}_{eff} = \sum_i r(\omega_i) A_i \frac{\omega_i^2}{g} e^{j\omega_i t} \end{cases} \quad (3.3.2.5)$$

Έτσι, το φάσμα του πλάτους διατοιχισμού $x_{rel,waves}(t)$ ισούται με :

$$S_{x_{rel,waves}}(\omega) = |\omega_{o,e}^2 \hat{H}_{abs}(\omega) - 1|^2 S_{\alpha,\alpha,c}(\omega) = |\omega_{o,e}^2 \hat{H}_{abs}(\omega) - 1|^2 \frac{S_{M_{waves}}(\omega)}{(WGM_{res})^2} \quad (3.3.2.6)$$

Τελικά, το συνολικό φάσμα της απόκρισης με βάση την σχετική γωνία διατοιχισμού ισούται με :

$$S(\omega) = S_{x_{rel,waves}}(\omega) + S_{dM_{wind,tot}}(\omega) = H_{rel}^2(\omega) \frac{S_{M_{waves}}(\omega)}{(WGM_{res})^2} + H^2(\omega) \frac{S_{dM_{wind,tot}}(\omega)}{(WGM)^2}$$

$$\begin{cases} H_{rel}^2(\omega) = |\omega_{o,e}^2 \hat{H}_{abs}(\omega) - 1|^2 = \frac{\omega^4 + (2\mu_e \omega)^2}{(\omega_{o,e}^2 - \omega^2)^2 + (2\mu_e \omega)^2} \\ H^2(\omega) = \omega_o^4 |\hat{H}_{abs}(\omega)|^2 = \frac{\omega_o^4}{(\omega_{o,e}^2 - \omega^2)^2 + (2\mu_e \omega)^2} \end{cases} \quad (3.3.2.7)$$

3.4 Καθορισμός δείκτη ευπάθειας $C_{s,i}$

Για τον υπολογισμό του δείκτη $C_{s,i}$ καθίσταται αναγκαίο να καθοριστεί η πιθανότητα ανατροπής υπό ένα δεδομένο περιβαλλοντικό σενάριο «i» το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα σημαντικό ύψος κύματος H_s και μια μέση περίοδο κύματος T_z . Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί εδώ πως δυσμενές σενάριο για την ευστάθεια του πλοίου θεωρείται πως λαμβάνει χώρα όταν, κατά την απόκρισή του, υπερβεί τουλάχιστον μια φορά μια υψηλή γωνία σε ένα θεωρούμενο χρονικό διάστημα έκθεσής του κάτω από την επίδραση ανέμων και κυματισμών.

Αυτή η υψηλή γωνία αντιστοιχεί στην οριακή γωνία ισοδύναμης περιοχής (equivalent area virtual limit angle) φ_{EA} . Επίσης, συνηθίζεται να αναφέρεται ως ισοδύναμη κρίσιμη γωνία (equivalent critical heel angle) ή ακόμη και ως ισοδύναμη γωνία απώλειας ευστάθειας για γραμμικό διατοιχισμό (equivalent failure angle). Οι γωνίες φ_{EA-} και φ_{EA+} , λοιπόν, με τα πρόσημα (-) και (+) να ενδεικνύουν τη φορά αντίθετη και την ομόρροπη με αυτήν του ανέμου αντίστοιχα, καθορίζονται μέσω της γραμμικοποίησης του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, υιοθετώντας την υπόθεση της «ισοδύναμης περιοχής» (“equivalent area”). Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ενεργειακής εξισορρόπησης (energy balance) προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις (IMO-SDC8/5, 2021) [6]:

$$\int_{\varphi_s}^{\varphi_{fail+}} GZ_{res}(\varphi) d\varphi = \frac{GM_{res} \cdot (\varphi_{EA+} - \varphi_s)^2}{2} \quad (3.4.1)$$

$$\int_{\varphi_{fail-}}^{\varphi_s} GZ_{res}(\varphi) d\varphi = \frac{GM_{res} \cdot (\varphi_s - \varphi_{EA-})^2}{2} \quad (3.4.2)$$

Έτσι, οι γωνίες φ_{EA+} και φ_{EA-} υπολογίζονται ως εξής :

$$\varphi_{EA+} = \varphi_s + \sqrt{\frac{2}{GM_{res}} \cdot \int_{\varphi_s}^{\varphi_{fail+}} GZ_{res}(\varphi) d\varphi} \quad (3.4.3)$$

$$\varphi_{EA-} = \varphi_s - \sqrt{\frac{-2}{GM_{res}} \cdot \int_{\varphi_{fail-}}^{\varphi_s} GZ_{res}(\varphi) d\varphi} \quad (3.4.4)$$

όπου :

- $GZ_{res}(\varphi)$ [m] είναι ο τροποποιημένος μοχλοβραχίονας επαναφοράς υπό την παρουσία ανέμου, συγκεκριμένα μέσης ροπής ανέμου, και δίνεται από τη σχέση :

$$GZ_{res}(\varphi) = GZ - l_{wind} \quad (3.4.5)$$

- φ_{fail+} , φ_{fail-} [rad] είναι οι γωνίες απώλειας ευστάθειας του μοχλοβραχίονα επαναφοράς και υπολογίζονται από :

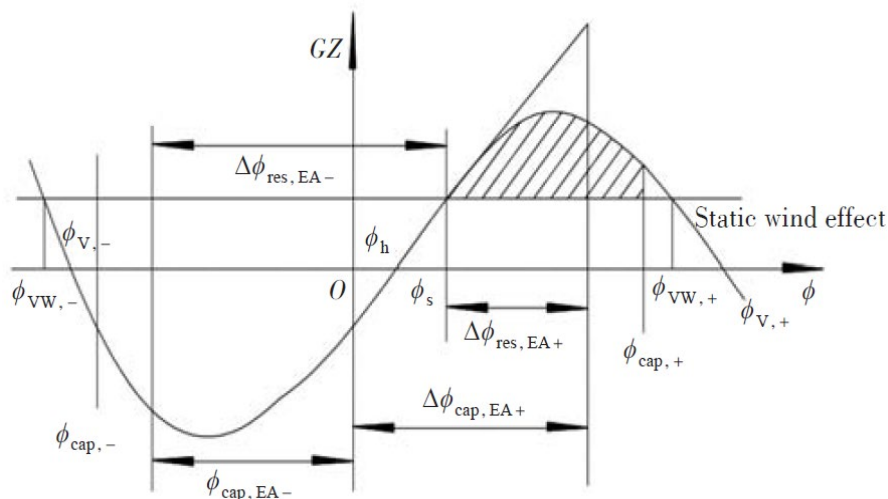
$$\varphi_{fail+} = \min(\varphi_{VW+}, \varphi_{crit+}) \quad (3.4.6)$$

$$\varphi_{fail-} = \max(\varphi_{VW-}, \varphi_{crit-}) \quad (3.4.7)$$

όπου φ_{VW+} και φ_{VW-} είναι τα, εκατέρωθεν της γωνίας ισορροπίας φ_s , σημεία τομής του GZ με το μοχλοβραχίονα μέσης ροπής ανέμου l_{wind} και φ_{crit+} και φ_{crit-} είναι οι κρίσιμες γωνίες που ορίζονται ως το μέγιστο/ελάχιστο μεταξύ των γωνιών κλίσης $\varphi_{f+}/\varphi_{f-}$, όπου κατακλύζονται με νερό τα απροστάτευτα ανοίγματα του πλοίου, και των $\pm 50deg$:

$$\varphi_{crit+} = \min(\varphi_{f+}, 50) \quad (3.4.8)$$

$$\varphi_{crit-} = \max(\varphi_{f-}, -50) \quad (3.4.9)$$



Σχήμα 3.3: Μοχλοβραχίονας ανέμου και επαναφοράς, γωνίες ευσταθούς-ασταθούς ισορροπίας και αναπαράσταση της προσέγγισης της ισοδύναμης περιοχής. (Zhenwang, Kun, & Xinmeng, 2016) [14]

Εδώ κρίνεται σημαντικό να σημειωθεί ότι ο δείκτης $C_{s,i}$ δίνει μια προσεγγιστική μέτρηση της πιθανότητας ανατροπής και αυτός είναι ο λόγος που καλείται και «δείκτης». Δεν αντιπροσωπεύει μια πραγματική πιθανότητα εξαιτίας των υποθέσεων και θεωρήσεων που έχουν γίνει στο παρόν κριτήριο. Επίσης, λόγω γραμμικού προβλήματος ο όρος «ανατροπή» δεν ευδοκιμεί πλήρως. Στο εξής, όταν αναφέρεται «πιθανότητα ανατροπής», θα νοείται ως πιθανότητα υπέρβασης της οριακής γωνίας φ_{EA} . Έτσι, στο εν λόγω κριτήριο δεύτερης γενιάς η ευπάθεια του πλοίου υπό την επίδραση σεναρίου διέγερσης κυματισμών και ριπών ανέμου, το οποίο αντιπροσωπεύεται από το σημαντικό ύψος κύματος H_s και τη μέση περίοδο ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας T_z , ισοδυναμεί με την υπέρβαση της ισοδύναμης γωνίας απώλειας ευστάθειας φ_{EA} . Επί της ουσίας η γωνία φ_{EA} αποτελεί την εικόνα της φ_{fail} στο γραμμικό σύστημα και συνεπώς στο εγγενές κριτήριο δεδομένου της γραμμικοποίησης του όρου επαναφοράς και της υιοθέτησης της θεώρησης περί «ισοδύναμης περιοχής».

Η πιθανότητα υπέρβασης της γωνίας φ_{EA} εκτιμάται υπό τη θεώρηση ότι η απόκριση του πλοίου αποτελεί μια Γκαουσιανή στοχαστική εργοδική διαδικασία, δεδομένου ότι το κριτήριο χρησιμοποιεί το γραμμικοποιημένο μοντέλο και ότι η διέγερση ακολουθεί κανονική κατανομή, ενώ οι υπολογισμοί εύρεσής της υλοποιούνται βάσει της υπόθεσης ότι η ανατροπή του πλοίου/υπέρβαση της γωνίας φ_{EA} συνιστά μια διαδικασία Poisson. Υποτίθεται ότι η εν λόγω

υπέρβαση μπορεί να πραγματοποιηθεί και στις δύο πλευρές του πλοίου (port & starboard side) και, κατ’ αυτόν τον τρόπο, μπορούν να θεωρηθούν ως δύο διαφορετικές διαδικασίες Poisson.

Η πιθανότητα υπέρβασης της φ_{EA} μέσα σε ένα χρονικό διάστημα έκθεσης T_{exp} ισούται με :

$$P(\text{failures in } T_{exp}) = 1 - P(\text{not failure in } T_{exp}) \quad (3.4.10)$$

Η πιθανότητα να συμβούν n υπερβάσεις της φ_{EA} σε χρονικό διάστημα T_{exp} δίνεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Poisson :

$$P(n \text{ failures in } T_{exp}) = \frac{1}{n!} \left(\frac{T_{exp}}{\bar{T}_{fail}} \right)^n \exp\left(-\frac{T_{exp}}{\bar{T}_{fail}}\right) \quad (3.4.11)$$

Έτσι, η πιθανότητα υπέρβασης της φ_{EA} , θεωρώντας μηδέν ανατροπές/υπερβάσεις ($n=0$) στην παραπάνω σχέση, ισούται με :

$$P(\text{failure in } T_{exp}) = 1 - \exp\left(-\frac{T_{exp}}{\bar{T}_{fail}}\right) \quad (3.4.12)$$

όπου \bar{T}_{fail} [s] είναι μια χαρακτηριστική παράμετρος της κατανομής και αντιπροσωπεύει το μέσο χρόνο ανατροπής, η οποία λαμβάνει χώρα θεωρητικά με την υπέρβαση της ισοδύναμης, λόγω γραμμικοποιήσεων, κρίσιμης οριακής γωνίας φ_{EA} .

Θεωρώντας πως $\lambda_{fail} = \frac{1}{\bar{T}_{fail}}$ είναι η μέση συχνότητα υπέρβασης της φ_{EA} (mean up-crossing rate) που δίνεται για τις δύο περιπτώσεις απόκρισης με ομόρροπη και με αντίρροπη φορά με εκείνη του ανέμου από τους εξής τύπους (IMO-SDC8/5, 2021) [6] :

$$\lambda_{fail+} = \int_0^{\infty} \dot{\varphi} \cdot pdf(\varphi = \varphi_{EA+}, \dot{\varphi}) d\dot{\varphi} \quad (3.4.13)$$

$$\lambda_{fail-} = \int_{-\infty}^0 \dot{\varphi} \cdot pdf(\varphi = \varphi_{EA-}, \dot{\varphi}) d\dot{\varphi} \quad (3.4.14)$$

όπου η $pdf(\varphi = \varphi_{EA+}, \dot{\varphi})$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (joint PDF) της σχετικής γωνίας διατοιχισμού φ και του ρυθμού μεταβολής της $\dot{\varphi}$, που υπό τη θεώρηση γραμμικοποιημένου προβλήματος, ακολουθεί κανονική κατανομή. Αν υποθεθεί ακόμη ότι οι τυχαίες μεταβλητές φ , $\dot{\varphi}$ είναι ανεξάρτητες/ασυσχέτιστες μεταξύ τους, δηλαδή η συνάρτηση συσχέτισης $\rho(\varphi, \dot{\varphi})$ και συνδιακύμανσης $\text{Cov}(\varphi, \dot{\varphi})$ είναι μηδέν, τότε η από κοινού PDF είναι απλουστευμένα το γινόμενο των δύο επιμέρους PDF των δύο δεδομένων τυχαίων μεταβλητών και ισούται για τις περιπτώσεις leeward και windward αντίστοιχα με :

$$pdf(\varphi = \varphi_{EA+}, \dot{\varphi}) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\varphi} \sigma_{\dot{\varphi}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{EA+} - \varphi_s}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\varphi} - \bar{\dot{\varphi}}}{\sigma_{\dot{\varphi}}}\right)^2\right) \quad (3.4.15)$$

$$pdf(\varphi = \varphi_{EA-}, \dot{\varphi}) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\varphi} \sigma_{\dot{\varphi}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_s - \varphi_{EA-}}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\varphi} - \bar{\dot{\varphi}}}{\sigma_{\dot{\varphi}}}\right)^2\right) \quad (3.4.16)$$

όπου η μέση τιμή του ρυθμού μεταβολής της σχετικής γωνίας $\bar{\varphi}$ θεωρείται ίση με μηδέν.

Έτσι, αν αντικατασταθούν οι (3.4.15) και (3.4.16) στις (3.4.13) και (3.4.14) αντίστοιχα, προκύπτει ότι:

$$\lambda_{fail+} = \frac{\sigma_{\dot{\varphi}}}{2\pi \sigma_{\varphi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_{EA+} - \varphi_s}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \quad (3.4.17)$$

$$\lambda_{fail-} = \frac{\sigma_{\dot{\varphi}}}{2\pi \sigma_{\varphi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_s - \varphi_{EA-}}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \quad (3.4.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα σενάρια υπέρβασης των φ_{EA+} και φ_{EA-} είναι ξεχωριστά-ασυσχέτιστα για τις περιπτώσεις leeward και windward, μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνολική μέση συχνότητα ανατροπής/υπέρβασης (up-crossing exceedance rate) λ_{fail} προκύπτει με την άθροιση των παραπάνω δύο σχέσεων :

$$\lambda_{fail} = \frac{\sigma_{\dot{\varphi}}}{2\pi \sigma_{\varphi}} \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_{EA+} - \varphi_s}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_s - \varphi_{EA-}}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \right] \quad (3.4.19)$$

Έτσι, η ολική πιθανότητα υπέρβασης της φ_{EA} υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\begin{aligned} P(\text{failure in } T_{exp}) &= 1 \\ &- \exp\left(\frac{\sigma_{\dot{\varphi}} T_{exp}}{2\pi \sigma_{\varphi}} \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_{EA+} - \varphi_s}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varphi_s - \varphi_{EA-}}{\sigma_{\varphi}}\right)^2\right) \right]\right) \end{aligned} \quad (3.4.20)$$

Τα μεγέθη σ_{φ} [rad] και $\sigma_{\dot{\varphi}}$ $\left[\frac{rad}{s}\right]$ αντιπροσωπεύουν τις τυπικές αποκλίσεις της απόκρισης βάσει της σχετικής γωνίας διατοιχισμού και του ρυθμού μεταβολής της αντίστοιχα και είναι ίσες με :

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} = \sqrt{m_0} \quad (3.4.21)$$

$$\sigma_{\dot{\varphi}} = \sqrt{\int_0^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega} = \sqrt{m_2} \quad (3.4.22)$$

όπου $S(\omega)$ το φάσμα απόκρισης υπό τη συνδυασμένη επίδραση ανέμου και κυματισμών βάσει της σχετικής γωνίας διατοιχισμού το οποίο αναλύθηκε εκτενώς στο εδάφιο 3.3.2.

Συμβολίζοντας με :

$$\delta\varphi_{res,EA+} = \varphi_{EA+} - \varphi_s \quad (3.4.23)$$

$$\delta\varphi_{res,EA-} = \varphi_s - \varphi_{EA-} \quad (3.4.24)$$

και

$$\sigma_{Cs} \equiv \sigma_{\varphi}$$

Παράλληλα, θέτοντας τους όρους RI_{EA+} και RI_{EA-} (Risk Indices) ίσους με :

$$RI_{EA+} = \frac{\sigma_{Cs}}{\delta\varphi_{res,EA+}} \quad (3.4.25)$$

$$RI_{EA-} = \frac{\sigma_{Cs}}{\delta\varphi_{res,EA-}} \quad (3.4.26)$$

Και ταυτόχρονα εισάγοντας την μέση περίοδο της ταλαντωτικής συμπεριφοράς του συστήματος, μοντελοποιώντας το ως προς τη σχετική γωνία διατοιχισμού,

$$T_{Cs} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} [s] \quad (3.4.27)$$

προκύπτει ο όρος :

$$r_{EA} = \frac{1}{T_{Cs}} \cdot \left[\exp\left(-\frac{1}{2RI_{EA+}^2}\right) + \exp\left(-\frac{1}{2RI_{EA-}^2}\right) \right] \quad (3.4.28)$$

Έτσι, ο δείκτης $C_{s,i}$ που εκφράζει την πιθανότητα υπέρβασης της φ_{EA} υπό το σενάριο διέγερσης «i» προκύπτει ίσος με :

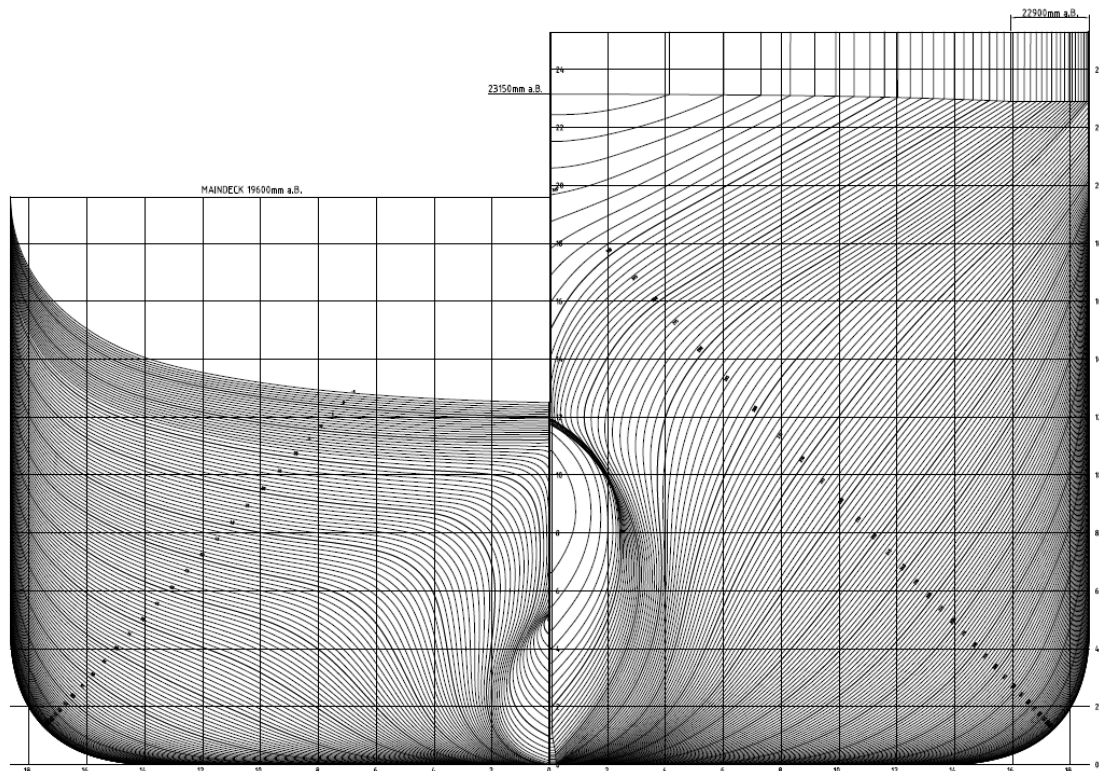
$$C_{s,i} = 1 - \exp(-r_{EA}T_{exp}) \quad (3.4.29)$$

Να σημειωθεί εδώ ότι οι εξισώσεις (3.4.20) και (3.4.29) είναι ταυτόσημες.

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”

4.1 Χαρακτηριστικά καταστάσεων φόρτωσης πλοίου

Στο παρόν κεφάλαιο διαφαίνονται τόσο τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου, του οποίου μελετήθηκε η διατοιχιστική συμπεριφορά, όσο και τα βασικά χαρακτηριστικά, ανάμεσά τους και πολλά στοιχεία σχετικά με την ευστάθεια του σε διατοιχισμό, των καταστάσεων φόρτωσής του.



Σχήμα 4.1: Σχέδιο “Body Lines-Plan”

<i>Main particulars</i>	
<i>Length between perpendiculars L_{BP}</i>	238.35m
<i>Beam B</i>	37.3m
<i>Depth D</i>	19.6m

Πίνακας 4.1: Κύρια Χαρακτηριστικά πλοίου

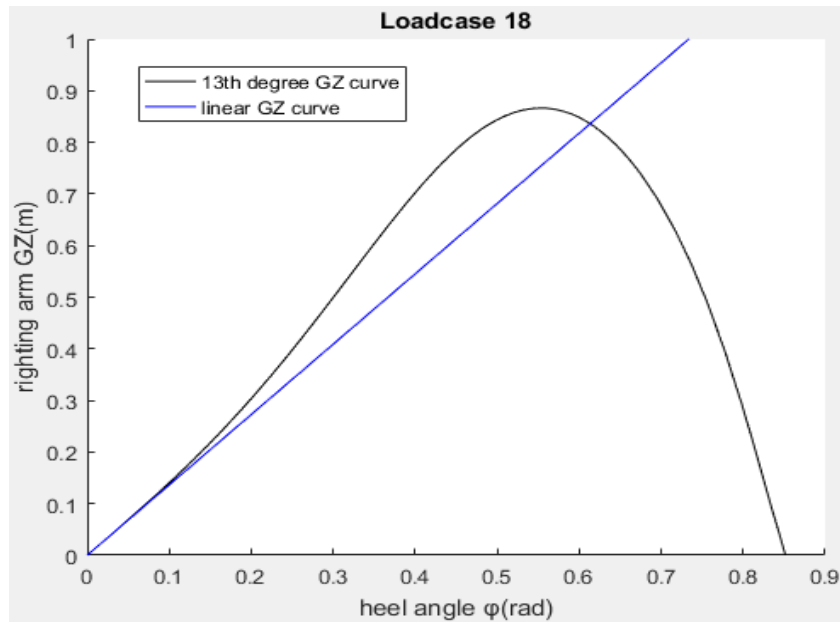
Loading Conditions \ Particulars	18	22	27	31
L _{WL} (m)	242.05	242.1	248.59	248.99
d(m)	12.52	12.19	11.5	11.21
Δ(t)	76078.1	73329.4	68322.2	65867.1
KG _{corr} (m)	16.21	15.5	16.88	15.82
c _B	0.664	0.658	0.647	0.643
c _M	0.983	0.982	0.981	0.981
c _{WL}	0.864	0.852	0.828	0.819
GM(m)	1.36	2.03	0.803	1.79
ω ₀ (rad/s)	0.2911	0.3537	0.2215	0.3290
T ₀ (s)	21.58	17.76	28.37	19.1
φ _V (deg)	49.68	56.94	41.37	57.02
φ _{GZmax} (deg)	31.79	34.63	29.21	35.42
GZ _{MAX} (m)	0.87	1.33	0.64	1.33
Z _{WINDAGE} (m)	22.952	21.878	23.831	22.29
A _{WINDAGE} (m ²)	4815.1	4383.5	5551.4	5121.4
φ _{DOWNFL(P&S)} (deg)	46.4	48.9	52	54.3

Πίνακας 4.2: Βασικά Χαρακτηριστικά μελετούμενων καταστάσεων φόρτωσης³

Παρακάτω διαφαίνονται οι διαγραμματικές απεικονίσεις του μη γραμμικού καθώς και του γραμμικού μοχλοβραχίονα επαναφοράς της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης συναρτήσει της γωνίας εκάρσιας κλίσης φ σε rad. Εκτός από τα διαγράμματα, σημειώνονται εξίσου και οι 13^{οο} βαθμού πολυωνυμικές αναπαραστάσεις τους.

➤ Κατάσταση Φόρτωσης 18

³ Για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών παραμέτρων ευστάθειας έχει υποτεθεί μηδενική διαγωγή.

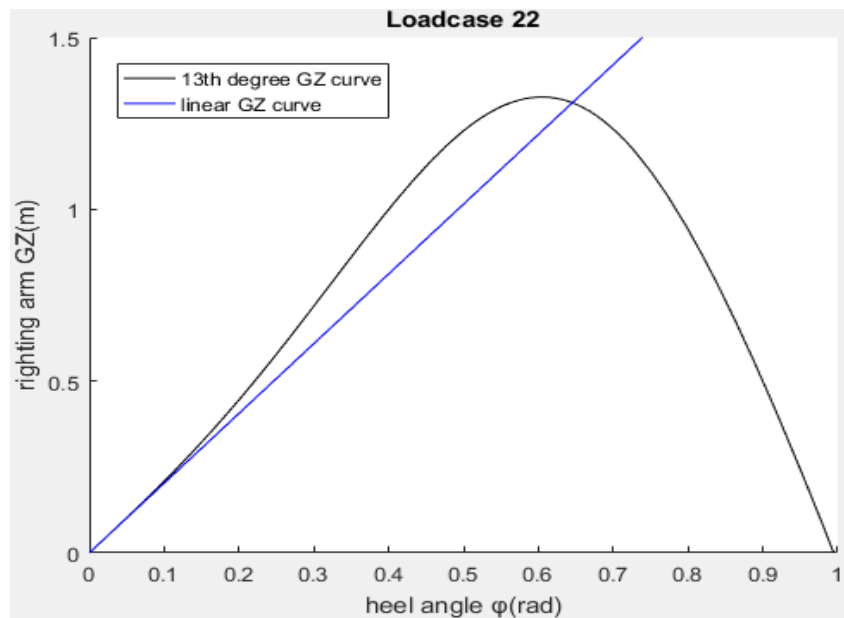


Σχήμα 4.2: Μη γραμμικός - γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς για την κατάσταση φόρτωσης 18

Ο μη γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς της κατάστασης φόρτωσης 18 αναπαριστάται ως ένα πολυώνυμο 13^{ου} βαθμού όπως παρατηρείται ακολούθως.

$$GZ = 124\varphi^{13} - 279\varphi^{11} + 230\varphi^9 - 74.7\varphi^7 - 2.87\varphi^5 + 4.06\varphi^3 + 1.36\varphi, \quad \varphi[\text{rad}] \quad (4.1.1)$$

➤ Κατάσταση Φόρτωσης 22

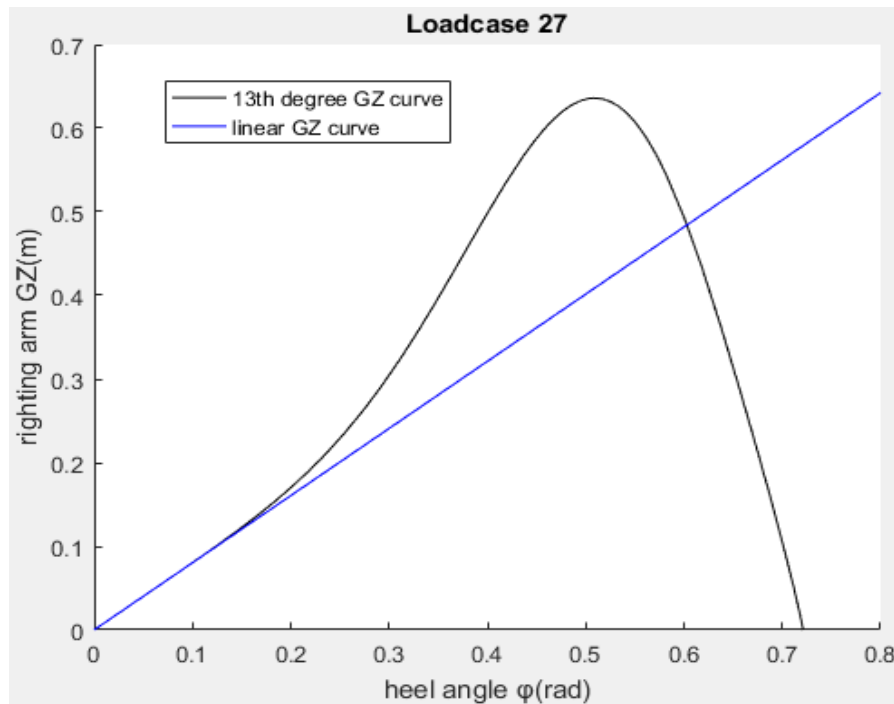


Σχήμα 4.3: Μη γραμμικός - γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς για την κατάσταση φόρτωσης 22

Η μη γραμμική έκφραση του μοχλοβραχίονας επαναφοράς της κατάστασης φόρτωσης 22 διαφαίνεται παρακάτω.

$$GZ = 2.22\varphi^{13} - 7.09\varphi^{11} + 2.94\varphi^9 + 13.5\varphi^7 - 19.3\varphi^5 + 5.67\varphi^3 + 2.03\varphi, \quad \varphi[\text{rad}] \quad (4.1.2)$$

➤ Κατάσταση Φόρτωσης 27

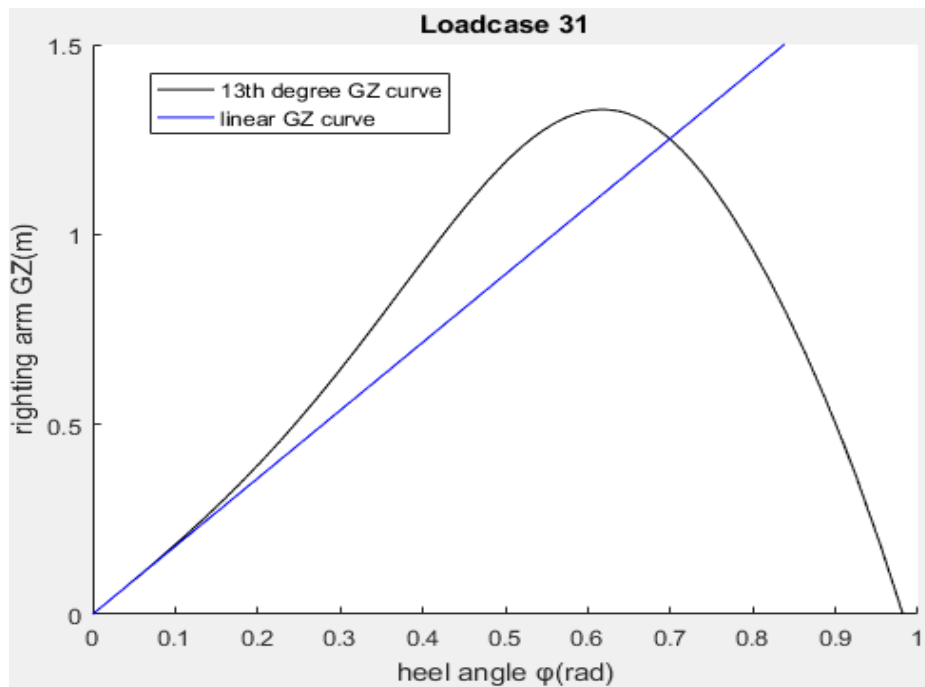


Σχήμα 4.4: Μη γραμμικός και γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς για την κατάσταση φόρτωσης 27

Η μη γραμμική έκφραση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς για τη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης είναι η ακόλουθη:

$$GZ = -668\varphi^{13} + 701\varphi^{11} - 29.4\varphi^9 - 172\varphi^7 + 45.4\varphi^5 - 0.36\varphi^3 + 0.8\varphi, \varphi[\text{rad}] \quad (4.1.3)$$

➤ Κατάσταση Φόρτωσης 31



Σχήμα 4.5: Μη γραμμικός και γραμμικός μοχλοβραχίονας επαναφοράς για την κατάσταση φόρτωσης 31

Στη προκειμένη περίπτωση η πολυωνυμική αναπαράσταση του μη γραμμικού μοχλοβραχίονα επαναφοράς είναι η ακόλουθη:

$$GZ = 21.8\varphi^{13} - 76.8\varphi^{11} + 98.2\varphi^9 - 48.5\varphi^7 - 1.01\varphi^5 + 4.39\varphi^3 + 1.79\varphi, \varphi[\text{rad}] \quad (4.1.4)$$

Παρατηρώντας τη μορφή και των τεσσάρων μοχλοβραχιόνων επαναφοράς παρατηρείται ότι κατά την απομάκρυνση του πλοίου από τη θέση ισορροπίας του αυξάνεται η δυσκαμψία του συστήματος, καθώς η κλίση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς παρουσιάζει αυξητική τάση ($\frac{d^2GZ}{d\varphi^2} > 0$). Παρουσιάζει, δηλαδή, τη συμπεριφορά «σκληρυνόμενου ελατηρίου» (“hardening spring”) και στις τέσσερις μελετούμενες καταστάσεις φόρτωσης. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα με εμφαντικό τρόπο στην κατάσταση LC27, καθώς ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς κυρτώνεται έντονα κυρίως μετά το πέρας της γραμμικής ζώνης που εκτείνεται μέχρι και $0.2\text{rad} \cong 11.5\text{deg}$ περίπου. Η γραμμική περιοχή του μοχλοβραχίονα για τις υπόλοιπες καταστάσεις φόρτωσης δε φαίνεται να ξεπερνά τα $0.15\text{rad} \cong 8.6\text{deg}$.

Τέλος, τη δεδομένη στιγμή κρίνεται απαραίτητο να παρατεθούν οι συντελεστές απόσβεσης, οι οποίοι έχουν προκύψει από την απλοποιημένη μέθοδο του Ikeda, για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης, καθώς διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση του πλοίου.

	Linear $\mu[1/s]$	Quadratic $\beta[1/\text{rad}]$	Cubic $\delta[s/\text{rad}^2]$
Loadcase 18	0.01013	0.5881	3.856
Loadcase 22	0.01535	0.3716	2.4568
Loadcase 27	0.0037	0.6729	2.2947
Loadcase 31	0.01482	0.1951	3.4133

Πίνακας 4.3: Συντελεστές απόσβεσης για τις μελετούμενες καταστάσεις φόρτωσης

4.2 Εφαρμογή

Εδώ να σημειωθεί ότι ο χρόνος έκθεσης του πλοίου κάτω από την επίδραση κυμάτων και ριπών ανέμου είναι ίσος με $T_{exp} = 1h = 3600s$.

Παρακάτω παρατίθενται τόσο ο πίνακας Wave Scatter Table (IACS, 2011)[4], από τον οποίο προκύπτει η συχνότητα εμφάνισης W_i του εκάστοτε σεναρίου διέγερσης όσο και πίνακες με μερικές από τις πιο σημαντικές ενδιάμεσες υπολογισθείσες ποσότητες προς εύρεση του πιθανοτικού δείκτη C . Στο τέλος του παρόντος εδαφίου διαφαίνεται συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές που λαμβάνει ο δείκτης C για όλες τις μελετούμενες καταστάσεις φόρτωσης.

Number of occurrences : 100.000 / T_z (s) = average zero up-crossing wave period / H_s (m) = significant wave height																
T_z (s) ▶	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5
H_s (m) ▼																
0.5	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0
2.5	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0
3.5	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0
4.5	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0
5.5	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1
6.5	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1
7.5	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1
8.5	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1
9.5	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.0
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.0
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0

Πίνακας 4.4: Wave Scatter Table (IACS, 2011)[4]

H_s	U [m/s]	I_{wind} [m]	ϕ_s [rad]	A_{res+} [m·rad]	A_{res-} [m·rad]	GM_{res} [m]	$\delta\phi_{res,EA+}$ [rad]	$\delta\phi_{res,EA-}$ [rad]
0.5	3.812	0.0012	0.0009	0.423	0.425	1.363	0.788	0.79
1.5	7.93	0.0051	0.0037	0.42	0.428	1.3632	0.785	0.792
2.5	11.147	0.01	0.0073	0.416	0.432	1.3637	0.781	0.796
3.5	13.951	0.0157	0.0115	0.411	0.437	1.3646	0.776	0.8
4.5	16.495	0.0219	0.0161	0.406	0.442	1.3661	0.771	0.804
5.5	18.856	0.0286	0.021	0.401	0.447	1.3684	0.766	0.809
6.5	21.078	0.0358	0.0262	0.395	0.453	1.3713	0.759	0.813
7.5	23.188	0.0433	0.0317	0.39	0.46	1.3752	0.753	0.818
8.5	25.206	0.0511	0.0374	0.383	0.466	1.38	0.746	0.822
9.5	27.146	0.0593	0.0433	0.377	0.473	1.3857	0.738	0.826
10.5	29.019	0.0678	0.0494	0.371	0.481	1.3926	0.73	0.831
11.5	30.833	0.0765	0.0556	0.364	0.488	1.4	0.721	0.835
12.5	32.595	0.0855	0.062	0.357	0.496	1.4096	0.712	0.839
13.5	34.311	0.0947	0.0686	0.35	0.504	1.4199	0.703	0.843
14.5	35.986	0.104	0.0752	0.344	0.512	1.4313	0.693	0.846
15.5	37.622	0.114	0.0819	0.336	0.521	1.444	0.683	0.849
16.5	39.223	0.124	0.0888	0.329	0.53	1.4578	0.672	0.853

Πίνακας 4.5: Ενδιάμεσες υπολογισθείσες ποσότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου για την LC18

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”

H_s	U [m/s]	I_{wind} [m]	φ_s [rad]	A_{res+} [m·rad]	A_{res-} [m·rad]	GM_{res} [m]	$\delta\varphi_{res,EA+}$ [rad]	$\delta\varphi_{res,EA-}$ [rad]
0.5	3.812	0.001	0.0005	0.712	0.713	2.03	0.837	0.838
1.5	7.930	0.0045	0.0022	0.709	0.716	2.0301	0.836	0.84
2.5	11.147	0.0089	0.0044	0.705	0.72	2.0303	0.833	0.842
3.5	13.951	0.014	0.0069	0.701	0.725	2.0308	0.831	0.845
4.5	16.495	0.0196	0.0096	0.696	0.729	2.032	0.828	0.847
5.5	18.856	0.0256	0.0126	0.691	0.735	2.033	0.825	0.85
6.5	21.078	0.0319	0.0158	0.686	0.74	2.034	0.821	0.853
7.5	23.188	0.0386	0.019	0.68	0.746	2.036	0.817	0.856
8.5	25.206	0.0457	0.0225	0.674	0.752	2.039	0.813	0.859
9.5	27.146	0.053	0.026	0.668	0.758	2.041	0.809	0.862
10.5	29.019	0.0605	0.0297	0.662	0.765	2.045	0.805	0.865
11.5	30.833	0.0683	0.0336	0.655	0.772	2.049	0.8	0.868
12.5	32.595	0.0764	0.0375	0.649	0.779	2.054	0.795	0.871
13.5	34.311	0.0846	0.0415	0.642	0.787	2.059	0.79	0.874
14.5	35.986	0.0931	0.0456	0.635	0.794	2.065	0.784	0.877
15.5	37.622	0.102	0.0498	0.628	0.802	2.072	0.779	0.88
16.5	39.223	0.111	0.054	0.621	0.81	2.079	0.773	0.883

Πίνακας 4.6: Ενδιάμεσες υπολογισθείσες ποσότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου για την LC22

H_s	U [m/s]	I_{wind} [m]	φ_s [rad]	A_{res+} [m·rad]	A_{res-} [m·rad]	GM_{res} [m]	$\delta\varphi_{res,EA+}$ [rad]	$\delta\varphi_{res,EA-}$ [rad]
0.5	3.812	0.002	0.002	0.228	0.23	0.803	0.753	0.757
1.5	7.930	0.007	0.009	0.224	0.234	0.803	0.747	0.763
2.5	11.147	0.014	0.017	0.219	0.239	0.803	0.739	0.772
3.5	13.951	0.022	0.027	0.213	0.245	0.8023	0.73	0.781
4.5	16.495	0.03	0.038	0.208	0.251	0.8019	0.719	0.792
5.5	18.856	0.04	0.05	0.201	0.259	0.8017	0.709	0.803
6.5	21.078	0.05	0.062	0.195	0.266	0.8021	0.697	0.815
7.5	23.188	0.06	0.075	0.188	0.275	0.804	0.684	0.827
8.5	25.206	0.071	0.089	0.181	0.284	0.808	0.67	0.838
9.5	27.146	0.082	0.103	0.174	0.293	0.815	0.654	0.848
10.5	29.019	0.094	0.117	0.167	0.303	0.827	0.636	0.856
11.5	30.833	0.106	0.131	0.16	0.314	0.846	0.616	0.861
12.5	32.595	0.119	0.146	0.153	0.325	0.871	0.593	0.863
13.5	34.311	0.132	0.16	0.146	0.336	0.905	0.569	0.862
14.5	35.986	0.145	0.175	0.139	0.348	0.947	0.542	0.857
15.5	37.622	0.158	0.189	0.133	0.361	0.997	0.516	0.85
16.5	39.223	0.172	0.202	0.126	0.373	1.055	0.488	0.841

Πίνακας 4.7: Ενδιάμεσες υπολογισθείσες ποσότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου για την LC27

H_s	U [m/s]	I_{wind} [m]	φ_s [rad]	A_{res+} [m·rad]	A_{res-} [m·rad]	GM_{res} [m]	$\delta\varphi_{res,EA+}$ [rad]	$\delta\varphi_{res,EA-}$ [rad]
0.5	3.812	0.0014	0.0008	0.702	0.704	1.79	0.885	0.887
1.5	7.930	0.0062	0.0035	0.697	0.708	1.7902	0.883	0.89
2.5	11.147	0.0123	0.0069	0.692	0.714	1.7906	0.879	0.893
3.5	13.951	0.0192	0.0107	0.686	0.72	1.7915	0.875	0.896
4.5	16.495	0.0269	0.015	0.68	0.727	1.793	0.871	0.9

Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή του κριτηρίου δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”

5.5	18.856	0.0351	0.0196	0.673	0.734	1.7951	0.866	0.904
6.5	21.078	0.0439	0.0245	0.665	0.742	1.7979	0.86	0.908
7.5	23.188	0.0531	0.0296	0.657	0.75	1.8015	0.854	0.912
8.5	25.206	0.0628	0.035	0.649	0.759	1.8061	0.848	0.917
9.5	27.146	0.0728	0.0405	0.641	0.768	1.8116	0.841	0.921
10.5	29.019	0.0832	0.0462	0.632	0.777	1.8181	0.834	0.925
11.5	30.833	0.0939	0.0521	0.623	0.787	1.8258	0.826	0.929
12.5	32.595	0.105	0.0582	0.614	0.798	1.8345	0.818	0.932
13.5	34.311	0.1163	0.0643	0.605	0.808	1.8444	0.81	0.936
14.5	35.986	0.128	0.0706	0.596	0.819	1.8555	0.801	0.94
15.5	37.622	0.1399	0.077	0.586	0.83	1.8679	0.792	0.943
16.5	39.223	0.152	0.0835	0.577	0.842	1.8815	0.783	0.946

Πίνακας 4.8: Ενδιάμεσες υπολογισθείσες ποσότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του κριτηρίου για την LC31

Loadcase	Vulnerability Index C	Status
18	0.01514	Pass
22	$5.795 \cdot 10^{-7}$	Pass
27	$5.09 \cdot 10^{-5}$	Pass
31	0.001868	Pass

Πίνακας 4.9: Δείκτης ευπάθειας C για τις μελετούμενες καταστάσεις φόρτωσης

Γίνεται άμεσα αντιληπτό, μέσω του παραπάνω πίνακα, ότι το πλοίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις του κριτηρίου, καθώς οι υπολογισθείσες τιμές του πιθανοτικού δείκτη ευπάθειας C καθίστανται μικρότερες της οριακής τιμής του κριτηρίου 0.06 και στις τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης. Στις καταστάσεις LC22 και LC27 ο εν λόγω δείκτης λαμβάνει αρκετά μικρές τιμές, ενώ στις LC18 και LC31 καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές. Ειδικά, στην LC18 καταγράφεται η μεγαλύτερη τιμή του και απέχει μόλις 0.045 περίπου από την οριακή τιμή του δεδομένου κριτηρίου. Για την LC22, η μικρή τιμή του δείκτη C, ο οποίος προέκυψε της τάξης 10^{-7} , μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της αρκετά υψηλής τιμής μετακεντρικού ύψους GM συνεπώς και τροποποιημένου μετακεντρικού ύψους GM_{res} , το οποίο είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια του πλοίου, με συνέπεια την απόδοση σχετικά μικρών τιμών στους δείκτες πιθανότητας ανατροπής Cs_i υπό την επίδραση των περισσότερων σεναρίων διέγερσης. Αυτό έχει ως αντίκτυπο, βέβαια, την καθολικά μειωμένη τιμή του πιθανοτικού δείκτη C. Ομοίως, στην LC27, αν και η δεδομένη κατάσταση φόρτωσης παρουσίαζε σχετικά χαμηλό μετακεντρικό ύψος, δεν παρατηρείται μεγάλη τιμή του πιθανοτικού δείκτη, όντας της τάξης του 10^{-5} . Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός πως τα επικίνδυνα σενάρια για τη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης, δεδομένου ότι η ιδιοσυχνότητα του συστήματος είναι αρκετά μικρή 0.22rad/s, αντιπροσωπεύονται από χαμηλόσυχνους κυματισμούς με μεγάλες μέσες περιόδους T_z ,περίπου από $T_z=15.5s$ και άνω, και συνεπώς, από το Wave Scatter Table(Πίνακας 4.4), έχουν πολύ μικρή έως μηδενική συχνότητα εμφάνισης. Έτσι, ο πιθανοτικός δείκτης διαφαίνεται αρκετά μειωμένος ικανοποιώντας ταυτόχρονα το κριτήριο. Από την άλλη πλευρά, ο πιθανοτικός δείκτης του κριτηρίου της LC31 καθίσταται αρκετά υψηλότερος των αντίστοιχων δύο αναφερθέντων προγενέστερα, όντας ίσος με 0.001868. Αυτό τεκμηριώνεται ενδεχομένως από την υψηλή συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων διέγερσης υπό την επίδραση των οποίων το σύστημα δύναται να βρεθεί σε καταστάσεις όπου οι περίοδοι κορυφής των αντιπροσωπευτικών φασμάτων Bretschneider είτε βρεθούν αρκετά κοντά είτε συμπέσουν στην ιδιοπερίοδο του συστήματος. Τέλος, όσον αφορά στην κατάσταση φόρτωσης LC18, δεδομένου του ακόμα μικρότερου μετακεντρικού ύψους από το αντίστοιχο της LC31 και ταυτόχρονα της υπαρξης συχνών, από πλευράς εμφάνισης, διεγέρσεων που αφενός αντιπροσωπεύονται μεγάλης ενέργειας κυματισμών αφενός οι συχνότητες κορυφής φάσματος

των αντίστοιχων κυματισμών βρίσκονται αρκετά κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα συντονισμού και δυσμενείς, όσον αφορά την ευστάθεια, καταστάσεις καθιστώντας, έτσι, υψηλή την πιθανότητα υπέρβασης της οριακής γωνίας φ_{EA} και κατ' επέκταση τον δείκτη ευπάθειας του εκάστοτε σεναρίου διέγερσης. Γι' αυτό το λόγο, λοιπόν, ο πιθανοτικός δείκτης ευπάθειας της δεδομένης κατάστασης λαμβάνει αισθητά υψηλή τιμή, προσεγγίζοντας αρκετά, εμφανώς περισσότερο από τους αντίστοιχους των υπόλοιπων καταστάσεων φόρτωσης, την οριακή τιμή του εν λόγω κριτηρίου.

Κεφάλαιο 5: Στατιστική Σύγκριση Μη Γραμμικού και Γραμμικοποιημένου Μοντέλου

5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων, ειδικότερα της διατοιχιστικής απόκρισης, η οποία εκφράζεται μέσω της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού, τόσο για το γραμμικοποιημένο όσο και για το μη γραμμικό μοντέλο. Ειδικότερα, τα στατιστικά δεδομένα προέκυψαν κατόπιν διενέργειας πληθώρας προσομοιώσεων για δεδομένη κάθε φορά διέγερση ανέμου και κυμάτων στις τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης, οι οποίες αναφέρθηκαν στο εδάφιο 4.1. Εδώ, καθίσταται αναγκαίο να τονισθεί ότι τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφυγές του συστήματος, οι οποίες πραγματοποιούνται στα πλαίσια της μοντελοποίησης μη γραμμικού συστήματος, αμελούνται κατά την κατασκευή των ιστογραμμάτων και την παρεμβολή των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (PDFs) ενώ, αντίθετα, προσμετρούνται κατά τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού (statistical probability of exceedance). Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τη στατιστική ανάλυση που επιχειρήθηκε, υπολογίστηκαν μέσες τιμές και διακυμάνσεις–τυπικές αποκλίσεις κατανομών πιθανότητα υπέρβασης της γωνίας απώλειας ευστάθειας και κατασκευάστηκαν, αντιπροσωπευτικά των πιθανοτήτων υπέρβασης, ημι-λογαριθμικά διαγράμματα και για τις δύο μοντελοποιήσεις αμφότερα σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση τριών σεναρίων διέγερσης, έχοντας κοινό σημαντικό ύψος κύματος και συνεπώς κοινή αναπαράσταση τυρβώδους ανέμου, πάνω στην απόκριση σε διατοιχισμό πλοίου, του οποίου η φόρτωσή του καθορίζεται από τις αντίστοιχες καταστάσεις 18, 22, 27 και 31. Έχουν μελετηθεί τόσο διεγέρσεις κυματισμών κατά τις οποίες η συχνότητα κορυφής του αντιπροσωπευτικού τους φάσματος συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα της εκάστοτε κατάστασης όσο και εκείνες κατά τις οποίες θάλασσας η περίοδος κορυφής βρίσκεται σχετικά μακριά ή δε συμπίπτει, εν γένει, από την ιδιοπερίοδο του συστήματος. Επίσης, τα περισσότερα μελετούμενα σενάρια διέγερσης επιλέχθηκαν έτσι ώστε η πιθανότητα εμφάνισής τους, από το Wave Scatter Table (Πίνακας 4.4), να μην καθίσταται αμηλετέα. Έπειτα, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα από τη στατική ανάλυση του μη γραμμικού και του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Τέλος, εξήχθησαν συμπεράσματα για την εκάστοτε περίπτωση μελέτης {καταστάσης φόρτωσης – κατάσταση θάλασσας (Hs, Tz)} καθώς και ταυτοχρόνως έλαβε χώρα προσέγγιση και αποσαφήνιση της μορφής των διαγραμμάτων καθώς και της ορθολογικότητας των στατιστικών μεγεθών. Εδώ αξίζει να διευκρινιστεί ότι όλοι οι υπολογισμοί, προσομοιώσεις και αποτελέσματα έχουν προκύψει με τη χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος *MATLAB*.

