



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Fax 210-7723565

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση της Δυνατότητας Ελέγχου Φορτίων και Κινήσεων Πλωτών Ανεμογεννητριών με Χρήση Πτερυγίων Κατάλληλα Προσαρμοσμένων στον Πλωτήρα»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Γεώργιου Τερζάκη

Επιβλέπων

Βασίλειος Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ – Τομέας Ρευστών



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Fax 210-7723565

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Διερεύνηση της Δυνατότητας Ελέγχου Φορτίων
και Κινήσεων Πλωτών Ανεμογεννητριών με Χρήση Πτερυγίων
Κατάλληλα Προσαρμοσμένων στον Πλωτήρα»

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Γεώργιου Τερζάκη

Επιβλέπων

Βασίλειος Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
ΕΜΠ – Τομέας Ρευστών

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21/10/2020

.....
Βασίλειος Ριζιώτης
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Τερζάκης, 2020.

All rights reserved

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Βασίλειο Ριζιώτη για την συνεχή υποστήριξη που μου παρείχε για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Η καθοδήγηση του, τόσο πριν όσο και κατά την διάρκεια της περιόδου της πανδημίας, ήταν καθοριστικής σημασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Σπυρόπουλο για την προθυμία του να με βοηθήσει σε όποιο πρόβλημα αντιμετώπισα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου και κυρίως στην οικογένεια μου που με στηρίζει αδιάκοπα όλα αυτά τα χρόνια. Χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει τίποτα.

*“Στην μνήμη του παππού μου,
Βαγγέλη.”*

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	Διερεύνηση της Δυνατότητας Ελέγχου Φορτίων και Κινήσεων Πλωτών Ανεμογεννητριών με Χρήση Πτερυγίων Κατάλληλα Προσαρμοσμένων στον Πλωτήρα
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Γεώργιος Τερζάκης
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Βασίλειος Ριζιώτης, Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών – Τομέας Ρευστών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2020

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν αρχικά η μοντελοποίηση διαφόρων διατάξεων πτερυγίων, τοποθετημένων κάθετα στον άξονα συμμετρίας ενός πλωτήρα, και μετέπειτα η εξέταση της συμβολής τους στην δυναμική συμπεριφορά μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Η προσομοίωση της συμβολής των πτερυγίων πραγματοποιήθηκε σε ένα απλουστευμένο μοντέλο ROM (Reduced Order Model) και στο εμπλουτισμένο μοντέλο hGAST. Ως σημεία αναφοράς, ορίστηκαν πρωτίστως οι τρεις στροφές του πλωτού συστήματος, δηλαδή η περιστροφή (roll), πρόνευση (pitch), γωνιακή απόκλιση (yaw), και δευτερευόντως οι τρεις μετακινήσεις, δηλαδή η ταλάντευση εμπρός – πίσω (surge), πλευρική ταλάντευση (sway), ταλάντευση πάνω κάτω (heave).

Για τον ακριβή υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης και άνωσης του κάθε πτερυγίου, χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός εξισώσεων έτσι ώστε να περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πτερυγίου. Έτσι, υπολογίζονται οι παραγόμενες δυνάμεις του κάθε πτερυγίου και εισάγονται στην εξίσωση Morison.

Η πειραματική δοκιμή διατάξεων πτερυγίων ικανών να συμβάλουν στην βελτίωση της ευστάθειας του πλωτού συστήματος, πραγματοποιήθηκε αρχικά μέσω του μοντέλου ROM, το οποίο αποδίδει αποτελέσματα με μικρό υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο, λόγω του ότι το μοντέλο αυτό επιλύει το πρόβλημα προσεγγιστικά, η ολοκληρωμένη συμπεριφορά του πλωτού συστήματος πραγματοποιήθηκε μέσω του μοντέλου hGAST. Η διαφορά με το μοντέλο ROM, έγκειται στο γεγονός ότι το hGAST περιέχει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και λαμβάνει υπόψιν τη μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος.

Συνολικά επιλέχθηκαν 4 διατάξεις πτερυγίων (2×2 και 2×4) οι οποίες είναι ικανές να συμβάλουν στην μείωση των ταλαντώσεων της πλωτής Α/Γ παρουσιάζοντας όμως και μικρές διαστάσεις σε σύγκριση με το μέγεθος του συστήματος. Για την επίτευξη υψηλής δύναμης αντίστασης, επιλέχθηκε συγκεκριμένη και σταθερή γωνία ελέγχου για το εκάστοτε πτερύγιο, έτσι ώστε η γωνία προσβολής να κυμαίνεται κοντά στις 90° .

Η συμπεριφορά της πλωτής Α/Γ δοκιμάστηκε σε διάφορες περιπτώσεις ανέμου και κύματος, μερικές από τις οποίες παρουσίαζαν ακραίες μεταβολές, με σκοπό να εκτιμηθεί κατά πόσο ουσιαστική είναι η συμβολή των διατάξεων στην μείωση των κινήσεων και ταλαντώσεων.

POST-GRADUATE THESIS: **Researching the Ability to Control Loads and Movements of Floating Wind Turbines Using Plates Adapted to the Floater**

STUDENT: **Georgios Terzakis**

SUPERVISOR: **Vasileios Riziotis, Assistant Professor, School of Mechanical Engineering NTUA – Section of Fluids**

ACADEMIC YEAR: **2020**

Summary

The purpose of this diploma thesis was initially to model various plates, mounted on the axial plane of floater, as well as, to examine their contribution to the dynamic behavior of a floater wind turbine. At the beginning, the plate contribution was simulated to a Reduced Order Model (ROM) and following, to an enriched model called hGAST (Hydrodynamic General Aerodynamic and Structural Tool). The reference point of examination was mainly the 3 angles of floater, and more specifically the roll, pitch and yaw and secondly the 3 motions, especially the surge, sway and heave.

To accurately calculate the coefficient of Drag and Lift for each plate, a combination of equations were used for simulating the hydrodynamic contribution of each plate to be included in the result. Therefore, the Drag and Lift forces of each plate are calculated and they are added to Morison equation.

Furthermore, in order to find the dimensions of the plates that are consistent with the float system size and can improve the stability of the system, the first point was to use the ROM model which was able to provide results in short time. However, due to the fact that this model solves the problem approximately, the integrated behavior of the floating system was confirmed using the more advanced hGAST model. The difference is, that hGAST consists of more degrees of freedom and takes into account linear terms.

To summarize, a total of 4 plate's cases were selected (2×2 and 2×4), which were able to reduce the body movements of an existing floating wind turbine. For achieving a high Drag force, a fixed control angle was selected for each plate, so that the angle of attack would fluctuate around at 90° .

The behavior of the floating system, was tested in various wind and wave cases, some of which were presented with extreme alteration, in order to estimate whether the contribution of plates improved or not the stability of the system.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Τεχνολογίες πλωτών Ανεμογεννητριών	3
1.3 Σκοπός της εργασίας.....	4
1.4 Δομή της εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2	7
2.1 Υπολογισμός υδροδυναμικών φορτίων του πλωτήρα με χρήση της εξίσωσης Morison	7
2.2 Προσαρμογή εξίσωσης Morison στην περίπτωση των πλωτών πτερυγίων.....	9
2.2.1 Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης πτερυγίου	9
2.2.2 Υπολογισμός συντελεστή άνωσης πτερυγίου	13
Κεφάλαιο 3	17
3.1 Μοντέλο ROM.....	17
3.1.1 Δυναμικές εξισώσεις συστήματος	19
3.2 Λογισμικό HydroGast.....	24
3.2.1 Αεροδυναμικό πρότυπο.....	25
3.2.2 Ελαστικό πρότυπο.....	26
3.2.3 Δυναμικό πρότυπο.....	28
3.2.4 Υδροδυναμικό πρότυπο.....	30
3.2.5 Πρότυπο Αγκύρωσης	31
3.2.6 Σύνθεση των προτύπων για το συζευγμένο σύστημα.....	31
Κεφάλαιο 4	33
4.1 Χαρακτηριστικά υπεράκτιας πλωτής Ανεμογεννήτριας.....	33
4.2 Μοντέλο πτερυγίων πλωτήρα	35
4.3 Ορισμός διατάξεων πτερυγίων του πλωτήρα	39
Κεφάλαιο 5	43
5.1 Προσομοίωση συμβολής των πτερυγίων με χρήση μοντέλου hGAST	43
5.1.1 Στοχαστικός άνεμος – Κύμα τύπου JONSWAP	46
5.1.2 Άνεμος τύπου EDC – Κύμα τύπου JONSWAP.....	52
5.1.3 Άνεμος τύπου EOG – Κύμα τύπου JONSWAP	56
5.1.4 Στοχαστικός άνεμος – Κύμα τύπου JONSWAP με ακραίες τιμές (SSS).....	59
5.1.5 Άνεμος τύπου ETM – Κύμα τύπου JONSWAP με ακραίες τιμές (SSS)	61

5.1.6 Σταθερός άνεμος – Χωρίς κύμα.....	65
5.1.7 Συμβολή των γραμμών αγκυρώσεων	68
5.2 Προσομοίωση συμβολής των πτερυγίων με χρήση μοντέλου ROM.....	72
5.2.1 Σταθερός άνεμος – Χωρίς κύμα.....	72
5.3 Αριθμητική σύγκριση μοντέλων hGAST – ROM.....	75
5.3.1 Σταθερός άνεμος – Χωρίς κύμα.....	75
5.4 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων	78
Κεφάλαιο 6	81
6.1 Συμπεράσματα.....	81
6.2 Πρόταση για μελλοντική έρευνα	82
Βιβλιογραφία	85

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

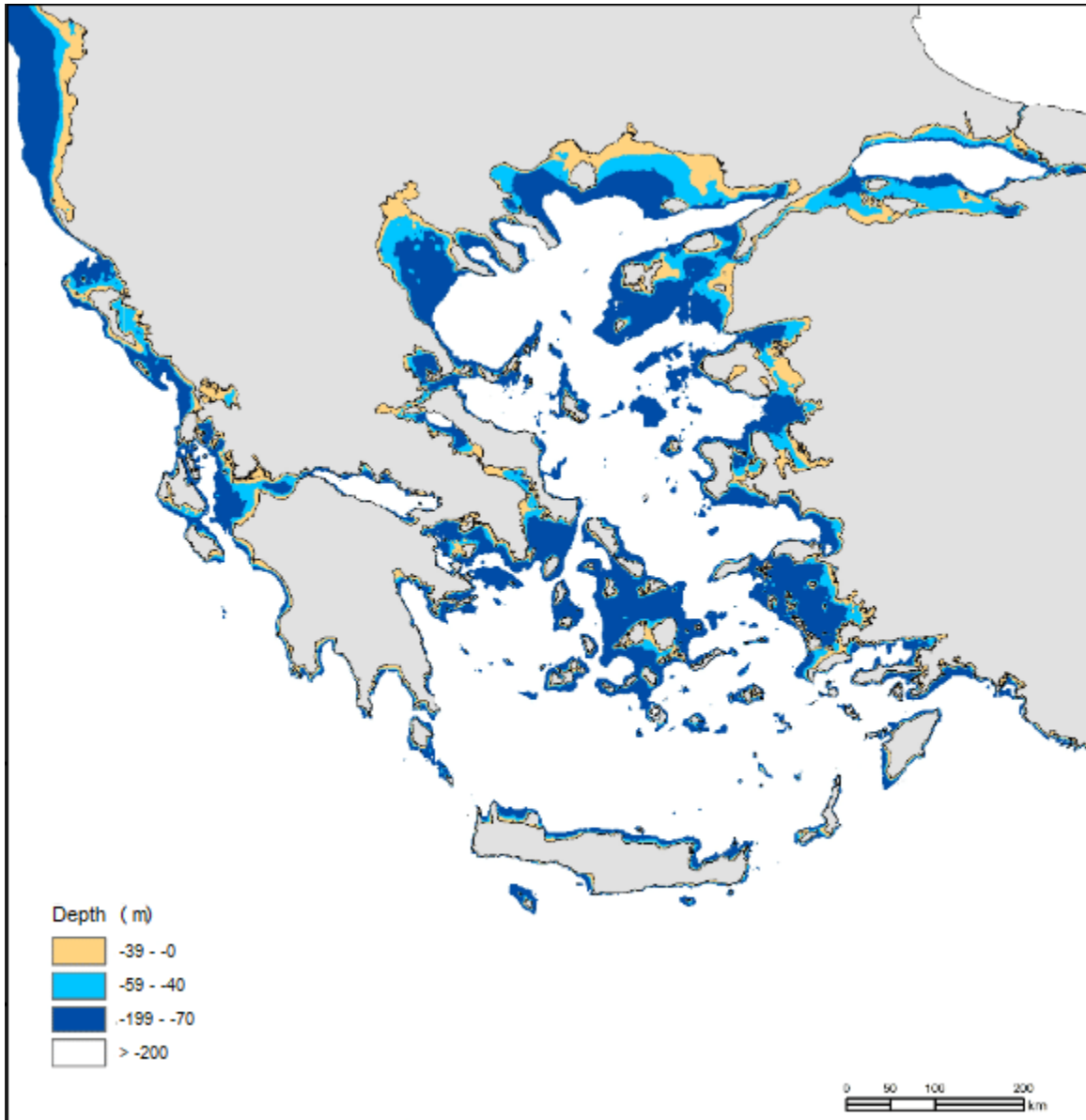
Τα τελευταία χρόνια, η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού σε συνδυασμό με την βελτίωση του βιοτικού του επιπέδου, έχει οδηγήσει στην ανάγκη εκμετάλλευσης όλο και περισσότερων ενεργειακών πόρων. Μέχρι και τις αρχές του 1970, οι ενεργειακές απαιτήσεις καλύπτονταν, σχεδόν αποκλειστικά, μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, δηλαδή αποθεμάτων άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Τα καύσιμα αυτά δημιουργήθηκαν από την αποικοδόμηση ζωτικής και φυτικής ύλης σε διάστημα αρκετών αιώνων και σε συνδυασμό με την αλόγιστη κατανάλωση τους τα αποθέματα αυτά όλο και φθίνουν στο πέρασμα των ετών. Το γεγονός αυτό συνδυαζόμενο με την επιτακτική ανάγκη μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, έχει καταστήσει απαραίτητη την ανάπτυξη τεχνολογιών οι οποίες καλούνται να έχουν χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα στο περιβάλλον.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η αιολική ενέργεια αξιοποιείται ολοένα και περισσότερο στις μέρες μας καθώς είναι ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον, διότι χρησιμοποιεί τον άνεμο για να παράξει έργο. Η ενεργειακή της εκμετάλλευση ξεκίνησε στις αρχές του 1980, εξ' αιτίας της πρώτης πετρελαϊκής κρίσης, και τα τελευταία χρόνια θεωρείται ο σημαντικότερος προμηθευτής ανανεώσιμης ενέργειας. Όμως, λόγω του ότι οι αξιοποιήσιμες επίγειες περιοχές εγκατάστασης αιολικών πάρκων αρχίζουν να μειώνονται, η ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων θεωρήθηκε μονόδρομος.

Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο παραγωγής ενέργειας εγκαταστάθηκε στην Δανία το 1991 και λειτουργούσε μέχρι και το 2017. Αξιοποιούσε το υψηλό αιολικό δυναμικό της θάλασσας, χωρίς να υπάρχει ζήτημα χωροθέτησης ή να παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο μείωσης της ενεργειακής του απόδοσης, προβλήματα που απαιτούν λύση σε επίγεια αιολικά πάρκα. Απέιχε από την ακτή γύρω στα 2 χιλιόμετρα και τα θεμέλια στήριξης του εδράζονταν στα 3 έως 6 μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Ωστόσο, η θεμελίωση στον βυθό της θάλασσας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βάθη έως και 50 μέτρων [1]. Σε πιά βαθιά νερά, η επιλογή αυτή είτε είναι ασύμφορη οικονομικά είτε τεχνικά.

Έτσι ξεκίνησε η εξέλιξη των πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων, τα οποία μπορούν να εγκαταστηθούν σε αρκετά μεγαλύτερο βάθος, εκμεταλλεζόμενα έτσι ενεργειακά τις υψηλές ταχύτητες ανέμου που πνέουν στα μέσα του ωκεανού. Η πρώτη υπεράκτια πλωτή ανεμογεννήτρια, ονομαστικής ισχύος 88 kW, τοποθετήθηκε το 2008 στην Ιταλία για συλλογή δεδομένων, όπου και λειτούργησε για 6 μήνες μέχρις ότου τεθεί εκτός λειτουργίας. Οι αγκυρώσεις της εδράζονταν σε βάθος 113 μέτρων και η κατασκευή απείχε 22 χιλιόμετρα από την ακτή.

Στην Ελλάδα, όπου το αιολικό δυναμικό στον ωκεανό είναι ισχυρό και σε συνδυασμό ότι το έδαφος είναι εύφορο και μπορεί να αξιοποιηθεί για αγροτικές καλλιέργειες, η επιλογή υπεράκτιων αιολικών πάρκων φαντάζει επιτακτική. Ειδικότερα, επειδή τα βάθη των Ελληνικών θαλασσών συνήθως είναι μεγαλύτερα από 100 μέτρα (Σχήμα 1.1), η χρήση πλωτών αιολικών πάρκων τείνει να είναι η βέλτιστη λύση.



Σχήμα 1.1: Βυθομετρικός χάρτης υδάτων της Ελλάδας [2]

1.2 Τεχνολογίες πλωτών Ανεμογεννητριών

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των πλωτών ανεμογεννητριών μόνο θετικές επιπτώσεις μπορεί να έχει για το ηλεκτρικό σύστημα, διότι ζητήματα που υπάρχουν στα χερσαία αιολικά πάρκα μπορούν να εξαλειφθούν. Αρχικά, η ταχύτητα ανέμου στην θάλασσα είναι μεγαλύτερη απ' αυτή στην στεριά, κυρίως διότι στην στεριά η κινητική ενέργεια του ανέμου μειώνεται λόγω των διάφορων εμποδίων (δέντρα, βουνά, πολυκατοικίες) που έρχεται σε επαφή. Το προαναφερθέν αποτελεί πρόβλημα που δεν υφίσταται στις υπεράκτιες κατασκευές. Επίσης, η οπτική όχληση λόγω μεγέθους κατασκευής και η ηχορύπανση λόγω λειτουργίας, δεν αποτελούν τεχνικό περιορισμό στις υπεράκτιες κατασκευές, ιδίως στις πλωτές, που συνήθως απέχουν αρκετά χιλιόμετρα από τις ακτές.

Υπάρχουν τριών ειδών βασικές κατηγορίες πλωτών κατασκευών (Σχήμα 1.2), στις οποίες εδράζονται οι ανεμογεννήτριες:

- **Πλατφόρμα Ιστού - Σημαντήρα (Spar - Buoy)**

Ο συγκεκριμένος τύπος θαλάσσιας πλωτής κατασκευής (Σχήμα 1.2α) αποτελείται από έναν κυλινδρικό κοίλο πυλώνα, όπου το μικρότερο μέρος του βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και στο οποίο εδράζεται η ανεμογεννήτρια. Το μεγαλύτερο μέρος του κυλίνδρου βρίσκεται βυθισμένο μέσα στο νερό, όπου ερματίζεται με νερό και πέτρες ώστε να επιτυγχάνεται η ευστάθεια ολόκληρης της διάταξης. Η θέση του συστήματος παραμένει σταθερή μέσω της πρόσδεσης του στον πυθμένα με καλωδιώσεις αγκύρωσης (Mooring Trusses). Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες δύο κατασκευές είναι η πιο οικονομική λύση.

- **Ημιβυθισμένης πλατφόρμας (Semi - Submersible)**

Η συγκεκριμένη διάταξη (Σχήμα 1.2β) αποτελείται από 3 ημιβυθιζόμενους κυλίνδρους, όπου η επαναφορά της διάταξης στην αρχική της θέση ισορροπίας, επιτυγχάνεται μέσω των υδροστατικών δυνάμεων αλλά και της πρόσδεσης του συστήματος στον πυθμένα με καλωδιώσεις αγκύρωσης.

- **Πλατφόρμα με τεταμένους τένοντες (Tension Leg Platform)**

Η συγκεκριμένη διάταξη (Σχήμα 1.3γ) αποτελείται από ένα ημιβυθιζόμενο κύλινδρο, στον οποίο είναι τοποθετημένες 3 προεντεταμένες αγκυρώσεις, με αποτέλεσμα σε συνδυασμό με την άνωση του συστήματος, η κατασκευή να εμφανίζει υψηλή αξονική ακαμψία, καταργώντας έτσι την κάθετη κίνηση του συστήματος.



Σχήμα 1.2: Είδη πλωτών κατασκευών [3]

1.3 Σκοπός της εργασίας

Οι υπεράκτιες πλωτές κατασκευές, στις οποίες τοποθετούνται οι ανεμογεννήτριες, υπόκεινται σε αεροδυναμικές και υδροδυναμικές φορτίσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δυναμική φόρτιση του συστήματος. Το γεγονός αυτό εισάγει 6 νέους βαθμούς ελευθερίας στην πλωτή κατασκευή, που αν δεν ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό, μπορούν να προκαλέσουν φορτίσεις στον πλωτήρα, στα πτερύγια, στην γεννήτρια και στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας [4]. Επομένως, ο έλεγχος του πλωτού συστήματος είναι αναγκαίος.

Το 2009 [5] προτάθηκε η εκμετάλλευση της γωνίας βήματος των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας για την μείωση της γωνίας πρόνευσης του πλωτήρα. Όταν ο πλωτήρας ανασηκώνεται από το επίπεδο της θάλασσας (πρόνευση), η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας αυξάνεται τεχνητά από έναν PID ελεγκτή, με συνέπεια την μεταβολή της γωνίας βήματος των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Αν η τιμή της νέας τεχνητής γωνιακής ταχύτητας κυμαίνεται παραπάνω από τα ονομαστικά, τότε η γεννήτρια προσπαθεί να την

επαναφέρει στην ονομαστική μέσω της γωνίας ελέγχου pitch των πτερυγίων. Επομένως, η γεννήτρια μπορεί να εκμεταλλευτεί περισσότερη κινητική ενέργεια από τον άνεμο παράγοντας περισσότερη ώση (thrust), με αποτέλεσμα την μείωση της γωνίας βήματος του πλωτήρα.

Το 2019 [6] δοκιμάστηκε η τοποθέτηση τεσσάρων επίπεδων κυκλικών πτερυγίων στο κατώτερο σημείο του πλωτήρα, με σκοπό την μείωση της στροφής pitch και της μετακίνησης heave. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, καταλήγοντας ότι η βέλτιστη λύση είναι αυτή με την μεγαλύτερη διάμετρο πτερυγίων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα εξεταστεί η τοποθέτηση διαφόρων διατάξεων πτερυγίων σε έναν πλωτήρα τύπου Spar - Buoy, με σκοπό την εξέταση της συμβολής τους στην ευστάθεια και τον έλεγχο των κινήσεων του πλωτήρα και κατά συνέπεια ολόκληρου του συστήματος της πλωτής Α/Γ. Τα πτερύγια θα είναι τοποθετημένα στον κάθετο άξονα του πλωτήρα, κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Το σημείο έδρασης τους στον πλωτήρα, οι διαστάσεις, η γεωμετρία τους και το αριθμητικό τους σύνολο θα διερευνηθεί στα επόμενα κεφάλαια. Ως σημείο βελτίωσης και έρευνας, θα τεθούν οι 6 βαθμοί ελευθερίας που αφορούν τις μετακινήσεις και τις στροφές του πλωτήρα γύρω από το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων :

- **Μετακινήσεις**
 - *Ταλάντευση εμπρός - πίσω (surge)*
 - *Ταλάντευση πλευρική (sway)*
 - *Ταλάντευση πάνω - κάτω (heave)*
- **Στροφές**
 - *Περιστροφή (roll)*
 - *Πρόνευση (pitch)*
 - *Γωνιακή απόκλιση (yaw)*

1.4 Δομή της εργασίας

- Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η εξίσωση Morison μέσω της οποίας θα υπολογιστούν τα υδροδυναμικά φορτία της πλωτής Α/Γ, με και χωρίς την συμβολή των πτερυγίων. Επιπλέον, αναδιαμορφώνεται η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης και άνωσης του κάθε πτερυγίου.
- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται το απλουστευμένο μοντέλο ROM και το εμπλουτισμένο μοντέλο hGAST, τα οποία προσομοιώνουν την δυναμική συμπεριφορά της πλωτής Α/Γ.

- Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων της πλωτής Α/Γ. Αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο των πτερυγίων του πλωτήρα και ορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των προς εξέταση διατάξεων πτερυγίων.
- Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται η προσομοίωση της συμβολής των πτερυγίων στην μείωση των μεταβολών της πλωτής Α/Γ.
- Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζεται μια πρόταση για περαιτέρω βελτίωση.

Κεφάλαιο 2

Στο παρόν Κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εξίσωση Morison όπου υπολογίζονται τα υδροδυναμικά φορτία της πλωτής Α/Γ και αναλύεται η διαδικασία αναδιαμόρφωσης των συντελεστών αντίστασης και άνωσης, ούτως ώστε να περιέχουν την γωνία προσβολής και τις διαστάσεις του κάθε πτερυγίου που θα τοποθετηθεί στον πλωτήρα.

2.1 Υπολογισμός υδροδυναμικών φορτίων του πλωτήρα με χρήση της εξίσωσης Morison

Σε πολλές εφαρμογές τα υδροδυναμικά φορτία ανά μονάδα μήκους ενός στοιχείου L , υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης Morison [7], η οποία περιγράφει, εμπειρικά τις δυνάμεις που ασκούνται σε μια κυλινδρική κατασκευή (ανά μονάδα μήκους της), δεχόμενη τη δράση μιας ταλαντευόμενης ροής. Η εξίσωση Morison έχει περιορισμούς στο πεδίο εφαρμογής της και αφορά αποκλειστικά λεπτόγραμμες κατασκευές, με χαρακτηριστική διάσταση (διάμετρο) πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος του διεγείροντος κυματισμού. Επομένως, για να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα, πρέπει $\lambda/D > 5$, όπου λ το μήκος κύματος και D ένα χαρακτηριστικό μήκος π.χ. η χαρακτηριστική διάσταση στην εγκάρσια τομή του εκάστοτε στοιχείου. Η κινηματική του κύματος υπολογίζεται στο κέντρο του κάθε στοιχείου για κάθε διατομή και οι παραγόμενες δυνάμεις ασκούνται κάθετα στον άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού στοιχείου. Συγκεκριμένα, η εξίσωση Morison δίνεται από τη σχέση:

$$dF_{Mor} / dL = \underbrace{(\rho dV a_n)}_{\text{Froude Krylov Diffraction}} + \underbrace{(C_a \rho dV a_n)}_{\text{Added mass}} - \underbrace{(C_a \rho dV \ddot{q})}_{\text{Added mass}} + \underbrace{(0.5 C_d \rho dS |u - \dot{q}|_n (u - \dot{q})_n)}_{\text{Drag term}} \quad (2.1)$$

όπου,

F_{Mor} (N) είναι η συνολική δύναμη και L (m) το στοιχείο κατά μήκος του κυλίνδρου.

a και u είναι η συνολική επαγόμενη επιτάχυνση και ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού, με μονάδες (m/s^2) και (m/s) αντίστοιχα. Το σύμβολο n δηλώνει την κάθετη συνιστώσα του αντίστοιχου διανύσματος στο στοιχείο L .

\ddot{q} , \dot{q} είναι η συνολική (κίνηση και παραμόρφωση) επιτάχυνση και ταχύτητα, με μονάδες (m/s^2) και (m/s) αντίστοιχα.

C_a και C_d είναι οι συντελεστές πρόσθετης μάζας και αντίστασης, οι οποίοι υπολογίζονται πειραματικά.

dV και dS είναι ο απειροστός όγκος και η επιφάνεια κάθετη στη ροή αντίστοιχα. Για ένα κυλινδρικό στοιχείο ακτίνας R ισχύει $dV = \pi R^2 dL$ (m^3) και $dS = 2RdL$ (m^2).

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού νερού (kg/m^3).

Σύμφωνα με την εξίσωση 2.1, η συνολική υδροδυναμική δύναμη είναι το άθροισμα της δύναμης του κύματος Froude-Krylov, της δύναμης περίθλασης (Diffraction), της δύναμης λόγω πρόσθετης μάζας (Added mass) και της δύναμης αντίστασης (Drag).

Ο πρώτος όρος περιγράφει την υδροδυναμική δύναμη που θα δεχότανε ένα σώμα χωρίς να λαμβάνει την επίδραση αυτού μέσα στο πεδίο ροής, δηλαδή το σώμα να θεωρείται ως μια επιμήκης κατασκευή. Η δύναμη αυτή ονομάζεται Froude Krylov.

Ο δεύτερος όρος, ονομάζεται δύναμη περίθλασης (diffraction effects), και ορίζεται ως η υδροδυναμική δύναμη που θα ασκούταν σε ένα κύλινδρο, λαμβάνοντας υπόψιν και την επίδραση του όγκου του μέσα στο πεδίο ροής. Αυτό προϋποθέτει, ο όγκος του σώματος να είναι αρκετά μεγάλος, έτσι ώστε να μην ικανοποιείται ο λόγος $\lambda/D > 5$.

Ο κύλινδρος δεν είναι αδιαπέραστος και ως εκ τούτου, η γεωμετρία του αναγκάζει το ρευστό να κινηθεί τριγύρω του (διαχωρισμός ρευστού), τροποποιώντας όλες τις τοπικές ταχύτητες και επιταχύνσεις. Αυτό σημαίνει πως στο ρευστό ασκείται κάποια δύναμη, η οποία μπορεί να προέρχεται μόνο από τον κύλινδρο, η ονομαζόμενη δύναμη προστιθέμενης μάζας (added mass). Σε γενικές γραμμές και για λείες επιμήκεις κατασκευές, με ομαλή διαμόρφωση βρεχόμενης επιφάνειας, η (δισδιάστατη) πρόσθετη μάζα του κυλίνδρου μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη μάζα του εκτοπιζόμενου ρευστού. Επομένως, μια καλή προσέγγιση για τον συντελεστή πρόσθετης μάζας είναι $C_a = 0.969954$ [8].

Οι δυνάμεις που ασκούνται στον κύλινδρο, λόγω των κινήσεων του μέσα στο ρευστό, ονομάζονται δυνάμεις αντίστασης (Drag terms). Διευκρινίζεται ότι, στον υπολογισμό τους το μέτρο της διαφοράς της ταχύτητας του ρευστού με αυτή του κυλίνδρου, εξασφαλίζει το γεγονός ότι αυτή είναι μη γραμμική και ταυτόχρονα αλλάζει πρόσημο, με εξάρτηση από την κατεύθυνση της ταχύτητας της ταλαντευόμενης ροής.

Η δύναμη Froude Krylov λαμβάνεται υπόψιν μόνο για πλήρως βυθιζόμενα σώματα [9]. Στην περίπτωση πλωτής ανεμογεννήτριας, πακτωμένη σε πλωτήρα, και προκειμένου να εισαχθεί ορθά η υδροδυναμική φόρτιση στην ταλάντευση πάνω-κάτω (heave), η δύναμη Froude Krylov θα εκφραστεί με τον όρο της δυναμικής πίεσεως p_d . Η εξίσωση του Morison εξάγει έγκυρα αποτελέσματα μόνο στις συνιστώσες οριζόντιων δυνάμεων, γεγονός που δεν ισχύει στις κάθετες συνιστώσες (surface piercing structure). Επομένως, η εξίσωση Morison για ταλάντευση heave, για μια πλάκα που αντιπροσωπεύει το κάτω μέρος ενός πλωτήρα, μπορεί να αναδιατυπωθεί ως εξής:

$$F_N = \underbrace{(S p_d)}_{\text{Froude Krylov}} + \underbrace{(C_a \rho V a_n)}_{\text{Diffraction}} - \underbrace{(C_a \rho V \ddot{q})}_{\text{Added mass}} + \underbrace{(0.5 C_D \rho S |u - \dot{q}|_n (u - \dot{q})_n)}_{\text{Drag term}} \quad (2.2)$$

όπου,

το S δηλώνει την επιφάνεια της πλάκας (m^2) και V (m^3) τον όγκο της κατασκευής που αντιστοιχεί σε κάθε πλάκα.

2.2 Προσαρμογή εξίσωσης Morison στην περίπτωση των πλωτών πτερυγίων

Η έδραση των εξεταζόμενων πτερυγίων, κάθετα στον άξονα συμμετρίας του πλωτήρα, θα λαμβάνει χώρα αρκετά μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Επιπλέον, η εξίσωση Morison εξάγει έγκυρα αποτελέσματα για μικρές κατασκευές ($\lambda/D > 5$). Τα παραπάνω, έχουν ως αποτέλεσμα οι δυνάμεις Froude Krylon και Περίθλασης να αμελούνται, αναδιατυπώνοντας έτσι, στην περίπτωση των πλωτών πτερυγίων, την εξίσωση 2.2 ως εξής:

$$F_{plates} = - (C_a \rho dV \ddot{q}) + (0.5 C_D \rho dS |u - \dot{q}|_n (u - \dot{q})_n) + F_{Lift} \quad (2.3)$$

όπου,

ως F_{plates} ορίζεται η υδροδυναμική δύναμη που προσφέρουν τα πτερύγια στον πλωτήρα.

Σε αντίθεση με τα κυλινδρικά μη ανωστικά σώματα τα πτερύγια αναπτύσσουν και δύναμη άνωσης, επομένως υπολογίζεται και η δύναμη F_{Lift} , η οποία προσδίδει δυνάμεις άνωσης στο πτερύγιο:

$$F_{Lift} = 0.5 C_L \rho dS |u - \dot{q}|_n (u - \dot{q})_n \quad (2.4)$$

όπου,

ως C_L ορίζεται ο συντελεστής άνωσης, ο οποίος θα υπολογιστεί στην Παράγραφο 2.2.2.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο υπολογισμός της δύναμης της προστιθέμενης μάζας των πτερυγίων αμελείται λόγω της μικρής της επίδρασης στο συνολικό αποτέλεσμα (επηρεάζει ελάχιστα τις ιδιοσυχνότητες του πλωτήρα). Επομένως, η εξίσωση Morison για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων των πτερυγίων, εξαρτάται άμεσα από την δύναμη αντίστασης και την δύναμη άνωσης.

2.2.1 Υπολογισμός συντελεστή αντίστασης πτερυγίου

Για τον υπολογισμό της δύναμης αντίστασης, ήταν αναγκαία η εύρεση ενός έγκυρου συντελεστή αντίστασης C_D , ούτως ώστε η υπολογιζόμενη δύναμη των πτερυγίων του πλωτήρα να αποδίδει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Σύμφωνα με [10], ο συντελεστής αντίστασης C_D μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$C_{Da} = 1,07 + 0,021 (a/b + b/a) \quad (2.5)$$

όπου,

a είναι το μήκος και b είναι το ύψος του πτερυγίου, με μονάδες σε m .

Η σχέση αυτή, αν και προσδίδει ρεαλιστικά αποτελέσματα, δεν εμπεριέχει στον υπολογισμό της την γωνία προσβολής AOA.

Επομένως, χρησιμοποιήθηκε μια δεύτερη σχέση (εξίσωση 2.6) υπολογισμού του C_D [11] η οποία να περιέχει την γωνία προσβολής AOA:

$$C_{Db} = 2 C_f + 2 \sin^2 AOA \quad (2.6)$$

όπου,

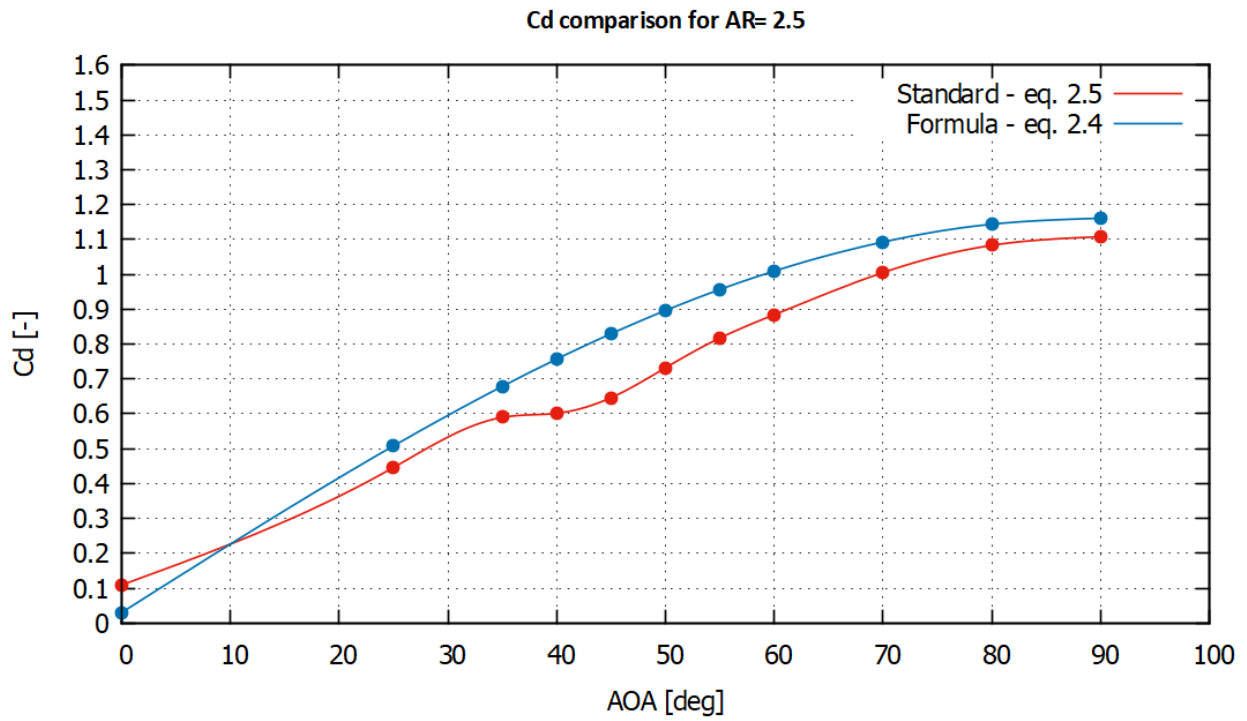
C_f ο συντελεστής τριβής (Coefficient fraction) και μπορεί να υπολογιστεί από την θεωρία οριακού στρώματος σε στρωτή και τυρβώδη ροή. Συνήθως έχει τιμές από 0,015 έως 0,025 γεγονός που τον καθιστά αμελητέο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μεγέθη.

Η γωνία προσβολής AOA (Angle Of Attack) ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας του ρευστού και του επίπεδου της πλάκας.

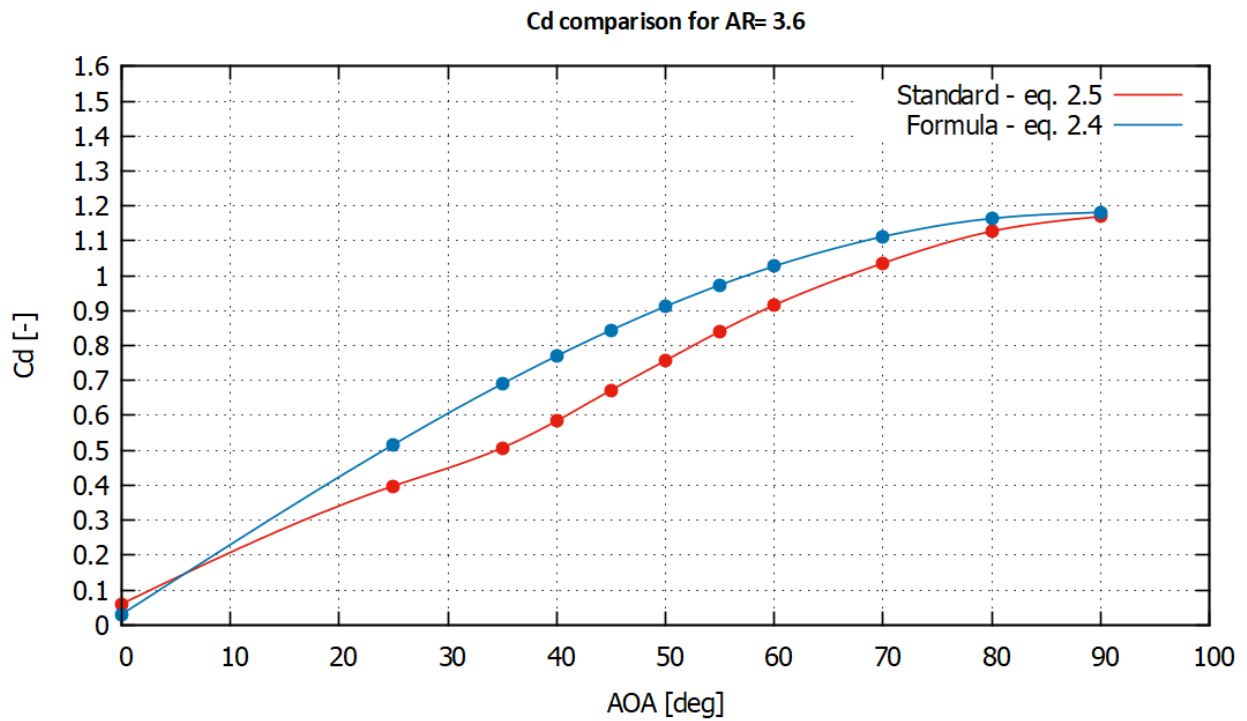
Ωστόσο, επειδή ο συντελεστής «2», στον δεύτερο όρο της εξίσωσης 2.6 υπολογισμού του C_{Db} , φαντάζει αρκετά μεγάλος, επιλέχθηκε να αντικατασταθεί από την σχέση 2.5. Επομένως, η νέα σχέση υπολογισμού του συντελεστή C_{Dn} , θα περιέχει την γωνία προσβολής AOA αλλά και τις διαστάσεις (μήκος, ύψος) του εκάστοτε πτερυγίου:

$$C_{Dn} = 2 C_f + C_{Da} 2 \sin^2 AOA \quad (2.7)$$

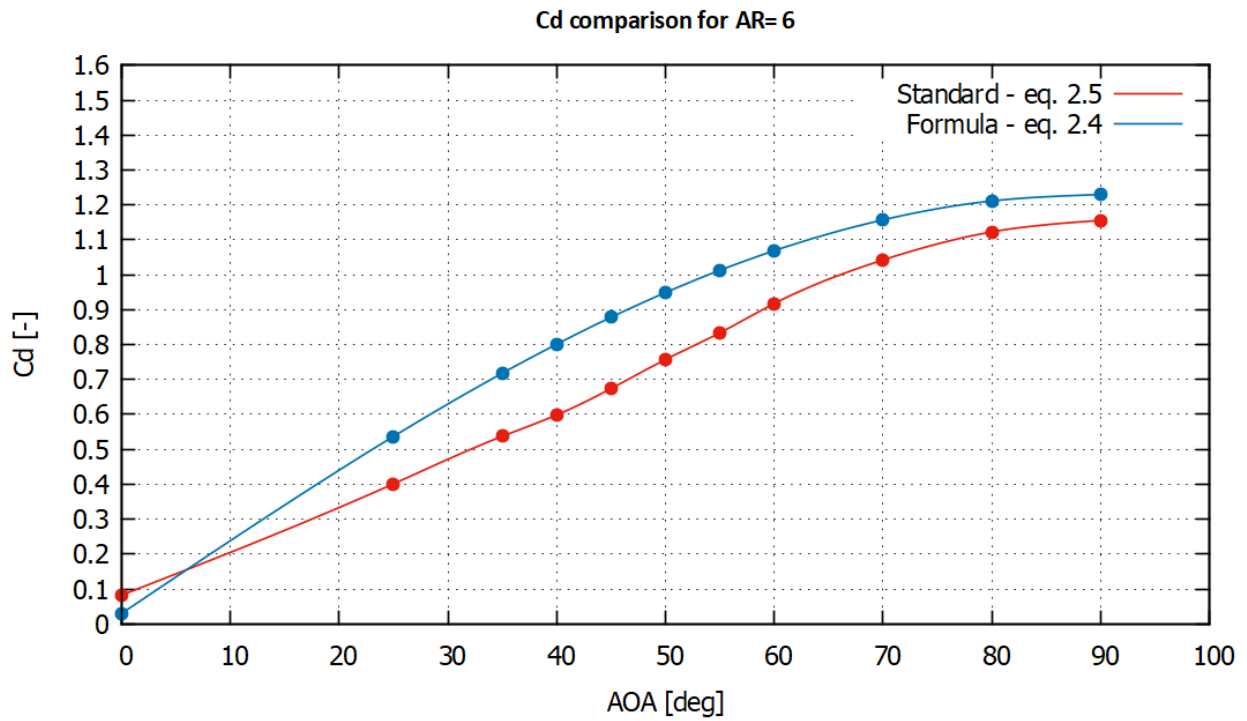
Η ορθότητα του πειραματικού υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης C_{Dn} (εξίσωση 2.7), αποδεικνύεται στα Σχήματα 2.1-2.4, για διάφορους λόγους μήκους – ύψους AR (Aspect Ratio) του πτερυγίου, σε σύγκριση με αυτόν της εξίσωσης 2.5. Στα παρακάτω Σχήματα 2.1-2.4 ο πειραματικός συντελεστής αντίστασης αναφέρεται ως *formula* και αυτός της εξίσωσης 2.5 ως *standard*.