5.2 Περιγραφή της διαδικασίας εξαγωγής των στατιστικών τιμών

Εμβαθύνοντας στο θέμα, είναι αναγκαίο να τονισθεί ότι οι στατιστικές τιμές και τα παραχθέντα διαγράμματα αφορούν τη μόνιμη απόκριση (steady state response) του πλοίου, υπενθυμίζοντας σε απόλυτη γωνία διατοιχισμού, ενώ ταυτόχρονα έχει αμεληθεί το μεταβατικό στάδιο (transient state). Η εύρεση του χρόνου όπου έχει περατωθεί η μεταβατική κατάσταση του πλοίου, κατά την οποία το πλοίο αμελεί την εξωτερική διέγερση εκτελώντας, ελεύθερη ταλάντωση εκθετικώς συρρικνώμενη με το χρόνο, ενώ ταυτόχρονα έχει αρχίσει η μόνιμη ταλαντωτική συμπεριφορά, ισοδυναμεί με την εύρεση της χρονικής στιγμής κατά την οποία μονιμοποιούνται-σταθεροποιούνται τα στατιστικά στοιχεία. Αυτή η χρονική στιγμή έχει βρεθεί για την εκάστοτε περίπτωση παρατηρώντας στα διαγράμματα των στατιστικών μεγεθών,

συγκεκριμένα της μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσεως του χρόνου, το χρονικό σημείο όπου «ταλαντεύονται» με μικρότερα «πλάτη» σε σχέση με τα αρχικά γύρω από μια μέση τιμή, η οποία, καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο, ονομάζεται ως μέση τιμή ολότητας. Αυτή η «ταλάντωση» που παρατηρείται στα διαγράμματα μέσης τιμής και διακύμανσης είναι λογικό να καθίσταται και αποδίδεται αφενός στο γεγονός ότι τα στατιστικά αυτά μεγέθη αποτελούν τυχαίες συναρτήσεις $X(t;\beta)$, όπου t ο χρόνος και β η τυχαία μεταβλητή/μεταβλητή επιλογής, αφετέρου λόγω των θορύβων που συνυπάρχουν στο σύστημα. Να σημειωθεί ότι για την παραγωγή αυτών των διαγραμμάτων έχουν πραγματοποιηθεί 1000 προσομοιώσεις μέχρι τη χρονική στιγμή 500s της μη γραμμικής αλλά και της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού σε όλες τις μελετούμενες περιπτώσεις {καταστάσης φόρτωσης – κατάσταση θάλασσας (Hs,Tz)}. Εδώ αξίζει να τονισθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ένα «υποκειμενικό κριτήριο» μονιμοποίησης των στατιστικών τιμών. Πιο συγκεκριμένα, καθώς λήφθηκε ο μέσος όρος των μέσων τιμών και διακυμάνσεων του τελευταίου λεπτού, διότι τη δεδομένη στιγμή αναμένεται ότι έχει μονιμοποιηθεί η απόκριση επομένως και τα στατιστικά μεγέθη, αφαιρέθηκε από όλες τις μέσες τιμές και διακυμάνσεις που αντιστοιχούν σε κάθε δευτερόλεπτο του χρόνου προσομοίωσης των 500s. Έτσι, με τη χρήση των παραγόμενων διαγραμμάτων από τις προκύπτοντες ανωτέρω τιμές $\Delta mean$ και $\Delta variance$ συναρτήσεως του χρόνου, εντοπίστηκε η χρονική στιγμή σταθεροποίησης των στατιστικών καθώς οι εν λόγω διαφορές τείνουν σε αρκετά χαμηλές τιμές κοντά στο μηδέν. Για την εύρεση αυτής της χρονικής στιγμής στην περίπτωση του μη γραμμικού μοντέλου αμελήθηκαν οι διαφυγές του εν λόγω συστήματος. Εν συνεχεία, αφού βρεθεί προσεγγιστικά αυτή η χρονική στιγμή, έλαβαν χώρα 15000 προσομοιώσεις για την εκάστοτε περίπτωση μέχρι μια χρονική στιγμή η οποία καθίσταται μεγαλύτερη της πρώτης. Κατόπιν, λήθηκαν οι τιμές της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού από τις διενεργούμενες προσομοιώσεις ως δεδομένα προς στατιστική ανάλυση, αντιστοιχώντας σε χρονικές στιγμές οι οποίες ανήκουν/αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα της μόνιμης ταλαντωτικής συμπεριφοράς και εξαιρώντας, παράλληλα, διαφυγές (απειρισμός λύσης) που λαμβάνουν χώρα κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση. Επειδή ο αριθμός των διαφυγών καθίσταται μικρός σχετικά με τον αριθμό των προσομοιώσεων σ' όλες τις περιπτώσεις, δεν αναμένεται μεγάλη διαφοροποίηση στα ιστογράμματα και στις αντίστοιχες PDFs σε περίπτωση ενσωμάτωσής τους σ' αυτά. Συγχρόνως, ενδεχόμενη ενσωμάτωσή τους δε θα συμβάδιζε με τον τρόπο κατά τον οποίο έχουν συλλεχθεί τα δεδομένα. Παράλληλα, η περίπτωση μη εξαίρεσής τους θα οδηγούσε στη διαστρέβλωση των στατιστικών μεγεθών, παρέχοντας μια ασαφή εικόνα της μόνιμης απόκρισης του πλοίου με μη γραμμικούς όρους απόσβεσης και επαναφοράς. Έτσι, αφού αφαιρεθούν τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφυγές, κατασκευάζονται τα ιστογράμματα και οι εγγενείς συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDFs). Επίσης, κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί το γεγονός πως στα ιστογράμματα έχουν παρεμβληθεί η κανονική κατανομή (Gaussian-Normal Distribution) και η μη παραμετρική κατανομή Kernel (Non parametric - Kernel Distribution) τόσο στο γραμμικοποιημένο όσο και στο μη γραμμικό μοντέλο. Αυτό έλαβε χώρα όχι μόνο στην περίπτωση του γραμμικού/γραμμικοποιημένου μοντέλου με στόχο την επιβεβαίωση της θεωρίας γραμμικών συστημάτων κατά την οποία η πιθανοτική κατανομή της απόκρισης συμπίπτει με την αυτήν της διέγερσης, αλλά και στην περίπτωση του μη γραμμικού με απώτερο σκοπό να εντοπιστούν οι διαφορές της τελικής κατανομής (Kernel Distribution) με την κανονική κατανομή. Στην προκειμένη περίπτωση, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας καθώς και η τυρβώδης συνιστώσα ταχύτητας ανέμου θεωρείται πως ακολουθούν κανονική κατανομή και έτσι η διέγερση συνιστά μια Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία. Εδώ, ωστόσο, κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί ότι κατά τη γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση και την εξαγωγή των σχετικών ιστογραμμάτων και των PDFs αναμένεται μια μικρή απόκλιση μεταξύ των δεδομένων του ιστογράμματος και της εκτιμήτριας PDF Kernel με τη Γκαουσιανή PDF σε όλες τις περιπτώσεις, κατάσταση φόρτωσης και σενάρια διέγερσης, που μελετήθηκαν. Ο λόγος της δεδομένης απόκλισης, που

διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση ανήκοντας, ωστόσο, σε χαμηλά-αποδεκτά επίπεδα τιμών, αποδίδεται στο γεγονός ότι οι χρόνοι εξαγωγής των τελικών πειραμάτων δεν ήταν τόσο μεγάλοι με συνέπεια το βήμα διακριτοποίησης τόσο του φάσματος κυματισμών Bretschneider όσο και ανέμου Davenport να παίρνει υψηλές, εν γένει, τιμές (υπενθυμίζοντας εδώ πως έχουν προκύψει από τον τύπο $d\omega/df = \frac{2\pi}{T_{exp}}$), δίνοντας κατά τη βέλτιστη δυνατή διακριτοποίηση των, εν λόγω, φασμάτων σχετικά μικρό αριθμό συνιστωσών κυρίως στην περίπτωση του φάσματος κυματισμών. Δεδομένου, όμως, ότι το Μοντέλο Τυχαίας Φάσης αναπαριστά μια Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία για ένα αρκετά μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών, αυστηρώς για $N \rightarrow \infty$, γίνεται κατανοητό ότι η στοχαστική περιγραφή της διέγερσης διαφέρει σε μικρό βαθμό από την αμιγώς κανονική κατανομή, γεγονός που αποτυπώνεται και στα ιστογράμματα με τη μορφή μιας μικρής απόκλισης μεταξύ των αντίστοιχων πιθανοτήτων των ιστογραμμάτων και των πιθανοτήτων που υπολογίζονται μέσω της Γκαουσιανής PDF (Αθανασούλης, 2007) [15]. Πάντως, για να κυμαίνεται η προαναφερθείσα απόκλιση σε όσο το δυνατόν χαμηλά επίπεδα, ως χρονική διάρκεια προσομοιώσεων επιλέχθηκε τις περισσότερες φορές τα 5min. Υπήρχαν, βέβαια και μερικές περιπτώσεις κατά τις οποίες χρειάστηκε άλλοτε περισσότερος και άλλοτε λιγότερος των 5min ως χρόνος προσομοιώσεων ώστε να εντοπισθεί επαρκώς συρρικνωμένη διαφορά μεταξύ εκτιμητριας PDF Kernel/τιμών ιστογράμματος και της Γκαουσιανής PDF. Έπειτα, κατασκευάστηκαν ημι-λογαριθμικά διαγράμματα των πιθανοτήτων υπέρβασης (statistical probabilities of exceedance) γωνιών διατοιχισμού (starboard&port side) καθώς και σχετικός πίνακας στον οποίο αντικατοπτρίζονται οι ποσοστιαίες διαφορές των εγγενών πιθανοτήτων υπέρβασης που υπολογίζονται από τις δύο αντιτιθέμενες μοντελοποιήσεις ως προς τη συναφή (ενν. πιθανότητα υπέρβασης) που προβλέπεται με τη χρήση του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Εδώ να σημειωθεί ότι για την παραγωγή των εν λόγω διαγραμμάτων αλλά και για την εξαγωγή της ποσοστιαίας απόκλισης έχουν ενσωματωθεί οι διαφυγές του συστήματος που εμφανίζονται στα πλαίσια μοντελοποίησης του μη γραμμικού συστήματος. Συγχρόνως, παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον η απόκλιση των συχνοτήτων εμφάνισης των ευρών γωνιών στα ιστογράμματα, η επακόλουθη μορφή των παρεμβληθεισών PDFs και ταυτόχρονα η διαφορά στην γραφική αναπαράσταση των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού του μη γραμμικού μοντέλου σε σχέση με τα αντίστοιχα του γραμμικοποιημένου λόγω των υπάρχουσών μη γραμμικοτήτων στον όρο απόσβεσης και κυρίως στον όρο επαναφοράς στον οποίο υπεισέρχεται η σχετική γωνία διατοιχισμού. Επισημαίνεται, σ' αυτό το σημείο, ότι οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος είναι μηδενικές, δηλαδή το πλοίο βρισκόταν αρχικά σε κατακόρυφη θέση με μηδενική ταχύτητα πριν την επενέργεια της διέγερσης. Συνεχίζοντας, κρίνεται σκόπιμο στο παρόν σημείο να αναφερθεί ότι η εκτιμητρια PDF Kernel δεν αντιπροσωπεύεται από μέση τιμή και διασπορά όπως συμβαίνει στη περίπτωση της κανονικής κατανομής. Ωστόσο, μπορεί να διαπιστώσει κανείς στο επόμενο εδάφιο ότι και στην περίπτωση της μη γραμμικής μοντελοποίησης εξάγεται μέση τιμή και διασπορά της PDF Kernel προς σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα μεγέθη της κατανομής Gauss της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης. Αυτό επιτεύχθει μέσω της εντολής “pd = fitdist(x,'Kernel’)” του *MATLAB*, η οποία παρεμβάλλει την εκτιμητρια συνάρτησης κατανομής πιθανότητας pd Kernel (Probability Distribution Object) στα δεδομένα x. Έτσι, με τη χρήση των εντολών mean(pd) και var(pd) εξάγονται αντιστοίχως η μέση τιμή και διακύμανση της κατανομής Kernel. Ακόμη, επισημαίνεται ότι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων υπέρβασης λαμβάνει υπόψιν τις αντίστοιχες υπερβάσεις γωνιών εκατέρωθεν των δύο πλευρών του πλοίου (port side & starboard side). Συνεπώς, η πιθανότητα υπέρβασης υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$Pr = Pr[\varphi > \varphi_d] + Pr[\varphi < -\varphi_d] \quad (5.2.1)$$

όπου φ_d μια καθορισμένη γωνία και φ η τυχαία μεταβλητή εκφράζοντας την απόλυτη γωνία διατοιχισμού. Αναφέρεται ενδεικτικά εδώ πως στα ημι-λογαριθμικά διαγράμματα των πιθανοτήτων υπέρβασης για την περίπτωση της μη γραμμικής μοντελοποίησης, εξαιτίας των διαφυγών που λαμβάνουν χώρα, παρατηρείται μια σταθεροποίηση, εν γένει, της αντίστοιχης καμπύλης για γωνίες μεγαλύτερες από τις μέγιστες γωνίες των δεδομένων της στατιστικής ανάλυσης, κατά την οποία αμελήθηκαν οι προαναφερόμενες διαφυγές. Αυτή η τιμή σταθεροποίησης αντιστοιχεί στην πιθανότητα υπέρβασης της εκάστοτε, ανάλογα με την επίδραση της μέσης ροπής ανέμου και κατά συνέπεια με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , γωνίας απώλειας ευστάθειας φ_{fail} .

5.3 Εξαγωγή και σχολιασμός στατιστικών αποτελεσμάτων

Στο συγκεκριμένο εδάφιο του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται τόσο σημαντικά στατιστικά μεγέθη και ιστογράμματα με τις παρεμβαλλόμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας PDFs, αγνοώντας τις διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος, όσο πίνακας καθώς και ημι-λογαριθμικής κλίμακας διάγραμμα των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών, λαμβάνοντας υπόψιν, σε αντίθεση με προηγουμένως, τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφυγές, όλων τις μελετούμενων περιπτώσεις. Επίσης, καταβάλλεται προσπάθεια αποσαφήνισης των διαγραμμάτων και απολογισμού της ορθολογικότητας των προκύπτων στατιστικών τιμών, ενώ παράλληλα εντοπίζονται οι διαφορές μεταξύ της γραμμικοποιημένης και της μη γραμμικής μοντελοποίησης. Στον πίνακα που ακολουθεί διαφαίνονται τα σενάρια διέγερσης (H_s, T_z) που έχουν μελετηθεί στατιστικώς.

Loading Condition	Excitation Scenario (Hs[m], Tz[s])
Loadcase 18	(6.5m, 14.5s)
	(6.5m, 15.5s)
	(6.5m, 9.5s)
Loadcase 22	(8.5m, 12.5s)
	(8.5m, 10.5s)
	(8.5m, 16.5s)
Loadcase 27	(8.5m, 16.5s)
	(8.5m, 11.5s)
	(8.5m, 13.5s)
Loadcase 31	(7.5m, 13.5s)
	(7.5m, 16.5s)
	(7.5m, 10.5s)

Πίνακας 5.1: Στατιστικώς μελετούμενες περιπτώσεις

Εδώ αξίζει να τονισθεί για μια ακόμη φορά ότι όλες οι διεγέρσεις που επενεργούν σε συγκεκριμένη/στην ίδια κατάσταση φόρτωσης αντιπροσωπεύονται από κοινό σημαντικό ύψος κύματος H_s . Δεδομένου, όμως, ότι το τελευταίο συνδέεται ντετερμινιστικά με τη μέση ταχύτητα ανέμου, μέσω της εξίσωσης (3.2.4), εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα μελετούμενα σενάρια διέγερσης της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης χαρακτηρίζονται από κοινό φάσμα ριπών ανέμου Danenport και ταυτόχρονα από κοινές γωνίες ισορροπίας αλλά και απώλειας ευστάθειας υπό δεδομένη μέση ροπή ανέμου.

Loading Condition - Significant Wave Height	Equilibrium angle due to mean wind moment φ_s (deg)	Failure angle under each mean wind moment $\varphi_{fail+}/\varphi_{fail-}$ (deg)	Equivalent area virtual limit angle (equivalent failure angle) $\varphi_{EA+}/\varphi_{EA-}$ (deg)
LC18 - Hs=6.5m	1.5	46.4/-46.4	45.01/-45.09
LC22 - Hs=8.5m	1.29	48.9/-48.9	47.88/-47.93
LC27 - Hs=8.5m	5.07	40/-42	43.45/-42.95
LC31 - Hs=7.5m	1.7	50/-50	50.64/-50.58

Πίνακας 5.2: Γωνία ευσταθούς ισορροπίας, γωνία απώλειας ευστάθειας και οριακή γωνία ισοδύναμης περιοχής των μελετούμενων καταστάσεων φόρτωσης

Από τον Πίνακα 5.2 παρατηρείται ότι η γωνία ισορροπίας της κατάστασης φόρτωσης 27 είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες των υπολοίπων καταστάσεων φόρτωσης. Αυτό επεξηγείται λόγω του αρκετά μικρού μετακεντρικού ύψους GM της δεδομένης κατάστασης φόρτωσης, γεγονός το οποίο μεταφράζεται στο Σχήμα 4.4 ως μικρή κλίση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς υπό μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης, και της έντονης αυξητικής τάσης της κλίσης του μοχλοβραχίονα για μικρές γωνίες (αύξηση δυσκαμψίας – “hardening spring effect”).

Κάτωθεν διακρίνεται πίνακας με τους ισοδύναμους γραμμικοποιημένους συντελεστές απόσβεσης μ_e , που προέκυψαν μέσω της εξίσωσης (3.2.2.2), όλων των περιπτώσεων.

Loading Condition	Excitation Scenario (Hs[m],Tz[s])	Equivalent Linear Roll Damping Coefficient μ_e [$\frac{1}{s}$]
Loadcase 18	(6.5m,14.5s)	0.048
	(6.5m,15.5s)	0.05
	(6.5m,9.5s)	0.023
Loadcase 22	(8.5m,12.5s)	0.031
	(8.5m,10.5s)	0.026
	(8.5m,16.5s)	0.031
Loadcase 27	(8.5m,16.5s)	0.023
	(8.5m,11.5s)	0.013
	(8.5m,13.5s)	0.015
Loadcase 31	(7.5m,13.5s)	0.04
	(7.5m,16.5s)	0.04
	(7.5m,10.5s)	0.031

Πίνακας 5.3: Ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης ⁴

Τέλος, δε μπορεί να παραληφθεί ότι κάθε περίπτωση {καταστάσης φόρτωσης – κατάσταση θάλασσας (Hs,Tz)} αναλύθηκε ξεχωριστά καθώς και διατυπώθηκαν συνοπτικά σχετικά συμπεράσματα και αξιολογήσεις των αποτελεσμάτων.

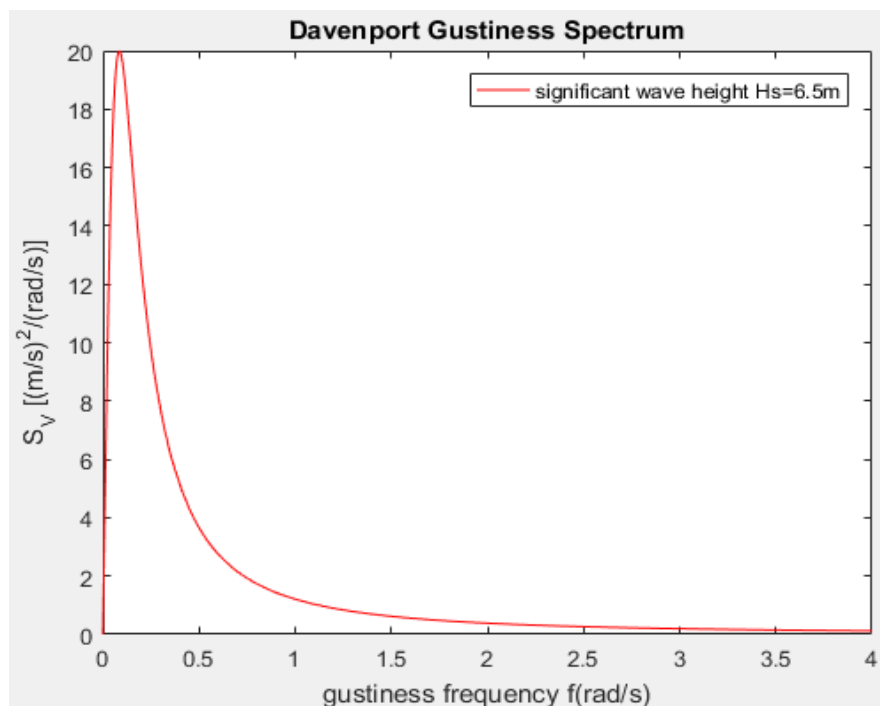
5.3.1 Κατάσταση Φόρτωσης 18

Για τη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης έχουν μελετηθεί οι τρεις καταστάσεις θάλασσας που αντιπροσωπεύονται από σημαντικό ύψος κύματος Hs=6.5m και μέση περίοδο ανύψωσης

⁴ Υπό την επίδραση των σεναρίων (Hs=7.5m,Tz=13.5s) και (Hs=7.5m,Tz=16.5s) στην κατάσταση φόρτωσης 31 καθώς επίσης και των σεναρίων (Hs=8.5m,Tz=12.5s) και (Hs=8.5m,Tz=16.5s) στην κατάσταση φόρτωσης 22, έχουν καταγραφεί κοινοί ισοδύναμοι γραμμικοποιημένοι συντελεστές απόσβεσης για την εκάστοτε φόρτωση λόγω εγγενών στρογγυλοποιήσεων στο 4^ο δεκαδικό.

της ελεύθερης επιφάνειας $T_z=14.5s$ και $T_z=15.5s$ και $T_z=9.5s$ αντίστοιχα. Στην κατάσταση θάλασσας ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) παρατηρείται συχνότητα κορυφής του φάσματος κυματισμών ίση με 0.288 rad/s , στη κατάσταση θάλασσας ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) ίση με 0.308 rad/s ενώ στην ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$) με 0.47 rad/s . Επειδή η ιδιοσυχνότητα ισούται με $\omega_0=0.2911 \text{ rad/s}$ για τη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης, έχουν επιλεχθεί να μελετηθούν οι επιδράσεις στην απόκριση του πλοίου δύο καταστάσεων θάλασσας με κοντινές τιμές συχνοτήτων, μιας και η συχνότητα κορυφής ω_{peak} και των δυο δε συμπίπτει με την ω_0 , αν και για την περίπτωση της ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) βρίσκεται, αν παρατηρήσει κανείς, πιο κοντά. Αυτό, απλώς, επισημαίνεται προς αποφυγή συγχύσεων αφού προγενέστερα είχε τονισθεί ότι επρόκειτο να εξεταστεί η κατάσταση θάλασσας της οποίας η περίοδος κορυφής θα βρισκόταν πολύ κοντά στην ιδιοπερίοδο T_0 του συστήματος, καθώς και ακόμη καταστάσεις κατά τις οποίες οι περίοδοι κορυφής κυματισμών βρίσκονται ως επί το πλείστον μακριά από την τελευταία (ενν. ιδιοπερίοδο). Να σημειωθεί ότι και για τις τρεις περιπτώσεις, λόγω του γεγονότος πως έχουν το ίδιο σημαντικό ύψος κύματος, έχουν την ίδια γωνία ισορροπίας λόγω της μέσης ροπής ανέμου η οποία είναι ίση με $\varphi_s = 1.5 \text{ deg}$.

Το φάσμα Davenport είναι κοινό για όλα τα μελετηθέντα σενάρια διέγερσης ανέμου, καθώς έχει επιλεχθεί ίδιο σημαντικό ύψος κύματος. Η αναπαράστασή του διαφαίνεται παρακάτω.

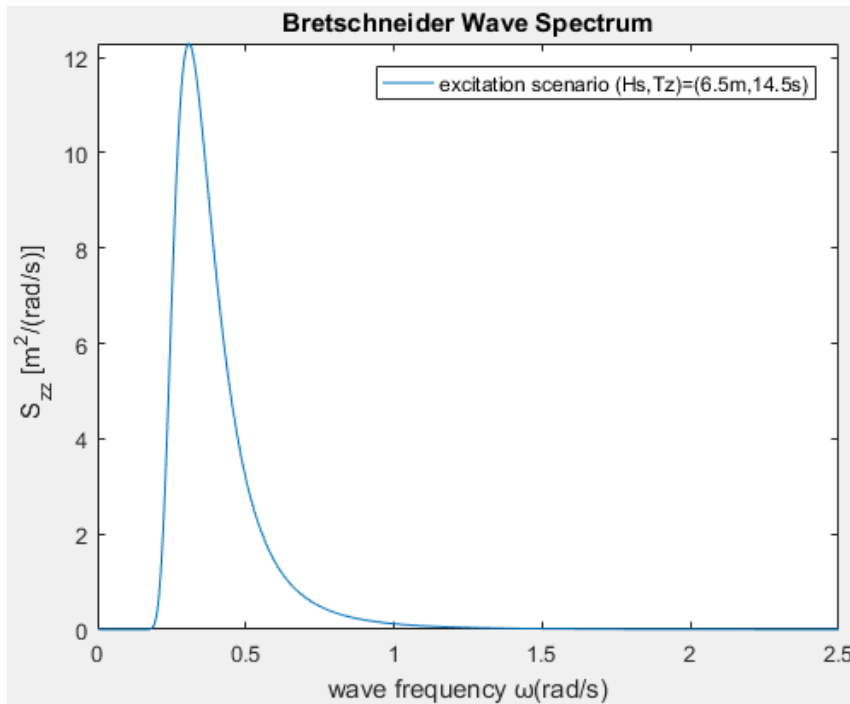


Σχήμα 5.1: Φάσμα Davenport για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=6.5m$

5.3.1.1 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC18- ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$)

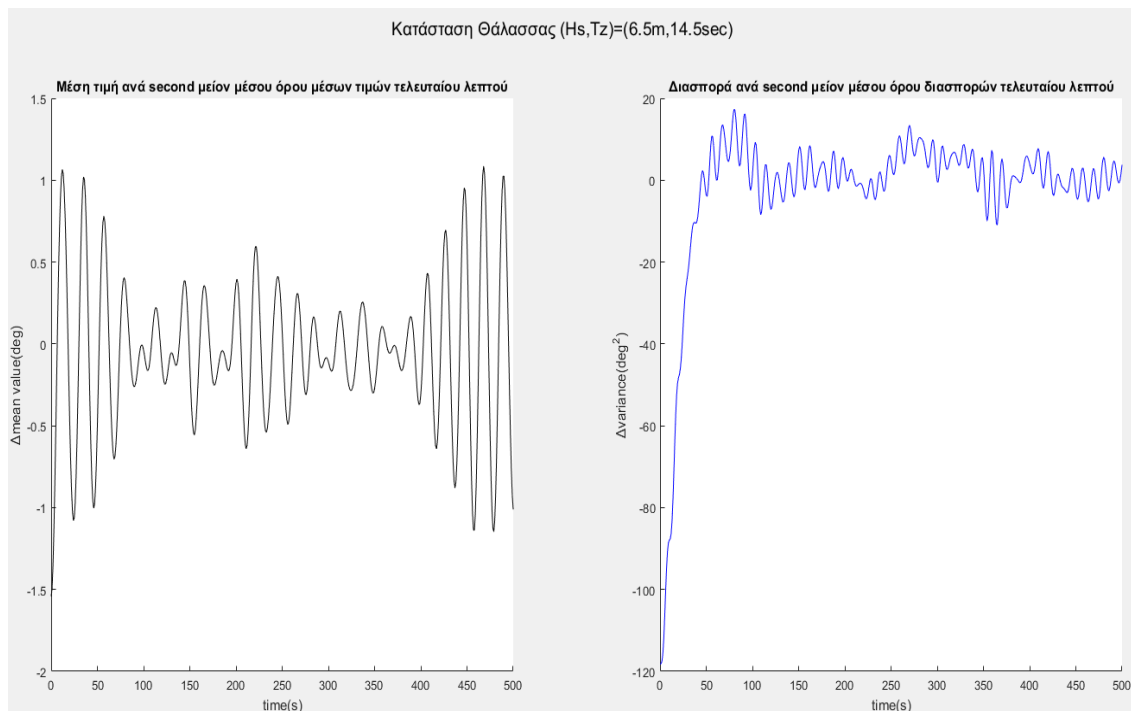
Το σενάριο ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) χαρακτηρίζεται από μια σχετικά χαμηλή συχνότητα εμφάνισης σε 100000 παρατηρήσεις, ειδικότερα όντας ίση με $4.22 \cdot 10^{-4}$.

Παρακάτω παρατίθεται η διαγραμματική απεικόνιση του φάσματος Bretschneider του εν λόγω σεναρίου διέγερσης, το οποίο έχει περίοδο κορυφής ίση με $T_{\text{peak}}=20.4s$, ευρισκόμενη αρκετά κοντά με την ιδιοσυχνότητα του πλοίου στη προκειμένη κατάσταση φόρτωσης.

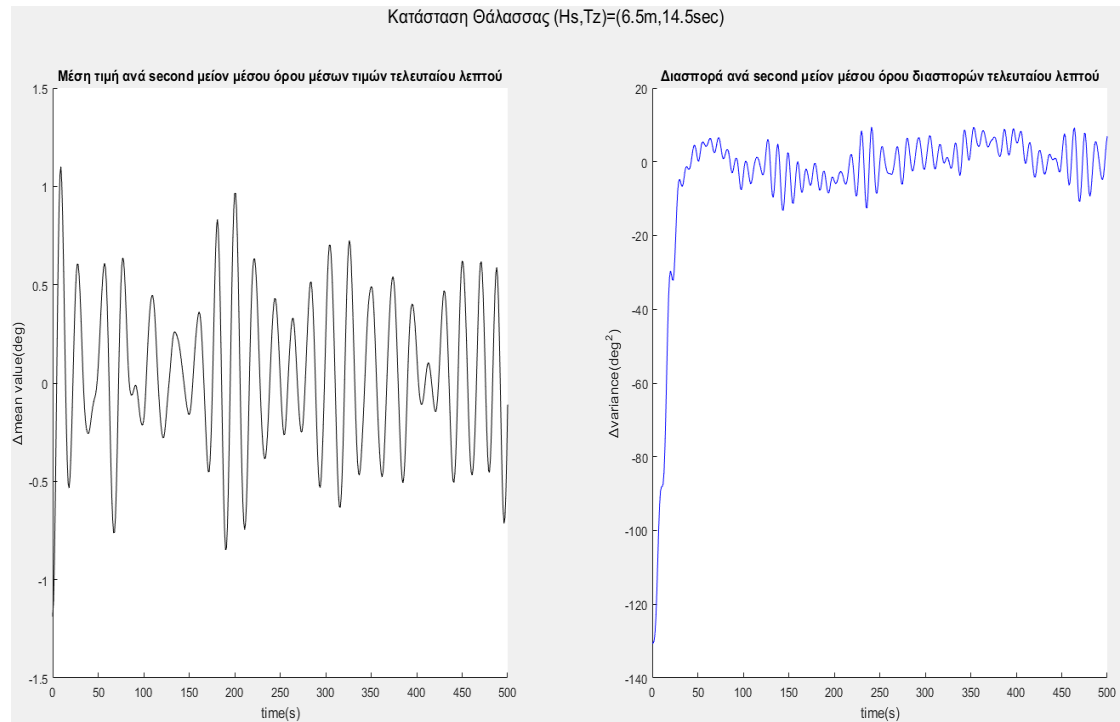


Σχήμα 5.2: Φάσμα Bretschneider για το σενάριο διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$)

Εν συνεχεία, διακρίνονται τα διαγράμματα των διαφορών μέσης τιμής και διασποράς από το μέσο όρο των μέσων τιμών και διασπορών του τελευταίου λεπτού αντίστοιχα συναρτήσει του χρόνου σε διάρκεια έκθεσης του πλοίου ίση με 500s υπό τη συνδυασμένη επίδραση κυματισμών και ανέμου και για τα δύο μοντέλα. Σημειώνεται ότι στο εξής τα παρακάτω διαγράμματα χάριν απλούστευσης θα αναφέρονται ως διαγράμματα μέσης τιμής και διασποράς.



Σχήμα 5.3: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC18-($H_s=6.5s, T_z=14.5s$)}

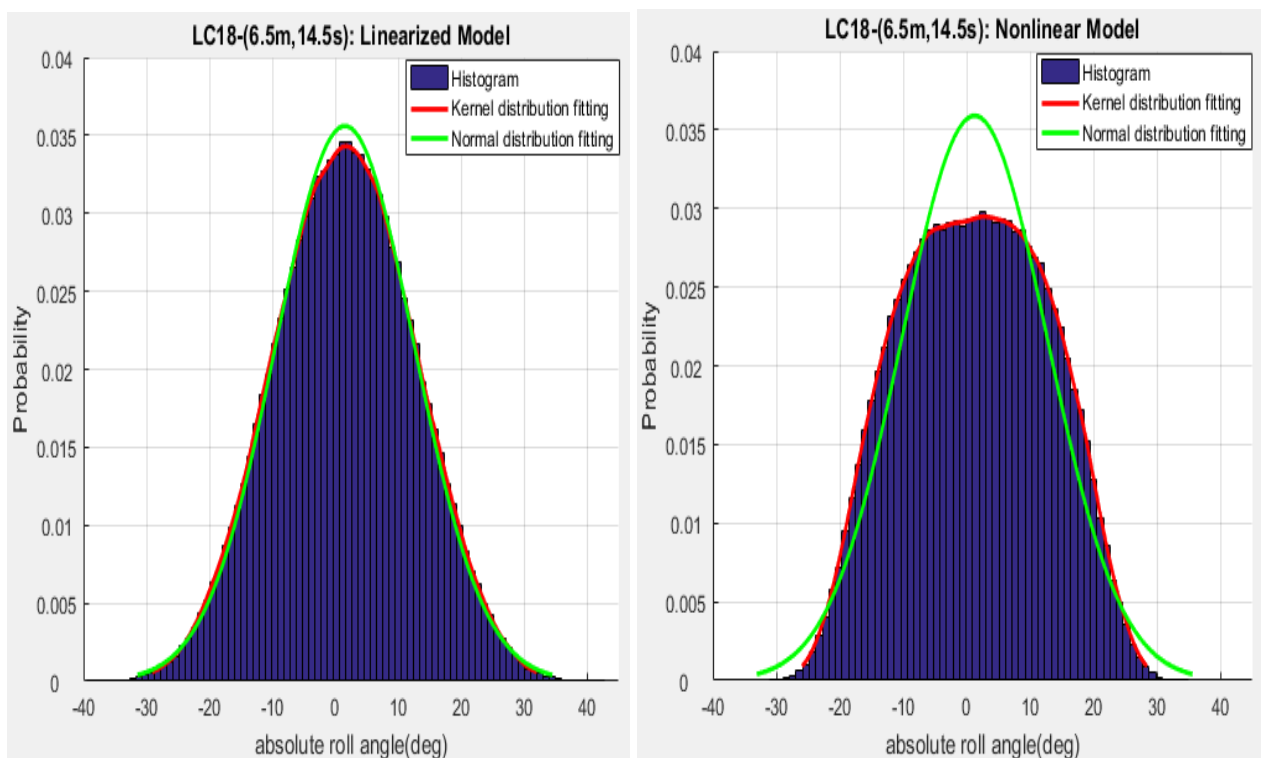


Σχήμα 5.4: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC18- $(H_s=6.5s, T_z=14.5s)$ }

Από το Σχήμα 5.3 παρατηρείται ότι για το γραμμικοποιημένο μοντέλο, παρόλο που επικρατεί έντονος θόρυβος στο σύστημα, ως χρόνος μονιμοποίησης των στατιστικών θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα 100s, ενώ από το Σχήμα 5.4 για το μη γραμμικό, διαφαίνεται πως τα στατιστικά σταθεροποιούνται μετά από 1min περίπου.

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Διενεργώντας 15000 προσομοιώοντας της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού καθώς και της μη γραμμικής μέχρι τα 5min και λαμβάνοντας, κατόπιν, 300000 δεδομένα από χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η απόκριση καθίσταται μόνιμη αμφότερα, παράγονται ιστογράμματα με τις παρεμβλλόμενες σ'αυτά συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας PDFs τα οποία διαφάνονται ακολούθως. Να σημειωθεί ότι για το κάθε μοντέλο στα στατιστικά δεδομένα έχουν παρεμβληθεί η PDF που ακολουθεί κανονική κατανομή και η εκτιμήτρια PDF Kernel. Επίσης, τα ισοκατανεμημένα εύρη(bins) γωνιών διατοιχισμού έχουν ληφθεί ίσα με 1deg. Άξιο προσοχής, επιπλέον, καθίσταται το γεγονός ότι για την εξαγωγή των ιστογραμμάτων, PDFs αλλά και των στατιστικών μεγεθών των κατανομών αμελούνται οι διαφυγές του συστήματος στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης. Συνεπώς, ο αριθμός των δεδομένων θα είναι 299900 στην εν λόγω μοντελοποίηση. Επισημαίνεται, εδώ, πως σημειώθηκαν 5 διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος, δίνοντας πιθανότητα ανατροπής/διαφυγής ίση με $3.33 \cdot 10^{-4}$.



Σχήμα 5.5: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=14.5s)}

Loadcase 18 (Hs,Tz)=(6.5m,14.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	100	60
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	5
Number of Data	300000	299900
Mean Value (deg)	1.51	1.22

Variance (deg ²)	120.53	132.13
Mean Value of 100 extreme values (deg)	35.9	30.71
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	1.39	0.86
Mean Value of 10 extreme values (deg)	39.18	32.67
Maximum absolute rolling angle (deg)	42.8	34.61

Πίνακας 5.4: Στατιστικές Τιμές για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=14.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Στην περίπτωση του γραμμικοποιημένου μοντέλου (αριστερό σκέλος Σχήματος 5.5), το οποίο διέπει το κριτήριο δεύτερης γενιάς “Level 2 Dead Ship Condition failure mode”, η PDF που ακολουθεί τη κατανομή Kernel είναι πανομοιότυπη με την αντίστοιχη που ακολουθεί τη κανονική κατανομή και έτσι επιβεβαιώνονται οι αρχές που διέπουν τα γραμμικά μοντέλα, εφόσον φάσμα θαλάσσης και ανέμου θεωρείται πως ακολουθούν κατανομή Gauss. Βέβαια, παρατηρείται ότι υπάρχει γύρω από την περιοχή της μέσης τιμής μια μικρή απόκλιση μεταξύ των κατανομών Gauss και Kernel αλλά θεωρείται αποδεκτή, καθώς οι τιμές πιθανότητας που δίνουν οι δύο εν λόγω κατανομές στο συγκεκριμένο διάστημα έχουν μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση περίπου 5%. Η ύπαρξη της δεδομένης απόκλισης δικαιολογείται βάσει του γεγονότος ότι η στοχαστική διαδικασία της διέγερσης θεωρείται αμιγώς Γκαουσιανή όταν ο αριθμός των επιμέρους συνιστωσών (εδώ ανέμου και κυματισμών) είναι αρκετά μεγάλος (θεωρητικά $N_{components} \rightarrow \infty$) (Αθανασούλης, 2007)[15]. Στη προκειμένη περίπτωση, επειδή το βήμα διακριτοποίησης των φασμάτων ριπών ανέμου και κυματισμών, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με την χρονική διάρκεια του πειράματος (5min), είναι σχετικά υψηλό, εξάγονται πεπερασμένου, σχετικά μικρού, αριθμού συνιστώσες (25 συγκεκριμένα) με αποτέλεσμα η στοχαστική διεργασία της διεγέρσεως να αποκλίνει ελάχιστα από την Γκαουσιανή. Δεδομένου όμως ότι το συγκεκριμένο σύστημα είναι γραμμικό, αυτή η απόκλιση μεταβιβάζεται και στη στοχαστική ανάλυση της απόκρισης που μεταφράζεται ως διαφορά μεταξύ της Γκαουσιανής PDF και της εκτιμήτριας Kernel/των τιμών πιθανότητας ιστογράμματος. Ως μέση τιμή της κατανομής προέκυψε η $\bar{\varphi} = 1.51deg$, πολύ κοντά στη γωνία ισοροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου, και διασπορά ίση με $Var = 120.53deg^2$ (Πίνακας 5.4). Η μέση τιμή των 100 υψηλότερων γωνιών προέκυψε ίση με 35.9deg με τυπική απόκλιση 1.39deg, ενώ η μέση τιμή των υψηλότερων 10 προέκυψε ίση με 39.18deg. Η μέγιστη γωνία των στατιστικών δεδομένων είναι η $\varphi_{max} = 42.3deg$, η οποία δεν απέχει και πολύ από την οριακή γωνία $\varphi_{EA} = 45deg$ υπό το δεδομένο σενάριο διέγερσης ανέμου. Ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης προέκυψε μέσω στοχαστικής γραμμικοποίησης ίσος με 0.048 1/s.

Μη γραμμικό μοντέλο

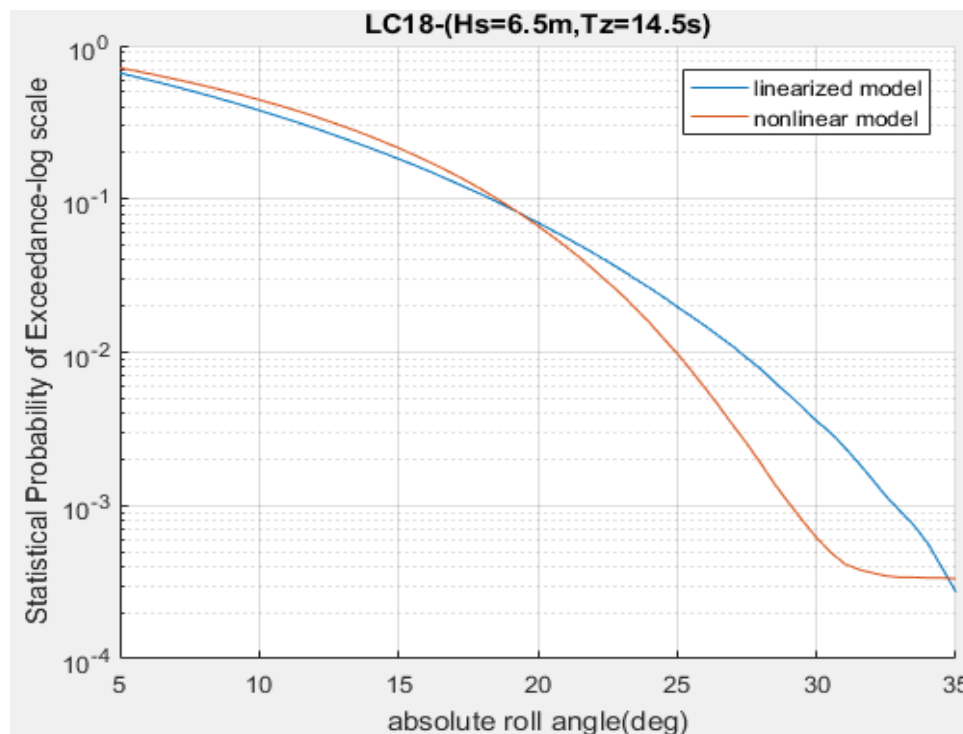
Αντιθέτως, όσον αφορά στη μη γραμμική μοντελοποίηση, παρατηρείται ότι το δεδομένο ιστογράμμα είναι εκ διαμέτρου διαφορετικό από αυτό του γραμμικοποιημένου και δίνει την εντύπωση ότι πρόκειται για ένα «ισχυρά» μη γραμμικό σύστημα. Οι έντονες μη γραμμικότητες (non-linearities), οι οποίες εισάγονται στο σύστημα αφενός μεν από τους μη γραμμικούς όρους του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, οι οποίοι εκφράζονται από τη σχετική γωνία διατοιχισμού $(\varphi - \alpha_{eff})^n \forall n = 3,5,7...$, αφετέρου δε από τη μη γραμμική έκφραση του όρου απόσβεσης, είναι αυτές που συντελούν στην δεδομένη μορφή του ιστογράμματος και κατά συνέπεια της, παρεμβληθείσας σ’ αυτό, εκτιμήτριας PDF ακολουθώντας κατανομή Kernel και της αισθητά υψηλής απόκλισής της από την αντίστοιχη κανονική, όπως διαφαίνεται στο δεξί

σκέλος του Σχήματος 5.5. Η μέση τιμή της εκτιμήτριας PDF βρέθηκε ίση με $\bar{\varphi} = 1.22deg$ (Πίνακας 5.4), η οποία εδώ διαφέρει, όντας μικρότερη, από τη γωνία ισορροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου $\varphi_s = 1.5deg$. Η ύπαρξη της δεδομένης απόκλισης μπορεί να αιτιολογηθεί βάσει του γεγονότος ότι δημιουργείται μια ασυμμετρία στον μοχλοβραχίονα επαναφοράς ο οποίος καθίσταται, εν προκειμένω, μη γραμμικός λόγω της ύπαρξης της ροπής ανέμου. Πλέον ο μοχλοβραχίονας του συστήματος είναι ο $GZ_{res}=GZ-lwind$, όπου $lwind$ ο μοχλοβραχίονας ροπής ανέμου, και έτσι, εν γένει, παρατηρείται μια περίσσεια επαναφοράς στις γωνίες διατοιχισμού τις οποίες αποκτά το πλοίο κινούμενο με φορά αντίθετη αυτής του ανέμου (windward). Μ' αυτόν τον τρόπο, στις περισσότερες διενργηθείσες προσομοιώσεις το εύρος των εν λόγω γωνιών διαφαίνεται μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο κατά τη leeward κατεύθυνση με αποτέλεσμα η μέση θέση ισορροπίας τους να καθίσταται μικρότερη της φ_s . Αυτό, μεταβιβάζεται στη δεδομένη στατιστική ανάλυση με τη μορφή της απόκλισης μεταξύ της μέσης τιμής της κατανομής και της προαναφερθείσας γωνίας ευσταθούς ισορροπίας φ_s . Συνεχίζοντας, από το ιστόγραμμα διαφαίνεται ότι οι συχνότητες εμφάνισης των ευρών γωνιών που βρίσκονται στη γειτονιά της μέσης τιμής καθίστανται αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες της γραμμικής μοντελοποίησης, ενώ ταυτόχρονα οι συχνότητες εμφάνισης αυτών που βρίσκονται λίγο πιο απομακρυσμένα είναι μεγαλύτερες από αυτές του αντιτιθέμενου μοντέλου. Γι' αυτό και η παρεμβαλλόμενη PDF Kernel φαίνεται να είναι πεπλατυσμένη στα άκρα της και να παρουσιάζει μικρότερο μέγιστο σε σχέση με τη Γκαουσιανή. Αυτό μπορεί να αποδοθεί ενδεχομένως στο εγγενές χαρακτηριστικό (εγγενής ιδιότητα) των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων να μεταπηδούν θέσεις ισορροπίας λόγω μεταβολών των εσωτερικών παραμέτρων του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η ένταξη της σχετικής γωνίας στην έκφραση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς διαστρεβλώνει τους μη γραμμικούς συντελεστές των όρων του τελευταίου (π.χ. το μετακεντρικό ύψος GM) με συνεπακόλουθο τη διαταραχή του συστήματος (Bulian & Francescutto, 2011)[2]. Έτσι, μπορεί να επεξηγηθεί η η πιο συχνή εμφάνιση γωνιών που βρίσκονται απομακρυσμένες από τη μέση τιμή συγκριτικά με το αντιπαραβαλλόμενο μοντέλο. Επίσης, η διακύμανση προέκυψε ίση με $Var \cong 132deg^2$ και καθίσταται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου μοντέλου, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η απόκλιση των πιθανοτήτων εμφάνισης των απομακρυσμένων γωνιών από τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου μοντέλου διαφαίνεται εν γένει αισθητή. Τέλος, ο μη γραμμικός όρος απόσβεσης, εκτός από τις συνεπαγόμενες μη γραμμικότητες που εισάγει στο σύστημα, συνεισφέρει στη μείωση από τη μία των γωνιών/πλατών διατοιχισμού και από την άλλη του χρόνου κατά τον οποίο επέρχεται η μονιμοποίηση της απόκρισης σε σχέση πάντα με το γραμμικοποιημένο μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή των 100 και των 10 μεγαλύτερων τιμών απόλυτης γωνίας προέκυψε ίση με 30.71deg και 32.67deg αντίστοιχα, ενώ η μέγιστη γωνία των δεδομένων είναι η $\varphi_{max} = 34.61deg$. Η τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων δεδομένων προέκυψε ίση με 0.86deg και καθίσταται μικρότερη από την αντίστοιχη της γραμμικής μοντελοποίησης χάρη στην παρουσία της της μη γραμμικής απόσβεσης. Ωστόσο, οι μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μέγιστων γωνιών διατοιχισμού των δύο μοντέλων θέτουν ερωτηματικά για την εγκυρότητα της γραμμικοποίησης της απόσβεσης. Εδώ κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί η μέγιστη γωνία των δεδομένων καθώς και η μέση τιμή των 10 μεγαλύτερων τιμών των δεδομένων υπερβαίνουν τη γωνία κατά την οποία ο μοχλοβραχίονας παίρνει τη μέγιστη τιμή του $\varphi_{GZmax} = 31.79deg$, εκεί που η επαναφορά του συστήματος καθίσταται η μέγιστη δυνατή. Δηλαδή, αντιστοιχούν στην περιοχή γωνιών κατά την οποία η επαναφορά του συστήματος φθίνει.

Πιθανότητες Υπέρβασης (Statistical Probabilities of Exceedance)

Οι πιθανότητες υπέρβασης, οι οποίες αποτελούν το έτερον ήμισυ των πιθανοτήτων της αθροιστικής κατανομής καθώς προστιθέμενες στις τελευταίες δίνουν τη μονάδα, έχουν υπολογιστεί προσμετρώντας τις διαφυγές του συστήματος στα πλαίσια της μη γραμμικής

μοντελοποίησης. Έτσι, παρακάτω διαφαίνονται τόσο αντιπροσωπευτικό αυτών ημι-λογαριθμικής κλίμακας διάγραμμα όσο και σχετικός πίνακας στον οποίο, μεταξύ άλλων, καταγράφονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις ανάμεσα του που προβλέπονται από τα δύο αντιπαραβαλλόμενα μοντέλα.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=14.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A *100%]
5	0.6626	0.7163	8.11%
10	0.379	0.444	17.14%
13	0.2498	0.2987	19.59%
15	0.1826	0.2151	17.75%
20	0.0701	0.0668	-4.74%
25	0.0198	0.0098	-50.36%
30	0.0036	0.0006	-82.66%
35	0.00027	0.00033	21.95%

Πίνακας 5.5: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=14.5s)}

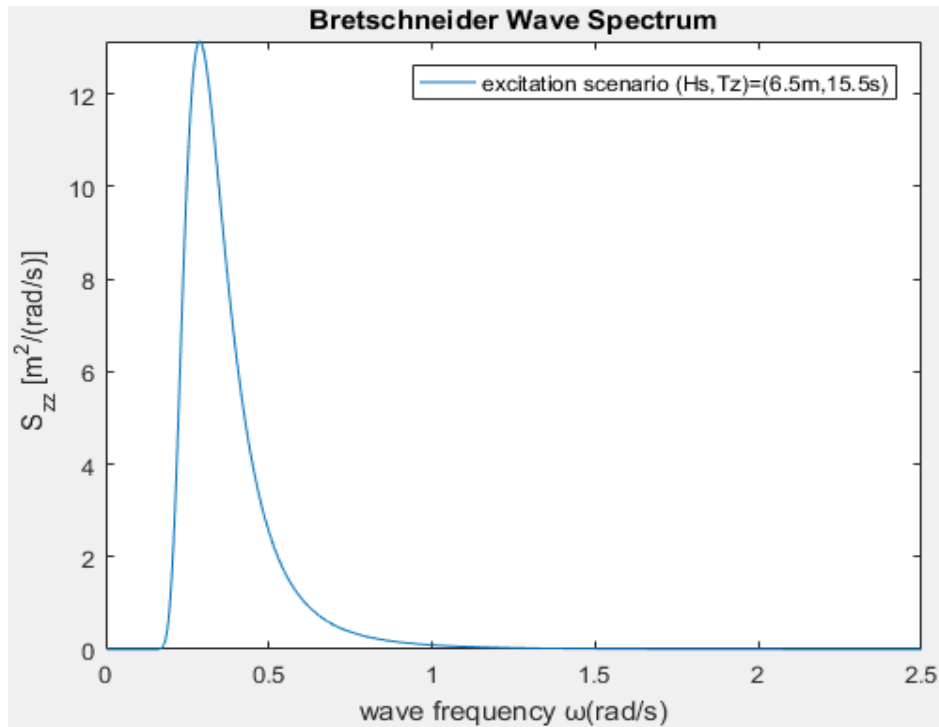
Από το Σχήμα 5.6 και τον Πίνακα 5.5 παρατηρείται ότι οι υπερβάσεις γωνιών μέχρι περίπου λίγο πριν τις 20deg καθίσταται πιο συχνές κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση από τις αντίστοιχες της γραμμικοποιημένης ενώ σπανιότερες για γωνίες μεγαλύτερες των 20deg, συμπεριλαμβανομένων και των 20deg, μέχρι και λίγο πριν τις 35deg. Αυτό συμβαίνει λόγω των μειωμένων μέγιστων τιμών γωνίας που παρουσιάζει το μη γραμμικό μοντέλο σε σχέση με το γραμμικοποιημένο κυρίως λόγω της χρήσης των μη γραμμικών όρων απόσβεσης, με τη ποσοστιαία διαφορά να παρουσιάζει αυξητική τάση κατ' απόλυτη τιμή με την πάροδο γωνιών.

Ο αριθμός των διαφυγών, 5 για την ακρίβεια, δεν είναι αρκετός ούτως ώστε να υπερκαλύψει τη δράση της μη γραμμικής ροπής απόσβεσης και έτσι παρουσιάζονται αυξημένες πιθανότητες υπέρβασης γωνιών στο διάστημα από 20deg μέχρι και λίγο πριν τις 35deg. Κατόπιν, από τις 35deg περίπου και έπειτα υπερτερούν τα δεδομένα της μη γραμμικής μοντελοποίησης έναντι αυτών της γραμμικοποιημένης λόγω της ενσωμάτωσης των διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος στη παρούσα ανάλυση και την ταυτόχρονη ελάττωση των δεδομένων της γραμμικής μοντελοποίησης, οδηγώντας στην υποεκτίμηση των υπερβάσεων γωνιών υψηλότερων των 35deg από πλευράς της τελευταίας (ενν. γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης). Πάντως, μέχρι τις 20deg η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο μοντέλων ως προς αυτών του γραμμικοποιημένου δε ξεπερνά το 20%, που κρίνεται ως μια όχι και τόσο αισθητή διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων. Από την άλλη, το γραμμικοποιημένο μοντέλο φαίνεται πως υπερεκτιμά αρκετά την εμφάνιση καθώς και υπέρβαση υψηλών, σχετικά, γωνιών διατοιχισμού, καθώς η απόκλιση μεταξύ των αντίστοιχων πιθανοτήτων υπέρβασης των 30deg των δύο μοντέλων ως προς αυτής του γραμμικοποιημένου είναι 82%, με την πιθανότητα υπέρβασης κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση να αποτελεί μόλις το 18% της αντίστοιχης της γραμμικοποιημένης. Τέλος, σημειώνεται πως παραλείπονται πιθανότητες υπέρβασης γωνιών μεγαλύτερων των 35deg για επακόλουθη σύγκρισή τους καθώς, όπως διαφαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα, αυτές του γραμμικοποιημένου μοντέλου ολόενα και συρρικνώνονται και παράλληλα καθίστανται σχεδόν μηδενικές τη στιγμή που οι αντίστοιχες του μη γραμμικού σταθεροποιούνται περίπου από τις 32deg και έπειτα σε μια τιμή η οποία αντιστοιχεί στην πιθανότητα ανατροπής $3.33 \cdot 10^{-4}$, έχοντας ως επακόλουθο τη γιγάντωση της μεταξύ τους απόκλιση.

5.3.1.2 Στατιστική ανάλυση της περίπτωσης LC18-(Hs=6.5m, Tz=15.5s)

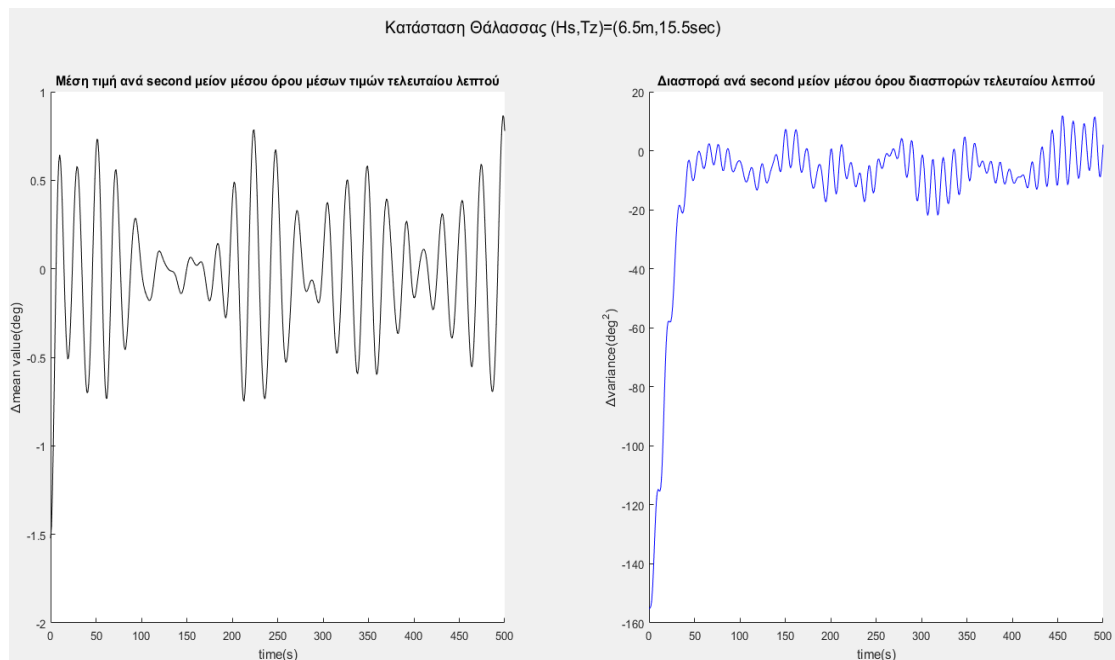
Η συχνότητα εμφάνισης του σεναρίου διέγερσης (Hs=6.5m, Tz=15.5s) λαμβάνεται από το Wave Scatter Table ίση με $1.09 \cdot 10^{-4}$, όντας μικρότερη από την αντίστοιχη του σεναρίου (Hs=6.5m, Tz=14.5s).

Το φάσμα κυματισμών για το δεδομένο σενάριο διέγερσης, του οποίου μεγάλα ποσά ενέργειας παρατηρούνται για χαμηλόσυχνους κυματισμούς, διαφαίνεται συναρτήσει της συχνότητας κυματισμών ακολούθως. Υπό την επενέργεια του συγκεκριμένου σεναρίου διέγερσης η περίοδος κορυφής του φάσματος κυματισμών $T_p=21.82s$ ταυτίζεται σχεδόν με την ιδιοπερίοδο του συστήματος.

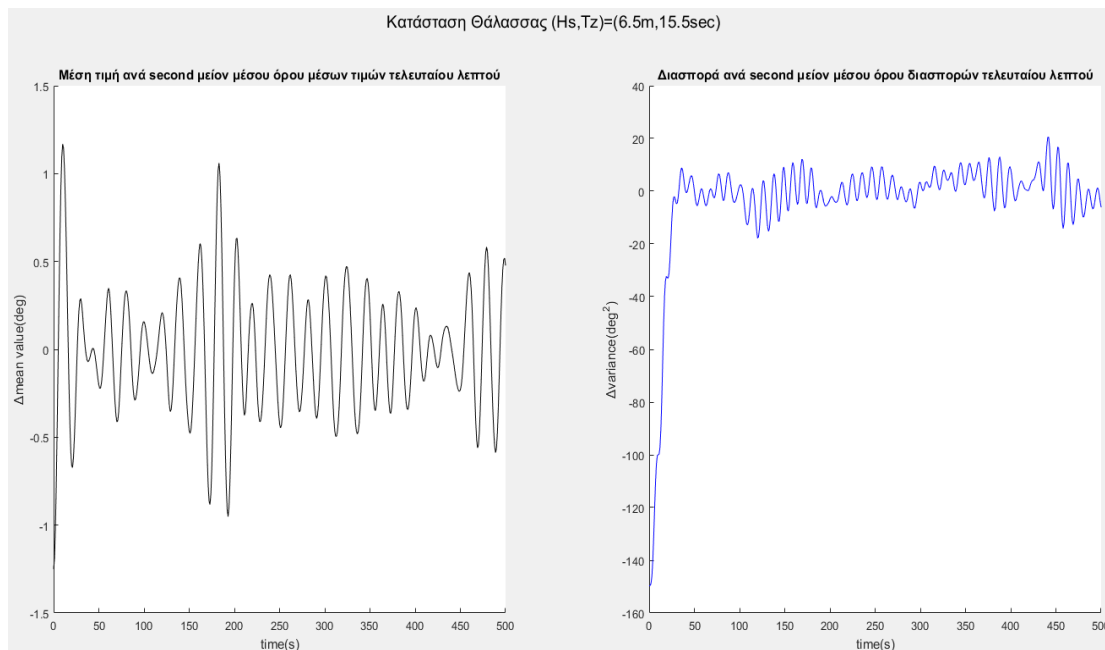


Σχήμα 5.7: Φάσμα Bretschneider για το σενάριο διέγερσης (Hs=6.5m, Tz=15.5s)

Ομοίως με προηγουμένως εξάγονται τα διαγράμματα μέσης τιμής και διακύμανσης και των δύο συγκρινόμενων μοντέλων συναρτήσει του χρόνου για εύρεση της χρονικής στιγμής σταθεροποίησής τους.



Σχήμα 5.8: Γραμμικοποιημένου Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC18-(Hs=6.5m, Tz=15.5s)}

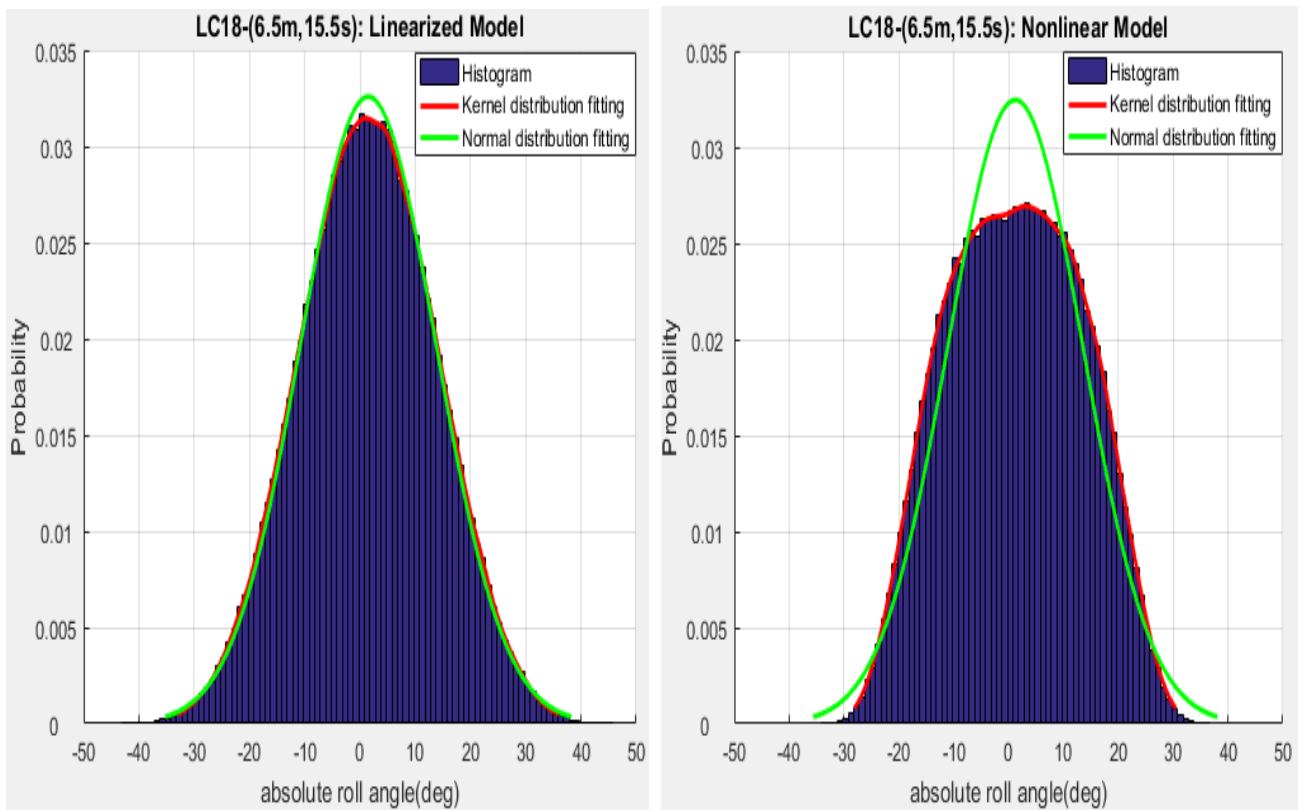


Σχήμα 5.9: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC18- (Hs=6.5m,Tz=15.5s)}

Παρατηρώντας τις δύο παραπάνω εικόνες, παρόλο της ύπαρξης αισθητών θορύβων και στα δύο εξεταζόμενα συστήματα, μπορεί να εξαχθεί άμεσα το συμπέρασμα ότι η χρονική στιγμή μονιμοποίησης των στατιστικών τιμών μετά από 1000 προσομοιώσεις μέχρι τα 500s ισούται αφενός περίπου με 2min για το γραμμικοποιημένο μοντέλο, αφετέρου με 1min για το μη γραμμικό.

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Κάτωθεν διαφαίνονται τα ιστογράμματα με τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που παρεμβάλλονται για το γραμμικοποιημένο μοντέλο και για το μη γραμμικό καθώς και πίνακας που περιλαμβάνει τις στατιστικές τιμές των κατανομών. Τα στατιστικά αποτελέσματα προέκυψαν κατόπιν διενέργειας 15000 προσομοιώσεων των 5min και συλλογής 360000 δεδομένων για τη γραμμικοποιημένη και 359760 δεδομένων για τη μη γραμμική μοντελοποίηση, καθώς έχουν αμεληθεί οι διαφυγές. Δέκα(10) ήταν οι χρονοσειρές όπου παρατηρήθηκε απειρισμός του συστήματος, δίνοντας μια πιθανότητα διαφυγής ίση με $6.67 \cdot 10^{-4}$. Επίσης, τα δεδομένα αντιστοιχούν σε απόλυτες γωνίες διατοιχισμού κατά την μόνιμη απόκριση του πλοίου, δηλαδή έχουν ληφθεί για χρονικές στιγμές μεγαλύτερες των των χρόνων σταθεροποίησης των στατιστικών μεγεθών και των δύο μοντελοποιήσεων. Τέλος, τα εύρη τιμών γωνιών σημειώνεται ότι λαμβάνονται ισόποσα 1deg.



Σχήμα 5.10: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=15.5s)}

Loadcase 18 (Hs,Tz)=(6.5m,15.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	120	60
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	21	10
Number of Data	360000	359760
Mean Value (deg)	1.5	1.24
Variance (deg ²)	149.8	152.13
Mean Value of 100 extreme values (deg)	41.32	33.52
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	1.626	0.856
Mean Value of 10 extreme values (deg)	44.61	35.34
Maximum absolute rolling angle (deg)	45.78	36.14

Πίνακας 5.6: Στατιστικές Τιμές για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=15.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Αρχικά, όσον αφορά στο γραμμικοποιημένο μοντέλο (Σχήμα 5.10) παρατηρείται ότι η, παρεμβλλόμενη στο αντίστοιχο ιστόγραμμα, PDF που ακολουθεί μη παραμετρική κατανομή Kernel ομοιάζει αρκετά με την αντίστοιχη που ακολουθεί κανονική κατανομή, με την τελευταία να δίνει, ίσως, λίγο μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας ιδίως γύρω από τη μέση τιμή, γεγονός που κρίνεται αποδεκτό λόγω σχετικά μικρού σφάλματος (περίπου 4%-5%). Συμπεραίνεται, έτσι, το γεγονός ότι η απόκριση του συστήματος αποτελεί μια Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία καθώς η συναφής PDF είναι αυτή που παρεμβάλλει με απόλυτη συνέπεια τα εύρη γωνιών του ιστογράμματος. Μ' αυτόν τον τρόπο επαληθεύεται και η θεωρία, που θέλει την απόκριση, σε περίπτωση γραμμικού προβλήματος, να «αντικατοπτρίζει» τη διέγερση και να αντιπροσωπεύεται από ίδια την κατανομή μ' αυτή. Είναι εύλογο, επίσης, να σημειωθεί ότι επικρατεί συμμετρία των στατιστικών αποτελεσμάτων από την απόκριση του πλοίου, γεγονός το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των γραμμικών συστημάτων. Η μέση τιμή της κατανομής για το δεδομένο μοντέλο είναι ίση με $\bar{\varphi} = 1.5deg$ η οποία ταυτίζεται με τη γωνία ευσταθούς ισορροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου φ_s , ενώ η διακύμανση είναι ίση με $Var \cong 150deg^2$ (Πίνακας 5.6). Ακολούθως, η μέση τιμή των 100 υψηλότερων γωνιών προέκυψε ίση με 41.32deg, που αποτελεί μια ιδιαίτερα μεγάλη τιμή αν αναλογιστεί κανείς ότι η ισοδύναμη γωνία απώλειας ευστάθειας, έχοντας προκύψει με τη θεώρηση της ισοδύναμης περιοχής ("equivalent area method"), είναι ίση με 45deg, ενώ ταυτόχρονα την τελευταία προσεγγίζει η μέση τιμή των 10 υψηλότερων γωνιών η οποία ισούται με 44.61deg. Η τυπική απόκλιση των 100 μεγαλύτερων τιμών των στατιστικώς επεξεργασμένων δεδομένων βρέθηκε ίση με 1.626deg. Μέσω στοχαστικής γραμμικοποίησης προέκυψε ο ισοδύναμος γραμμικός όρος απόσβεσης ίσος με 0.05 1/s, αποτελώντας, ωστόσο, μια αρκετά μεγάλη τιμή. Τέλος, σε 21 προσομοιώσεις σημειώθηκε υπέρβαση της οριακής γωνίας φ_{EA} κατά τη διενέργεια των 15000 προσομοιώσεων προς εξαγωγή των στατιστικών αποτελεσμάτων υποδηλώνοντας, έτσι, ότι το συγκεκριμένο σενάριο κρίνεται αρκετά επικίνδυνο για το ταλαντευόμενο σύστημα, το οποίο είναι εκφρασμένο από γραμμικούς όρους απόσβεσης και επαναφοράς.

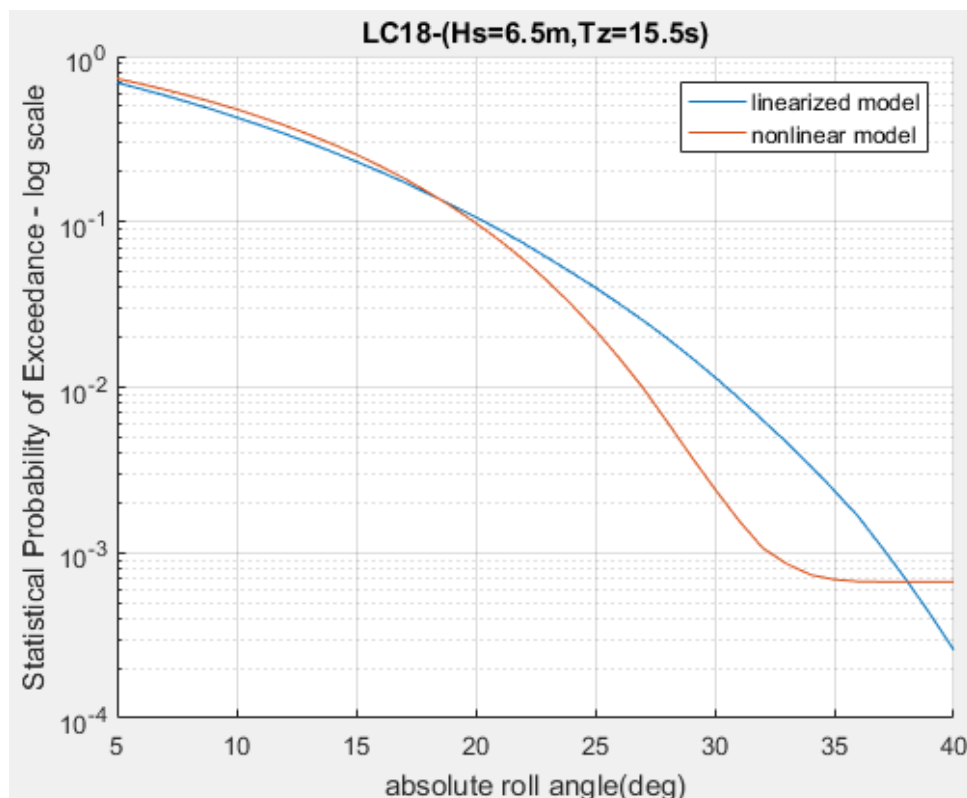
Μη γραμμικό μοντέλο

Στον αντίποδα, όσον αφορά στο μη γραμμικό πρόβλημα, παρατηρείται εξ αρχής από το Σχήμα 5.10 ότι υπάρχει πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ της παρεμβληθείσας στο δεδομένο ιστόγραμμα PDF που ακολουθεί την κατανομή Kernel με την αντίστοιχη που ακολουθεί την κανονική. Γίνεται αντιληπτό, ότι οι μη γραμμικότητες των όρων απόσβεσης και επαναφοράς είναι αυτές που επιδρούν στην αρκετά διαφορετική μορφή του δεδομένου ιστογράμματος και συνεπώς της εκτιμητριας PDF Kernel σε σχέση με την αντίστοιχη της Γκαουσιανής PDF. Γίνεται, λόγος, λοιπόν για ένα ισχυρά μη γραμμικό σύστημα καθώς οι γωνίες που λαμβάνει το πλοίο καθίστανται αρκετά υψηλές και εμπίπτουν στην έντονα μη γραμμική περιοχή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή εκτιμητριας PDF Kernel χαρακτηρίζεται από εμφανώς αυξημένη πεπλάτυνση στα άκρα, δίνοντας μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης γωνιών στο διάστημα περίπου από 12deg μέχρι 24deg σε σχέση με τις τιμές που δίνει η Γκαουσιανή, και φαίνεται να ομοιάζει σχεδόν με τη μορφή μιας παραβολής. Επίσης, το δεδομένο ιστόγραμμα και η αντίστοιχη PDF Kernel αντιπροσωπεύεται, σε αντίθεση με τη Γκαουσιανή του γραμμικοποιημένου μοντέλου, από μια οφθαλμοφανή μείωση των πιθανοτήτων εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή. Αυτό αποτελεί απόρροια τόσο των μη γραμμικών όρων απόσβεσης και επαναφοράς όσο και της εισαγωγής, ωστόσο, της σχετικής γωνίας διατοιχοιμού στον τελευταίο προαναφερθέντα όρο. Στο συγκεκριμένο σύστημα, η μέση τιμή της εκτιμητριας κατανομής βρέθηκε ίση με $\bar{\varphi} = 1.24deg$ απέχοντας από τη γωνία ευσταθούς ισορροπίας λόγω επίδρασης ανέμου $\varphi_s = 1.5deg$ (Πίνακας 5.6). Αυτό, όπως

προαναφέρθηκε και στη προηγούμενη μελέτη, είναι απόρροια της ασυμμετρίας που δημιουργείται στο μη γραμμικό μοχλοβραχίονα επαναφοράς λόγω του ανέμου. Επίσης, παρόλο που το εύρος των δεδομένων της μη γραμμικής μοντελοποίησης είναι αρκετά μειωμένο συγκριτικά με το αντίστοιχο της γραμμικοποιημένης, η εμφανώς μεγαλύτερη απόκλιση των τιμών γωνίας από τη μέση τιμή συντελεί στη λίγο μεγαλύτερη διακύμανση $Var \cong 152deg^2$ της δεδομένης περίπτωσης. Οι μέσες τιμές των 100 και 10 μεγαλύτερων τιμών των δεδομένων είναι 33.52deg και 35.34deg αντίστοιχα, οι οποίες διαφαίνονται μειωμένες από τις αντίστοιχες τιμές του γραμμικοποιημένου μοντέλου λόγω της χρήσης του μη γραμμικού όρου απόσβεσης, ενώ ταυτόχρονα η τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων δεδομένων βρέθηκε ίση με 0.856deg, όντας και αυτή μικρότερη από την αντίστοιχη του γραμμικού συστήματος. Έτσι, αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η δράση του μη γραμμικού και η διαφορά του από τον γραμμικοποιημένο ισοδύναμο συντελεστή δε περιορίζεται μόνο στις τις μη γραμμικότητες που εισάγει στο πρόβλημα αλλά και αφενός μεν εντοπίζεται στη δραματική μείωση (περίπου 7-8 deg) των τιμών της απόκρισης, γεγονός που εντοπίζεται βέβαια και από τις, ανωτέρω παρατιθέμενες, μειωμένες μέσες τιμές των μεγαλύτερων δεδομένων, αφετέρου δε στην ελάττωση της χρονικής στιγμής εμφάνισης της μόνιμης απόκρισης με την ταυτόχρονη τάχιστη συρρίκνωση της μεταβατικής. Ακόμη, αξίζει να τονισθεί ότι η μέγιστη γωνία των δεδομένων $\varphi_{max} = 36.14deg$ καθώς και οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών καθίστανται υψηλότερες από τη γωνία μεγιστοποίησης της επαναφοράς του συστήματος $\varphi_{GZmax} = 31.79deg$ και συνεπώς αντιστοιχούν σε κατάσταση ελαττώμενης επαναφοράς του συστήματος. Τέλος, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση προέκυψαν 10 διαφυγές του συστήματος και κατά συνέπεια ισάριθμες υπερβάσεις της γωνίας απώλειας ευστάθειας φ_{fail} .

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Στο παρόν εδάφιο υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης των γωνιών και από τις δύο πλευρές του πλοίου(statboard and port side) για τις δύο μοντελοποιήσεις αμφότερα και κατασκευάζονται τόσο, συναφή των πιθανοτήτων, ημι-λογαριθμικό διαγράμμα όσο πίνακας, στον οποίο αντικατοπτρίζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις μεταξύ τους. Εδώ κρίνεται αναγκαίο να επισημανθεί ότι στους υπολογισμούς ενσωματώνονται οι διαφυγές του συστήματος στα πλαίσια μοντελοποίησης του μη γραμμικού συστήματος.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=15.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A *100%]
5	0.6927	0.734	5.97%
10	0.4279	0.4787	11.86%
12	0.3407	0.3827	12.34%
15	0.2313	0.2552	10.35%
20	0.1066	0.0984	-7.72%
25	0.0401	0.0222	-44.6%
30	0.0115	0.0024	-78.89%
32	0.0063	0.0011	-83.14%
35	0.0024	$6.89 \cdot 10^{-4}$	-70.96%
38	$6.89 \cdot 10^{-4}$	$6.67 \cdot 10^{-4}$	-3.23%
40	$2.58 \cdot 10^{-4}$	$6.67 \cdot 10^{-4}$	158%

Πίνακας 5.7: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=15.5s)}

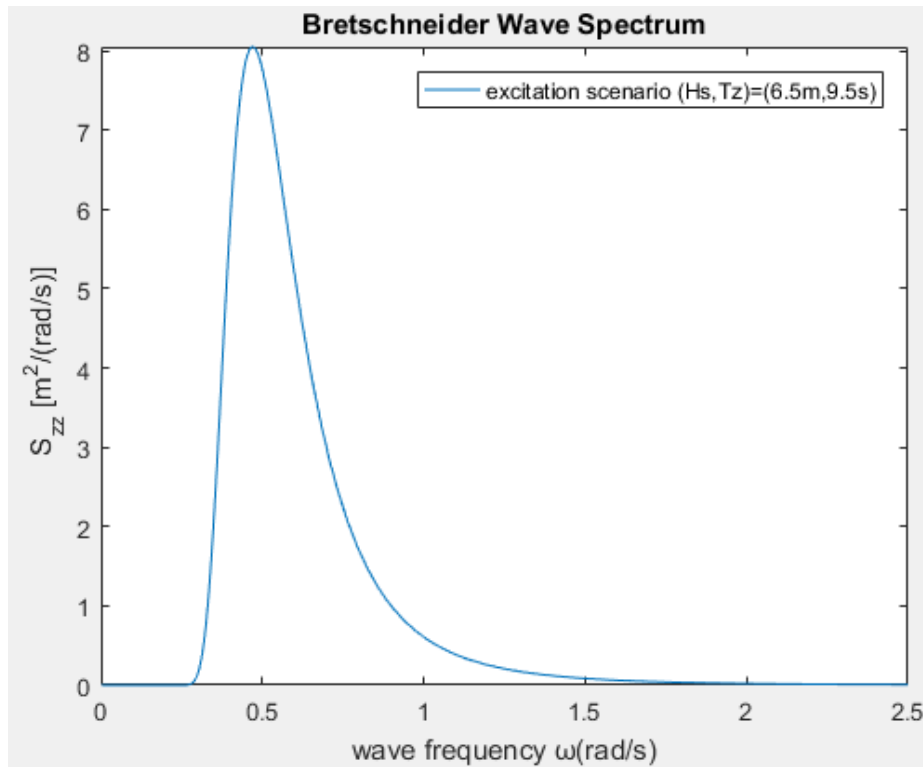
Παρατηρώντας τόσο το Σχήμα 5.11 όσο και τον Πίνακα 5.7, διαπιστώνεται ότι οι πιθανότητες υπέρβασης στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης εμφανίζονται υψηλότερες αυτών της γραμμικοποιημένης μέχρι και λίγο πριν τις 20deg, όπως ακριβώς και συνέβη στο προηγούμενη περίπτωση κατά την επένεργεια του σεναρίου διέγερσης (Hs=6.5m,Tz=14.5s). Από τις 20deg μέχρι περίπου και τις 38.5deg καθίσταται μικρότερες από τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου μοντέλου κυρίως λόγω της επίδρασης των μη γραμμικών όρων απόσβεσης. Βέβαια, στην περιοχή των μικρών σχετικά γωνιών όπου υπερέρχει το μη γραμμικό

μοντέλο στην πρόβλεψη πιθανοτήτων υπέρβασης, δεν εντοπίζονται μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις εκτιμήσεις των δύο μοντέλων, όπως συνέβη και στην προγενέστερη περίπτωση, καθώς η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση του ως προς αυτή του τελευταίου δε ξεπερνά το 12.5% αντιστοιχώντας στις 12deg. Από την άλλη, στη γειτονιά των γωνιών γύρω των 30deg παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ των πιθανοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, η πιθανότητα υπέρβασης των 25deg για το μη γραμμικό πρόβλημα είναι μειωμένη από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου κατά 45% περίπου, ενώ ταυτόχρονα η πιθανότητα υπέρβασης των 30deg υπολογίζεται μόλις ως το 21% αυτής που προέβλεψε η γραμμική μοντελοποίηση. Στις 32 deg η διαφορά μεταξύ τους κορυφώνεται, όντας ίση με -83%, με το αρνητικό πρόσημο να σημαίνει υπερεκτίμηση των υπερβάσεων του γραμμικοποιημένου μοντέλου έναντι του μη γραμμικού. Από εκεί και έπειτα η ψαλίδα μεταξύ τους φαίνεται να κλείνει τουλάχιστον μέχρι και τις 38.5deg. Ο μη αμελητέος αριθμός διαφυγών, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό των πιθανοτήτων υπέρβασης, με την πρόσθεση της πιθανότητας ανατροπής $6.67 \cdot 10^{-4}$ σ' αυτές, σε συνδυασμό με τον όχι και τόσο υψηλό αριθμό δεδομένων, ειδικότερα 195, άνω των 38.5deg στα πλαίσια της γραμμικής μοντελοποίησης, οδηγεί στην υποεκτίμηση των υπερβάσεων γωνιών μεγαλύτερων των 38.5deg υπό τη δεδομένη μοντελοποίηση. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως το γραμμικοποιημένο μοντέλο, λόγω των αρκετά υψηλότερων γωνιών που εμφανίζονται κατά τη στατιστική ανάλυση, υπερεκτιμά αρκετά την πιθανότητα υπέρβασης κυρίως των μεγάλων γωνιών μέχρι περίπου τη γωνία των 38.5deg, όπου από εκεί και έπειτα προβέπει αρκετά μικρότερες υπερβάσεις σε σχέση με το μη γραμμικό λόγω της αμέλειας των διαφυγών που συμβαίνουν κατ' εξοχήν στα μη γραμμικά συστήματα. Το γραμμικοποιημένο μοντέλο υποεκτιμά εξίσου, όχι αισθητά πάντως, τη συχνότητα υπέρβασης γωνιών έως και περίπου τις 18deg.

5.3.1.3 Στατιστική ανάλυση της περίπτωσης LC18 – (Hs=6.5m, Tz=9.5s)

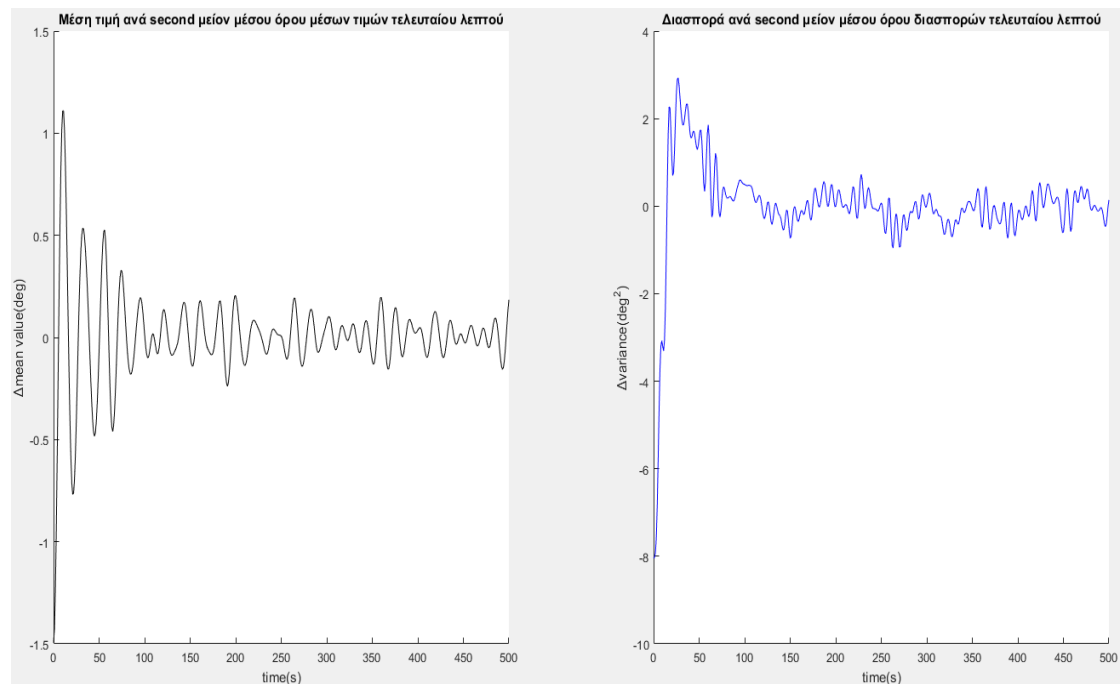
Το σενάριο (Hs=6.5m, Tz=9.5s), το οποίο δρα επί της κατάστασης φόρτωσης 18, λαμβάνει χώρα 1257,9 φορές από τις συνολικές 100000 παρατηρήσεις σύμφωνα με το Wave Scatter Table, αποτελώντας, έτσι, ένα αρκετά συχνό φαινόμενο.

Το φάσμα κυματισμών Bretschneider του συγκεκριμένου σεναρίου διέγερσης, το οποίο, όπως έχει προαναφερθεί, παρουσιάζει μέγιστο στη συχνότητα 0.47rad/s, απέχοντας (ενν. το μέγιστο) αρκετά από την ιδιοσυχνότητα της συγκεκριμένης κατάστασης φόρτωσης, διαφαίνεται διαγραμματικά συναρτήσει της συχνότητας κυματισμών στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.12). Ακόμη, διακατέχεται από χαμηλό, σε σχέση με τα προηγούμενα δύο σενάρια, ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών.

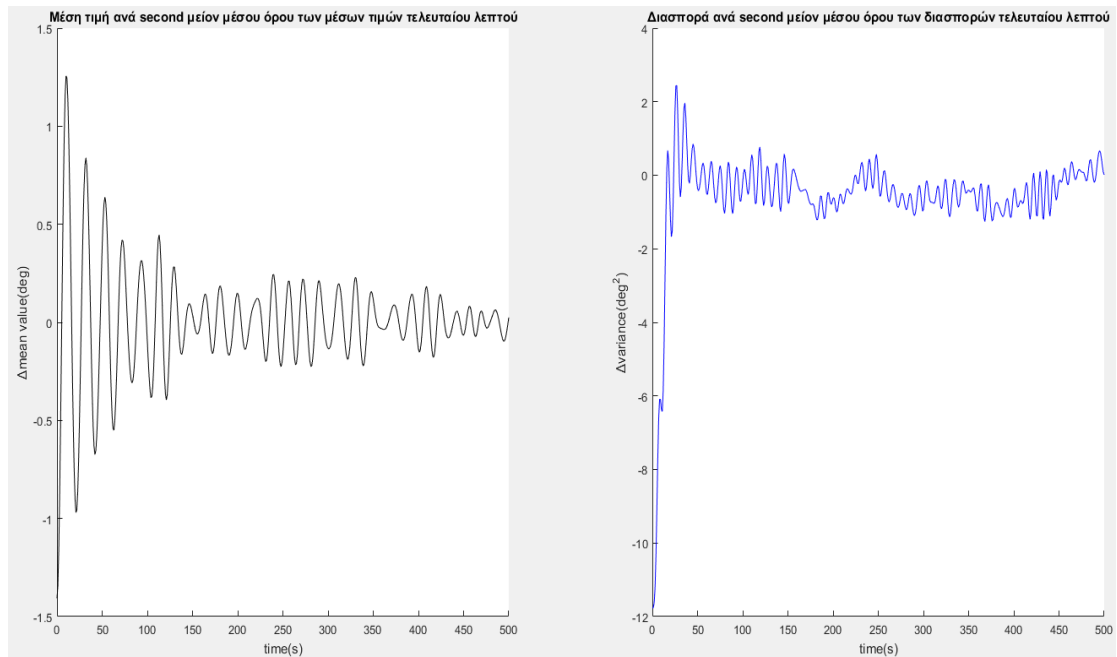


Σχήμα 5.12: Φάσμα Bretschneider για το σενάριο διέγερσης (Hs=6.5m, Tz=9.5s)

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μεταβολών, ως προς το μέσο όρο του τελευταίου λεπτού, της μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσεως του χρόνου για τα δύο μελετούμενα μοντέλα. Ως χρονική στιγμή σταθεροποίησης των στατιστικών λαμβάνονται προσεγγιστικά τα 2min αμότερα για τη γραμμικοποιημένη και για τη μη γραμμική μοντελοποίηση.



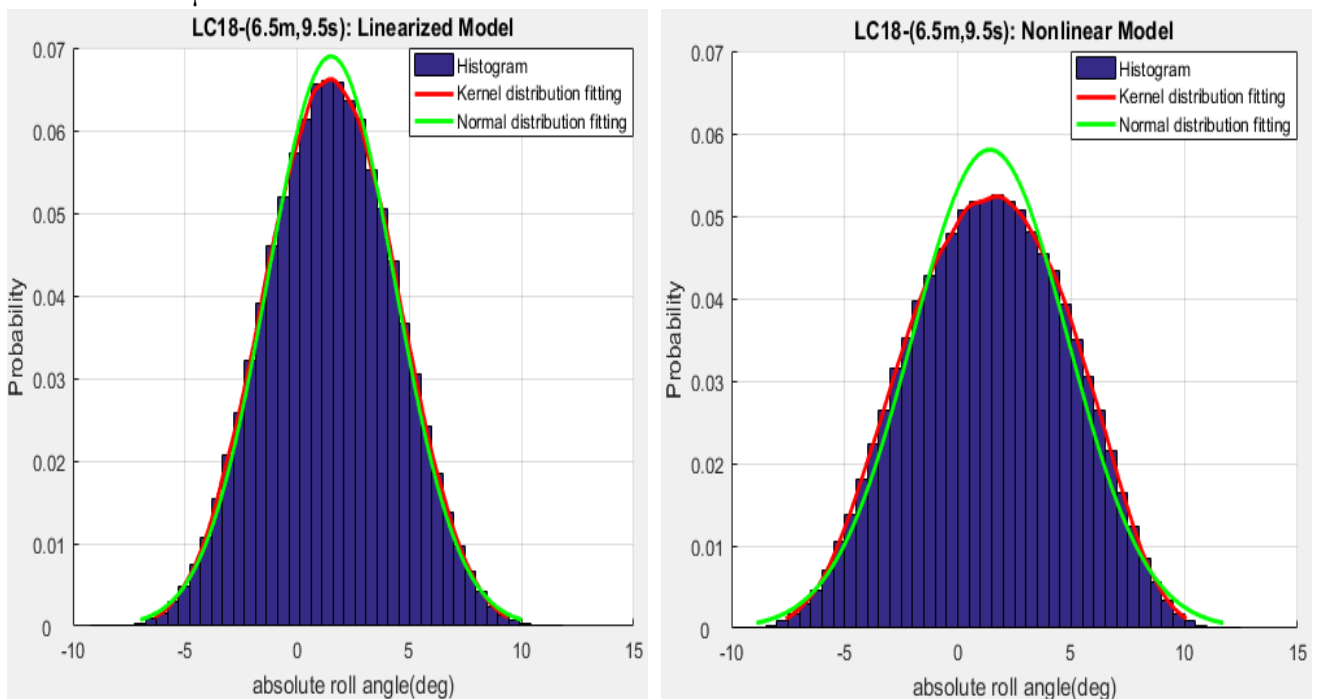
Σχήμα 5.13: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC18-(Hs=6.5m, Tz=9.5s)}



Σχήμα 5.14: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Ακολουθούν τα ιστογράμματα με τις παρεμβλλόμενες PDFs και για τις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης που έχουν εξαχθεί ύστερα από εκτέλεση 15000 προσομοιώσεων χρονικής διάρκειας τριών(3) λεπτών. Ο αριθμός των δεδομένων που λήφθηκαν για την επικείμενη στατιστική ανάλυση είναι 300000 για το γραμμικοποιημένο μοντέλο και 299980 για το μη γραμμικό, εφόσον έχει εξαιρεθεί η χρονοσειρά κατά την οποία το σύστημα απειρίστηκε. Τέλος, τα ισοκατανομημένα εύρη γωνιών των ιστογραμμάτων λήφθηκαν ίσα με 0.5deg αμφότερα για τα δύο μοντέλα.



Σχήμα 5.15: Ιστογράμματα και συναρτήσεως πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}

Τα προκύπτοντα στατιστικά μεγέθη των κατανομών της δεδομένης περίπτωσης παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Statistical Values	Loadcase 18 (Hs,Tz)=(6.5m,9.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	120	120
Simulation Time (s)	180	180
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	1
Number of Data	300000	299980
Mean Value (deg)	1.5	1.41
Variance (deg ²)	8.03	11.81
Mean Value of 100 extreme values (deg)	10.42	11.03
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.295	0.327
Mean Value of 10 extreme values (deg)	11.05	11.74
Maximum absolute rolling angle (deg)	11.62	12.3

Πίνακας 5.8: Στατιστικές Τιμές για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}

Τη δεδομένη στιγμή αξίζει να σημειωθεί ότι υπό το δεδομένο σενάριο διέγερσης η ενέργεια των κυματισμών, που αναπαριστάται από το φάσμα Bretschneider, λαμβάνει χαμηλότερες τιμές από τα αντίστοιχα των προηγούμενων δύο περιπτώσεων. Αυτό εντοπίζεται από τις σχετικά μικρές τιμές που λαμβάνει η απόκριση του συστήματος, εκφρασμένη από την απόλυτη γωνία διατοιχισμού, και κατά τις δύο αντιπαραβαλλόμενες μοντελοποιήσεις που διαφαίνονται στο Σχήμα 5.15.

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Από τη μία πλευρά, όσον αφορά στο γραμμικοποιημένο μοντέλο, παρατηρείται πως η PDF που ακολουθεί κανονική κατανομή κρίνεται κατάλληλη για την παρεμβολή των πιθανοτήτων εμφάνισης εύρων γωνιών του συναφούς ιστογράμματος (Σχήμα 5.15). Βέβαια, υπάρχει μια μικρή απόκλιση γύρω από τη μέση τιμή μεταξύ των τιμών πιθανότητας που δίνει η εκτιμήτρια συνάρτηση PDF Kernel και η Γκαουσιανή PDF που λογίζεται, ωστόσο, αποδεκτή καθώς είναι της τάξης του 5%. Η ύπαρξη αυτής της μικρής απόκλισης υπενθυμίζεται εδώ ότι αποδίδεται στο γεγονός ότι η διέγερση, επομένως και η απόκριση λόγω γραμμικότητας, αποτελεί αμιγώς Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία όταν αριθμός των συνιστωσών τείνει θεωρητικά στο άπειρο. Η μέση τιμή της κατανομής ισούται με $\bar{\varphi} = 1.5deg$, η οποία συμπίπτει σχεδόν με τη γωνία ισοροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου φ_s και η διακύμανση είναι ίση με $Var \cong 8deg^2$ (Πίνακας 5.8). Οι μέσες τιμές των 100 μεγαλύτερων και των 10 υψηλότερων τιμών γωνίας προέκυψαν ίσες με 10.42deg και 11deg αντίστοιχα, ενώ η απομάκρυνση των 100 υψηλότερων τιμών ως προς την μέση τιμή τους εκφράζεται από την τυπική απόκλιση που, εν προκειμένω, ισούται με 0.295deg. Η μέγιστη απόλυτη γωνία διατοιχισμού των στατιστικά αναλυθέντων δεδομένων είναι ίση με 11.62deg. Τέλος, ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκε στη δεδομένη μοντελοποίηση είναι ίσος με 0.023 1/s, λαμβάνοντας, ωστόσο,

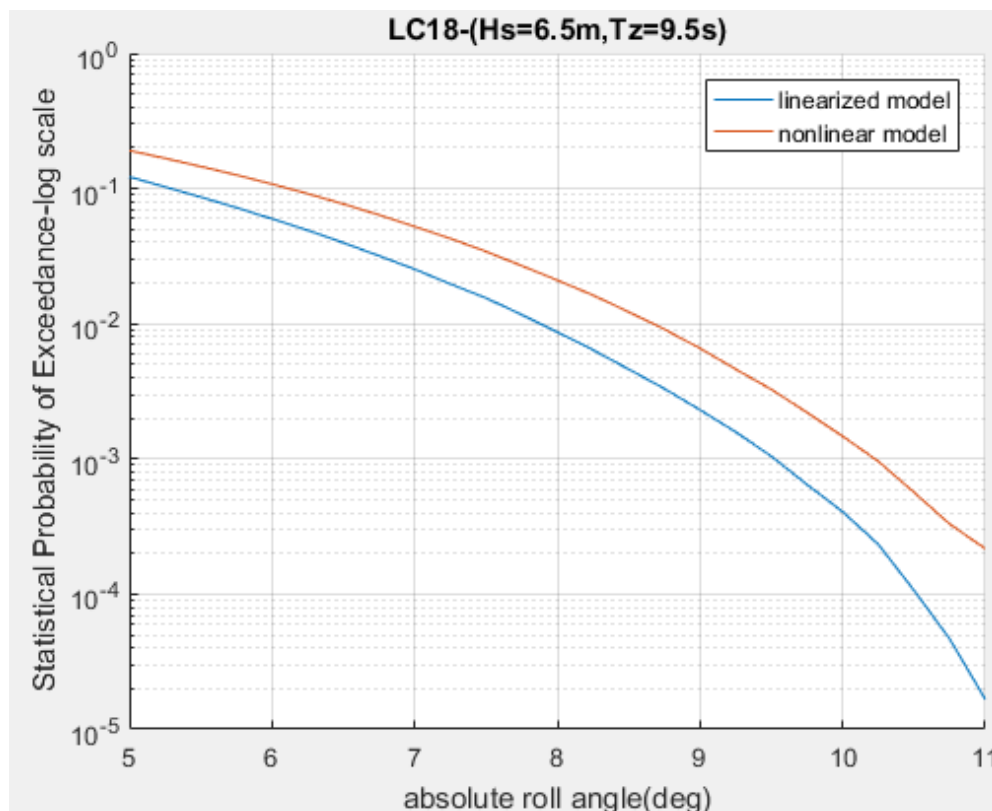
χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τους αντίστοιχους των δύο προγενέστερων σεναρίων διέγερσης εξαιτίας της μικρότερης τιμής της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας διατοιχισμού.

Μη γραμμικό μοντέλο

Από την άλλη, όσον αφορά στο μη γραμμικό μοντέλο, από το δεξί σκέλος του Σχήματος 5.15 είναι προφανές ότι δεν υπάρχουν έντονες, όπως στα προηγούμενα δύο σεναρία διέγερσης, μη γραμμικότητες στο σύστημα. Βέβαια, ενδείξεις μη γραμμικότητας στο παρόν σύστημα αποτελούν οι αισθητά μειωμένες συχνότητες εμφάνισης των γωνιών που βρίσκονται στην περιοχή γύρω από τη μέση τιμή καθώς και οι, σε μικρότερο βαθμό από τις δύο προγενέστερες περιπτώσεις, αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης των γωνιών που είναι πιο απομακρυσμένες της τελευταίας σε σχέση με το γραμμικοποιημένο μοντέλο. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα εύρη γωνιών κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα αποτυπώνονται και από την τιμή της διακύμανσης $Var = 11.81deg^2$ (Πίνακας 5.8), η οποία είναι εμφανώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αντιπαραβαλλόμενου μοντέλου. Η διαστρέβλωση της γωνίας ισοροπίας λόγω ανέμου φ_s διαφαίνεται από την μέση τιμή της εκτιμήτριας PDF Kernel που προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 1.41deg$ απέχοντας από την πρώτη 0.1deg περίπου. Αυτή η διαφορά μπορεί να αποδοθεί ασυμμετρία που ανακύπτει στο μοχλοβραχίονα επαναφοράς εξαιτίας της ροπής κλίσεως και έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ανάλυση Ακόμη, αν ληφθεί υπόψη ότι η γραμμική περιοχή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εκτείνεται μέχρι και τη γωνία 0.15rad=8.6deg (Σχήμα 4.2) και ότι οι μέσες τιμές των 100 και 10 μεγαλύτερων τιμών των δεδομένων βρέθηκαν ίσες με 11.03deg και 11.74deg αντίστοιχα σε συνδυασμό με τη μικρή σχετικά τιμή τυπικής απόκλισης των 100 υψηλότερων γωνιών 0.33deg, μπορεί να διατυπωθεί εύλογα το συμπέρασμα ότι οι μεγαλύτερες γωνίες κατά τη διατοιχιστική συμπεριφορά του πλοίου υπερβαίνουν ελάχιστα το όριο γραμμικότητας του μοχλοβραχίονα επαναφοράς στις περισσότερες προσομοιώσεις. Βέβαια, σαν όρισμα του μοχλοβραχίονα δεν εισάγεται η απόλυτη αλλά η σχετική γωνία διατοιχισμού που λαμβάνει, εξαιτίας της επιδράσεως κλίσεως κυματισμού a_{eff} , ακόμη μικρότερες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι οι ανώτερης τάξης μη γραμμικοί όροι(ειδικότερα $(\varphi - a_{eff})^n \forall n = 5, \dots, 13$) του μοχλοβραχίονα για όρισμα τις υψηλότερες σχετικές γωνίες διατοιχισμού τείνουν στο μηδέν. Συνεπώς, ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς δεν καθίσταται ισχυρά μη γραμμικός. Αυτός, λοιπόν, είναι και ο λόγος που στη προκειμένη περίπτωση οι μη γραμμικότητες δεν είναι τόσο έντονες όσο στις προηγούμενες δύο. Τώρα, όσον αφορά στην απόσβεση του συστήματος, η μη γραμμική αν και συντελεί στην παρουσία διαταραχών, έστω και μικρών, στο σύστημα, δε μειώνει αισθητά τις γωνίες σε σχέση με το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο και αυτό διακρίνεται και από τις μέσες τιμές των 10 και 100 υψηλότερων γωνιών καθώς και από την τυπική απόκλιση των τελευταίων, μεγέθη που καθίστανται μεγαλύτερα στη μη γραμμική μοντελοποίηση. Έτσι, ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης σε συνδυασμό με τη γραμμική έκφραση του μοχλοβραχίονα φαίνεται να περιορίζει περισσότερο τις τιμές της απόλυτης γωνίας σε σχέση με τους μη γραμμικούς όρους απόσβεσης και επαναφοράς, γεγονός που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως ένα «παράδοξο». Βέβαια, οι μέγιστες γωνίες των στατιστικών δεδομένων των δύο μοντέλων δε αποκλίνουν ιδιαίτερα με τη διαφορά να κυμαίνεται από 0.5deg μέχρι 1deg.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Ενσωματώνοντας τη διαφυγή του μη γραμμικού συστήματος υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης των γωνιών του μη γραμμικού αλλά και του γραμμικοποιημένου μοντέλου που διαφαίνονται τόσο στο ημι-λογαριθμικό διάγραμμα όσο και στον πίνακα που ακολουθούν.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A *100%]
5	0.122	0.1911	56.6%
6	0.0597	0.108	80.9%
7	0.0253	0.0524	107.1%
8	0.0087	0.021	142.17%
9	0.0023	0.0066	185.26%
10	0.0004	0.0014	261.48%

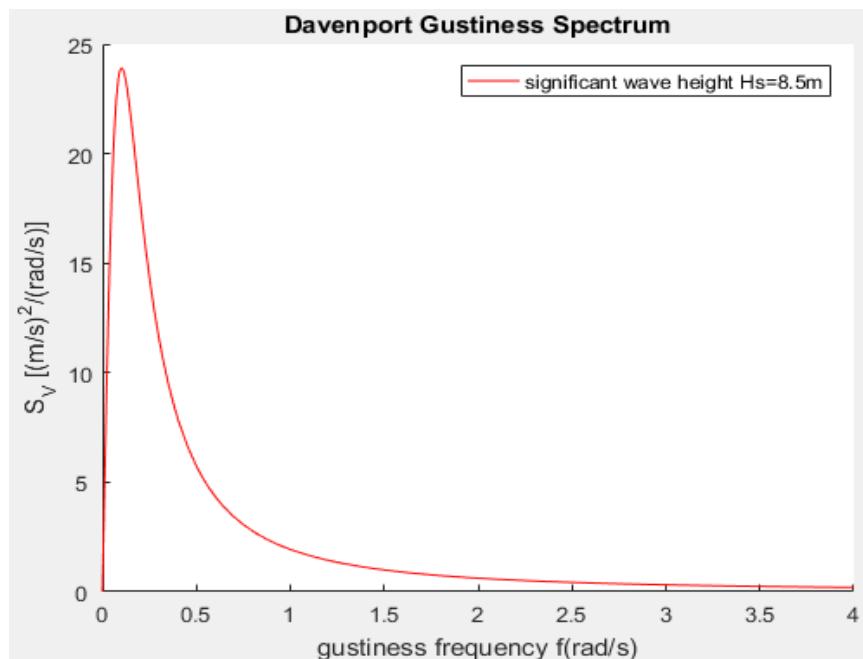
Πίνακας 5.9: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σε αντίθεση με τις προγενέστερες δύο, όπως διαφαίνεται άλλωστε τόσο διαμέσου του Σχήματος 5.16 όσο και του Πίνακα 5.9, οι αποκλίσεις μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού των δύο συγκρινόμενων μοντέλων είναι ιδιαίτερα υψηλές και αποτελούν μια αύξουσα συνάρτηση ως προς τις γωνίες διατοιχισμού. Ειδικότερα, η ποσοστιαία απόκλιση των πιθανοτήτων υπέρβασης ως προς το γραμμικοποιημένο μοντέλο των 5deg είναι 56.6% περίπου ενώ των 7deg είναι λίγο μεγαλύτερη από 100%, δηλαδή είναι δυο φορές και κάτι ακόμη καθίσταται πιο συχνή η υπέρβαση των 7deg στο μη γραμμικό μοντέλο σε σχέση με το γραμμικοποιημένο. Για γωνίες μεγαλύτερες των 7deg η ποσοστιαία διαφορά ολοένα και αυξάνεται με αποκορύφωμα την αυξημένη κατά 261.48%, όπερ και σημαίνει κάτι περισσότερο από τριπλάσια, πιθανότητα υπέρβασης των 10deg που προκύπτει στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης από την αντίστοιχη της γραμμικοποιημένης. Παρατηρείται, λοιπόν, σε αντίθεση με τα προγενέστερα δύο σενάρια, ότι οι υπερβάσεις σχεδόν όλου του φάσματος γωνιών, ακόμη και των

υψηλότερων, είναι συχνότερες στο μη γραμμικό από ό,τι στο γραμμικοποιημένο μοντέλο. Έτσι, το γραμμικοποιημένο μοντέλο, το οποίο διέπει το κριτήριο δεύτερης γενιάς "Level 2 Deadship Condition failure mode", φαίνεται πως υποεκτιμά αισθητά την υπέρβαση γωνιών μεγαλύτερων των 5deg εκατέρωθεν του πλοίου υπό την επίδραση του σεναρίου διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$) στην κατάσταση φόρτωσης 18.

5.3.2 Κατάσταση Φόρτωσης 22

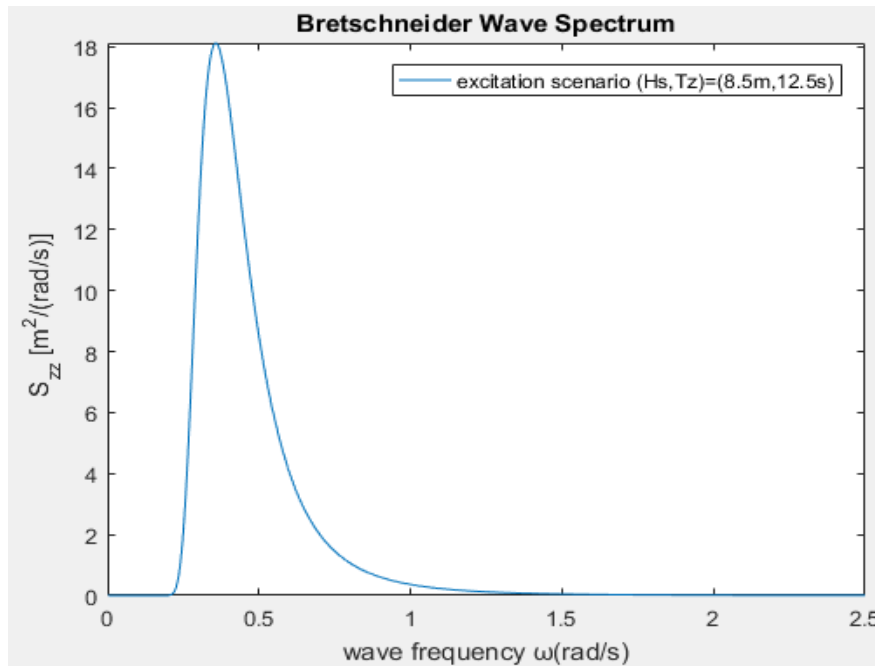
Στη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης για την απόκριση του πλοίου μελετήθηκαν ως σενάρια διέγερσης τόσο η κατάσταση θάλασσας και ανέμου (H_s, T_z)=(8.5m, 12.5s), της οποίας το φάσμα Bretschneider παρουσιάζει μέγιστο στη συχνότητα κορυφής $\omega_{peak}=0.357 \text{ rad/s}$, η οποία βρίσκεται αρκετά κοντά με την ιδιοσυχνότητα του πλοίου $\omega_0=0.3537 \text{ rad/s}$, όσο και οι καταστάσεις (H_s, T_z)=(8.5m, 10.5s) και (H_s, T_z)=(8.5m, 16.5s). Στην πρώτη εκ των τελευταίων δύο επικρατούν, εν γένει, υψίσυχοι κυματισμοί, ενώ στη δεύτερη χαμηλόσυχοι. Επίσης, είναι εύλογο να αναφερθεί ότι η γωνία ευσταθούς ισορροπίας υπό την επίδραση ανέμου είναι και στις τρεις περιπτώσεις ίση με $\varphi_s = 1.3deg$. Παρακάτω αναπαρίσταται διαγραμματικά το φάσμα Davenport που αντιπροσωπεύει τις τυρβώσεις συνιστώσες ταχύτητας ανέμου, του οποίου η μέση ταχύτητα συνδέεται ντετερμινιστικά με το σημαντικό ύψος κύματος $H_s=8.5m$



Σχήμα 5.17: Φάσμα Davenport για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=8.5m$

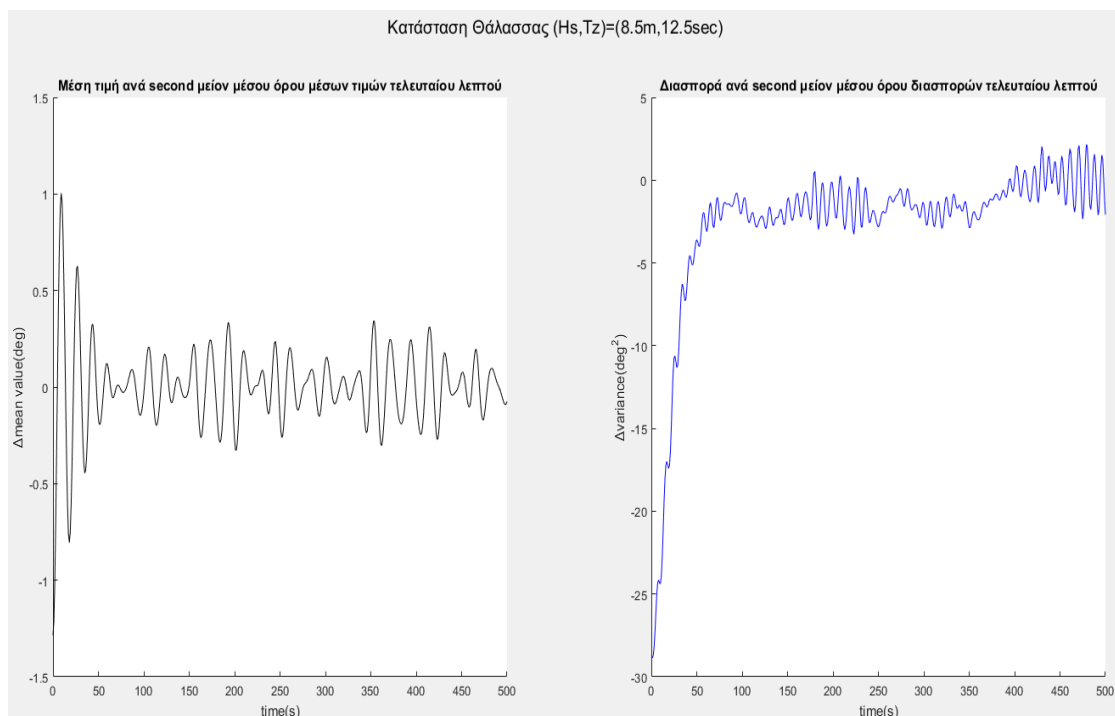
5.3.2.1 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC22-($H_s=8.5m, T_z=12.5s$)

Παρακάτω διαφαίνεται η διαγραμματική απεικόνιση του φάσματος Bretschneider της συγκεκριμένης περίπτωσης διέγερσης, η οποία έχει συχνότητα εμφάνισης ίση με $1.746 \cdot 10^{-3}$, συναρτήσει της συχνότητας κυματισμών, το οποίο διακατέχεται από μια περίοδο κορυφής ίση με 17.6s.

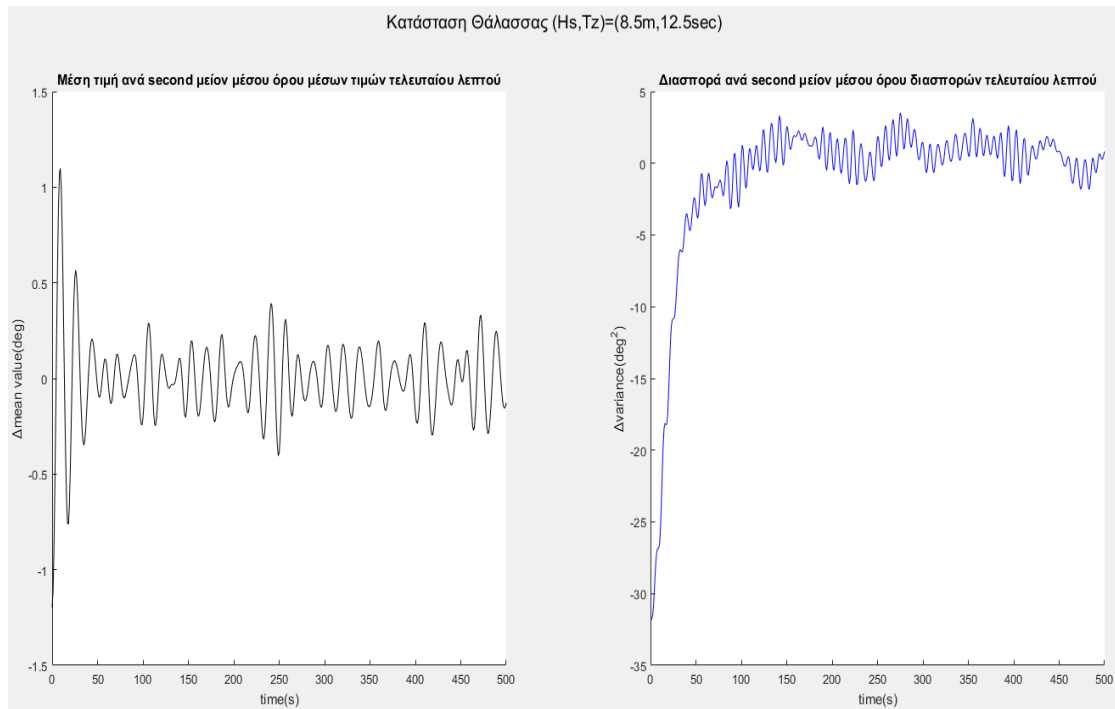


Σχήμα 5.18: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=12.5s)

Ακολούθως διαφαίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των στατιστικών τιμών, ειδικότερα μέσης τιμής και διασποράς, σε σχέση με το χρόνο και για τα δύο προς ανάλυση μοντέλα με σκοπό την εύρεση της χρονικής στιγμής περάτωσης του μεταβατικού σταδίου της απόκρισης.