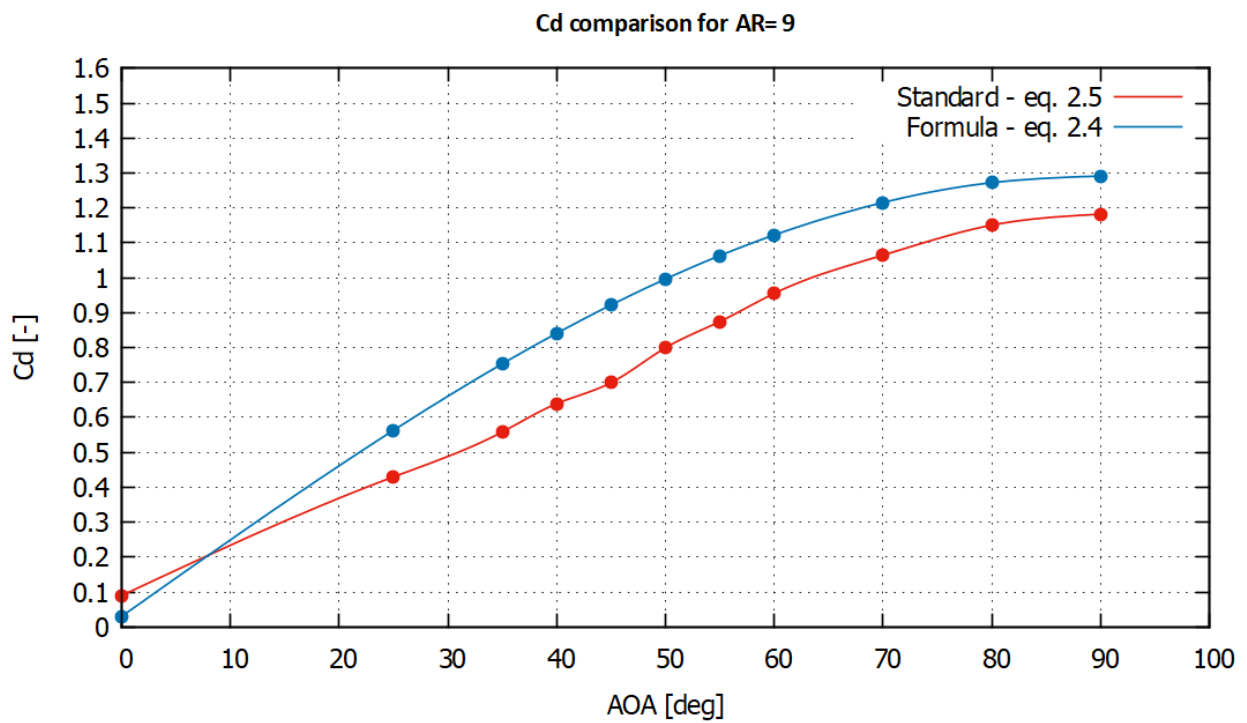
Σχήμα 2.1: Σύγκριση συντελεστών C_D για AR= 2,5



Σχήμα 2.2: Σύγκριση συντελεστών C_D για AR= 3,6



Σχήμα 2.3: Σύγκριση συντελεστών C_d για AR= 6



Σχήμα 2.4: Σύγκριση συντελεστών C_D για AR= 9

Παρατηρείται ότι, ο νέος υπολογιζόμενος συντελεστής αντίστασης C_{Dn} παρουσιάζεται λίγο αυξημένος σε σχέση με αυτόν της εξίσωσης 2.5. Αποδίδει όμως, έγκυρα αποτελέσματα για διάφορες γωνίες προσβολής, αφού η καμπύλη του παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με αυτόν τις εξίσωσης 2.5.

2.2.2 Υπολογισμός συντελεστή άνωσης πτερυγίου

Για τον υπολογισμό της δύναμης F_{Lift} , πρέπει να εκτιμηθεί ο συντελεστής άνωσης C_L . Σύμφωνα με [11], η σχέση που αποδίδει τον C_L , εμπεριέχοντας την γωνία προσβολής AOA , είναι ο εξής:

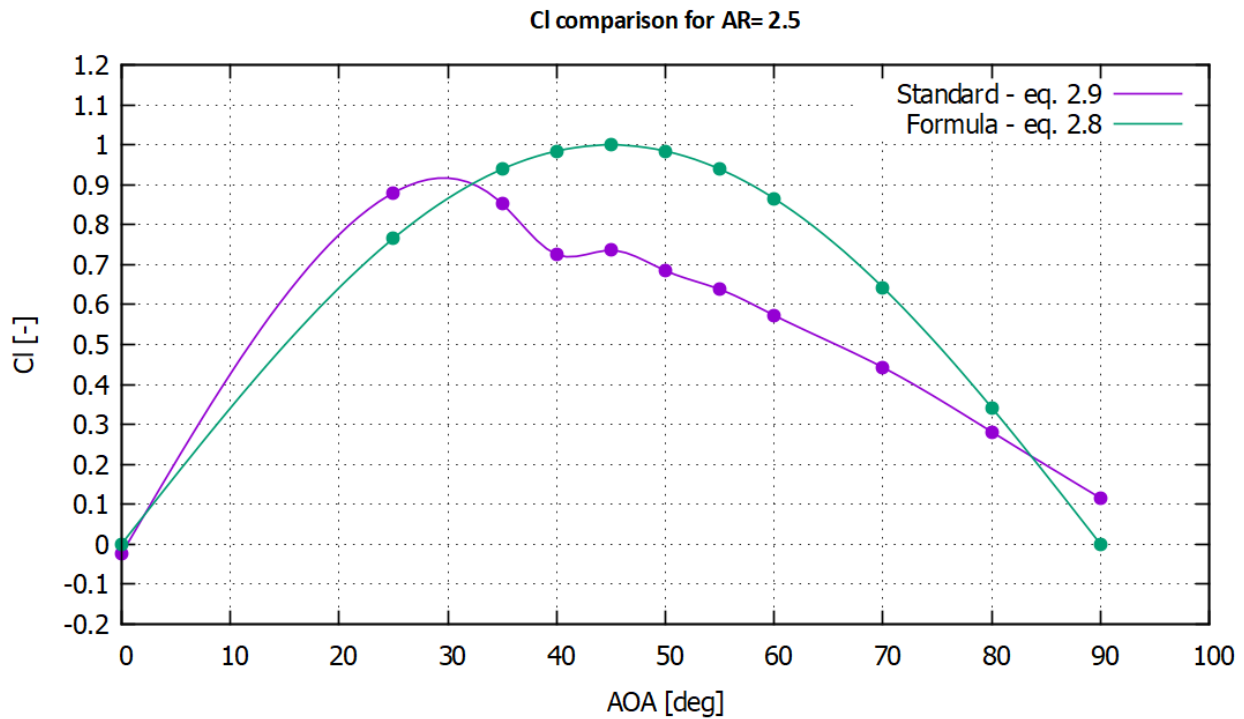
$$C_L = \sin(2 AOA) \quad (2.8)$$

Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της σχέσης υπολογισμού του C_L , αποδεικνύεται γραφικά στα παρακάτω Σχήματα 2.5-2.8, για διάφορους λόγους μήκους - ύψους AR . Η σύγκριση, λαμβάνει μέρος με τον συντελεστή άνωσης της εξίσωσης 2.9 [10].

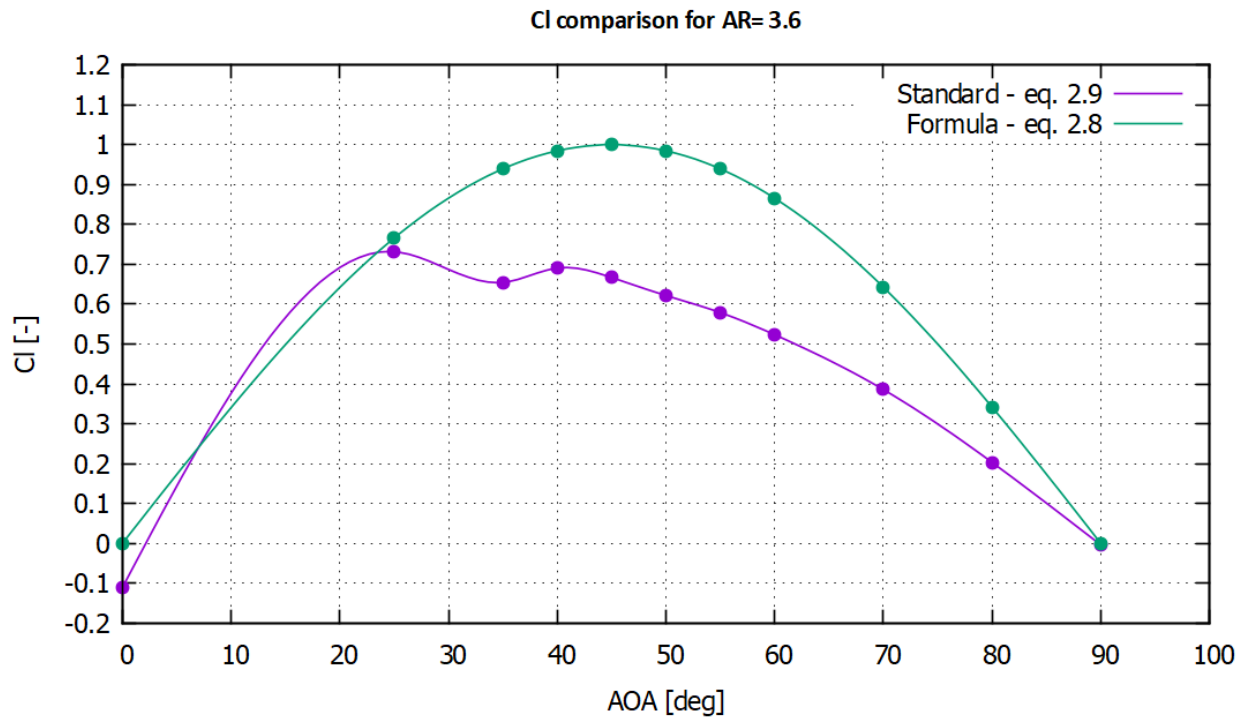
$$C_L = \sin AOA \cos AOA (K_p \cos AOA + \pi \sin AOA) \quad (2.9)$$

όπου,

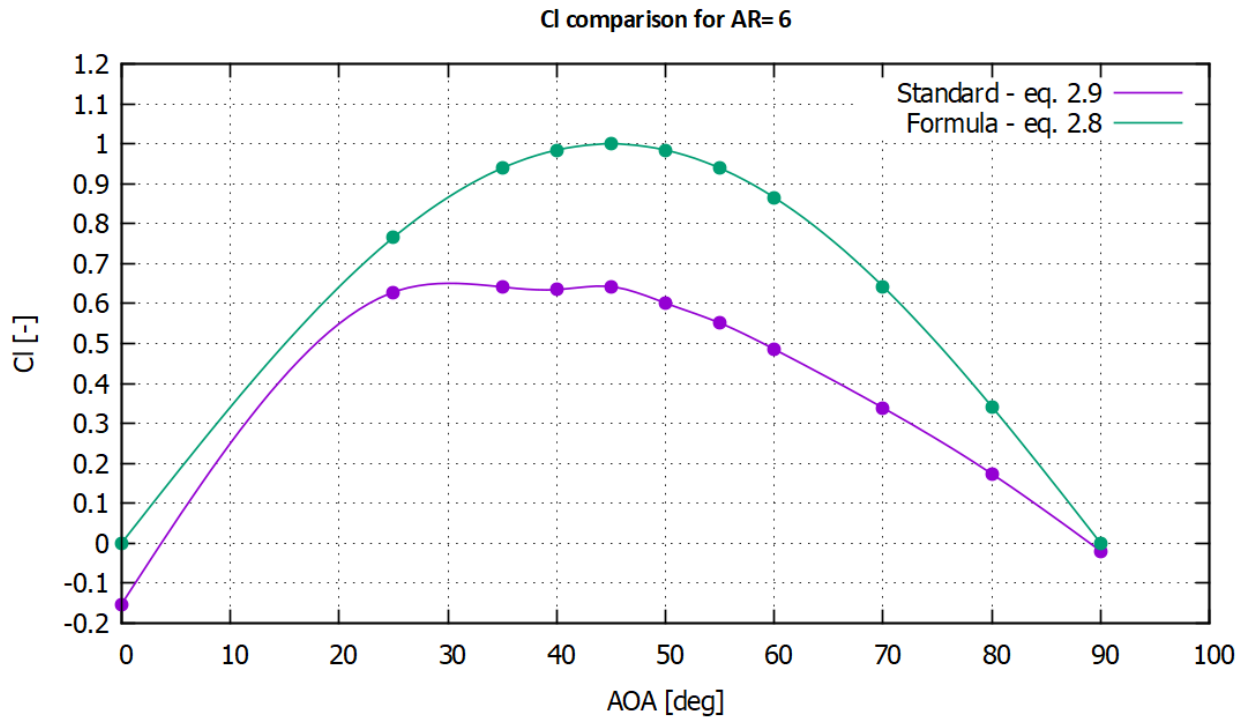
K_p είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από την γωνία προσβολής AOA .



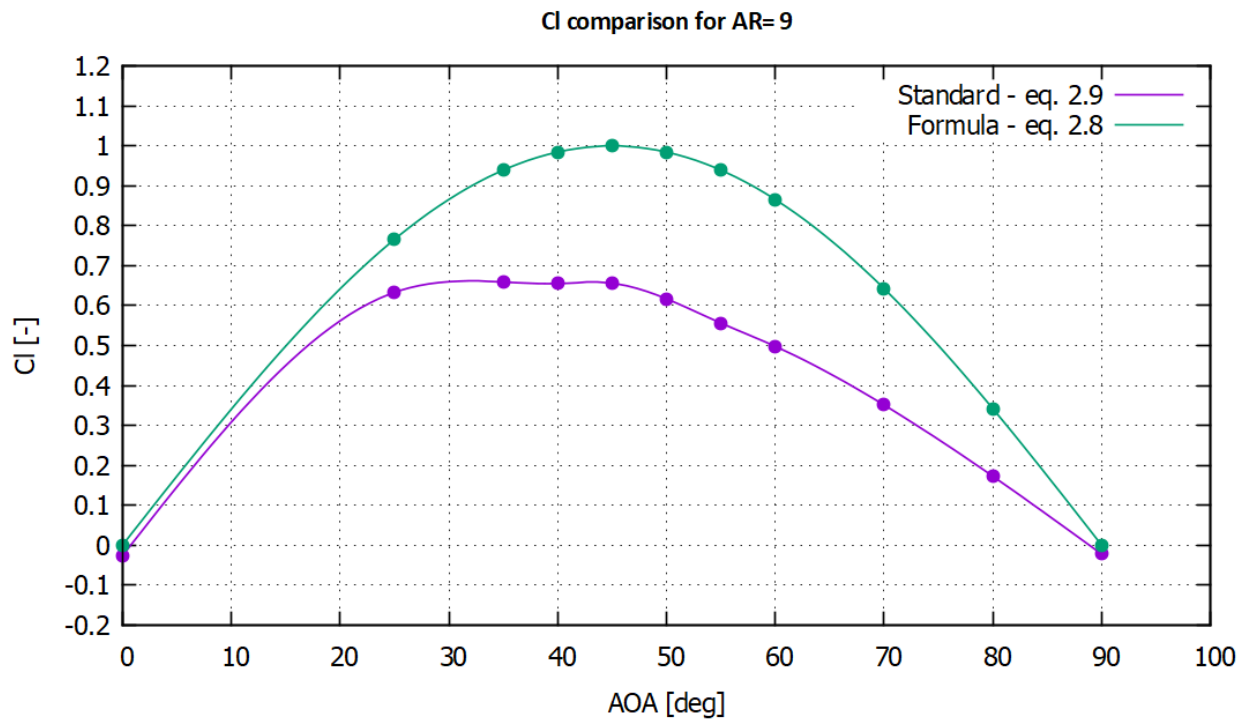
Σχήμα 2.5: Σύγκριση συντελεστών C_L για $AR= 2,5$



Σχήμα 2.6: Σύγκριση συντελεστών C_L για $AR=3,6$



Σχήμα 2.7: Σύγκριση συντελεστών C_L για $AR=6$



Σχήμα 2.8: Σύγκριση συντελεστών C_L για $AR= 9$

Παρατηρείται ότι, η εξίσωση 2.8 δεν μπορεί να αποδώσει με ακρίβεια την καμπύλη του C_L στην περιοχή της απώλειας στήριξης. Αυτό συμβαίνει διότι η εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή άνωσης εξαρτάται αποκλειστικά από το ημίτονο της γωνίας προσβολής.

“Intentionally Blank”

Κεφάλαιο 3

Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύεται το απλουστευμένο και το εμπλουτισμένο μοντέλο ROM και hGAST αντίστοιχα, μέσω των οποίων θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της πλωτής ανεμογεννήτριας.

3.1 Μοντέλο ROM

Το μοντέλο ROM (Reduced Order Model) χρησιμοποιείται για την μείωση της τάξης και της πολυπλοκότητας ενός μηχανικού συστήματος. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος εξέτασης ενός προβλήματος, αποδίδοντας αποτελέσματα ικανά να δημιουργήσουν μια πρώτη εντύπωση του προβλήματος για την μετέπειτα εκτενέστερη ανάλυση του. Σε σχέση με το εμπλουτισμένο μοντέλο hGAST (Ενότητα 3.2), τα ελατήρια, μέσω των οποίων προσομοιώνονται οι μετατοπίσεις του εκάστοτε στοιχείου, αντικαθίστανται από συγκεντρωμένες ελαστικές ιδιότητες. Η ιδιαιτερότητα αυτή, προσδίδει ταχύτητα στην υπολογιστική διαδικασία, με αντίκτυπο όμως, ένα μικρό σφάλμα λόγω της επίλυσης του προβλήματος προσεγγιστικά [12]. Το μοντέλο αποτελείται, από τον κλωβό, την πλήμνη, τον πύργο, τα πτερύγια και τον πλωτήρα. Κάθε ένα από αυτά τα μέρη του μοντέλου, εμπεριέχει και ένα συγκεκριμένο σύνολο βαθμών ελευθερίας, δηλαδή τον αριθμό των ανεξάρτητων συντεταγμένων που χρειάζονται για να περιγράψουν πλήρως τη διαμόρφωση μιας κατασκευής οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Το σύνολο των βαθμών ελευθερίας επιλέχθηκε σύμφωνα με τον αριθμό των κινηματικά ανεξάρτητων μεταβλητών που απαιτούνται για τη πλήρη περιγραφή της ταλαντωτικής κίνησης, όπου:

1. β_1 : γωνία πτερύγισης (flap) του πρώτου πτερυγίου
2. ξ_1 : γωνία περιστροφής (edge) του πρώτου πτερυγίου
3. q_{p1} : γωνία βήματος (pitch) πρώτου πτερυγίου
4. β_2 : γωνία πτερύγισης (flap) του δεύτερου πτερυγίου
5. ξ_2 : γωνία περιστροφής (edge) του δεύτερου πτερυγίου
6. q_{p2} : γωνία βήματος (pitch) δεύτερου πτερυγίου
7. β_3 : γωνία πτερύγισης (flap) του τρίτου πτερυγίου
8. ξ_3 : γωνία περιστροφής (edge) του τρίτου πτερυγίου
9. q_{p3} : κλίση γωνίας βήματος (pitch) του τρίτου πτερυγίου

10. $\Delta\psi$: στρέψη του άξονα του δρομέα κατά την κατεύθυνση *edge*
11. Ψ_g : γωνία στροφής του άξονα του δρομέα κατά την κατεύθυνση *edge* στη θέση της γεννήτριας ($\dot{\Psi} = \omega$ [rad/s])
12. q_{roll} : πλευρική γωνιακή απόκλιση του πύργου ως προς το κατακόρυφο επίπεδο (πλάγια κίνηση)
13. q_{yaw} : γωνιακή απόκλιση *yaw* του πύργου
14. q_{tilt} : γωνία διαμήκους ταλάντωσης του πύργου ως προς το κατακόρυφο επίπεδο (μπρος-πίσω)
15. q_f : γραμμική μετατόπιση πύργου και κλωβού στο διάμηκες επίπεδο
16. q_1 : πλευρική μετατόπιση πύργου και κλωβού
17. x_{fr} : γωνία περιστροφής *roll* ως προς τον X άξονα του πλωτήρα
18. y_{fp} : γωνία κλίσης *pitch* ως προς τον Y άξονα του πλωτήρα
19. z_{fy} : γωνία απόκλισης *yaw* ως προς τον Z άξονα του πλωτήρα
20. x_{fsu} : μετατόπιση *surge* ως προς τον X άξονα του πλωτήρα
21. y_{fsw} : μετατόπιση *sway* ως προς τον Y άξονα του πλωτήρα
22. z_{fhe} : μετατόπιση *heave* ως προς τον Z άξονα του πλωτήρα

Στο κάθε πτερύγιο αναλογούν 3 βαθμοί ελευθερίας (β_i, ξ_i, q_{pi}). Το καθένα μοντελοποιείται ως μία ράβδος με κατανεμημένη μάζα και συγκεντρωμένες ελαστικές ιδιότητες στη ρίζα, οι οποίες επιτρέπουν την στροφή του κατά την κατεύθυνση πτερυγίωσης *flap*, την πλάγια κατεύθυνση *edge* καθώς και τη στροφή γύρω από τον άξονά *pitch*. Ακόμα, ο έλεγχος της γωνίας *pitch* του εκάστοτε πτερυγίου, προσομοιώνεται μέσω του βαθμού ελευθερίας της γωνιακής του απόκλισης (q_{p1}, q_{p2}, q_{p3}).

Οι επόμενοι 7 βαθμοί ελευθερίας (10 έως 16) αφορούν τον πύργο και τον κλωβό, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να ταλαντώνονται και να στρέφονται στο διαμήκες και εγκάρσιο επίπεδο, ενώ το αξονικό σύστημα έχει επιπλέον την δυνατότητα να στρίψει κατά *yaw* (q_{yaw}) και να αποκλίνει κατά *edge* ($\Delta\psi$) και στα δύο άκρα (δρομέας και γεννήτρια). Ο κλωβός μοντελοποιείται ως μία συγκεντρωμένη μάζα στην κορυφή του πύργου ενώ η πλήμνη του κλωβού, μοντελοποιείται ως μία συγκεντρωμένη μάζα σε συγκεκριμένη απόσταση από τον άξονα του πύργου. Επιπλέον, προστίθεται το ύψος του πύργου (συγκεντρωμένη σημειακή ιδιότητα) με τον κλωβό και τον πύργο να αποτελούν

διαφορετικές συγκεντρωμένες μάζες. Ο κλωβός είναι πλήρως πακτωμένος στον πύργο και εξαρτάται μόνο από τη κίνηση αυτού, αλλά διαθέτει δικιά του δυσκαμψία η οποία επηρεάζει τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος, ιδιαίτερα των πτερυγίων. Για αυτό ακριβώς το λόγο, προστέθηκαν οι δύο γραμμικές μετατοπίσεις του κλωβού ως βαθμοί ελευθερίας, ώστε να προσομοιώνεται πιο κατάλληλα η ευελιξία του (q_f, q_1). Επιπλέον, προστέθηκε ο βαθμός ελευθερίας της γωνιακής μετακίνησης του άξονα του δρομέα στη θέση της γεννήτριας, ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ως είσοδος στο σύστημα ελέγχου η ροπή της γεννήτριας (Ψ_g).

Η μοντελοποίηση του πλωτήρα γίνεται και αυτή με την μέθοδο των συγκεντρωμένων σημειακών ιδιοτήτων. Οι 3 βαθμοί ελευθερίας (x_{fr}, y_{fp}, z_{fy}) προσομοιώνουν τις στροφές του πλωτήρα και οι υπόλοιποι 3 ($x_{fsu}, y_{fsw}, z_{fhe}$) προσομοιώνουν τις μετακινήσεις του γύρω από τον εκάστοτε άξονα.

3.1.1 Δυναμικές εξισώσεις συστήματος

Η συμπεριφορά των μηχανικών συστημάτων αποτυπώνεται από τις εξισώσεις *Lagrange*, η οποία απαιτεί τον ορισμό κατάλληλων βαθμών ελευθερίας q_j , έτσι ώστε να περιγραφεί πλήρως η θέση r κάθε εξεταζόμενου σημείου. Οι σχέσεις που απαιτούνται για την επίλυση των εξισώσεων *Lagrange* αναλύονται παρακάτω:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j = \sum_i f_i \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (3.1)$$

$$L = T - U \quad (3.2)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_0^R m(r) dr \dot{r}^T \dot{r} \quad (3.3)$$

$$U = \frac{1}{2} K_{(q)} q_j^2 \quad (3.4)$$

$$Q_j = \frac{\delta W}{dq_j} \quad (3.5)$$

$$\delta W = \sum_j f_i \frac{\partial r_i}{\partial q_j} dq_j \quad (3.6)$$

όπου,

T η κινητική ενέργεια του μοντέλου.

U η δυναμική ενέργεια του μοντέλου.

q_j οι ανεξάρτητοι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος.

Q_j τα εξωτερικά φορτία.

δW το έργο των εξωτερικών δυνάμεων.

Κάθε μία από τις παραπάνω εξισώσεις αντιπροσωπεύει τη συνθήκη ισορροπίας για κάθε βαθμό ελευθερίας. Εάν ο βαθμός ελευθερίας είναι μετακίνηση, τότε η εξίσωση θα εκφράζει τη δυναμική ισορροπία των δυνάμεων, ενώ εάν ο βαθμός ελευθερίας είναι στροφή, τότε η εξίσωση ισορροπίας θα εκφράζει την ισορροπία των ροπών. Για το σύστημα των 22 βαθμών που περιγράφηκε παραπάνω (Ενότητα 3.1), το διάνυσμα θέσης r ενός τυχαίου σημείου, ως προς το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ορίζεται ως εξής:

- Πάνω στο πτερύγιο:

$$r_G = \begin{Bmatrix} x_{fsu}(t) \\ y_{fsw}(t) \\ z_{fhe}(t) \end{Bmatrix} + R_1^{x_{fr}} \cdot R_2^{y_{fp}} \cdot R_3^{z_{fy}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{tower} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} qf(t) \\ ql(t) \\ 0 \end{Bmatrix} + R_2^{q_{tilt}} \cdot R_1^{q_{roll}} \cdot R_3^{q_{yaw}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\psi_G} \cdot \left(\begin{Bmatrix} -H_{sh} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\Delta\psi} \cdot R_1^{\psi_0} \cdot R_2^{Q_p} \cdot R_3^{b_1} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{Bmatrix} \right) \right) \right) \quad (3.7)$$

- Πάνω στην πλήμνη:

$$r_{hub} = \begin{Bmatrix} x_{fsu}(t) \\ y_{fsw}(t) \\ z_{fhe}(t) \end{Bmatrix} + R_1^{x_{fr}} \cdot R_2^{y_{fp}} \cdot R_3^{z_{fy}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{tower} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} qf(t) \\ ql(t) \\ 0 \end{Bmatrix} + R_2^{q_{tilt}} \cdot R_1^{q_{roll}} \cdot R_3^{q_{yaw}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\psi_G} \cdot \left(\begin{Bmatrix} -H_{sh} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\Delta\psi} \cdot \begin{Bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{Bmatrix} \right) \right) \right) \quad (3.8)$$

- Πάνω στην νασέλλα:

$$r_{nac} = \begin{Bmatrix} x_{fsu}(t) \\ y_{fsw}(t) \\ z_{fhe}(t) \end{Bmatrix} + R_1^{x_{fr}} \cdot R_2^{y_{fp}} \cdot R_3^{z_{fy}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{tower} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} qf(t) \\ ql(t) \\ 0 \end{Bmatrix} + R_2^{q_{tilt}} \cdot R_1^{q_{roll}} \cdot R_3^{q_{yaw}} \cdot \left(\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\psi_G} \cdot \left(\begin{Bmatrix} -H_{sh} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + R_1^{\Delta\psi} \cdot \begin{Bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{Bmatrix} \right) \right) \right) \quad (3.9)$$

- Πάνω στον πύργο:

$$r_{tow} = \begin{Bmatrix} x_{fsu}(t) \\ y_{fsw}(t) \\ z_{fhe}(t) \end{Bmatrix} + R_1^{xfr} \cdot R_2^{yfp} \cdot R_3^{zfy} \cdot \begin{Bmatrix} x_t \\ y_t \\ H_{float} + z_t \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

- Πάνω στον πλωτήρα:

$$r_{float} = \begin{Bmatrix} x_{fsu}(t) \\ y_{fsw}(t) \\ z_{fhe}(t) \end{Bmatrix} + R_1^{xfr} \cdot R_2^{yfp} \cdot R_3^{zfy} \cdot \begin{Bmatrix} x_{fl} \\ y_{fl} \\ z_{fl} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

όπου,

ως H_{tower} ορίζεται το ύψος του πύργου σε (m).

Αφού οριστεί το διάνυσμα r , υπολογίζονται οι εξισώσεις ισορροπίας του εκάστοτε βαθμού ελευθερίας. Η απλοποίηση που γίνεται, καθώς το μέγεθος των μετακινήσεων και των στροφών που εκφράζουν οι βαθμοί ελευθερίας είναι μικρό, είναι η εξής:

$$\cos q = 1, \sin q = q \quad (3.12)$$

Γραμμικοποίηση γίνεται για τους παρακάτω βαθμούς ελευθερίας, καθώς το μέγεθος τους δεν μπορεί να θεωρηθεί μικρό:

- q_{pi} ($i = 3,6,9$)
- Ψ_{gi} ($i = 11$)
- y_{fpi} ($i = 18$)

Η διαδικασία γραμμικοποίησης, είναι η εισαγωγή της επέκτασης του Taylor. Η εξίσωση ισορροπίας γράφεται σε σχέση με την απόκλιση, η οποία θεωρείται πολύ μικρή έτσι ώστε να μηδενίζονται οι όροι δεύτερης τάξης. Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι οι παραπάνω βαθμοί ελευθερίας γράφονται ως εξής:

$$q_p = q_{p0} + \delta q_p, \quad \dot{q}_p = \dot{q}_{p0} + \delta \dot{q}_p, \quad \ddot{q}_p = \ddot{q}_{p0} + \delta \ddot{q}_p \quad (3.13)$$

$$\Psi_g = \Psi_{g0} + \delta \Psi_g, \quad \dot{\Psi}_g = \dot{\Psi}_{g0} + \delta \dot{\Psi}_g, \quad \ddot{\Psi}_g = \ddot{\Psi}_{g0} + \delta \ddot{\Psi}_g \quad (3.14)$$

$$y_{fp} = y_{fp0} + \delta y_{fp}, \quad \dot{y}_{fp} = \dot{y}_{fp0} + \delta \dot{y}_{fp}, \quad \ddot{y}_{fp} = \ddot{y}_{fp0} + \delta \ddot{y}_{fp} \quad (3.15)$$

Επομένως, οι δυναμικές εξισώσεις του συστήματος μπορούν, μετά από μια απλή ανακατάταξη των όρων τους, να αποτυπωθούν στην εξής μορφή:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q \quad (3.16)$$

όπου,

M το δυναμικό μητρώο μάζας.

C το δυναμικό μητρώο απόσβεσης.

K το δυναμικό μητρώο δυσκαμψίας.

\dot{q}, \ddot{q} η πρώτη και δεύτερη παράγωγος του διανύσματος των βαθμών ελευθερίας ως προς τον χρόνο αντίστοιχα. Η πρώτη παράγωγος θα δώσει τις ταχύτητες των παραμορφώσεων και η δεύτερη τις επιταχύνσεις των παραμορφώσεων.

Q το εξωτερικό φορτίο που δέχεται η κατασκευή, το οποίο για την επίλυση του δυναμικού μέρους του προβλήματος παραμένει σταθερό, δηλαδή ανεξάρτητο των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

Στην περίπτωση που το εξωτερικό φορτίο μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρόνο, για παράδειγμα όταν υπάρχει αεροδυναμική φόρτιση, τότε η εξίσωση 3.16, μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$M(t)\ddot{q} + C(t)\dot{q} + K(t)q = Q \quad (3.17)$$

Η διαφορά με το δυναμικό σύστημα είναι ότι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται τώρα από τον χρόνο. Επομένως, το δεύτερο μέλος της εξίσωσης αποτελείται από τις αρχικές δυνάμεις, τις (πρώτης τάξης) παραγώγους της αεροδυναμικής ως προς τους γενικευμένους βαθμούς ελευθερίας και τις (πρώτης τάξης) παραγώγους ως προς τις flap και edge δυνάμεις του πτερυγίου.

Στο παρακάτω Σχήμα 3.1, παρουσιάζονται σχηματικά οι 22 βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου ROM, όπως αναλύθηκαν στην Ενότητα 3.1, όπου:

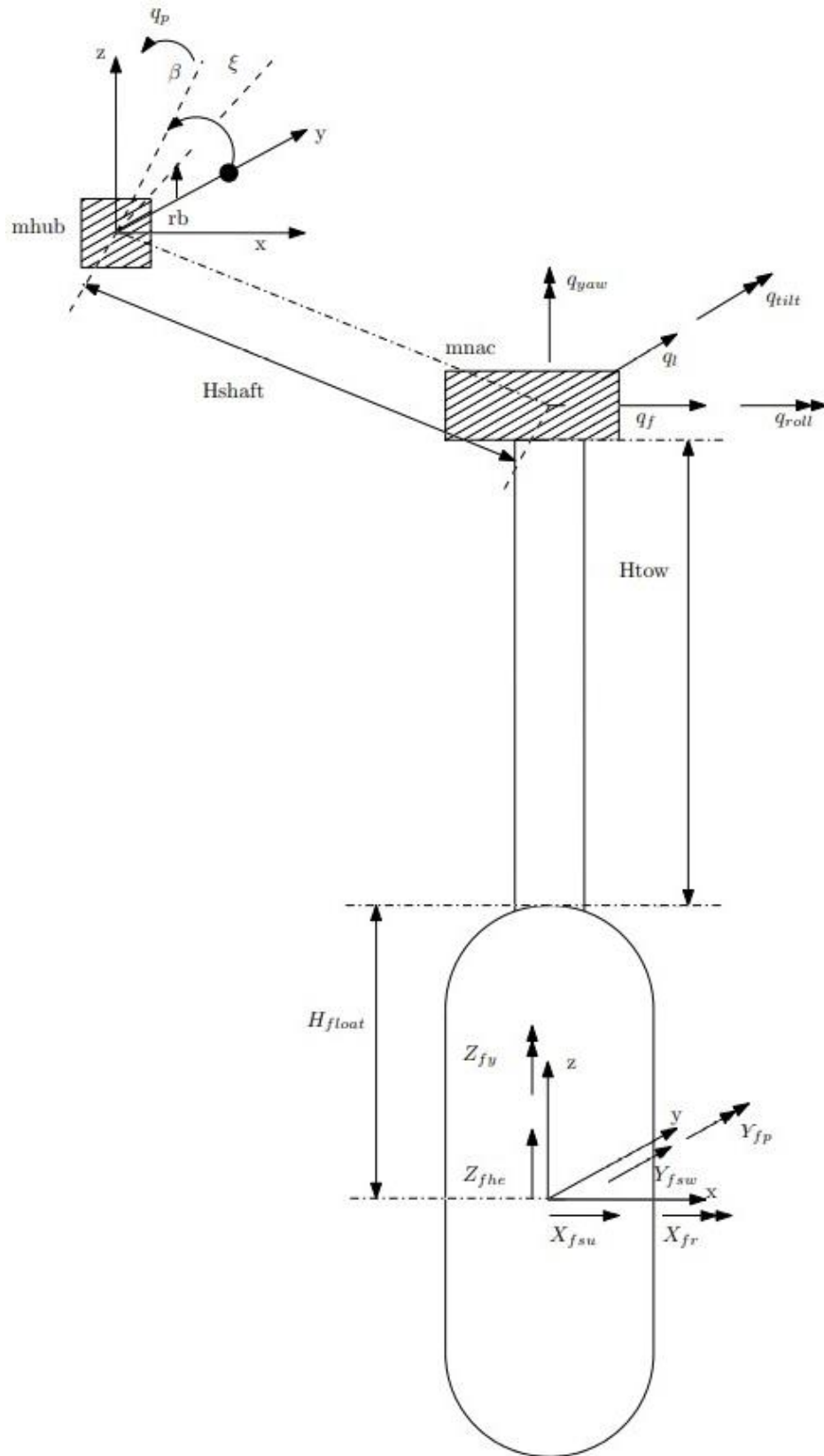
H_{float} το ύψος του πλωτήρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

H_{tow} το ύψος του πύργου.

H_{shaft} η απόσταση του δρομέα από την νασέλλα.

m_{nac} η μάζα της νασέλλας.

m_{hub} η μάζα του δρομέα.



Σχήμα 3.1: Οι 22 βαθμοί ελευθερίας του συστήματος

3.2 Λογισμικό HydroGast

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται ο εμπλουτισμένος κώδικας hGAST (Hydrodynamic General Aerodynamic and Structural Tool) [13]. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση της απόκρισης υπεράκτιων ανεμογεννητριών και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στις δυνατότητες εφαρμογής του συγκαταλέγονται τα εξής:

- Ανάλυση ιδιοτιμών σε μεταβατικές συνθήκες και σε συνθήκες ισορροπίας.
- Ανάλυση ευστάθειας για χρονικά σταθερές και χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- Αεροελαστικές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου.

Τα επιμέρους πρότυπα που απαρτίζουν το hGAST, δηλαδή το αεροδυναμικό, το υδροδυναμικό, το ελαστικό, το δυναμικό και το πρότυπο αγκύρωσης, εξετάζονται χωριστά και στη συνέχεια συντίθενται, επιβάλλοντας κατάλληλη μη-γραμμική σύζευξη στα σημεία αλληλεπίδρασης τους. Κάθε διακριτό ελαστικό τμήμα της κατασκευής ή μέρος αυτής μοντελοποιείται με βάση τη θεωρία δοκού Timoshenko [14] και επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Αξίζουν να σημειωθούν ορισμένες σημαντικές διαφορές μεταξύ των μοντέλων hGAST και ROM, όπου:

- Στο hGAST υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης σταθερού, στοχαστικού ή και καθόλου κύματος, σε αντίθεση με το ROM όπου δεν λαμβάνεται υπόψιν ο υπολογισμός της επίδρασης του κύματος.
- Στο hGAST ο άνεμος μπορεί να είναι σταθερός, στοχαστικός, τυρβώδης ή να αποκτήσει ριπές, σε αντίθεση με το ROM όπου ο άνεμος μπορεί να είναι μόνο σταθερός.
- Στο hGAST οι αγκυρώσεις προσομοιώνονται ως δομικά στοιχεία, ενώ στο ROM λογίζονται ως συγκεντρωμένα ελατήρια. Επιπλέον, το hGAST μοντελοποιεί όλα τα υπάρχοντα είδη βάσεων στήριξης στο βυθό καθώς και πλωτήρες για οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες.
- Στην ελαστοδυναμική ανάλυση του hGAST τα σώματα θεωρούνται ως δοκοί με κατανομημένη ελαστικότητα και η επίλυση γίνεται μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Στο ROM τα σώματα θεωρούνται ως άκαπτοι ράβδοι οι οποίες έχουν συγκεντρωμένη ελαστικότητα στο σημείο στήριξης τους, μειώνοντας έτσι τους απαιτούμενους βαθμούς ελευθερίας.

Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις δεν προσομοιώνεται το πεδίο του ανέμου, επομένως πρέπει να οριστεί από τον χρήστη είτε ως παράμετρος είτε ως αρχείο εισόδου.

3.2.1 Αεροδυναμικό πρότυπο

Το hGAST υπολογίζει τα αεροδυναμικά φορτία μέσω του προτύπου δίσκου ορμής που συνδυάζεται με τη μεθοδολογία στοιχείων περυγώσης (BEM) [13],[15],[16].