Σχήμα 5.19: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m, Tz=12.5s)}

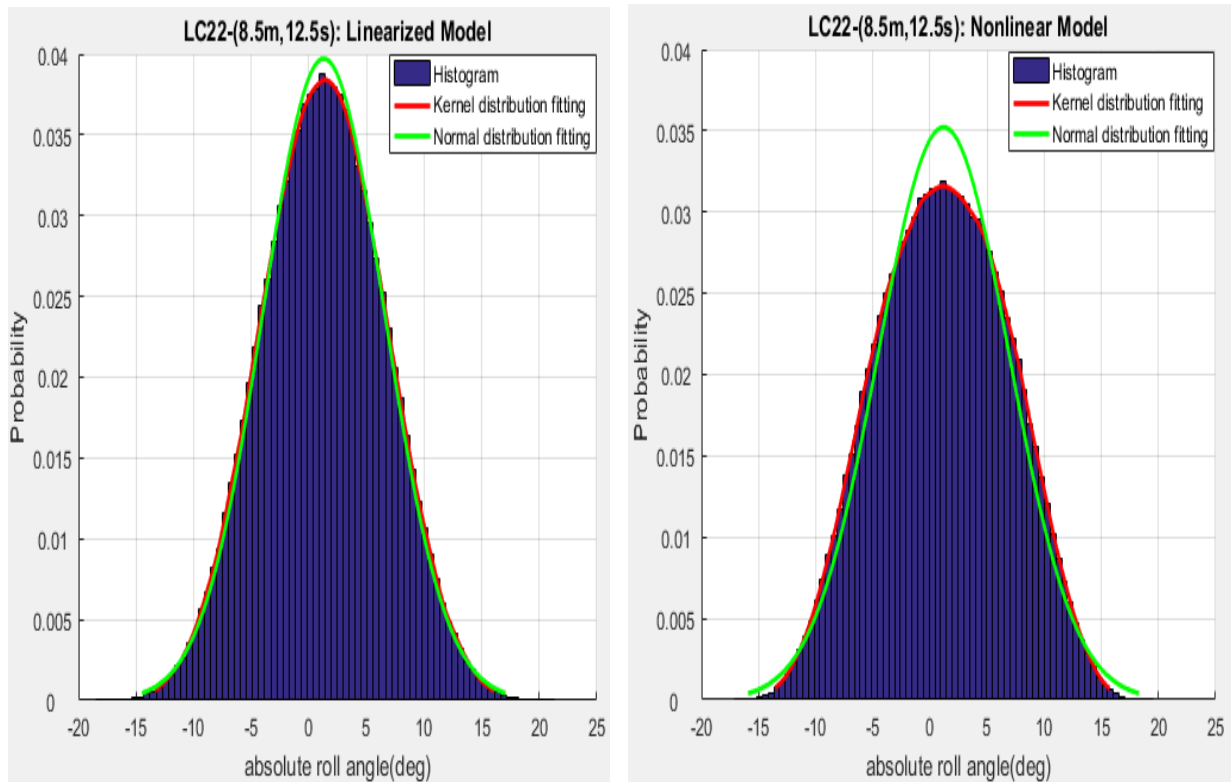


Σχήμα 5.20: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}

Παρατηρείται ότι τόσο στο γραμμικοποιημένο μοντέλο όσο και στο μη γραμμικό η χρονική στιγμή αντιστοιχεί περίπου στα 100s. Βέβαια, παρόλο που η μέση τιμή και των δύο περιπτώσεων φαίνεται να σταθεροποιείται αρκετά νωρίτερα, η διακύμανση χρειάζεται περισσότερο χρόνο να συγκλίνει στο μέσο όρο των τελευταίων 60 διακυμάνσεων και έτσι η χρονική στιγμή μονιμοποίησης της απόκρισης ισοδυναμεί με το χρόνο σταθεροποίησής της.

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Με συνακόλουθο τρόπο, όπως υλοποιήθηκε και στην προηγούμενη μελετούμενη κατάσταση φόρτωσης, εξάγονται και στην προκειμένη περίπτωση τα ιστογράμματα των στατιστικών δεδομένων, που αφορούν στη μόνιμη απόκριση του πλοίου, με τις παρεμβαλλόμενες PDFs και για τα δύο μοντέλα σε χρόνο προσομοίωσης 5 λεπτών. Ο αριθμός των δεδομένων που μελετήθηκαν είναι 450000 και 449700 για γραμμικοποιημένο και μη γραμμικό μοντέλο αντίστοιχα. Το μη γραμμικό σύστημα απειρίστηκε 10 φορές σε σύνολο προσομοιώσεων ίσο με 15000, έχοντας, έτσι, μια πιθανότητα ανατροπής ίση με $6.67 \cdot 10^{-4}$. Για μια ακόμη φορά επισημαίνεται πως αυτές οι διαφυγές δεν προσμετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης. Το βήμα των ισαπέχοντων ευρών γωνιών των ιστογραμμάτων λήφθηκε ίσο με 0.5deg περίπου.



Σχήμα 5.21: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}

Statistical Values	Loadcase 22 (Hs,Tz)=(8.5m,12.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	100	100
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	10
Number of Data	450000	449700
Mean Value (deg)	1.29	1.19
Variance (deg ²)	27.69	32.78

Mean Value of 100 extreme values (deg)	18.5	17.8
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.584	0.528
Mean Value of 10 extreme values (deg)	19.83	18.92
Maximum absolute rolling angle (deg)	21.3	19.54

Πίνακας 5.10: Στατιστικές Τιμές για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Κατά την ανάλυση της γραμμικής μοντελοποίησης της κατάστασης φόρτωσης 22, η οποία διεγείρεται από τη συνδυασμένη επίδραση ανέμου και κυμάτων με στατιστικά αντιπροσωπευτικά μεγέθη $H_s=8.5m$ και $T_z=12.5s$, εξάγεται το πόρισμα πως η Γκαουσιανή PDF, προς επιβεβαίωση της θεωρίας, κρίνεται κατάλληλη για την παρεμβολή των δεδομένων του σχετικού ιστογράμματος (Σχήμα 5.21). Βέβαια, η μικρή απόκλιση (περίπου 3%-3.5%) στη γειτονιά της μέσης τιμής μεταξύ των αντίστοιχων τιμών πιθανότητας του ιστογράμματος και της Γκαουσιανής PDF μπορεί να αποδοθεί στο στο μη επαρκή χρόνο προσομοίωσης (5 min) και συνεπώς στο μη επαρκή αριθμό συνιστωσών ανέμου και κυμάτων ώστε η διέγερση, επομένως και η απόκριση του συστήματος, να καθίσταται μια αμιγώς Γκαουσιανή διαδικασία. Αυτός, λοιπόν, είναι και ο λόγος που εντοπίζεται η εν λόγω διαφορά και, εξαιτίας μικρού μέγεθους της, κρίνεται αμελητέα. Η μέση τιμή της Γκαουσιανής κατανομής είναι ίση με $\bar{\varphi} = 1.29deg$, απέχοντας μόλις 0.5% από τη γωνία ισορροπίας φ_s , ενώ ταυτόχρονα η διακύμανση είναι ίση με $Var \cong 27.7deg^2$ (Πίνακας 5.10). Επίσης, η μέση τιμή των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών είναι 18.5deg και 19.83deg αντιστοίχως, ενώ η απομάκρυνση των γωνιών γύρω από την πρώτη εκφράζεται από την τυπική απόκλιση που στη δεδομένη περίπτωση βρέθηκε ίση με 0.584deg. Τέλος, ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης είναι ίσος με $\mu_e = 0.031 \frac{1}{s}$. Δε πρέπει να λησμονάται, βέβαια, και η επίδραση του υψηλού αρχικού μετακεντρικού ύψους $GM=2.03m$ στην απόκριση, την οποία κρατά, εν γένει, σε χαμηλά επίπεδα, την ώρα που η ενεργειακή περιεκτικότητα των υφιστάμενων κυματισμών και ανέμων είναι μεγάλη που θα περίμενε εύλογα κανείς να σημειωθούν αρκετά μεγαλύτερες τιμές.

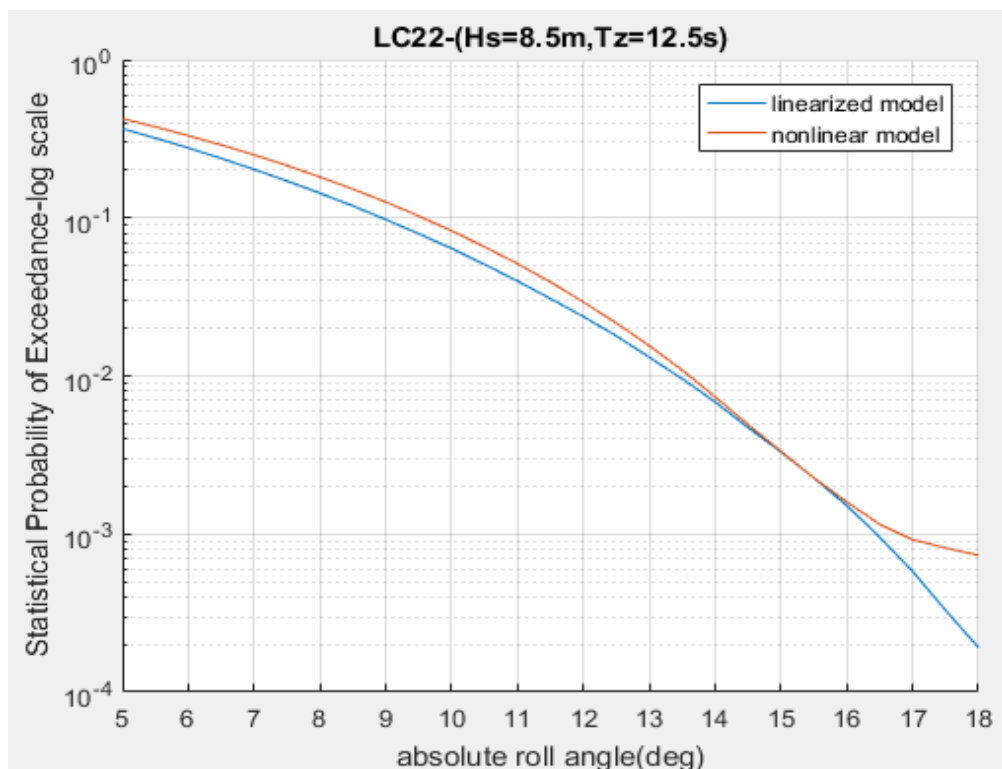
Μη γραμμικό μοντέλο

Αντίθετα, στο μη γραμμικό μοντέλο (Σχήμα 5.21), είναι εμφανής η διαφορά μεταξύ των δύο συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας που παρεμβάλλονται στο συγκεκριμένο ιστογράμμα, με την εκτιμήτρια PDF Kernel να είναι αυτή που αντιπροσωπεύει κατάλληλα και με πιο συνεπή αλλά και ορθολογικό τρόπο τις τιμές πιθανοτήτων των δεδομένων. Η μέση τιμή προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 1.19deg$, απέχοντας 0.1deg περίπου από τη γωνία ισορροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου, και η διακύμανση ίση με $Var \cong 32.8deg^2$, με την τελευταία να είναι εμφανώς μεγαλύτερη της αντίστοιχης της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης (Πίνακας 5.10). Η απόκλιση μεταξύ μέσης τιμής και γωνίας ισορροπίας φ_s αποδίδεται, όπως έχει αναφερθεί προγενέστερα, στη ασυμμετρία που δημιουργείται στο μη γραμμικό μοχλοβραχίονα επαναφοράς λόγω της ροπής ανέμου. Ταυτόχρονα, η διακύμανση εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της Γκαουσιανής κατανομής εξαιτίας των μεγαλύτερων συχνοτήτων εμφάνισης γωνιών αρκετά μακριά από τη μέση τιμή. Πιο συγκεκριμένα, για γωνίες μεταξύ (-15deg,-3.5deg) και (6deg,15.5deg) περίπου το μη γραμμικό εκτιμά μεγαλύτερες πιθανότητες εμφάνισης σε σχέση με το γραμμικοποιημένο μοντέλο. Αυτό εντοπίζεται και στη μορφή της PDF Kernel η οποία χαρακτηρίζεται ως πιο ογκώδης στις παρειές, επιτρέποντας την παρομοίωσή της με μια συνάρτηση τύπου παραβολής. Ταυτόχρονα, οι συχνότητες εμφάνισης

γωνιών γύρω από τη μέση τιμή εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες του ιστογράμματος κατά τη γραμμική μοντελοποίηση. Πάντως, το δεδομένο ιστογράμμα, συγκρινόμενο με το αντίστοιχο που προέκυψε από τη μη γραμμική μοντελοποίηση των περιπτώσεων όπου τα σενάρια διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) επιδρούσαν πάνω στην κατάσταση φόρτωσης 18, δε φαίνεται να αναπαρήχθη και αυτό με τη σειρά του από ένα ισχυρά μη γραμμικό σύστημα. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην μειωμένη επίδραση ύπαρξης των μη γραμμικοτήτων στο σύστημα, γεγονός που οφείλεται στους μικρούς συντελεστές των περισσότερων μεγαλύτερης τάξης μη γραμμικών όρων του μοχλοβραχίονα επαναφοράς (4.1.2), οι οποίοι έχουν παραπλήσιες τιμές με το μετακεντρικό ύψος GM καθιστώντας τον, έτσι, όχι τόσο έντονα μη γραμμικό. Εν συνεχεία, στο παρόν πρόβλημα οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων τιμών απόλυτης γωνίας προέκυψαν ίσες με 17.8deg και 18.92deg αντίστοιχα, ενώ η ρίζα της διασποράς των 100 τιμών γύρω από την πρώτη εκφράζεται από την τυπική απόκλιση που στη δεδομένη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 0.528deg. Η σύγκριση μεταξύ αυτών των τιμών και των αντίστοιχων της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης, οδηγεί στο πόρισμα ότι η μη γραμμική απόσβεση δρα πιο αποτελεσματικά στην ελάττωση των διατοιχιστικών γωνιών από τον ισοδύναμο συντελεστή. Βέβαια, λόγω τόσο των σχετικά μικρών διαφορών ανάμεσά τους (της τάξης των 1deg-2deg) όσο και της γειτνίασης των τυπικών αποκλίσεων των 100 μεγαλύτερων γωνιών (των δύο μοντέλων ενν.), με αυτήν του γραμμικοποιημένου να υπέρχει έναντι της αντίστοιχης του μη γραμμικού μοντέλου, η γραμμικοποίηση της απόσβεσης θα μπορούσε σε πρώτη φάση να αξιολογηθεί σε γενικές γραμμές με θετικό πρόσημο.

Πιθανότητες Υπέρβασης (Statistical Probabilities of Exceedance)

Προς τήρηση της συνέπειας της δομής της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται, και στην προκειμένη περίπτωση, τόσο ημι-λογαριθμικά διάγραμμα με τις πιθανότητες υπέρβασης όσο και αντιπροσωπευτικός πίνακας των τελευταίων και για τα δύο μοντέλα, έχοντας προσμετρήσει ταυτόχρονα τις 10 διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος.



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC22- ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$)}

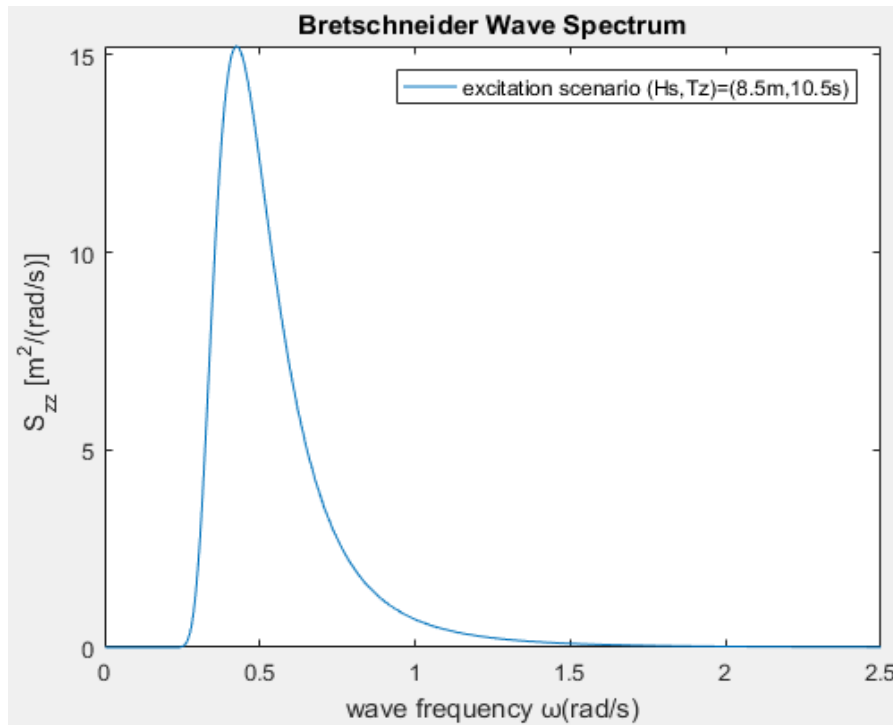
Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A *100%]
5	0.3664	0.4241	15.75%
7	0.2023	0.2502	23.69%
10	0.0639	0.0827	29.25%
12	0.0237	0.0293	23.64%
15	0.0033	0.0033	1.01%
15.5	0.0023	0.0023	0%
17	0.0006	0.0009	58.62%
18	0.0002	0.0007	283.72%

Πίνακας 5.11: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC22-
(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}

Στα πλαίσια σχολιασμού του παραπάνω ημι-λογαριθμικού διαγράμματος (Σχήμα 5.22), αξίζει να τονισθεί ότι το μη γραμμικό μοντέλο δίνει μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης από το γραμμικοποιημένο σε όλο το φάσμα γωνιών. Ειδικότερα, από τις 5deg μέχρι και τις 10deg, η απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης που προβλέπουν τα δύο μοντέλα φαίνεται να ακολουθεί αύξουσα πορεία, παρουσιάζοντας τη μέγιστη τιμή της, περίπου 30%, στις 10deg (Πίνακας 5.11). Ύστερα, παρουσιάζει φθίνουσα πορεία μέχρι τις 15.5deg όπου και μηδενίζεται, με τα δύο μοντέλα να δίνουν ίδια πιθανότητα υπέρβασης της εν λόγω γωνίας. Από εκεί και έπειτα, λόγω αφενός της επίδρασης των διαφυγών και των, αντιστοιχιζόμενων σ' αυτές, 300 δεδομένων και αφετέρου της μείωσης των δεδομένων του γραμμικοποιημένου μοντέλου με την πάροδο των γωνιών, η ψαλίδα μεταξύ στα δύο μοντέλα φαίνεται να ανοίγει, καθώς η απόκλιση παρουσιάζει αυξητική τάση. Μάλιστα, η πιθανότητα υπέρβασης των 17deg που υπολογίζεται μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης καθίσταται έως και 1.5 φορά μεγαλύτερη της αντίστοιχης της γραμμικοποιημένης. Στις 18 deg η διαφορά μεταξύ τους εκτοξεύεται στο 284%, με την συναφή πιθανότητα υπέρβασης που προβλέπει το μη γραμμικό μοντέλο να είναι τετραπλάσια σχεδόν από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου.

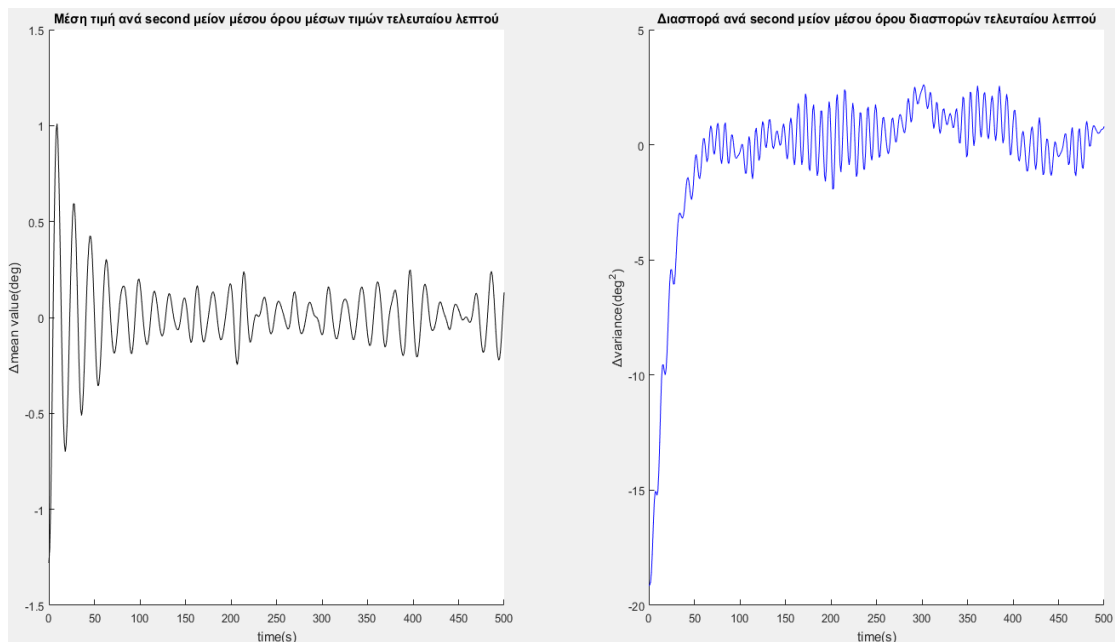
5.3.2.2 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC22-(Hs=8.5m, Tz=10.5s)

Η διαγραμματική απεικόνιση του φάσματος κυματισμών του σεναρίου διέγερσης (Hs=8.5m,Tz=10.5s), το οποίο εμφανίζεται 350,6 φορές ανά 100000 παρατηρήσεις, συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμών διαφαίνεται ακολούθως. Η περίοδος κορυφής του εν λόγω φάσματος $T_p=14.78s$ είναι αρκετά μικρή και απέχει περίπου 3s από την ιδιοπερίοδο του συστήματος $T_0=17.76s$.

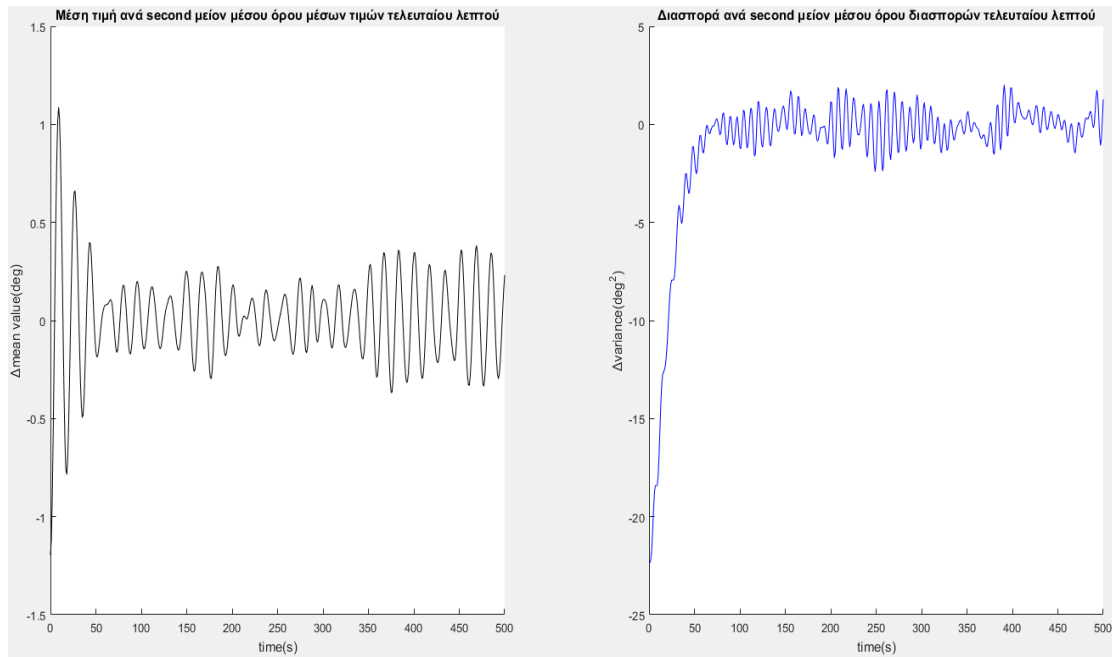


Σχήμα 5.23: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=10.5s)

Με όμοιο τρόπο όπως διενεργήθηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις, παρατίθενται σε πρώτη φάση τα διαγράμματα μέσης τιμής και διακύμανσης απόλυτης γωνίας διατοιχισμού συναρτήσεως του χρόνου με σκοπό την εύρεση της χρονικής στιγμής που αντιστοιχεί στην έναρξη της μόνιμης απόκρισης του πλοίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η σταθεροποίηση των στατιστικών μεγεθών φαίνεται να επέρχεται περίπου στο 1.5min και για τις δύο αντιπαραβαλλόμενες μοντελοποιήσεις.



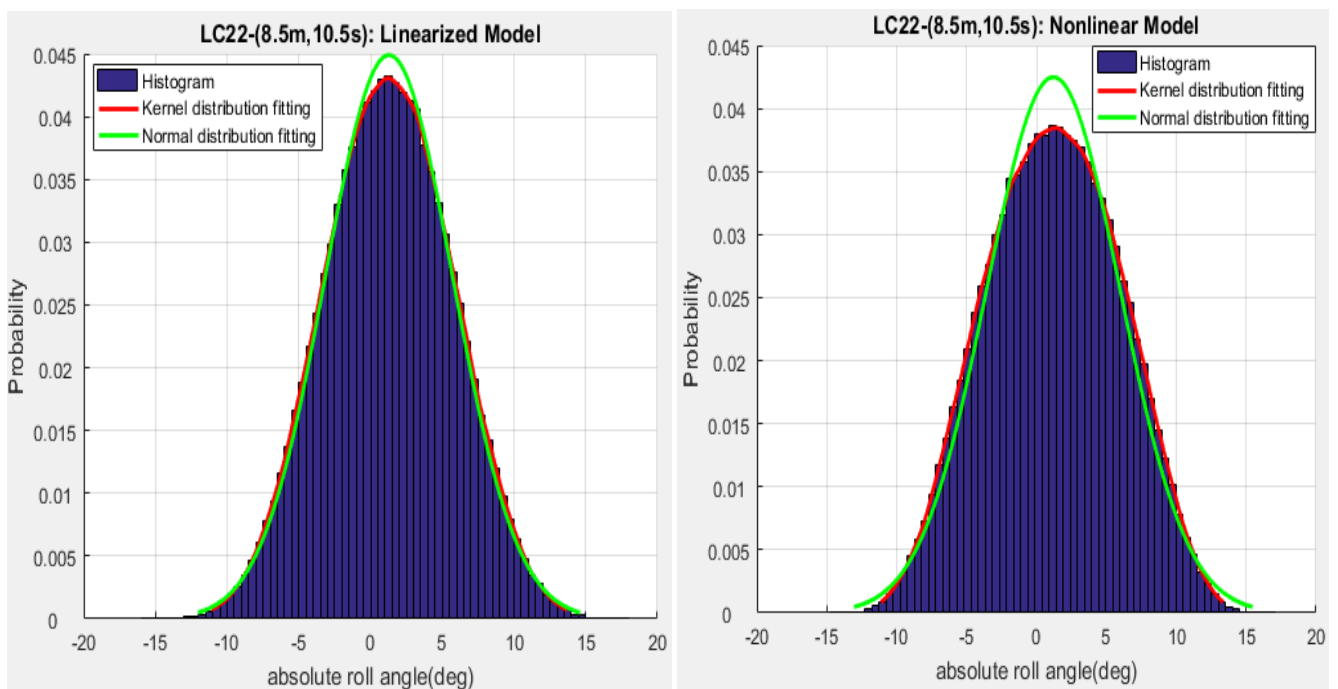
Σχήμα 5.24: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m, Tz=10.5s)}



Σχήμα 5.25: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Παρακάτω διακρίνονται τα πιθανοτικά διαγράμματα με τη χρήση τόσο της μη γραμμικής όσο και της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης του συστήματος σε χρονική διάρκεια προσομοιώσεων 5min αμφότερα. Εδώ δε πρέπει να παραληφθεί ότι τα 450000 και 449970 δεδομένα του γραμμικού και του μη γραμμικού μοντέλου αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική ανάλυση, κατανεμήθηκαν ανά 0.5deg προς παραγωγή των ιστογραμμάτων. Η λύση του συστήματος απειρίστηκε μόλις μια(1) φορά στις 15000 διενεργηθείσες προσομοιώσεις και αμελήθηκε κατά τους σχετικούς υπολογισμούς.



Σχήμα 5.26: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}

Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τις κυριότερες προκύπτουσες στατιστικές τιμές της συγκεκριμένης περίπτωσης.

Statistical Values	Loadcase 22 (Hs,Tz)=(8.5m,10.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	100	100
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	1
Number of Data	450000	449970
Mean Value (deg)	1.28	1.21
Variance (deg ²)	19.73	22.73
Mean Value of 100 extreme values (deg)	15.81	14.97
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.621	0.481
Mean Value of 10 extreme values (deg)	17.17	16.04
Maximum absolute rolling angle (deg)	17.94	17.04

Πίνακας 5.12: Στατιστικές Τιμές για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

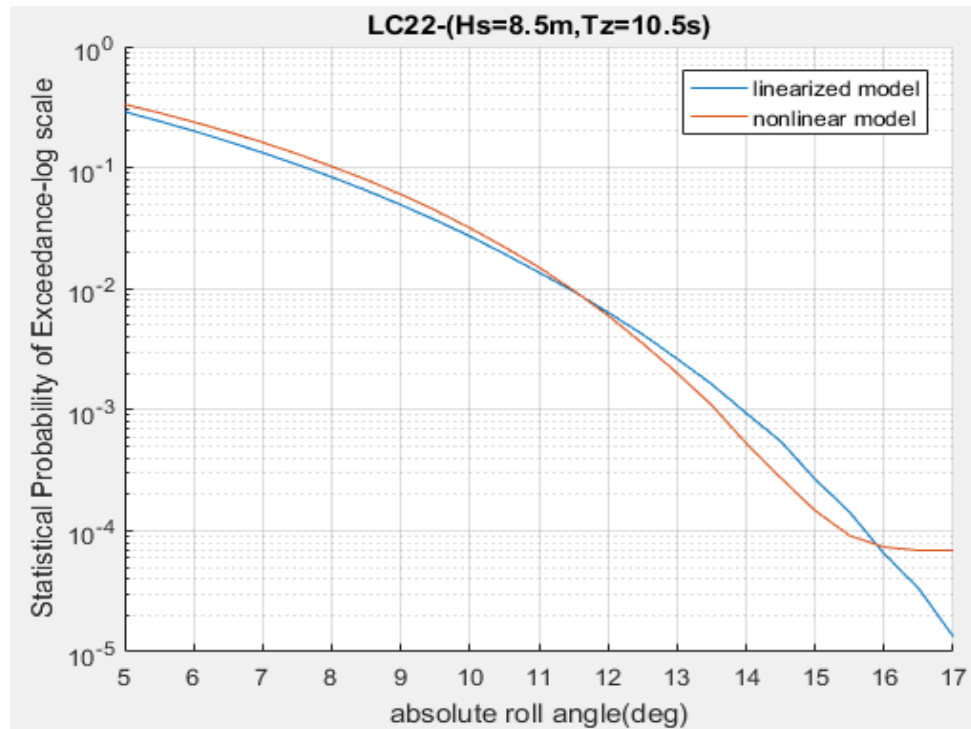
Και στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατά την οποία η διέγερση χαρακτηρίζεται από, εν γένει, υψίσυχνους κυματισμούς, διαπιστώνεται ότι η PDF που παρεμβάλλει τα εύρη των τιμών γωνίας του ιστογράμματος του γραμμικοποιημένου μοντέλου ακολουθεί κανονική κατανομή, όπως συμβαίνει στα γραμμικά συστήματα με «Γκαουσιανή» διέγερση, καθώς αυτή ομοιάζει αρκετά με την εκτιμήτρια PDF που ακολουθεί τη κατανομή Kernel. Διαφαίνονται, ωστόσο, από το αριστερό σκέλος του Σχήματος 5.26, μικρές αποκλίσεις μεταξύ της Kernel και της κανονικής κατανομής κυρίως γύρω από τη γειτονιά της μέσης τιμής που κρίνονται, όμως, αποδεκτές αφού δε ξεπερνούν το 5%. Ακόμη, λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής περιεκτικότητας των κυματισμών σε σχέση με το σενάριο διέγερσης (8.5m,12.5s) και της ύπαρξης των περισσότερων διακριτοποιημένων συχνοτήτων κυματισμών μακριά από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος, παρατηρείται μια μείωση των τιμών που λαμβάνει η απόλυτη γωνία διατοιχισμού τόσο στο γραμμικοποιημένο όσο και στο μη γραμμικό μοντέλο. Η μέση τιμή της κανονικής κατανομής ισούται με $\bar{\varphi} = 1.28deg$, η οποία τείνει να συμπέσει με την γωνία ισοροπίας λόγω μέσης ροπής κλίσης φ_s , και η διασπορά είναι ίση με $Var \cong 20deg^2$ (Πίνακας 5.12). Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών διατοιχισμού προέκυψαν ίσες με 15.81deg και 0.621deg αντίστοιχα, ενώ ταυτόχρονα η μέση τιμή των υψηλότερων 10 ίση με 17.17deg. Ο γραμμικοποιημένος ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης ισούται με $\mu_e = 0.026 \frac{1}{s}$, μικρότερος από τον αντίστοιχο της περίπτωσης {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}, με την τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού ταυτόχρονα να ανακύπτει ίση με $\sigma_{\dot{x}} = 0.0269 rad/s$.

Μη γραμμικό μοντέλο

Στην αντίπερα όχθη, στην περίπτωση της μη γραμμικής μοτελοποίησης του συστήματος διαφαίνεται ότι οι PDFs που ακολουθούν κανονική κατανομή και Kernel διαφέρουν, με τη δεύτερη να εκτιμά συνεπέστερα και σαφώς πιο κατάλληλα τις πιθανότητες εμφάνισης των δεδομένων του σχετικού ιστογράμματος (Σχήμα 5.26). Βέβαια, η εκτιμήτρια PDF Kernel δεν αποκλίνει σε υπερβολικό βαθμό από την κανονική κατανομή που έχει παρεμβληθεί στα συγκεκριμένα δεδομένα αν εξαιρέσει κανείς την αισθητά μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης των γωνιών γύρω από τη μέση τιμή της κατανομής που δίνει. Γίνεται, επομένως, άμεσα αντιληπτό ότι οι μη γραμμικότητες που υπάρχουν στο σύστημα δεν καθίστανται έντονες. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας από τη μία από το δεδομένο ιστόγραμμα ότι το πλοίο κατά τη μόνιμη απόκρισή του δε λαμβάνει μεγάλες γωνίες, γεγονός που εντοπίζεται τόσο και από τις μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων τιμών δεδομένων, 15deg και 0.48deg αντιστοίχως, όσο και από τη μέση τιμή των υψηλότερων 10, 16deg, αλλά και από τη μέγιστη γωνία των δεδομένων $\varphi_{max} = 17deg \cong 0.3rad$ (Πίνακας 5.12), και από την άλλη ότι οι συντελεστές των ανώτερης τάξης, μη γραμμικών, όρων του μοχλοβραχίονα εμφανίζονται αρκετά μικροί, εξάγεται το συμπέρασμα πως στις περισσότερες διενεργηθείσες προσομοιώσεις οι ανώτεροι τάξης μη γραμμικοί όροι έχουν αμελητέα επίδραση. Ταυτόχρονα, αν αναλογιστεί κανείς το γεγονός πως η σχετική γωνία καθίσταται όρισμα του μοχλοβραχίονα, προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα πως οι γωνίες δεν υπερβαίνουν τις 15deg με συνέπεια να τείνουν στο μηδέν. Αξιοσημείωτο να παρατεθεί εδώ είναι το γεγονός ότι από τις 15000 προσομοιώσεις, μόλις στις 157 παρατηρήθηκε υπέρβαση των 15deg, ενώ από τα στατιστικώς αναλυθέντα δεδομένα μόνο 36 ήταν υψηλότερα των 15deg. Έτσι, σ' αυτά τα επίπεδα τιμών ο μοχλοβραχίονας δε καθίσταται εντόνως μη γραμμικός. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος έκλειψης σημαντικών μη γραμμικοτήτων από το σύστημα. Ωστόσο, οι μικρότερης τάξης όροι του μοχλοβραχίονα εισάγουν μη γραμμικότητες, οι οποίες εκφράζονται από τη μορφή της εκτιμήτριας PDF Kernel, μέσω όχι μόνο των προαναφερόμενων μικρότερων πιθανοτήτων εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή, αλλά και των μεγαλύτερων συχνοτήτων εμφάνισης γωνιών σε σχέση πάντα με τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Το δεύτερο επιδρά και στην μεγαλύτερη διακύμανση $Var \cong 22.8deg^2$ που εντοπίζεται κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση του συστήματος από την αντίστοιχη της Γκαουσιανής PDF. Έτσι, η μορφή της εκτιμήτριας PDF Kernel καθίσταται πιο πεπλατυσμένη από την αντίστοιχη Γκαουσιανή όπως αντικατοπτρίζεται άλλωστε και στο Σχήμα 5.26. Η μέση τιμή της κατανομής/των δεδομένων δεν πρέπει να παραληφθεί ότι προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 1.21deg$. Βέβαια, δε θα μπορούσε να παραληφθεί ότι ακόμη ένας λόγος εμφάνισης των προαναφερόμενων μη γραμμικοτήτων καθώς και μείωσης του μεγέθους των γωνιών διατοιχισμού καθίσταται η μη γραμμική έκφραση της ροπής απόσβεσης του συστήματος.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Και στη δεδομένη περίπτωση εξάγονται τα διαγράμματα με τις πιθανότητες υπέρβασης γωνιών(starboard & port side) καθώς και σχετικός, αντιπροσωπευτικός των τελευταίων, πίνακας. Σημειωτέο, εδώ, κρίνεται το γεγονός πως συμπεριλήφθηκαν στους συναφείς υπολογισμούς τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος.



Σχήμα 5.27: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC22-
(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A *100%]
5	0.2894	0.3334	15.22%
7	0.1328	0.1614	21.59%
8	0.0836	0.1022	22.3%
10	0.0271	0.0317	16.85%
12	0.0064	0.006	-5.63%
13	0.0009	0.002	-23.61%
15	$2.667 \cdot 10^{-4}$	$1.4667 \cdot 10^{-4}$	-45%
16	$6.44 \cdot 10^{-5}$	$7.33 \cdot 10^{-5}$	13.8%
17	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$6.89 \cdot 10^{-5}$	416.67%

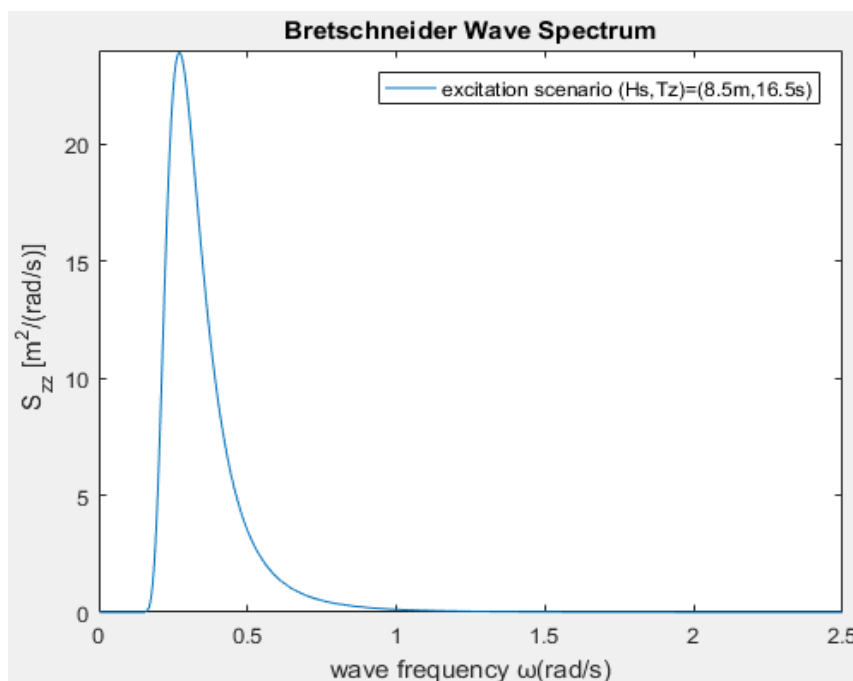
Πίνακας 5.13: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC22-
(Hs=8.5m,Tz=10.5s)}

Από τον Πίνακα 5.13 καθώς και από το ημι-λογαριθμικό διάγραμμα του Σχήματος 5.27, παρατηρείται πως, έπειτα της γωνίας των 11.5deg, το γραμμικοποιημένο μοντέλο υποεκτιμά την υπέρβαση γωνιών σε σχέση με το μη γραμμικό, με την απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπερβάσεων των δύο μοντέλων, υπολογισμένη ως προς αυτή του γραμμικοποιημένου, να μεγιστοποιείται στις 8deg, όντας ίση με 22.3%. Εν συνεχεία και κατά το διάστημα από 11.5deg μέχρι και λίγο νωρίτερα των 16deg, μέσω της γραμμικής μοντελοποίησης υπολογίζονται μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης γωνιών σ' αυτό το διάστημα λόγω πιο αποτελεσματικής δράσης της μη γραμμικής απόσβεσης όσον αφορά στη μείωση σχετικά υψηλών γωνιών διατοιχισμού αφενός και το μικρό αριθμό διαφυγών του αντίστοιχου μη γραμμικού συστήματος, όντας μία, αφετέρου. Στο διάστημα «υπεροχής» του γραμμικοποιημένου μοντέλου, η μέγιστη απόκλιση βρέθηκε ίση με -45% και αντιστοιχεί σε υπέρβαση των 15deg,

με την πιθανότητα που υπολογίζεται μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης να καθίσταται λίγο μεγαλύτερη της μισής της αντίστοιχης που ανακύπτει μέσω της γραμμικοποιημένης, ειδικότερα να αποτελεί το 55% της δεύτερης. Η μοναδική διαφυγή που σημειώθηκε από το σύνολο των 15000 διενεργούμενων προσομοιώσεων είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για το δεύτερο σημείο τομής των καμπυλών των πιθανοτήτων υπέρβασης και για την συνεπαγόμενη υπεροχή του μη γραμμικού μοντέλου για γωνίες μεγαλύτερες των 16deg περίπου. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ στην περίπτωση της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης μόλις 6 δεδομένα βρίσκονται άνω από το φράγμα των 17deg, στην περίπτωση της μη γραμμικής 31 δεδομένα, με τα 30 να αντιστοιχούν στη διαφυγή, καθίστανται υψηλότερα των 17deg, εκτοξεύοντας τη ποσοστιαία διαφορά στο 416.67%.

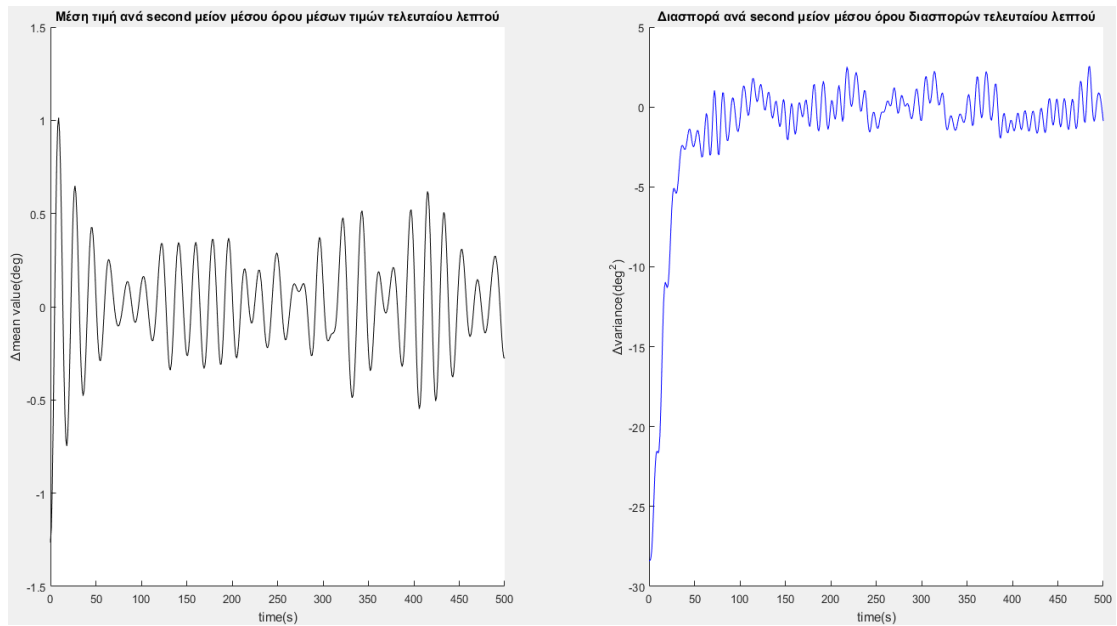
5.3.2.3 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC22-(Hs=8.5m, Tz=16.5s)

Κάτωθεν αναπαριστάται διαγραμματικά το φάσμα κυματισμών του σεναρίου διέγερσης με αντιπροσωπευτικό σημαντικό ύψος κύματος 8.5m και μέση περίοδο 16.5s συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμών, το οποίο διακατέχεται από περίοδο κορυφής ίση με 23.19s. Το εν λόγω σενάριο, το οποίο επενεργεί στην κατάσταση φόρτωσης 22 αλλά και στην κατάσταση φόρτωσης 27, αποτελεί ένα εξαιρετικά σπάνιο φαινόμενο καθώς συμβαίνει μόνο 2.2 φορές σε 100000 παρατηρήσεις, δίνοντας, έτσι, μια πιθανότητα εμφάνισης ίση με $2.2 \cdot 10^{-5}$.

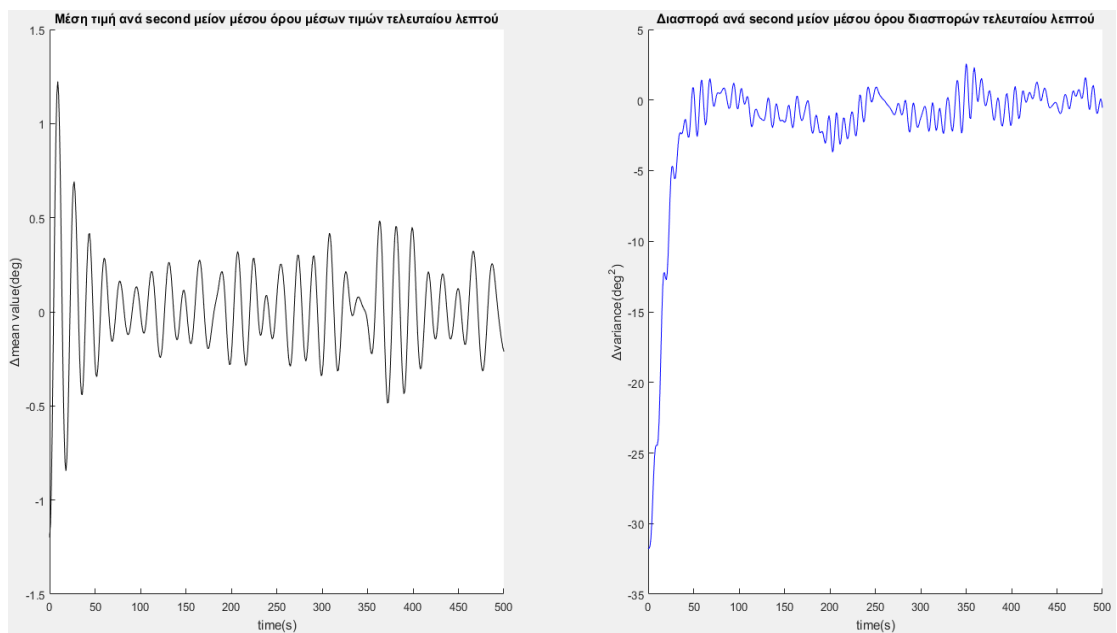


Σχήμα 5.28: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=16.5s)

Από τα παρακάτω διαγράμματα των μεταβολών μέσης τιμής και διακύμανσης συναρτήσει του χρόνου προκύπτει η χρονική στιγμή σταθεροποίησής τους που συναπάγεται τη μονιμοποίηση της απόκρισης του συστήματος. Έτσι, η μονιμοποίησή τους επέρχεται ύστερα από περίπου 1.5min και 1min για το γραμμικοποιημένο και για το μη γραμμικό μοντέλο αντίστοιχα.



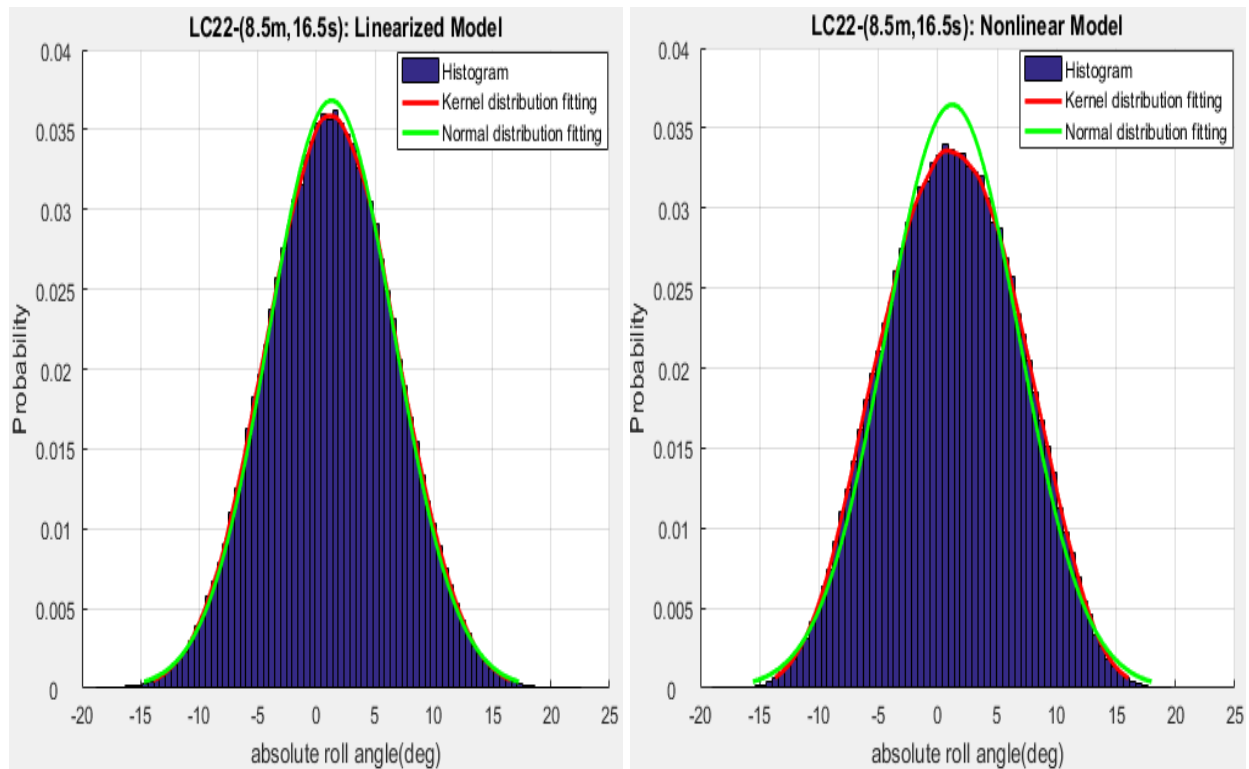
Σχήμα 5.29: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεϊ του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}



Σχήμα 5.30: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεϊ του χρόνου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Μέσω διενέργειας 15000 προσομοιώσεων μέχρι τη χρονική στιγμή 5min και για τις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης και λήψης τιμών απόλυτης γωνίας διατοιχισμού από 20 χρονικές στιγμές που ανήκουν στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το πλοίο ταλαντεύεται μόνιμα, εξαιρώντας ταυτόχρονα τις 5 διαφυγές που σημειώθηκαν στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης, παρήχθησαν τόσο τα παρακάτω ιστογράμματα, με βήμα ισαπέχοντων ευρών γωνιών ίσο με 0.5deg, και οι παρεμβαλλόμενες σ'αυτά PDFs όσο και πίνακες με τα σημαντικότερα στατιστικά μεγέθη.



Σχήμα 5.31: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Statistical Values	Loadcase 22 (Hs,Tz)=(8.5m,16.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	90	60
Simulation Time	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	5
Number of Data	300000	299880
Mean Value (deg)	1.28	1.21
Variance (deg ²)	28.4	31.56
Mean Value of 100 extreme values (deg)	18.92	18.11

Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.841	0.61
Mean Value of 10 extreme values (deg)	20.92	19.39
Maximum absolute rolling angle (deg)	22.51	19.68

Πίνακας 5.14: Στατιστικές Τιμές για την {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Όσον αφορά στο γραμμικοποιημένο μοντέλο, παρατηρείται μέσω του Σχήματος 5.31 ότι οι, παρεμβλλόμενες στο σχετικό ιστόγραμμα, PDFs που ακολουθούν κανονική και Kernel κατανομή είναι πανομοιότυπες. Επομένως, επαληθεύεται ότι η στοχαστική διεργασία της απόκρισης να ταυτίζεται με αυτήν της διέγερσης στην περίπτωση των γραμμικών συστημάτων. Η μέση τιμή της εν λόγω κατανομής ισούται με $\bar{\varphi} = 1.28deg$ απέχοντας μόλις 0.2% από την γωνία ισορροπίας φ_s και η διακύμανση είναι ίση με $Var \cong 28deg^2$ (Πίνακας 5.14). Η μέση τιμή των 100 υψηλότερων δεδομένων είναι ίση με 18.92deg και η τυπική τους απόκλιση ίση με 0.841deg. Οι 10 υψηλότερες γωνίες έχουν μέση τιμή 20.92deg, την ίδια στιγμή που η μέγιστη γωνία των δεδομένων είναι 22.5deg. Ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής αποσβέσεως προέκυψε ίσος με $\mu_e = 0.031 \frac{1}{s}$, ίδιος με τον αντίστοιχο της περίπτωσης όπου η διέγερση αντιπροσωπεύεται από σημαντικό ύψος κύματος Hs=8.5m και μέση περίοδο κυματισμών Tz=12.5s λόγω στρογγυλοποιήσεων στο 3^ο δεκαδικό καθώς και των πανομοιότυπων τυπικών αποκλίσεων της απόλυτης ταχύτητας διατοιχισμού.