Το πρότυπο δίσκου ορμής βασίζεται στην θεωρία σύμφωνα με την οποία η ώση dT και ροπή dQ σε ένα δακτύλιο εύρους dr δίνονται από τις σχέσεις:

$$dT = N \frac{\rho U_{eff}^2}{2} (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr = 4 \pi \rho U_{\infty}^2 a (1 - a) r dr \quad (3.18)$$

$$dQ = N \frac{\rho U_{eff}^2}{2} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c dr = 4 \pi \rho \Omega U_{\infty} \acute{a} (1 - a) r^3 dr \quad (3.19)$$

όπου,

N ο αριθμός των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

ρ η πυκνότητα του αέρα (kg/m^3).

U_{eff} το μέτρο της σχετικής ταχύτητας στο περύγιο (m/s).

φ η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας και του επίπεδου του δρομέα.

C_L και C_D οι συντελεστές άνωσης και αντίσταση, οι οποίοι δίνονται ως δισδιάστατα χαρακτηριστικά σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης φ .

r η ακτινική θέση και c το μήκος της τοπικής χορδής.

Ω η ταχύτητα περιστροφής (rad/s)

a και \acute{a} οι συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής, οι οποίοι ορίζουν τις συνιστώσες της σχετικής ταχύτητας $U_{\infty}(1 - a)$ και $\Omega r(1 + \acute{a})$ στην αξονική και περιφερειακή κατεύθυνση αντίστοιχα.

Οι σχέσεις που διέπουν την ταχύτητα U_{eff} και την γωνία φ δίνονται παρακάτω:

$$U_{eff} = \sqrt{(U_{\infty} (1 - a))^2 + (\Omega r(1 + \acute{a}))^2} \quad (3.20)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{(1 - a) U_{\infty}}{(1 + \acute{a}) \Omega r} \right) \quad (3.21)$$

Η γωνία πρόσπτωσης a χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των συντελεστών C_L και C_D από πίνακες δεδομένων για κάθε τύπο αεροτομής. Ορίζεται ως εξής:

$$a = \varphi - \theta_t - \theta_p \quad (3.22)$$

όπου, θ_t και θ_p είναι η τοπική γωνία συστροφής και βήματος αντίστοιχα.

Στην πράξη το μοντέλο επεκτείνεται, έτσι ώστε να μπορούν να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Η μη μονιμότητα της ροής ανέμου.
- Η λειτουργία σε μεγάλη φόρτιση όπου διορθώνεται ο συντελεστής ώσης C_T .
- Οι απώλειες του ακροπτερυγίου.
- Η λειτουργία με απόκλιση της ροής του ανέμου (yaw, tilt).
- Η περίπτωση παραμόρφωσης των πτερυγίων, οπότε προστίθεται η ταχύτητα παραμόρφωσης.
- Η υστέρηση των συντελεστών C_L , C_D , C_M στην περίπτωση μη μόνιμης αεροδυναμικής.

Μετά τον υπολογισμό των συντελεστών επαγωγής, τα αεροδυναμικά φορτία, δηλαδή η κάθετη και η εφαπτομενική στο δίσκο δύναμη και η ροπή στην ακτινική κατεύθυνση υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$F_n = \frac{\rho}{2} C_n U_{eff}^2 c dr = \frac{\rho}{2} (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) U_{eff}^2 c dr \quad (3.23)$$

$$F_t = \frac{\rho}{2} C_t U_{eff}^2 c dr = \frac{\rho}{2} (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) U_{eff}^2 c dr \quad (3.24)$$

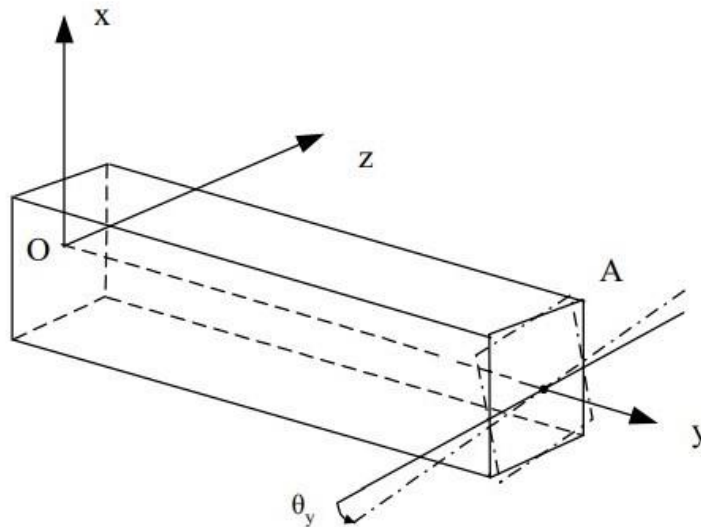
$$M = \frac{\rho}{2} C_M U_{eff}^2 c^2 dr \quad (3.25)$$

3.2.2 Ελαστικό πρότυπο

Το ελαστικό πρότυπο βασίζεται στη θεωρία δοκού του Timoshenko [14], στην οποία τα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν προσεγγίζονται μονοδιάστατα. Πιο απλά, το μήκος των στοιχείων αυτών θεωρείται πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις των εγκάρσιων διατομών τους, γεγονός που δικαιολογεί και την χρήση του όρου «δοκός». Στη μέθοδο αυτή περιλαμβάνονται οι εξισώσεις για τους ελαστικούς και για τους κινηματικούς βαθμούς ελευθερίας, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) [13]. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται το πλήρες δυναμικό σύστημα της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Επιπλέον κάθε παραμορφώσιμο στοιχείο της μηχανής θεωρείται

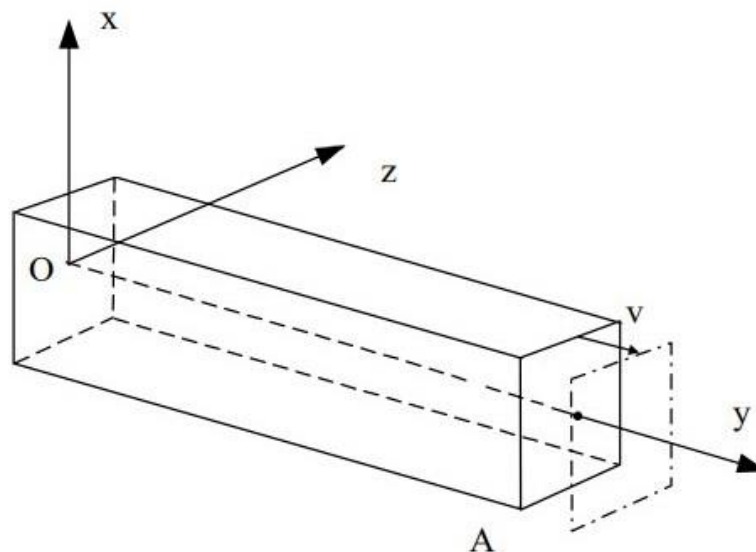
ελεύθερος φορέας, ο οποίος ικανοποιεί τις συνθήκες κινηματικής και δυναμικής συμβιβαστότητας σε σχέση με τα γειτονικά στοιχεία με τα οποία συνδέεται. Η θεωρία Δοκού βασίζεται σε τρεις βασικές υποθέσεις [14],[17],[18] οι οποίες εξηγούνται παρακάτω:

Υπόθεση Στρέψης: Η διατομή ενός γραμμικού φορέα, που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y (συστήματος συντεταγμένων O_{xy}), κατά τη στρέψη του φορέα παραμένει κάθετη στον άξονα y , επίπεδη και απαραμόρφωτη και στρέφεται γύρω από αυτόν.



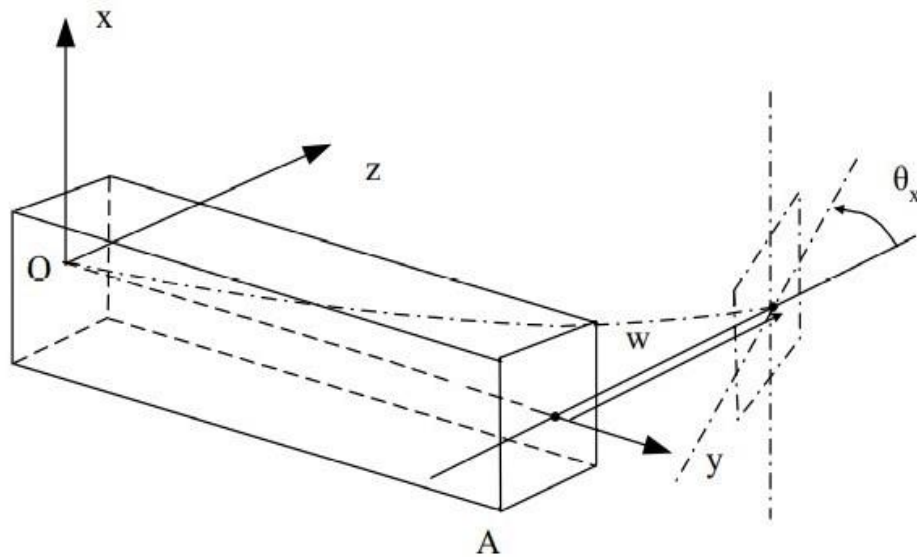
Σχήμα 3.2: Υπόθεση στρέψης για μία δοκό [18]

Υπόθεση Εφελκυσμού: Η διατομή ενός γραμμικού φορέα που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y (συστήματος συντεταγμένων O_{xy}), κατά τον εφελκυσμό ή την θλίψη του φορέα παραμένει επίπεδη, απαραμόρφωτη και κάθετη στον y , και μετατοπίζεται κατά την κατεύθυνση του.



Σχήμα 3.3: Υπόθεση εφελκυσμού για μία δοκό [18]

Υπόθεση Κάμψης: Κάθε διατομή ενός γραμμικού φορέα που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y (συστήματος συντεταγμένων O_{xy}), κατά την κάμψη του φορέα μετατοπίζεται κάθετα ως προς τον y και στρέφεται έτσι ώστε να είναι πάντα κάθετη ως προς τον καμπτώμενο άξονα y , ενώ ταυτόχρονα παραμένει επίπεδη και अपαραμόρφωτη.



Σχήμα 3.4: Υπόθεση κάμψης για μία δοκό [18]

3.2.3 Δυναμικό πρότυπο

Το δυναμικό πρότυπο βασίζεται στη θεώρηση πολλαπλών σωμάτων (multibody formulation). Στο πλαίσιο αυτό η συνολική κατασκευή διαχωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες. Κάθε συνιστώσα μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της κατασκευής (π.χ. το πτερύγιο, το αξονικό σύστημα κλπ) ή σε ένα τμήμα του. Η δεύτερη εκδοχή αντιστοιχεί στην περίπτωση που ένα εύκαμπτο στοιχείο όπως είναι τα πτερύγια, χωρίζεται σε περισσότερα τμήματα (sub-bodies) ώστε να λαμβάνονται υπόψη γεωμετρικές μη-γραμμικότητες εξαιτίας μεγάλων μετακινήσεων και στροφών. Για κάθε συνιστώσα ορίζεται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων ως προς το οποίο αναφέρονται οι ελαστικές μετακινήσεις. Σε κάθε συνιστώσα υπάρχει η δυνατότητα γενικής κίνησης της στο χώρο που περιλαμβάνει 3 μετακινήσεις και 3 στροφές.

Έστω R^k η θέση της αρχής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων $[O_{xyz}]$ της συνιστώσας "k" και T^k το μητρώο στροφής ως προς το γενικό (ακίνητο, αδρανειακό) σύστημα αναφοράς $[O_G x_G y_G z_G]$ (Σχήμα 3.5). Η θέση r_G^k ενός σημείου της συνιστώσας k ως προς το $[O_G x_G y_G z_G]$ καθώς και οι αντίστοιχες ταχύτητες και επιταχύνσεις γράφονται ως εξής:

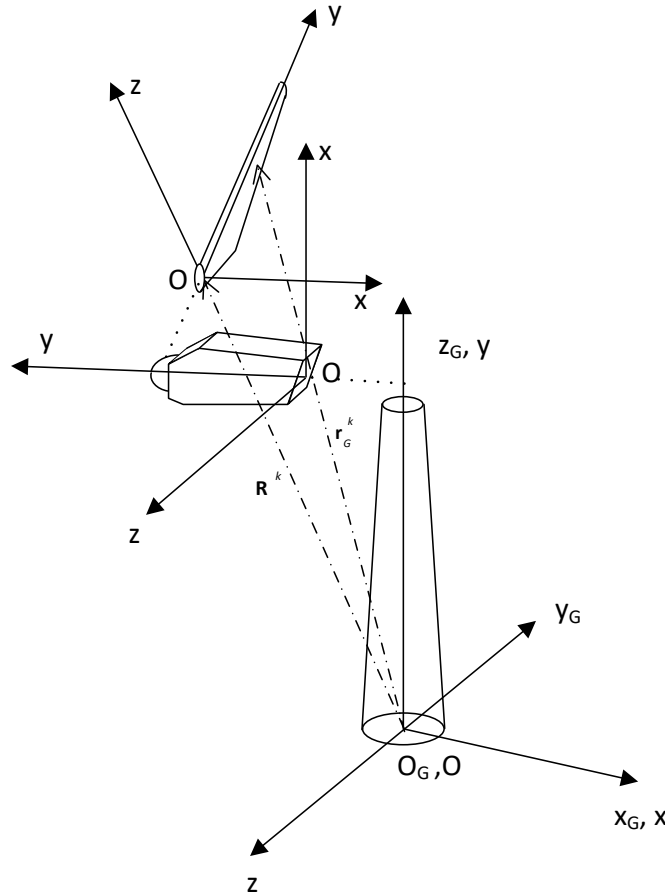
$$r_G^k = R^k + T^k \cdot r^k \quad (3.26)$$

$$\dot{r}_G^k = \dot{R}^k + \dot{T}^k \cdot r^k + T^k \cdot \dot{r}^k \quad (3.27)$$

$$\ddot{r}_G^k = \ddot{R}^k + \ddot{T}^k \cdot r^k + 2 \cdot \dot{T}^k \cdot \dot{r}^k + T^k \cdot \ddot{r}^k \quad (3.28)$$

Η επιτάχυνση ως προς το τοπικό σύστημα $[O_{xyz}]$, παίρνει την εξής μορφή:

$$(T^k)^T \cdot \ddot{r}_G^k = (T^k)^T \cdot \ddot{R}^k + (T^k)^T \cdot \ddot{T}^k \cdot r^k + 2 \cdot (T^k)^T \cdot \dot{T}^k \cdot \dot{r}^k + T^k \cdot \ddot{r}^k \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.5: Τα συστήματα συντεταγμένων στη θεώρηση πολλαπλών σωμάτων [13]

Για την ακριβή προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας, πρέπει να γίνει η εισαγωγή στοιχείων συγκεντρωμένων ιδιοτήτων, όπως είναι τα στοιχεία αδράνειας, τα στοιχεία απόσβεσης, τα στοιχεία ελαστικότητας και τα στοιχεία εξωτερικών δυνάμεων και ροπών. Η προσομοίωση της μάζας και της ροπής αδράνειας της πλήμνης του δρομέα, του κλωβού, της ηλεκτρογεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται με συγκεντρωμένα στοιχεία αδράνειας. Η προσομοίωση των εδράσεων, των ελαστικών

συνδέσμων σύνδεσης του αξονικού συστήματος και της ελαστικότητας του μηχανισμού προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται με στοιχεία απόσβεσης και ελαστικότητας.

Παρακάτω, στον Πίνακα 3.1 περιγράφεται το διάνυσμα q , το οποίο περιέχει τους βαθμούς ελευθερίας των στροφών και των μετακινήσεων του συστήματος.

q1	Κατά x ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q2	Κατά y ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q3	Κατά z ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q4	Κατά x ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q51	Κατά y ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q61	Κατά z ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q52	Κατά y στροφή του άκρου του πύργου (γωνία απόκλισης (yaw))
q62	Κατά z στροφή του άκρου του πύργου (γωνία ανατροπής (tilt))
q7	Κατά x ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q8	Κατά y ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q9	Κατά z ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q10	Κατά x ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q11	Κατά y ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q12	Κατά z ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q13	Γωνία πτερύγισης του δρομέα (teeter)
q14	Γωνία βήματος του πτερυγίου

Πίνακας 3.1: Το διάνυσμα των κινηματικών βαθμών ελευθερίας q

3.2.4 Υδροδυναμικό πρότυπο

Στο hGAST, οι υδροδυναμικές δυνάμεις υπολογίζονται με χρήση του τύπου Morison (Ενότητα 2.1). Η εξίσωση κίνησης ενός απαραμόρφωτου πλωτήρα στο πεδίο του χρόνου, όπως προκύπτει από τη μέθοδο παλμικής κρουστικής απόκρισης του Cummins [19], είναι η εξής:

$$\begin{aligned}
 (M + a_{\infty})\ddot{q} + \int_0^t R(t - \tau)\dot{q}(\tau)d\tau + (K_H + K_G + K_{Moor})q \\
 = F_{exc}^{(1)} + F_{exc}^{(2)} + F_{Moor} + F_{WT} + F_{visc} + \delta_{i3}(B - W)
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

όπου,

q είναι το διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας του πλωτήρα (3 μετακινήσεις και 3 στροφές), ενώ οι τελείες δηλώνουν τις αντίστοιχες χρονικές παραγώγους (ταχύτητα και επιτάχυνση).

M είναι το 6×6 μητρώο γενικευμένης μάζας του πλωτήρα και $R(t)$ είναι το μητρώο της χρονικής ιστορίας.

a_∞ είναι το μητρώο πρόσθετης μάζας, για άπειρη συχνότητα κύματος.

K_H και K_G είναι τα γραμμικά μητρώα δυσκαμψίας υδροστατικής και βαρυτικής προελεύσεως.

K_{Moor} είναι το μητρώο δυσκαμψίας λόγω των αγκυρώσεων.

$F_{exc}^{(1)}(t)$ είναι η πρωτοτάξια δύναμη διέγερσης, που περιλαμβάνει τη συνεισφορά της δύναμης του κύματος καθώς και την επίδραση λόγω της παρουσίας του σώματος (φαινόμενο περίθλασης).

$F_{exc}^{(2)}(t)$ είναι η δευτεροτάξια δύναμη διέγερσης ανάλογη του τετραγώνου του εύρους του κύματος και οφείλεται στην αλληλεπίδραση δύο αρμονικών κυμάτων με αντίστοιχες συχνότητες.

F_{Moor} είναι το διάνυσμα των φορτίων που ασκούνται στον πλωτήρα από το σύστημα αγκύρωσης.

F_{WT} είναι το διάνυσμα των φορτίων που ασκούνται στον πλωτήρα από την ανεμογεννήτρια.

F_{Visc} είναι το διάνυσμα των δυνάμεων αντίστασης λόγω συνεκτικών φαινομένων.

B και W είναι οι δυνάμεις άνωσης και βάρους του πλωτήρα.

3.2.5 Πρότυπο Αγκύρωσης

Το σύστημα αγκύρωσης μοντελοποιείται με τη δυναμική μέθοδο. Τα στοιχεία της αγκύρωσης προσομοιώνονται ως αλληλουχία δοκών που μεταφέρουν και παραλαμβάνουν μόνο αξονική φόρτιση. Σε κάθε κλάδο αγκύρωσης λαμβάνονται υπόψιν αδρανειακά, βαρυτικά και υδροδυναμικά φορτία, ενώ η επίλυση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, όπως και για όλα τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας. Η ροπή αδράνειας των γραμμών αγκύρωσης και των βαρυτικών δυνάμεων, λαμβάνονται υπόψιν μέσω της εξίσωσης Morison (Ενότητα 2.1). Επιπλέον, υπολογίζεται και η συνεισφορά της επαφής του κλάδου αγκύρωσης με το βυθό.

3.2.6 Σύνθεση των προτύπων για το συζευγμένο σύστημα

Η σύνθεση όλων των επιμέρους εξισώσεων, γίνεται με την εξής σειρά:

1. Αρχικά, για κάθε συνιστώσα υπολογίζονται τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας καθώς και τα διανύσματα εξωτερικής φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά, εισάγονται στο τελικό σύστημα με την εξής σειρά: πτερύγια, πύργος, βάση στήριξης και τέλος αγκυρώσεις.
2. Εισάγονται οι κινηματικές συνθήκες που σχετίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας q .
3. Εισάγονται οι δυναμικές συνθήκες, οι οποίες σχετίζονται με τη μεταφορά των φορτίων μεταξύ των σωμάτων.

4. Το σύστημα συμπληρώνεται με τις εξισώσεις των βαθμών ελευθερίας q . Στις εξισώσεις αυτές περιλαμβάνονται είτε απλές σχέσεις αντιστοίχισης (π.χ. ενός ελαστικού βαθμού ελευθερίας με τον αντίστοιχο κινηματικό) είτε δυναμικές εξισώσεις, όπως στην περίπτωση των κινήσεων του πλωτήρα καθώς και των βαθμών ελευθερίας του συστήματος ελέγχου (γωνία αζιμουθίου του αξονικού συστήματος ή γωνία βήματος των πτερυγίων).

Επομένως το σύστημα, γραμμένο σε μορφή εξισώσεων, θα έχει την τελική μορφή:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{Q} \quad (3.31)$$

όπου, το \mathbf{X} είναι το διάνυσμα των αγνώστων και τα \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} τα μητρώα μάζας, απόσβεσης, δυσκαμψίας και \mathbf{Q} είναι η εξωτερική φόρτιση. Τα \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} , \mathbf{Q} εξαρτώνται από το \mathbf{X} και τις χρονικές παραγώγους του, κάνοντας έτσι το σύστημα μη γραμμικό.

Κεφάλαιο 4

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και του πλωτήρα. Αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο των πτερυγίων και ορίζονται οι 4 διατάξεις πτερυγίων που θα τοποθετηθούν στο αξονικό επίπεδο του πλωτήρα.

4.1 Χαρακτηριστικά υπεράκτιας πλωτής Ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της NREL-5MW [20], οριζοντίου άξονα. Τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1.

Ονομαστική ισχύς	5 MW
Τύπος Α/Γ	Ανάντι, τριών πτερυγίων
Σύστημα ελέγχου	Μεταβλητών στροφών, μεταβλητής γωνίας βήματος
Σύστημα μετάδοσης κίνησης	Αύξησης στροφών, κιβώτιο ταχυτήτων πολλαπλών βαθμίδων
Διάμετρος δρομέα / πλήμνης	126 m / 3 m
Ύψος πλήμνης	90 m
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut in)	3 m/s
Ονομαστική ταχύτητα	11.4 m/s
Ταχύτητα αποκοπής (cut out)	25 m/s
Έναρξη ρύθμισης στροφών	6.9 rpm
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	12.1 rpm
Μάζα δρομέα	110000 kg
Μάζα κλωβού	240000 kg
Μάζα πύργου	347460 kg

Πίνακας 4.1: Ορισμός υπεράκτιας Α/Γ NREL-5MW

Έπειτα, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του πύργου, ο οποίος εδράζεται στον πλωτήρα σε ύψος 10 μέτρων πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Ύψος από το επίπεδο της θάλασσας στη βάση του πύργου	10 m
Ύψος από το επίπεδο της θάλασσας στην κορυφή του πύργου	87.6 m
Συνολική (ολοκληρωμένη) μάζα	249718 kg
Ποσοστό κατασκευαστικής απόσβεσης	1%

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά υπεράκτιου πύργου

Για την έδραση της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιήθηκε ο πλωτήρας OC3-Hywind [8], ο οποίος είναι τύπου spar – buoy. Ο πλωτήρας, μεταξύ της κορυφής και του κάτω μέρους του, αποτελείται από δύο διαφορετικής διαμέτρου κυλινδρικές περιοχές, οι οποίες ενώνονται μέσω μιας κωνικής περιοχής. Η διάμετρος κάτω από την κωνική περιοχή είναι μεγαλύτερη από αυτή από πάνω, με σκοπό την μείωση των υδροδυναμικών φορτίων. Η κωνική περιοχή εκτείνεται σε βάθος από 4 έως 12 μέτρα υπό το επίπεδο της θάλασσας. Τα χαρακτηριστικά του OC3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Βάθος της πλατφόρμας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας	120 m
Ύψος από το επίπεδο της θάλασσας στην βάση του πύργου	10 m
Διάμετρος του πλωτήρα πάνω από το επίπεδο της κωνικής περιοχής	6.5 m
Διάμετρος του πλωτήρα κάτω από το επίπεδο της κωνικής περιοχής	9.3 m
Μάζα πλωτήρα συμπεριλαμβανομένου του έρματος	7466330 kg
Κέντρο μάζας πλωτήρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας	89.9155

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά πλωτήρα OC-3

Η πλωτή κατασκευή προσδένεται με ένα σύστημα τριών αλυσιδωτών αγκυρώσεων (moorings lines), για να αποφευχθεί να παρασυρθεί από την αρχική της θέση λόγω των υδροδυναμικών φορτίσεων. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Αριθμός αγκυρώσεων	3
Γωνία μεταξύ των αγκυρώσεων	120°
Βάθος πρόσδεσης αγκυρώσεων, κάτω από το επίπεδο της θάλασσας	320 m
Σημείο πρόσδεσης στον πλωτήρα, κάτω από το επίπεδο της θάλασσας	70 m
Διάμετρος γραμμών αγκυρώσεων	0.09 m
Μήκος γραμμών αγκυρώσεων	853.87 m

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά γραμμών αγκυρώσεων

4.2 Μοντέλο πτερυγίων πλωτήρα

Τα πτερύγια, είναι τοποθετημένα στον πλωτήρα αρκετά μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Ως όριο βάθους τοποθέτησης μπορούν τα οριστούν τα 120 μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2.

Αρχικά ορίζονται τα μητρώα περιστροφής $R_1^{(q)}$, $R_2^{(q)}$, $R_3^{(q)}$ γύρω από τους άξονες x, y, z για γωνία q :

$$R_1^q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos q & -\sin q \\ 0 & \sin q & \cos q \end{bmatrix}, R_2^q = \begin{bmatrix} \cos q & 0 & \sin q \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin q & 0 & \cos q \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$R_3^q = \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & 0 \\ \sin q & \cos q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Έχοντας ως δεδομένο κάθε χρονική στιγμή t τις 3 στροφές ($q1, q2, q3$) και τις 3 μετακινήσεις ($q4, q5, q6$) του πλωτήρα από το εκάστοτε μοντέλο, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η θέση του πτερυγίου $R_{plate,loc}$ κάθε χρονική στιγμή t στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων :

$$R_{plate,loc} = \begin{bmatrix} q4(t) \\ q5(t) \\ q6(t) \end{bmatrix} + R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot R_{conv,n} \cdot (AT_{loc,n} + R_3^{theta,n} \cdot r_{local}) \quad (4.2)$$

όπου,

$R_{conv,n}$ μητρώο στροφών για την μεταφορά του εκάστοτε πτερυγίου n από το γενικό σύστημα συντεταγμένων στο τοπικό.

$AT_{loc,n}$ διάνυσμα αρχικής θέσης, πριν την μεταβολή του συστήματος, του εκάστοτε πτερυγίου n ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

$R_3^{theta,n}$ είναι η γωνία ελέγχου της γωνίας προσβολής AOA για κάθε πτερυγίο n ως προς τον άξονα $z'z$ του τοπικού συστήματος συντεταγμένων.

r_{local} είναι ένα σημείο πάνω στο επίπεδο του πτερυγίου στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Ωστόσο, ο υπολογισμός της ταχύτητας U_{plate} του πτερυγίου στο γενικό σύστημα, λαμβάνει μέρος στην αρχή των αξόνων $(0, 0, 0)$, δηλαδή η επιφάνεια της θάλασσας. Άρα, το διάνυσμα r_{local} παίρνει μηδενικές τιμές, επομένως η εξίσωση 4.2 μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$R_{plate,loc} = \begin{bmatrix} q4(t) \\ q5(t) \\ q6(t) \end{bmatrix} + R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot R_{conv,n} \cdot AT_{loc,n} \quad (4.3)$$

Συνεπώς, η θέση του πτερυγίου $R_{plate,loc}$ μπορεί να οριστεί στο γενικό σύστημα συντεταγμένων, αρκεί το διάνυσμα $AT_{loc,n}$ να εκφραστεί ως προς το ίδιο σύστημα:

$$AT_{glob,n} = R_{conv,n} \cdot AT_{loc,n} \quad (4.4)$$

όπου, $AT_{glob,n}$ το διάνυσμα που περιέχει την αρχική θέση του κάθε πτερυγίου n στο γενικό σύστημα. Επομένως η θέση και η ταχύτητα του πτερυγίου στο γενικό σύστημα συντεταγμένων ορίζεται:

$$R_{plate,glo} = \begin{bmatrix} q4(t) \\ q5(t) \\ q6(t) \end{bmatrix} + R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot AT_{glo,n} \quad (4.5)$$

$$U_{plate} = \frac{dR_{plate,glo}}{dt} = d \frac{(R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot AT_{glo,n})}{dt} \quad (4.6)$$

Η συνολική σχετική ταχύτητα, στο γενικό σύστημα, μεταξύ της ταχύτητας του πτερυγίου U_{plate} όταν κινείται μέσα σε ένα ρευστό ταχύτητας U_{wf} ορίζεται ως εξής:

$$W_{effG} = U_{wf} - U_{plate} \quad (4.7)$$

Στο βάθος που πραγματοποιείται η τοποθέτηση των πτερυγίων, θεωρείται ότι η ταχύτητα του ρευστού είναι αμελητέα, επομένως, η εξίσωση 4.7 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$W_{effG} = -U_{plate} \quad (4.8)$$

Για κάθε εξεταζόμενη γεωμετρία πτερυγίου δημιουργείται και ένα διάνυσμα, για κάθε άξονα x, y, z του γενικού συστήματος, μέσω του οποίου μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του πτερυγίου στο τοπικό σύστημα:

$$i_{glo} = R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot R_{conv,n} \cdot R_3^{theta,n} \cdot i_{uni} \quad (4.9)$$

$$j_{glo} = R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot R_{conv,n} \cdot R_3^{theta,n} \cdot j_{uni} \quad (4.10)$$

$$k_{glo} = R_1^{q1(t)} \cdot R_2^{q2(t)} \cdot R_3^{q3(t)} \cdot R_{conv,n} \cdot R_3^{theta,n} \cdot k_{uni} \quad (4.11)$$

όπου

i_{glo} , j_{glo} και k_{glo} μοναδιαία διανύσματα στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του πτερυγίου.

Επομένως η τοπική ταχύτητα W_{effL} για κάθε άξονα του τοπικού συστήματος ορίζεται ως εξής:

$$W_{effL,x} = W_{effG} \cdot i_{glo} \quad (4.12)$$

$$W_{effL,y} = W_{effG} \cdot j_{glo} \quad (4.13)$$

$$W_{effL,z} = W_{effG} \cdot k_{glo} \quad (4.14)$$

Η γωνία προσβολής AOA ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των συνιστωσών x και y της τοπικής σχετικής ταχύτητας του πτερυγίου και του επιπέδου της πλάκας:

$$AOA = \tan^{-1} \frac{W_{effL,x}}{W_{effL,y}} \quad (4.15)$$

Στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, θεωρείται ότι κατά μήκος του άξονα $z'z$ η επίδραση της ταχύτητας στις υπολογιζόμενες δυνάμεις είναι μηδαμινή, επομένως πραγματοποιείται η απαλοιφή της. Συνεπώς, υπολογίζεται η ενεργή σχετική ταχύτητα του πτερυγίου στο γενικό σύστημα ως εξής:

$$W_{effG,xy} = W_{effL,x} \cdot i_{glo} + W_{effL,y} \cdot j_{glo} \quad (4.16)$$

Ωστόσο, η εξίσωση 4.16 δίνει ως αποτέλεσμα καθαρό αριθμό, δίχως να ορίζεται η διεύθυνση της ταχύτητας. Επομένως, δημιουργήθηκε ένα μοναδιαίο διάνυσμα ed το οποίο περιέχει την κατεύθυνση της ταχύτητας του πτερυγίου στο γενικό σύστημα αξόνων:

$$ed = \frac{W_{effG,xy}}{|W_{effG,xy}|} \quad (4.17)$$

Το διάνυσμα αυτό περιέχει επίσης και την κατεύθυνση της δύναμης αντίστασης Drag, η οποία ορίζεται:

$$F_{Drag} = \frac{1}{2} \rho C_D A ed \left((W_{effL,x})^2 + (W_{effL,y})^2 \right) \quad (4.18)$$

όπου,

A είναι η επιφάνεια του πτερυγίου (m^2).

ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3).

C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης του πτερυγίου. Όπως αναλύθηκε στο Κεφαλαίο 2 (εξίσωση 2.7) η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

$$C_D = 2 C_f + C_{Da} 2 \sin^2 AOA \quad (4.19)$$

Επίσης, επίδραση στην κίνηση του πτερυγίου προσφέρει και η δύναμη άνωσης Lift, της οποίας η κατεύθυνση, είναι κάθετη σε αυτή του διανύσματος της δύναμης αντίστασης. Για τον ορισμό της διεύθυνσης της, χρησιμοποιήθηκε ένα διάνυσμα el το οποίο θα είναι κάθετο σε αυτό της δύναμης αντίστασης. Επομένως το διάνυσμα el προκύπτει από το εξωτερικό γινόμενο του ed με το μοναδιαίο διάνυσμα k_{glo} του γενικού συστήματος:

$$el = ed \times k_{glo} \quad (4.20)$$

Συνεπώς, η δύναμη άνωσης F_{Lift} υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{Lift} = \frac{1}{2} \rho C_L A el \left((W_{effL,x})^2 + (W_{effL,y})^2 \right) \quad (4.21)$$

όπου, C_L ο συντελεστής άνωσης του πτερυγίου. Όπως αναλύθηκε στο Κεφαλαίο 2 (εξίσωση 2.8) η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

$$C_L = \sin(2 AOA) \quad (4.22)$$

Ο υπολογισμός των δυνάμεων και των ροπών του κάθε πτερυγίου, προστίθεται στην εξίσωση Morison, η οποία διαμορφώνεται ως εξής:

$$\mathbf{F}_{Morison} = F_{Froude Krylov} + F_{Diffraction} + F_{Added mass} + (F_{Drag, Floater} + \mathbf{F}_{Plates}) \quad (4.23)$$

$$\mathbf{F}_{Plates} = (F_{Drag} + F_{Lift}) \quad (4.24)$$

4.3 Ορισμός διατάξεων πτερυγίων του πλωτήρα

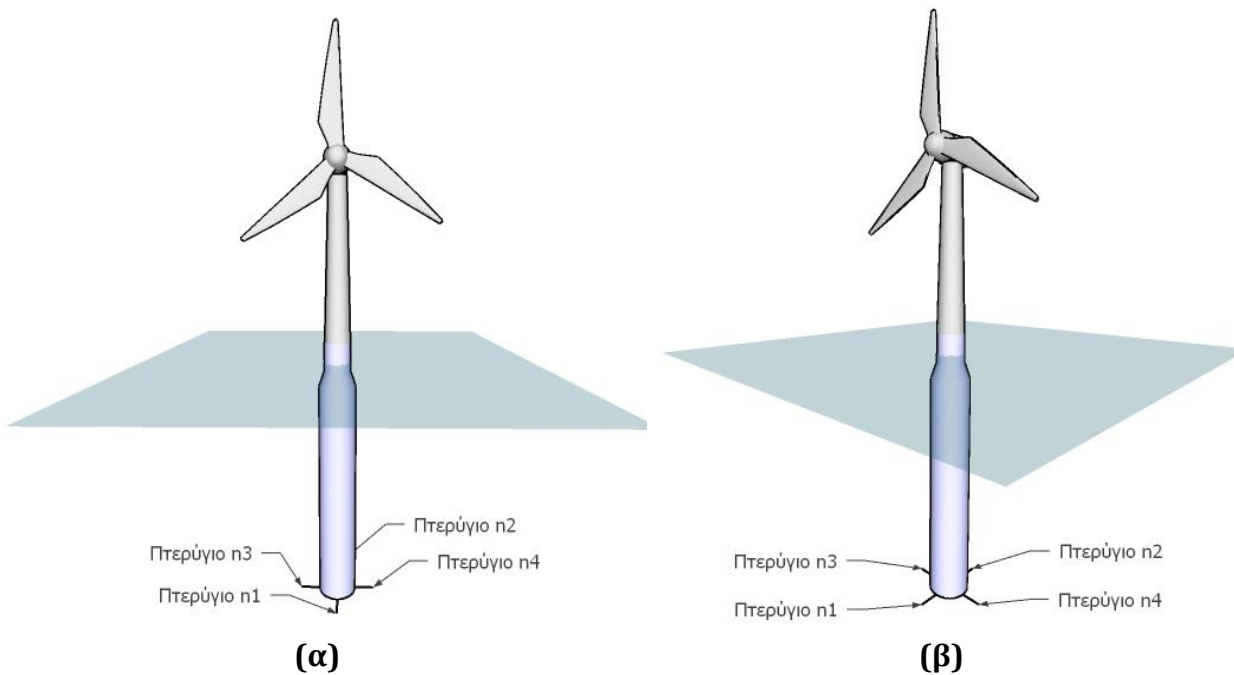
Για τον έλεγχο της ευστάθειας της πλωτής Α/Γ, χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικές διατάξεις πτερυγίων. Σκοπός τους είναι αρχικά η μείωση των στροφών pitch και yaw και κατά δεύτερον η μείωση της στροφής roll του πλωτήρα. Η μείωση των 3 μετακινήσεων surge, sway και heave λήφθηκε υπόψιν αλλά όχι σε τόσο σημαντικό βαθμό όσο οι στροφές.

Για την ελάχιστη δυνατή τιμή της μάζας του κάθε πτερυγίου επιλέχθηκε ανάμεσα από τα τοιχώματα να υπάρχει κενό. Το κάθε τοίχωμα αποτελείται από χάλυβα, υλικό με μεγάλη ακαμψία. Τα γενικά χαρακτηριστικά του κάθε πτερυγίου, που ισχύουν και για τις 4 διατάξεις, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.5:

Βάθος τοποθέτησης, υπό το επίπεδο της θάλασσας	120 m
Οριζόντια απόσταση τοποθέτησης στο αξονικό επίπεδο του πλωτήρα	10 m
Διαστάσεις πτερυγίου (ύψος / πλάτος)	20 m / 8 m
Επιφάνεια	160 m ²
Συνολικό πάχος τοιχωμάτων	0.02 m
Πυκνότητα χάλυβα	8000 kg/m ³
Μάζα	25600 kg
Ροπή αδράνειας πτερυγίου στον x'x άξονα	164731936 Nm
Ροπή αδράνειας πτερυγίου στον y'y άξονα	170570688 Nm
Ροπή αδράνειας πτερυγίου στον z'z άξονα	7543357.5 Nm

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά εκάστοτε πτερυγίου του πλωτήρα για τις 4 διατάξεις

Το βάθος τοποθέτησης των πτερυγίων στον πλωτήρα επιλέχθηκε να είναι το μέγιστο δυνατό, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή δύναμη. Η οριζόντια απόσταση από τον κάθετο άξονα του πλωτήρα ορίστηκε ούτως ώστε να θεωρείται εφικτή σε πραγματικές συνθήκες. Βέβαια, όσο μεγαλύτερη είναι η οριζόντια απόσταση τόσο μεγαλύτερες δυνάμεις θα αποδίδουν τα πτερύγια (Ενότητα 5.4). Επίσης, η επιφάνεια ορίστηκε και αυτή σε λογικά μεγέθη, η οποία όσο αυξάνεται τόσο μεγαλύτερες οι παραγόμενες δυνάμεις των πτερυγίων.



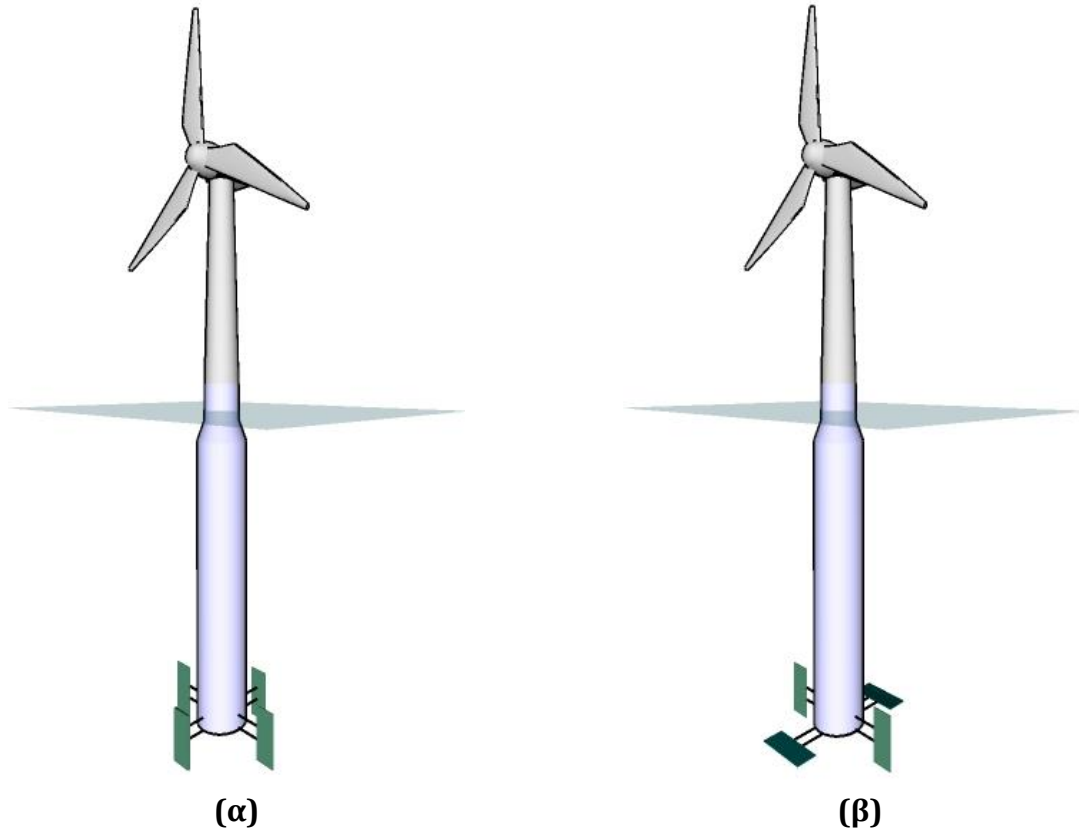
Σχήμα 4.1: Σημεία τοποθέτησης πτερυγίων στον πλωτήρα υπό το επίπεδο της θάλασσας 4.1α πρόσοψη και 4.1β προοπτική προβολή

Διάταξη Νο 1

Η διάταξη αυτή (Σχήμα 4.2α) αποτελείται από 4 πτερύγια ίδιου μεγέθους. Σκοπός της είναι αρχικά η μείωση της στροφής yaw και κατά δεύτερο λόγο της στροφής pitch του πλωτήρα. Η γωνία μεταξύ των τοποθετημένων πτερυγίων στον πλωτήρα ανέρχεται στις 90° . Σύμφωνα με την εξίσωση 4.2 το μητρώο στροφών $R_{conv,n}$, μέσω του οποίου το σύστημα μεταβαίνει από το γενικό στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, ορίστηκε για τα πτερύγια $n = 1, 2$ να είναι ίσο με $R_{conv,1-2} = 0$. Για τα πτερύγια $n = 3, 4$ ορίστηκε ίσο με $R_{conv,3-4} = R_3^{-\pi/2}$.

Διάταξη Νο 2

Η συγκεκριμένη διάταξη (Σχήμα 4.2β) αποτελείται από 4 πτερύγια. Δημιουργήθηκε κατά κύριο λόγο για την μείωση της γωνίας pitch και yaw και κατά δεύτερον της γωνίας roll του πλωτήρα. Η γωνία μεταξύ των τοποθετημένων πτερυγίων στον πλωτήρα ανέρχεται στις 90° . Το μητρώο στροφών $R_{conv,n}$ για τα πτερύγια $n = 1, 2$ ορίστηκε ίσο με $R_{conv,1-2} = R_1^{\pi/2}$. $R_3^{-\pi/2}$ ενώ για τα πτερύγια $n = 3, 4$ ορίστηκε ίσο με $R_{conv,3-4} = R_3^{-\pi/2}$.



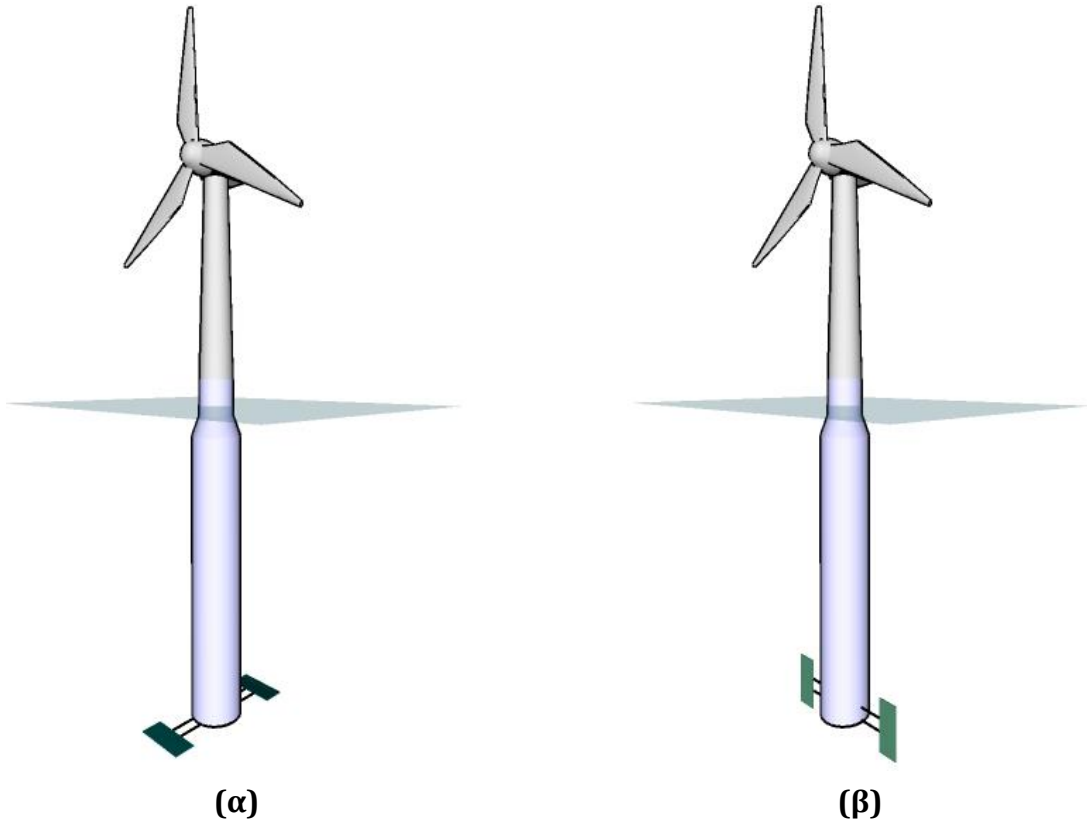
Σχήμα 4.2: Διατάξεις 4 πτερυγίων, 4.2α Νο1 και 4.2β Νο2

Διάταξη Νο 3

Η διάταξη αυτή (Σχήμα 4.3α) αποτελείται από 2 πτερύγια. Δημιουργήθηκε για την μείωση της γωνίας pitch του πλωτήρα. Η γωνία μεταξύ των 2 πτερυγίων, τοποθετημένα στον πλωτήρα, ανέρχεται στις 180°. Το μητρώο στροφών $R_{conv,n}$ για τα πτερύγια $n = 1, 2$ ορίστηκε ίσο με $R_{conv,1-2} = R_1^{\pi/2} \cdot R_3^{-\pi/2}$

Διάταξη Νο 4

Η διάταξη αυτή (Σχήμα 4.3β) αποτελείται από 2 πτερύγια. Δημιουργήθηκε κυρίως για την μείωση της γωνίας yaw και κατά δεύτερον της γωνίας pitch του πλωτήρα. Η γωνία μεταξύ των 2 πτερυγίων, τοποθετημένα στον πλωτήρα, ανέρχεται στις 180°. Το μητρώο στροφών $R_{conv,n}$ για τα πτερύγια $n=3, 4$ ορίστηκε ίσο με $R_{conv,3-4} = R_3^{-\pi/2}$.



Σχήμα 4.3: Διατάξεις 2 πτερυγίων, 4.3α Νο3 και 4.3β Νο4

Κεφάλαιο 5

Δεδομένου του ότι η πλωτή ανεμογεννήτρια τοποθετείται κυρίως ανοιχτά του πελάγους και σε μεγάλα βάθη, οι διακυμάνσεις του ανέμου και του κύματος είναι συνήθως υψηλές. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Κανονισμό IEC [21] μπορούν να υπάρξουν διαφορετικές περιπτώσεις συνδυασμού ανέμου – κύματος, οι οποίες είτε να διεγείρουν ελάχιστα είτε αρκετά την πλωτή Α/Γ. Η προσομοίωση των διαφόρων συνθηκών πραγματοποιήθηκε κυρίως με χρήση του λογισμικού hGAST (Ενότητα 3.2). Το μοντέλο ROM (Ενότητα 3.1), λόγω της δυνατότητας του να προσομοιώνει μόνο τον άνεμο (χωρίς κύμα) αλλά με αρκετά μειωμένο υπολογιστικό χρόνο, θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση αποτελεσμάτων με το μοντέλο hGAST. Σκοπός της σύγκρισης αυτής, είναι να παρουσιαστεί κατά πόσο μπορεί το μοντέλο ROM, σε αρκετά μικρότερο χρόνο, να αποδώσει παρόμοια αποτελέσματα με το hGAST.

5.1 Προσομοίωση συμβολής των πτερυγίων με χρήση μοντέλου hGAST

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει διάφορες καταστάσεις ανέμου και κύματος, ενώ οι γραμμές αγκυρώσεων λογίζονται ως δομικά στοιχεία. Για την κάθε διάταξη πτερυγίων, επιλέχθηκε να επιτυγχάνεται γωνία προσβολής ίση με $AOA = 90^\circ$, ώστε να μεγιστοποιείται ο συντελεστής αντίστασης με επακόλουθο τη μέγιστη δύναμη αντίστασης και του μηδενισμού της δύναμης άνωσης. Αυτό καθίσταται δυνατόν, μέσω της γωνίας ελέγχου $R_3^{theta,n}$ (Πίνακας 5.1) η οποία παραμένει σταθερή για όλη την διάρκεια της εκάστοτε προσομοίωσης. Ωστόσο, επειδή η γωνία ελέγχου παραμένει αμετάβλητη, δεν είναι εφικτό να εξασφαλίζεται διαρκώς τιμή γωνίας προσβολής ίση με 90° , λόγω της μεταβλητότητας της κατεύθυνσης του ανέμου – κύματος σε κάθε προσομοίωση. Αυτό έχει ως συνέπεια, η δύναμη αντίστασης να μην είναι η μέγιστη δυνατή.

Διάταξη / πτερύγιο	No 1	No 2	No 3	No 4
n1	0	85.23	85.23	-
n2	0	85.23	85.23	-
n3	0	0	-	0
n4	0	0	-	0

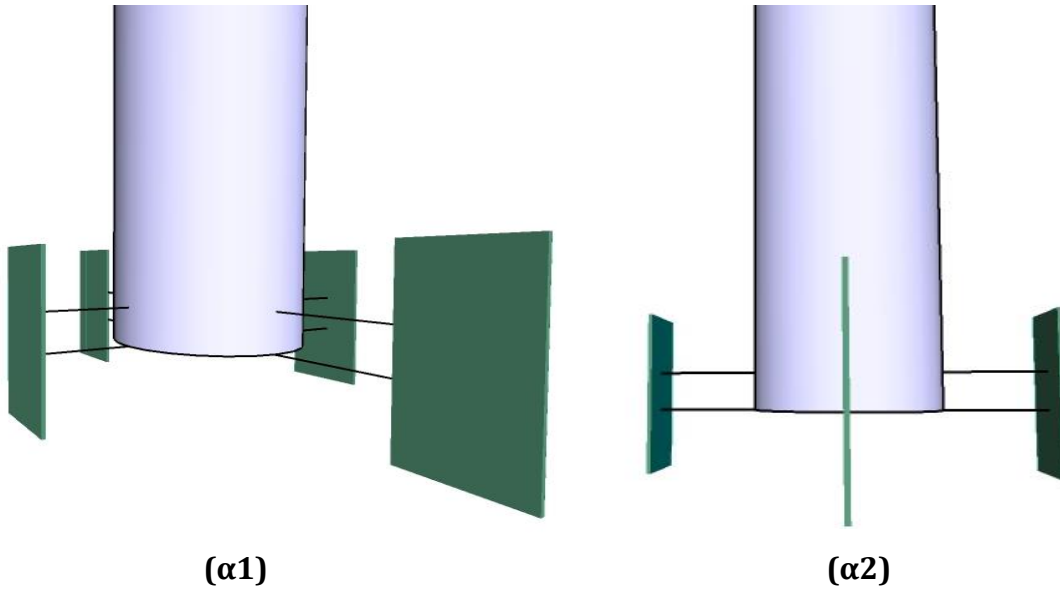
Πίνακας 5.1: Γωνία ελέγχου ($^\circ$) για κάθε πτερύγιο κάθε διάταξης

Για τα πτερύγιο $n = 1, 2$ των διατάξεων No2 και No3, η γωνία ελέγχου υπολογίζεται ως εξής:

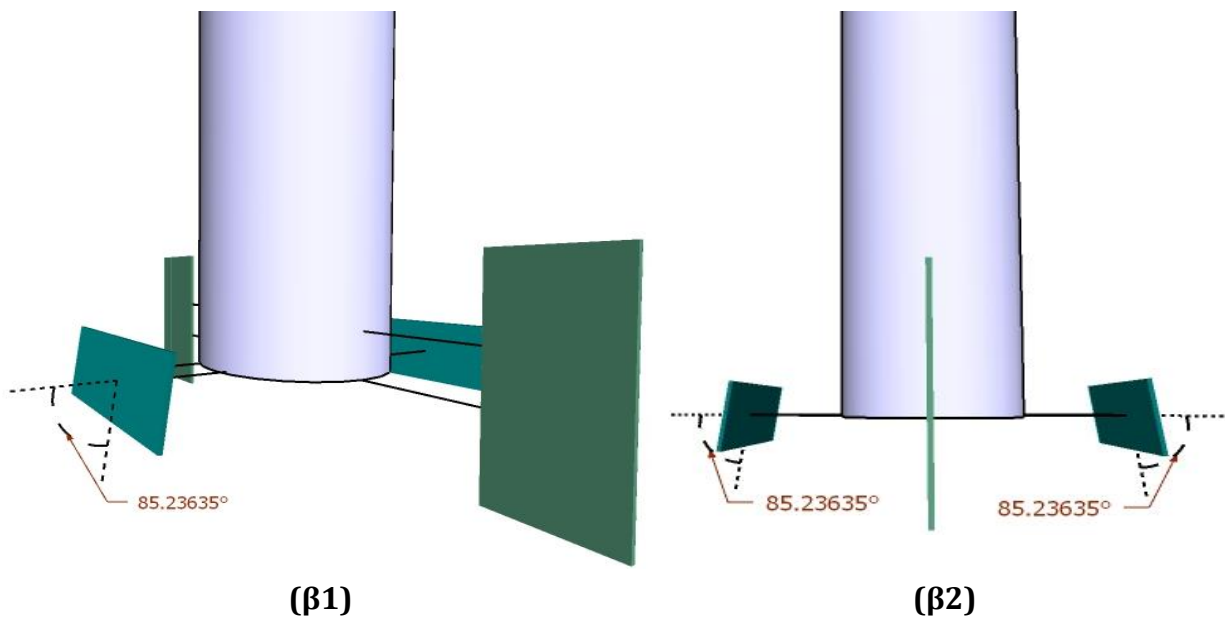
$$R_3^{theta,n} = 90^\circ - AOA_n = \tan^{-1}(z_n/x_n) \quad (5.1)$$

όπου, z_n είναι το βάθος τοποθέτησης του κάθε πτερυγίου n (m) και x_n η οριζόντια απόσταση του πτερυγίου n από το κάθετο επίπεδο του πλωτήρα (m).

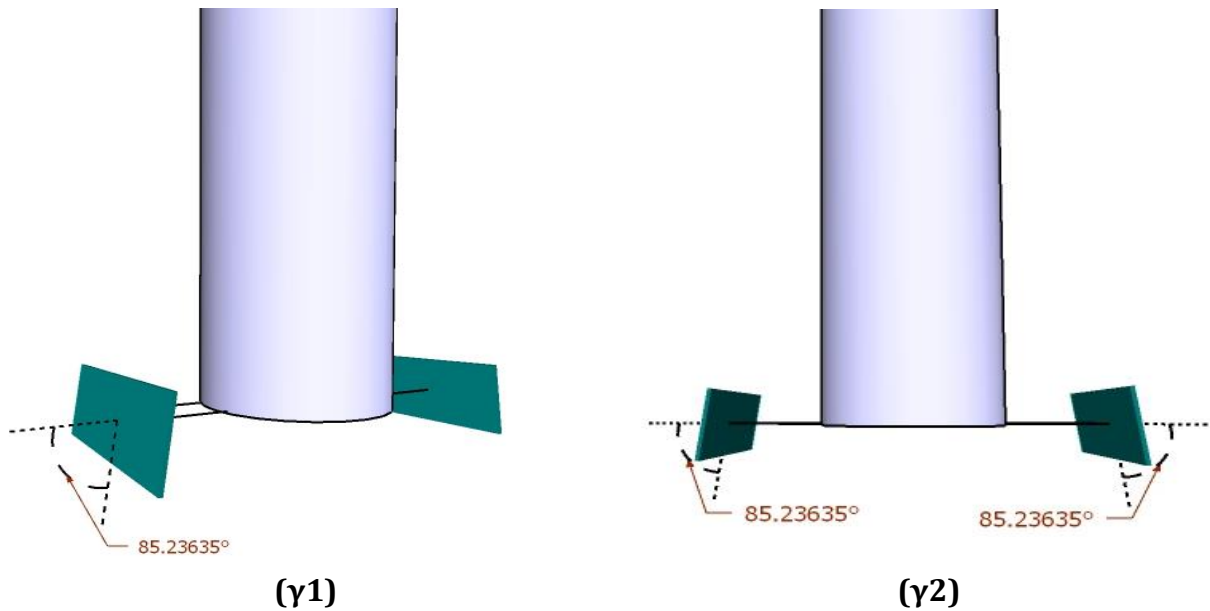
Για τα πτερύγια $n = 3, 4$ των διατάξεων No1, No2 και No4 επιλέγεται η γωνία $R_3^{theta,n} = 0^\circ$.



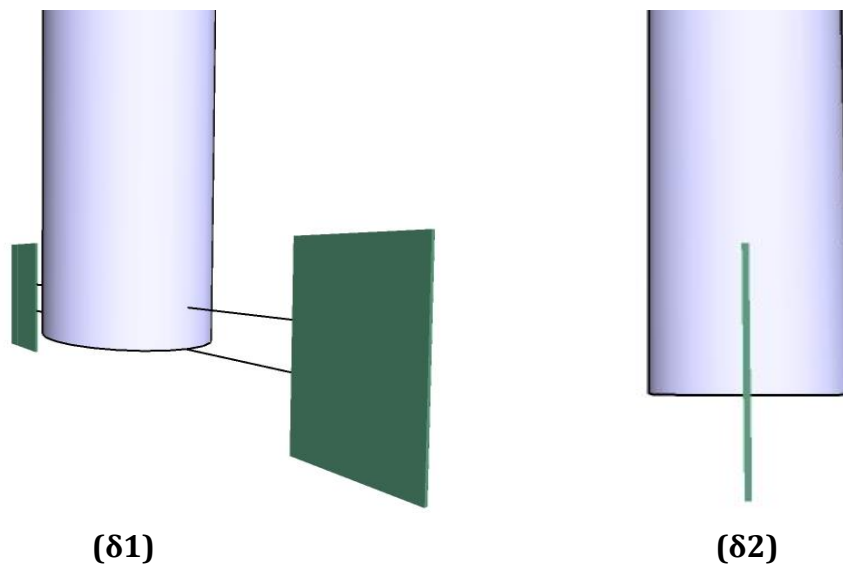
Σχήμα 5.1: Διάταξη No1 με ενσωματωμένη την γωνία ελέγχου, (α1) προοπτική προβολή και (α2) πλάγια όψη



Σχήμα 5.2: Διάταξη No2 με ενσωματωμένη την γωνία ελέγχου, (β1) προοπτική προβολή και (β2) πλάγια όψη



Σχήμα 5.3: Διάταξη Νο3 με ενσωματωμένη την γωνία ελέγχου, (γ1) προοπτική προβολή και (γ2) πλάγια όψη



Σχήμα 5.4: Διάταξη Νο4 με ενσωματωμένη την γωνία ελέγχου, (δ1) προοπτική προβολή και (δ2) πλάγια όψη

Ωστόσο, λόγω του μεγάλου όγκου συνδυασμού των διατάξεων με περιπτώσεις ανέμου και κύματος, η επιλογή παρουσίασης των προσομοιώσεων θα γίνει με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να αναδεικνύεται η συμβολή των διατάξεων είτε στην βελτίωση είτε στην επιδείνωση της ευστάθειας της πλωτής Α/Γ. Διευκρινίζεται ότι στις γραφικές παραστάσεις η κάθε *Διάταξη* θα ορίζεται ως **Case** και η προσομοίωση χωρίς την επίδραση των πτερυγίων στον πλωτήρα θα ορίζεται ως **noplates**.

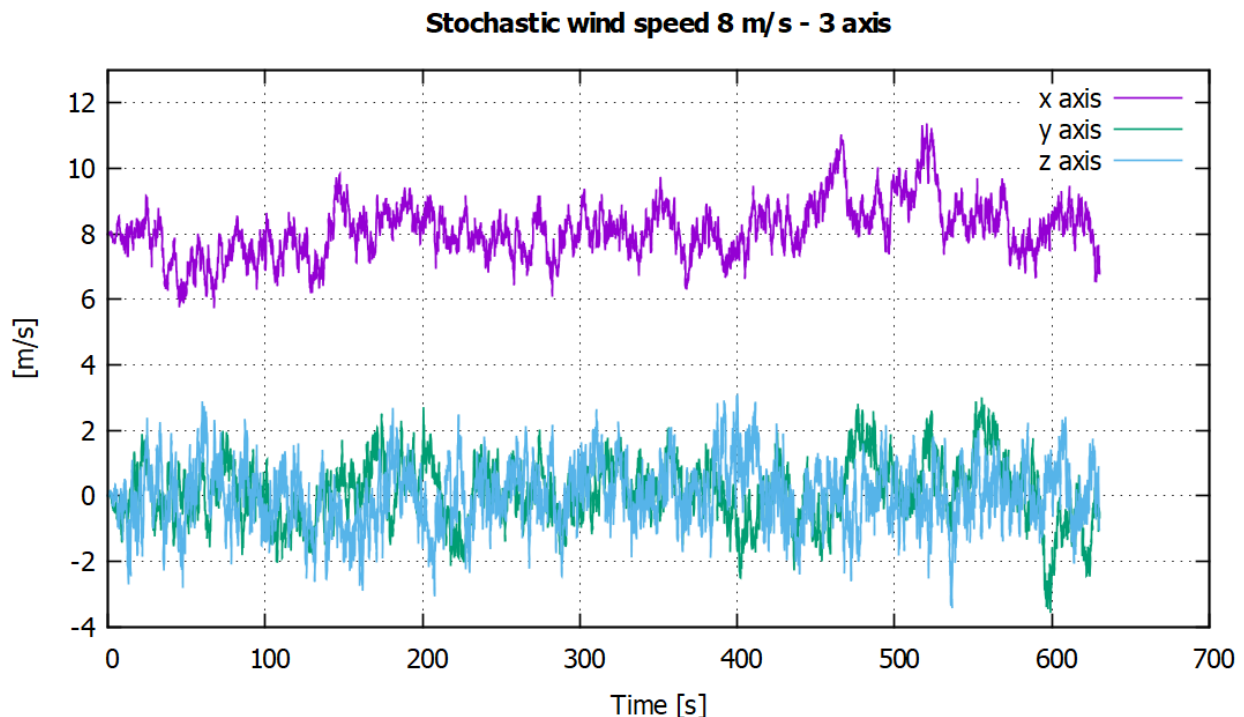
5.1.1 Στοχαστικός άνεμος – Κύμα τύπου JONSWAP

Στην προσομοίωση αυτή ο άνεμος και το κύμα παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις τιμές τους. Το κύμα είναι τύπου JONSWAP (JOint North-Sea WAve Project) και προσομοιώνει την στοχαστική συμπεριφορά των θαλάσσιων κυματισμών. Δεδομένου των δοσμένων τιμών του σημαντικού ύψους κύματος και της μέγιστης περιόδου κύματος, το φάσμα JONSWAP προσομοιώνει την «θαλάσσια καταιγίδα». Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στα 8 m/s, υπολογισμένο στο ύψος του δρομέα της Α/Γ, παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.5.

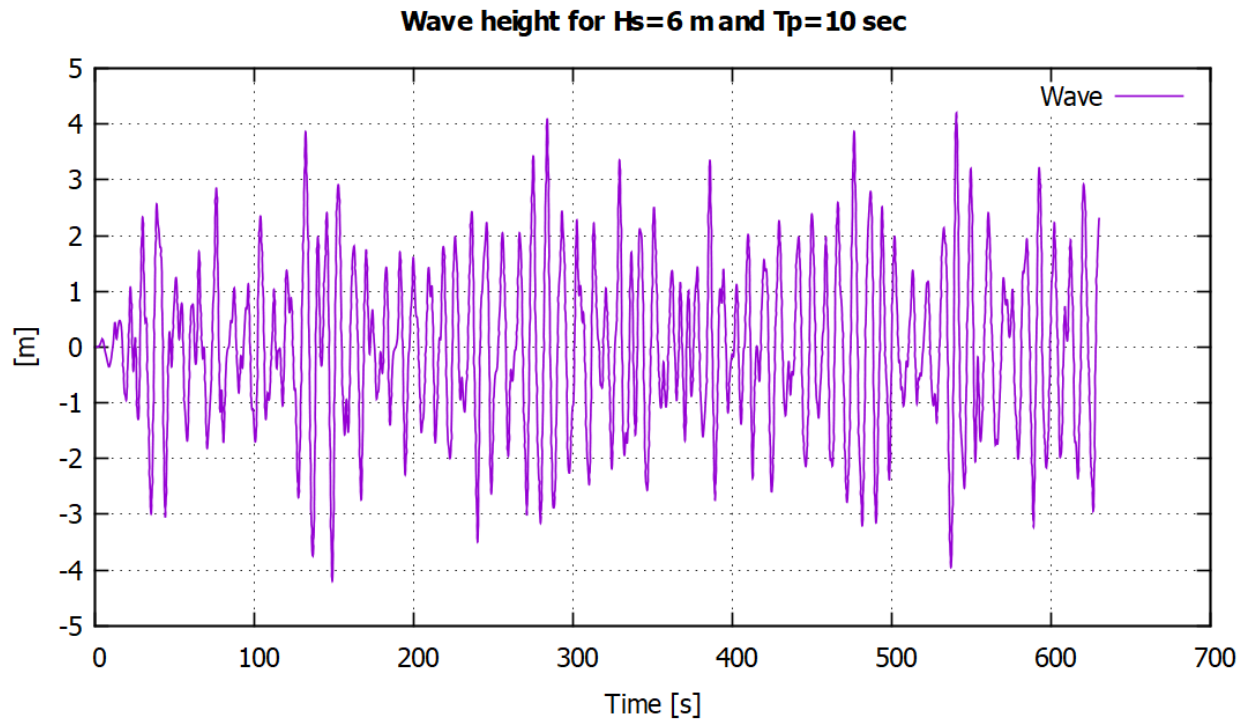
Τύπος ανέμου	Στοχαστικός
Ταχύτητα ανέμου	8 και 18 m/s
Τύπος κύματος	JONSWAP
Σημαντικό ύψος κύματος (H_s)	6 m
Μέγιστη περίοδος (T_p)	10 s
Διάρκεια προσομοίωσης	630 s

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά ανέμου και κύματος

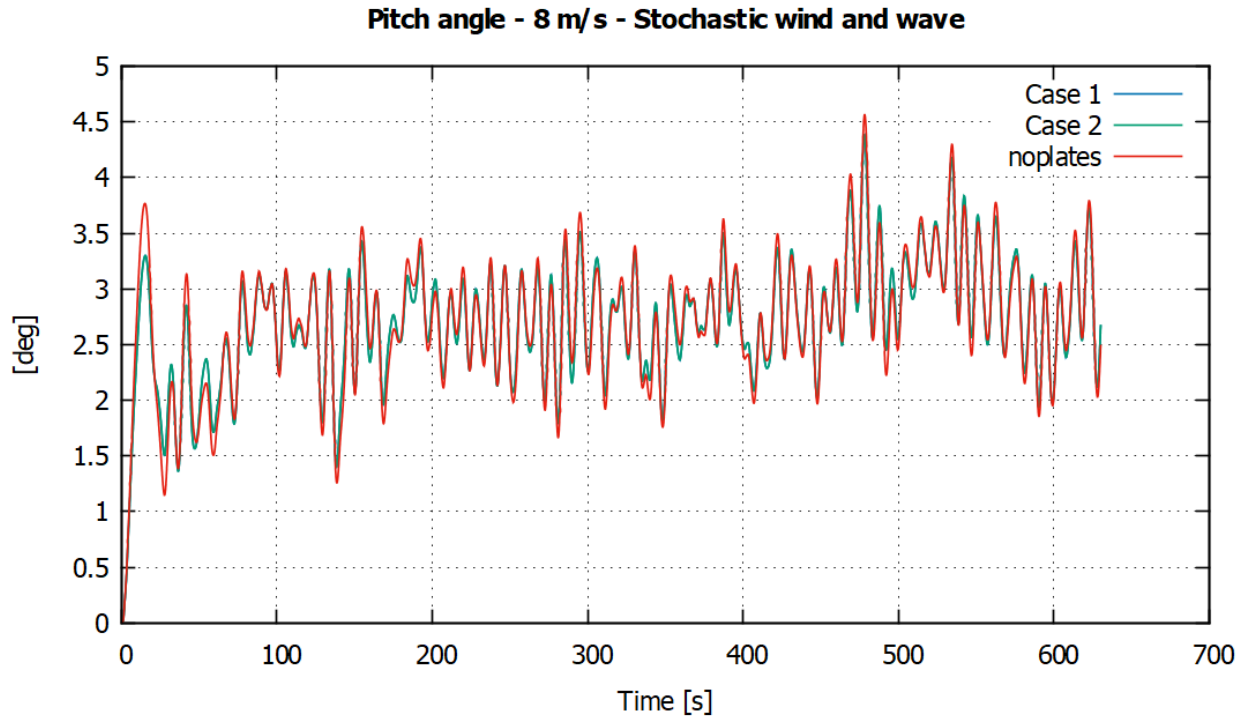
Ως σημαντικό ύψος κύματος H_s , ορίζεται η μέση τιμή ύψους του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων. Η μέγιστη περίοδος κύματος T_p σχετίζεται με το χρονικό σημείο όπου το κύμα θα έχει την μεγαλύτερη ενέργεια του. Όσο αυξάνεται το σημαντικό ύψος κύματος τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια των κυμάτων.



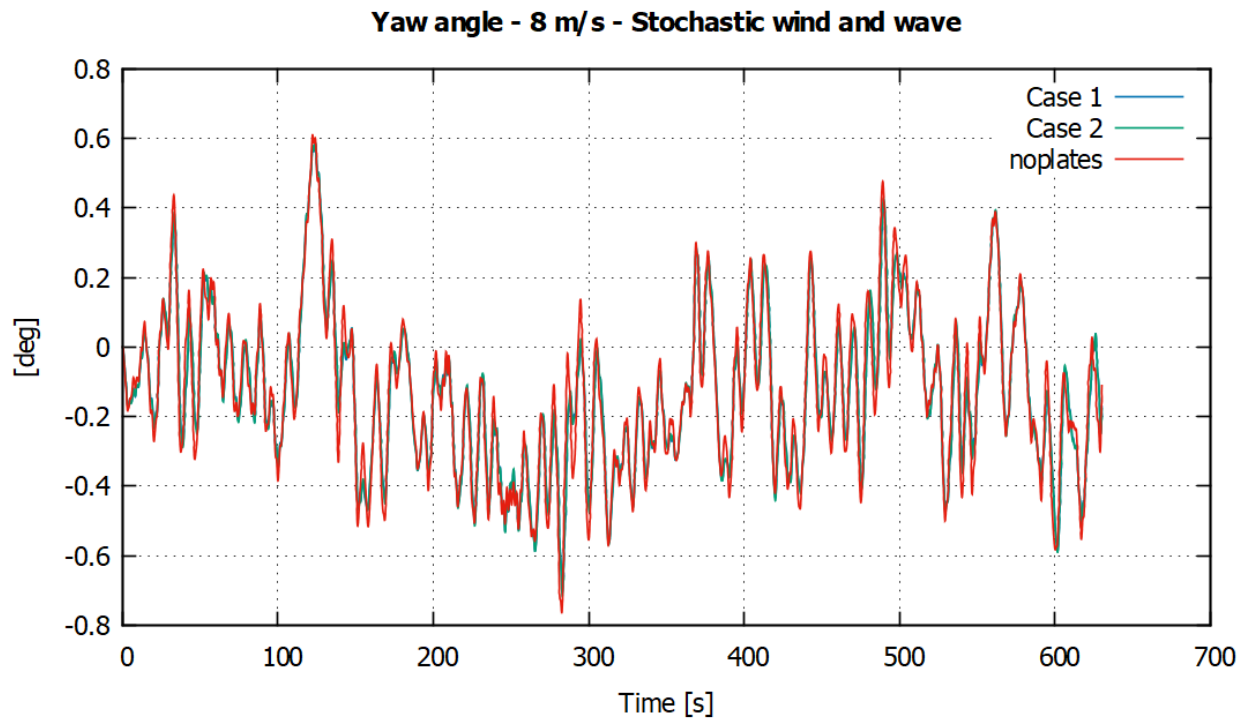
Σχήμα 5.5: Προφίλ των 3 συνιστωσών της ταχύτητας στοχαστικού ανέμου στα 8 m/s



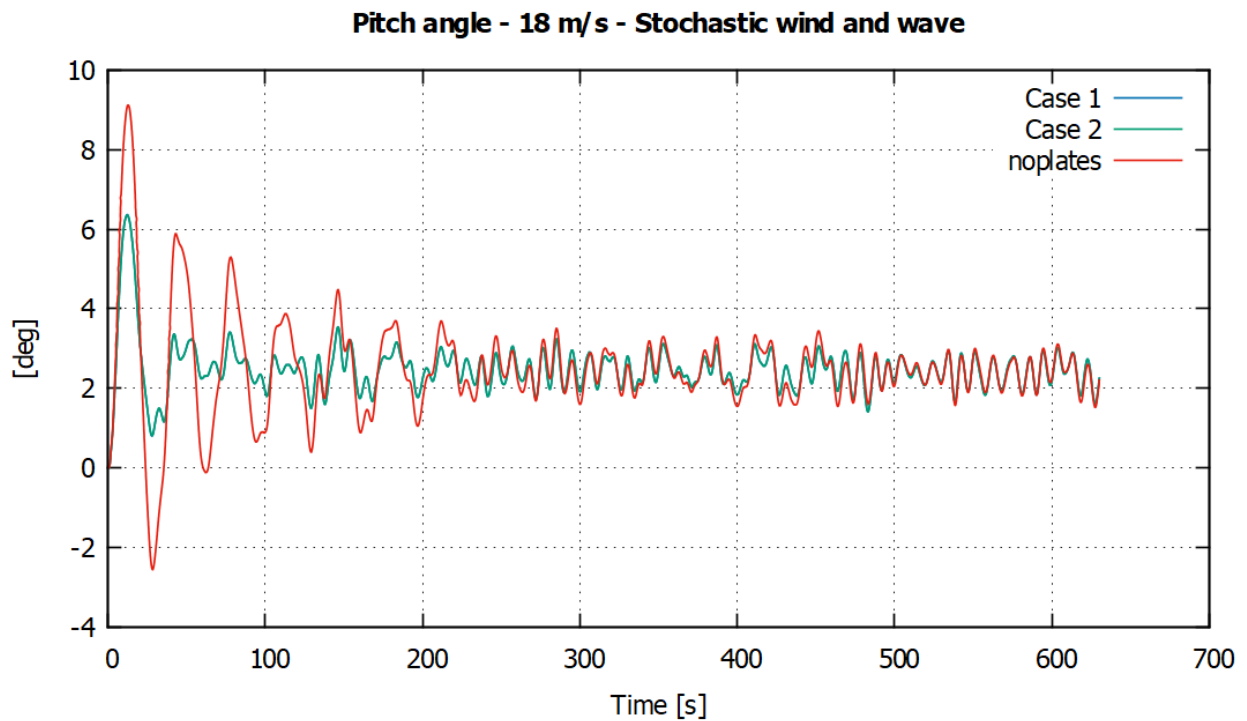
Σχήμα 5.6: Υψη κυματισμών για σημαντικό ύψος 6m και μέγιστη περίοδο 10s



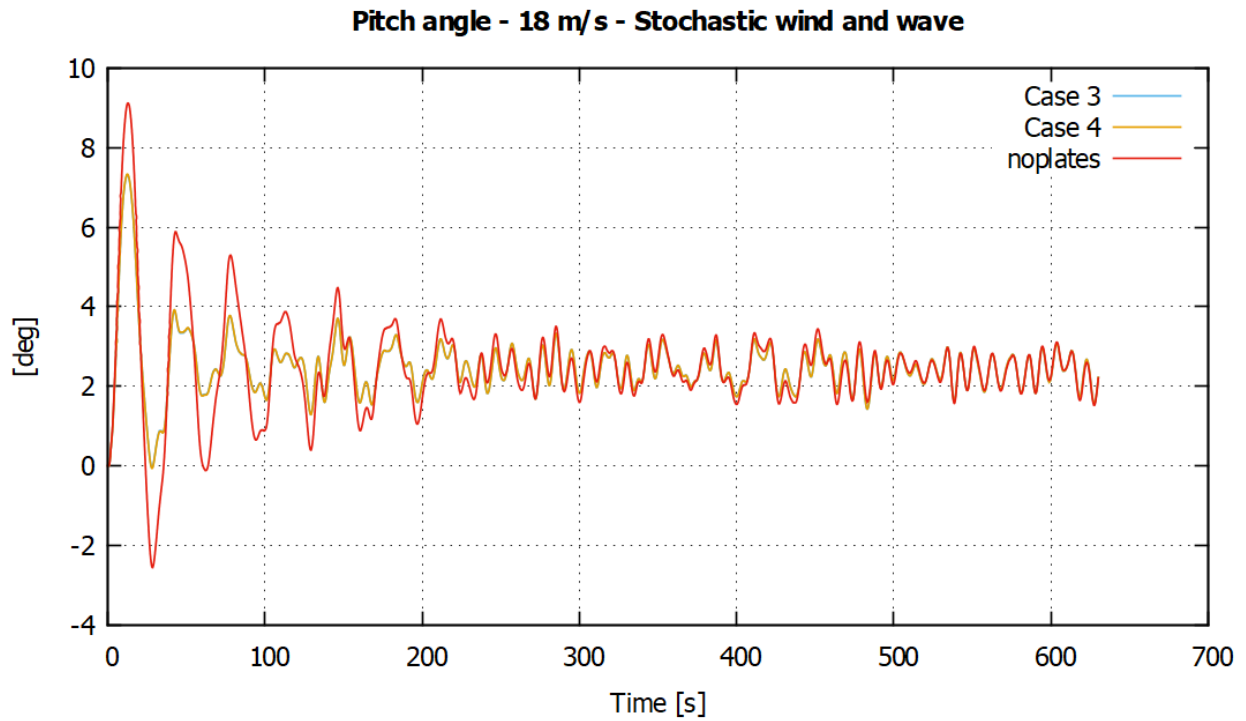
Σχήμα 5.7: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



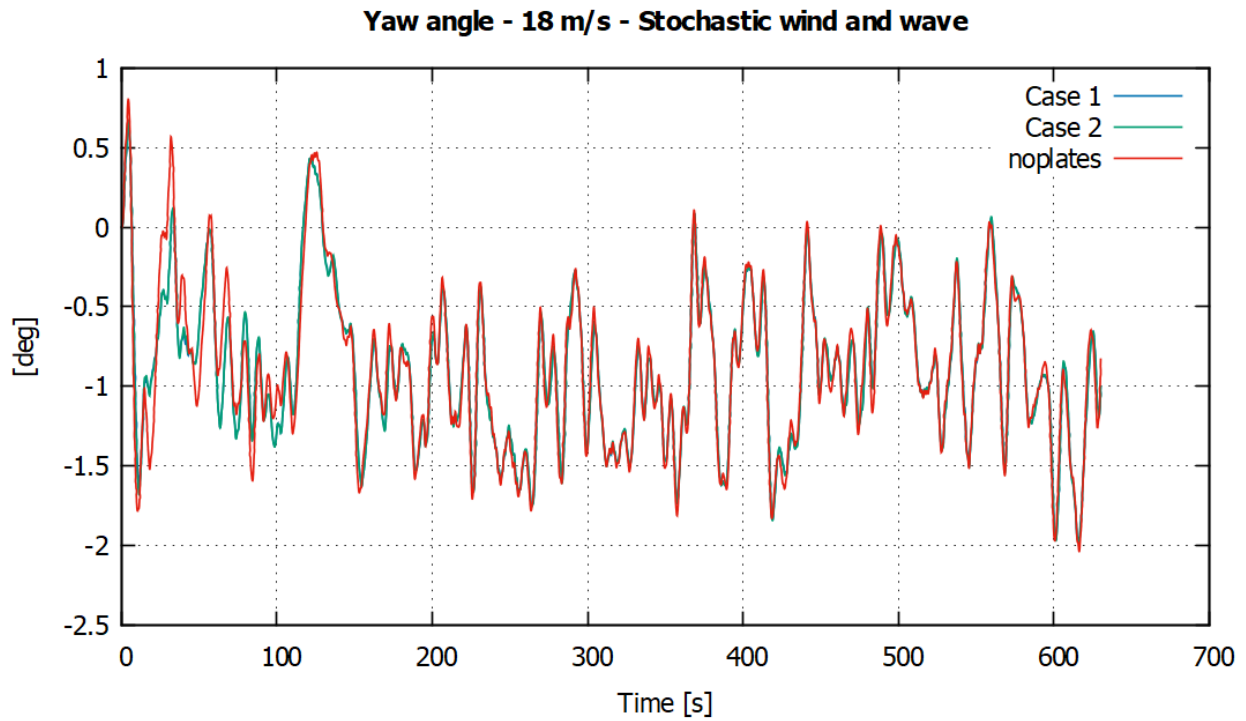
Σχήμα 5.8: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



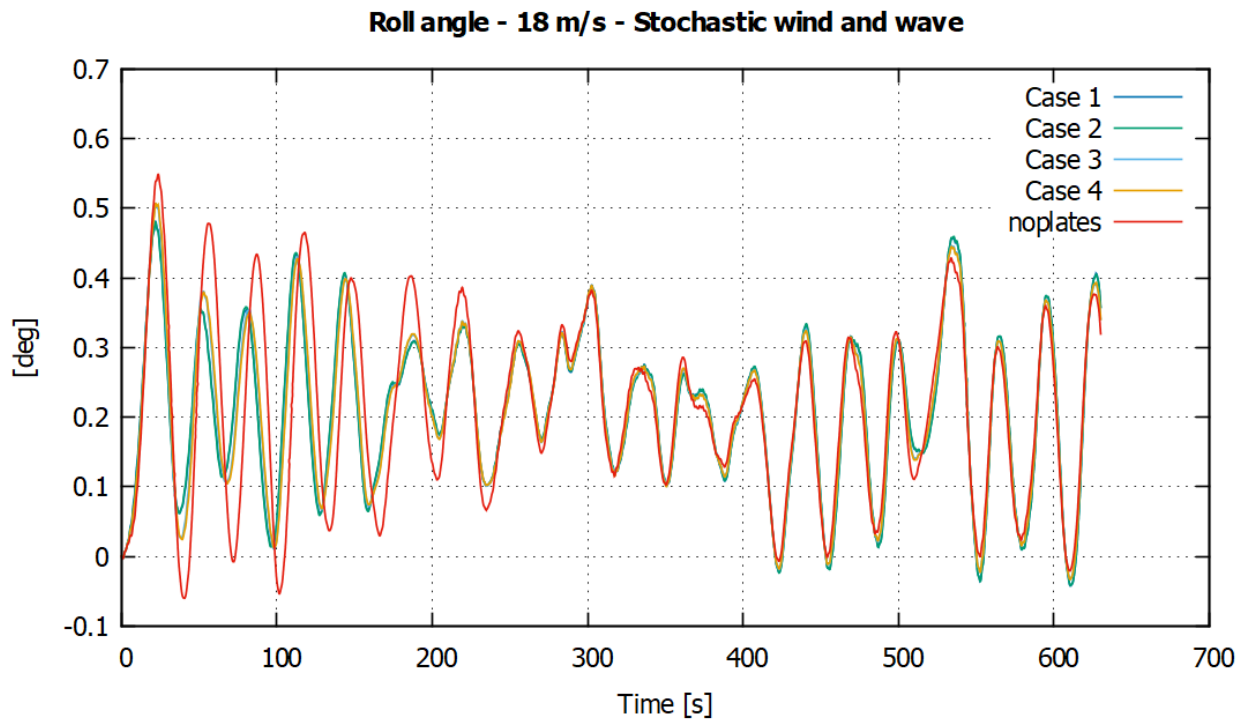
Σχήμα 5.9: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