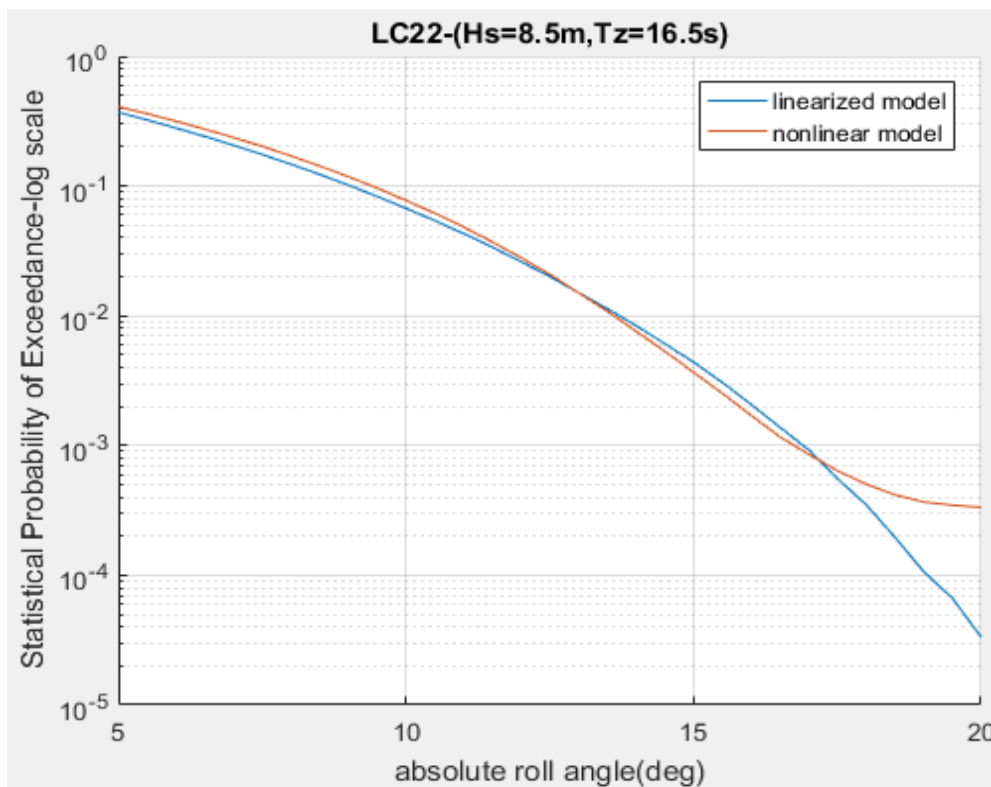
Μη γραμμικό μοντέλο

Παράλληλα, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση, είναι φανερή η απόκλιση των PDFs που ακολουθούν Kernel και Gauss, με την εκτιμήτρια PDF Kernel να παρεμβάλλει εμφανώς με πιο ορθολογικό και συνεπή τρόπο τα εύρη των γωνιών του δεδομένου ιστογράμματος. Η μορφολογία της χαρακτηρίζεται, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις μη γραμμικών μοντελοποιήσεων, από μικρότερο σημείο μεγίστου, δηλαδή από μικρότερες πιθανότητες εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή, και από πιο πεπλατυσμένα άκρα σε σχέση με την αντίστοιχη μορφολογία της Γκαουσιανής PDF. Ωστόσο, εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρώντας το δεξί σκέλος του Σχήματος 5.31 πως δεν επικρατούν έντονες μη γραμμικότητες καθώς η μορφή της εκτιμήτριας PDF Kernel, κυρίως στην περιοχή των παρειών της, δε διαφέρει αισθητά από την αντίστοιχη Γκαουσιανή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι συντελεστές των, μεγαλύτερης τάξης, όρων του μοχλοβραχίονα επαναφοράς καθίστανται μικροί και συγκρίσιμοι σε μέγεθος, έχοντας παραπλήσιες τιμές ταυτόχρονα, με το συντελεστή του γραμμικού όρου του, μετακεντρικού ύψους GM, με αποτέλεσμα να μην έχουν έντονη επίδραση. Η μέση τιμή της εκτιμήτριας PDF προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 1.21deg$ ενώ η διακύμανση ίση με $Var \cong 31.6deg^2$, η οποία καθίσταται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου μοντέλου (Πίνακας 5.14). Πιο συγκεκριμένα, σε πληθώρα προσομοιώσεων λόγω της μη γραμμικής έκφρασης των όρων επαναφοράς και απόσβεσης και της ένταξης της σχετικής γωνίας διατοιχισμού στο μοχλοβραχίονα επαναφοράς «γεννώνται» μη γραμμικότητες και αστάθειες στο πρόβλημα με συνεπάγόμενη μεταβολή εσωτερικών παραμέτρων του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σύστημα να ενδέχεται να μεταπηδήσει θέση/θέσεις ισορροπίας. Μέσω των δεδομένων μεταπηδήσεων και ταλαντώσεων του γύρω από τις νέες θέσεις ισορροπίας κατά τη χρονική διάρκεια της διατοιχιστικής του κίνησης σε αρκετές από τις διενεργηθείσες προσομοιώσεις, μπορούν να αποσαφηνιστούν τόσο οι μειωμένες συχνότητες εμφάνισης γωνιών στη γειτονιά της μέσης τιμής όσο και οι αυξημένες συχνότητες εμφάνισης γωνιών απομακρυσμένων από την τελευταία σε σχέση με το

γραμμικοποιημένο μοντέλο. Ειδικότερα, όσο αφορά το τελευταίο, παρατηρώντας το Σχήμα 5.31, οι πιθανότητες εμφάνισης των ευρών γωνιών που ανήκουν στα διαστήματα (-14.5deg,-4deg) και (6deg,15deg) καθίστανται μεγαλύτερες σε σχέση με τις συναφείς της γραμμικής μοντελοποίησης, γεγονός που συντελεί στην υψηλότερη τιμή διακύμανσης που παρατηρείται κατά το μη γραμμικό μοντέλο. Συνεχίζοντας, όπως διαφαίνεται και στον Πίνακα 5.14, η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 μεγαλύτερων τιμών δεδομένων είναι ίσες με 18.11deg και 0.61deg αντίστοιχα, ενώ η μέση τιμή των υψηλότερων 10 ίση με 19.4deg. Ο λόγος για τον οποίο τα στατιστικά μεγέθη όπως π.χ η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών, η μέση τιμή των υψηλότερων 10 και η μέγιστη γωνία διαφαίνονται υψηλότερα στην περίπτωση του γραμμικοποιημένου μοντέλου καθίσταται η επίδραση των μη γραμμικών όρων απόσβεσης, οι οποίοι, εκτός από το να εισάγουν μη γραμμικότητες στο σύστημα, συνεισφέρουν και στη δραστικότερη μείωση των γωνιών/πλατών διατοιχισμού σε σχέση με τον γραμμικοποιημένο συντελεστή μ_e .

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Συμπεριλαμβάνοντας στους υπολογισμούς των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών τις 5 διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος, υλοποιήθηκαν συναφές ημι-λογαριθμικό διάγραμμα καθώς και σχετικός πίνακας στον οποίο διακρίνεται της ποσοστιαίας απόκλισης μεταξύ των δύο μοντέλων.



Σχήμα 5.32: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC22-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A * 100%]
5	0.3704	0.4084	10.26%
7	0.2058	0.2367	15.02%
9	0.1016	0.118	16.12%
10	0.0673	0.0774	14.96%
12	0.0261	0.028	7.26%
15	0.0044	0.0037	-16.62%
17	$9.27 \cdot 10^{-4}$	$8.57 \cdot 10^{-4}$	-7.55%
18	0.00035	0.0005	43.81%
20	$3.33 \cdot 10^{-5}$	$3.33 \cdot 10^{-4}$	900%

Πίνακας 5.15: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC22- (Hs=8.5m, Tz=16.5s)}

Από το Σχήμα 5.32 καθώς και από τον Πίνακα 5.15 παρατηρείται πως το γραμμικοποιημένο μοντέλο υποεκτιμά σε σχέση με το μη γραμμικό τις πιθανότητες υπέρβασης γωνιών σε δύο διαστήματα. Το πρώτο διάστημα γωνιών εκτείνεται από τις 5deg έως και τις 12.5deg περίπου και το δεύτερο από τις 17.25deg περίπου και έπειτα. Στο μεταξύ των δύο αυτών διαστημάτων, το γραμμικοποιημένο προβλέπει υψηλότερες πιθανότητες υπέρβασης από το μη γραμμικό. Στο διάστημα γωνιών [5deg,12.5deg] δεν αποκλίνουν αισθητά οι προβλέψεις των δύο μοντέλων αφού δεν ξεπερνούν το 16%, αντιστοιχώντας σε υπέρβαση των 9deg. Στο διάστημα [12.5deg,17.5deg], εξαιτίας της δράσης της μη γραμμικής απόσβεσης και της συνεπαγόμενης ελάττωση των υψηλών σχετικά γωνιών αλλά και της σταδιακής «εξάλειψης» των γωνιών, κατά την αύξησή τους, όπου εμφανίζονται αρκετά πιο συχνά κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση όπως διακρίνεται και στο αντίστοιχο ιστόγραμμα (Σχήμα 5.31), το γραμμικό μοντέλο υπερκτιμά τις υπερβάσεις των γωνιών του συγκεκριμένου διαστήματος, με τη μεγαλύτερη, ωστόσο, απόκλιση να καταγράφεται στις 15deg όπου και η πιθανότητα υπέρβασης του μη γραμμικού αποτελεί το 83% περίπου της αντίστοιχης του γραμμικού μοντέλου. Από τις 17.5deg και έπειτα, λόγω των 5 διαφυγών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση του συστήματος και της λογικής μείωσης των δεδομένων της αντιτιθέμενης μοντελοποίησης, το μη γραμμικό μοντέλο εκτιμά υψηλότερες πιθανότητες υπέρβασης έναντι του γραμμικοποιημένου, με τη διαφορά ολοένα και να αυξάνει με την πάροδο των γωνιών, καθώς η σχετική καμπύλη του πρώτου τείνει να γίνει σταθερή λαμβάνοντας την τιμή της πιθανότητας ανατροπής $3.33 \cdot 10^{-4}$, την ώρα που η αντίστοιχη καμπύλη του δεύτερου ακολουθεί συνεχώς φθίνουσα πορεία. Επίσης, να σημειωθεί ότι 105 δεδομένα βρέθηκαν άνω των 18deg στα πλαίσια της γραμμικής μοντελοποίησης, τη στιγμή όπου 151 δεδομένα από τη στατιστική ανάλυση του μη γραμμικού συστήματος ήταν μεγαλύτερα της συγκεκριμένης γωνίας. Τέλος, η ποσοστιαία απόκλιση των πιθανοτήτων υπέρβασης εκτοξεύεται στις 20deg, λαμβάνοντας την τιμή 900%, καθώς στην περίπτωση της γραμμικής μοντελοποίησης μόλις 11 δεδομένα βρίσκονται άνω των 20deg, τη στιγμή που 100 δεδομένα, οφειλόμενα εξ'ολοκλήρου στις διαφυγές, ξεπερνούν την εν λόγω γωνία στα πλαίσια του μη γραμμικού μοντέλου.

5.3.3 Κατάσταση Φόρτωσης 27

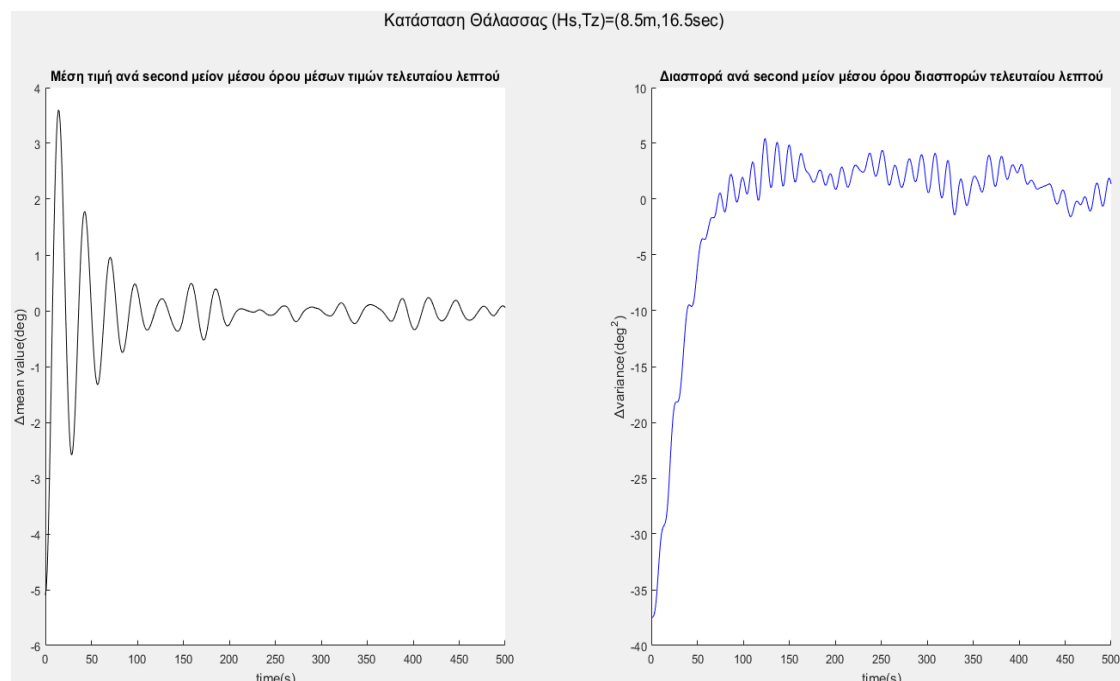
Για τη κατάσταση φόρτωσης 27 έχουν μοντελοποιηθεί τα φάσματα Bretschneider και Davenport για κυματισμούς και άνεμο αντίστοιχα που αντιπροσωπεύονται από σημαντικό ύψος κύματος ίσο με Hs=8.5m και μέσες περιόδους ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ίσες με Tz=11.5s, Tz=13.5s και Tz=16.5s. Δηλαδή μελετήθηκαν τα ακόλουθα τρία σενάρια

διέγερσης : $(H_s, T_z)=(8.5m, 11.5s)$, $(H_s, T_z)=(8.5m, 13.5s)$ και $(H_s, T_z)=(8.5m, 16.5s)$. Εξαιτίας της πολύ μικρής ιδιοσυχνότητας της δεδομένης κατάστασης, $\omega_0=0.2215 \text{ rad/s}$, για καμία μέση περίοδο κυματισμού υπό δεδομένο ύψος κύματος του Wave Scatter Table δεν εντοπίζεται συχνότητα κορυφής του φάσματος Bretschneider κοντά σ' αυτή. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα κατάσταση θάλασσας και ανέμου ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$), κατά την οποία η μεγιστοποίηση της ενέργειας των κυματισμών επέρχεται στη συχνότητα $\omega_{\text{peak}}=0.271 \text{ rad/s}$ αποτελώντας, ταυτόχρονα, ένα ρεαλιστικό, όχι όμως και ένα αρκετά συχνό σενάριο, με την πιθανότητα εμφάνισής του να είναι $2.2 \cdot 10^{-5}$. Η κατάσταση ($H_s=8.5m, T_z=11.5s$) αφορά κυρίως υψίσυχνους κυματισμούς και έχει συχνότητα κορυφής ίση με 0.388 rad/s , η οποία απέχει αρκετά από τη ιδιοσυχνότητα, ενώ η ($H_s=8.5m, T_z=13.5s$) έχει περίοδο κορυφής ίση με $18.98s$. Η γωνία ισορροπίας υπό τη μέση επίδραση του ανέμου είναι ίση με $\varphi_s = 5.1 \text{ deg}$ για όλα τα σενάρια διέγερσης λόγω του κοινού σημαντικού ύψους κύματος H_s . Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η συγκεκριμένη γωνία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις προηγούμενες γωνίες ευσταθούς ισορροπίας των προαναφερθέντων δύο καταστάσεων φόρτωσης. Αυτό μπορεί να αποσαφηνισθεί λόγω της χαμηλής τιμής του αρχικού μετακεντρικού ύψους $GM=0.803m$.

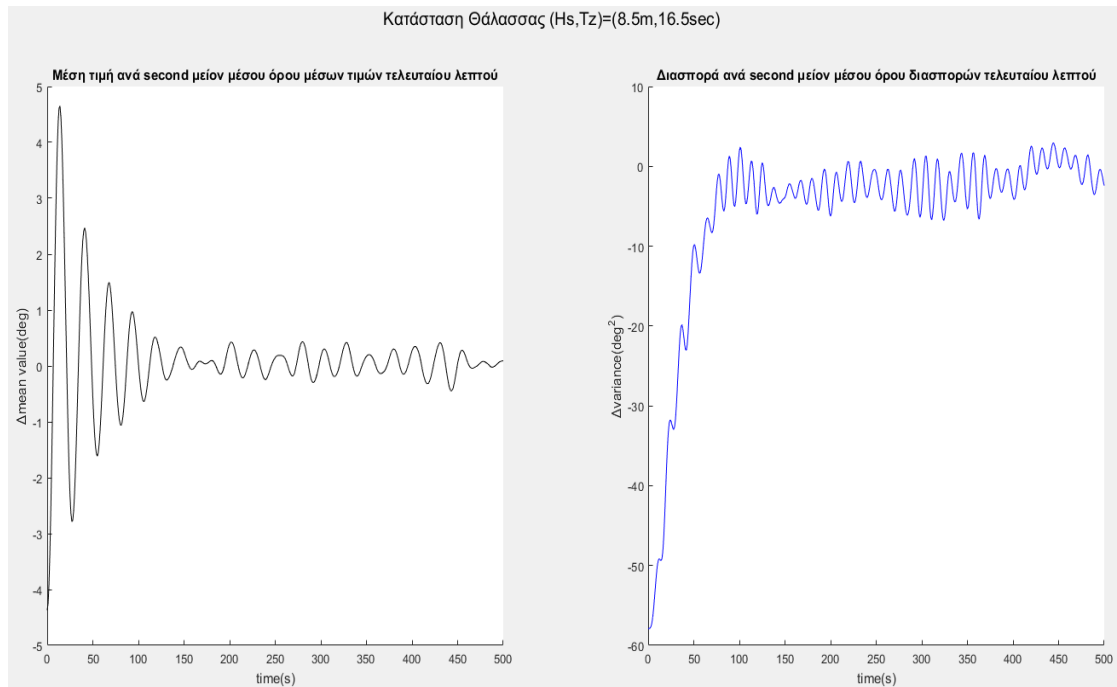
5.3.3.1 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC27-($H_s=8.5m, T_z=16.5s$)

Υπενθυμίζεται εδώ ότι δε διαφαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του φάσματος κυματισμών Bretschneider, μιας και έχει μελετηθεί η επίδρασή του στην κατάσταση φόρτωσης 22.

Παρακάτω διαφαίνονται οι μεταβολές μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσει του χρόνου για τα δύο συγκρινόμενα μοντέλα με σκοπό βρεθεί προσεγγιστικά η χρονική στιγμή κατά την οποία ομαλοποιούνται τα προηγούμενως αναφερόμενα στατιστικά μεγέθη. Ως χρονική στιγμή σταθεροποίησής τους εκλέχθηκε αμφοτέρωθεν και για τα δύο μελετούμενα μοντέλα τα 2min.



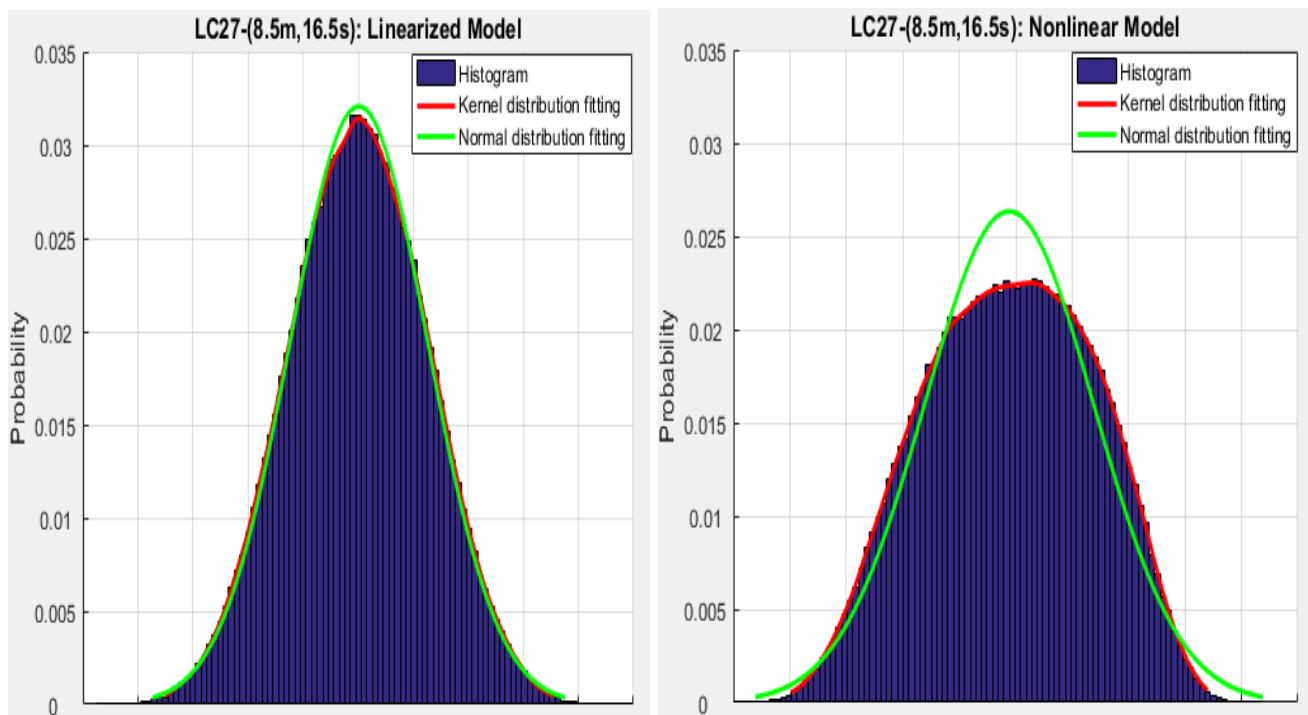
Σχήμα 5.33: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC27-($H_s=8.5m, T_z=16.5s$)}



Σχήμα 5.34: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Εκτελώντας πληθώρα προσομοιώσεων, ειδικότερα 15000, μέχρι τα 7min, ανακύπτουν τα 375000 και 374900 στατιστικά δεδομένα από αντίστοιχες 25 χρονικές στιγμές, οι οποίες έπονται των 2min, του γραμμικού και του μη γραμμικού μοντέλου αντίστοιχα αμελώντας τις 4 διαφυγές στα πλαίσια της μοντελοποίησης του μη γραμμικού συστήματος, και κατόπιν παράγονται τα ιστογράμματα αυτών με τις τιμές τους να κατανέμονται σε εύρη των 0.5deg στα



Σχήμα 5.35: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

οποία παρεμβάλλονται οι PDFs των δύο μοντέλων. Ο αρκετά μεγάλος χρόνος προσομοίωσης των 7min επιλέχθηκε ώστε να ελαχιστοποιηθεί κατά το μέγιστο δυνατό το σφάλμα μεταξύ τιμών απόλυτης γωνίας διατοιχισμού του ιστογράμματος και της Γκαουσιανής PDF ιδίως για την περιοχή κοντά στη μέση τιμή στην περίπτωση του γραμμικού συστήματος.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα ευρήματα της στατιστικής ανάλυσης που δνεργήθηκε.

Statistical Values	Loadcase 27 (Hs,Tz)=(8.5m,16.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	120	120
Simulation Time (s)	420	420
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	4
Number of Data	375000	374900
Mean Value (deg)	5.07	4.42
Variance (deg ²)	38.98	56.63
Mean Value of 100 extreme values (deg)	26.03	24
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	1.084	0.686
Mean Value of 10 extreme values (deg)	28.15	25.56
Maximum absolute rolling angle (deg)	29.82	26.67

Πίνακας 5.16: Στατιστικές Τιμές για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

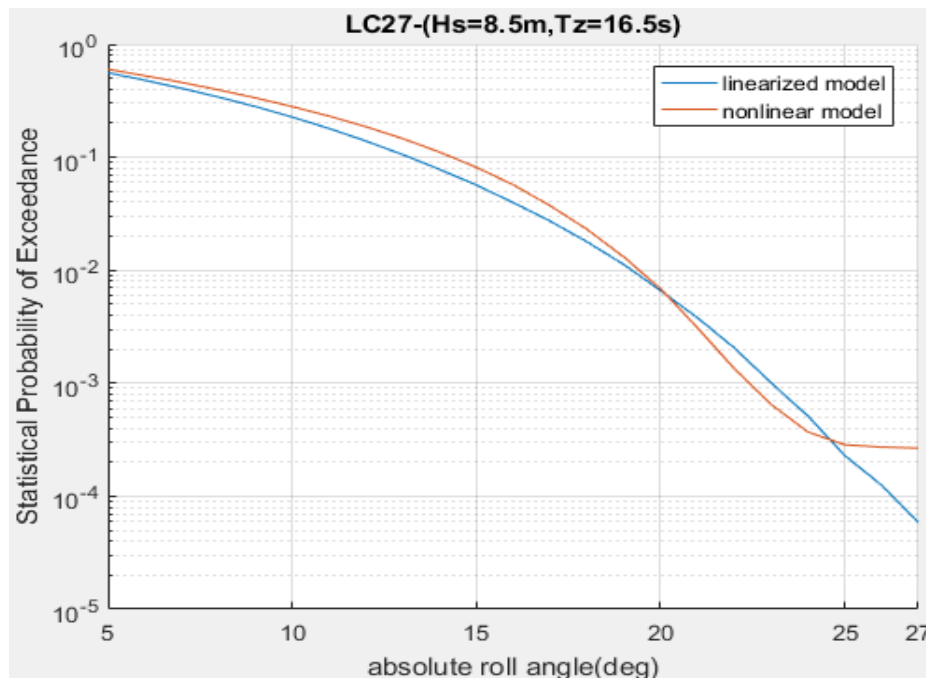
Σε πρώτη φάση, όσον αφορά στο γραμμικοποιημένο μοντέλο, θα μπορούσε να υποστηριχθεί, βάσει του αριστερού μέρους του Σχήματος 5.35, ότι η εκτιμήτρια PDF που ακολουθεί μη παραμετρική κατανομή Kernel, η οποία παρεμβάλλεται στο δεδομένο ιστογράμμο, σχεδόν ταυτίζεται με την αντίστοιχη Γκαουσιανή, επιβεβαιώνοντας για μια ακόμη φορά την ισχύ της θεωρίας των γραμμικών συστημάτων. Η μέση τιμή της κατανομής Gauss είναι $\bar{\phi} = 5.07deg$, συμπίπτοντας με τη γωνία ευσταθούς ισορροπίας ϕ_s , και η διασπορά ισούται με $Var \cong 39deg^2$, ενώ οι μέσες τιμές των 100 και 10 μεγαλύτερων τιμών δεδομένων γωνίας διατοιχισμού βρέθηκαν ίσες με 26deg και 28.15deg αντίστοιχα (Πίνακας 5.16). Επίσης, η ρίζα του τετραγώνου της απόκλισης τιμών γωνίας γύρω από την πρώτη εκ των δύο μέση τιμή εκφράζεται από την τυπική απόκλιση των δεδομένων τιμών η οποία είναι ίση με 1.08deg, αποτελώντας μια αρκετά μεγάλη τιμή. Δε θα μπορούσε να παραληφθεί ότι ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης προέκυψε ίσος με $\mu_e = 0.023 \frac{1}{s}$, αποτελώντας μια όχι και τόσο μεγάλη τιμή, εν γένει, γραμμικής απόσβεσης.

Μη γραμμικό μοντέλο

Είναι οφθαλμοφανές, αν παρατηρήσει κανείς προσεκτικά το δεξί σκέλος του Σχήματος 5.35, ότι η μη γραμμική προσέγγιση του προβλήματος διαφέρει αρκετά από την αντίστοιχη γραμμικοποιημένη. Συγκεκριμένα, η κατανομή Kernel αλλά και η μορφή του αντίστοιχου ιστογράμματος διαφέρουν αισθητά από την παρεμβαλλόμενη κατανομή Gauss στο δεδομένο ιστογράμμο, γεγονός το οποίο αποτελεί δείγμα υπάρξεως έντονων μη γραμμικοτήτων στο

πρόβλημα. Η απόκριση του πλοίου κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση λαμβάνει τιμές κατά τις οποίες ο μοχλοβραχίονας δεν βρίσκεται στη γραμμική περιοχή και έτσι εισάγει στο πρόβλημα αστάθειες. Αυτό εντείνεται λόγω και του μεγάλου μέτρου των συντελεστών των υψηλότερης τάξης μη γραμμικών όρων του μοχλοβραχίονα επαναφοράς. Έτσι, οι μεγάλες γωνίες απόλυτης άρα και σχετικής γωνίας διατοιχισμού σε συνδυασμό με τους σχετικά υψηλό μέτρου συντελεστές των όρων ανώτερης τάξεως του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, όπως διαφαίνεται και στην πολυωνυμική 13^{ου} βαθμού αναπαράστασή του (4.1.3), εντείνουν τις μη γραμμικότητες στο πρόβλημα. Αυτές οι μη γραμμικότητες εντοπίζονται στην παρούσα στατιστική ανάλυση και στα δεδομένα παραχθέντα ιστογράμματα όχι μόνο από τις αισθητά μειωμένες, σε σχέση με το γραμμικοποιημένο, πιθανότητες εμφάνισης των ευρών γωνιών γύρω από τη μέση τιμή, περίπου κατά 0.009, αλλά και από τις μεγαλύτερες συχνότητες των αρκετά απομακρυσμένων ευρών γωνιών από την τελευταία. Ειδικότερα, στην περίπτωση της μη γραμμικής μοντελοποίησης έχουν μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης γωνίες μεταξύ των διαστημάτων ($\min\{\varphi_{\text{abs,ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ}}\}[\text{deg}], -3\text{deg})=(-18.5\text{deg}, -3\text{deg})$ και $(11.5\text{deg}, 21\text{deg})$ σε σχέση με τις αντίστοιχες της γραμμικοποιημένης. Γι' αυτό και η μορφή της εκτιμήτριας PDF διαφαίνεται διογκωμένη και πεπλατυσμένη στις πλευρές, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μικρότερο μέγιστο από την αντίστοιχη Γκαουσιανή. Η μέση τιμή προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 4.42\text{deg}$ και η διακύμανση ίση με $\text{Var} = 56.63\text{deg}^2$ (Πίνακας 5.16). Συγχρόνως, οι μη γραμμικοί όροι απόσβεσης, εκτός από τις μη γραμμικότητες που προσδίδουν στο σύστημα, μειώνουν τα επίπεδα τιμών απόκρισης, γεγονός που εντοπίζεται όχι μόνο από τη μέση τιμή και τυπική απόκλιση των υψηλότερων 100 γωνιών 24deg και 0.69deg αντίστοιχα αλλά και από τη μέση τιμή των υψηλότερων 10 25.56deg, καθώς αποτελούν στατιστικά μεγέθη τα οποία καθίστανται μικρότερα των αντίστοιχων του γραμμικοποιημένου προβλήματος.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)



Σχήμα 5.36: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC27-(Hs=8.5m, Tz=16.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance	Statistical Probability of Exceedance	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
--	---------------------------------------	---------------------------------------	--------------------------------------

	Linearized Model(A)	Nonlinear Model(B)	
5	0.559	0.599	7.2%
8	0.3408	0.3948	15.83%
10	0.227	0.2807	23.67%
12	0.1393	0.1863	33.77%
15	0.0567	0.0815	43.8%
18	0.0179	0.0231	29.18%
20	0.0066	0.0069	4.12%
23	0.001	$6.51 \cdot 10^{-4}$	-35.62%
25	$2.29 \cdot 10^{-4}$	$2.85 \cdot 10^{-4}$	24.42%
27	$5.87 \cdot 10^{-5}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	354.55%

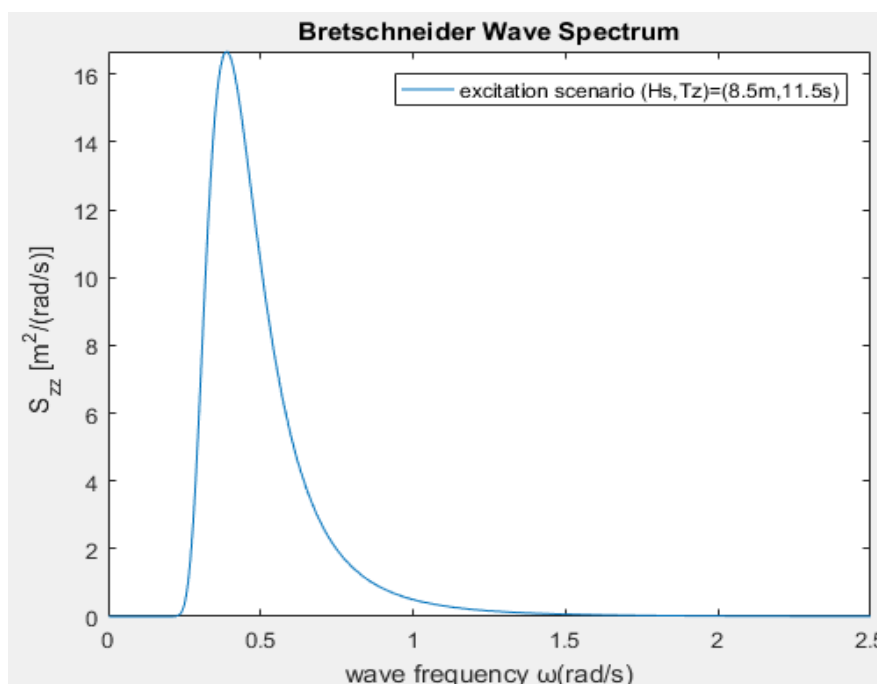
Πίνακας 5.17: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC27- (Hs=8.5m,Tz=16.5s)}

Για την κατασκευή του παραπάνω ημι-λογαριθμικού διαγράμματος πιθανοτήτων υπέρβασης (Σχήμα 5.36) και του σχετικού πίνακα (Πίνακας 5.17) έχουν συμπεριληφθεί, σε αντίθεση με ό,τι συνέβη στην περίπτωση των ιστογραμμάτων, οι 4 διαφυγές του συστήματος οι οποίες αντιστοιχούν σε 100 δεδομένα μεγαλύτερα της γωνίας απώλειας ευστάθειας ϕ_{fail} . Οι διαφυγές αυτές είναι υπεύθυνες για το δεύτερο σημείο τομής των καμπυλών των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο αντιτιθέμενων μοντέλων το οποίο αντιστοιχεί περίπου στις 24.5deg. Όπως συνήθως συμβαίνει, έτσι και εδώ η γραμμική μοντελοποίηση προβλέπει μικρότερες πιθανότητες υπέρβασης γωνιών από μικρής έως και μεσαίας κλίμακας (μέτρου) λόγω των μεγαλύτερων πιθανοτήτων εμφάνισης γωνιών στα διαστήματα (11.5deg,20deg) και (-18.5deg,-3deg), με τη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των δύο μοντελοποιήσεων να μεγιστοποιείται κατά την υπέρβαση των 15deg, λαμβάνοντας την τιμή 44%. Αυτό σημαίνει πως η πιθανότητα υπέρβασης υπολογισμένη μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης είναι κάτι λιγότερο από 1.5 φορά της αντιστοιχίας της γραμμικοποιημένης. Η απόκλιση μεταξύ τους ολοένα και συρρικνώνεται μέχρι και τις 20deg, όπου από εκεί και έπειτα, μέχρι βέβαια το φράγμα των 24.5deg περίπου, το γραμμικοποιημένο υπερεκτιμά τις υπερβάσεις γωνιών του εν λόγω διαστήματος, με τη μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση των δύο μοντελοποιήσεων ως προς της γραμμικοποιημένης, ωστόσο, να μην υπερβαίνει το 36%. Αυτή η υπεροχή στην πρόβλεψη των υπερβάσεων γωνιών διατοιχισμού οφείλεται στην ελάττωση υψηλών γωνιών που επιτυγχάνεται με τη χρήση της μη γραμμικής απόσβεσης καθώς και στην «επικράτηση» της τελευταίας έναντι των 4 διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος. Με απλά λόγια, στο δεδομένο διάστημα ο αριθμός των διαφυγών δεν είναι αρκετός έτσι ώστε οι πιθανότητες υπέρβασης του μη γραμμικού να καθίστανται υψηλότερες αυτών του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Τέλος, η φθίνουσα πορεία της καμπύλης των πιθανοτήτων υπέρβασης του γραμμικού μοντέλου σε συνδυασμό με την τάση προς σταθεροποίηση της αντίστοιχης καμπύλης του μη γραμμικού στην τιμή της πιθανότητας ανατροπής, η οποία ισούται με $2.67 \cdot 10^{-4}$, λόγω των διαφυγών, οδηγεί στην πρόβλεψη περισσότερων υπερβάσεων γωνιών διατοιχισμού από πλευράς μη γραμμικού μοντέλου από τις 24.5deg και έπειτα, με τη διαφορά μεταξύ των δύο μοντελοποιήσεων ολοένα και να αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, η πιθανότητα υπέρβασης των 25deg μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης είναι κατά 25% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης, ενώ η διαφορά γίνεται χαώδης στις 27deg, όπου η καμπύλη έχει εξ' ολοκλήρου οριζοντιωθεί λαμβάνοντας την τιμή $2.67 \cdot 10^{-4}$.

5.3.3.2 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC27-(Hs=8.5m, Tz=11.5s)

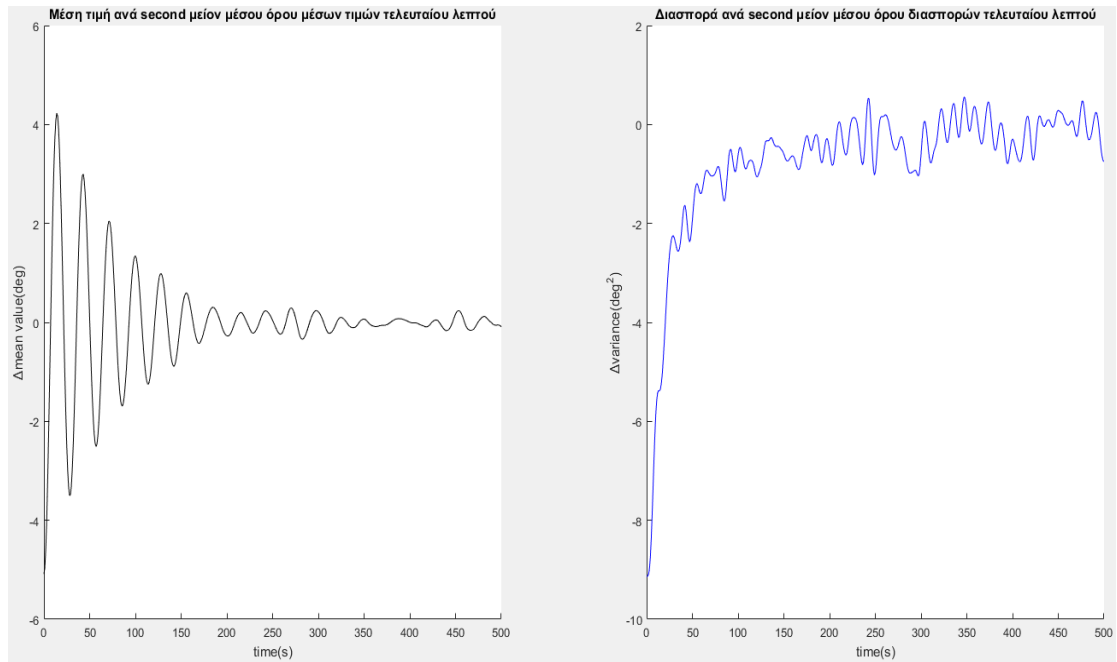
Το σενάριο, το οποίο αντιπροσωπεύεται από σημαντικό ύψος κύματος Hs=8.5m και μέση περίοδο κύματος Tz=11.5s, αποτελεί ένα σχετικά συνχό φαινόμενο με πιθανότητα εμφάνισης περίπου ίση με $3 \cdot 10^{-3}$.

Στο παρακάτω διάγραμμα αναπαριστάται το φάσμα Bretschneider του εν λόγω σεναρίου διέγερσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως το δεδομένο φάσμα λαμβάνει αμελητέες τιμές για συχνότητα 0.21rad/s περίπου. Επομένως, στη δεδομένη περίπτωση η ενέργεια κυματισμών με συχνότητα κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος είναι αρκετά μικρή, επομένως αναμένονται μικρότερες γωνίες κατά τη μόνιμη απόκριση σε σχέση με την επίδραση στη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης του προγενέστερου σεναρίου διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=16.5s).

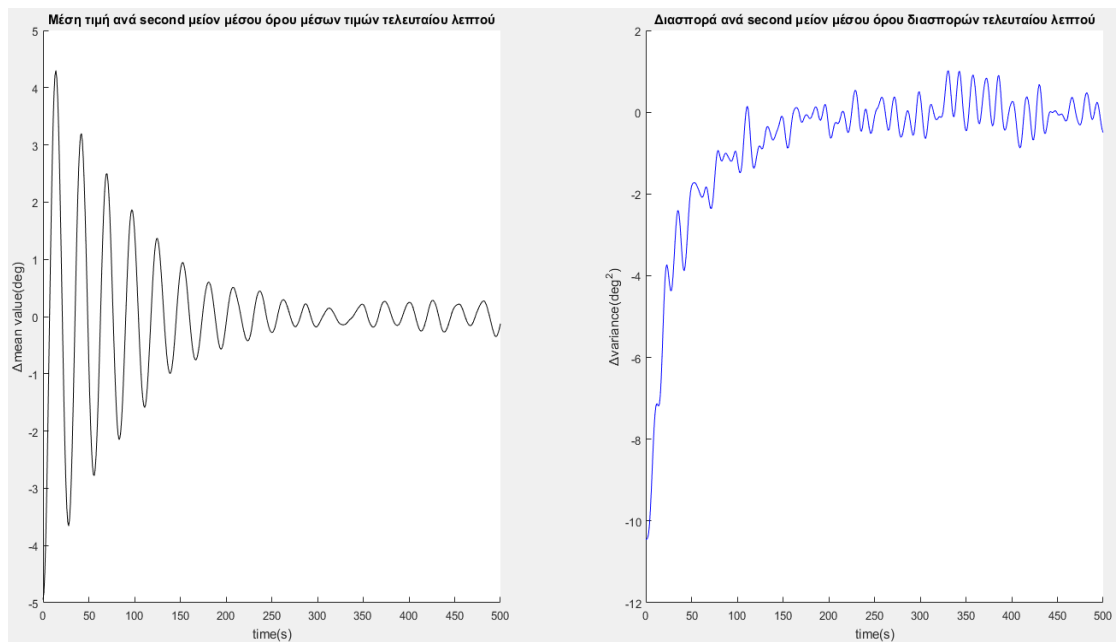


Σχήμα 5.37: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=11.5s)

Από τα ακόλουθα διαγράμματα των μεταβολών των στατιστικών μεγεθών, μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσει του χρόνου, μπορεί να αποφανθεί ότι ο χρόνος που μεσολαβεί για την σταθεροποίησή τους είναι ίσος προσεγγιστικά με 200s τόσο για το γραμμικοποιημένο και όσο και για το μη γραμμικό μοντέλο.



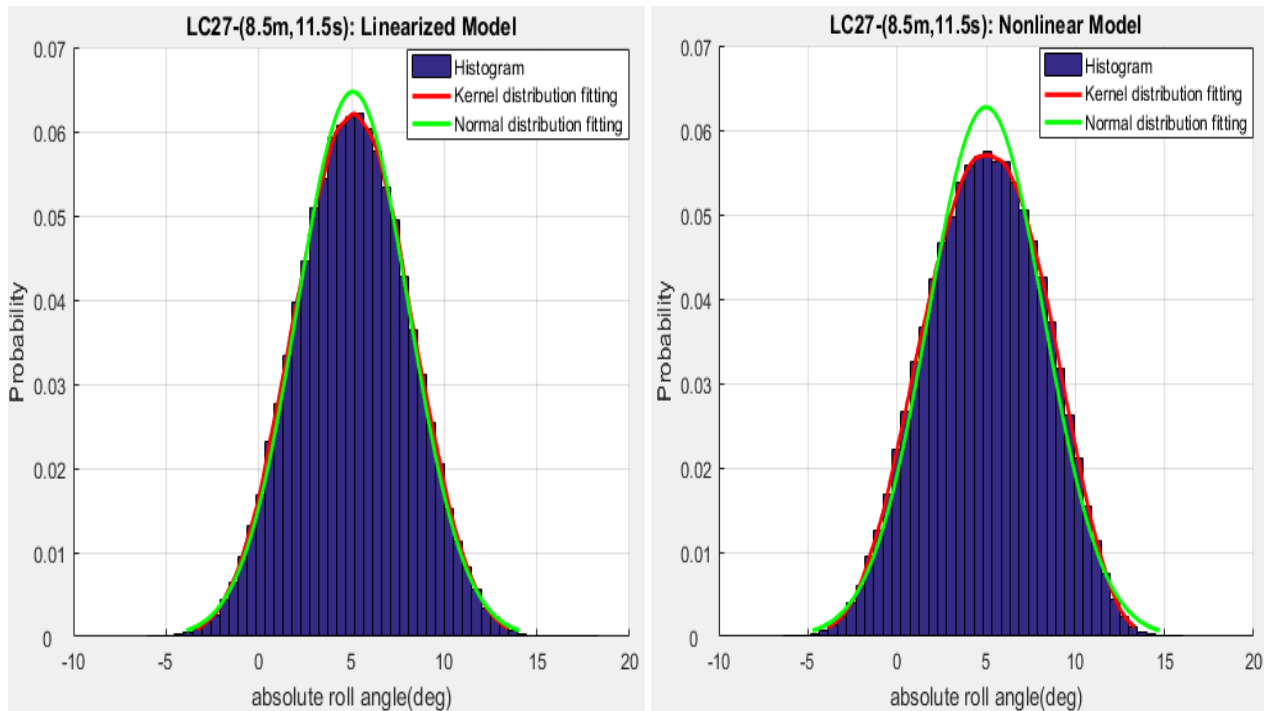
Σχήμα 5.38: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC27-(Hs=8.5m, Tz=11.5s)}



Σχήμα 5.39: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC27-(Hs=8.5m, Tz=11.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Ακολούθως διακρίνονται τα ιστογράμματα και οι παρεμβαλλόμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDFs) Kernel και Gauss καθώς και πίνακας με τις εξαγόμενες στατιστικές τιμές τόσο για το γραμμικοποιημένο όσο και για το μη γραμμικό μοντέλο. Τα 300000 στατιστικώς επεξεργασμένα δεδομένα προέκυψαν ύστερα από πραγματοποίηση 15000 προσομοιώσεων 5 min και για τα δύο μοντέλα. Να σημειωθεί ότι δε σημειώθηκαν διαφυγές στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης του προβλήματος. Τέλος, για την κατασκευή των ιστογραμμάτων έχει ληφθεί 0.5deg ως βήμα των ισαπέχοντων ευρών γωνιών διατοιχισμού.



Σχήμα 5.40: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}

Loadcase 27 (Hs,Tz)=(8.5m,11.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	200	200
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	0
Number of Data	300000	300000
Mean Value (deg)	5.08	4.99
Variance (deg ²)	8.97	10.61
Mean Value of 100 extreme values (deg)	14.89	14.48
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.61	0.331
Mean Value of 10 extreme values (deg)	16.14	15.14

Maximum absolute rolling angle (deg)	18.27	15.63
--------------------------------------	-------	-------

Πίνακας 5.18: Στατιστικές Τιμές για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Καταρχάς, κρίνεται αναγκαίο να επισημανεί ότι για ακόμη μια φορά η απόκριση του συστήματος αποτελεί μια Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία, καθώς η αντίστοιχη PDF είναι κατάλληλη για την παρεμβολή των τιμών απόλυτης γωνίας του ιστογράμματος κατά τη γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση του συστήματος. Αυτό διαφαίνεται άλλωστε και από το Σχήμα 5.40 καθώς είναι ευδιάκριτη η ομοιότητα των δύο PDF των δύο κατανομών Gauss και Kernel. Ωστόσο, η απόκλιση, ούσα μικρή σχετικά, μεταξύ τους στη γειτονιά της μέσης τιμής οφείλεται, όπως έχει προαναφερθεί, στο μη επαρκή χρόνο προσομοίωσης και συνεπώς στο μη επαρκή αριθμό συνιστωσών κυμάτων και ριπών ανέμου, ώστε η διέγερση, επομένως και η απόκλιση, να αποτελεί μια αμιγώς Γκαουσιανή διεργασία. Η μέση τιμή της κατανομής Gauss ισούται με $\bar{\varphi} = 5.08deg$, η οποία ταυτίζεται σχεδόν με την γωνία ισορροπίας λόγω μέσης επίδρασης ανέμου, ενώ η διακύμανση είναι ίση με $Var \cong 9deg^2$ (Πίνακας 5.18). Ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης ισούται με $\mu_e = 0.013 \frac{1}{s}$ που λογίζεται, γενικά, ως μια μικρή τιμή απόσβεσης. Ακόμα, η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων δεδομένων προέκυψαν ίσες με 14.89deg και 0.61deg αντίστοιχα, την ίδια στιγμή που η μέση τιμή των υψηλότερων 10 βρέθηκε ίση με 16.14deg. Η μέγιστη παρατηρούμενη γωνία από τα στατιστικώς αναλυθέντα δεδομένα είναι η 18.28deg. Γίνεται άμεσα αντιληπτό, πως η απόκριση δε λαμβάνει ιδιαίτερα υψηλές τιμές, με τα πλάτη διατοιχισμού να μην υπερβαίνουν στις περισσότερες προσομοιώσεις τις 10deg, λαμβάνοντας, ταυτόχρονα, υπόψη ότι η γωνία ισορροπίας είναι προσεγγιστικά 5deg. Και αυτό γιατί, η διακριτοποίηση του αντίστοιχου φάσματος Bretschneider με βήμα $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_{exp}} = \frac{2\pi}{300} = 0.021 \frac{rad}{s}$ οδηγεί, αν την ίδια στιγμή προσθέσει κανείς στην εξίσωση ότι ως αρχική συχνότητα της διακριτοποίησης του φάσματος Bretschneider λήφθηκε η 0.018rad/s, όπως διαφαίνεται και από το συναφές Σχήμα 5.37, στο συμπέρασμα ότι η συχνότητα όλων των κυματισμών, υψίσυχνων εδώ, αλλά και η συχνότητα κορυφής του αντιπροσωπευτικού τους φάσματος βρίσκονται μακριά από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος με αποτέλεσμα το πλοίο να μην υφίσταται συντονιστικά και επικίνδυνα, από τη σκοπιά εμφάνισης υψηλών γωνιών, φαινόμενα.

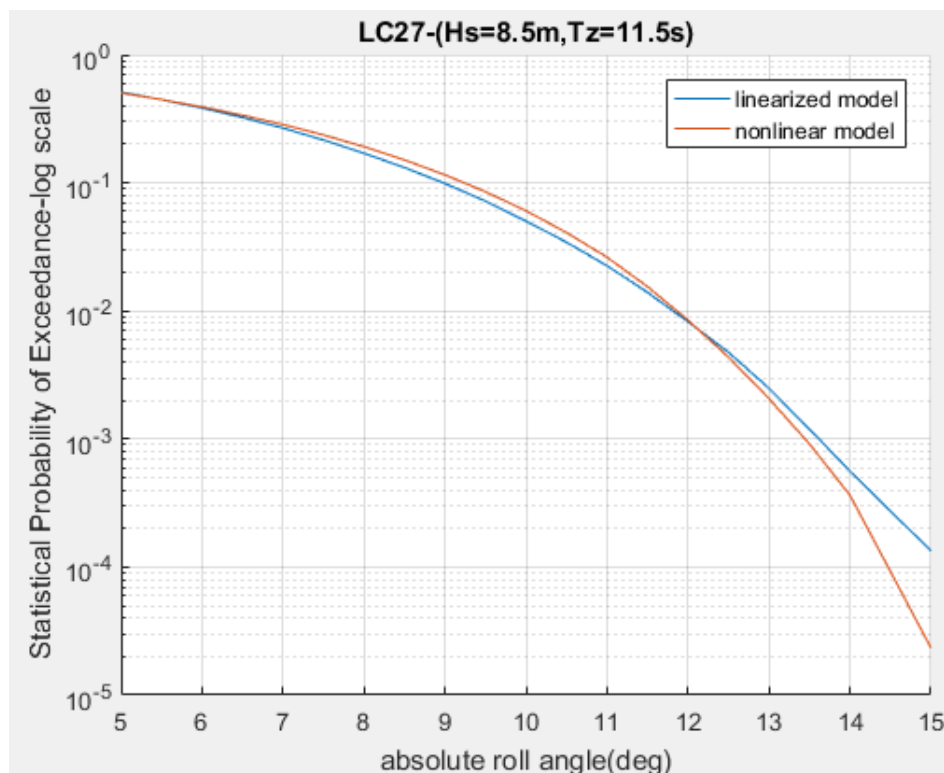
Μη γραμμικό μοντέλο

Στον αντίποδα, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση (δεξί σκέλος Σχήματος 5.40), παρατηρείται ότι οι PDFs των δύο κατανομών, Gauss και Kernel, ομοιάζουν αρκετά, αν εξαιρέσει κανείς τις αισθητά μειωμένες πιθανότητες εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή σε σχέσεις με εκείνες της γραμμικοποιημένης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο μη γραμμικό σύστημα δεν συνυπάρχουν έντονες μη γραμμικότητες με συνεπακόλουθο την απουσία εμφανών ασταθειών. Έτσι, το παρόν σύστημα δε χαρακτηρίζεται ως ισχύρα μη γραμμικό όπως το προγενέστερο υπό την επίδραση του σεναρίου διέγερσης (Hs=8.5m,Tz=16.5s). Ωστόσο, η επίδραση των όχι και τόσο έντονων μη γραμμικοτήτων εντοπίζεται, στις υψηλότερες συχνότητες εμφάνισης μεσαίας κλίμακας γωνιών διατοιχισμού σε σχέση με το γραμμικοποιημένο μοντέλο, σε μειωμένο βαθμό βέβαια από τις μειωμένες πιθανότητες εμφάνισης γύρω από τη μέση τιμή, γεγονός που επιδρά και στη μεγαλύτερη τιμή της διακύμανσης $Var = 10.6deg$ (Πίνακας 5.18) σε σχέση με την αντίστοιχη της γραμμικής μοντελοποίησης. Εμβαθύνοντας περισσότερο στο θέμα, οι έντονες μη γραμμικότητες απουσιάζουν από το παρόν σύστημα προκαλώντας ταυτόχρονα τη ψευδαίσθηση της «γραμμικότητας», η οποία φαίνεται να εμφανίζεται εν μέρει στη συμπεριφορά του, λόγω του

γεγονότος ότι οι ανώτερης/μεγαλύτερης τάξης μη γραμμικοί όροι του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, ο οποίος εκπροσωπείται από τη σχετική γωνία διατοιχισμού, τείνουν στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι η απόλυτη γωνία διατοιχισμού λαμβάνει τιμές στις περισσότερες διενεργηθείσες προσομοιώσεις που δε υπερβαίνουν τις 15deg με αντίκτυπο τμε αντίκτυπο τη λήψη ακόμη μικρότερων, από τις προαναφερθείσες, τιμών από τη σχετική γωνία εξαιτίας της επιδρώσας κλίσης κυματισμών. Έτσι, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη και το έντονο “*hardening effect*” (αύξηση δυσκαμψίας συστήματος κατά την απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας) του μοχλοβραχίονα επαναφοράς το οποίο, εκτεινόμενο ως ένα μεγάλο διάστημα γωνιών, έχοντας ως αποτέλεσμα την οριοθέτηση της γραμμικής του περιοχής μέχρι και τις 11.5deg, συμπεραίνεται ότι οι τιμές που λαμβάνει η σχετική γωνία διατοιχισμού απέχουν ελάχιστα από την περιοχή στην οποία ο μοχλοβραχίονας καθίσταται γραμμικός. Αυτό έχει ως άμεσο επακόλουθο την παραπλήσια μορφή της εκτιμήτριας PDF Kernel με την αντίστοιχη της Γκαουσιανής PDF. Εδώ δε πρέπει να παραληφθεί ότι η μέση τιμή κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση προέκυψε 5deg, αποκλίνοντας κατά 0.1deg περίπου από τη γωνία ισορροπίας φ_s λόγω ασυμμετρίας του μη γραμμικού τροποποιημένου μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZres. Συνεχίζοντας, οι μη γραμμικοί όροι απόσβεσης, εκτός από τις, όχι και τόσο αισθητές, μη γραμμικότητες που εισάγουν στο σύστημα, συντελούν στην ταλαντωτική συμπεριφορά του πλοίου με μικρότερα, ωστόσο παραπλήσια, πλάτη διατοιχισμού σε σχέση με εκείνα του γραμμικοποιημένου προβλήματος. Αν και η μέση τιμή των 100 υψηλότερων δεδομένων 14.48deg απέχει μόλις περίπου 0.5deg από τη συναφή της γραμμικής μοντελοποίησης, η τυπική απόκλιση των δεδομένων γωνιών 0.331deg διαφέρει αρκετά, όντας μισή, από την αντίστοιχη στα πλαίσια του γραμμικού μοντέλου. Συνοψίζοντας, βέβαια, οι γωνίες που παρατηρούνται κατά την απόκριση των δύο μοντέλων δε αποκλίνουν ιδιαίτερα.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Ελλείψει διαφυγών υπό την επενέργεια του σεναρίου ($H_s=8.5m$, $T_z=11.5s$), παράγονται ημιλογαριθμικό διάγραμμα των πιθανοτήτων υπέρβασης καθώς και σχετικός των τελευταίων πίνακας.