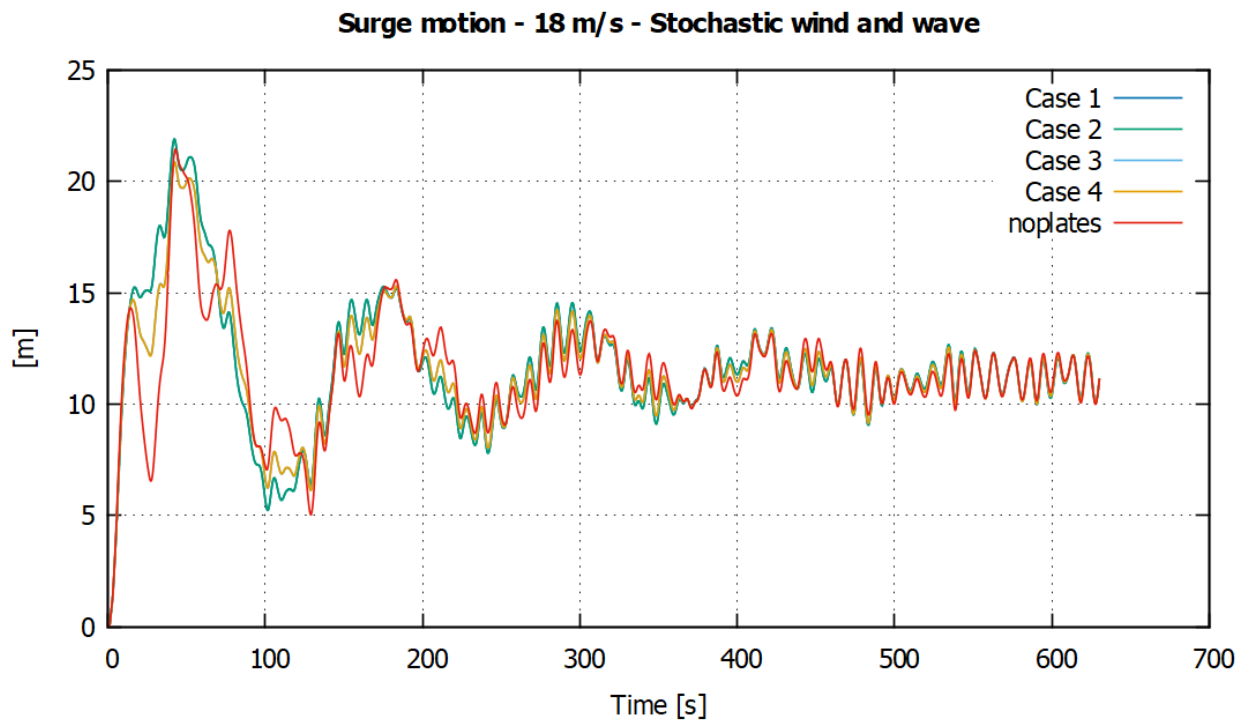
Σχήμα 5.10: Συμβολή των διατάξεων Νο 3, 4 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.11: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

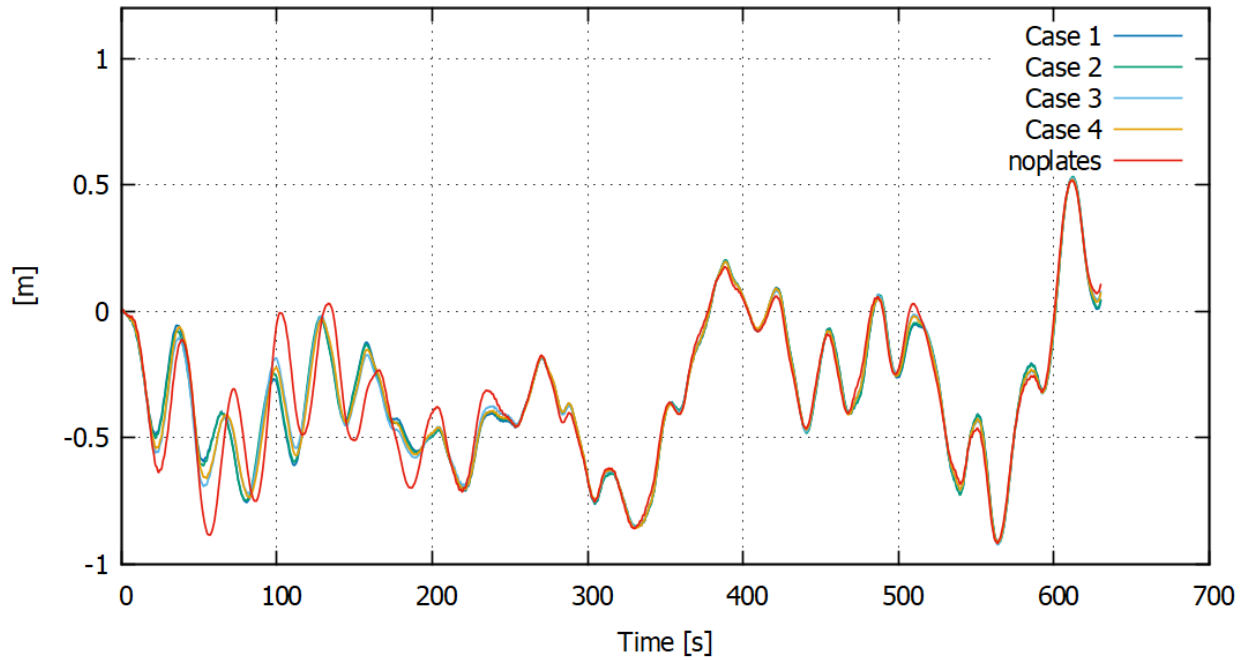


Σχήμα 5.12: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2, 3, 4 στην στρόφι roll της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



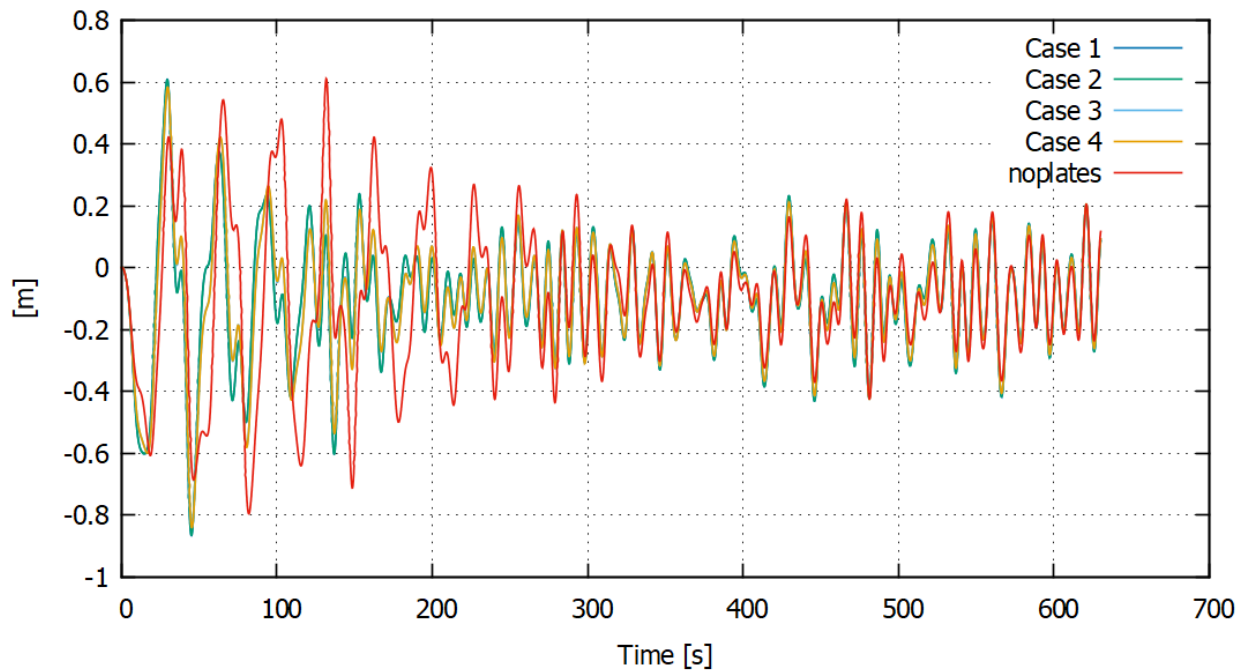
Σχήμα 5.13: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2, 3, 4 στην μετακίνηση surge της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Sway motion - 18 m/s - Stochastic wind and wave



Σχήμα 5.14: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2, 3, 4 στην μετακίνηση sway της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Heave motion - 18 m/s - Stochastic wind and wave



Σχήμα 5.15: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2, 3, 4 στην μετακίνηση heave της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Για ταχύτητα ανέμου ίση με 8 m/s, οι διατάξεις Νο1 και Νο2 μειώνουν αισθητά την στροφή pitch και yaw της πλωτής Α/Γ. Ωστόσο, όταν η ταχύτητα του ανέμου ισούται με 18 m/s, τότε η συμβολή και των 4 διατάξεων στην μείωση της στροφής pitch είναι αρκετά καλή, ειδικά από τις διατάξεις Νο1 και Νο2 που αποτελούνται από 4 πτερύγια κάθε μια. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία των 2 παραπάνω πτερυγίων, παράγοντας έτσι μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης (εξίσωση 4.18), λόγω της διπλάσιας εκμεταλλεζόμενης επιφάνειας. Οι στροφές yaw και roll μειώνονται, όχι όμως σε τέτοιο βαθμό όσο η pitch. Επίσης, η μετακίνηση surge του πλωτού συστήματος, αρχικά βελτιώνεται το ίδιο καλά και από τις 4 διατάξεις πτερυγίων, όμως έπειτα η συμβολή τους στην ευστάθεια είναι μηδαμινή, επηρεάζοντας μόνο τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Η μετακίνηση heave μειώνεται ενώ η sway μειώνεται σε πολύ μικρότερο βαθμό. Επομένως μπορεί τα πτερύγια να συμβάλλουν στην μείωση των τριών μετακινήσεων, όμως οι μετακινήσεις δεν αποτελούν σημαντικό σημείο βελτίωσης διότι οι μεταβολές τους στον χρόνο είναι αρκετά μικρές (έχουν αργή συχνότητα) επηρεάζοντας έτσι ελάχιστα το πλωτό σύστημα.

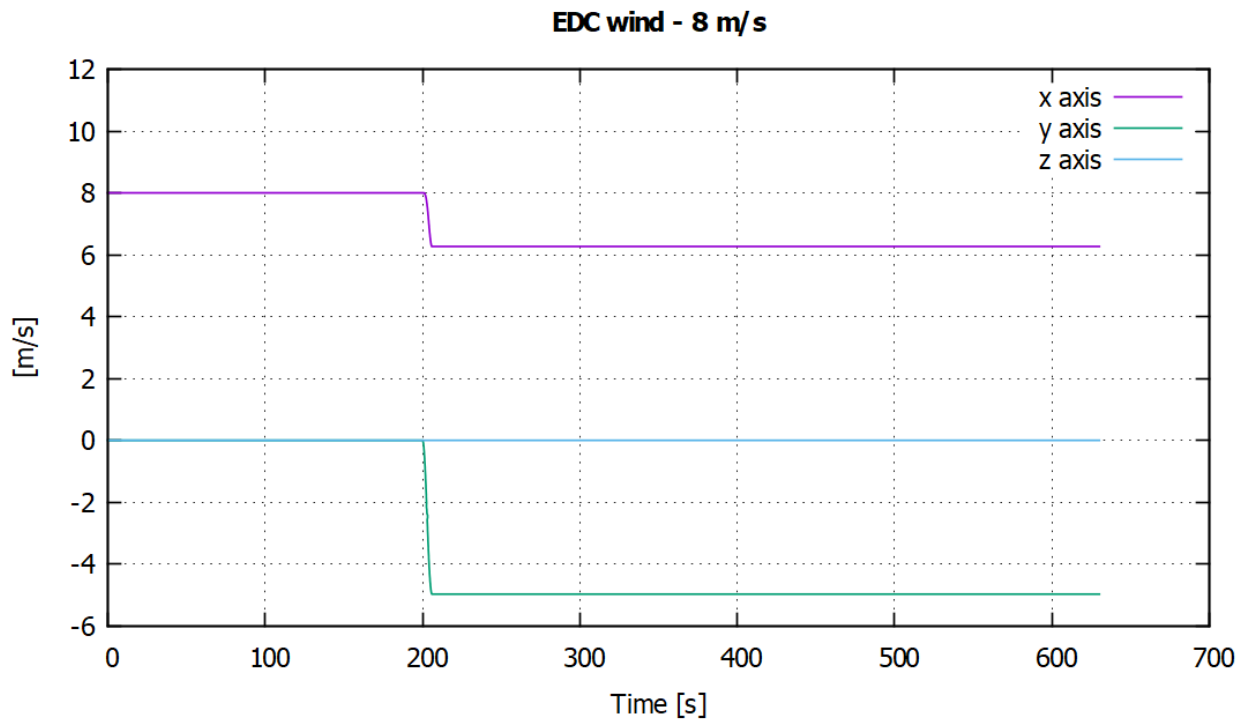
5.1.2 Άνεμος τύπου EDC - Κύμα τύπου JONSWAP

Στην προσομοίωση αυτή, σε συγκεκριμένο χρονικό σημείο η κατεύθυνση του ανέμου αρχίζει να μεταβάλλεται, μεταβάλλοντας όμως και την ταχύτητα του (EDC - Extreme Direction Change). Αφού πραγματοποιηθεί η αλλαγή αυτή, η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου παραμένει ως έχει.

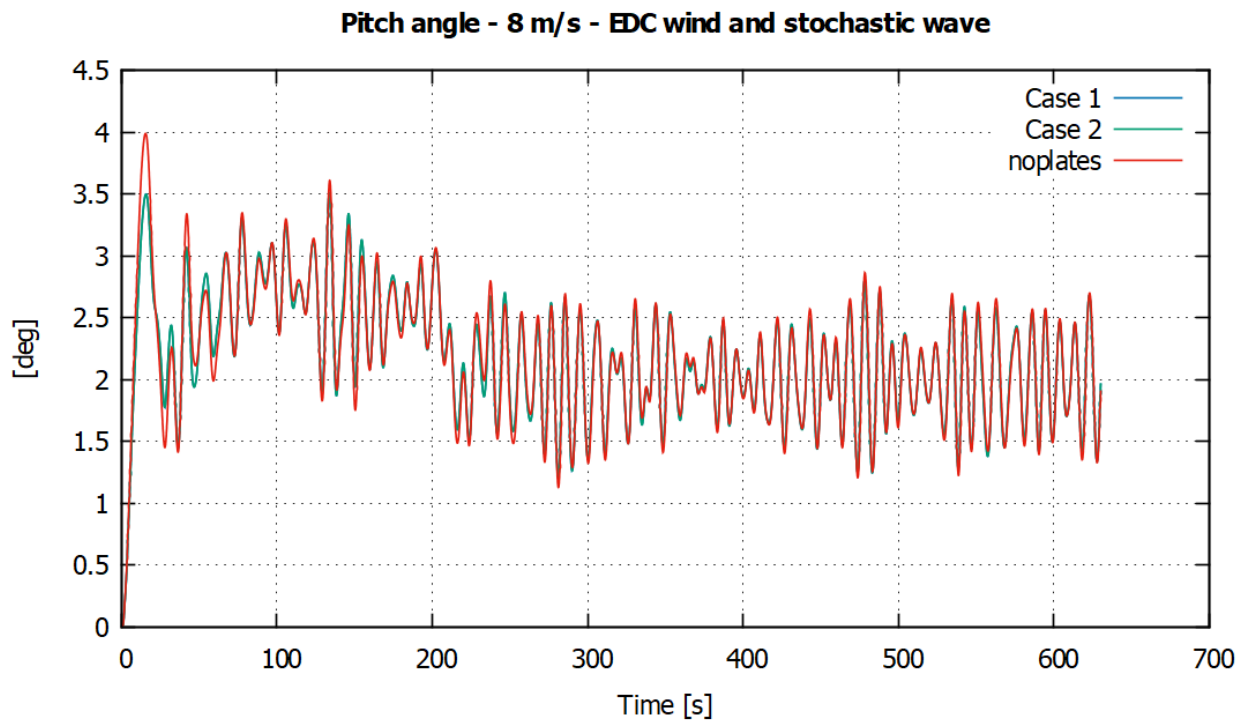
Τύπος ανέμου	Μεταβολή κατεύθυνσης (EDC)
Ταχύτητα ανέμου	8 και 18 m/s
Χρονικό σημείο μεταβολής κατεύθυνσης	200 s
Χρονική διάρκεια πραγματοποίησης μεταβολής κατεύθυνσης	6 s
Τύπος κύματος	JONSWAP
Σημαντικό ύψος κύματος (Hs)	6 m
Μέγιστη περίοδος (Tp)	10 s
Διάρκεια προσομοίωσης	630 s

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά ανέμου (EDC)

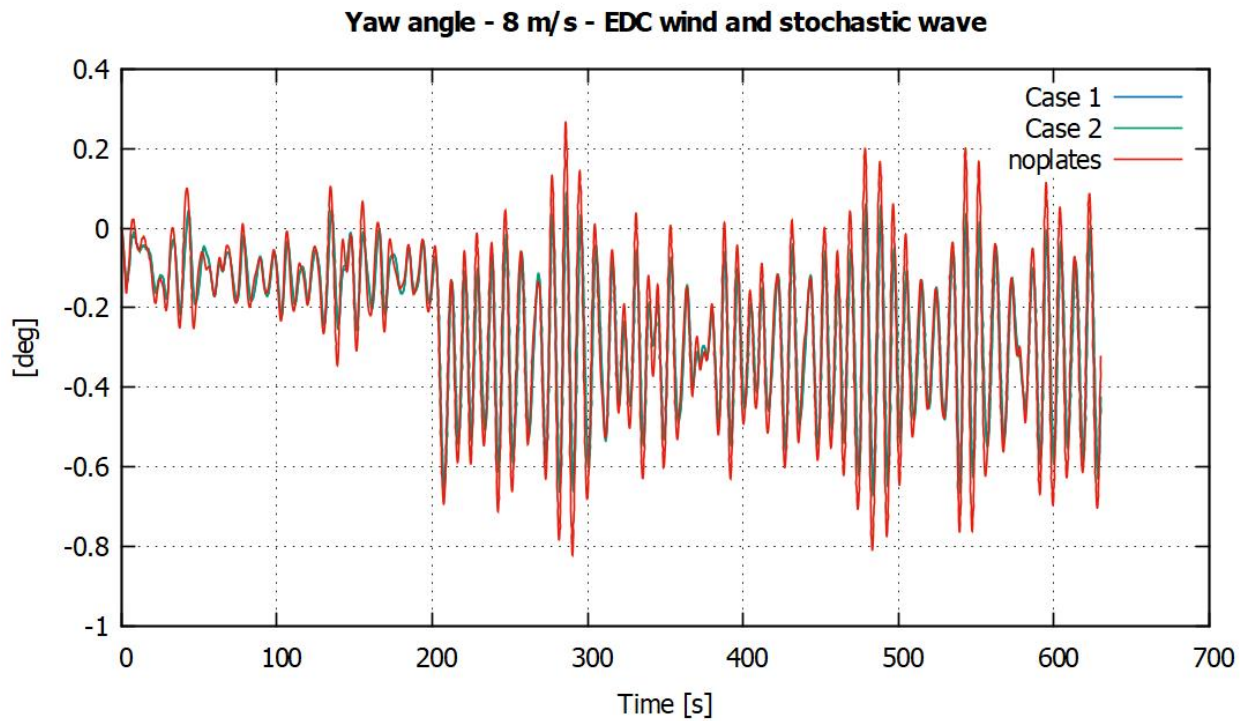
Στο παρακάτω Σχήμα 5.16, μέχρι και τα 200 s μόνο η συνιστώσα x'χ της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζει την ευστάθεια της πλωτής Α/Γ, μεταβάλλοντας περισσότερο την στροφή pitch του συστήματος. Μετά τα 200 s η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει, επηρεάζοντας έτσι και τις υπόλοιπες στροφές και μετακινήσεις σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι προηγουμένως. Οπότε, πραγματοποιείται μια ακραία μεταβολή της στροφής yaw του πλωτήρα, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια του πλωτού συστήματος.



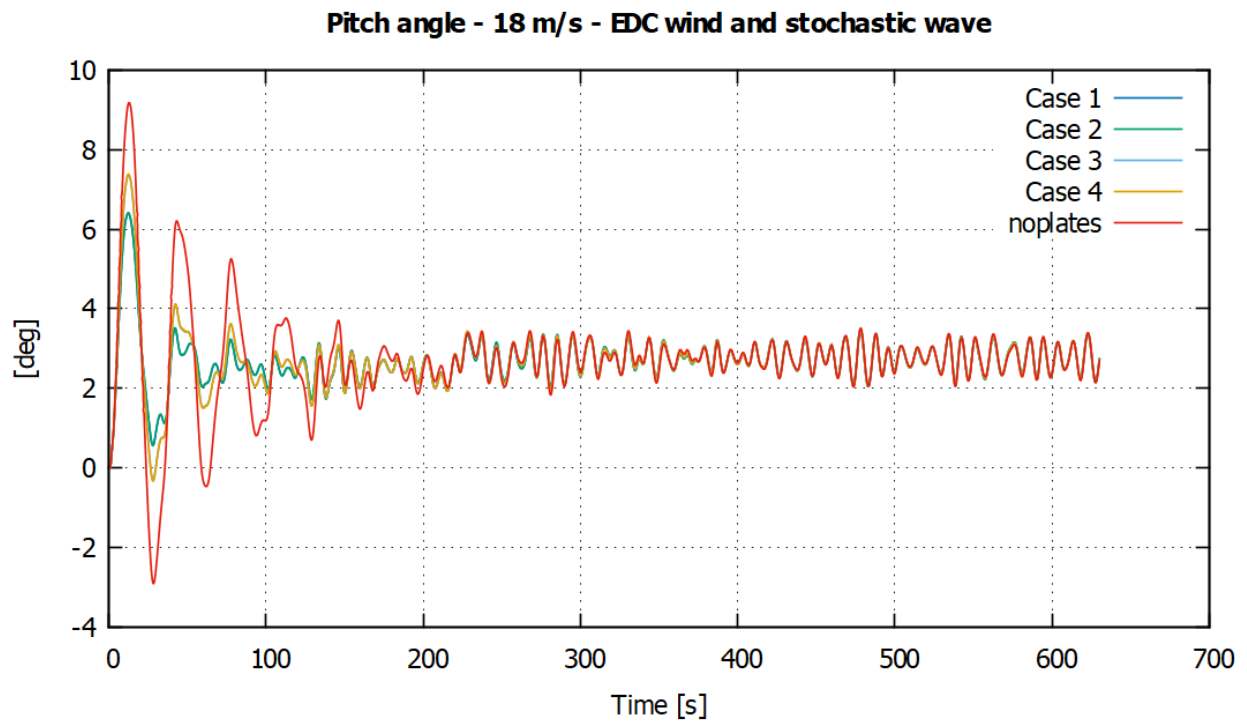
Σχήμα 5.16: Προφίλ των 3 συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου τύπου EDC στα 8 m/s



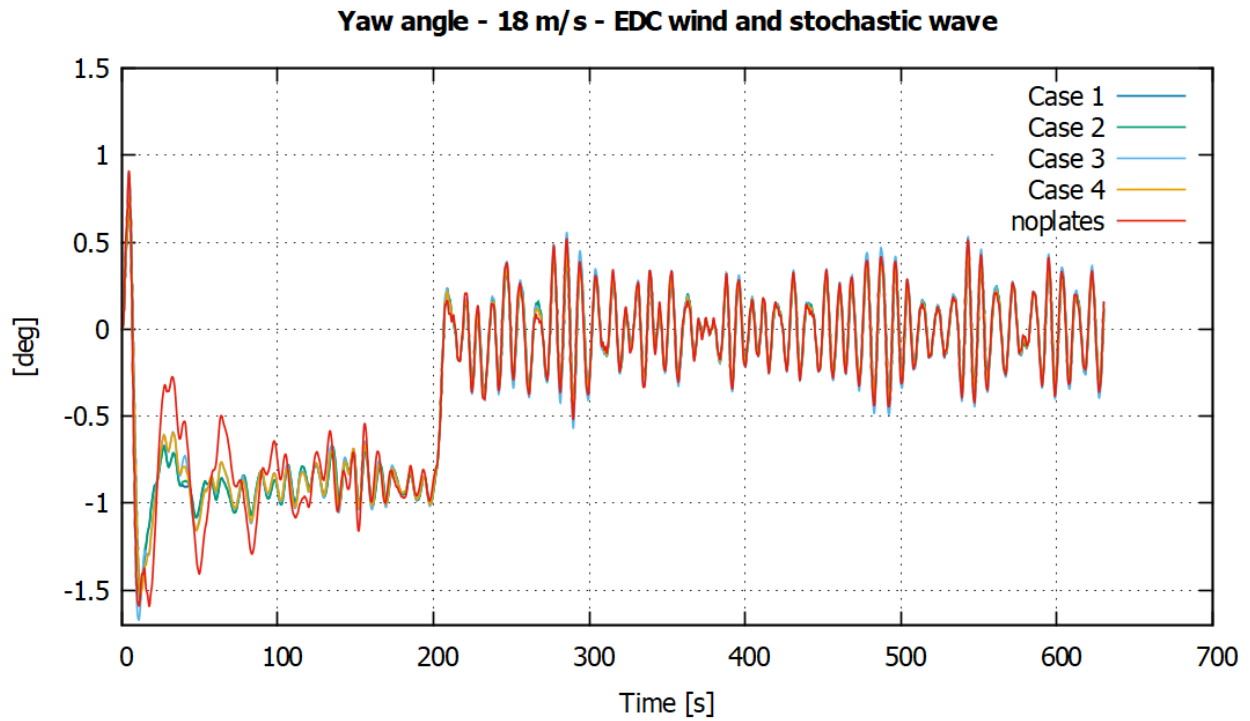
Σχήμα 5.17: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



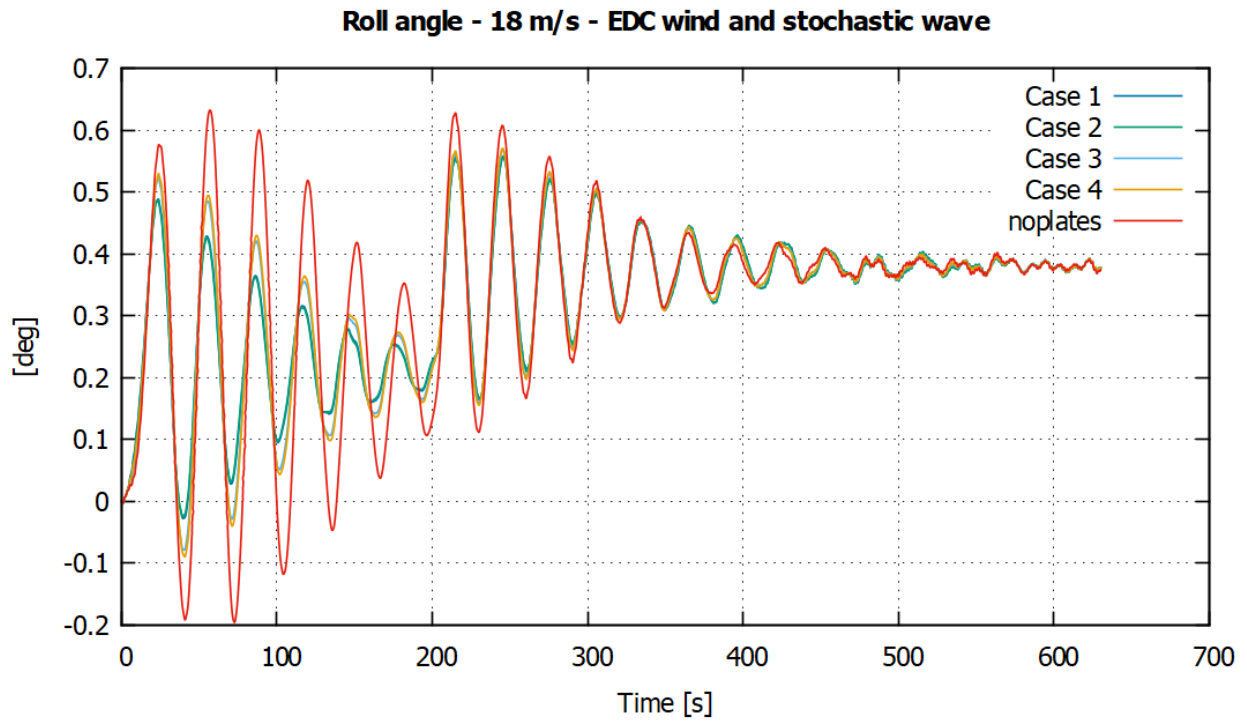
Σχήμα 5.18: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή γων της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.19: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2, 3, 4 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.20: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2, 3, 4 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.21: Συμβολή των διατάξεων No 1, 2, 3, 4 στην στροφή roll της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

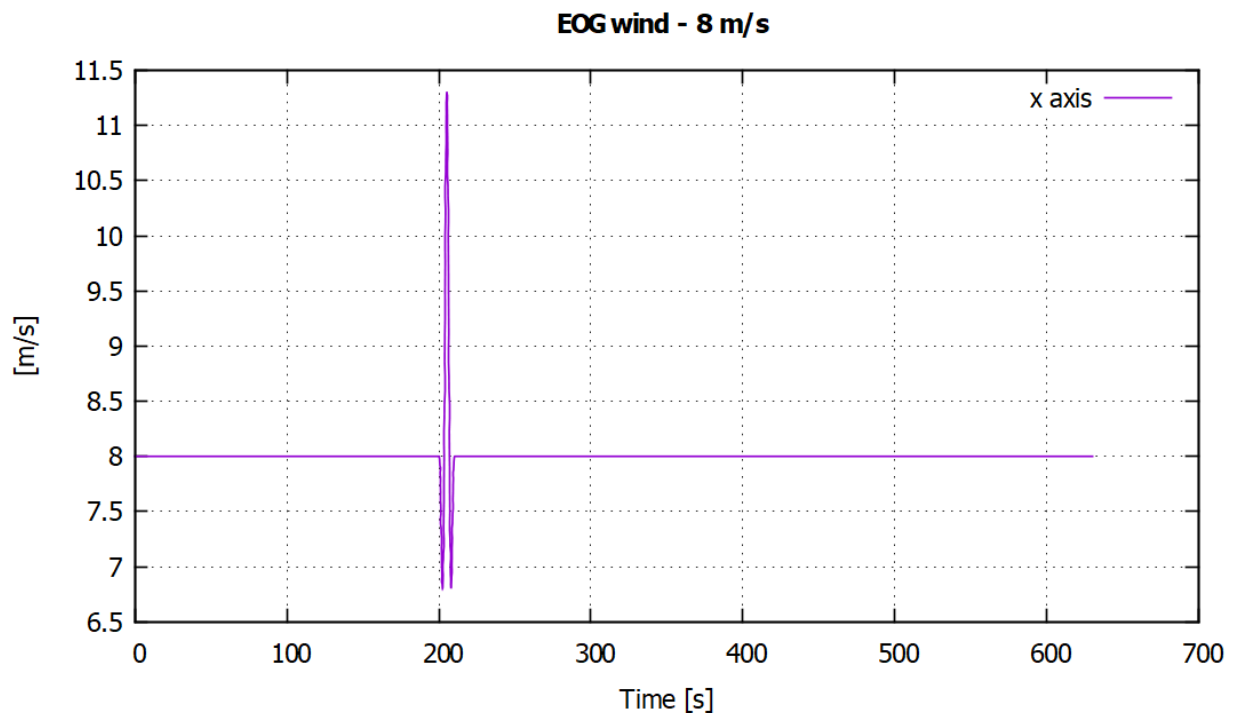
Πριν τα 200 s, σε ταχύτητες ανέμου 8 και 18 m/s, η στροφή yaw της πλωτής Α/Γ μειώνεται αισθητά ενώ στην στροφή pitch παρατηρείται μεγαλύτερη βελτίωση. Μετά τα 200 s, όπου λαμβάνει μέρος η αλλαγή κατεύθυνσης του ανέμου, η συμβολή των πτερυγίων στην μείωση της στροφής pitch είναι μηδαμινή. Στην στροφή yaw και μετά τα 200 s, παρατηρείται μεγαλύτερη συμβολή από τα πτερύγια στα 8 m/s παρά στα 18 m/s. Στην στροφή roll, πριν και μετά τα 200 s, η συμβολή των πτερυγίων είναι αρκετά καλή.

5.1.3 Άνεμος τύπου EOG - Κύμα τύπου JONSWAP

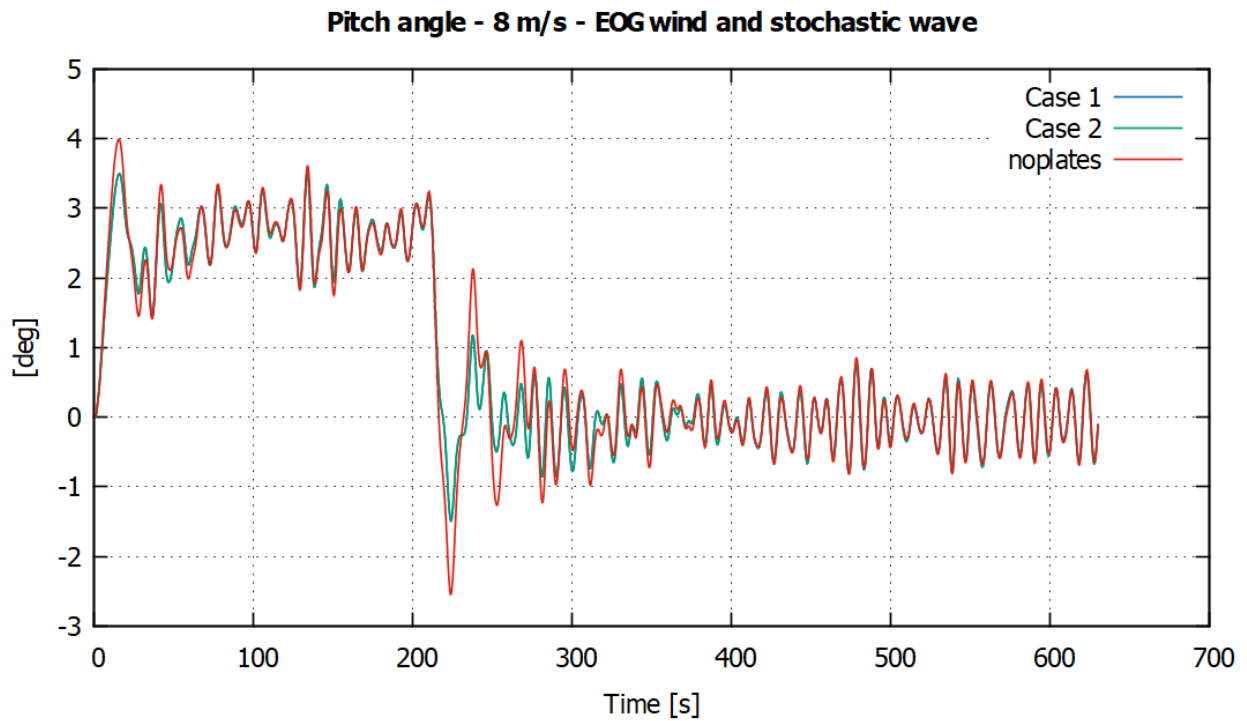
Στην προσομοίωση αυτή, δημιουργούνται ριπές ανέμου σε συγκεκριμένο χρονικό σημείο για συγκεκριμένη χρονική περίοδο (EOG - Extreme Operating Gust). Την χρονική στιγμή που πραγματοποιούνται οι ριπές, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας του ανέμου, ακολουθούμενη από απότομη άνοδο, απότομη πτώση και άνοδο πίσω στην αρχική τιμή. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.22. Τα χαρακτηριστικά του κύματος JONSWAP είναι όμοια με αυτά της Παραγράφου 5.1.1 για $H_s= 6m$ και $T_p= 10 s$.

Τύπος ανέμου	Ριπές ανέμου (EOG)
Ταχύτητα ανέμου	8 και 18 m/s
Χρονικό σημείο έναρξης ριπών	200 s
Χρονική διάρκεια ριπών	10 s
Διάρκεια προσομοίωσης	630 s

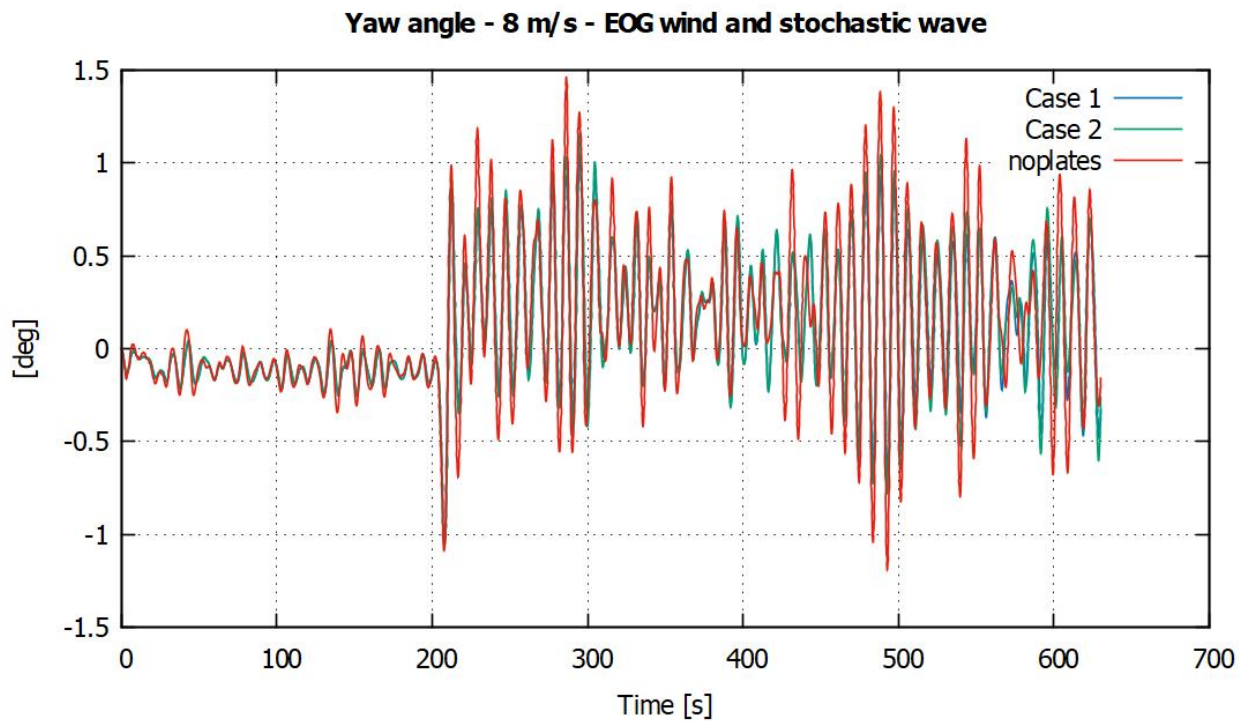
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά ανέμου (EOG)



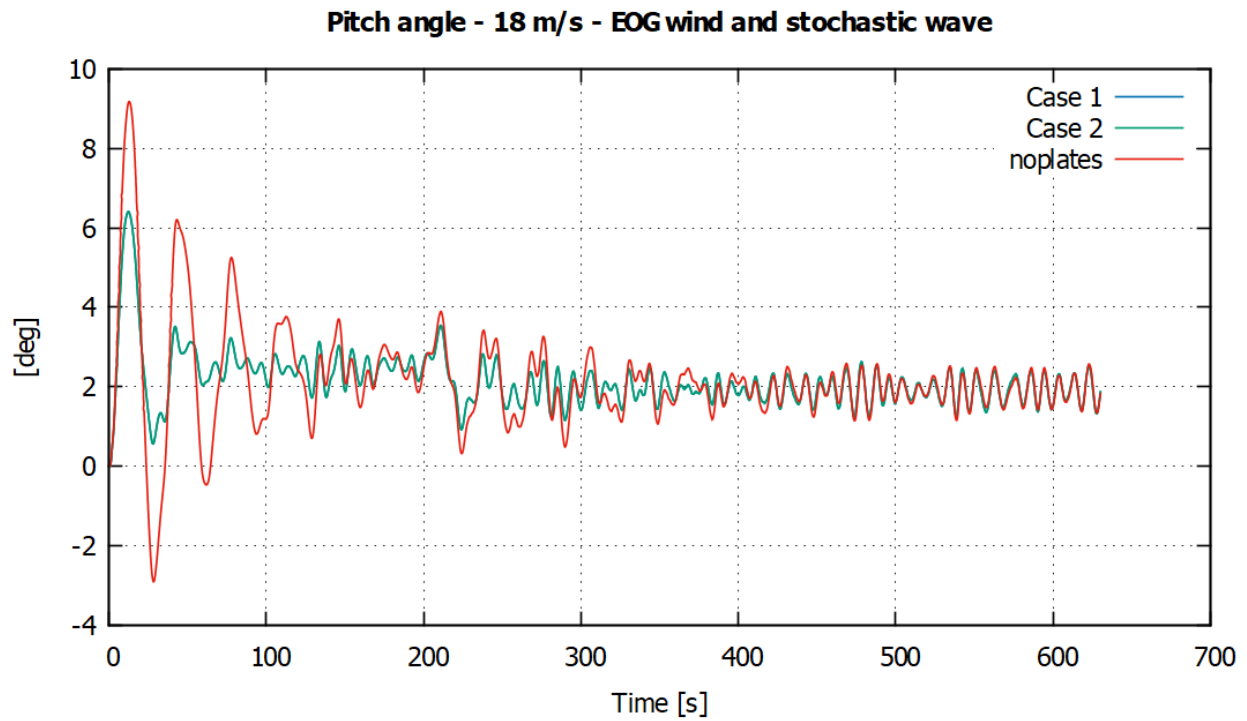
Σχήμα 5.22: Η συνιστώσα x'ς της ταχύτητας ανέμου τύπου EOG στα 8 m/s



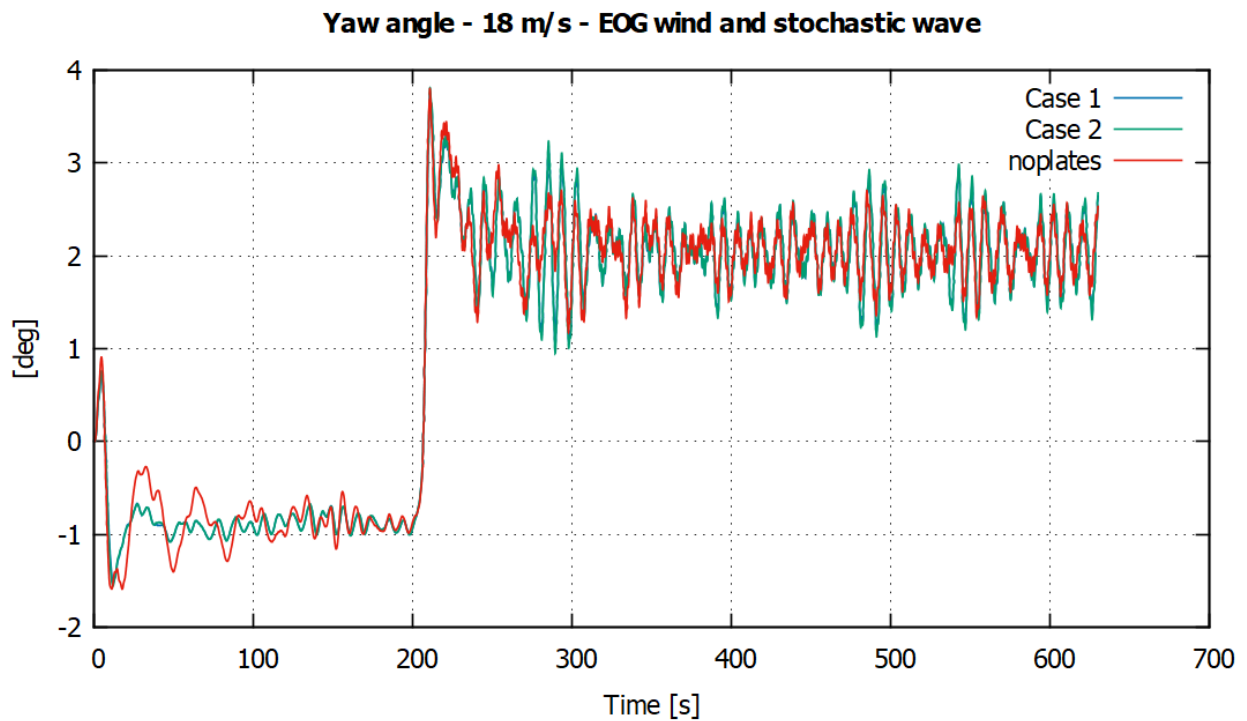
Σχήμα 5.23: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.24: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.25: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.26: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 2 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση, οι ριπές του ανέμου έλαβαν μέρος ούτως ώστε να μεταβληθεί η στροφή pitch του πλωτήρα, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αεροδυναμική της ανεμογεννήτριας. Λόγω του ότι η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της Α/Γ είναι στα 11.4 m/s, στην προσομοίωση με ταχύτητα ανέμου 8 m/s και όταν υπάρξουν οι ριπές, παρατηρείται μεγαλύτερη μεταβολή του συστήματος στην στροφή pitch απ' ότι στα 18 m/s. Αυτό συμβαίνει διότι η Α/Γ πριν τα 11.4 m/s δεν κάνει ρύθμιση βήματος των πτερυγίων (pitch control), επομένως υπάρχει μεγαλύτερη ώση (Thrust).