Σχήμα 5.41: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
5	0.5111	0.5032	-1.54%
8	0.17	0.1916	12.6%
10	0.0503	0.0605	20.33%
12	0.0082	0.0085	3.08%
14	0.0006	0.0004	-35.12%
15	0.0001	2.33 10 ⁻⁵	-82.5%

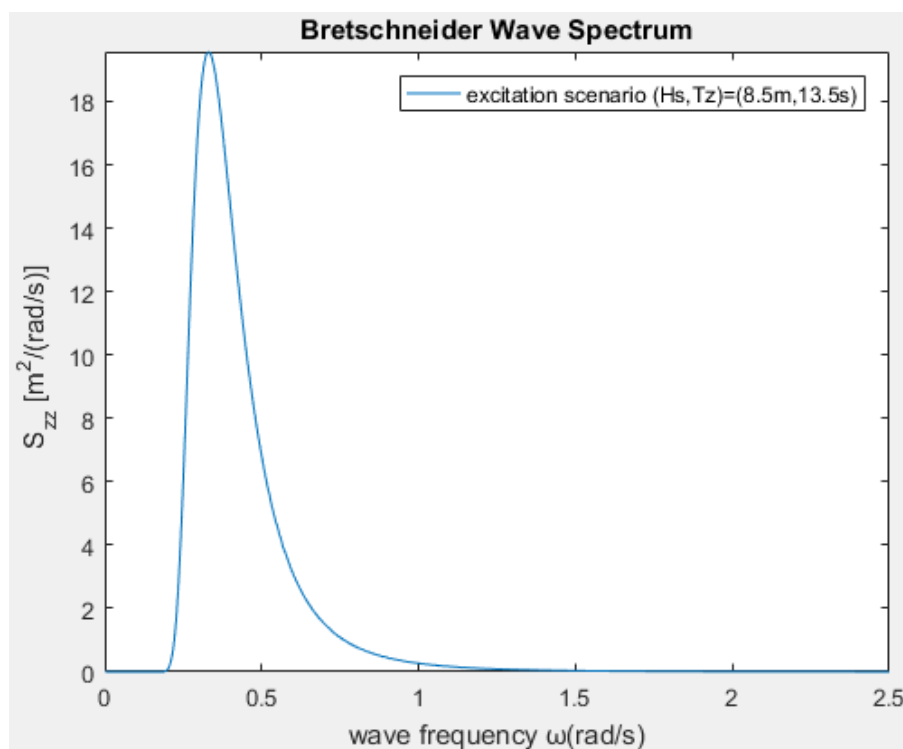
Πίνακας 5.19: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=11.5s)}

Ενώ το γραμμικοποιημένο μοντέλο διαφαίνεται, τόσο από το Σχήμα 5.41 όσο και από τον συναφή Πίνακα 5.19, να υποεκτιμά τις υπερβάσεις γωνιών μέχρι και περίπου 12deg, από εκεί και έπειτα προβλέπει μεγαλύτερες συχνότητες υπέρβασης από το μη γραμμικό. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη στατιστική ανάλυση της μη γραμμικής εξίσωσης κίνησης, ενώ προέκυψαν πιθανότητες υπέρβασης των γωνιών 8deg, 10deg και 12deg μεγαλύτερες κατά 12.6%, 20.33% και 3.1% αντίστοιχα από τις συναφείς του γραμμικοποιημένου μοντέλου, η υπέρβαση της γωνίας των 14deg καθίσταται μικρότερη κατά 35%. Αυτό συμβαίνει λόγω της δράσης της μη γραμμικής απόσβεσης στην ελάττωση υψηλών διατοιχιστικών γωνιών αφενός και στην σταδιακή μη συμπερίληψη γωνιών όπου εμφανίζονται πιο συχνά σε σχέση με τις αντίστοιχες στα πλαίσια της αντιπαρατιθένης μοντελοποίησης. Η απόκλιση μεταξύ τους εντείνεται κατά την υπέρβαση των 15deg, όπου η συναφής πιθανότητα του μη γραμμικού αποτελεί μόλις το 17.5% αυτής του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Πάντως, σε γενικές γραμμές, οι διαφορές μεταξύ των προβλέψεων των υπερβάσεων γωνιών μέχρι και 12deg-13deg

των δύο μοντέλων δεν είναι σημαντικές εφόσον καθίστανται παραπλήσιες. Αυτό επιβεβαιώνει τους ισχυρισμούς περί απουσίας έντονων μη γραμμικοτήτων και περί υπάρξεως «γραμμικότητας» κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση. Γίνεται, ωστόσο, κατανοητό πως ελλείψει διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος δεν υπάρχει δεύτερο σημείο τομής των καμπυλών των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο μοντέλων και συνεπώς το γραμμικοποιημένο μοντέλο δεν υποεκτιμά τις υπερβάσεις των υψηλότερων γωνιών.

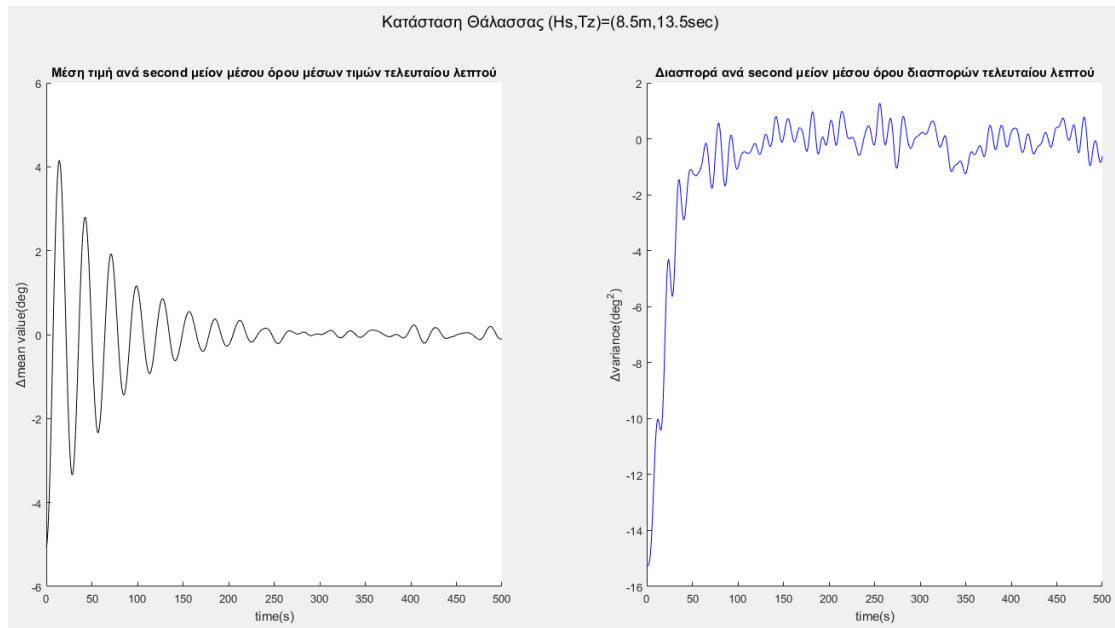
5.3.3.3 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC27-(Hs=8.5m, Tz=13.5s)

Η διαγραμματική απεικόνιση του φάσματος Bretschneider του σεναρίου διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=13.5s), σενάριο το οποίο χαρακτηρίζεται από πιθανότητα εμφάνισης σε 100000 παρατηρήσεις ίση με $7.76 \cdot 10^{-4}$, συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.42). Η συχνότητα κορυφής του φάσματος είναι ίση με 0.331 rad/s απέχοντας αρκετά από την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Γίνεται, εμφανώς, αντιληπτό ότι η ιδιοσυχνότητα του πλοίου αντιστοιχεί σε σχετικά χαμηλή ενεργειακή περιεκτικότητα κυματισμών.

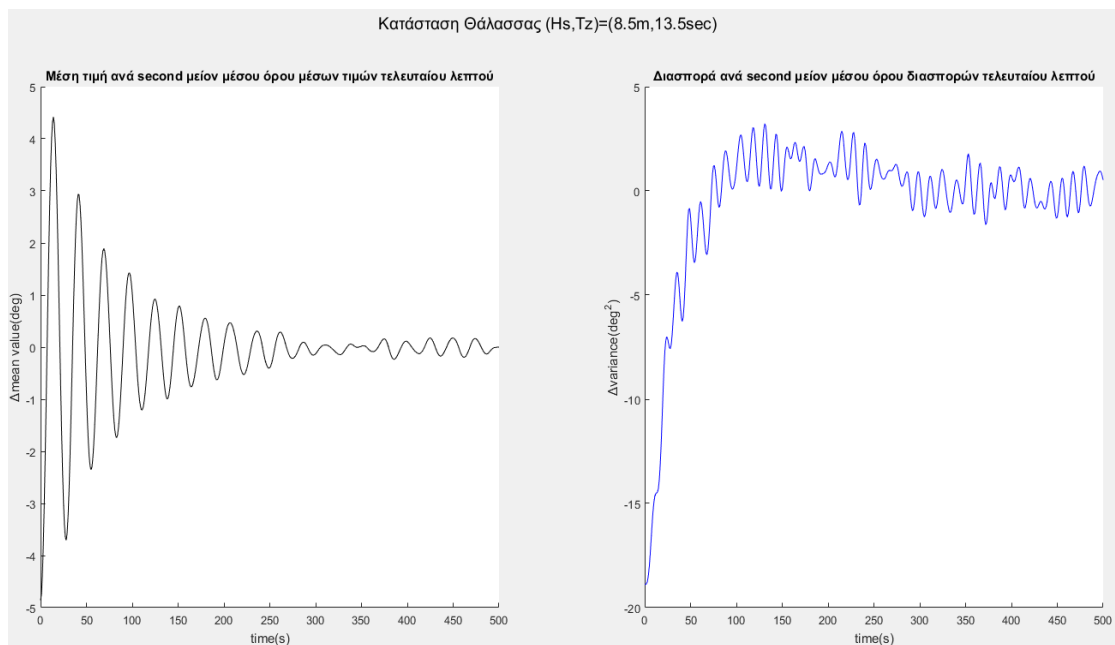


Σχήμα 5.42: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=8.5m, Tz=13.5s)

Συνεχίζοντας, ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσει του χρόνου και για τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα.



Σχήμα 5.43: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεϊ του χρόνου για την {LC27-(Hs=8.5m, Tz=13.5s)}

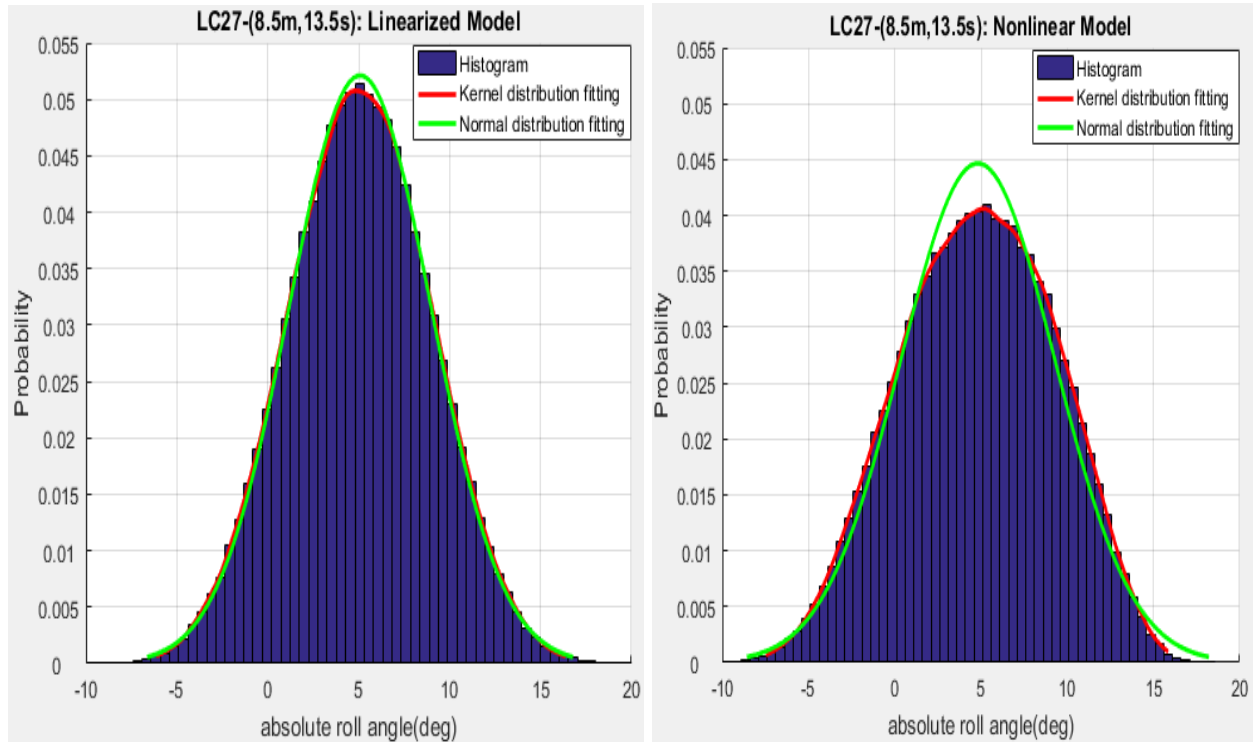


Σχήμα 5.44: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεϊ του χρόνου για την {LC27-(Hs=8.5m, Tz=13.5s)}

Με τη μελέτη των παραπάνω παρατιθέμενων διαγραμμάτων προκύπτει ότι η χρονομεταβαλλόμενη μέση τιμή φαίνεται να συγκλίνει ικανοποιητικά στη μέση τιμή ολότητας, με την αντίστοιχη μεταβολή να τείνει ικανοποιητικά στο μηδέν, περίπου τη χρονική στιγμή 180s τόσο για το γραμμικοποιημένο όσο και το μη γραμμικό μοντέλο. Η διασπορά φαίνεται και στα δύο μοντέλα να σταθεροποιείται λίγο νωρίτερα. Έτσι, ως χρόνος παγίωσης των στατιστικών επιλέγονται τα 180s.

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Διενεργώντας 15000 προσομοιώσεις των 5min των εξισώσεων κίνησης διατοιχισμού και των δύο μοντέλων και συλλέγοντας 210000 δεδομένα από 14 χρονικές στιγμές που ανήκουν στο χρονικό διάστημα [180s,300s] για τη γραμμικοποιημένη και μη γραμμική περίπτωση αντίστοιχα, προκύπτουν τα ιστογράμματα, περιέχοντας 60 περίπου ισομερή εύρη απόλυτων γωνιών διατοιχισμού, ισοδυναμώντας το εκάστοτε εύρος με 0.5deg, καθώς και οι παρεμβαλλόμενες PDFs των κατανομών Kernel και Gauss. Από τα 210000 δεδομένα αφαιρούνται τα 14 που αντιστοιχούν στη μοναδική διαφυγή του μη γραμμικού συστήματος και εν τέλει υλοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των 209986 δεδομένων.



Σχήμα 5.45: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}

Loadcase 27 (Hs,Tz)=(8.5m,13.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	180	180
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	1
Number of Data	210000	209986
Mean Value (deg)	5.08	4.82
Variance (deg ²)	15.24	20.14
Mean Value of 100 extreme values (deg)	18.01	16.96
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.588	0.495

Mean Value of 10 extreme values (deg)	19.34	18.05
Maximum absolute rolling angle (deg)	20.09	18.59

Πίνακας 5.20: Στατιστικές Τιμές για την {LC27-(Hs=8.5m,Tz=13.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

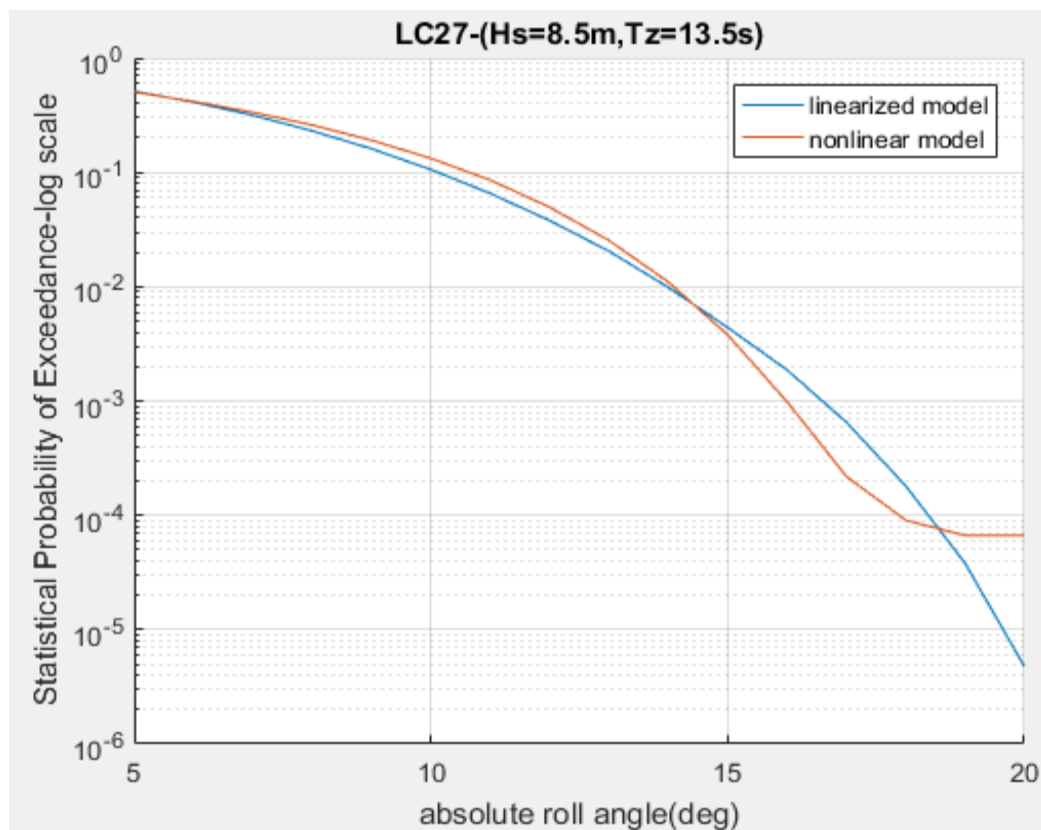
Για μια ακόμη φορά, βάσει του αριστερού σκέλους του Σχήματος 5.45, επιβεβαιώνεται η θεωρία των γραμμικών συστημάτων, καθώς η Γκαουσιανή PDF της απόκρισης παρεμβάλλει με συνεπή τρόπο τα εύρη των δεδομένων του ιστογράμματος του γραμμικοποιημένου μοντέλου, την στιγμή που η διέγερση αποτελεί Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία. Γι' αυτό, εξάλλου, και οι PDFs που ακολουθούν κατανομή Gauss και Kernel εμφανίζονται σχεδόν ταυτισμένες. Η μέση τιμή της κανονικής κατανομής προέκυψε ίση με $\bar{\varphi} = 5.08deg$, συμπίπτοντας με τη γωνία ισορροπίας φ_s , όπως άλλωστε αναμενόταν, και η διακύμανση ίση με $Var \cong 15.24deg^2$ (Πίνακας 5.20). Την ίδια στιγμή υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών ίσες με 18deg και 19.34deg αντίστοιχα, ενώ παρατηρήθηκε πως η μέγιστη τιμή των δεδομένων βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η παρούσα στατιστική ανάλυση είναι 20deg. Επίσης, η τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων δεδομένων προέκυψε ίση με 0.588deg. Εν γένει, πάντως, τα δεδομένα, που έχουν προκύψει υπό το συγκεκριμένο σενάριο διέγερσης, κατέχουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το σενάριο (Hs=8.5m,Tz=16.5s) καθώς αφενός το φάσμα Bretchneider του χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών από ότι το αντίστοιχο του τελευταίου, αφετέρου η ιδιουσυχνότητα απέχει αρκετά από τη συχνότητα κορυφής του εν λόγω φάσματος, ενώ αντίθετα υψηλότερες από τις προκύπτουσες δεδομένου του σεναρίου (Hs=8.5m,Tz=11.5s). Η τυπική απόκλιση του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού βρέθηκε ίση με 0.0185rad/s και ο γραμμικοποιημένος ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης υπολογίστηκε 0.015 1/s, αποτελώντας μια αρκετά μικρή τιμή γραμμικής απόσβεσης.

Μη γραμμικό μοντέλο

Στην αντίπερα όχθη, στο δεξί μέρος του Σχήματος 5.45 διακρίνεται το ιστόγραμμα που προέκυψε από την μη γραμμική μοντελοποίηση και διαπιστώνεται ότι η εκτιμήτρια συνάρτηση PDF Kernel είναι κατάλληλη για την ακριβή περιγραφή του καθώς οι διαφορές μεταξύ της ίδιας και εκείνης που παρεμβλήθηκε, ακολουθώντας κατανομή Gauss, είναι αρκετά μεγάλες και οφθαλμοφανείς. Έτσι, όπως είναι άλλωστε φυσικό να αναμένεται, η απόκριση ενός μη γραμμικού συστήματος, του οποίου η διέγερση συνιστά Γκαουσιανή στοχαστική διαδικασία, δε συμπεριφέρεται με γραμμικό τρόπο και συνεπώς η PDF που παρεμβάλλει το αντίστοιχο ιστόγραμμα δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Η μη γραμμική απόσβεση καθώς και κυρίως η μη γραμμική έκφραση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς με την εισαγωγή της σχετικής γωνίας διατοιχισμού, δηλαδή με την ένταξη της επιδρώσας κλίσης κυματισμών, στους όρους του τελευταίου διαταράσσουν και ταυτόχρονα διαστρεβλώνουν το σύστημα επηρεάζοντας ενδεχομένως χαρακτηριστικές του παραμέτρους όπως π.χ οι συντελεστές του μοχλοβραχίονα λόγω της ένταξης της σχετικής γωνίας. Έτσι, οι μη γραμμικότητες που εισάγονται είναι δυνατές ώστε να μετατοπίσουν τη θέση ισορροπίας του ταλαντευόμενου συστήματος σε κάποια άλλη θέση κατά τη χρονική διάρκεια της διατοιχιστικής του κίνησης σε πληθώρα προσομοιώσεων και περισσότερα δεδομένα να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες γωνίες και λιγότερα να αντιστοιχούν γωνίες γύρω από τη μέση τιμή-γωνία ισορροπίας σε σχέση με τα συναφή της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης. Αυτό έχει ως αντίκτυπο από τη μια τις μειωμένες συχνότητες εμφάνισης γωνιών κοντά στη μέση τιμή και από την άλλη τις αυξημένες συχνότητες εμφάνισης των πιο απομακρυσμένων από την τελευταία γωνιών σε σχέση πάντα

με τις αντίστοιχες του γραμμικού μοντέλου. Αυτό διαφαίνεται και από τη μορφή της PDF Kernel, η οποία χαρακτηρίζεται από μια πεπλάτυνση στις πλευρές και από χαμηλότερο μέγιστο σε σχέση με τη Γκαουσιανή PDF. Η μεγαλύτερη τιμή διακύμανσης $Var = 20.14deg^2$ (Πίνακας 5.20) από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου μοντέλου αιτιολογεί τα ανωτέρω. Επίσης, η μέση τιμή της εκτιμήτριας PDF και των αντίστοιχων δεδομένων βρέθηκε ίση με $4.82deg$, ενώ οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών υπολογίστηκαν ως $16.96deg$ και $18.05deg$ αντίστοιχα, όντας λίγο μικρότερες από εκείνες του γραμμικοποιημένου μοντέλου περίπου κατά $1deg-1.5deg$. Ταυτόχρονα, η τυπική απόκλιση των 100 μεγαλύτερων δεδομένων βρέθηκε ίση με $0.5deg$, η οποία, κατά τη σύγκρισή της με την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου μοντέλου, καθίσταται μικρότερη. Οι μικρότερες μέσες τιμές των υψηλότερων γωνιών και αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις και τα χαμηλότερα επίπεδα τιμών γωνίας εν γένει που παρατηρούνται κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση οφείλονται προφανώς στην επίδραση της μη γραμμικής έκφρασης του όρου απόσβεσης στην απόκριση του συστήματος.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)



Σχήμα 5.46: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC27- (Hs=8.5m,Tz=13.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
5	0.512	0.5035	-1.66%
8	0.2303	0.2593	12.59%
10	0.1056	0.1325	25.42%

12	0.0379	0.0495	30.74%
15	0.0044	0.0038	-13.67%
17	0.0007	0.0002	-66.64%
18	0.0002	$9.05 \cdot 10^{-5}$	-50%
19	$3.81 \cdot 10^{-5}$	$6.67 \cdot 10^{-5}$	75%

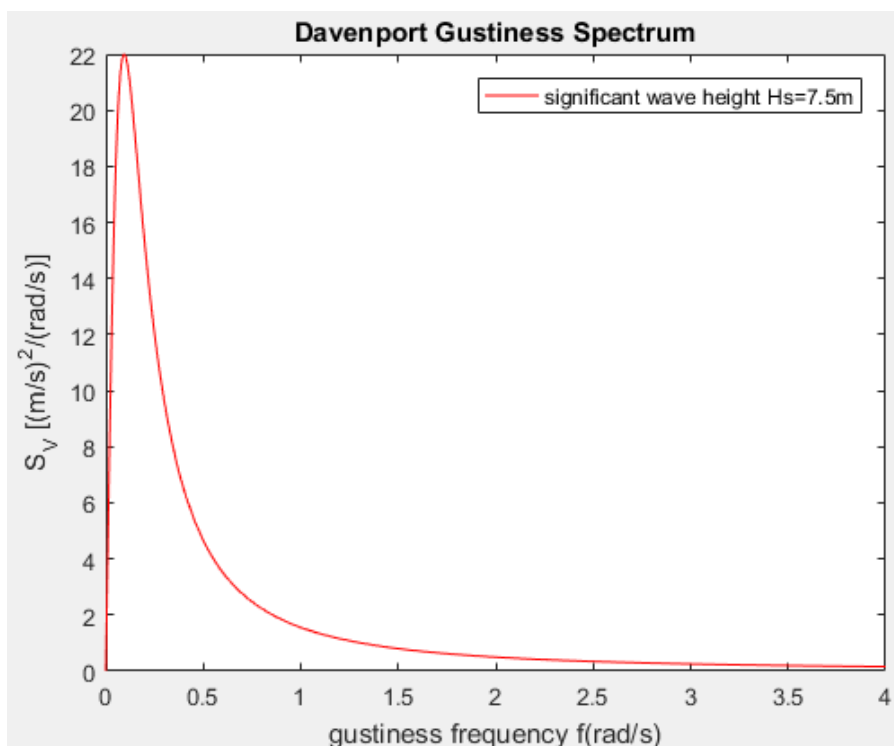
Πίνακας 5.21: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC27- (Hs=8.5m,Tz=13.5s)}

Στη παρούσα φάση, συμπεριλαμβανομένης της διαφυγής που εντοπίστηκε στα πλαίσια μοντελοποίησης του μη γραμμικού προβλήματος, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι έπειτα των 5.5deg εκατέρωθεν (port&starboard side), γωνία έως και την οποία το γραμμικοποιημένο μοντέλο εκτιμά μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης με, πάντως, ολοένα και φθίνουσα πορεία, και μέχρι τις 14deg εκτιμώνται υψηλότερες συχνότητες υπέρβασης μέσω της μη γραμμικής μοντελοποίησης (Σχήμα 5.46). Πιο συγκεκριμένα, οι γωνίες άνω των 8deg εκατέρωθεν που υπολογίστηκαν κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση ήταν κατά 12.59% περισσότερες από τις αντίστοιχες της γραμμικοποιημένης υπό ισάριθμα δεδομένα (Πίνακας 5.21). Η απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων, παρουσιάζοντας αύξουσα πορεία, μεγιστοποιείται στις 12deg όπου και λαμβάνει την τιμή 31% περίπου, όντας όχι και μια μικρή τιμή. Ενόσω η διαφορά τους συρρικνώνεται και ταυτόχρονα εκτιμώνται μέσω του γραμμικοποιημένου μοντέλου ολοένα και υψηλότερες πιθανότητες υπέρβασης για αυξανόμενες γωνίες, επέρχεται η στιγμή όπου η πιθανότητα υπέρβασης των 15deg που υπολογίζεται στα πλαίσια του γραμμικού συστήματος είναι μεγαλύτερη κατά 16% περίπου από την αντίστοιχη του μη γραμμικού. Σα να μην έφτανε αυτό, οι γωνίες που βρέθηκαν άνω των 17deg εκατέρωθεν είναι 137 και 46, από τις οποίες 14 αφορούν στη διαφυγή, για το γραμμικοποιημένο και το μη γραμμικό μοντέλο αντίστοιχα, εκτινάσσοντας ταυτόχρονα την απόκλιση τους, ως προς το γραμμικοποιημένο, στο 66.64%. Από εκεί και ύστερα, η απόκλιση ακολουθεί φθίνουσα πορεία λόγω αφενός μείωσης των δεδομένων τα οποία υπερβαίνουν υψηλές γωνίες στην περίπτωση του γραμμικοποιημένου μοντέλου, αφετέρου σταθεροποίησης της καμπύλης πιθανότητας υπέρβασης του μη γραμμικού στην τιμή της πιθανότητας ανατροπής/διαφυγής $6.67 \cdot 10^{-5}$. Η υπερεκτίμηση του γραμμικοποιημένου μοντέλου είναι ακόμη φανερή κατά την υπέρβαση των 18deg, καθώς τα δεδομένα που είναι υψηλότερα από την εν λόγω γωνία είναι για το δεδομένο μοντέλο 38, ενώ μόλις 19 για το μη γραμμικό. Η κατάσταση δεν αργεί να αλλάξει καθώς τα δεδομένα μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης που βρέθηκαν άνω των των 19deg είναι 14, αποτελώντας δεδομένα που αντιστοιχούν εξ' ολοκλήρου στη διαφυγή του μη γραμμικού συστήματος, αφού από τον Πίνακα 5.20 διαφαίνεται ότι η μέγιστη απόλυτη γωνία διατοιχισμού, στην ανάλυση χωρίς τις διαφυγές, ισούται με 18.6deg, την ώρα που μόλις 8 βρέθηκαν μεγαλύτερα της εν λόγω γωνίας μέσω της γραμμικής μοντελοποίησης.

5.3.4 Κατάσταση Φόρτωσης 31

Για τη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης έχουν μελετηθεί οι επίδρασεις πάνω στη διατοιχιστική συμπεριφορά του πλοίου τριών σεναρίων κυμάτων και ανέμου με αντιπροσωπευτικά στατιστικά μεγέθη Hs=7.5m, το οποίο είναι κοινό για όλα τα σεναρία, και Tz=10.5s, Tz=13.5s, Tz=16.5s αντίστοιχα. Όσο αφορά στο σενάριο (Hs=7.5m,Tz=13.5s) το φάσμα Bretschneider παρουσιάζει μέγιστο στην συχνότητα $\omega_{peak}=0.331$ rad/s, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα του πλοίου υπό τη δεδομένη φόρτωση $\omega_0=0.329$ rad/s. Το σενάριο κυματισμών (Hs=7.5m,Tz=16.5s) αντιπροσωπεύεται κυρίως από χαμηλόσυχνους κυματισμούς, ενώ το (7.5m,10.5s) από κυρίως υψηλόσυχνους αντίστοιχα. Η γωνία ευσταθούς ισορροπίας υπό τη επίδραση της μέσης ροπής ανέμου προέκυψε από την τομή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς και του μοχλοβραχίονα ανέμου ίση με $\varphi_s = 1.697deg$ για όλα τα σεναρία καθώς αντιπροσωπεύονται από ίδιο σημαντικό ύψος κύματος Hs=7.5m.

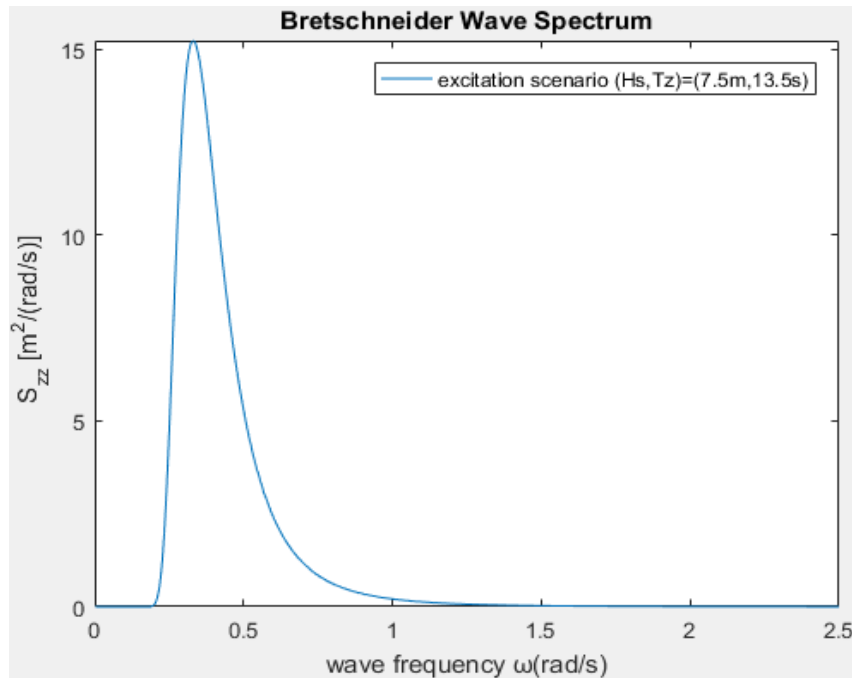
Στη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης μελετήθηκε η επίδραση ανέμου, της οποίας το αντιπροσωπευτικό φάσμα Davenport για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=7.5m$ διακρίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 5.47: Φάσμα Davenport για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=7.5m$

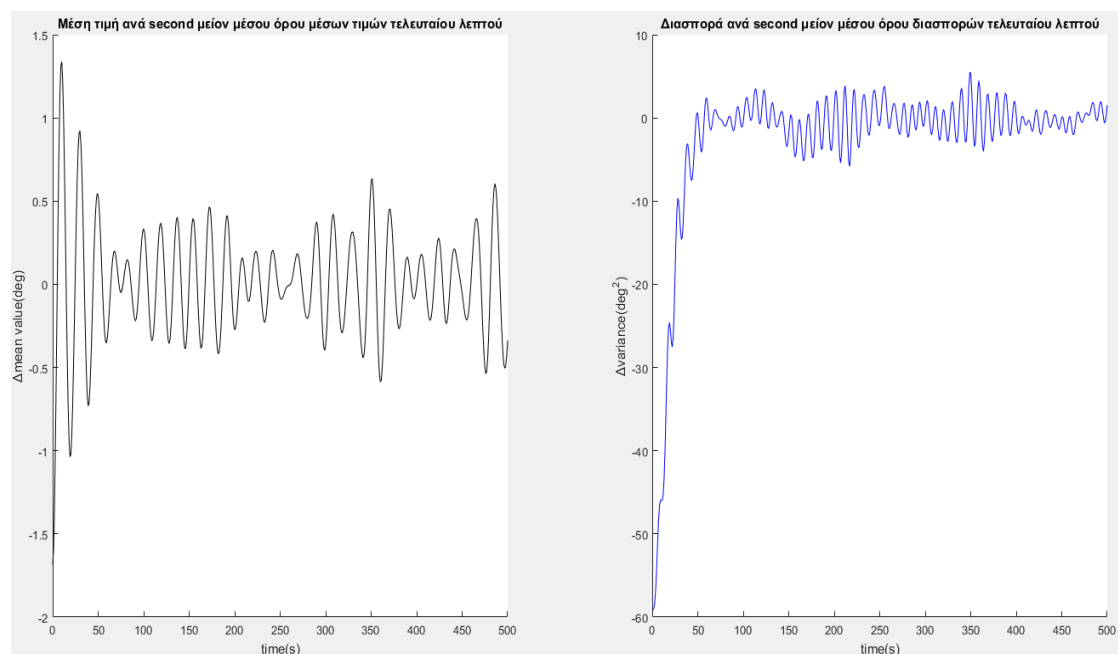
5.3.4.1 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC31-($H_s=7.5m, T_z=13.5s$)

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.48) αναπαρίσταται το φάσμα κυματισμών συναρτήσει των συχνοτήτων κυματισμών του σεναρίου διέγερσης που αντιπροσωπεύεται από μέση περίοδο κύματος ίση με 13.5s και από περίοδο κορυφής ίση με 18.98s, ταυτιζόμενη σχεδόν με την ιδιοπερίοδο του πλοίου $T_0=19.1s$. Το εν λόγω σενάριο διέγερσης έχει συχνότητα εμφάνισης περίπου ίση με 10^{-3} .

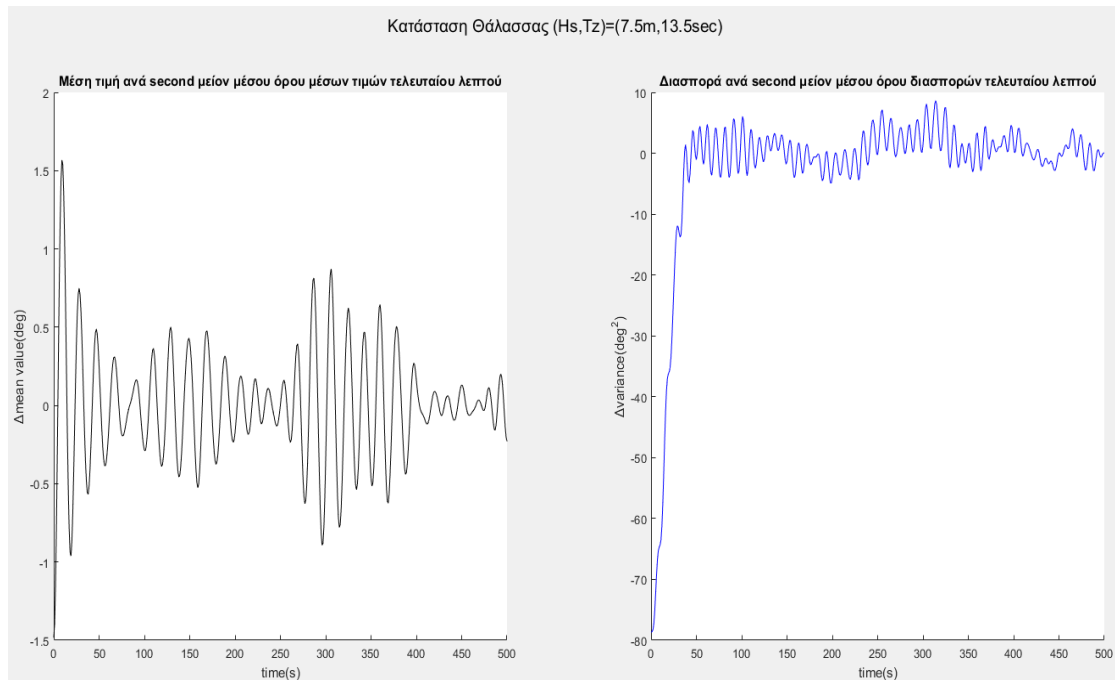


Σχήμα 5.48: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$)

Με παρόμοιο τρόπο όπως υλοποιήθηκε σε προγενέστερες περιπτώσεις, έτσι και στη προκειμένη διακρίνονται ακολούθως τα διαγράμματα μεταβολών μέσης τιμής και διασποράς συναρτήσεως του χρόνου και για τα δύο αντιτιθέμενα μοντέλα. Παρατηρείται ότι προσεγγιστικά η χρονική στιγμή κατά την οποία φαίνονται να σταθεροποιούνται τα δεδομένα στατιστικά μεγέθη μπορεί να ληφθεί τόσο για το γραμμικοποιημένο όσο και για το μη γραμμικό μοντέλο ίση με 1.5min.



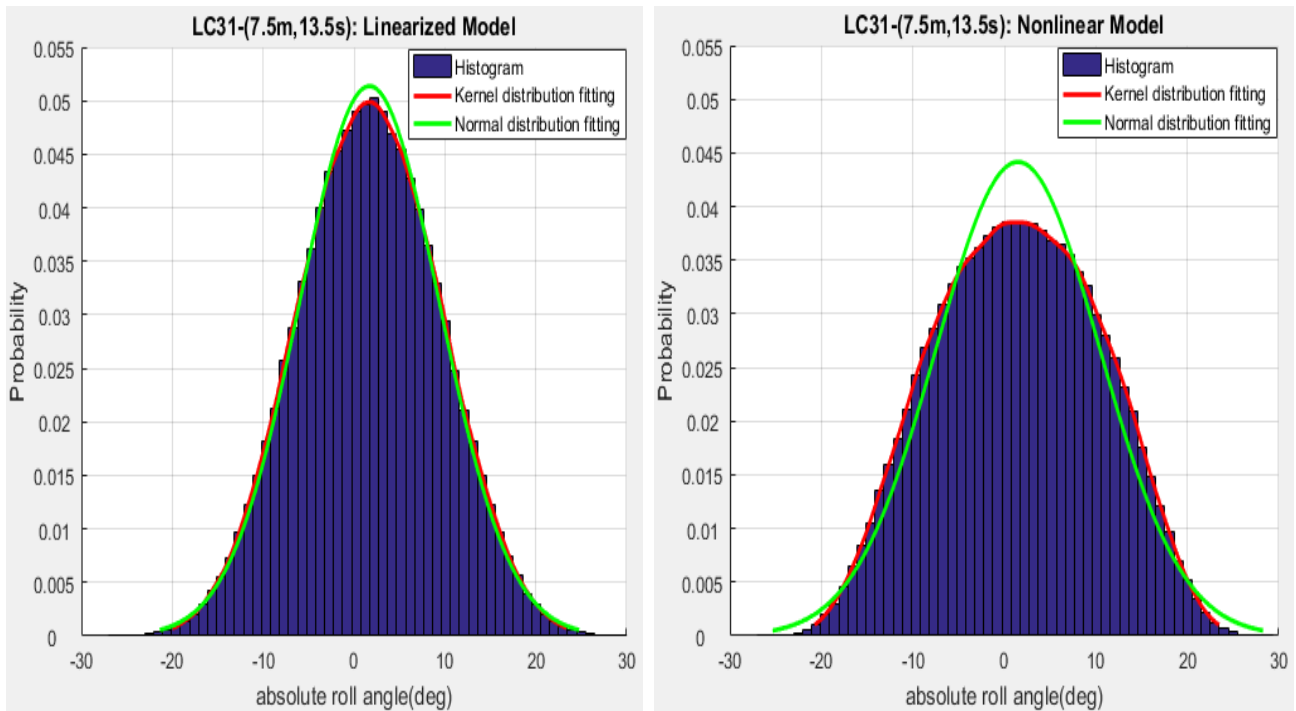
Σχήμα 5.49: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC31-($H_s=7.5m, T_z=13.5s$)}



Σχήμα 5.50: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσεως του χρόνου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Προσομοιώνοντας 15000 φορές τόσο τη μη γραμμική διαφορική εξίσωση διατοιχισμού όσο και τη γραμμικοποιημένη σε χρόνο 5min και συλλέγοντας δεδομένα από 24 χρονικές στιγμές που ανήκουν στο χρονικό διάστημα προσομοίωσης [90s,300s], ώστε η απόκριση να καθίσταται μόνιμη, προκύπτουν τα ιστογράμματα και οι PDFs Gauss και Kernel οι οποίες παρεμβάλλονται σ'αυτά. Υπό την επενέργεια του εν λόγω σεναρίου (Hs=7.5m,Tz=13.5s) στην κατάσταση



Σχήμα 5.51: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}

φόρτωσης 31 σημειώθηκαν οι περισσότερες διαφυγές του συστήματος, όντας 14, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση, οι οποίες και αμελούνται στη παρούσα ανάλυση. Έτσι, ενώ τα δεδομένα που υπέστησαν στατιστική ανάλυση είναι 360000 στην περίπτωση γραμμικοποιημένο μοντέλο, στη περίπτωση του μη γραμμικού είναι 359664. Ακόμη, αξίζει να επισημανθεί ότι οι τιμές των δεδομένων κατανέμονται επί των ιστογραμμάτων ανά 1deg και στα δύο μοντέλα.

Οι πιο σημαντικές στατιστικές τιμές και μεγέθη των κατανομών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Statistical Values	Loadcase 31 (Hs,Tz)=(7.5m,13.5s)	
	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	90	90
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	14
Number of Data	360000	359664
Mean Value (deg)	1.7	1.48
Variance (deg ²)	59.1	80.49
Mean Value of 100 extreme values (deg)	26.72	25.7
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.871	0.768
Mean Value of 10 extreme values (deg)	28.41	27.47
Maximum absolute rolling angle (deg)	30.09	29.09

Πίνακας 5.22: Στατιστικές Τιμές για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Και στη δεδομένη περίπτωση είναι εμφανείς οι διαφορές μεταξύ της γραμμικοποιημένης και της μη γραμμικής μοντελοποίησης του προβλήματος. Όσον αφορά στη γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση (αριστερό σκέλος του Σχήματος 5.51), διαπιστώνεται για μια ακόμη φορά ότι η PDF που ακολουθεί κανονική κατανομή θεωρείται κατάλληλη για τη στατιστική ανάλυση του εν λόγω συστήματος καθώς παρεμβάλλει με ιδιαίτερη συνέπεια τα εύρη τιμών απόλυτης γωνίας διατοιχισμού του δεδομένου ιστογράμματος και καθίσταται πανομοιότυπη με τη παρεμβληθείσα εκτιμήτρια PDF που ακολουθεί την κατανομή Kernel. Ίσως η μόνη διαφορά να έγκειται στο γεγονός ότι η κανονική κατανομή δίνει ελάχιστα υψηλότερες τιμές πιθανότητας εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή σε σχέση με την Kernel, διαφορά η οποία είναι τόσο μικρή που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Ο λόγος ύπαρξης της δεδομένης απόκλισης έχει αποσαφηνιστεί σε προηγούμενο εδάφιο. Η μέση τιμή της κατανομής ισούται με $\bar{\varphi} = 1.7deg$ (Πίνακας 5.22), η οποία, άλλωστε όπως αναμένεται, συμπίπτει με τη γωνία ισορροπίας φ_s και η διακύμανση της κατανομής είναι ίση με $Var \cong 59deg^2$, την ίδια στιγμή που οι μέσες τιμές των 100 και 10 μεγαλύτερων τιμών των δεδομένων προέκυψαν ίσες με 26.72deg και 28.41deg αντιστοίχως. Το εύρος τιμών που απλώνεται γύρω από την μέση τιμή των 100 μεγαλύτερων δεδομένων εκφράζεται από την αντίστοιχη τυπική απόκλιση η οποία είναι ίση με 0.871deg, όντας μια αρκετά μεγάλη τιμή. Επίσης, η μέγιστη γωνία των

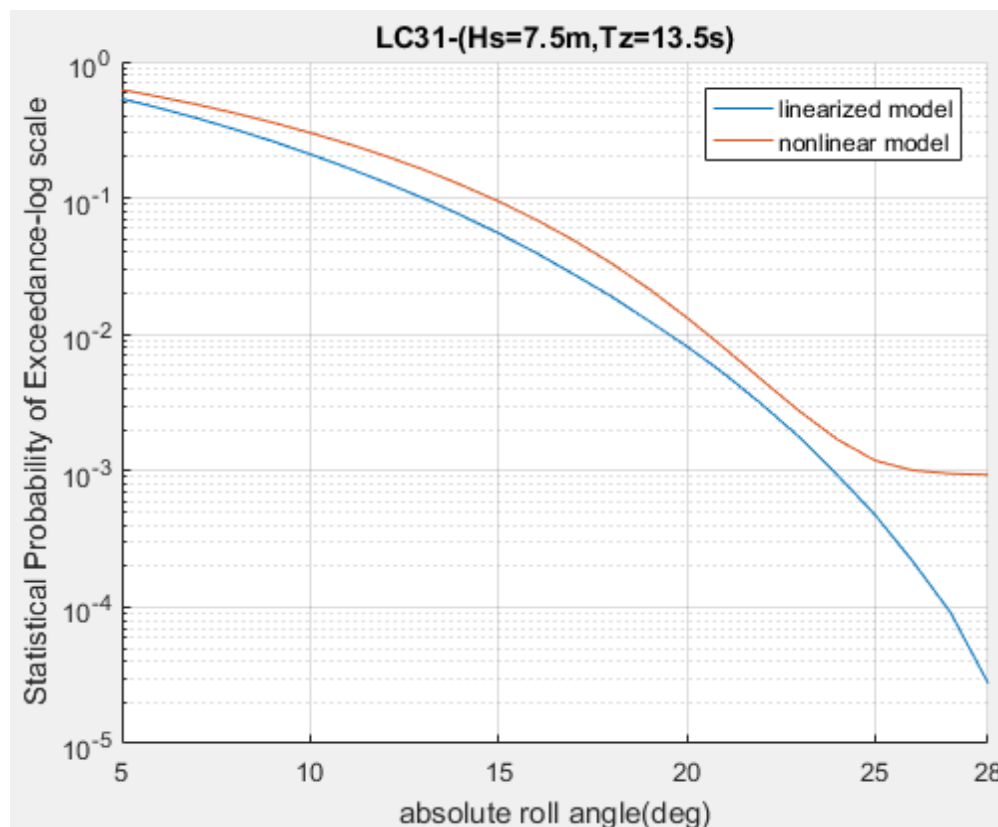
αναλυθέντων δεδομένων είναι η $\varphi_{max} = 30.1deg$. Τέλος, ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης, μέσω στοχαστικής γραμμικοποίησης, προέκυψε ίσος με $0.04 \frac{1}{s}$.

Μη γραμμικό μοντέλο

Στην αντίπερα όχθη και συγκεκριμένα στην περίπτωση του μη γραμμικού μοντέλου, είναι εμφανές, βάσει του δεξί μέρους του Σχήματος 5.51, ότι η παρεμβληθείσα στα δεδομένα εκτιμήτρια PDF που ακολουθεί κατανομή Kernel διαφέρει αρκετά από αυτήν που ακολουθεί κανονική κατανομή, καθιστώντας σαφές την ύπαρξη έντονων μη γραμμικοτήτων που εισάγονται στο παρόν πρόβλημα κυρίως από τον όρο επαναφοράς, ο οποίος έχει ως όρισμα τη σχετική γωνία, και δευτερογενώς από τον όρο απόσβεσης. Όπως συνέβη και σε προγενέστερες ομοιάζουσες περιπτώσεις, έτσι και εδώ η εκτιμήτρια PDF χαρακτηρίζεται από αισθητά μικρότερες, περίπου κατά 0.013 μονάδες, πιθανότητες εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή και από μεγαλύτερες συχνότητες εύρεσης γωνιών μεσαίας έως και μεγάλης κλίμακας σε σχέση με τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Ειδικότερα, αυτή η υπεροχή του μη γραμμικού ως προς τις συχνότητες εμφάνισης διαφαίνεται στα διαστήματα των γωνιών από τις 10deg μέχρι και τις 25deg και από τις -6deg μέχρι και τις -23deg περίπου. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η εκτιμήτρια PDF εμφανίζεται πιο πεπλατυσμένη στα άκρα από την αντίστοιχη Γκαουσιανή, ομοιάζοντας αρκετά με μια συνάρτηση παραβολής. Η μέση τιμή βρέθηκε ίση με $\bar{\varphi} = 1.48deg$ (Πίνακας 5.22), εμφανώς μικρότερη από την γωνία φ_s λόγω της δεδομένης ασυμμετρίας που επικρατεί στο μη γραμμικό τροποποιημένο, πια, μοχλοβραχίονα επαναφοράς του συστήματος GZres από την παρουσία της διέγερσης ανέμου, ενώ ταυτόχρονα η διακύμανση ίση με $Var \cong 80.5deg^2$. Η τελευταία, όπως αναμένεται, καθίσταται ιδιαίτερα μεγαλύτερη της αντίστοιχης της Γκαουσιανής κατανομής. Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών είναι 25.7deg και 0.77deg αντίστοιχα, ενώ η μέση τιμή των υψηλότερων 10 προέκυψε ίση με 27.47. Όχι μόνο οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων δεδομένων των δύο μοντέλων οι οποίες διαφέρουν όχι περισσότερο από 1deg, αλλά και η αισθητή διαφορά των τυπικών αποκλίσεων κατά 0.1deg φανερώνουν τη δράση των μη γραμμικών όρων απόσβεσης και τη συνεισφορά τους στη ελάττωση των επιπέδων τιμών γωνίας.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Κρίνεται σκόπιμο να παρατεθεί ότι η ανάλυση του παρόντος εδαφίου συμπεριλαμβάνει τις 14 διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος σε αντίθεση με ό,τι συνέβη προηγουμένως.



Σχήμα 5.52: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC31- (Hs=7.5m,Tz=13.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
5	0.5358	0.6223	16.14%
10	0.21	0.3012	43.48%
15	0.0553	0.0946	71.19%
17	0.0276	0.049	77.44%
20	0.0082	0.0133	62.55%
22	0.0031	0.0046	51%
25	0.0005	0.0012	150%

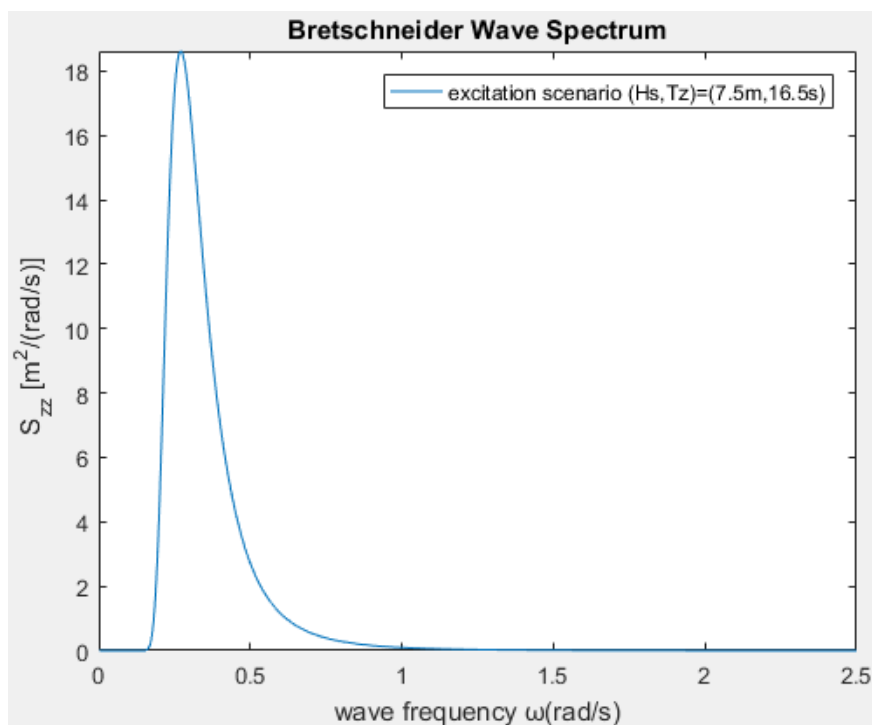
Πίνακας 5.23: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC31- (Hs=7.5m,Tz=13.5s)}

Από το παραπάνω ημι-λογαριθμικό διάγραμμα (Σχήμα 5.52) και το σχετικό πίνακα (Πίνακας 5.23) εξάγεται το συμπέρασμα πως η μη γραμμική μοντελοποίηση της περίπτωσης κατά την οποία το σενάριο (Hs=7.5m,Tz=13.5s) ενεργεί επί της κατάστασης φόρτωσης 31 προβλέπει μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης σε όλο το φάσμα γωνιών. Στο διάστημα των μεσαίων και υψηλών σχετικά γωνιών, όπου συνήθως το γραμμικοποιημένο υπερεκτιμά τις υπερβάσεις τους λόγω της δράσης της μη γραμμικής απόσβεσης και της σταδιακής μη συμπερίληψης γωνιών που κατέχουν αρκετά μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης (βλπ ιστόγραμμα μη γραμμικού μοντέλου-Σχήμα 5.51), πλέον, αντιθέτως, προβλέπει μικρότερες εξαιτίας της ενσωμάτωσης των 14 διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος αποτελώντας και τις περισσότερες διαφυγές που παρατηρήθηκαν στα πλαίσια της

διενεργηθείσας στατιστικής ανάλυσης όλων των μελετούμενων περιπτώσεων. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι οι διαφυγές στο δεδομένο διάστημα υπερκαλύπτουν το χάσμα που παρατηρείται κατά το πλείστον ανάμεσα στις δύο μοντελοποιήσεις. Η απόκλιση παρουσιάζει στην αρχή μια αύξουσα πορεία, λαμβάνοντας μέγιστο κατά την υπέρβαση των 17deg ίσο με 78% περίπου, που χαρακτηρίζεται ως μια ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Εν συνεχεία, και λόγω της δράσης των μη γραμμικών όρων απόσβεσης διαφαίνεται να φθίνει μέχρι και τις 22deg, λαμβάνοντας την τιμή 51%. Από εκεί και έπειτα, εξαιτίας των διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος, διαμέσου των οποίων η καμπύλη των πιθανοτήτων υπέρβασης του μη γραμμικού μοντέλου σταθεροποιείται στην τιμή της πιθανότητας διαφυγής $9.33 \cdot 10^{-4}$, αποτελώντας ταυτόχρονα μια αρκετά μεγάλη τιμή, αλλά και της αναμενόμενης μείωσης των δεδομένων του γραμμικοποιημένου συστήματος με την πάροδο των γωνιών, η ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών των δύο μοντέλων αυξάνεται και πάλι. Ενδεικτική αυτής της αύξησης είναι η τιμή που λαμβάνει κατά την υπέρβαση των 25deg, όντας ίση με 150% δηλαδή μέσω μη γραμμικής μοντελοποίησης προβλέπονται 2.5 φορές περισσότερα δεδομένα άνω των 25deg από αυτά που προβλέπονται μέσω της γραμμικοποιημένης.