Για ταχύτητες ανέμου 8 και 18 m/s, τόσο πριν τις ριπές όσο και μετά, η συμβολή των διατάξεων στην μείωση της στροφής pitch του πλωτού συστήματος είναι αρκετά ικανοποιητική. Η επίδραση των διατάξεων στην στροφή yaw, πριν λάβουν μέρος οι ριπές, είναι αισθητή, ειδικά όταν η ταχύτητα ανέμου ισούται με 18 m/s. Αφού πραγματοποιηθούν οι ριπές, η στροφή yaw του συστήματος για ταχύτητα ανέμου ίση με 8 m/s, βελτιώνεται αρκετά, παρουσιάζοντας όμως μια σχετική επιδείνωση στα 430 και 590 s. Αντιθέτως, για ταχύτητα ανέμου 18 m/s, η συμβολή των διατάξεων στην στροφή yaw προκαλεί επιδείνωση στην ευστάθεια του συστήματος.

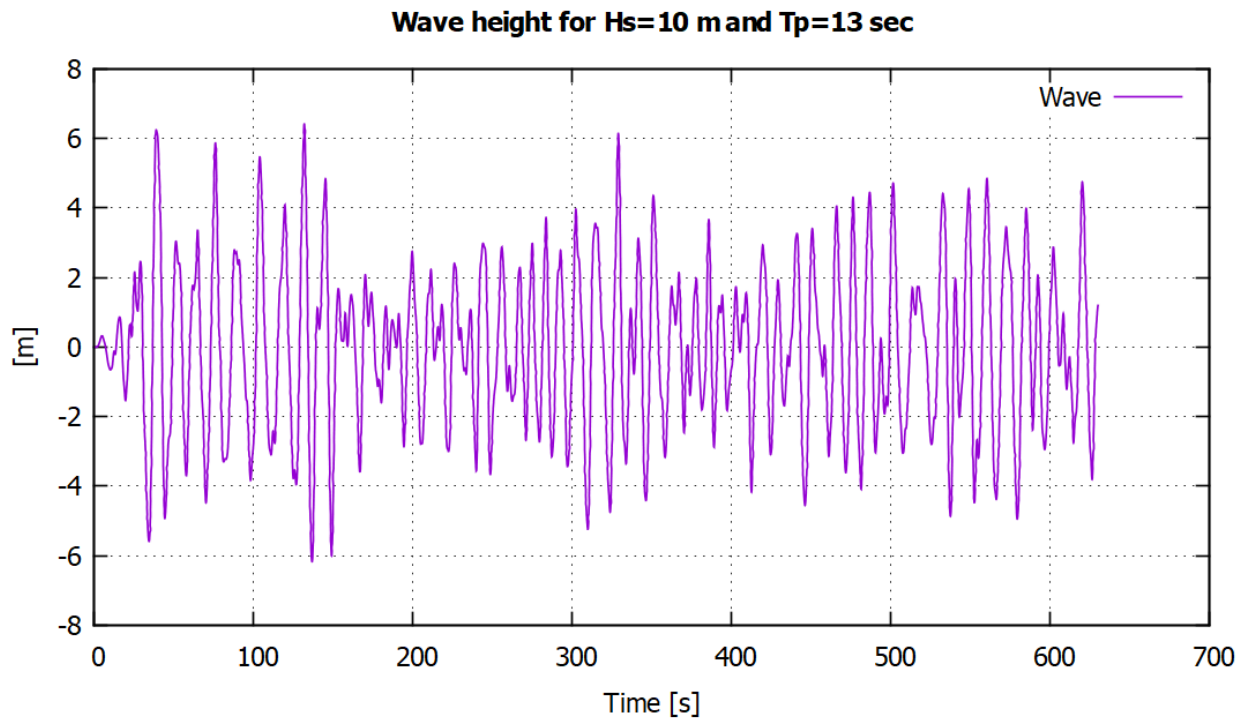
5.1.4 Στοχαστικός άνεμος – Κύμα τύπου JONSWAP με ακραίες τιμές (SSS)

Στην προσομοίωση αυτή, ο άνεμος και το κύμα έχει στοχαστική συμπεριφορά. Όμως, οι τιμές του σημαντικού ύψους και της μέγιστης περιόδου του κύματος έχουν αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, προσομοιώνοντας έτσι τις ακραίες θαλάσσιες καιρικές συνθήκες (SSS – Severe Sea State) σύμφωνα με τον Παγκόσμιο κανονισμό IEC [21].

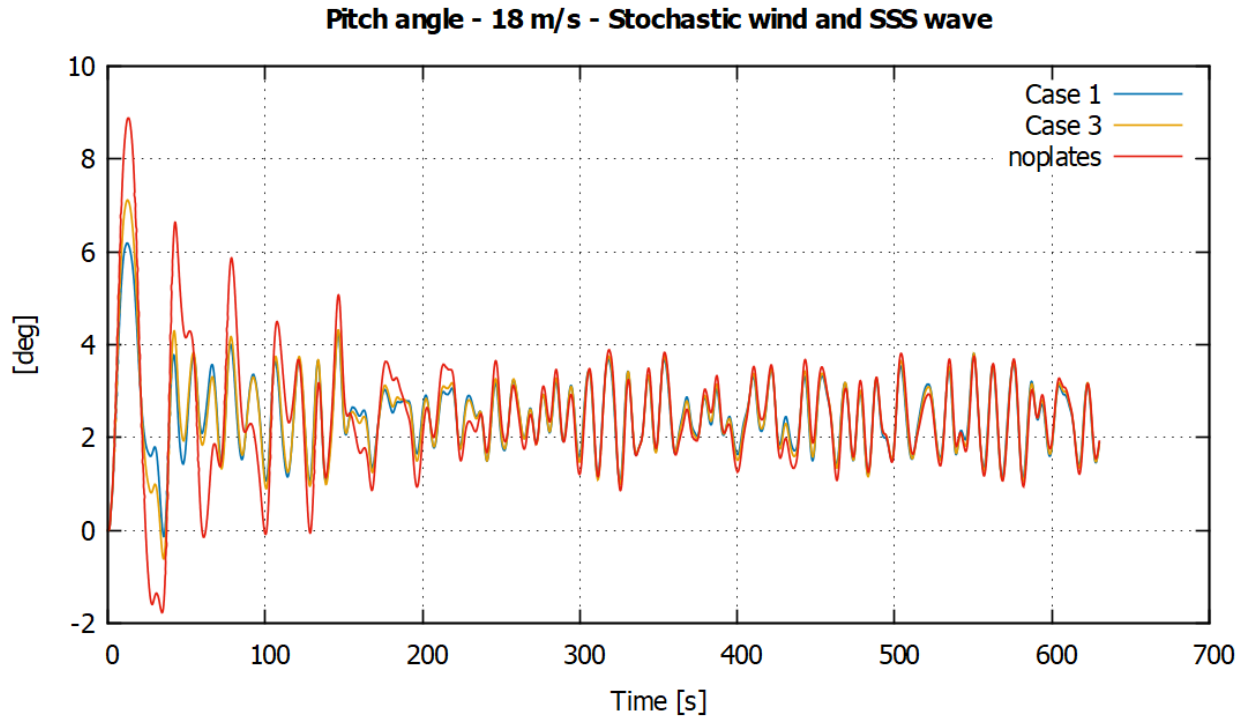
Τύπος ανέμου	Στοχαστικός
Ταχύτητα ανέμου	18 m/s
Τύπος κύματος	JONSWAP
Σημαντικό ύψος κύματος (Hs)	10 m
Μέγιστη περίοδος (Tp)	13 s
Διάρκεια προσομοίωσης	630 s

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά ανέμου και κύματος

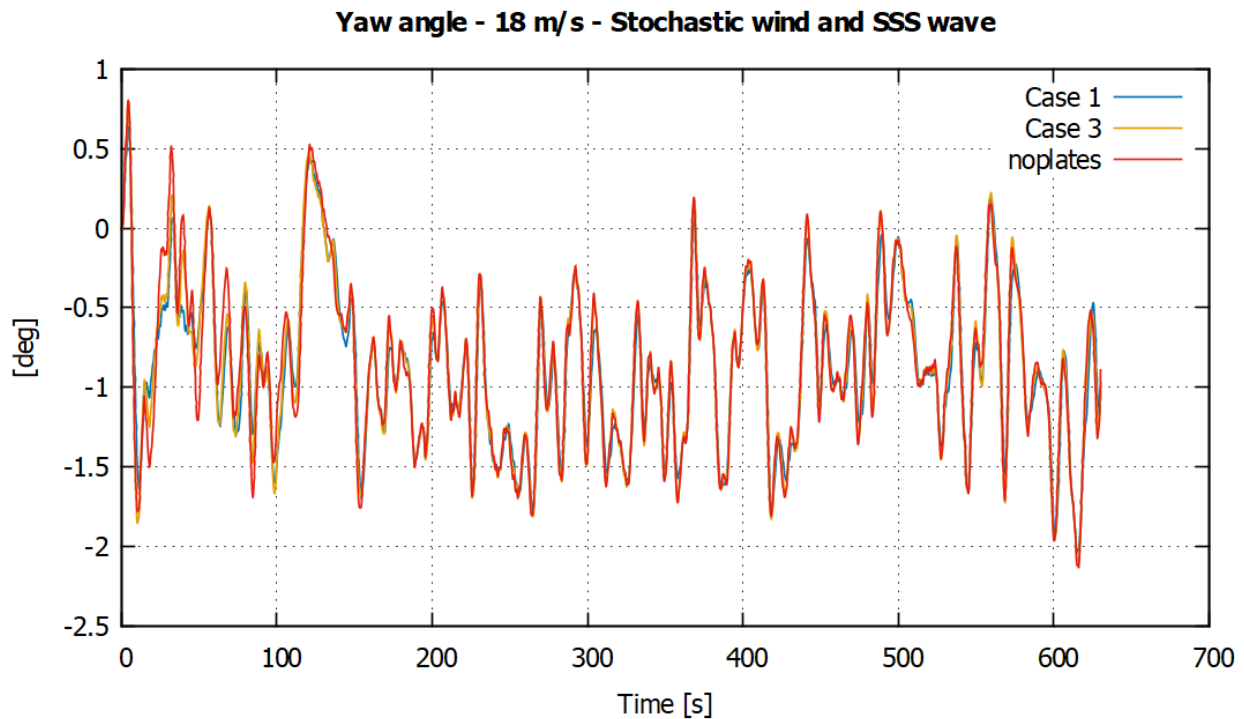
Διευκρινίζεται ότι, για να πραγματοποιηθούν οι συγκεκριμένες θαλάσσιες συνθήκες, πρέπει αντίστοιχα η ταχύτητα του ανέμου να έχει υψηλές τιμές, επομένως για την συγκεκριμένη προσομοίωση, θα παρουσιαστούν αποτελέσματα μόνο για ταχύτητα ανέμου ίση με 18 m/s. Επιπλέον, από τις 4 διατάξεις επιλέχθηκε η Νο1 και η Νο3, ούτως ώστε να υπάρχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα τόσο για 2 όσο και για 4 πτερύγια.



Σχήμα 5.27: Ύψη κυματισμών για σημαντικό ύψος 10m και μέγιστη περίοδο 13s



Σχήμα 5.28: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

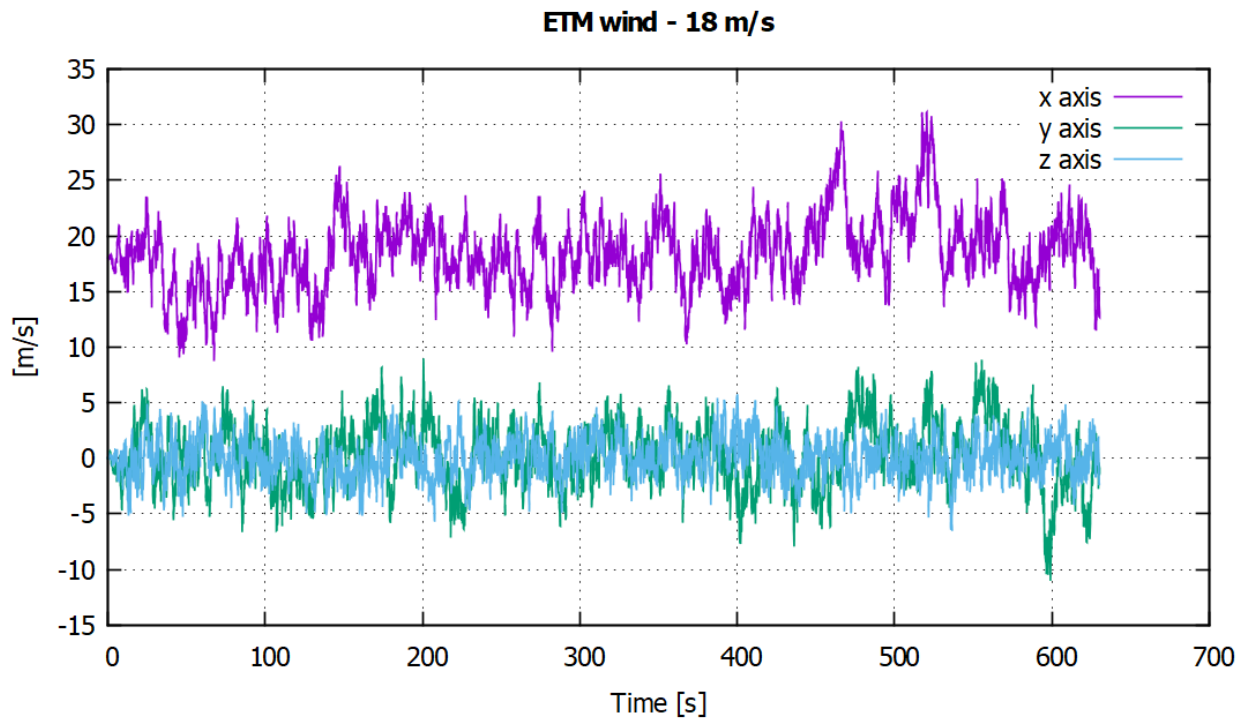


Σχήμα 5.29: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

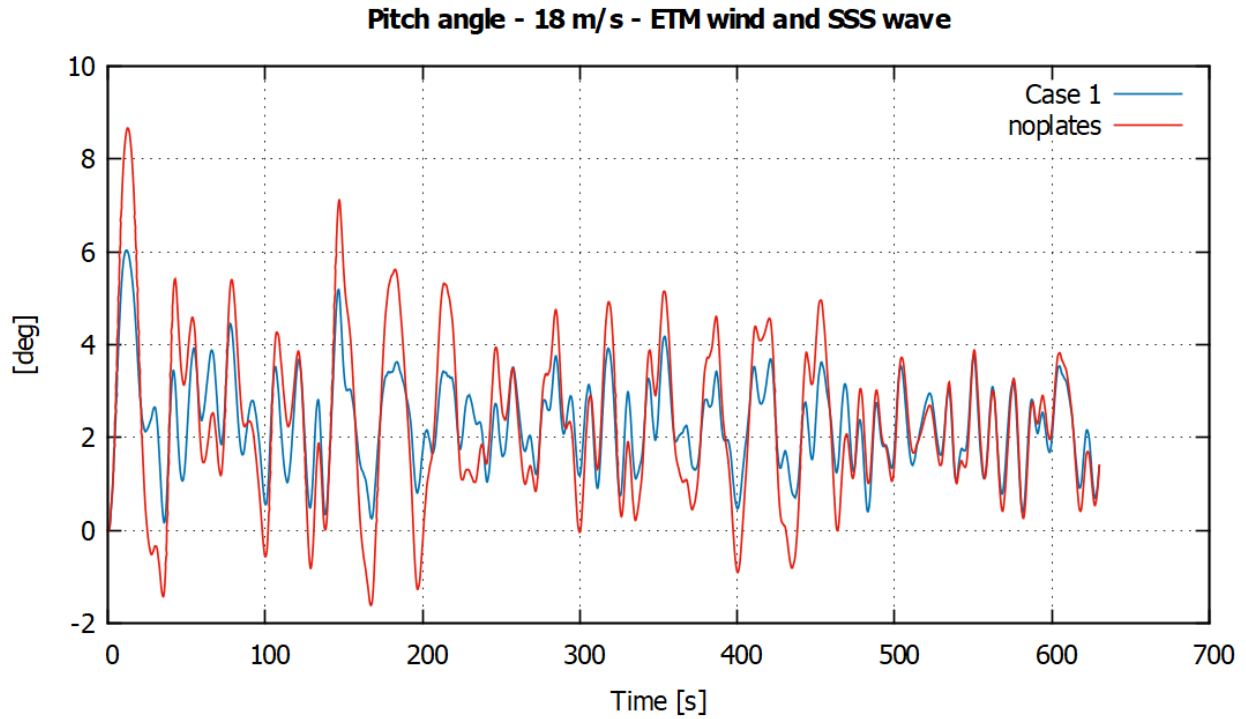
Η συμβολή της διάταξης Νο1 και Νο3 στην μείωση της στροφής pitch της πλωτής Α/Γ, είναι αρκετά ικανοποιητική. Αναλυτικότερα, η διάταξη Νο1 δεδομένου ότι αποτελείται από 4 πτερύγια προσδίδει καλύτερα αποτελέσματα απ' ό,τι η διάταξη Νο3. Η διαφορά βελτίωσης, έγκειται στο γεγονός ότι με δύο παραπάνω πτερύγια, υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια άρα και μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης. Όσον αφορά την στροφή yaw, η συμβολή της διάταξης Νο1 είναι μεγαλύτερη απ' αυτή της Νο3, η οποία δεύτερη διάταξη σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία επιδεινώνει ελάχιστα την ευστάθεια του συστήματος.

5.1.5 Άνεμος τύπου ETM - Κύμα τύπου JONSWAP με ακραίες τιμές (SSS)

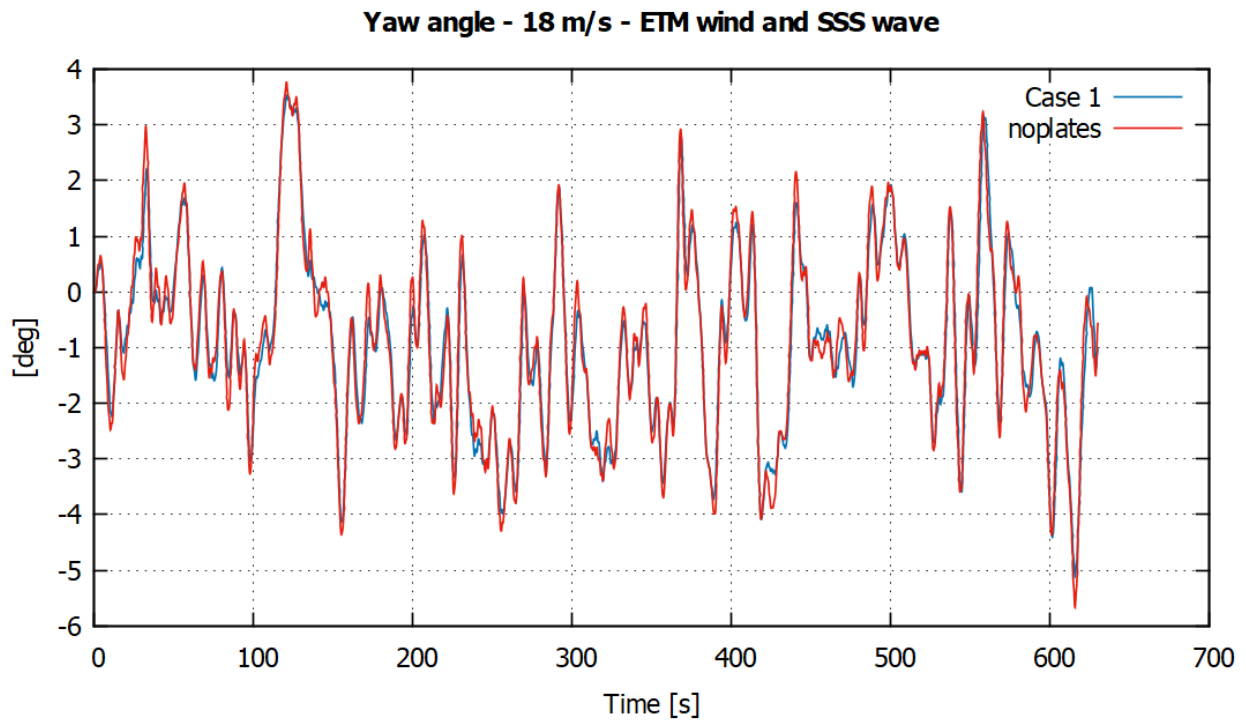
Στην προσομοίωση αυτή, η συμπεριφορά του ανέμου είναι τυρβώδης και αποκτά ακραίες τιμές ταχύτητας (ETM – Extreme Turbulence Model) (Σχήμα 5.30). Σύμφωνα με τον κανονισμό IEC, ο τύπος ανέμου ETM χρησιμοποιείται για την πιο δυσμενή κατάσταση που μπορεί να υπάρξει από πλευράς ανέμου. Για την συμπεριφορά του κύματος, θα χρησιμοποιηθεί το φάσμα JONSWAP με ακραίες τιμές (SSS), όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη Παράγραφο 5.1.4 για $H_s= 10\text{m}$ και $T_p= 13\text{ s}$. Η ταχύτητα ανέμου ορίζεται στα 18 m/s και η προσομοίωση θα γίνει για την διάταξη Νο1 (4 πτερύγια).



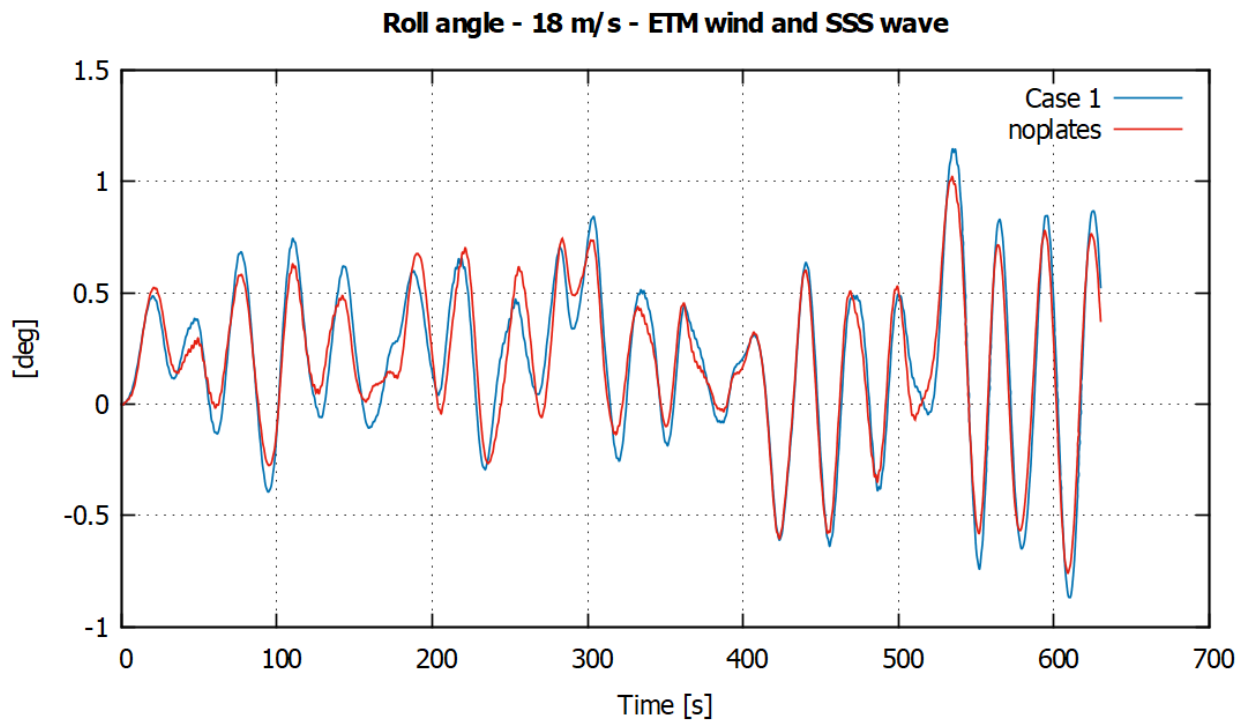
Σχήμα 5.30: Προφίλ των 3 συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου τύπου ETM στα 18 m/s



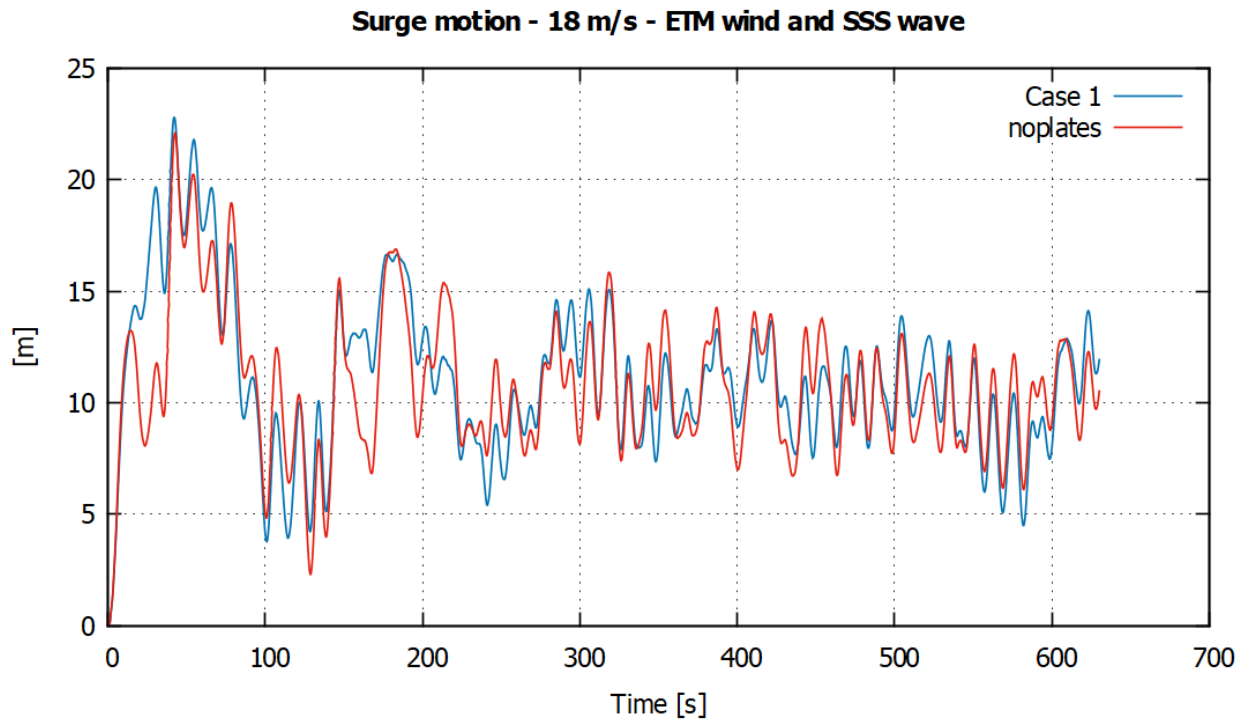
Σχήμα 5.31: Συμβολή της διάταξης No 1 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



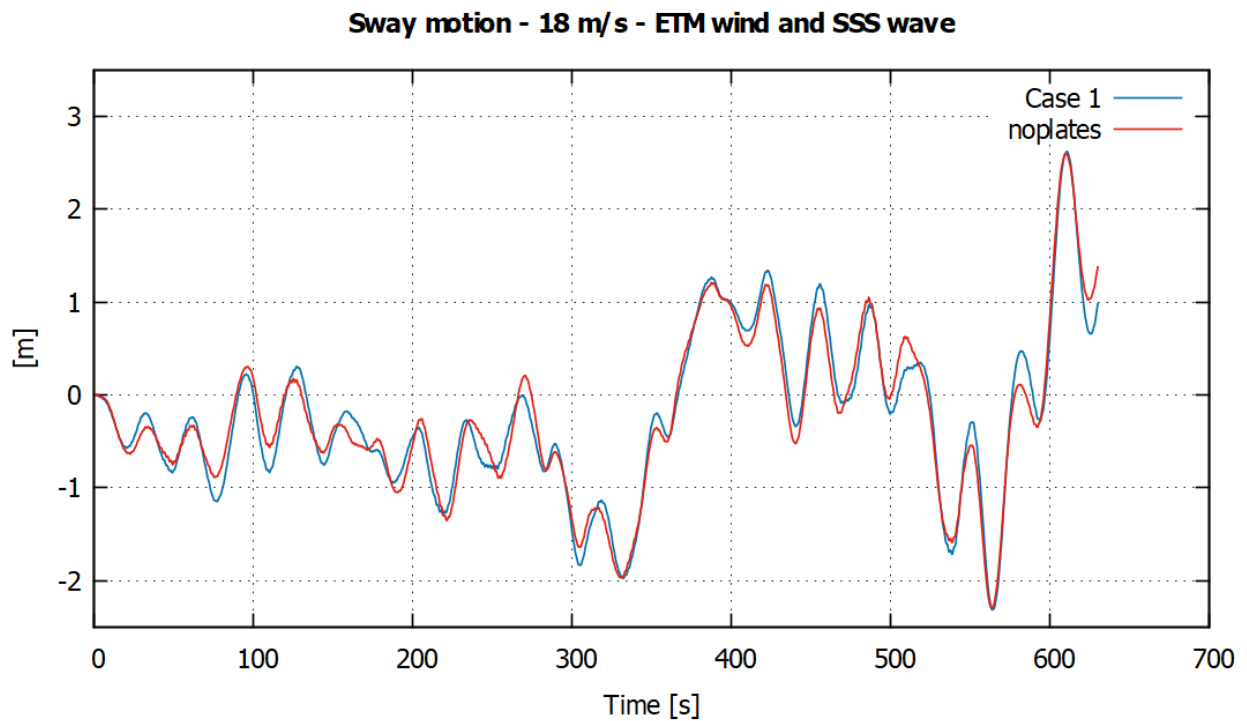
Σχήμα 5.32: Συμβολή της διάταξης No 1 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



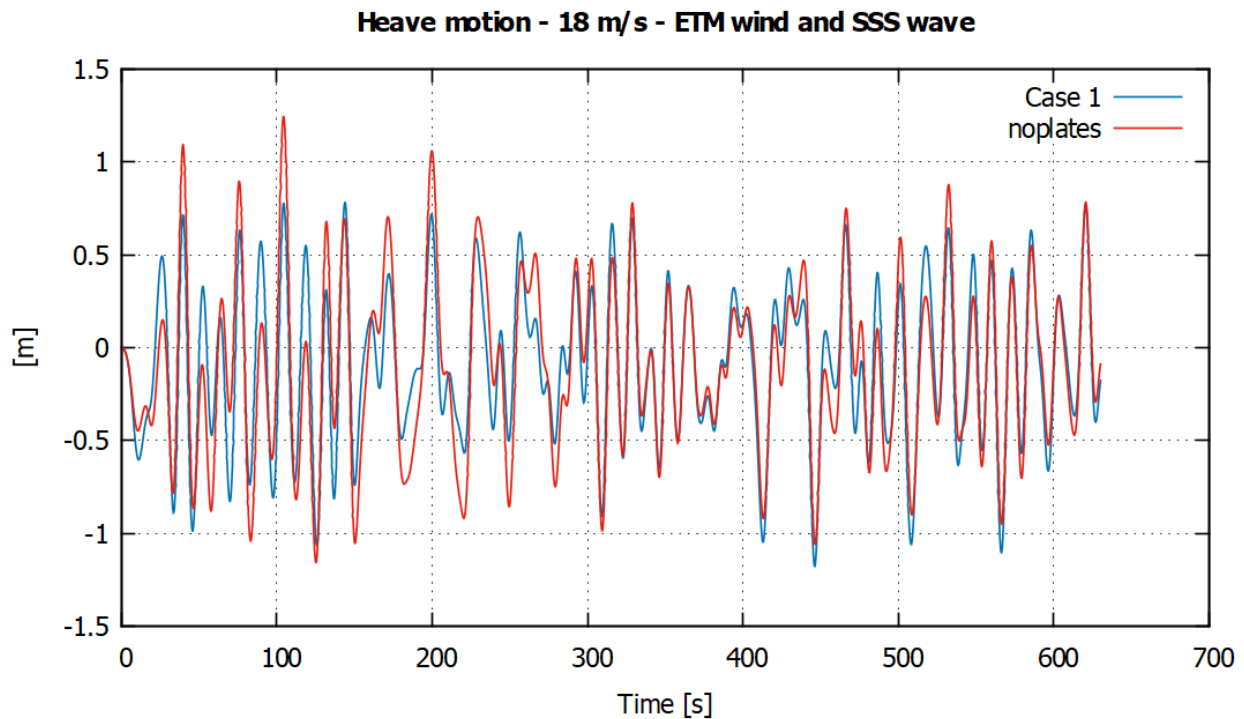
Σχήμα 5.33: Συμβολή της διάταξης No 1 στην στροφή roll της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.34: Συμβολή της διάταξης No 1 στην μετακίνηση surge της πλωτής A/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.35: Συμβολή της διάταξης No 1 στην μετακίνηση sway της πλωτής A/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

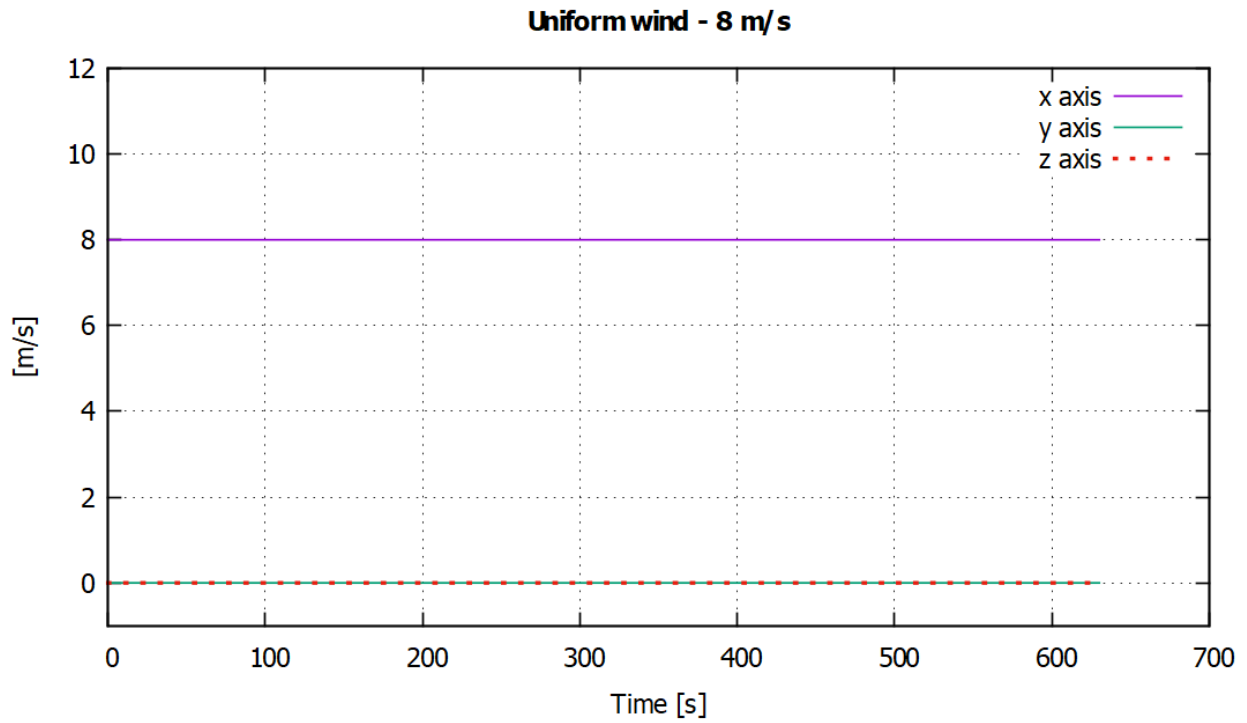


Σχήμα 5.36: Συμβολή της διάταξης No 1 στην μετακίνηση heave της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

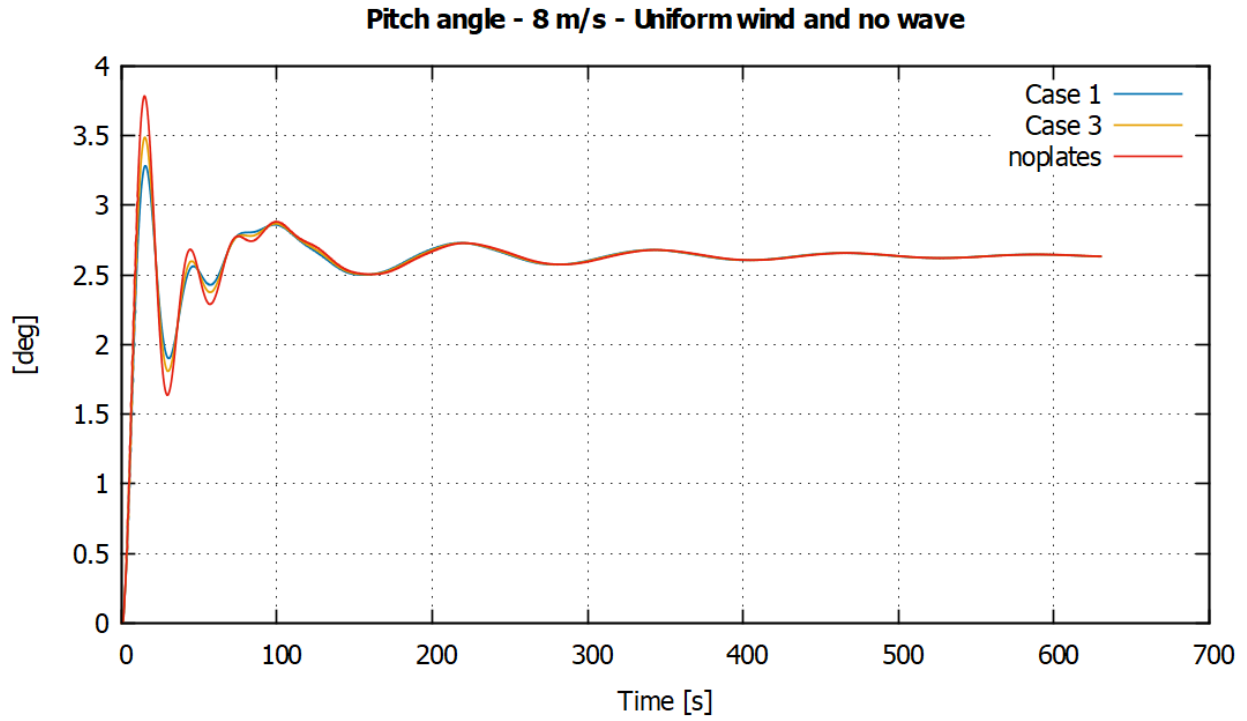
Η διάταξη No1 συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην μείωση της στροφής pitch του πλωτήρα και σε μικρότερο στην στροφή yaw. Η στροφή roll στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παρουσιάζει επιδείνωση, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιο ζήτημα λόγω της χαμηλής της τιμής και συχνότητας. Οι μετακινήσεις μειώνονται σε κάποια χρονικά σημεία, όπου το υπόλοιπο διάστημα τα πτερύγια συμβάλλουν μόνο στην μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος, χωρίς όμως να επιδεινώνουν την ευστάθεια του.