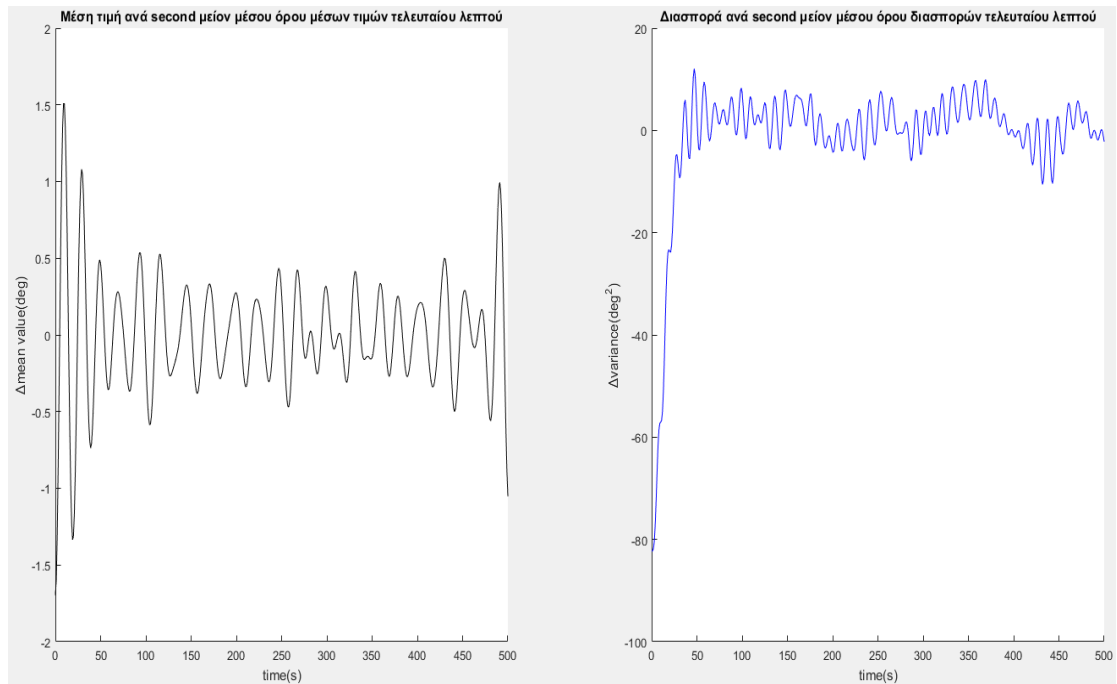
5.3.4.2 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)

Το φάσμα Bretschneider του σεναρίου διέγερσης (Hs=7.5m,Tz=16.5s) συναρτήσεως της συχνότητας κυματισμού διαφαίνεται ακολούθως. Στο συγκεκριμένο σενάριο, του οποίου η πιθανότητα εμφάνισης καθίσταται μικρή όντας ίση μόλις με $2.5 \cdot 10^{-5}$, οι κυματισμοί χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερα ποσά ενέργειας σε σχέση με το προγενέστερο και η περίοδος κορυφής του είναι περίπου 23.2s.

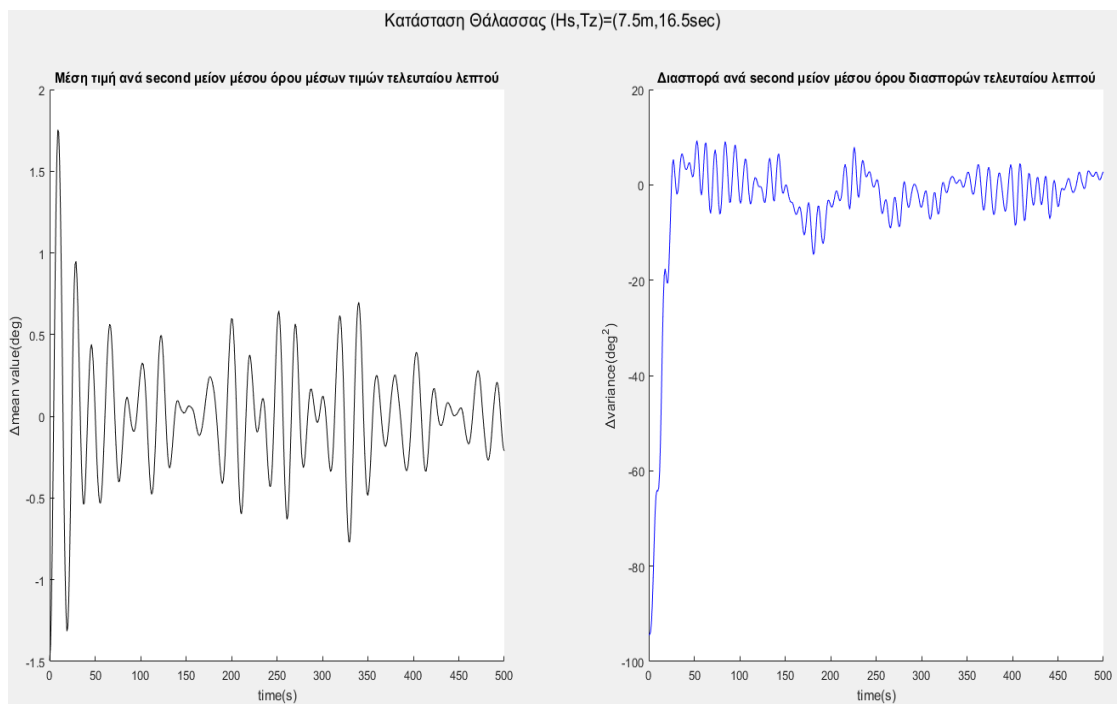


Σχήμα 5.53: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=7.5m,Tz=16.5s)

Ως χρόνος σταθεροποίησης των παρακάτω παρατιθέμενων στατιστικών μεγεθών, τα οποία, αποτελώντας τυχαίες συναρτήσεις, ταλαντεύονται κατά την πάροδο του χρόνου μέχρι να λάβουν τη μέση τιμή ολότητας τους, επιλέγονται τα 2min περίπου και για τα μοντέλα.



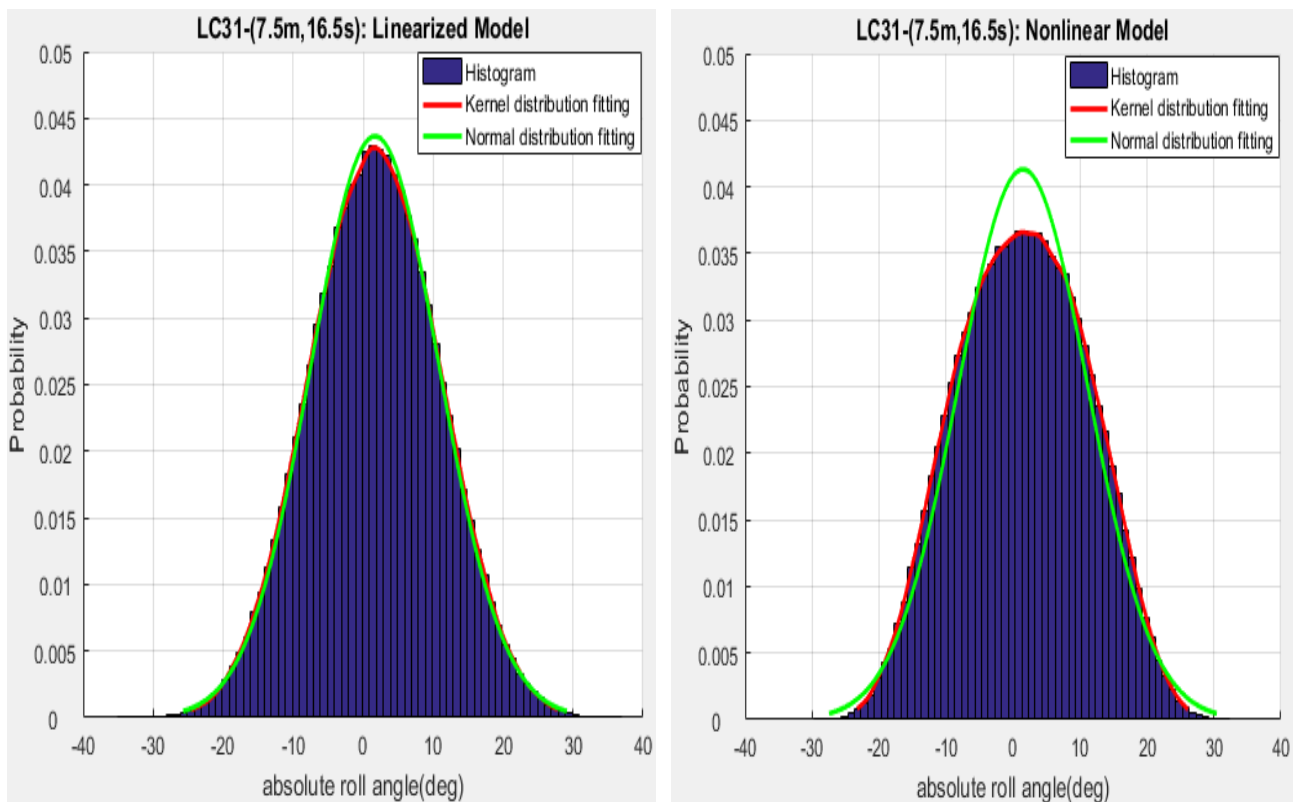
Σχήμα 5.54: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}



Σχήμα 5.55: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Έτσι, έχοντας προσεγγιστικά τον χρόνο παγίωσης των στατιστικών, τόσο για το γραμμικοποιημένο όσο και για το μη γραμμικό μοντέλο σε χρόνο προσομοιώσεων, 15000 στο σύνολο, των 5min λήφθηκαν 360000 και 359832 τιμές απόλυτης γωνίας διατοιχισμού, αντιστοιχώντας σε χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το πλοίο αποκρίνεται μόνιμα, για το γραμμικοποιημένο και μη γραμμικό μοντέλο αντίστοιχα, αμελώντας ταυτοχρόνως τις 7 διαφυγές του συστήματος στη περίπτωση του τελευταίου, προς παραγωγή των ιστογραμμάτων και των παρεμβαλλόμενων σ' αυτά PDFs. Να σημειωθεί εδώ ότι το βήμα των ισαπεχόντων ευρών γωνιών επιλέχθηκε, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, ίσο με 1deg. Τέλος, κατασκευάστηκε συνοπτικός πίνακας που περιλαμβάνει τα κυριότερα στατιστικά μεγέθη της παρούσας ανάλυσης.



Σχήμα 5.56: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}

Loadcase 31 (Hs,Tz)=(7.5m,16.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	120	120
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	7
Number of Data	360000	359832
Mean Value (deg)	1.7	1.5

Variance (deg ²)	83.48	93.87
Mean Value of 100 extreme values (deg)	32.39	29.21
Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	1.21	0.797
Mean Value of 10 extreme values (deg)	34.94	30.92
Maximum absolute rolling angle (deg)	36.83	31.83

Πίνακας 5.24: Στατιστικές Τιμές για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}

Άξιο προσοχής είναι το γεγονός πως το πλοίο λαμβάνει μεγαλύτερες γωνίες διατοιχισμού στη συγκεκριμένη περίπτωση διέγερσης σε σχέση με την προηγούμενη κατά την οποία η περίοδος κορυφής του εν λόγω φάσματος συμπίπτει με την ιδιοπερίοδό του.

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

Εμβαθύνοντας περαιτέρω, όσον αφορά στο γραμμικοποιημένο μοντέλο (Σχήμα 5.56), θα μπορούσε να υποστηριχθεί κάλλιστα ότι η κατανομή Gauss ομοιάζει αρκετά, ταυτιζόμενη σχεδόν, με την Kernel και διαφαίνεται να παρεμβάλλει με ορθό και ταυτόχρονα συνεπή τρόπο τα εύρη τιμών γωνίας του ιστογράμματος. Η μόνη απόκλιση μεταξύ των τιμών πιθανότητας που δίνουν παρατηρείται γύρω από τη μέση τιμή, ωστόσο καθίσταται τόσο μικρή που θεωρείται αμελητέα. Έτσι, επαληθεύεται η τήρηση ίδιας κατανομής, στη συγκεκριμένη περίπτωση κανονικής, της, παρεμβαλλόμενης στα δεδομένα-ιστογράμματα γραμμικών συστημάτων, PDF της απόκρισης με αυτήν της διέγερσης. Η μέση τιμή της κατανομής Gauss ισούται με $\bar{\varphi} = 1.7deg$, συμπίπτοντας με τη γωνία φ_s , και η διασπορά της κατανομής βρέθηκε ίση με $Var = 83.5deg^2$, όντας μια αρκετά μεγάλη τιμή η οποία αποτυπώνει την ύπαρξη δεδομένων αρκετά μακριά από τη μέση τιμή της κατανομής (Πίνακας 5.24). Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων δεδομένων είναι 32.39deg και 1.21deg, τη στιγμή που η μέση τιμή των 10 υψηλότερων προέκυψε 34.94deg. Η μέγιστη παρατηρούμενη γωνία από τα στατιστικώς αναλυθέντα δεδομένα είναι 36.83deg. Ο ισοδύναμος γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης ισούται με $\mu_e = 0.04 \frac{1}{s}$ και ταυτίζεται σχεδόν με τον αντίστοιχο της παραπάνω περίπτωσης με μέση περίοδο τυχαίων κυματισμών 13.5s λόγω των πανομοιότυπων τυπικών αποκλίσεων του ρυθμού μεταβολής της απόλυτης γωνίας διατοιχισμού σ_x .

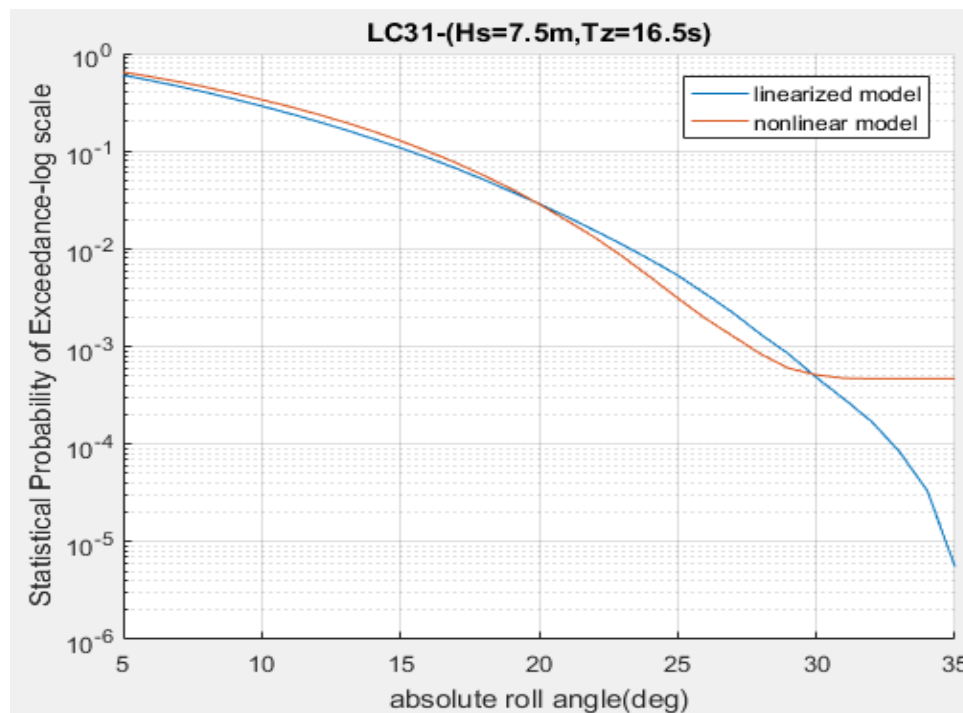
Μη γραμμικό μοντέλο

Από την άλλη, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση είναι εμφανές, βάσει του Σχήματος 5.56, ότι η PDF που ακολουθεί κατανομή Kernel αντιπροσωπεύει συνεπέστερα τις τιμές πιθανοτήτων των ευρών των απόλυτων γωνιών διατοιχισμού από την αντίστοιχη Γκαουσιανή. Οι πιθανότητες εμφάνισης των ευρών γωνιών γύρω από τη μέση τιμή καθίστανται μικρότερες περίπου κατά 0.008 σε σχέση με τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου, ενώ παράλληλα διαφαίνονται μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης των γωνιών που απέχουν αρκετά από την τελευταία (π.χ. για εύρη γωνιών που βρίσκονται από 9deg έως και περίπου 24deg και από -6deg μέχρι τις -22deg). Γι' αυτό το λόγο η μορφή της εκτιμήτριας PDF Kernel διακατέχεται όχι μόνο από μικρότερο μέγιστο αλλά και από μια διόγκωση στις παρειές της, απέχοντας εμφανώς από την αντίστοιχη μορφή της Γκαουσιανής PDF. Η μέση τιμή των δεδομένων/εκτιμήτριας PDF ισούται με $\bar{\varphi} = 1.5deg$ και η διακύμανση είναι ίση με $Var = 93.87deg^2$ (Πίνακας 5.24). Η τελευταία εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της

Γκαουσιανής κατανομής λόγω του γεγονότος ότι τα περισσότερα δεδομένα είναι διασκορπημένα μακριά από τη μέση τιμή της κατανομής, καθιστώντας το τετράγωνο της απόκλισής τους από την τελευταία υψηλότερο. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών από τα αναλυθέντα δεδομένα, 29.21deg και 0.8deg, είναι μικρότερα των συναφών του γραμμικοποιημένου όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη μέση τιμή των υψηλότερων 10, η οποία ισούται με 30.92deg. Αυτό οφείλεται στην χρήση των μη γραμμικών όρων απόσβεσης και τη συμβολή των τελευταίων στη μείωση, εν γένει, των επιπέδων τιμών απόκρισης διατοιχισμού.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Προσμετρώντας τις 7 διαφυγές του συστήματος, οι οποίες αντιστοιχούν σε 168 δεδομένα μεγαλύτερα της γωνίας απώλειας ευστάθειας ϕ_{fail} , στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησής του και εν μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (Cumulative Distribution Function-CDF) υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης των γωνιών εκατέρωθεν του πλοίου και κατασκευάζεται συναφή ημι-λογαριθμικό διάγραμμα.



Σχήμα 5.57: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC31-(Hs=7.5m,Tz=16.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
5	0.5986	0.6438	7.55%
10	0.2887	0.336	16.34%
14	0.134	0.16	19.4%
15	0.1078	0.1273	18.1%
20	0.0289	0.0287	-0.65%
25	0.0054	0.0031	-41.64%

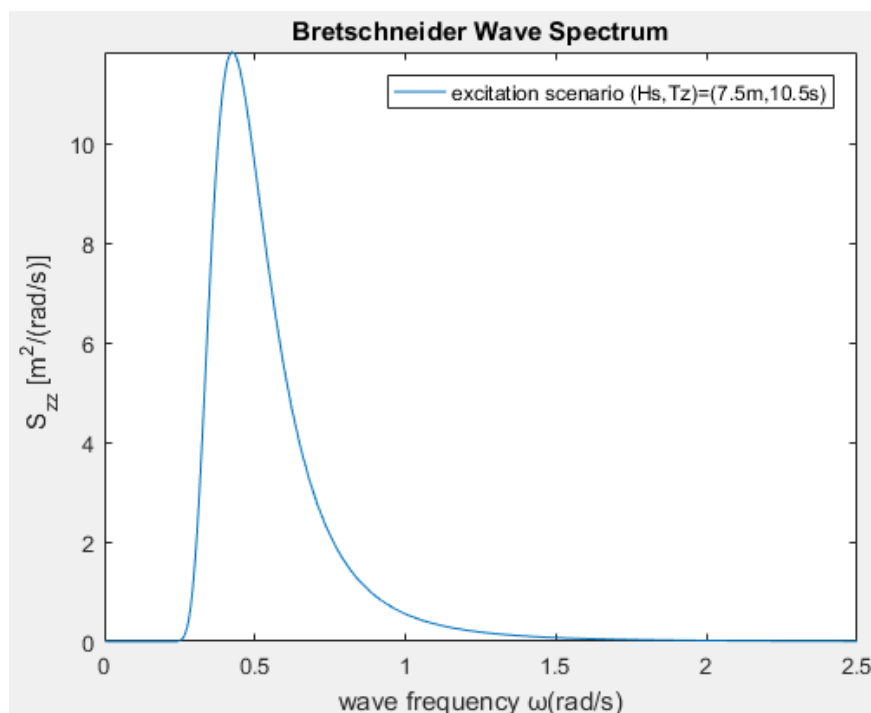
26	0.0035	0.0019	-44.13%
30	$4.81 \cdot 10^{-4}$	$5.11 \cdot 10^{-4}$	6.36%

Πίνακας 5.25: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC31- (Hs=7.5m,Tz=16.5s)}

Στο Σχήμα 5.57 διακρίνονται τρεις περιοχές γωνιών από τις οποίες οι δύο αφορούν στην υπεροχή του μη γραμμικού μοντέλου έναντι του γραμμικοποιημένου στην πρόβλεψη των υπερβάσεων γωνιών και η εναπομείνουσα στην υπερκεκτίμηση των υπερβάσεων των αντίστοιχων γωνιών από πλευράς γραμμικοποιημένου μοντέλου. Αυτή η περιοχή εκτείνεται από τις 20deg έως και λίγο πριν τις 30deg και η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων καταγράφεται στις 26deg λαμβάνοντας την τιμή 44.13% (Πίνακας 5.25), γεγονός που σημαίνει ότι η πιθανότητα υπέρβασης του μη γραμμικού είναι το 55% περίπου της αντίστοιχης του γραμμικοποιημένου μοντέλου. Στο διάστημα από 5deg έως και 20deg, όπου και η γραμμική μοντελοποίηση υποεκτιμά τις υπερβάσεις γωνιών, καταγράφεται μέγιστη διαφορά κατά την υπέρβαση των 14deg ίση με 19.4%, η οποία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αισθητά υψηλή. Τέλος, λόγω της προσμέτρησης των 7 διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος, αντιστοιχώντας σε 168 δεδομένα τα οποία είναι μεγαλύτερα της φ_{fail} , και της φθίνουσας πορείας της καμπύλης των πιθανοτήτων υπέρβασης του γραμμικοποιημένου μοντέλου, το τελευταίο υποεκτιμά τις υπερβάσεις γωνιών μεγαλύτερων των 30deg, με την ψαλίδα μεταξύ των δύο μοντελοποιήσεων συνεχώς να αυξάνεται.

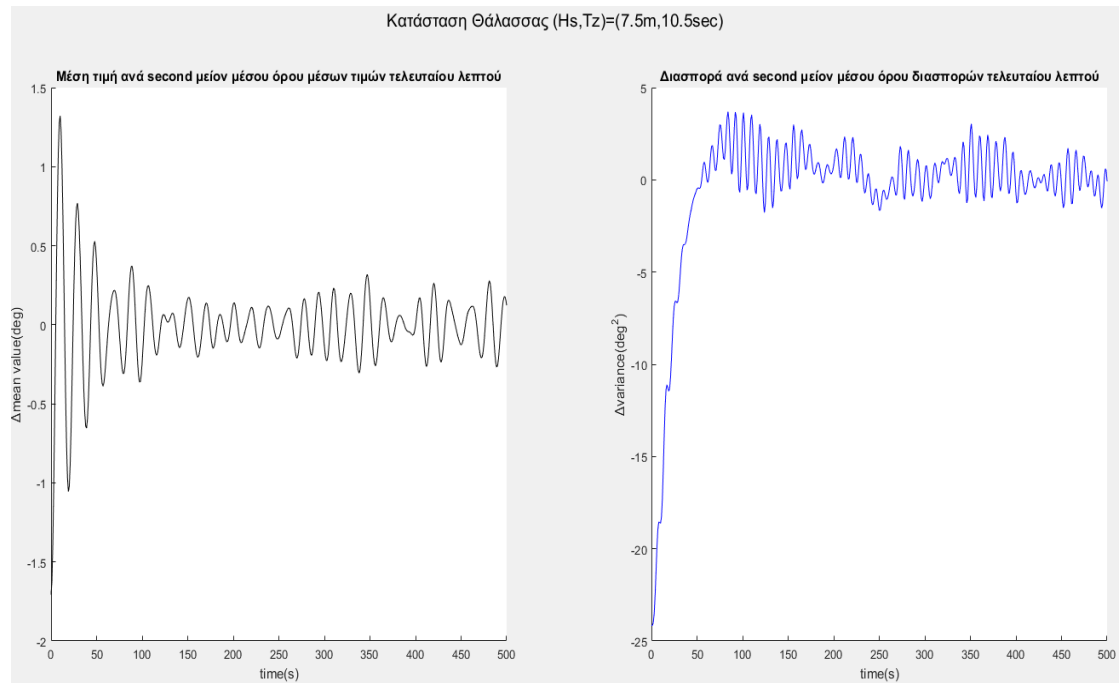
5.3.4.3 Στατιστική Ανάλυση της περίπτωσης LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)

Το φάσμα Bretschneider με αντιπροσωπευτικά στατιστικά μεγέθη Hs=7.5m και Tz=10.5s, από το οποίο έχουν προκύψει τα πλάτη κυματισμών για αντίστοιχες διακριτές συχνότητες, αφορά κυρίως υψίσυχνους κυματισμούς, έχοντας ταυτοχρόνως περίοδο κορυφής ίση με 15s. Ακόμη, σε σχέση με τα προγενέστερα δύο σενάρια που επενεργούν στη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης, το εν λόγω σενάριο εμφανίζεται πιο συχνά, με πιθανότητα εμφάνισης ίση με $7 \cdot 10^{-3}$.

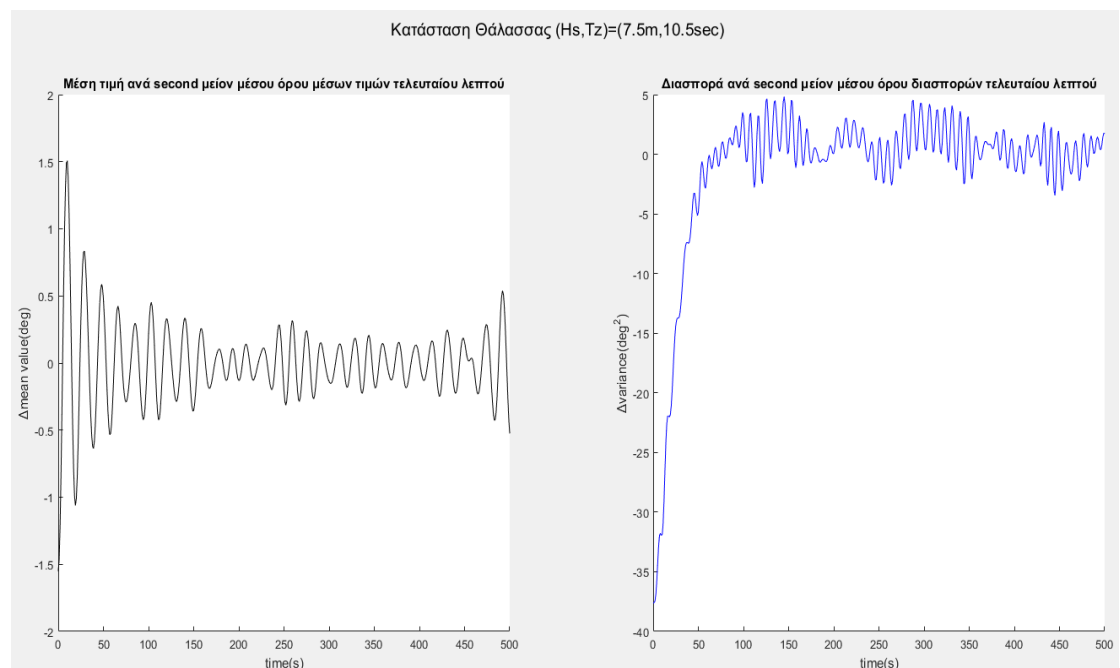


Σχήμα 5.58: Φάσμα Bretschneider για σενάριο διέγερσης (Hs=7.5m,Tz=10.5s)

Παρατηρώντας τις μεταβολές των δύο παραπάνω στατιστικών μεγεθών και των δύο μοντελοποιήσεων συναρτήσει του χρόνου, διαφαίνεται ότι σταθεροποιούνται επαρκώς, λόγω θορύβων που δεν τα «αφήνει» να συμπέσουν, έχοντας απειροελάχιστο θεωρητικά πλάτος ταλάντωσης, στη μέση τιμή ολότητάς τους, περίπου στα 150s αμφότερα.



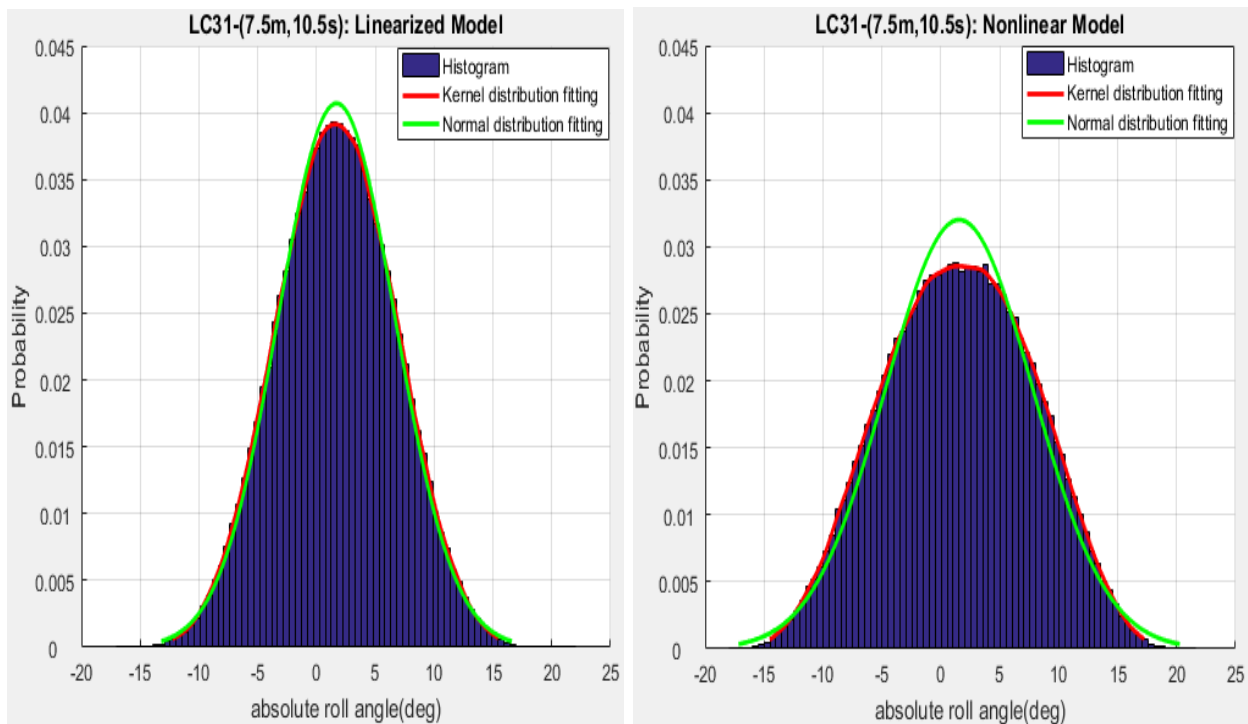
Σχήμα 5.59: Γραμμικοποιημένο Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}



Σχήμα 5.60: Μη Γραμμικό Μοντέλο - Μέση τιμή και διασπορά συναρτήσει του χρόνου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}

Ιστογράμματα, PDFs και στατιστικά μεγέθη κατανομών

Έτσι, προσομοιώντας 15000 φορές τόσο τη γραμμικοποιημένη όσο και τη μη γραμμική διαφορική εξίσωση κίνησης για χρόνο 5min και λαμβάνοντας 330000 και 329780 δεδομένα από χρονικές στιγμές οι οποίες ανήκουν στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο η απόκριση του πλοίου καθίσταται μόνιμη, παράγονται τα ιστογράμματα και εν συνεχεία, οι παρεμβαλλόμενες σε αυτά PDFs που ακολουθούν κατανομές Kernel και Gauss. Η πιθανότητα διαφυγής/ανατροπής στα πλαίσια της μοντελοποίησης του μη γραμμικού συστήματος είναι ίση με $6.67 \cdot 10^{-4}$, αντιστοιχώντας σε 10 διαφυγές. Σημειώνεται ότι κάθε εύρος εύρος τιμών των ιστογραμμάτων έχει ληφθεί ίσο με 0.5deg. Επίσης, στον πίνακα που ακολουθεί διαφαίνονται τα πιο σημαντικά μεγέθη που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση.



Σχήμα 5.61: Ιστογράμματα και συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας γραμμικοποιημένου και μη γραμμικού μοντέλου για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}

Loadcase 31 (Hs,Tz)=(7.5m,10.5s)		
Statistical Values	Linearized model	Nonlinear model
Time of Stabilization of statistical values (s)	150	150
Simulation Time (s)	300	300
Number of simulations with exceedances of ϕ_{EA} or escapes from 15000 simulations	0	10
Number of Data	330000	329780
Mean Value (deg)	1.7	1.55
Variance (deg ²)	24.69	39.24
Mean Value of 100 extreme values (deg)	17.56	18.88

Stand. Deviation of 100 extreme values (deg)	0.807	0.594
Mean Value of 10 extreme values (deg)	19.341	20.249
Maximum absolute rolling angle (deg)	22	21.53

Πίνακας 5.26: Στατιστικές Τιμές για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}

Γραμμικοποιημένο μοντέλο

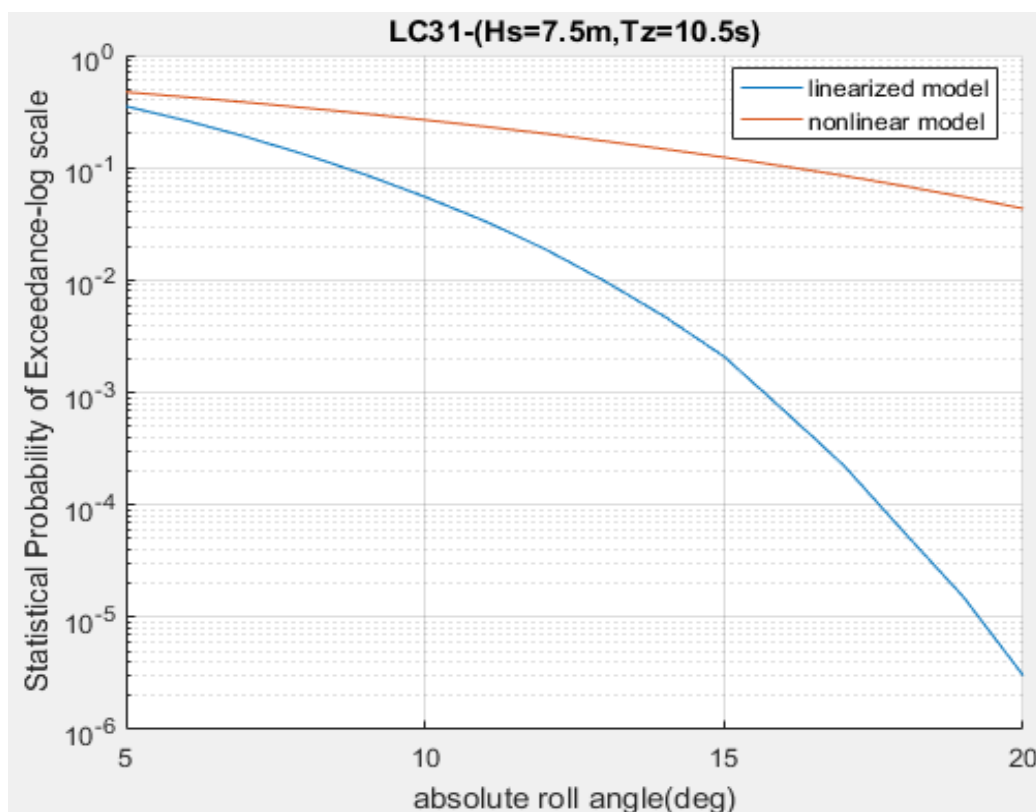
Κατά τη μελέτη του Σχήματος 5.61 διαφαίνεται ότι για το γραμμικοποιημένο μοντέλο δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των PDFs που ακολουθούν κανονική και Kernel κατανομή αντίστοιχα και έτσι μπορεί να διαπιστωθεί ότι η Γκαουσιανή PDF είναι κατάλληλη για την στοχαστική περιγραφή καθώς και για την στατιστική ανάλυση του συγκεκριμένου συστήματος. Βέβαια, όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις, παρατηρείται μια μικρή απόκλιση περίπου 5% στην περιοχή κυρίως της μέσης τιμής μεταξύ Γκαουσιανής PDF και εκτιμήτριας PDF Kernel/ιστογράμματος που οφείλεται στο σχετικά μικρό αριθμό συνιστωσών κυρίως κυμάτων, ειδικότερα 35, και δευτερογενώς ανέμου, καθώς, εν γένει, το μοντέλο τυχαίας φάσης αναπαριστά πιστά μια στοχαστική διαδικασία Gauss για ένα αρκετά μεγάλο, θεωρητικά άπειρο, αριθμό συνιστωσών. Έτσι, η δεδομένη απόκλιση κρίνεται αμελητέα. Η μέση τιμή της κατανομής είναι $\bar{\varphi} = 1.7deg$, συμπίπτοντας με τη γωνία ισορροπίας λόγω ανέμου φ_s και η διακύμανση είναι ίση με $Var = 24.69deg^2$ (Πίνακας 5.26). Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών είναι 19.34deg και 0.81deg αντίστοιχως, ενώ παράλληλα η μέση τιμή των 10 υψηλότερων προέκυψε ίση με 19.34deg. Η μέγιστη τιμή των στατιστικών δεδομένων είναι ίση με 22deg. Τέλος, ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης προέκυψε μέσω της στοχαστικής γραμμικοποίησης ίσος με $\mu_e = 0.031 \frac{1}{s}$, με την τιμή της τυπικής απόκλισης της απόλυτης ταχύτητας διατοιχισμού να είναι ίση με $\sigma_{\dot{x}} = 0.0427 rad/s$.

Μη γραμμικό μοντέλο

Στον αντίποδα, κατά τη μελέτη του μη γραμμικού μοντέλου(δεξί σκέλος Σχήματος 5.61), διαπιστώνεται εξαρχής ότι η PDF που ακολουθεί κανονική κατανομή δεν μπορεί να περιγράψει καταλλήλως το παραγόμενο ιστόγραμμα, καθώς η μορφή του, η οποία αναπαριστάται με συνεπέστερο και πιο ορθολογικό τρόπο από την εκτιμήτρια PDF της κατανομής Kernel, διαφέρει αρκετά από την αντίστοιχη της Γκαουσιανής PDF. Τόσο οι μικρότερες γύρω από την περιοχή της μέσης τιμής όσο οι μεγαλύτερες σε πιο απομακρυσμένα εύρη τιμών πιθανότητες εμφάνισης γωνιών αποτελούν χαρακτηριστικά τα οποία διαφοροποιούν το παρόν ιστογράμμα και την εκτιμήτρια, παρεμβαλλόμενη σ' αυτό, PDF που ακολουθεί κατανομή Kernel από το αντίστοιχο ιστόγραμμα του γραμμικοποιημένου και τη συναφή Γκαουσιανή PDF. Ειδικότερα, για γωνίες μεγαλύτερες των -3.5deg και των 7.5deg παρατηρούνται μεγαλύτερες συχνότητες εμφάνισης των δεδομένων κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση σε σχέση με τη γραμμικοποιημένη. Αυτό αποτυπώνεται και στην διακύμανση της συγκεκριμένης κατανομής $Var \cong 39.24deg^2$, καθώς διακρίνεται εμφανώς υψηλότερη, κατά 14.5deg² συγκεκριμένα, από εκείνη της Γκαουσιανής (Πίνακας 5.26). Η μέση τιμή των δεδομένων και της αντίστοιχης εκτιμήτριας κατανομής βρέθηκε ίση με 1.55deg, απέχοντας από τη γωνία ισορροπίας φ_s λόγω της ασυμμετρίας που δημιουργεί στο μη γραμμικό μοχλοβραχίονα επαναφοράς η χρονομεταβαλλόμενη ροπή ανέμου. Επιπρόσθετα, οι μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών, 18.88deg και 24.25deg αντίστοιχα, παραδόξως, όπως συνέβη και στην περίπτωση LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s), εμφανίζονται μεγαλύτερες κατά 1deg-1.5deg από τις αντίστοιχες του γραμμικοποιημένου μοντέλου, ενώ η τυπική απόκλιση των 100 υψηλότερων γωνιών, η οποία ισούται με 0.594deg, καθίσταται, όπως είθισται, μικρότερη.

Πιθανότητες Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance)

Και σ' αυτήν την περίπτωση οι 10 διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος προσμετρώνται στον υπολογισμό των πιθανοτήτων υπέρβασης και κατ' αυτόν τον τρόπο παράγονται τόσο ,συναφές με αυτές, ημι-λογαριθμικό διάγραμμα όσο και σχετικός πίνακας στον οποίο εντοπίζεται η ποσοστία απόκλιση μεταξύ των δεδομένων τιμών.



Σχήμα 5.62: Διάγραμμα πιθανότητας υπέρβασης γωνιών διατοιχισμού της {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}

Absolute roll angle (deg) [port&starboard]	Statistical Probability of Exceedance Linearized Model(A)	Statistical Probability of Exceedance Nonlinear Model(B)	Percentage Divergence [(B-A)/A*100%]
5	0.352	0.4697	33.45%
8	0.1304	0.4402	160.98%
10	0.055	0.2657	338.37%
12	0.0189	0.201	962.05%

Πίνακας 5.27: Πιθανότητες υπέρβασης ορισμένων γωνιών των δύο μοντέλων για την {LC31-(Hs=7.5m,Tz=10.5s)}

Παρατηρώντας τόσο το Σχήμα 5.62 όσο και τον Πίνακα 5.27 διαπιστώνεται ότι, όπως συνέβη και στις προγενέστερες περιπτώσεις {LC18-(Hs=6.5m,Tz=9.5s)}, {LC22-(Hs=8.5m,Tz=12.5s)}, {LC31-(Hs=7.5m,Tz=13.5s)}, μέσω του μη γραμμικού μοντέλου εκτιμώνται μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης σε σχέση με το γραμμικοποιημένο καθ' όλο το φάσμα γωνιών. Αυτό είναι απόρροια όχι μόνο των υψηλότερων γωνιών που εμφανίζονται κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση, γεγονός που διαφαίνεται και από τις μέσες τιμές των 100 υψηλότερων γωνιών της προηγούμενης ανάλυσης (Πίνακας 5.26) αλλά των πολλών διαφυγών, συγκεκριμένα 10, του μη γραμμικού συστήματος που ενσωματώνονται στους σχετικούς

υπολογισμούς. Υψηλές, ακόμα και μέσaiας κλίμακας μέτρου, γωνίες διατοιχισμού π.χ. 15deg-20deg εντοπίστηκαν σε περισσότερες προσομοιώσεις της μη γραμμικής μοντελοποίησης παρά της γραμμικοποιημένης. Η απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών των δύο μοντέλων, υπολογισμένη ως προς αυτή του γραμμικοποιημένου, καθίσταται αρκετά υψηλή και ακολουθεί αύξουσα πορεία. Μάλιστα, η απόκλιση των δύο καμπυλών των δύο μοντέλων διαφαίνεται χαώδης και καθίσταται μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες των ομοιογενών περιπτώσεων που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Στην τεραστίων διαστάσεων ποσοστιαία απόκλιση των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο μοντέλων συμβάλλει η ενσωμάτωση των 10 διαφυγών, οι οποίες μόνο λίγες δεν μπορούν να χαρακτηριστούν. Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα υπέρβασης των 5deg μέσω του μη γραμμικού μοντέλου υπολογίζεται υψηλότερη κατά 33.45% από εκείνη του γραμμικοποιημένου, ενώ ταυτόχρονα των 8deg κατά 161% μεγαλύτερη, όντας κάτι παραπάνω από διπλάσια, της συναφούς που υπολογίστηκε στα πλαίσια της γραμμικής μοντελοποίησης. Η διαφορά εκτινάσσεται στις ακόμα υψηλότερες γωνίες, καθώς η πιθανότητα υπέρβασης των 10deg που προκύπτει μέσω της μη γραμμικής μοντελοποίησης είναι κάτι παραπάνω από τετραπλάσια της αντίστοιχης της γραμμικοποιημένης. Ταυτόχρονα, τη στιγμή κατά την οποία παρατηρούνται 66330 δεδομένα άνω των 12deg κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση, μόλις 6237 εντοπίζονται μεγαλύτερα των 12deg στα πλαίσια της μοντελοποίησης του γραμμικοποιημένου συστήματος.

Κεφάλαιο 6: Αξιολόγηση – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Διαφορές στη μορφή των ιστογραμμάτων και των PDFs του γραμμικού και του μη γραμμικοποιημένου μοντέλου

Από τη στατιστική ανάλυση που προηγήθηκε καθίσταται σαφές ότι όσο πιο μη γραμμικό είναι ένα σύστημα τόσο μεγαλύτερη ανακλύπτει η απόκλιση μεταξύ τόσο του εγγενούς ιστογράμματος, εκφρασμένο από την απόλυτη γωνία διατοιχισμού, και του αντίστοιχου γραμμικοποιημένου όσο και της παρεμβαλλόμενης, στο πρώτο, PDF, ακολουθώντας κατανομή Kernel, και της Γκαουσιανής PDF. Έντονα μη γραμμικό καθίσταται ένα σύστημα το οποίο, ενόσω λαμβάνει σχετικά υψηλές τιμές γωνιών διατοιχισμού, ώστε να μην εμπίπτουν στη γραμμική περιοχή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, την ίδια στιγμή αποτελείται αφενός από έναν μοχλοβραχίονα επαναφοράς ο οποίος αντιπροσωπεύεται από υψηλού μέτρου ανώτερης τάξης συντελεστές, εμφανώς μεγαλύτερων από το συντελεστή του γραμμικού όρου, δηλαδή του μετακεντρικού ύψους GM, αφετέρου από μια εξίσου έντονα μη γραμμική ροπή απόσβεσης. Τέτοια συστήματα προέκυψαν από την επίδραση των σεναρίων διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) (Σχήμα 5.5), ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) (Σχήμα 5.10) στην κατάσταση φόρτωσης 18, του σεναρίου ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.35) στην κατάσταση φόρτωσης 27 και των σεναρίων ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) (Σχήμα 5.51), ($H_s=7.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.56) και ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) (Σχήμα 5.61) στην κατάσταση φόρτωσης 31. Βέβαια, σε όλα τα μελετούμενα συστήματα εντοπίστηκε απόκλιση μεταξύ των ιστογραμμάτων και των παρεμβαλλόμενων PDFs των δύο αντιτιθέμενων μοντελοποιήσεων, αλλά κυρίως στις παραπάνω περιπτώσεις αυτή η απόκλιση εντοπίστηκε μεγαλύτερη και πιο έντονη. Εν γένει, χαρακτηριστικά ιδιώματα των, εχασθέντων μέσω στατιστικής ανάλυσης, ιστογραμμάτων στα πλαίσια της μη γραμμικής μοντελοποίησης αποτελούν τόσο οι μειωμένες πιθανότητες εμφάνισης γωνιών που βρίσκονται γύρω από τη μέση τιμή των δεδομένων όσο και οι αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης μεσαίας έως και μεγάλης κλίμακας γωνιών σε σχέση με τα ιστογράμματα των γραμμικών μοντελοποιήσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται αφενός στις μη γραμμικότητες, που εισάγονται στο σύστημα τόσο από τη ροπή επαναφοράς όσο και από τη ροπή απόσβεσης, αφετέρου στην εκπροσώπηση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς/ροπής επαναφοράς από τη σχετική γωνία διατοιχισμού, διαστρεβλώνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, σημαντικές χαρακτηριστικές παραμέτρους ευστάθειας όπως π.χ. συντελεστές του μοχλοβραχίονα επαναφοράς (Bulian & Francescutto, 2011) [2]. Ο συνδυασμός των προγενέστερων δύο έχει ως αποτέλεσμα σε αρκετές προσομοιώσεις το σύστημα να μεταπηδά θέση ισορροπίας, η οποία βρίσκεται, εν γένει, κοντά στη γωνία ισορροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου φ_s και να ταλαντώνεται γύρω από μια νέα, μεγαλύτερη κατ' απόλυτη τιμή. Αυτό, διαβιβάζεται μέσω στατιστικής ανάλυσης και μεταφράζεται, εν τέλει, από την περίσσεια εμφάνισης δεδομένων στις μεσαίας κλίμακας γωνίες και από το έλλειμμα εμφάνισής τους γύρω από τη μέση τιμή σε σχέση με τις αντίστοιχες συχνότητες εμφάνισης που προκύπτουν κατά τη γραμμική μοντελοποίηση. Το παραπάνω αποτελεί τεκμήριο για τις μεγαλύτερες τιμές διακύμανσεων των κατανομών που παρατηρήθηκαν στα μη γραμμικά συστήματα. Επίσης, για όλα τα σεναρία που μελετήθηκαν στα πλαίσια του μη γραμμικού μοντέλου προέκυψαν μέσες τιμές οι οποίες ήταν μικρότερες, άλλοτε λίγο και άλλοτε πολύ, από τη γωνία ισορροπίας λόγω μέσης ροπής ανέμου της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης. Αυτό συνέβη λόγω της ασυμμετρίας του τροποποιημένου, πια, μη γραμμικού μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZ_{res} από τη ροπή ανέμου και της περίσσειας, στις περισσότερες διενεργηθείσες προσομοιώσεις, επαναφοράς στην κατεύθυνση που είναι αντίθετη αυτής του εξωτερικού αιτίου (προς τον άνεμο-windward). Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις επιδράσεων των σεναρίων ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) (Σχήμα 5.5)

και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) (Σχήμα 5.10) στην κατάσταση φόρτωσης 18, του σεναρίου ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.35) στην κατάσταση φόρτωσης 27 και των σεναρίων ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) (Σχήμα 5.51), ($H_s=7.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.56) και ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) (Σχήμα 5.61) στην κατάσταση φόρτωσης 31 εντοπίστηκαν αισθητές διαφορές μεταξύ των ιστογραμμάτων των δύο μοντελοποιήσεων. Αυτό τεκμηριώνεται από την έντονη μη γραμμικότητα των μοχλοβραχιόνων επαναφοράς ((4.1.1) - Loadcase 18, (4.1.3) - Loadcase 27, (4.1.4) – Loadcase 31) καθώς οι αντίστοιχοι ανώτερης τάξης όροι του κατέχουν υψηλή τιμή. Αυτό σε συνδυασμό με τη λήψη γωνιών διατοιχισμού που αντιστοιχούν στην μη γραμμική περιοχή τους αλλά και την έκφρασή τους μέσω της σχετικής γωνίας διατοιχισμού οδηγούν στην διαφορετική μορφή του ιστογράμματος του μη γραμμικού μοντέλου σε σχέση με το γραμμικοποιημένο, με την εμφάνιση μέσaiας κλίμακας μέτρου γωνιών να καθίσταται πιο συχνή στη περίπτωση του πρώτου. Αντίθετα, κατά την στατιστική ανάλυση των αποκρίσεων υπό την επίδραση των τριών(3) μελετούμενων σεναρίων διέγερσης στην κατάσταση φόρτωσης 22, δεν παρουσιάστηκαν έντονες διαφορές μεταξύ των ιστογραμμάτων του γραμμικοποιημένου και του μη γραμμικού μοντέλου (Σχήμα 5.21, Σχήμα 5.26 και Σχήμα 5.31). Αυτό οφείλεται στην απουσία έντονης μη γραμμικότητας του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, με την κλίση του, μετακεντρικό ύψος GM, να λαμβάνει υψηλές και δη παραπλήσιες τιμές με αυτές των συντελεστών των μη γραμμικών όρων του. Επίσης, τα υψηλά επίπεδα επαναφοράς, με μέγιστο μοχλοβραχίονος και ροπής επαναφοράς ίσο με ($GZ_{MAX}=1.33m, M_{R,MAX}=97528.1tm$) (Πίνακας 4.2) σε συνδυασμό τόσο με την αρκετά μεγάλη τιμή του μετακεντρικού ύψους GM, ίσο με 2m, όσο και με την χρήση της μη γραμμικής ροπής απόσβεσης δεν αφήνουν το σύστημα να ταλαντωθεί σε πολύ υψηλές γωνίες διατοιχισμού στις περισσότερες προσομοιώσεις, συνεισφέροντας μ' αυτόν τον τρόπο στην ευστάθεια. Τέλος, ομοίως με προηγουμένως, κατά την επενέργεια των σεναρίων ($H_s=6.5m, T_z=9.5m$) (Σχήμα 5.15) και ($H_s=8.5m, T_z=11.5s$) (Σχήμα 5.40) στην κατάσταση φόρτωσης 18 και στην 27 αντίστοιχα, δεν εντοπίστηκαν τεράστιες διαφορές μεταξύ των ιστογραμμάτων και των PDFs του γραμμικοποιημένου και του μη γραμμικού μοντέλου εξαιτίας της απουσίας αισθητά υψηλών γωνιών στις περισσότερες από τις διενεργούμενες προσομοιώσεις (ενν. του μη γραμμικού μοντέλου), με τον μοχλοβραχίονα να παρουσιάζει, ως επί το πλείστον, μια σχεδόν γραμμική συμπεριφορά καθώς τα επίπεδα γωνιών εμπίπτουν στη γραμμική περιοχή του. Ιδίως κατά τη μη γραμμική μοντελοποίησης της περίπτωση του σεναρίου ($H_s=8.5m, T_z=11.5s$), λόγω και της έντονης συμπεριφοράς «σκληρυνόμενου ελατηρίου» (“hardening spring”) του μοχλοβραχίονα της κατάστασης 27 (Σχήμα 4.4), που εδραιώνει την γραμμική περιοχή έως και τις 11.5deg, η μέση τιμή των 100 υψηλότερων γωνιών βρέθηκε μόλις 14.5deg (Πίνακας 5.18), καθιστώντας έτσι το ιστόγραμμα της συναφούς μοντελοποίησης σχεδόν πανομοιότυπο με της γραμμικοποιημένης, με τη μόνη διαφορά να εντοπίζεται στη λήψη μικρότερων πιθανοτήτων εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή.

Ποιοτική συσχέτιση στατιστικής ανάλυσης με δείκτη ευπάθειας C του κριτηρίου

Κατά την επίδραση των σεναρίων διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$), ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) στην κατάσταση φόρτωσης 18, το πλοίο λαμβάνει τις υψηλότερες γωνίες διατοιχισμού σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Μάλιστα, η μεγαλύτερη γωνία, συγκεκριμένα 45.78deg (Πίνακας 5.6), εντοπίστηκε κατόπιν προσομοιώσεων της απόκρισης του πλοίου υπό την επίδραση του σεναρίου ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) στα πλαίσια της γραμμικής μοντελοποίησης την ώρα που η οριακή γωνία ανατροπής, για μη γραμμικό μοχλοβραχίονα, ισούται με 46.4deg και η εικόνα αυτής, στα πλαίσια της γραμμικής μοντελοποίησης, προκύπτοντας μέσω της μεθόδου της «ισοδύναμης περιοχής», ϕ_{EA} είναι ίση με 45deg (Πίνακας 5.6) . Ακόμη, υπό την επίδραση του συγκεκριμένου σεναρίου σημειώθηκαν 21 υπερβάσεις της γωνίας ϕ_{EA} στις 15000 προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν στα πλαίσια του γραμμικού μοντέλου (Πίνακας 5.6). Στη δεδομένη κατάσταση φόρτωσης και υπό την επενέργεια των προαναφερθέντων δύο σεναρίων

διέγερσης, λοιπόν, σημειώνονται κατά τη διενέργεια προσομοιώσεων της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχιστικής κίνησης(καθώς και της μη γραμμικής) μεγαλύτερες γωνίες διατοιχισμού παρόλο τη χαμηλότερη, από τη μία πλευρά, τιμή του σημαντικού ύψους κύματος, μέσω του οποίου συνεπάγονται χαμηλότερη ενεργειακή περιεκτικότητα ριπών ανέμου και χαμηλότερη μέση ταχύτητα ανέμου, επόμενος και κατ'επέκταση μειωμένη συνολική επίδραση ανέμου, και από την άλλη παρά τους υψηλότερους ισοδύναμους γραμμικοποιημένους συντελεστές απόσβεσης μ_e των δύο περιπτώσεων(Πίνακας 5.3). Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω της σχετικά μικρής τιμής αρχικού μετακεντρικού ύψους, $GM=1.36m$, το οποίο καθίσταται μικρότερο από τα αντίστοιχα των λοιπών καταστάσεων εκτός του συναφούς της κατάστασης 27, αποτελώντας ταυτόχρονα μέγεθος ενδεικτικό της ευστάθειας, αφετέρου εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας κυματισμών με την ταυτόχρονη προσέγγιση της ιδιοπερίοδου της συγκεκριμένης κατάστασης φόρτωσης (κατάσταση φόρτωσης 18) από τις περιόδους κορυφής των αντιπροσωπευτικών των σεναρίων φασμάτων κυματισμών Bretschneider.

Εύλογα, αν αναλογιστεί κανείς ότι παραπλήσια ή ακόμη και δυσμενέστερη επίδραση με/από τα σενάρια ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) στη κατάσταση φόρτωσης 18 θα έχουν σενάρια τα οποία εκφράζονται όχι μόνο από, επί το πλείστον, μεγαλύτερη τιμή σημαντικού ύψους κύματος H_s , έχοντας ταυτόχρονα κοινή μέση περίοδο κυματισμών $T_z=14.5s, 15.5s$ (και συνεπώς εκφραζόμενα από υψηλότερες τιμές ενεργειακής περιεκτικότητας ανέμου και κυματισμών), αλλά και από μεγαλύτερες μέσες περιόδους κυματισμών T_z σε συνδυασμό με μεγαλύτερα είτε ακόμη και με μικρότερα σημαντικά ύψη κύματος, η πιθανότητα ευπάθειας/απώλειας ευστάθειας υπό τα δεδομένα σενάρια αναμένεται να ανακύψει σαφώς μια υπολογίσιμη ποσότητα. Εάν θεωρηθεί, ταυτόχρονα, πως ο χρόνος προσομοίωσης είναι αρκετά μεγαλύτερος από το μέσο χρόνο των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν, π.χ 1h, αποτελώντας και τον ακριβή χρόνο έκθεσης στα πλαίσια μοντελοποίησης του κριτηρίου, και ότι ορισμένα από τα δυσμενή σενάρια έχουν μη αμελητέα συχνότητα εμφάνισης, μπορεί να επικυρωθεί και η αρκετά υψηλή τιμή, υπολογισμένη μέσω του κριτηρίου, που λαμβάνει ο πιθανοτικός δείκτης ευπάθειας C , ίσος με $C=0.01514$ (Πίνακας 4.9), στην εν λόγω κατάσταση, η οποία μάλιστα προσεγγίζει και την οριακή τιμή $R=0.06$. Αυτή είναι και η μεγαλύτερη τιμή από τις υπολογισθείσες του δείκτη C για τις τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης. Βέβαια, εδώ καθίσταται απαραίτητο να τονισθεί ότι ο υπολογισμός του δείκτη C έχει πραγματοποιηθεί μέσω της χρήσης της σχετικής γωνίας διατοιχισμού. Από την άλλη, μέσω της κατάστασης φόρτωσης 27, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή μετακεντρικού ύψους ($GM=0.803m$) με τη συνεπαγόμενη αυτού μεγαλύτερη, από κάθε άλλη κατάσταση, τιμή γωνίας ισοροπίας $\varphi_s(5deg)$, και συγχρόνως από μικρότερους γραμμικούς ισοδύναμους συντελεστές απόσβεσης, δεν ανακύπτει μεγάλη τιμή του δείκτη ευπάθειας C , όντας της τάξης του 10^{-5} (Πίνακας 4.9). Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της μικρής συχνότητας εμφάνισης των σεναρίων, κατά την επίδραση των οποίων παρατηρούνται συντονιστικά φαινόμενα και εν γένει υψηλές γωνίες διατοιχισμού, αφού η ιδιοπερίοδος του πλοίου στην προκειμένη κατάσταση φόρτωσης είναι αρκετά υψηλή $T_0=28.37s$. Μάλιστα, η ιδιοπερίοδος αντιστοιχεί σε περιόδους κορυφής αρκετά χαμηλόσυχων κυματισμών οι οποίοι δεν περιλαμβάνονται στο Wave Scatter Table (Πίνακας 4.4), καθώς τέτοιοι κυματισμοί έχουν μέση περίοδο ανύψωσης τη ελεύθερης επιφάνειας T_z μεγαλύτερη των 18.5s. Ακόμη, φάσμα κυματισμών με παραπλήσια/κοντινή περίοδο κορυφής αντιστοιχεί σε ανάλογα σενάρια τα οποία έχουν μηδενική πιθανότητα εμφάνισης. Την ίδια στιγμή, χαμηλά επίπεδα απόκρισης καταγράφηκαν και κατά τη μοντελοποίηση, μη γραμμική και γραμμικοποιημένη αμφότερα, της κατάστασης φόρτωσης 22, ακόμη και με την επενέργεια των σεναρίων ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$) και ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) που χαρακτηρίζονται από προσέγγιση της ιδιοπερίοδου του συστήματος από την περίοδο κορυφής και από αξιοσημείωτα ποσά ενέργειας αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται όχι μόνο στην υψηλή τιμή του μετακεντρικού ύψους, $GM=2.03m$, καθιστώντας υψηλή επαναφορά στο σύστημα ακόμη και στην περιοχή των μικρών γωνιών, αλλά και στις αξιολογες-μη αμελητέες τιμές των

ισοδύναμων συντελεστών απόσβεσης μ_e . Το γεγονός αυτό φαίνεται να επικυρώνει εν μέρει την τιμή του πιθανοτικού δείκτη ευπάθειας C ο οποίος προέκυψε της τάξεως του 10^{-7} (Πίνακας 4.9). Δε μπορεί να παραληφθεί ότι, στην κατάσταση φόρτωσης 31, σημειώθηκαν υψηλές τιμές απόκρισης κατά τη διεξαχθείσα στατιστική ανάλυση, κοντά στη περιοχή των 30deg, κύριως κατά την επίδραση των σεναρίων ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) και ($H_s=7.5m, T_z=16.5s$) (Πίνακας 5.22 και Πίνακας 5.24 αντίστοιχα), ενώ ταυτόχρονα υπολογίστηκε μέσω του κριτηρίου μια αρκετά μεγάλη τιμή του, συναφούς της δεδομένης κατάστασης, πιθανοτικού δείκτη ευπάθειας C, όντας ίσος με $C=0.001868$ (Πίνακας 4.9).

Διαφορές μεταξύ των Πιθανοτήτων Υπέρβασης(Statistical Probabilities of Exceedance) του γραμμικοποιημένου και του μη γραμμικού μοντέλου

Αναφορικά με τις πιθανότητες υπέρβασης γωνιών(Statistical Probabilities of Exceedance), που βασίζονται μέσω της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων, στα πλαίσια της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης σημειώθηκε μια γενική τάση υποεκτίμησή τους για γωνίες από μικρής έως και μεσαίας κλίμακας, ενώ συγχρόνως παρατηρήθηκε μια τάση υπερεκτίμησή τους για γωνίες από μεσαίας κλίμακας έως και μιας εκάστοτε γωνίας σχετικά υψηλής, ύστερα από την οποία το μη γραμμικό μοντέλο υπερτερεί στην πρόβλεψή τους εξαιτίας των διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος. Ταυτόχρονα, η προσθήκη των διαφυγών σταθεροποιεί την καμπύλη των πιθανοτήτων υπέρβασης του μη γραμμικού μοντέλου έπειτα της μέγιστης γωνίας των δεδομένων του μη γραμμικού ιστογράμματος, στην τιμή της πιθανότητας διαφυγής/ανατροπής. Εν γένει, παρατηρήθηκε μια αύξουσα πορεία της απόκλισης των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών, υπολογισμένων εντός των πλαισίων γραμμικοποιημένης και μη γραμμικής μοντελοποίησης, έως και μια δεδομένη γωνία κάθε φορά, με την υπεροχή της μη γραμμικής μοντελοποίησης να καθίσταται εμφανής. Από εκεί και έπειτα, η ποσοστιαία διαφορά, λαμβάνοντας αρνητικό πρόσημο εξαιτίας τόσο της υπερεκτίμησης των υπερβάσεων υψηλών σχετικά γωνιών από το γραμμικοποιημένο μοντέλο όσο και της έκφρασής της ως προς την πιθανότητα υπέρβασης υπολογισμένη μέσω του τελευταίου, συνεχίζει να αυξάνεται, όμως αυτή τη φορά, κατ' απόλυτη τιμή. Αυτό αποδίδεται στην δραστικότερη επίδραση των μη γραμμικών όρων απόσβεσης στη μείωση των τιμών κατά την απόκριση έναντι του ισοδύναμου γραμμικοποιημένου συντελεστή καθώς και στη μη ενσωμάτωση γωνιών, κατά την πάροδό τους, όπου κατέχουν υψηλότερες συχνότητες εμφάνισης εξαιτίας της πεπλάτυνσης των μη γραμμικών ιστογραμμάτων στις μεσαίου μέτρου γωνίες. Επομένως, οι μη γραμμικοί όροι απόσβεσης και επαναφοράς (καθώς και η μορφή του αντίστοιχου ιστογράμματος) είναι υπεύθυνοι για την υπεροχή του γραμμικού μοντέλου στην πρόβλεψη περισσότερων υπερβάσεων γωνιών εν γένει μεσαίας κλίμακας (μέτρου). Τέλος, λόγω της φθίνουσας πορείας της καμπύλης πιθανοτήτων υπέρβασης του γραμμικοποιημένου μοντέλου και της λήψης ολένα και μικρότερων τιμών αφενός και των διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος και της επικείμενης σταθεροποίησης της αντίστοιχης καμπύλης στην τιμή της πιθανότητας διαφυγής/ανατροπής, οι πιθανότητες υπέρβασης των υψηλών γωνιών προκύπτουν μεγαλύτερες μέσω της μη γραμμικής μοντελοποίησης, καθιστώντας, έτσι, την αντιπαρατιθέμενη γραμμικοποιημένη ανεπαρκή για την αξιολόγηση της ευστάθειας σε δυσμενείς-επικίνδυνες καταστάσεις. Εδώ να υπενθυμιστεί ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων των πιθανοτήτων υπέρβασης αντιστοιχούσε σε γωνίες εκατέρωθεν των δύο πλευρών του πλοίου (port & straboard side) και οι συναφείς πιθανότητες υπολογίστηκαν από τη σχέση (5.2.1).

Ειδικότερα, κατά την επίδραση των σεναρίων με αντιπροσωπευτική μέση περίοδο κυματισμών $T_z=14.5s$ και $T_z=15.5s$ και κοινό σημαντικό ύψος κύματος $H_s=6.5m$ στην κατάσταση φόρτωσης 18 (Σχήμα 5.6 και Σχήμα 5.11 αντίστοιχα), η γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση εκτιμά μικρότερο αριθμό υπερβάσεων γωνιών σε σχέση με τη μη γραμμική περίπτωση μέχρι και τις 19deg και τις 18deg αντίστοιχα. Ωστόσο, η ποσοστιαία διαφορά τους,

υπολογισμένη ως προς τη πιθανότητα υπέρβασης του γραμμικοποιημένου μοντέλου, δε ξεπερνά το 19.59% (Πίνακας 5.5) και το 12.34% (Πίνακας 5.7) υπό την επενέργεια των σεναρίων ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) αντίστοιχα, αποτελώντας αποκλίσεις που δεν καθίστανται ιδιαίτερα υψηλές. Από κει και μέχρι τις γωνίες 34deg και 38.5deg περίπου για τα σεναρία ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) (Σχήμα 5.6) και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) (Σχήμα 5.11) αντίστοιχα, το γραμμικοποιημένο μοντέλο προβλέπει πιο συχνές υπερβάσεις γωνιών σε σχέση με τις αντίστοιχες του μη γραμμικού, με την απόκλιση τους να αυξάνεται πρώτα ενώ έπειτα να μειώνεται με την πάροδο των γωνιών. Η απόκλιση των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο μοντελοποιήσεων, υπολογισμένη ως προς τη γραμμικοποιημένη, της γωνίας 30deg λαμβάνει περίπου την τιμή 78.89% και 82.66% για τα σεναρία ($H_s=6.5m, T_z=14.5s$) και ($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) αντίστοιχα. Δηλαδή η πιθανότητα υπέρβασης, υπολογισμένη στα πλαίσια μη γραμμικής μοντελοποίησης, της εν λόγω γωνίας είναι μόλις το 21% και 17% της αντίστοιχης της γραμμικοποιημένης. Από την άλλη, η πρόβλεψη μεγαλύτερων πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών από μικρού έως και μεσαίου μέτρου στα πλαίσια του μη γραμμικού μοντέλου έγκειται στο γεγονός της εύρεσης περιπτώσεων δεδομένων μακριά σχετικά από τη μέση τιμή τους με άμεσο επακόλουθο οι συχνότητες εμφάνισής τους να καθίστανται μεγαλύτερες, γεγονός που διαφαίνεται και από τη μορφή των αντίστοιχων ιστογραμμάτων. Συγχρόνως, η ενσωμάτωση των διαφυγών οδηγούν στη αυξητική τάση της απόκλισης και στη λήψη της τελευταίας πολύ μεγάλων τιμών με την πάροδο των γωνιών, γεγονός που οφείλεται επίσης και στην εκ φύσεως μείωση εμφάνισης των δεδομένων του γραμμικοποιημένου μοντέλου τα οποία αντιστοιχούν σε πολύ υψηλές γωνίες. Συνεχίζοντας, σχεδόν η ίδια συμπεριφορά/τάση φαίνεται να επικρατεί και στην κατάσταση φόρτωσης 22. Πιο συγκεκριμένα, για τα σεναρία ($H_s=8.5m, T_z=10.5s$) (Σχήμα 5.27) και ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.32), η πρόβλεψη μεγαλύτερων πιθανοτήτων υπέρβασης του γραμμικοποιημένου σε σχέση με το μη γραμμικό μοντέλο λαμβάνει χώρα στις περιοχές γωνιών [11.5deg, 15.8deg] και [13.5deg, 16.5deg] αντίστοιχα. Η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο μοντέλων ανάμεσα στις παραπάνω περιοχές γωνιών, παρατηρείται στις 15deg και ισούται με -45% και -16.62% για τα δύο σεναρία ($H_s=8.5m, T_z=10.5s$) (Πίνακας 5.13) και ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) (Πίνακας 5.15) αντίστοιχα. Επίσης, για τα εν λόγω σεναρία, ($H_s=8.5m, T_z=10.5s$) και ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$), στο διάστημα από μικρού έως μεσαίου μέτρου γωνιών, η εκτίμηση του μη γραμμικού απέκλινε, συγκεκριμένα ήταν μεγαλύτερη, από την αντίστοιχη του γραμμικοποιημένου το πολύ κατά 22%, για την περίπτωση υπέρβασης των 8deg, και κατά 16% στα πλαίσια υπέρβασης των 9deg αντιστοίχως. Η οριακή γωνία, μετέπειτα της οποίας το γραμμικοποιημένο μοντέλο υποεκτιμά αρκετά τον αριθμό υπερβάσεων των γωνιών, λόγω των διαφυγών που λαμβάνουν χώρα στο μη γραμμικό σύστημα, είναι 15.8deg περίπου για το σενάριο ($H_s=8.5m, T_z=10.5s$) και 17.5deg για το σενάριο ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$). Στην κατάσταση φόρτωσης 27 και ειδικότερα στην περίπτωση του σεναρίου διέγερσης ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) (Σχήμα 5.36), όπου το μη γραμμικό προβλέπει μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης μέχρι και περίπου τις 20deg, η μέγιστη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των αντιτιθέμενων μοντέλων στο δεδομένο διάστημα είναι ίση με 43.8% και αντιστοιχεί στην υπέρβαση των 15deg (Πίνακας 5.16). Αυτή η διαφορά χαρακτηρίζεται ως αρκετά μεγάλη, καθώς η πιθανότητα υπέρβασης του μη γραμμικού μοντέλου λογίζεται κάτι λιγότερο από μιάμιση φορά της αντίστοιχης του γραμμικοποιημένου, γεγονός που δεν μπορεί να αμεληθεί σε καμία περίπτωση. Αυτή η μεγάλη τιμή οφείλεται αφενός στο έντονα μη γραμμικό σύστημα, κάτι που αποτυπώνεται και από το αντίστοιχο ιστόγραμμα με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης γωνιών μεσαίας κλίμακας, αφετέρου στις διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος. Την ίδια στιγμή, η πιθανότητα υπέρβασης των 25deg, που προέκυψε κατά το μη γραμμικό μοντέλο, υπολογίστηκε κατά 25% περίπου μεγαλύτερη της αντίστοιχης του γραμμικοποιημένου μοντέλου, μιας και ύστερα των 24.5deg το μη γραμμικό υπερτερεί στην πρόβλεψη πιθανοτήτων υπέρβασης λόγω τόσο των διαφυγών, 4 στη συγκεκριμένη περίπτωση, όσο και στην ελάττωση του αριθμού δεδομένων του γραμμικοποιημένου μοντέλου κατά την

πάροδο των γωνιών. Η επίδραση του σεναρίου ($H_s=8.5m, T_z=11.5s$) (Σχήμα 5.41) στην εν λόγω κατάσταση φόρτωσης δε θα φέρει ανατροπές/διαφυγές κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση. Αυτός είναι και ο λόγος που από τη γωνία 12deg περίπου και για γωνίες μεγαλύτερες, μέσω της γραμμικής μοντελοποίησης υπολογίζονται υψηλότερες πιθανότητες υπέρβασης με ολοένα και αυξανόμενη απόκλιση μεταξύ των δύο μοντέλων. Υπό την επίδραση του σεναρίου διέγερσης ($H_s=8.5m, T_z=13.5s$) (Σχήμα 5.46), παρατηρήθηκε στο διάστημα όπου το μη γραμμικό μοντέλο προβλέπει μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης πως η μέγιστη απόκλιση ήταν 30%, εντοπισμένη στις 12deg (Πίνακας 5.21). Παράλληλα, η πιθανότητα υπέρβασης, υπολογισμένη στα πλαίσια του μη γραμμικού συστήματος, στο διάστημα κατά το οποίο το γραμμικοποιημένο υπερεκτιμά τον αριθμό των υπερβάσεων γωνιών, βρέθηκε ίση με το 1/3 της αντίστοιχης του αντιτιθέμενου μοντέλου. Επιπλέον, κατά τη στατιστική μελέτη των επιδράσεων ανέμων και κυμάτων, που αντιπροσωπεύονται από μέση περίοδο $T_z=16.5s$ και σημαντικό ύψος κύματος $H_s=7.5m$, επί της κατάστασης φόρτωσης 31, η απόκλιση ανάμεσα στις πιθανότητες υπέρβασης, υπολογισμένες με τη χρήση των δύο μοντέλων στο διάστημα μεταξύ μικρών και μεσαίων γωνιών, καταγράφηκε μέγιστη στις 14deg ίση με 19.4% (Πίνακας 5.25, Σχήμα 5.57). Από τις 20deg μέχρι τις 30deg μέσω της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης προβλέπονται μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης, με τη ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα να μεγιστοποιείται κατά την υπέρβαση των 26deg λαμβάνοντας την τιμή -44%. Αυτό υποδηλώνει ότι η πιθανότητα υπέρβασης, υπολογισμένη μέσω του μη γραμμικού μοντέλου, είναι σχεδόν η μισή της αντίστοιχης του γραμμικοποιημένου. Εστιάζοντας στο διάστημα γωνιών από μικρού έως και μεσαίου μέτρου, η απόκλιση 43.8% που σημειώθηκε κατά την επίδραση του σεναρίου ($H_s=8.5m, T_z=16.5s$) στην κατάσταση φόρτωσης 27 αποτελεί και τη μεγαλύτερη από τις συναφείς των λοιπών περιπτώσεων και κατ' αυτόν τον τρόπο, εξαιρώντας την, θα μπορούσε να υποστηριχθεί, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι οι συχνότερες υπέρβασης υπολογισμένες βάσει του μη γραμμικού μοντέλου δεν εμφανίζονται αισθητά μεγαλύτερες των αντίστοιχων του γραμμικοποιημένου, μιας και δεν υπερβαίνεται το φράγμα του 20%, το οποίο αποτελεί σχετικά μικρή απόκλιση. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να αναιρέσει κάποιος αυτές τις αποκλίσεις ανάμεσά τους καθώς δε κρίνονται αμελητέες. Βέβαια, αν επικεντρωθεί κάποιος στο σενάριο ανατροπής του πλοίου και εν γένει στην υπέρβαση υψηλών γωνιών, η δεδομένη υπεροχή του μη γραμμικού μοντέλου στις μικρής και μεσαίας κλίμακας γωνίες δε παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον. Την ίδια ώρα, κατά την επενέργεια των σεναρίων ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$) (Σχήμα 5.16), ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$) (Σχήμα 5.27), ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) (Σχήμα 5.52) και ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) (Σχήμα 5.62) στις καταστάσεις φόρτωσης 18, 22 και 31 αντίστοιχα, υπολογίζονται μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης όλων των γωνιών διατοιχιστικής απόκρισης, δηλαδή οι αντίστοιχες καμπύλες των πιθανοτήτων υπέρβασης των δύο σημείων δεν έχουν κανένα σημείο τομής. Ειδικότερα, για τα σενάρια ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$) και ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$), ο κύριος λόγος της προαναφερόμενης συμπεριφοράς είναι ο μεγάλος αριθμός διαφυγών που έλαβαν χώρα, 10 και 14 αντίστοιχα, καθώς η στατιστική ανάλυση προς εξαγωγή ιστογραμμάτων και PDFs, χωρίς την ενσωμάτωσή τους (ενν. διαφυγών), οδηγεί σε μειωμένο αριθμό δεδομένων στην περιοχή των υψηλών γωνιών σε σχέση με το γραμμικοποιημένο μοντέλο, με αποτέλεσμα την αποκλειστικά φθίνουσα πορεία της αντίστοιχης καμπύλης(πιθανοτήτων υπερβάσεων) και τις συνεπαγόμενες αισθητά, κατά την πάροδο των γωνιών, μικρότερες τιμές αυτής. Μάλιστα, οι 14 διαφυγές υπό την επίδραση του σεναρίου ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) τη κατάσταση φόρτωσης αποτελούν και τις περισσότερες που σημειώθηκαν στα πλαίσια στατιστικής ανάλυσης όλων των περιπτώσεων που μελετήθηκαν. Αντίθετα, κατά τη στατιστική μελέτη των περιπτώσεων {LC18-($H_s=6.5m, T_z=9.5s$)} και {LC31-($H_s=7.5m, T_z=10.5s$)}, παρατηρήθηκε ότι ακόμη και χωρίς την προσμέτρηση των διαφυγών, κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση προκύπτουν μεγαλύτερες, όχι κατά πολύ ωστόσο, γωνίες διατοιχισμού και αυτό επαληθεύεται από τις μεγαλύτερες μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών σε σχέση με τη γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση (Πίνακας 5.8

και Πίνακας 5.26 αντίστοιχα). Αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη διαφυγών, και δη πολλών, όπως στην περίπτωση του σεναρίου ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) όπου υπήρξαν 10, οδηγεί σε υποεκτίμηση των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών από πλευράς γραμμικοποιημένου μοντέλου (Σχήμα 5.62). Μάλιστα, η απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων υπερβάσεων δύο μοντέλων λαμβάνει τεράστιες τιμές παρουσιάζοντας ταυτόχρονα αυξητική τάση κατά την πάροδο των γωνιών και στις δύο περιπτώσεις. Ειδικότερα στην περίπτωση $\{LC31-(H_s=7.5m, T_z=10.5s)\}$, ήδη, κατά την υπέρβαση των 8deg, η απόκλιση μεταξύ των δύο μοντελοποιήσεων λαμβάνει την τιμή 161% (Πίνακας 5.27). Τέλος, σημειώνεται ότι η υποεκτίμηση των πιθανοτήτων υπέρβασης των υψηλών/υψηλότερων γωνιών στα πλαίσια της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης λόγω της αμέλειας των διαφυγών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα μη γραμμικά συστήματα, μπορεί να οδηγήσει σε επικείμενη αστοχία της ακριβούς πρόβλεψης της διατοιχιστικής συμπεριφοράς του πλοίου και κατ' επέκταση σε λανθασμένες εκτιμήσεις του δείκτη ευπάθειας C του κριτήριου.

Loading Condition	Excitation Scenario ($H_s[m], T_z[s]$)	Maximum Percentage Divergence	Absolute roll angle (deg) [port&starboard]
Loadcase 18	(6.5m,14.5s)	19.59%	13deg
	(6.5m,15.5s)	12.34%	12deg
Loadcase 22	(8.5m,10.5s)	22.3%	8deg
	(8.5m,16.5s)	16.12%	9deg
Loadcase 27	(8.5m,11.5s)	20.33%	10deg
	(8.5m,13.5s)	30%	12deg
	(8.5m,16.5s)	43.8%	15deg
Loadcase 31	(7.5m,16.5s)	19.4%	14deg

Πίνακας 6.1: Μέγιστες ποσοστιαίες αποκλίσεις των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών των δύο μοντέλων κατά το πρώτο διάστημα «υπεροχής» του μη γραμμικού στην πρόβλεψή τους.⁵

Loading Condition	Excitation Scenario ($H_s[m], T_z[s]$)	Maximum Percentage Divergence	Absolute roll angle (deg) [port&starboard]
Loadcase 18	(6.5m,14.5s)	-82.66%	30deg
	(6.5m,15.5s)	-83.14%	32deg
Loadcase 22	(8.5m,10.5s)	-45%	15deg
	(8.5m,16.5s)	-16.62%	15deg
Loadcase 27	(8.5m,13.5s)	-66.64%	17deg
	(8.5m,16.5s)	-35.62%	23deg
Loadcase 31	(7.5m,16.5s)	-44.13%	26deg

Πίνακας 6.2: Μέγιστες ποσοστιαίες αποκλίσεις των πιθανοτήτων υπέρβασης γωνιών των δύο μοντέλων κατά το διάστημα υπερεκτίμησης των υπερβάσεων από πλευράς γραμμικοποιημένου.⁶

⁵ Εξαιρούνται τα σενάρια ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$), ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$), ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$), που επενεργούν στις καταστάσεις φόρτωσης 18, 22 και 31 αντίστοιχα, όπου παρατηρήθηκε περοχή του μη γραμμικού μοντέλου στην εκτίμηση των υπερβάσεων όλων των γωνιών απόκρισης. Το θετικό πρόσημο των ποσοστιαίων διαφορών είναι ενδεικτικό της υποεκτίμησης των υπερβάσεων από πλευράς γραμμικοποιημένου μοντέλου.

⁶ Εξαιρέσεις αποτελούν τα σενάρια ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$), ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$), ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$), που επενεργούν στις καταστάσεις φόρτωσης 18, 22 και 31 αντίστοιχα. Επίσης, από τον πίνακα εξαιρείται και η περίπτωση $\{LC27-(H_s=8.5m, T_z=11.5s)\}$, καθώς, δεδομένου της απουσίας διαφυγών, το γραμμικοποιημένο μοντέλο προβλέπει μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης γωνιών μεγαλύτερων των 12deg, η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων υπέρβασης ολόένα και αυξάνεται κατ' απόλυτη τιμή. Το αρνητικό πρόσημο των ποσοστιαίων διαφορών είναι ενδεικτικό της υπερεκτίμησης των υπερβάσεων από πλευράς γραμμικοποιημένου μοντέλου.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Κλείνοντας, καθίσταται σαφές ότι ο τρόπος κατά τον οποίο θα αποκριθεί ένα πλοίο είναι στενά συνυφασμένος με τις εσωτερικές του παραμέτρους, όπως είναι οι όροι απόσβεσης και επαναφοράς, στις οποίες υπάγονται έμμεσα οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της φόρτωσής του, καθώς και με τη διέγερσή του. Υπό το σενάριο “Deadship Condition” ριπές ανέμου και κυματισμοί διαδραματίζουν αμφότερα το ρόλο της διέγερσης, με αντιπροσωπευτικά μεγέθη την επιδρώσα κλίση κυματισμών και τη χρονικά μεταβαλλόμενη συνιστώσα ταχύτητας ανέμου αντίστοιχα. Στο παρόν έργο, μέσω στατιστικής ανάλυσης που επιχειρήθηκε, αναδείχθηκαν οι διαφορές πάνω στις στοχαστικές διεργασίες/διαδικασίες των αποκρίσεων μεταξύ της μη γραμμικής και της γραμμικοποιημένης μοντελοποίησης του προβλήματος. Στη μη γραμμική μοντελοποίηση οι όροι επαναφοράς εκφράστηκαν μέσω της σχετικής γωνίας διατοιχισμού. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη στατιστική ανάλυση προς εξαγωγή των PDFs, όπου αμελήθηκαν οι διαφυγές στα πλαίσια μη γραμμικής μοντελοποίησης, το ιστόγραμμα του μη γραμμικού μοντέλου απέκλινε άλλοτε αρκετά άλλοτε λίγο από το αντίστοιχο του γραμμικοποιημένου. Χαρακτηριστικά του γνωρίσματα ήταν οι αυξημένες συχνότητες εμφάνισης γωνιών μεσαίας κλίμακας και εν γένει απομακρυσμένων από τη μέση τιμή των δεδομένων από τη μία, και οι μειωμένες συχνότητες εμφάνισης αυτών κοντά στη γειτονιά της τελευταίας. Έτσι, κατά συνέπεια η σ’ αυτό εκτιμήτρια PDF Kernel, που παρεμβλήθηκε στα δεδομένα της μη γραμμικής μοντελοποίησης, διέφερε από την αντίστοιχη Γκαουσιανή, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη διακύμανση στο σύνολο των μελετούμενων περιπτώσεων. Επίσης, μόνο στις περιπτώσεις επίδρασης των σεναρίων διέγερσης ($H_s=6.5m, T_z=9.5s$) (Σχήμα 5.15) και ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) (Σχήμα 5.61) στις καταστάσεις φόρτωσης 18 και 31 αντίστοιχα, η μη γραμμική μοντελοποίηση απέδωσε υψηλότερες γωνίες διατοιχισμού, από το σύνολο των στατιστικώς επεξεργασμένων δεδομένων, σε σχέση με τη γραμμική. Αυτό τεκμηριώνεται από τις μεγαλύτερες, όχι κατά πολύ ωστόσο, μέσες τιμές των 100 και 10 υψηλότερων γωνιών της μη γραμμικής έναντι της γραμμικής μοντελοποίησης (Πίνακας 5.8, Πίνακας 5.26). Αυτό αποτελεί και ένα «παράδοξο», καθώς αναμένονται ελαττώμενες υψηλές γωνίες διατοιχισμού στα πλαίσια του μη γραμμικού μοντέλου λόγω της δράσης των μη γραμμικών όρων απόσβεσης καθώς και επαναφοράς. Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφυγές του μη γραμμικού συστήματος στις προγενέστερες δύο περιπτώσεις διέγερσης, οι πιθανότητες υπέρβασης υπολογίστηκαν μεγαλύτερες κατά τη μη γραμμική μοντελοποίηση καθ’ όλο το φάσμα γωνιών, με την ποσοστιαία απόκλιση σε σχέση με τις αντίστοιχες της γραμμικοποιημένης, ακολουθώντας αύξουσα πορεία, να λαμβάνει τεραστίων διαστάσεων τιμές (Σχήμα 5.16, Σχήμα 5.62). Αυτό συνέβη με εμφαντικό τρόπο στην περίπτωση διέγερσης του σεναρίου ($H_s=7.5m, T_z=10.5s$) επί της κατάστασης φόρτωσης 31 λόγω του μεγάλου αριθμού διαφυγών, συγκεκριμένα 10, που έλαβαν χώρα. Επίσης, εξαιτίας της ενσωμάτωσης των διαφυγών και μόνο, κατά τη μελέτη των περιπτώσεων επενέργειας των σεναρίων ($H_s=8.5m, T_z=12.5s$) (Σχήμα 5.22) και ($H_s=7.5m, T_z=13.5s$) (Σχήμα 5.52) στις καταστάσεις φόρτωσης 22 και 31 αντίστοιχα, προέκυψαν και μεγαλύτερες πιθανότητες υπέρβασης όλων των γωνιών κατά τη μοντελοποίηση του μη γραμμικού συστήματος. Στις υπόλοιπες 8 περιπτώσεις, το μη γραμμικό μοντέλο προβλέπει υψηλότερες πιθανότητες υπέρβασης στην περιοχή από μικρής έως και σχετικά υψηλής κλίμακας γωνιών και, εκτός της περίπτωσης {LC27-($H_s=8.5m, T_z=11.5s$)} (Σχήμα 5.41) όπου δε σημειώθηκαν διαφυγές, στην περιοχή των υψηλότερων γωνιών, ειδικότερα έπειτα από μια αρκετά υψηλή γωνία διατοιχισμού που διαφέρει ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Από την άλλη, το γραμμικοποιημένο μοντέλο υπερεκτιμά τις υπέρβασεις στην περιοχή γωνιών από μεσαίου έως και υψηλού μέτρου, ειδικότερα μέχρι τη γωνία όπου από εκεί και ύστερα «υπερέχει» στην πρόβλεψη των αντίστοιχων πιθανοτήτων το μη γραμμικό. Αξιοσημείωτο αναφοράς καθίσταται το γεγονός ότι κατά τη διενέργεια 15000 προσομοιώσεων της γραμμικής εξίσωσης διατοιχισμού υπό την επίδραση του σεναρίου διέγερσης

($H_s=6.5m, T_z=15.5s$) στην κατάσταση φόρτωσης 18 σημειώθηκαν σε 21 απ' αυτές υπερβάσεις της οριακής γωνίας φ_{EA} . Επίσης, υπό την δεδομένη κατάσταση φόρτωσης, ο δείκτης του κριτηρίου C βρέθηκε μεγαλύτερος μεταξύ των αντίστοιχων των υπόλοιπων καταστάσεων, προσεγγίζοντας, συγχρόνως, αρκετά την οριακή τιμή του κριτηρίου. Συμπεραίνεται, εδώ, πως αν κάποιος επικεντρωθεί στο τρόπο απόκρισης του πλοίου και γενικότερα στη διατοιχιστική του συμπεριφορά, η γραμμικοποίηση των όρων επαναφοράς και απόσβεσης δε κρίνεται ορθή λόγω αφενός της υπερεκτίμηση των συχνοτήτων εμφάνισης γωνιών γύρω από τη μέση τιμή των δεδομένων η οποία αντιστοιχεί στη μέση γωνία ισορροπίας, αφετέρου της υποεκτίμησης των συχνοτήτων εμφάνισης μεγαλύτερων γωνιών και ειδικότερα γωνιών μεσαίας κλίμακας. Παράλληλα, εάν επικεντρωθεί κανείς στο σενάριο ανατροπής του πλοίου και, εν γένει, σε σενάρια δυσμενή για την ευστάθεια, η προσμέτρηση των διαφυγών του μη γραμμικού συστήματος οδηγεί στην πρόβλεψη μεγαλύτερων πιθανοτήτων υπέρβασης των υψηλότερων, κυρίως, γωνιών, όπως π.χ. της οριακής γωνίας φ_{EA} , σε σχέση με το γραμμικοποιημένο μοντέλο. Έτσι, η γραμμικοποιημένη μοντελοποίηση υποεκτιμά επικίνδυνες καταστάσεις αμελώντας ταυτόχρονα τις περιπτώσεις ανατροπής που συμβαίνουν στην πραγματικότητα μέσα στα πλαίσια της, εκ φύσεως, μη γραμμικότητας. Ολοκληρώνοντας, όπως έγινε αντιληπτό, το παρόν πρόβλημα καθίσταται μείζονος σημασίας τόσο για την απόκριση αυτή καθ' αυτή όσο και για την ίδια τη ζωή του πλοίου. Ωστόσο, παρόλα τα ευρήματα και τα πορίσματα που τέθηκαν και αποκαλύφθηκαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου, κρίνεται αδιαμφισβήτητα αναγκαίο να συνεχιστούν σε βάθος χρόνου οι διεξοδικές στατιστικές αναλύσεις και συγχρόνως αξιολογήσεις με απώτερο σκοπό την περαιτέρω βελτιστοποίηση του δεδομένου κριτηρίου και κατά συνέπεια την ακρίβεια στον υπολογισμό του συναφή δείκτη ευπάθειας C.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Παράλληλα, πέραν του θέματος περί εγγενών, του κριτηρίου, γραμμικοποιήσεων που λαμβάνουν χώρα, οι οποίες μελετήθηκαν και κατόπιν αξιολογήθηκαν, έντονο ενδιαφέρον και προβληματισμό παρουσιάζουν, μεταξύ άλλων, τόσο η μοντελοποίηση του κριτηρίου με βάση τη σχετική και όχι την απόλυτη γωνία διατοιχισμού όσο και η αξιοπιστία της μεθόδου υπολογισμού της συνάρτησης επιδρώσας κλίσης κυματισμών λόγω ορισμένων θεωρήσεων, η οποία αναγράφεται και στο Παράρτημα Β, θέματα τα οποία δε συγκαταλέχθηκαν στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Παροτρύνεται, παρ' όλα αυτά, να μελετηθούν και να αξιολογηθούν μελλοντικά καθώς παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον όσον αφορά στην πρόβλεψη της διατοιχιστικής συμπεριφοράς και γενικότερα στην ευστάθεια του πλοίου κάτω από το σενάριο "Deadship Condition failure mode".

Βιβλιογραφία

- [1] Belenky, V. L., Degtyarev, A. B., & Boukhanovsky, A. V. (1996). Probabilistic Qualities of Nonlinear Stochastic Rolling. *Ocean Engineering*.
- [2] Bulian, G., & Francescutto, A. (2011). Effect of roll modelling in beam waves under multi-frequency excitation. *Ocean Engineering*.
- [3] Choi, J., Jensen, J., Kristensen, H., Nielsen, U., & Erichsen, H. (2017). Intact stability analysis of dead ship conditions using FORM. *Journal of Ship Research*.
- [4] IACS. (2011). Standard Wave Data Recommendation No.34.
- [5] IMO - SDC 8/5/Add.2- Appendices. (2021). DEVELOPMENT OF EXPLANATORY NOTES TO THE INTERIM GUIDELINES ON SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA-Appendix 1,2,3. *IMO*, (pp. 55-57).
- [6] IMO-SDC 8/5. (2021). DEVELOPMENT OF EXPLANATORY NOTES TO THE INTERIM GUIDELINES ON SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA-Physical Background and mathematical models for stability failures of SGISC. *IMO*.
- [7] IMO. (2006). Weather Criterion. Retrieved 2009b
- [8] IMO- SDC 7/WP.6. (2020). FINALIZATION OF SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA., (pp. 12-21).
- [9] M.Taylan. (1998). The effect of nonlinear damping and restoring in ship rolling. *Ocean Engineering*.
- [10] Remola, A. O. (2018). *On Ship Roll Damping: Analysis and Contributions on Experimental Techniques*.
- [11] Su, Z. (2012). NONLINEAR RESPONSE AND STABILITY ANALYSIS OF VESSEL ROLLING MOTION IN RANDOM WAVES USING STOCHASTIC DYNAMICAL SYSTEMS. *Ocean Engineering*.
- [12] Vassalos, D., Jasionwski, A., & Cichowicz, J. (2003). Weather Criterion-Questions and Answers. *8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*. Universities of Glasgow and Strathclyde.
- [13] Wei Chai, Arvid Naess, & Bernt J. Leira. (2015). Stochastic Dynamic Analysis and Reliability of a Vessel Rolling in Random Beam Seas. *Journal of Ship Research*.
- [14] Zhenwang, Kun, & Xinmeng. (2016, April). Vulnerability assessment fod dead-ship stability failure mode of the damaged warship. *CHINESE JOURNAL OF SHIP REASEARCH, Vol.11, NO.2*.
- [15] Αθανασούλης, Γ. Α. (2007). *Θεωρία Πιθανοτήτων & Στατιστική - Εφαρμογές στο Θαλάσσιο Περιβάλλον*. Αθήνα.
- [16] Σπύρου, Κ. (2015). *Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου*. Αθήνα: Κάλλιπος.

Παράρτημα

A. Επικύρωση (Verification) γραμμικοποιημένης εξίσωσης διατοιχισμού

Σύμφωνα με το νόμο του Νεύτωνα και γράφοντας τους όρους επαναφοράς και απόσβεσης με τη σχετική γωνία διατοιχισμού φ_{rel} , η εξίσωση περιστροφικής κίνησης διατοιχισμού υπό την επίδραση ανέμου διατυπώνεται ως εξής :

$$I\ddot{\varphi}_{abs} = -M_D(\dot{\varphi}_{rel}) - M_R(\varphi_{rel}) - \delta I\ddot{\varphi}_{rel} + \bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t) \quad (A.1)$$

(Σπύρου, 2015) [16],

όπου :

- I : η ροπή αδράνειας «στεγνού» πλοίου σε διατοιχισμό ως προς τον διαμήκη άξονά του
- δI : η πρόσθετη υδροδυναμικής φύσεως ροπή αδράνειας
- $M_D(\dot{\varphi}_{rel})$: η ροπή απόσβεσης
- $M_R(\varphi_{rel})$: η ροπή επαναφοράς
- φ_{abs} : η απόλυτη γωνία διατοιχισμού
- φ_{rel} : η σχετική γωνία διατοιχισμού
- $\bar{M}_{wind,tot}$: η μέση ροπή διέγερσης ανέμου
- $\delta M_{wind,tot}(t)$: η χρονικά μεταβαλλόμενη ροπή ανέμου

Απαλοίφοντας τη σχετική γωνία διατοιχισμού σύμφωνα με την σχέση $\varphi_{abs} = \varphi_{rel} + a_{eff}$ και θεωρώντας γραμμική έκφραση των ροπών απόσβεσης και επαναφοράς, η παραπάνω σχέση τροποποιείται ως εξής :

$$(I + \delta I)\ddot{\varphi}_{abs} + b_1\dot{\varphi}_{abs} + \Delta gGM(\varphi_{abs} - a_{eff}) = \delta I\ddot{a}_{eff} + b_1\dot{a}_{eff} + \bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t) \quad (A.2)$$

Διαιρώντας με την ολική αδράνεια διατοιχισμού $(I + \delta I)$ προκύπτει ότι :

$$\ddot{\varphi}_{abs} + \frac{b_1}{I + \delta I}\dot{\varphi}_{abs} + \frac{g\Delta GM}{I + \delta I}(\varphi_{abs} - a_{eff}) = \frac{\delta I}{I + \delta I}\ddot{a}_{eff} + \frac{b_1}{I + \delta I}\dot{a}_{eff} + \frac{1}{I + \delta I}(\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (A.3)$$

Αντικαθιστώντας την ιδιοσυχνότητα του πλοίου από τον τύπο $\omega_o = \sqrt{\frac{\Delta gGM}{I + \delta I}}$, η (A.3) γίνεται:

$$\ddot{\varphi}_{abs} + \frac{b_1}{I + \delta I}\dot{\varphi}_{abs} + \omega_o^2(\varphi_{abs} - a_{eff}) = \frac{\delta I}{I + \delta I}\ddot{a}_{eff} + \frac{b_1}{I + \delta I}\dot{a}_{eff} + \frac{\omega_o^2}{\Delta gGM}(\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (A.4)$$

όπου :

- $\frac{\delta I}{I+\delta I} \ddot{a}_{eff} = -\frac{\delta I}{I+\delta I} \sum_{i=1}^{N_1} \omega_i^2 A_i \kappa_i r(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varepsilon_{i\kappa}) =$
 $-\frac{\delta I}{I+\delta I} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\omega_i^4}{g} A_i r(\omega_i) \cos(\omega_i t + \varepsilon_{i\kappa})$ είναι αμελητέος όρος, καθώς το $\frac{\delta I}{I+\delta I}$ είναι της τάξης του 10^{-1} , το $\frac{\omega_i^4}{g}$ είναι της τάξης του 10^{-5} και τέλος ο συντελεστής επιδρώσας κλίσης κύματος $r(\omega_i)$ και το πλάτος της συνιστώσας A_i είναι της τάξης του 10^{-1} . Άρα, συνολικά, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι αρμονικές συνιστώσες i προστίθενται για να δώσουν την συνολική επιδρώσα κλίση κύματος με διαφορετικές φάσεις, οι οποίες ακολουθούν διακριτή ομοιόμορφη κατανομή στο $[0, 2\pi)$, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο τελικά, στη χειρίστη περίπτωση, ο όρος $\frac{\delta I}{I+\delta I} \ddot{a}_{eff}$ είναι της περιόδου της τάξης $10^{-6} - 10^{-7}$ και γι' αυτό μπορεί να αμεληθεί.
- $\frac{b_1}{I+\delta I} \dot{a}_{eff} = \frac{b_1}{I+\delta I} \sum_{i=1}^{N_1} \omega_i A_i \kappa_i r(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varepsilon_{i\kappa}) = \frac{b_1}{I+\delta I} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{\omega_i^3}{g} A_i r(\omega_i) \sin(\omega_i t + \varepsilon_{i\kappa})$ καθίσταται επίσης αμελητέος όρος εφόσον το $\frac{b_1}{I+\delta I}$ λαμβάνει τιμές της τάξης του $10^{-3} - 10^{-2}$, το $\frac{\omega_i^3}{g}$ είναι της τάξης του 10^{-4} περίπου και, όπως και προγενέστερα αναφέρθηκε, ο συντελεστής επιδρώσας κλίσης κύματος $r(\omega_i)$ και το πλάτος της συνιστώσας A_i είναι της τάξης του 10^{-1} . Επομένως, ο όρος $\frac{b_1}{I+\delta I} \dot{a}_{eff}$ δε μπορεί να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές της τάξης του 10^{-7} και επομένως αμελείται η επίδρασή του.

Έτσι, η εξίσωση (Α . 4) παίρνει την ακόλουθη μορφή :

$$\ddot{\varphi}_{abs} + \frac{b_1}{I+\delta I} \dot{\varphi}_{abs} + \omega_o^2 (\varphi_{abs} - a_{eff}) = \frac{\omega_o^2}{g\Delta GM} (\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (\text{Α . 5})$$

Αντικαθιστώντας $b_{eq} = \frac{b_1}{I+\delta I}$ στην (Α . 5) λαμβάνεται η παρακάτω γραμμική εξίσωση διατοιχισμού :

$$\ddot{\varphi}_{abs} + b_{eq} \dot{\varphi}_{abs} + \omega_o^2 \varphi_{abs} = \omega_o^2 a_{eff} + \frac{\omega_o^2}{g\Delta GM} (\bar{M}_{wind,tot} + \delta M_{wind,tot}(t)) \quad (\text{Α . 6})$$

Παρατηρώντας τις εξισώσεις (3.2.2.9) και (Α.7) διαπιστώνεται ότι είναι σχεδόν ταυτόσημες, διαφέροντας μόνο στο συντελεστή απόσβεσης, καθώς τη στιγμή που στο γραμμικοποιημένο πρόβλημα (3.2.2.9) χρησιμοποιείται ο ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης $\mu_e(\sigma_{\dot{x}})$, στο παρόν γραμμικό (Α.8) τη θέση του γραμμικού όρου απόσβεσης καταλαμβάνει το $b_{eq} = 2\zeta\omega_o$ όπου ζ ο λόγος απόσβεσης. Η παραπάνω διαδικασία, που υλοποιήθηκε προς απόδειξη περί ταύτισης-γεινίασης των εξισώσεων (3.2.2.9) και (Α.9), λογίζεται ως μέθοδος επικύρωσης του γραμμικοποιημένου μοντέλου που χρησιμοποιείται στο κριτήριο δεύτερης γενιάς “Level 2 Deadship Condition failure mode”.

**B. Μεθοδολογία για την εκτίμηση της συνάρτησης επιδρώσας κλίσης κύματος -
Standard methodology for the estimation of the effective wave slope function
(IMO - SDC 8/5/Add.2- Appendices, 2021)[5]**

Η μεθοδολογία, που παρουσιάζεται εδώ, κρίνεται αναγκαίο να ακολουθηθεί στην περίπτωση απουσίας λεπτομερών πληροφοριών, οι οποίες λαμβάνονται από πειραματικές δοκιμές, για τον υπολογισμό της συνάρτησης επίδρωσας κλίσης κυματισμού. Η δεδομένη μεθοδολογία βρίσκει εφαρμογή μόνο σε μονόγαστρα πλοία και βασίζεται στις παρακάτω υποθέσεις :

1. Το βρεχόμενο τμήμα της εκάστοτε εγκάρσιας τομής του πλοίου αντικαθίσταται από μία «ισοδύναμη βρεχόμενη εγκάρσια τομή» έχοντας, εν γένει, ίδιο πλάτος στη περιοχή της ισάλου και κοινή βρεχόμενη επιφάνεια με την αρχική τομή. Επομένως :
 - εγκάρσιες τομές οι οποίες έχουν μηδενικό πλάτος στην ίσαλο, όπως αυτές στην περιοχή του βολβού, κρίνονται αμελητέες.
 - το βύθισμα της «ισοδύναμης βρεχόμενης εγκάρσιας τομής» οριοθετείται από το βύθισμα του πλοίου της εκάστοτε τομής.
2. Ο συντελεστής/συνάρτηση επιδρώσας κλίσης κυματισμού για κάθε συχνότητα κυματισμών καθορίζεται χρησιμοποιώντας την υπόθεση της «ισοδύναμης βρεχόμενης εγκάρσιας τομής» λογίζοντας μόνο το άθικτο/αδιατάραχο και γραμμικό πεδίο πιέσεων λόγω κυματισμών.
3. Για κάθε εγκάρσια τομή, εφαρμόζεται μία φόρμουλα/μέθοδος υπολογισμού εφαρμόζεται, η οποία καθίσταται ακριβής για ορθογωνικές διατομές.

Για κάθε διαμήκη θέση x του πλοίου, το βύθισμα $T_{eq}(x)$ (m), το πλάτος $B_{eq}(x)$ (m) και η βρεχόμενη εγκάρσια επιφάνεια $A_{eq}(x)$ (m^2) του «ισοδύναμου πλοίου» υπολίζονται ως εξής :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } A(x) > 0 \text{ and } B(x) > 0: \\ \quad \text{if } \frac{A(x)}{B(x)} \leq T(x) \text{ then } \begin{cases} A_{eq}(x) = A(x) \\ B_{eq}(x) = B(x) \\ T_{eq}(x) = \frac{A(x)}{B(x)} \end{cases} \\ \quad \text{if } \frac{A(x)}{B(x)} > T(x) \text{ then } \begin{cases} T_{eq}(x) = T(x) \\ B_{eq}(x) = B(x) \\ A_{eq}(x) = B_{eq}(x) \cdot T_{eq}(x) \end{cases} \\ \text{otherwise: } \begin{cases} A_{eq}(x) = 0 \\ B_{eq}(x) = 0 \\ T_{eq}(x) = 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (B.1)$$

όπου $A(x)$ (m^2), $B(x)$ (m) and $T(x)$ (m) είναι, αντιστοίχως, η βρεχόμενη εγκάρσια επιφάνεια, το πλάτος της εγκάρσιας τομής x στην ίσαλο και το βύθισμα του πλοίου στη δεδομένη εγκάρσια τομή x .

Ο βρεχόμενος όγκος ∇_{eq} (m^3), η εγκάρσια μετακεντρική ακτίνα $BM_{T,eq}$ (m), η κατακόρυφη θέση του κέντρου άντωσης KB_{eq} (m) και η κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους KG_{eq} (m) του «ισοδύναμου σκάφους» υπολογίζονται ως εξής ::

$$\nabla_{eq} = \int_L A_{eq}(x) dx \quad (B.2)$$

$$BM_{T,eq} = \frac{1}{\nabla_{eq}} \cdot \int_L \frac{1}{12} \cdot B_{eq}^3(x) dx \quad (B.3)$$

$$KB_{eq} = T + \frac{1}{\nabla_{eq}} \cdot \int_L \frac{-T_{eq}(x)}{2} \cdot A_{eq}(x) dx \quad (B.4)$$

$$KG_{eq} = KB_{eq} + BM_{T,eq} - GM \quad (B.5)$$

όπου GM (m) το αρχικό μετακεντρικό ύψος.

Έτσι, ο συντελεστής επιδράσας κλίσης κυματισμού υπολογίζεται ως συνάρτηση της συχνότητας κυματισμού όπως ακολούθως :

$$r(\omega) = \left| \frac{\int_L C(x) dx}{\nabla_{eq} \cdot GM} \right| \quad (B.6)$$

όπου

$$C(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } A_{eq}(x) = 0 \text{ and } B_{eq}(x) = 0 \\ A_{eq}(x) \cdot [K_1(x) + K_2(x) + F_1(x) \cdot OG_{eq}] & \end{cases} \quad (B.7)$$

και

$$k_w = \frac{\omega^2}{g}, OG_{eq} = KG_{eq} - T \quad (B.8)$$

$$K_1(x) = \frac{\sin\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}{\left(\frac{k_w \cdot B_{eq}(x)}{2}\right)} \cdot \frac{(1 + k_w \cdot T_{eq}(x)) \cdot e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)} - 1}{k_w^2 \cdot T_{eq}} \quad (B.9)$$

$$K_2(x) = -\frac{e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)}}{k_w^2 \cdot T_{eq}} \cdot \left[\cos\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right) - \frac{\sin\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}{\left(\frac{k_w \cdot B_{eq}(x)}{2}\right)} \right] \quad (B.10)$$

$$F_1(x) = -\frac{1 - e^{-k_w \cdot T_{eq}(x)}}{k_w \cdot T_{eq}(x)} \cdot \frac{\sin\left(k_w \cdot \frac{B_{eq}(x)}{2}\right)}{\left(\frac{k_w \cdot B_{eq}(x)}{2}\right)} \quad (B.11)$$

C. Μεθοδολογία εύρεσης συντελεστές απόσβεσης διατοιχισμού - Roll Damping Coefficients (IMO - SDC 8/5/Add.2- Appendices, 2021)[5]

Ο γραμμικός, τετραγωνικός και κυβικός συντελεστής απόσβεσης διατοιχισμού, μ , β , δ , αντίστοιχα, μπορούν να καθοριστούν από τον ισοδύναμο γραμμικό συντελεστή απόσβεσης $B_{44}(\varphi_\alpha) \left[\frac{Nm}{s} \right]$, ο οποίος προκύπτει από την απλοποιημένη μέθοδο του Ikeda (*simplified Ikeda's method*), μέσω παρεμβολής με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για διάφορα πλάτη διατοιχισμού φ_α ή ισοδύναμα:

$$\frac{B_{44}(\varphi_\alpha) \cdot \omega_0^2}{2 \cdot W \cdot GM} \rightarrow \mu + \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \beta \cdot \omega_0 \cdot \varphi_\alpha + \frac{3}{8} \cdot \delta \cdot \omega_0^2 \cdot \varphi_\alpha^2 \quad (C.1)$$

Όπου ω_0 (rad/s) είναι η ιδιοσυχνότητα, $W(N)$ είναι το βάρος του πλοίου και GM το μετακεντρικό ύψος. Η εξίσωση (C.1) έχει προκύψει υποθέτοντας ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ του μη γραμμικού μοντέλου απόσβεσης και του ισοδύναμου μοντέλου απόσβεσης της μεθόδου του Ikeda.

D. Μη παραμετρική κατανομή Kernel

Η κατανομή Kernel είναι μία μη παραμετρική αναπαράσταση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (PDF) μιας τυχαίας μεταβλητής. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εν γένει, όταν μια παραμετρική κατανομή δεν μπορεί να περιγράψει τα δεδομένα είτε όταν κρίνεται επιθυμητό να αποφευχθούν οι υποθέσεις που αφορούν το ποιά κατανομή παρεμβάλλει καταλληλότερα τα δεδομένα. Καθορίζεται από μια συνάρτηση εξομάλυνσης (smoothing function) και ένα εύρος τιμών (bandwidth), τα οποία ελέγχουν την «λειότητα» της προκύπτουσας καμπύλης πυκνότητας.

Η εκτιμήτρια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Kernel (Kernel density estimator) για πραγματικές τιμές τυχαία μεταβλητής x δίνεται από τον τύπο :

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right), \quad (D.1)$$

Όπου x_1, x_2, \dots, x_n είναι τα δεδομένα από μια άγνωστη κατανομή, n είναι το πλήθος τους, $K(\cdot)$ είναι η συνάρτηση εξομάλυνσης και h είναι το εύρος τιμών.