5.1.6 Σταθερός άνεμος – Χωρίς κύμα

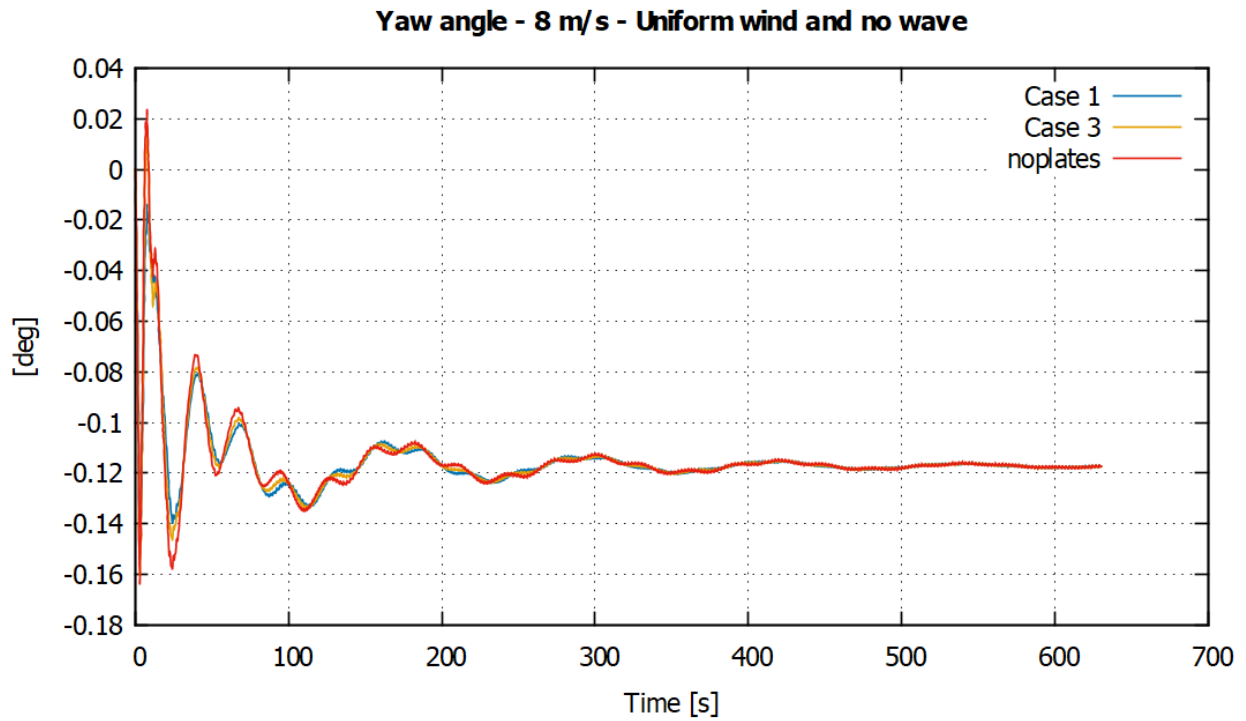
Η συγκεκριμένη προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με το απλουστευμένο μοντέλο ROM. Η ταχύτητα του ανέμου καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης παραμένει σταθερή (Σχήμα 5.37). Ωστόσο, στην παρούσα προσομοίωση η επίδραση του κύματος στην πλωτή Α/Γ δεν υπολογίζεται, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι ικανά να συγκριθούν με αυτά του μοντέλου ROM. Η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης ορίζεται στα 630 s. Οι ταχύτητες ανέμου ορίζονται στα 8 και 18 m/s. Η μοναδική μεταβολή της πλωτής Α/Γ, αφού απουσιάζει η επίδραση του κύματος, προέρχεται από την συνιστώσα του άξονα x' της ταχύτητας του ανέμου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.37.



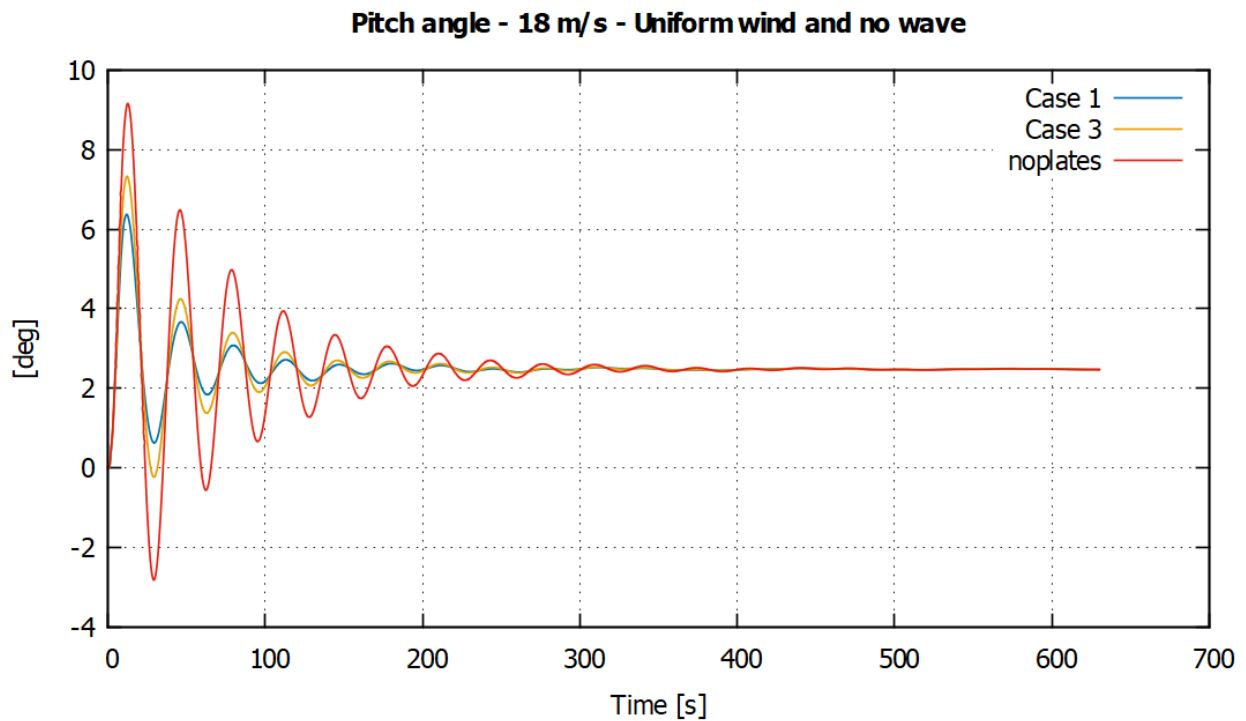
Σχήμα 5.37: Οι 3 συνιστώσες του σταθερού ανέμου για ταχύτητα 8 m/s



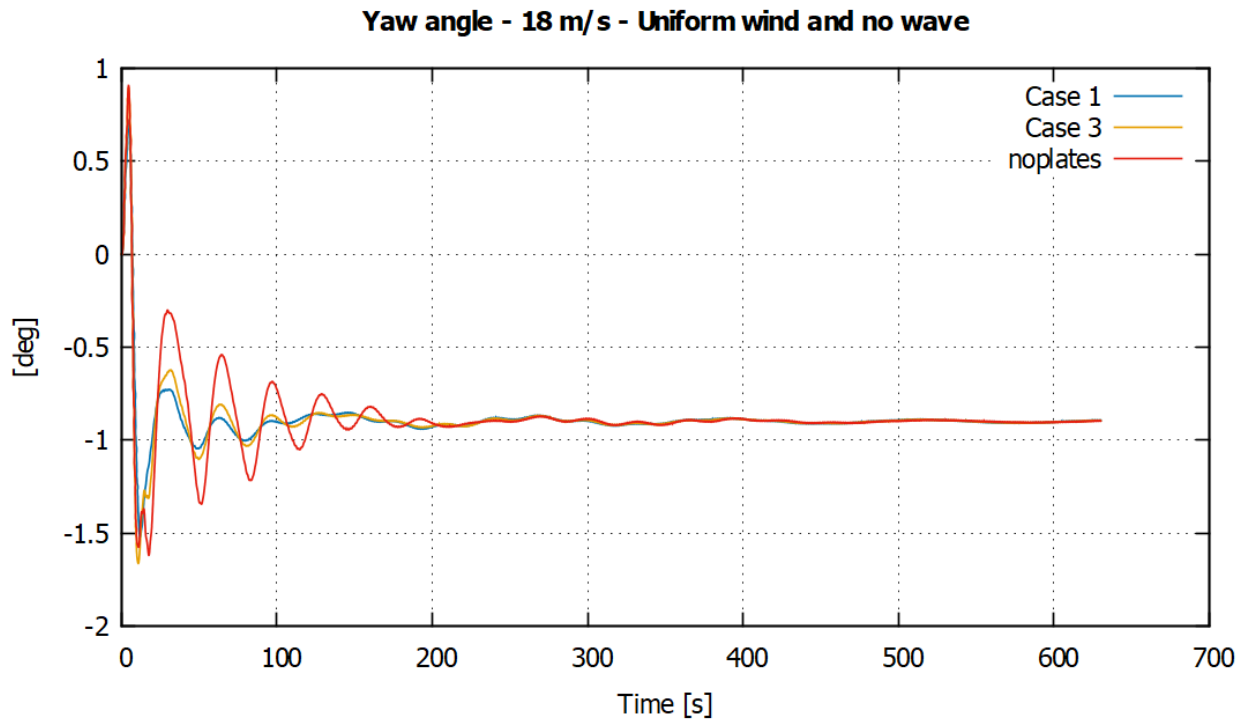
Σχήμα 5.38: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.39: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.40: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

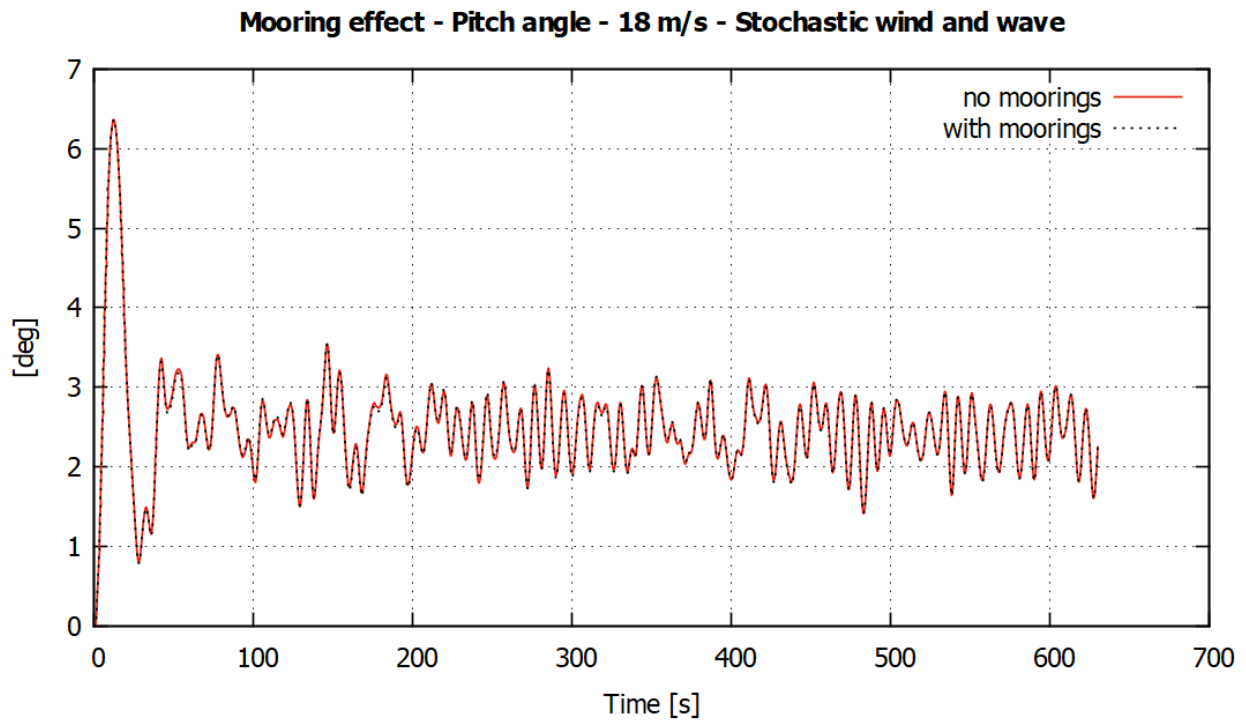


Σχήμα 5.41: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

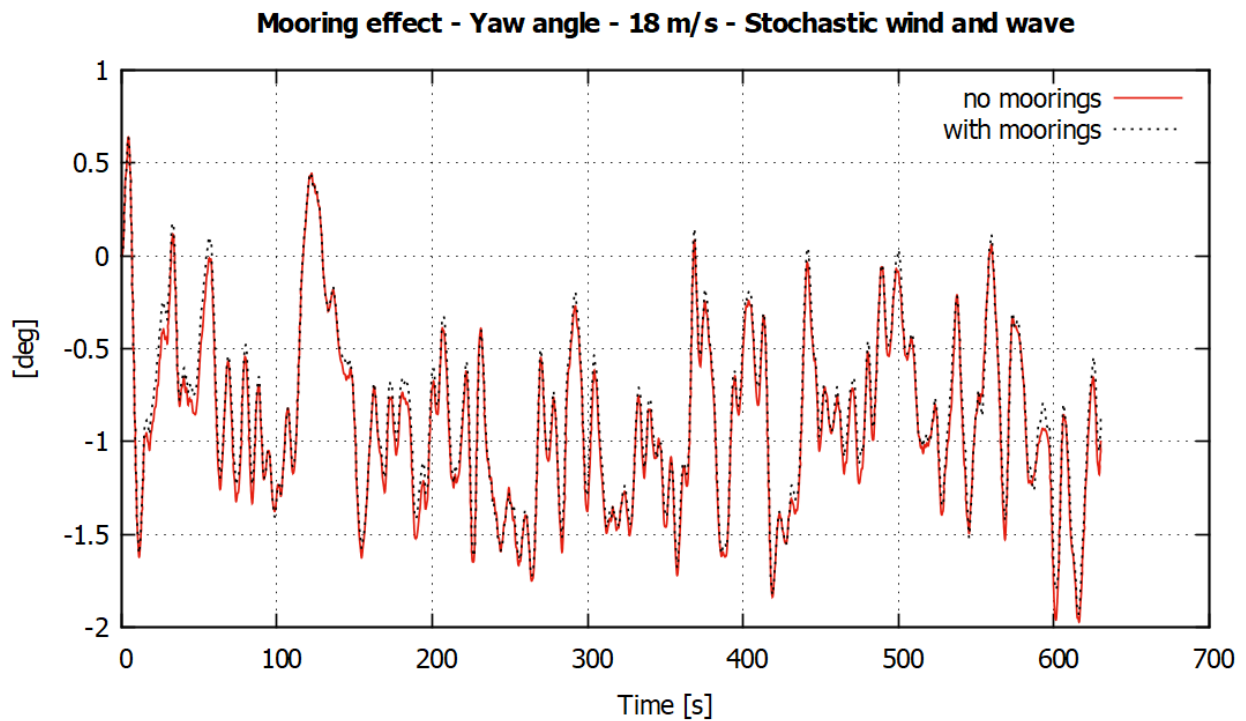
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μείωση των στροφών pitch και yaw της πλωτής Α/Γ επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό και από τις δύο διατάξεις. Όπως αναμενόταν η διάταξη Νο1, που αποτελείται από 4 πτερύγια, συμβάλει σε μεγαλύτερο βαθμό στην μείωση των στροφών. Παρατηρείται ότι, για ταχύτητα ανέμου ίση με 18 m/s, η συμβολή των διατάξεων είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτή των 8 m/s.

5.1.7 Συμβολή των γραμμών αγκυρώσεων

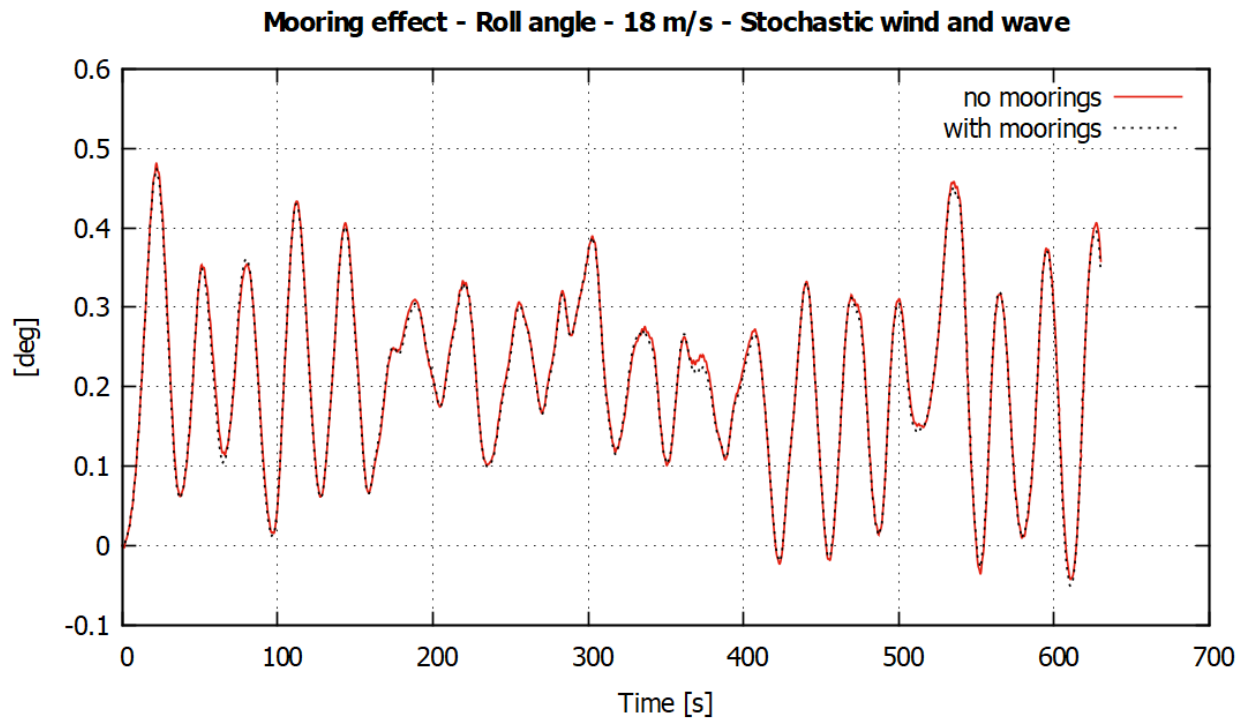
Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λογίζεται και η επίδραση των γραμμών αγκυρώσεων (moorings lines) του πλωτήρα (Πίνακας 5.4), στην δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Συνολικά οι αγκυρώσεις είναι 3, με μήκος 853.87 m έκαστη, τοποθετημένες στον πλωτήρα στα 70 m υπό το επίπεδο της θάλασσας. Το βάθος τοποθέτησης τους, στον πυθμένα της θάλασσας, φτάνει τα 320 m. Ο άνεμος επιλέγεται να είναι στοχαστικός και το κύμα τύπου JONSWAP, των οποίων η συμπεριφορά έχει αναλυθεί στην Παράγραφο 5.1.1. Ως ταχύτητα ανέμου επιλέγεται αυτή των 18 m/s, ούτως ώστε να δημιουργούνται όσον το δυνατόν μεγαλύτερες μεταβολές στο πλωτό σύστημα. Η συμβολή των γραμμών αγκυρώσεων, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της Παραγράφου 5.1.1 όπου δεν λήφθηκαν υπόψιν, παρουσιάζεται γραφικά παρακάτω.



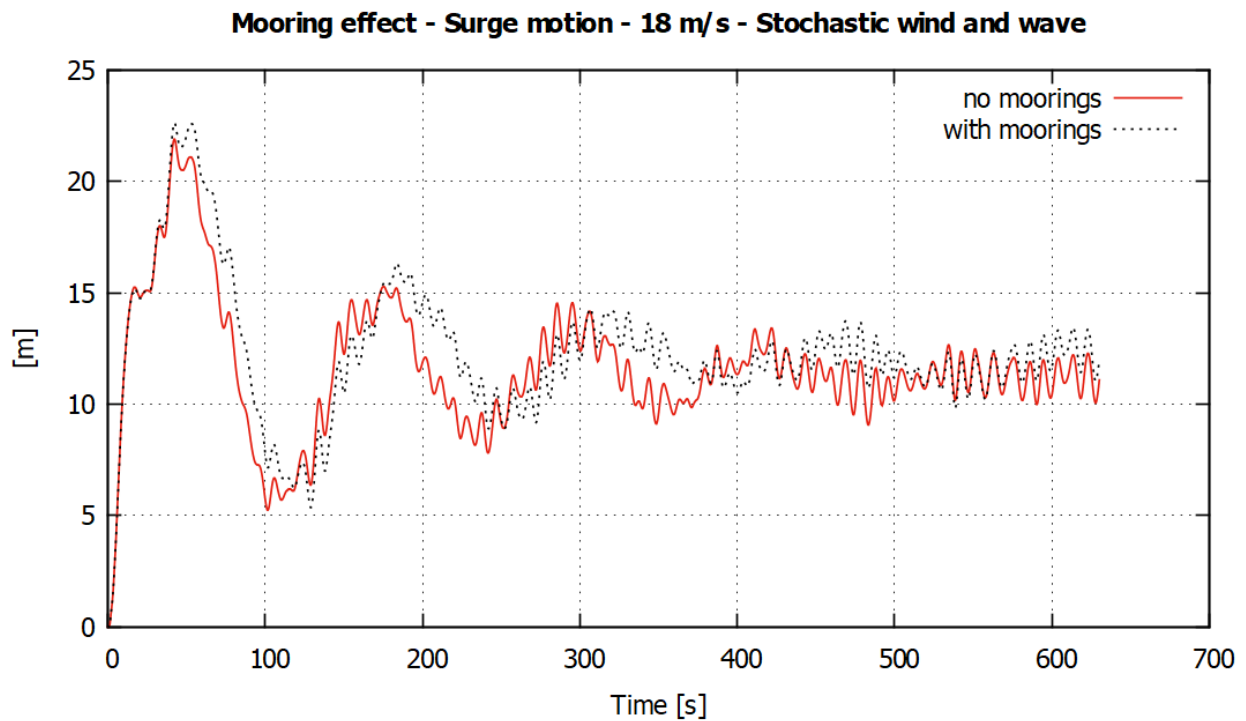
Σχήμα 5.42: Σύγκριση συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων



Σχήμα 5.43: Σύγκριση συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων

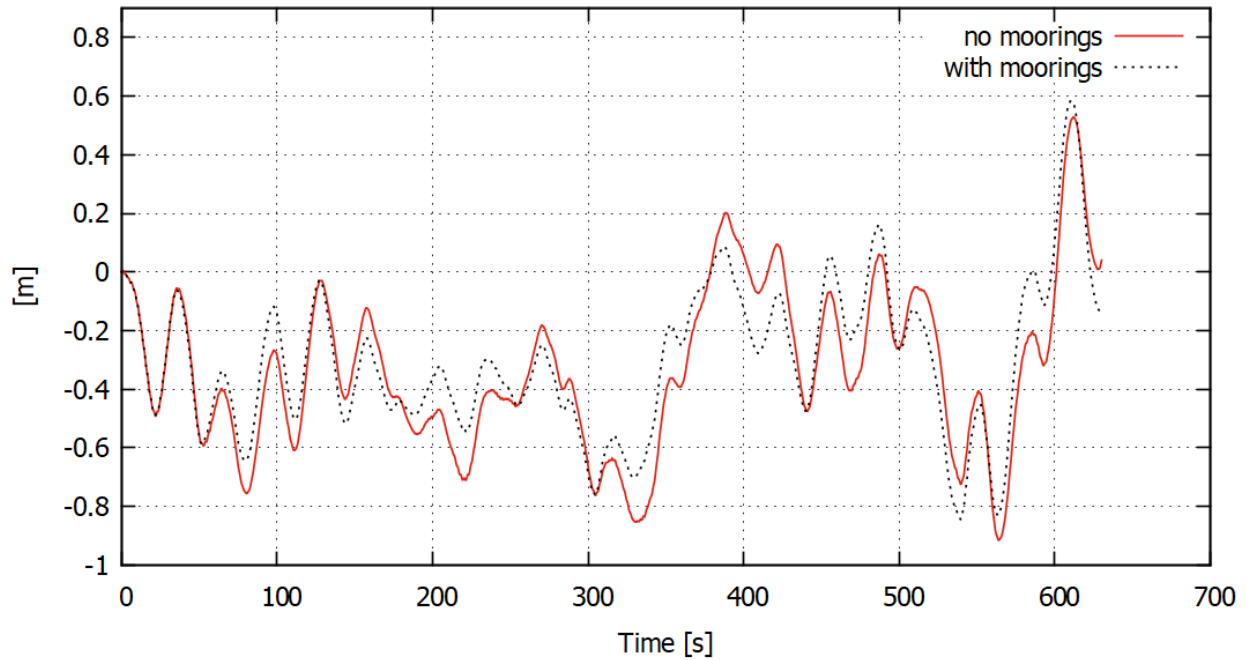


Σχήμα 5.44: Σύγκριση συμβολής της διάταξης Νο1 στην στροφή roll της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων



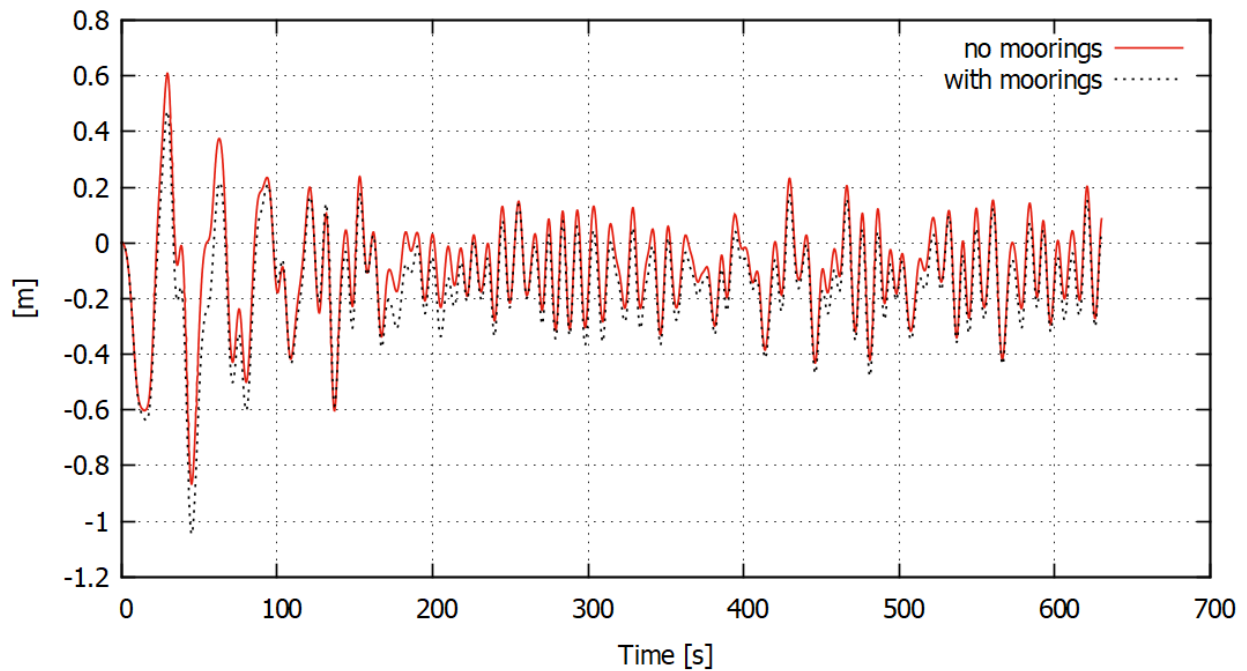
Σχήμα 5.45: Σύγκριση συμβολής της διάταξης Νο1 στην μετακίνηση surge της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων

Mooring effect - Sway motion - 18 m/s - Stochastic wind and wave



Σχήμα 5.46: Σύγκριση συμβολής της διάταξης Νο1 στην μετακίνηση sway της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων

Mooring effect - Heave motion - 18 m/s - Stochastic wind and wave



Σχήμα 5.47: Σύγκριση συμβολής της διάταξης Νο1 στην μετακίνηση heave της πλωτής Α/Γ με και χωρίς γραμμές αγκυρώσεων

Όπως παρατηρείται, οι γραμμές αγκυρώσεων συμβάλλουν μόνο στην μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του συστήματος, μη προσφέροντας κάποια δραστική αλλαγή στην δυναμική συμπεριφορά της πλωτής Α/Γ.

5.2 Προσομοίωση συμβολής των πτερυγίων με χρήση μοντέλου ROM

Το συγκεκριμένο μοντέλο, έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει μόνο το πεδίο του ανέμου, δίχως να υπολογίζεται η συμβολή του κύματος στην ευστάθεια της πλωτής Α/Γ. Το γεγονός αυτό, μειώνει τις πιθανές καταστάσεις που μπορούν να εξεταστούν για ένα πλωτό σύστημα, καθιστώντας το έτσι κατάλληλο για απλουστευμένες προσομοιώσεις. Επομένως, στην παρούσα διπλωματική εργασία, το μοντέλο ROM χρησιμοποιήθηκε για την ταχεία εξέταση διαφόρων διατάξεων πτερυγίων ούτως ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες για την πλήρη εξέταση στο εμπλουτισμένο μοντέλο hGAST.

Για την προσομοίωση της συμβολής των διατάξεων (Σχήματα 4.2-4.3) στην ευστάθεια της πλωτής Α/Γ, η γωνία ελέγχου $R_3^{theta,n}$ ορίζεται σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται γωνία προσβολής ίση με 90° . Επιπλέον, στο μοντέλο ROM η γωνία pitch και η γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων της Α/Γ, υπολογίζεται εξωτερικά για κάθε ταχύτητα ανέμου και παραμένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Γωνία pitch πτερυγίων Α/Γ (°)	Γωνιακή ταχύτητα πτερυγίων (rad/s)
8	0	1.003
18	14.93	1.267

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά Α/Γ για ταχύτητες ανέμου 8 και 18 m/s

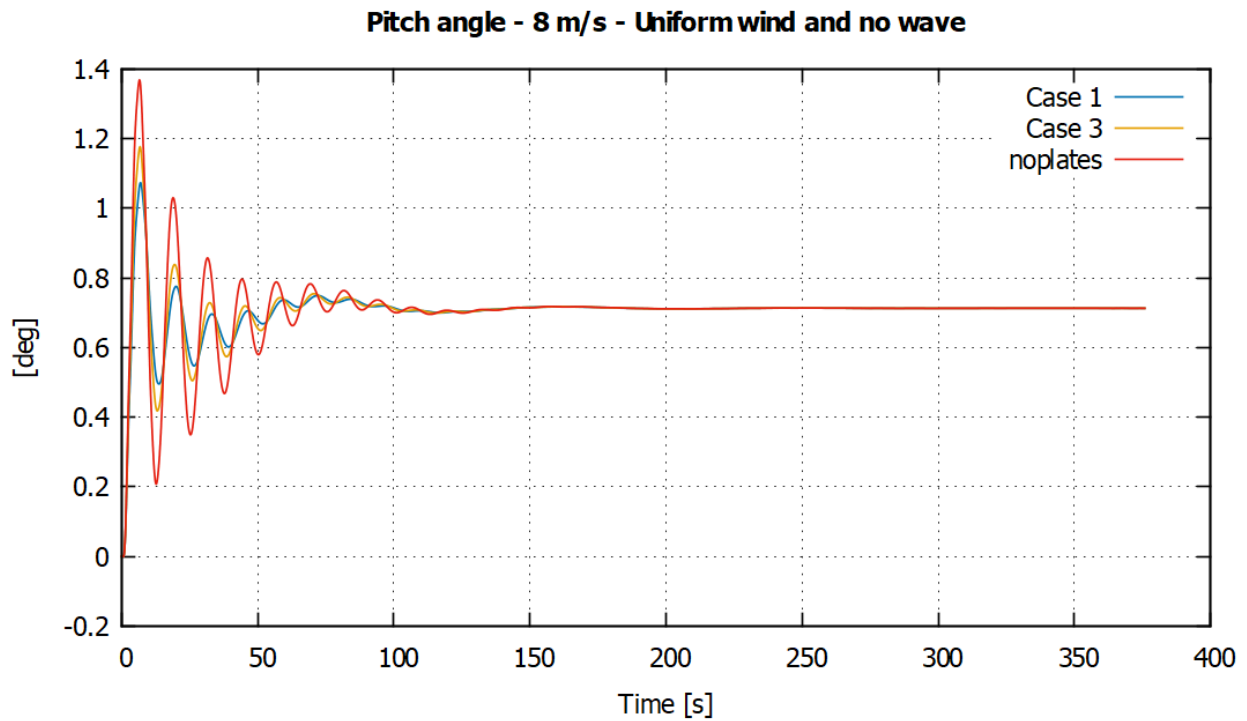
Δεδομένου ότι, το μοντέλο ROM προσομοιώνει μόνο το πεδίο του ανέμου, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μια μοναδική προσομοίωση για ταχύτητες ανέμου 8 και 18 m/s.

5.2.1 Σταθερός άνεμος – Χωρίς κύμα

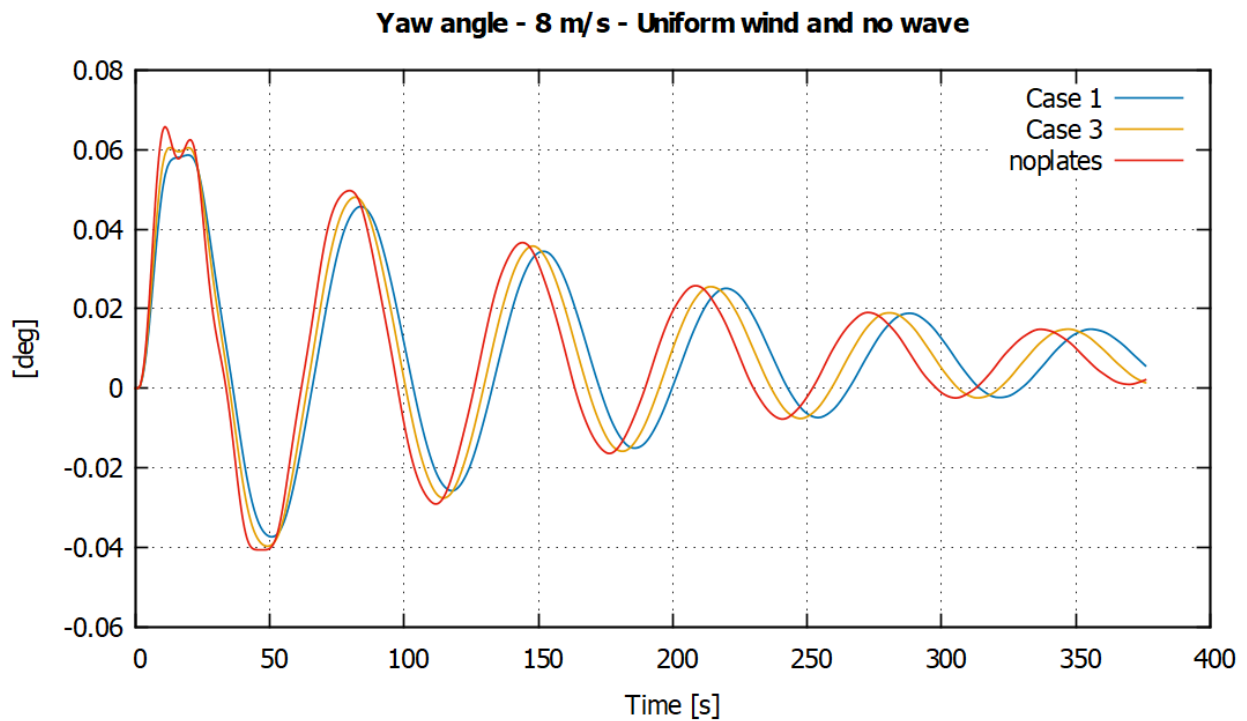
Στην παρούσα προσομοίωση, η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει σταθερή τιμή καθ' όλη την διάρκεια της.

Τύπος ανέμου	Σταθερός
Ταχύτητα ανέμου	8 και 18 m/s

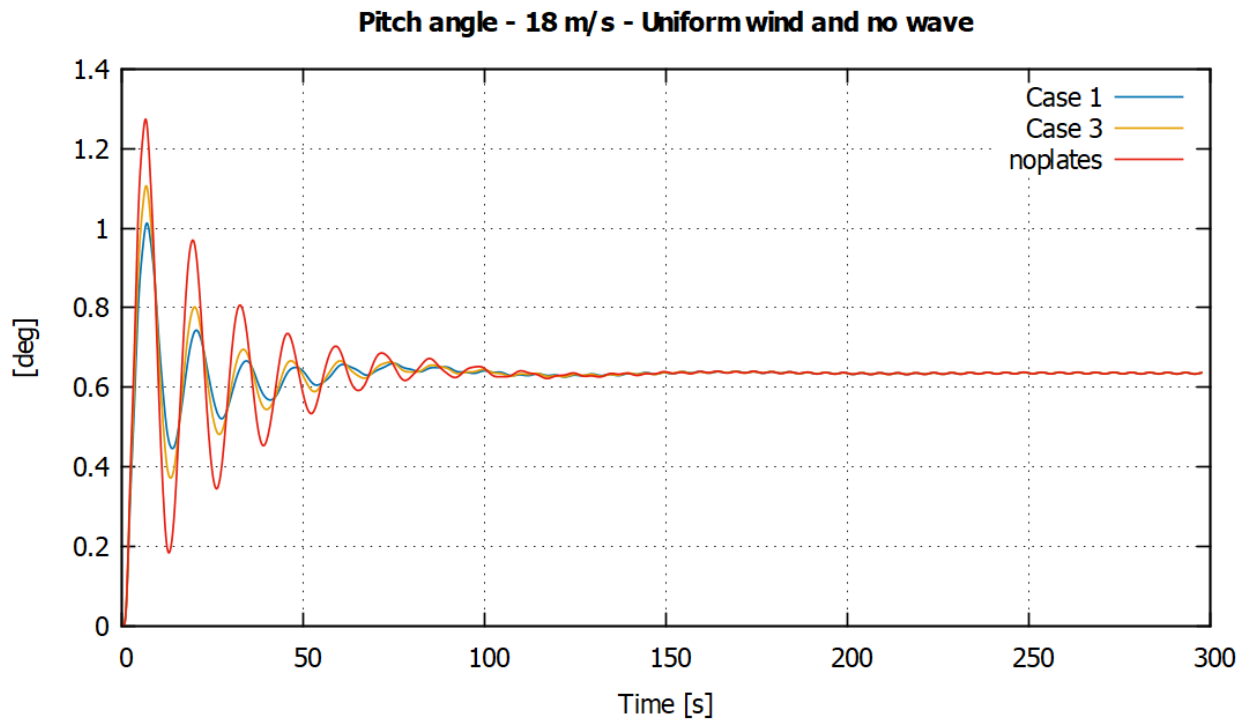
Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά ανέμου



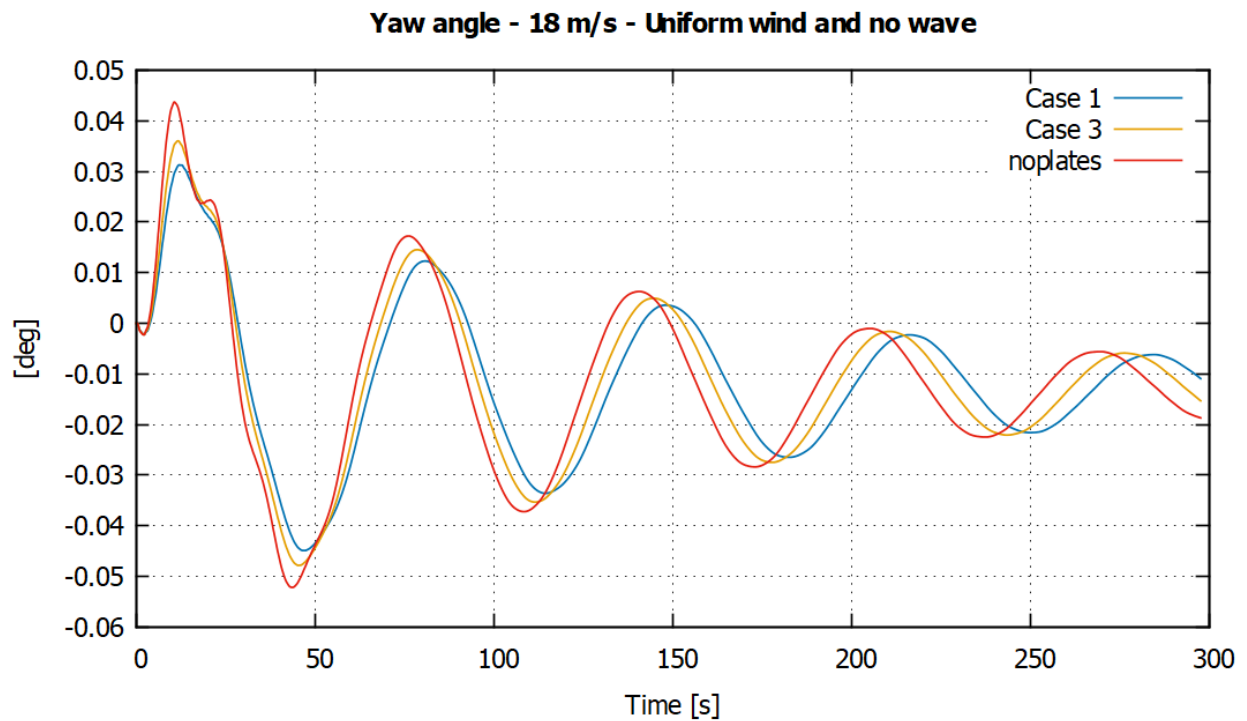
Σχήμα 5.48: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.49: Συμβολή των διατάξεων Νο 1, 3 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.50: Συμβολή των διατάξεων No 1, 3 στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



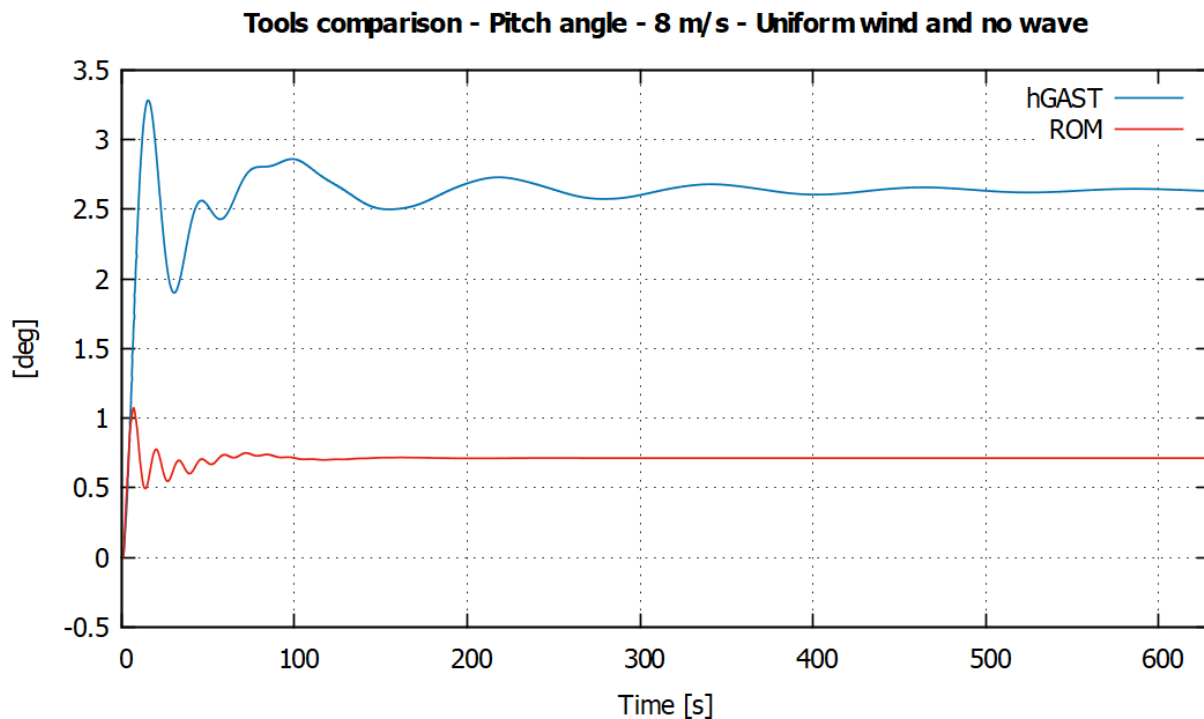
Σχήμα 5.51: Συμβολή των διατάξεων No 1, 3 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

5.3 Αριθμητική σύγκριση μοντέλων hGAST - ROM

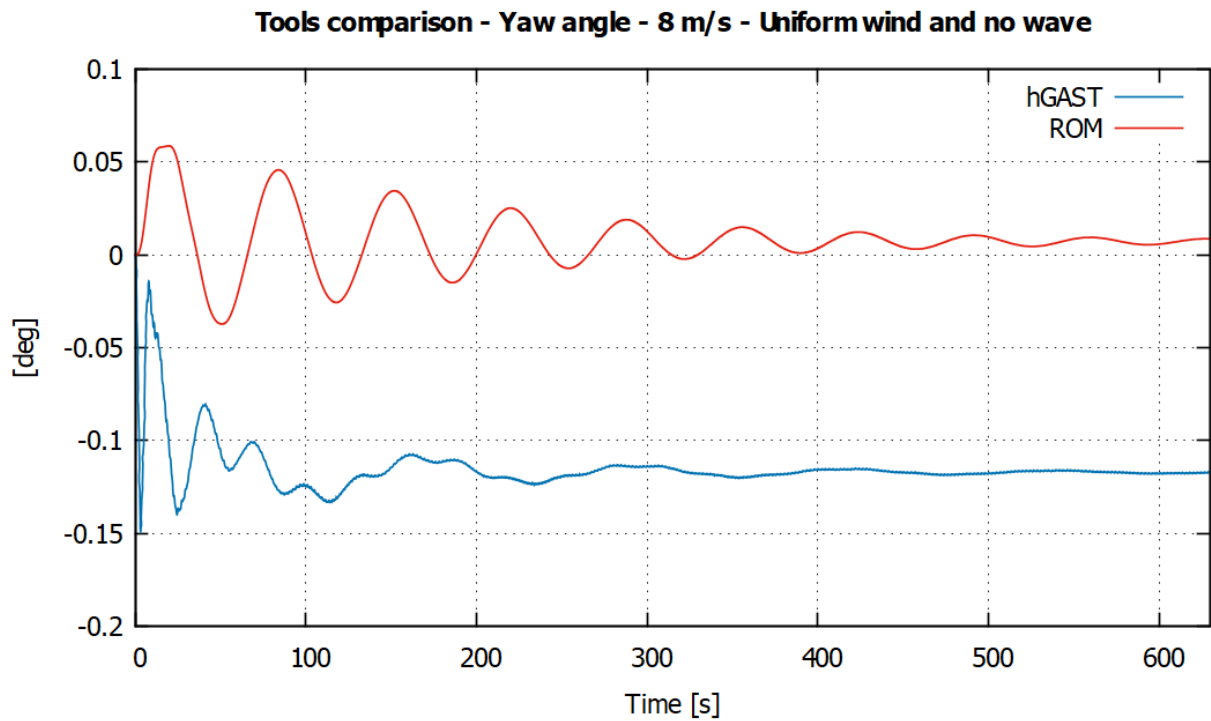
Η σύγκριση μεταξύ των δύο αυτών υπολογιστικών εργαλείων, πραγματοποιείται για την προσομοίωση της συμβολής της διάταξης No1 (Σχήμα 4.2α) στην δυναμική συμπεριφορά μιας πλωτής Α/Γ. Σκοπός της σύγκρισης αυτής, ήταν κυρίως κατά πόσο μπορεί το απλουστευμένο μοντέλο ROM να αποδώσει αποτελέσματα ικανά να δημιουργήσουν μια πρώτη εντύπωση για την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα.

5.3.1 Σταθερός άνεμος - Χωρίς κύμα

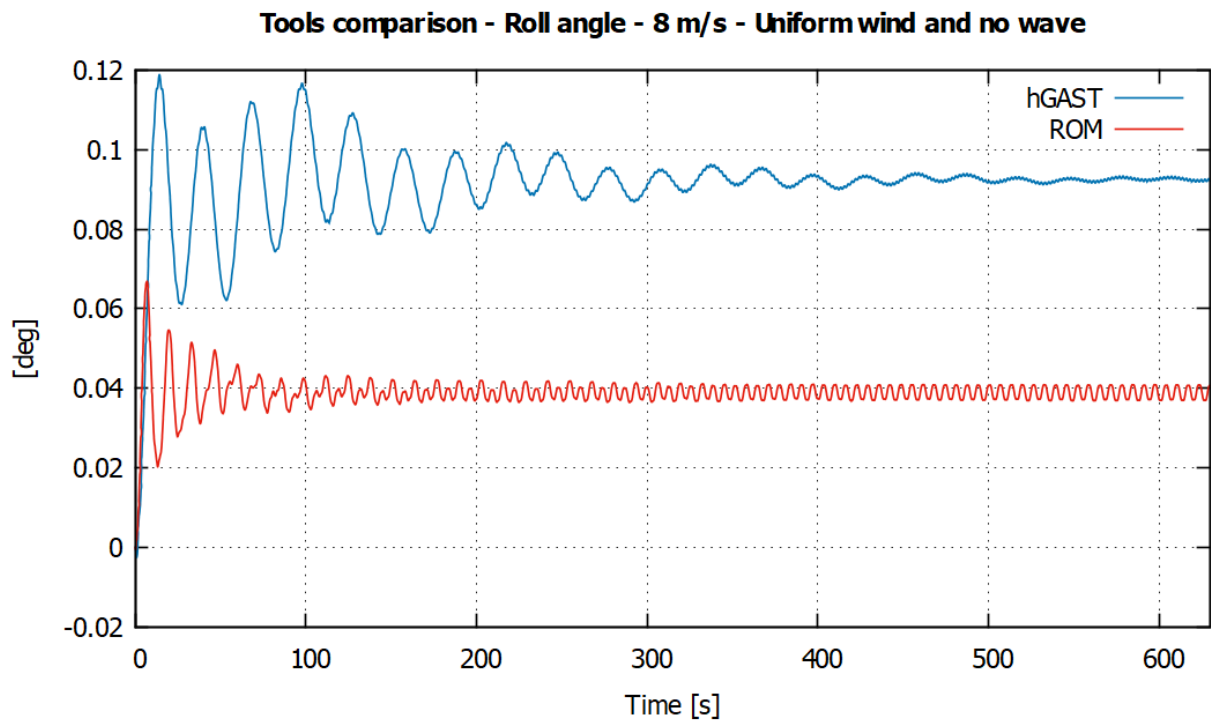
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έχουν υπολογιστεί προηγουμένως, όπου για το μοντέλο hGAST στην Παράγραφο 5.1.6 και για το ROM στην Παράγραφο 5.2.1. Η ταχύτητα ανέμου, για την οποία θα γίνει η σύγκριση, επιλέχθηκε να είναι αυτή των 8 και των 18 m/s.



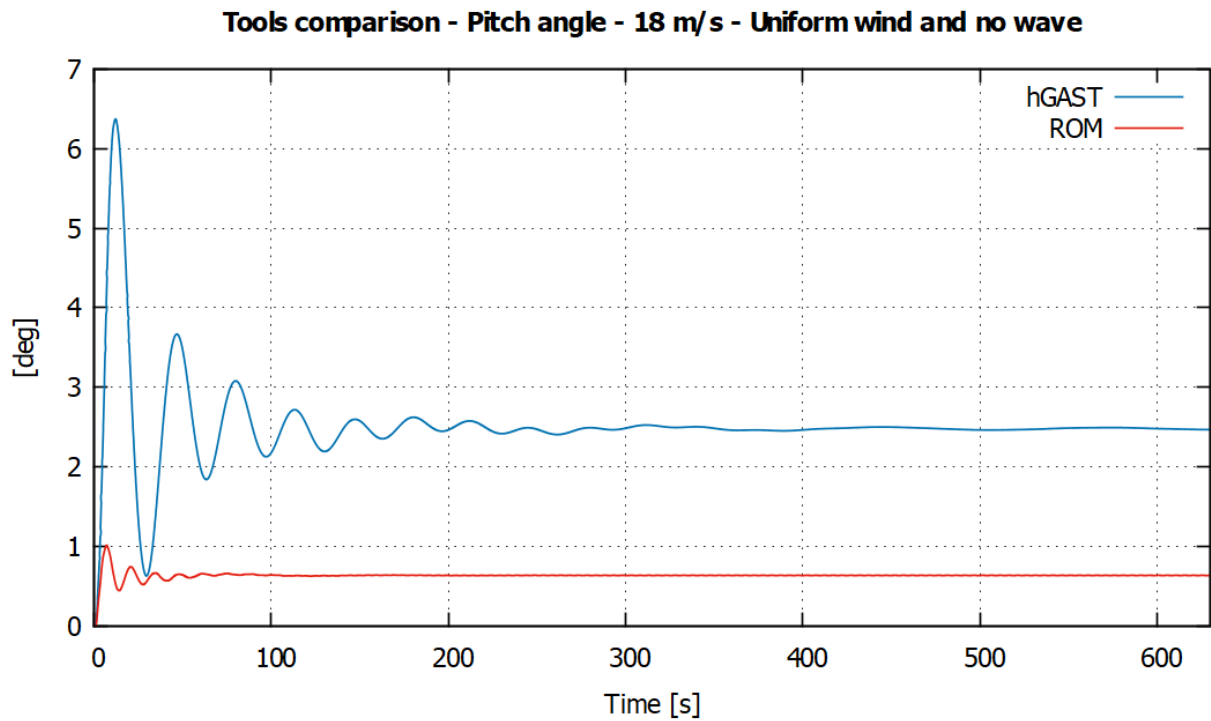
Σχήμα 5.52: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή pitch, για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



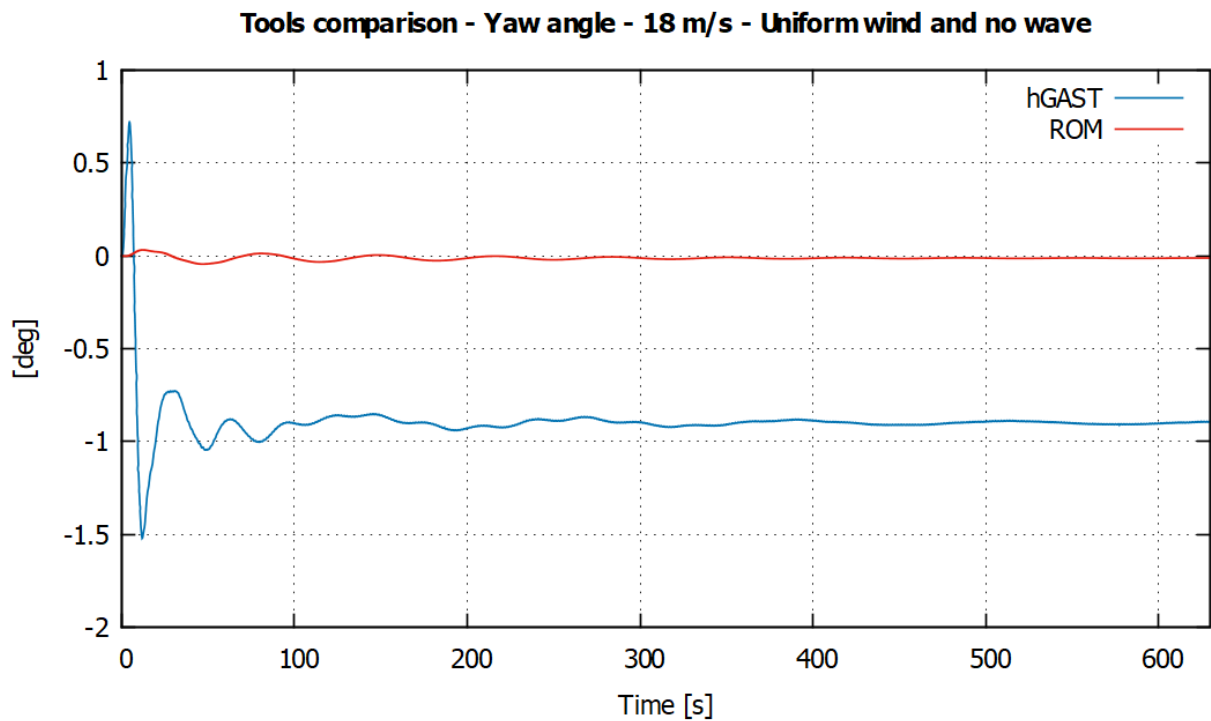
Σχήμα 5.53: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή yaw, για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



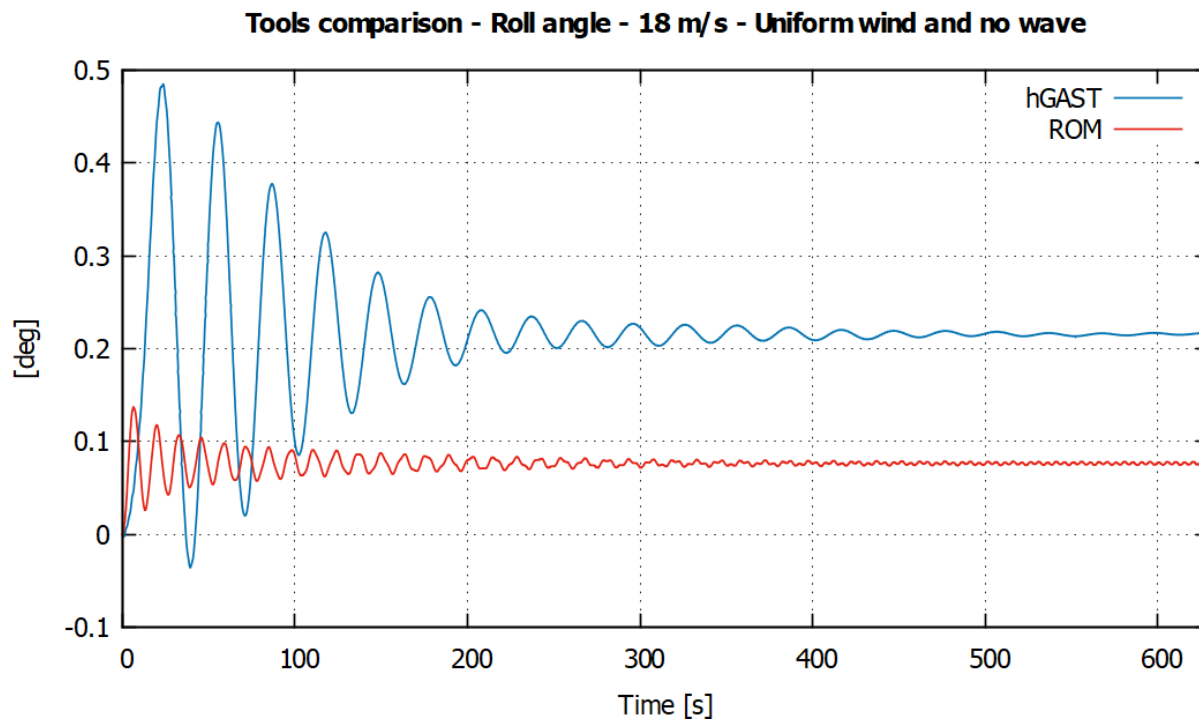
Σχήμα 5.54: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή roll, για ταχύτητα ανέμου 8 m/s



Σχήμα 5.55: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή pitch, για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.56: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή yaw, για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.57: Σύγκριση των δύο μοντέλων μέσω της συμβολής της διάταξης No1 στην στροφή roll, για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Παρατηρείται ότι, οι στροφές της πλωτής Α/Γ που υπολογίστηκαν από το μοντέλο ROM παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή στο πεδίο του χρόνου συγκριτικά με αυτές του hGAST. Ωστόσο, τα πλάτη των καμπυλών των στροφών διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό μεταξύ των δύο μοντέλων. Το γεγονός αυτό έχει αναλυθεί σε προηγούμενη εργασία [12], όπου πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των μοντέλων για τις κινήσεις και στροφές της πλωτής Α/Γ, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των πτερυγίων στην συμπεριφορά του πλωτού συστήματος. Οι αποκλίσεις οφείλονται λόγω ότι το μοντέλο ROM χρησιμοποιεί πρότυπα μειωμένου αριθμού βαθμών ελευθερίας σε αντίθεση με τον hGAST που χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Επίσης, το hGAST λαμβάνει υπ' όψιν του και μη γραμμικούς όρους, οι οποίοι δε λογίζονται στο απλουστευμένο μοντέλο.

5.4 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πτερυγίων

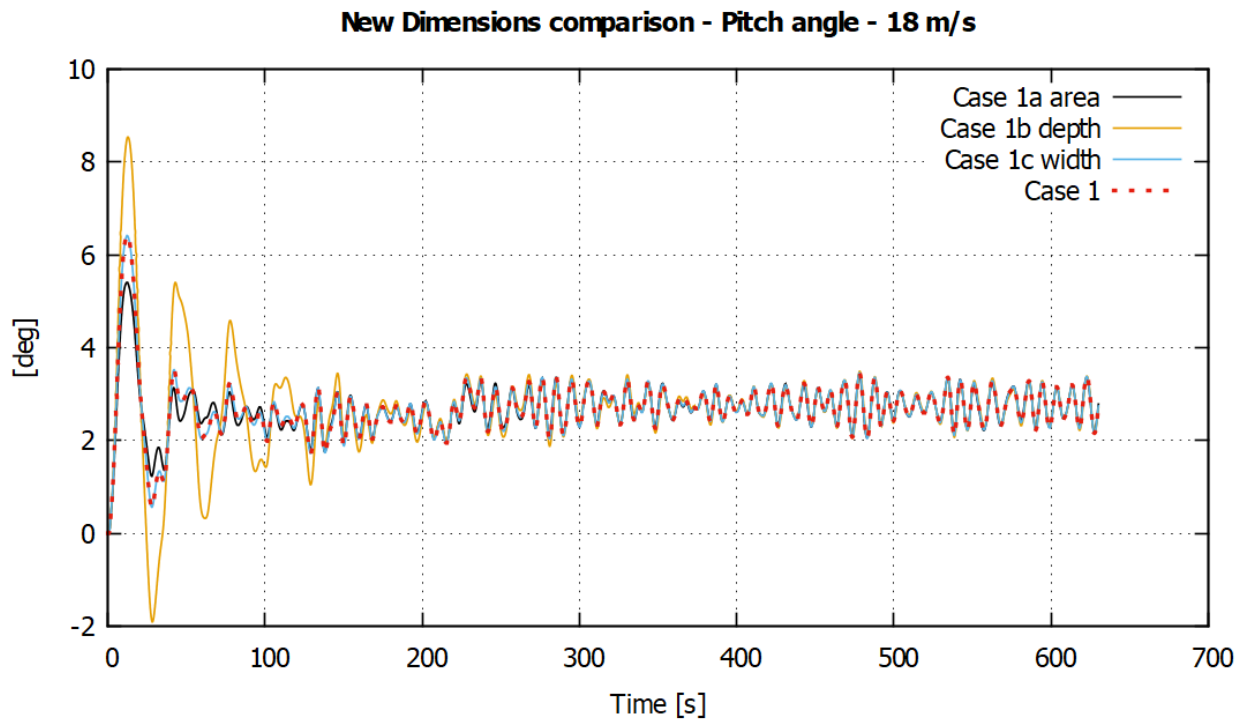
Η διαστασιολόγηση των πτερυγίων έγινε με εμπειρικό τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό μέγεθος της πλωτής Α/Γ, έτσι ώστε τα πτερύγια να είναι συμβατά με τις πραγματικές συνθήκες. Παρακάτω θα εξεταστεί το κατά πόσο επιδρούν τα χαρακτηριστικά του κάθε πτερυγίου στην συνολική ευστάθεια του συστήματος. Για τις νέες διατάξεις (Πίνακας 5.8) με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς και επεξεργασίας η διάταξη No1, η οποία αποτελείται από 4 πτερύγια (Σχήμα 5.1).

Διευκρινίζεται ότι οι αλλαγές στις διατάξεις θα γίνουν, στην επιφάνεια (No1a), στο βάθος τοποθέτησης (No1b) και στην οριζόντια απόσταση του κάθε πτερυγίου από τον πλωτήρα (No1c). Η γωνία ελέγχου $R_3^{theta,n}$ παραμένει και στις 4 διατάξεις μηδενική.

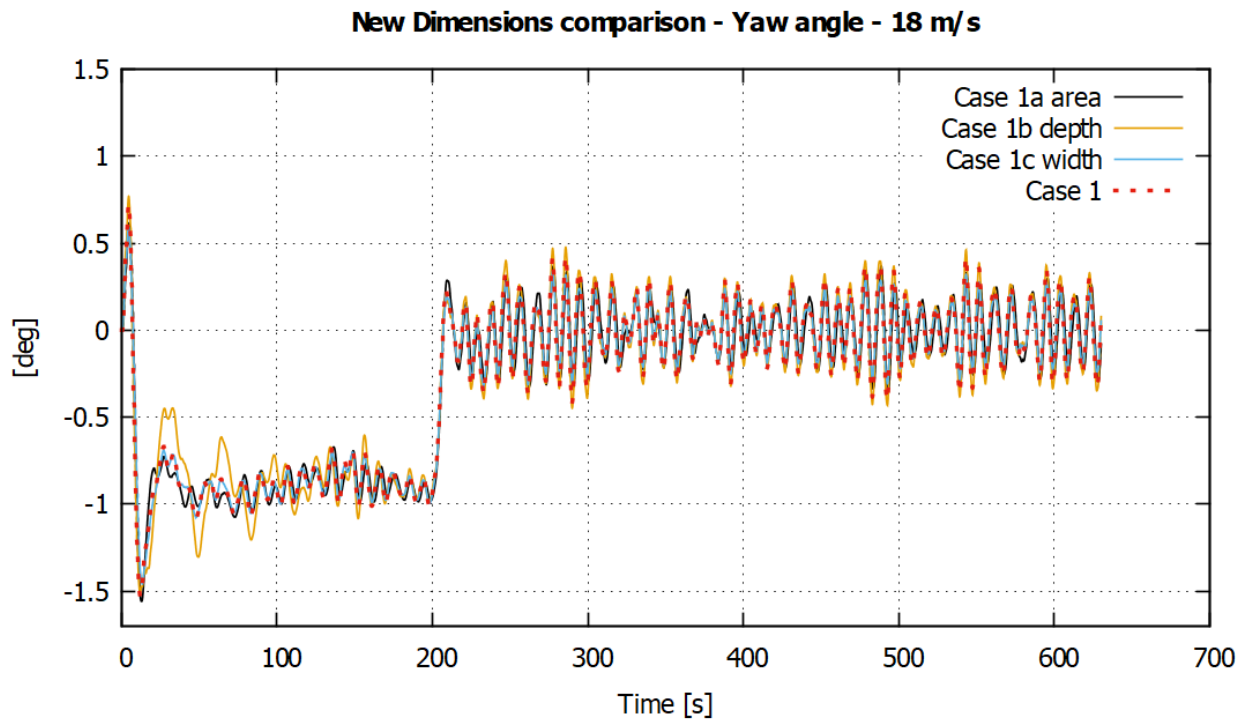
Διατάξεις	Επιφάνεια (m ²)	Βάθος (m)	Οριζόντια απόσταση (m)
No1	20 x 8= 160	120	10
No1a	30 x 10= 300	120	10
No1b	20 x 8= 160	80	10
No1c	20 x 8= 160	120	15

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά των 4 διατάξεων

Στην παρακάτω προσομοίωση, τα χαρακτηριστικά του ανέμου (EDC) και του κύματος (JONSWAP) είναι όμοια με αυτά της Παραγράφου 5.1.2. Η ταχύτητα ανέμου της προσομοίωσης ορίζεται στα 18 m/s.



Σχήμα 5.58: Σύγκριση των 3 νέων διατάξεων με την διάταξη No1 στην στροφή pitch της πλωτής A/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 5.59: Σύγκριση των 3 νέων διατάξεων με την διάταξη No1 στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ, μεγαλύτερη βελτίωση προσφέρει η διάταξη με την μεγαλύτερη επιφάνεια. Η αρχική διάταξη No1 έχει ίδια αποτελέσματα με την No1c, ενώ η No1b, λόγω του μικρότερου βάθους τοποθέτησης, δεν έχει μεγάλη συμβολή. Στην στροφή yaw και πριν την αλλαγή κατεύθυνσης (200 s) μεγαλύτερη συνεισφορά έχει η διάταξη No1a, δηλαδή με την μεγαλύτερη επιφάνεια. Ωστόσο, μετά την αλλαγή κατεύθυνσης η διάταξη No1c προσδίδει καλύτερα αποτελέσματα απ' όλες τις υπόλοιπες.

Κεφάλαιο 6

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής καθώς πραγματοποιείται και μια πρόταση βελτίωσης της συμβολής των πτερυγίων χρησιμοποιώντας μεταβλητές γωνίες ελέγχου.

6.1 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Το απλουστευμένο μοντέλο ROM, παρά το γεγονός ότι επιλύει το πρόβλημα προσεγγιστικά, δύναται να χρησιμοποιηθεί στα αρχικά στάδια της ανάλυσης για να δημιουργηθεί μια πρώτη εντύπωση για την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Μπορεί τα πλάτη των κυματομορφών που εξάγονται, σε σύγκριση με αυτά του hGAST, να διαφέρουν αριθμητικά, όμως η συμπεριφορά του πλωτού συστήματος είναι παρόμοια.
- Όσο αυξάνεται ο αριθμός των πτερυγίων τόσο μεγαλύτερη είναι η συμβολή τους στην ευστάθεια του πλωτήρα, διότι αυξάνεται η συνολική επιφάνεια των πτερυγίων αποδίδοντας έτσι μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης.
- Οι γραμμές αγκυρώσεων, κατά την δυναμική ανάλυση της πλωτής Α/Γ, επηρεάζουν μόνο την ιδιοσυχνότητα της.
- Η συμβολή των πτερυγίων στην βελτίωση της ευστάθειας του πλωτού συστήματος είναι αρκετά ικανοποιητική. Από ένα χρονικό σημείο και έπειτα, όταν οι τιμές του κύματος και ανέμου παραμένουν σταθερές, η συμβολή τους, συνήθως, ελαχιστοποιείται και το σύστημα παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά και χωρίς αυτά, έως ότου δημιουργηθεί ξανά κάποια απότομη μεταβολή λόγω του κύματος ή του αέρα.
- Η γωνία ελέγχου του κάθε πτερυγίου, που εισάγεται για την επίτευξη γωνίας προσβολής 90° , κρίνεται αναγκαία, διότι η δύναμη αντίστασης εξαρτάται άμεσα από την γωνία προσβολής.
- Το βάθος τοποθέτησης, η οριζόντια απόσταση από τον κάθετο άξονα του πλωτήρα και η επιφάνεια του εκάστοτε πτερυγίου πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αρχική διαστασιολόγηση, διότι επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

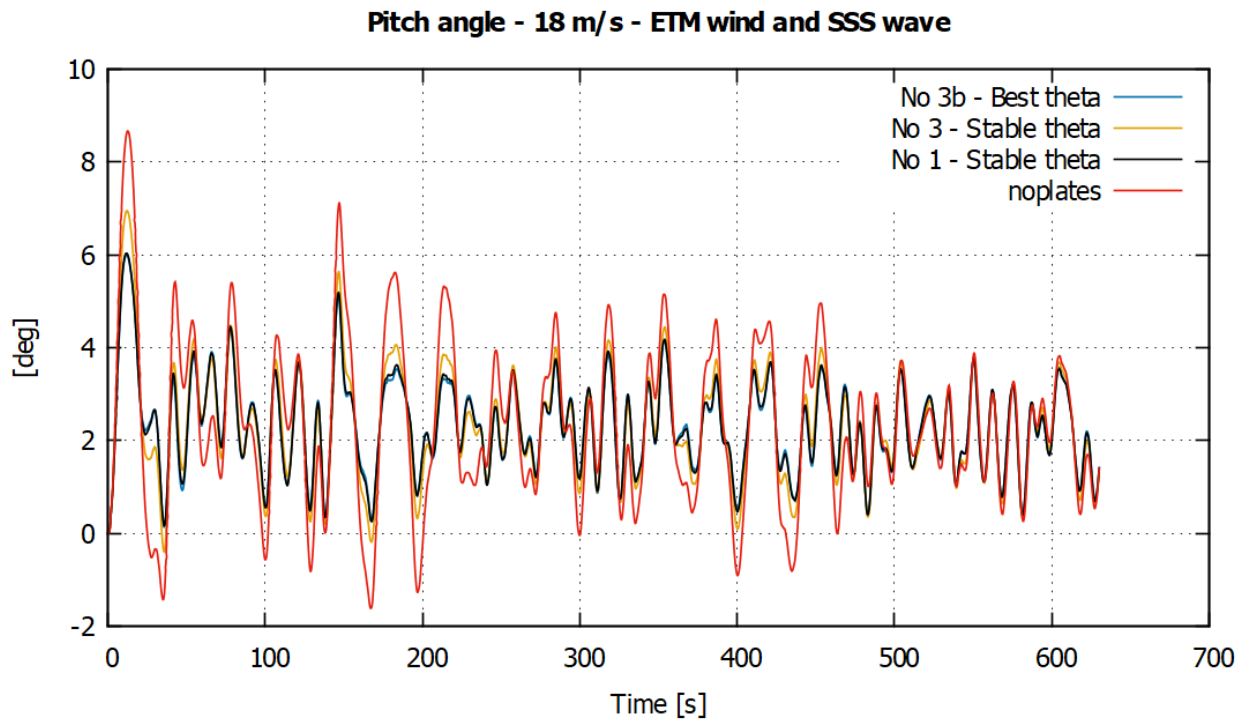
6.2 Πρόταση για μελλοντική έρευνα

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, αφορούσαν πτερύγια τα οποία παρέμεναν σταθερά καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Ο σκοπός ήταν να επιτευχθεί μια μόνιμη γωνία προσβολής ίση με 90° μέσω της γωνίας ελέγχου $R_3^{theta,n}$. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η δύναμη αντίστασης (Drag) να μεγιστοποιείται και η δύναμη άνωσης (Lift) να μηδενίζεται. Επομένως, στην παρούσα ενότητα, τα πτερύγια που θα χρησιμοποιηθούν θα έχουν μεταβλητή γωνία ελέγχου με σκοπό την μεγιστοποίηση του αθροίσματος των δυνάμεων Drag και Lift.

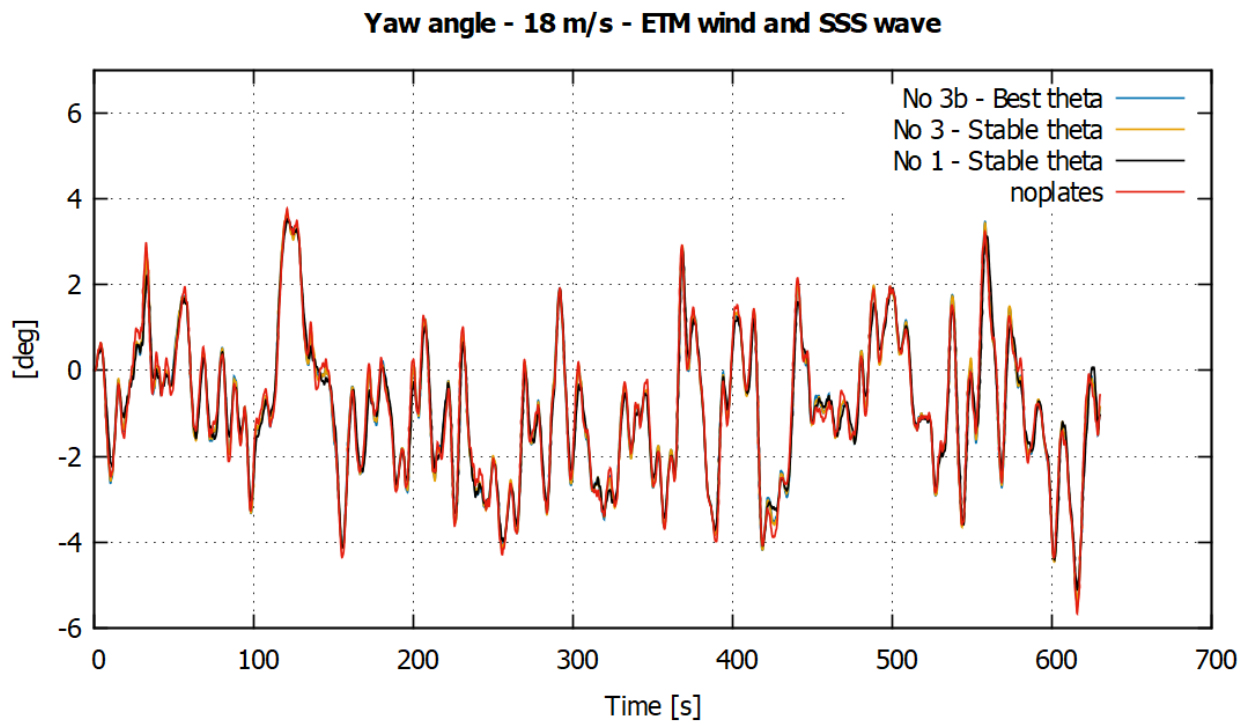
Στην παρακάτω προσομοίωση, η μεταβλητή γωνία ελέγχου θα χρησιμοποιηθεί για την διάταξη No3 (Σχήμα 5.3) έτσι ώστε να γίνει μια σύγκριση με την διάταξη No1 (Σχήμα 5.1) που αποτελείται από δύο παραπάνω πτερύγια. Η νέα διάταξη, με τα κινούμενα πτερύγια, ορίζεται ως No3b. Ως περίπτωση ανέμου και κύματος χρησιμοποιείται αυτή της Παραγράφου 5.1.5, όπου υπάρχουν ακραίες τιμές ανέμου (ETM) και κύματος (SSS), με σκοπό την μέγιστη διέγερση της πλωτής Α/Γ.

Διάταξη / πτερύγια	No 1 (σταθερή)	No 3 (σταθερή)	No 3b (μεταβλητή)
n1	0	85.23	0 έως 90
n2	0	85.23	0 έως 90
n3	0	-	-
n4	0	-	-

Πίνακας 6.1: Γωνία ελέγχου (°) σε κάθε πτερύγιο κάθε διάταξης



Σχήμα 6.1: Σύγκριση μεταβλητής και σταθερής γωνίας ελέγχου για διατάξεις 2 και 4 πτερυγίων στην στροφή pitch της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s



Σχήμα 6.2: Σύγκριση μεταβλητής και σταθερής γωνίας ελέγχου για διατάξεις 2 και 4 πτερυγίων στην στροφή yaw της πλωτής Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 18 m/s

Η βελτίωση που προκύπτει από την διάταξη Νο3b με τα πτερύγια μεταβλητής γωνίας ελέγχου, είναι αρκετά ικανοποιητική και προσδίδει παρόμοια αποτελέσματα με την διάταξη Νο1 των 4 πτερυγίων και στις δύο εξεταζόμενες στροφές. Επιπλέον, παρατηρείται αρκετά μεγάλη διαφορά ανάμεσα στην διάταξη Νο3 (σταθερή γωνία) και στην διάταξη Νο3b (μεταβλητή γωνία), λόγω του ενεργού ελέγχου. Επομένως, όμοια μείωση των μεταβολών με την διάταξη Νο1 μπορεί να προκύψει και από τις διατάξεις 2 πτερυγίων, αρκεί η γωνία ελέγχου να είναι μεταβλητή.

Ωστόσο, στον υπολογισμό της συμβολής των πτερυγίων μεταβλητής γωνίας ελέγχου, δεν λαμβάνεται υπόψιν μια σημαντική παράμετρος:

- *Δεν υπολογίζεται η επιπλέον δύναμη που παράγεται, λόγω της επιταχυνόμενης κίνησης των πτερυγίων μέσα στο ρευστό, απόρροια του μεταβλητού ελέγχου της γωνίας προσβολής.*

Αναλυτικότερα, δεδομένου ότι η γωνία προσβολής των πτερυγίων μεταβάλλεται κάθε χρονική στιγμή, με σκοπό να επιτευχθεί το μέγιστο άθροισμα των δυνάμεων Drag και Lift, είναι ουσιαστικά αδύνατον τα πτερύγια να κινούνται μέσα στο ρευστό τόσο γρήγορα.

Εν κατακλείδι, προτείνεται να διερευνηθεί η συμβολή του ενεργού ελέγχου των πτερυγίων στην ευστάθεια της πλωτής Α/Γ, συμπεριλαμβάνοντας όμως και την επιπλέον δύναμη που παράγεται λόγω της εξαναγκασμένης επιταχυνόμενης κίνησης των πτερυγίων μέσα στο ρευστό.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Sánchez, J. S. López-Gutiérrez, V. Negro, and M. D. Esteban, “Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 12, 2019.
- [2] T. Soukissian *et al.*, “Assessment of offshore wind power potential in the Aegean and Ionian Seas based on high-resolution hindcast model results,” *AIMS Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 268–289, 2017.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Floating Foundations: A Game Changer for Offshore Wind Power,” 2016.
- [4] J. M. Jonkman, “Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine,” 2007.
- [5] F. G. Nielsen, T. D. Hanson, and B. Skaare, “Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines,” *Eur. Wind Energy Conf. Exhib. 2006, EWEC 2006*, vol. 3, pp. 1834–1842, 2006.
- [6] Y. Wenxian, T. Wenye, O. Hvalbye, Z. Peng, K. Wei, and X. Tian, “Experimental Research for Stabilizing Offshore Floating Wind Turbines,” *Energies*, vol. 12, p. 15, 2019.
- [7] J. R. Morison, J. W. Johnson, and S. A. Schaaf, “The Force Exerted by Surface Waves on Piles,” *J. Pet. Technol.*, vol. 2, no. 05, pp. 149–154, 1950.
- [8] J. Jonkman, “Definition of the Floating System for Phase IV of OC3,” 2010.
- [9] P. Temarel, “Loads on ships and offshore structures,” in *LOADS ON SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES*, 2007.
- [10] X. Ortiz, D. Rival, and D. Wood, “Forces and moments on flat plates of small aspect ratio with Application to PV wind loads and small wind turbine blades,” *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2438–2453, 2015.
- [11] H. B. Jiang, Y. R. Li, and Z. Q. Cheng, “Relations of lift and drag coefficients of flow around flat plate,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 518, no. 2, pp. 161–164, 2014.
- [12] Σ. Κούκουρα, “Αεροελαστική Ανάλυση Πλωτών Ανεμογεννητριών με Πρότυπα Μειωμένου Αριθμού Βαθμών Ελευθερίας,” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
- [13] D. Manolas, “Hydro-Aero-Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines,” National Technical University of Athens, 2015.
- [14] S. Timoshenko, *Strength Of Materials_parts_IandII-Timoshenko.pdf*. D. VAN NOSTRAND COMPANY, Inc, 1940.

- [15] S. Liu and I. Janajreh, "Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2012.
- [16] Γ. Ε. Τερζάκης, "Βέλτιστος Σχεδιασμός Συνιστωσών Ανεμογεννητριών," Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2018.
- [17] R. M. Rivello, *Theory and analysis of flight structures*. McGraw-Hill, 1969.
- [18] V. A. Riziotis, "Αεροδυναμική Και Αεροελαστική Ανάλυση Της Απώλειας Στήριξης Σε Δρομείς Ανεμογεννητριών," National Technical University of Athens, 2003.
- [19] W. Cummins, "THE IMPULSE RESPONSE FUNCTION AND SHIP MOTIONS," 1962.
- [20] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL Technical Report No. TP-500-38060," 2009.
- [21] IEC, *IEC TS 61400-3-2:2019*. International Electrotechnical Commission, 2019.