



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

«Πειραματική διερεύνηση τυχαίων κυματισμών σε πλωτές  
ανεμογεννήτριες τύπου SPAR και TLP»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ν. ΜΑΚΡΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Σ. Α. ΜΑΥΡΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2017



## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια των σπουδών μου στο ΔΠΜΣ Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη εντάσσεται και η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Μετά την επιτυχή παρακολούθηση του μαθήματος Συνθήκες Φόρτισης του Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Σπυρίδωνα Μαυράκου, θέλησα στη συνέχεια να εμβαθύνω τις γνώσεις μου πάνω σε θέματα μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς πλωτών Ανεμογεννητριών, μέρος του οποίου πραγματεύεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Θα ήθελα στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Σπυρίδωνα Μαυράκο για την καταρχήν αποδοχή της επίβλεψης της μεταπτυχιακής μου εργασίας και την παροχή των πειραματικών δεδομένων. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κύριο Θωμά Μαζαράκο, Δρ. Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., Μεταδιδακτορικό Ερευνητή του Εργαστηρίου Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την βοήθεια του, με τις σχετικές επισημάνσεις και τις απαιτούμενες διορθώσεις.



*Η παρούσα διπλωματική  
αφιερώνεται στους Γονείς μου*



## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά τη μελέτη της ανάλυσης πειραματικών δεδομένων που προέρχονται από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη δεξαμενή δοκιμών (DHI) στην πόλη Hørsholm της Δανίας, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Hydralab IV (Μαυράκος, 2012).

Στο πρώτο κεφάλαιο ξεκινά η ανάλυση με την παράθεση των λόγων για τους οποίους οδηγήθήκαμε στην κατασκευή των πλωτών ανεμογεννητριών και γίνεται αναφορά στην ιστορική εξέλιξή τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα περισσότερα μοντέλα απ' όσα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών χαρακτηριστικών τους, καθώς και των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Επίσης, λαμβάνει χώρα παρουσίαση των συστημάτων πρόσδεσης που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους πλωτά μέσα. Στο τρίτο κεφάλαιο παραθέτουμε εργασίες που σχετίζονται με τη διεξαγωγή πειραμάτων στις πλωτές ανεμογεννήτριες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προβαίνουμε στην παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας και των αντίστοιχων παραμέτρων, βάση των οποίων έγιναν τα πειράματα για τις συσκευές Tension Leg Platform (TLP) και Spar Buoy (SB). Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχει η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που προκύπτουν από τους τυχαίους κυματισμούς με τους ελέγχους κανονικότητας και στασιμότητας των χρονοσειρών, την παραγωγή των φασμάτων, την ανάλυση των κατανομών του σημαντικού ύψους για διάφορες περιπτώσεις και, τέλος, την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αδιάστατων συντελεστών MKN για τις μέγιστες τιμές.





## **Abstract**

The present master's thesis is about the study of analysis of experimental data that originates from the experiments that they were carried out at the DHI deep water wave basin in Hørsholm, Denmark (Mavrakos, 2012).

The study begins in the first chapter with the introduction of the reasons which led to the manufacture of navigable Wind generators and to their historical development. In the second chapter are reported most models that have been drawn and manufactured with their technical characteristics and the advantages and disadvantages that they present. There is also a presentation mooring systems that are used in such type floating means. In the third chapter we mention certain results from published work in experiments on the floating Wind generators.

In the fourth chapter it is presented the experimental procedure and the corresponding parameters, based on which the experiments were performed on devices Tension Leg Platform (TLP) and Spar Buoy (SB). In the fifth chapter there is an analysis of not linear experimental data with the controls of regularity and stagnation of time series, the production of spectra, the analysis of distributions of significant height for various cases and finally it is presented the results of dimensionless MKN rates for maximum values.



## Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	15
Κεφάλαιο 1.....	17
1.1 Εισαγωγή.....	17
1.2 Πλεονεκτήματα Μειονεκτήματα.....	17
1.3 Triple floater.....	18
1.4 Ανεμογεννήτρια σε σχήμα T.....	19
1.5 Ανεμογεννήτρια τύπου Tension Leg.....	20
1.6 Μοντέλο Spar Buoy.....	20
1.7 Quadruple floater.....	21
1.8 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών βάση στατικής ευστάθειας.....	21
1.8. α ) Μοντέλο MIT/NREL TLP και UMaine TLP.....	22
1.8. β ) Μοντέλο OC3- Hywind Spar και UMaine Spar.....	23
1.8. γ ) Μοντέλο ITI Energy Barge και UMaine Semi.....	24
1.9 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με βάση την επίτευξη στατικής σταθερότητας.....	25
1.10 Προβολή χαρακτηριστικής γωνίας.....	26
Κεφάλαιο 2.....	29
2.1 Συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης θαλάσσιων κατασκευών.....	29
2.2 Γενικευμένες κινήσεις.....	30
2.3 Περιγραφή των συνθηκών περιβάλλοντος.....	30
2.4 Πεδίο ανέμου.....	31
2.5 Θαλάσσια ρεύματα.....	32
2.6 Θαλάσσιοι κυματισμοί.....	33
2.7 Συστήματα αγκύρωσης πλωτών συστημάτων.....	33
2.8 Gravity base anchor (άγκυρα βαρύτητας).....	35
2.9 Drag-Embedded Anchor.....	35
2.10 Driven Pile Anchor.....	36
2.11 Suction Anchor (Άγκυρες αναρρόφησης).....	37
2.12 Driven anchor plate.....	37
2.13 Τύπος Catenary Mooring System (αλυσοειδές σύστημα αγκύρωσης).....	38
2.14 Types of Vertical Moored Systems.....	39
Κεφάλαιο 3.....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2 Barge Floater.....	41

3.2.1 Χαρακτηριστικά συσκευής Barge Floater.....	42
3.2.2 Χαρακτηριστικά στροβίλου τύπου NREL 5 MW .....	42
3.2.3 Όργανα μέτρησης.....	43
3.3 Πειράματα για TLP Spar και Semi.....	43
3.4 Πειράματα για Wind Wave Float .....	46
3.4.1 Συσκευή Wind Wave Float .....	47
3.4.2 Διεξαγωγή πειραμάτων .....	48
3.5 SWAY Spar .....	48
3.5.1 Όργανα μέτρησης.....	49
3.6 Πλατφόρμα OC4-DeepCWind Semi-Submersible.....	50
3.6.1 Υλικά κατασκευής.....	51
3.6.2 Όργανα μέτρησης.....	51
3.6.3 Χαρακτηριστικά δεξαμενής δοκιμών .....	52
3.6.4 Κλίμακα λ.....	52
3.7 Σύγκριση πλωτών ανεμογεννητριών .....	53
3.7.1 Σχήματα και χαρακτηριστικά των πλωτών ανεμογεννητριών.....	53
3.7.2 Πειραματική διαδικασία.....	54
3.8 Πλατφόρμα Towing Tank .....	56
3.8.1 Χαρακτηριστικά προτύπου.....	56
3.8.2 Όργανα μέτρησης.....	56
3.9 Παρουσίαση πειραματικών δοκιμών.....	57
Κεφάλαιο 4.....	61
4.1 Εισαγωγή.....	61
4.2 Περιγραφή μοντέλων.....	61
4.2.1 Το μοντέλο TLP .....	61
4.2.2 Το μοντέλο SB.....	63
4.2.3 Χαρακτηριστικά δεξαμενής.....	64
4.3 Όργανα μέτρησης.....	65
4.4 Συγχρονισμός οργάνων .....	66
4.4.1 Βαθμονόμηση οργάνων.....	66
4.4.2 Calibration για τη δύναμη 6compFy .....	68
4.4.3 Calibration για τη δύναμη TLP_ Mooring 1 .....	70
4.4.4 Calibration για τη δύναμη TLP_ Mooring 2 .....	71
4.4.5 Calibration για τη δύναμη TLP_ Mooring 3 .....	71

4.4.6 Calibration για τη δύναμη TLP_Mooring 3 .....	72
4.5 Πειραματική διαδικασία.....	73
4.6 Πρόγραμμα δοκιμών .....	74
4.7 Αναγωγή με βάση το συντελεστή κλίμακας ( $\lambda$ ).....	74
4.8 Παρουσίαση χρονοσειρών.....	78
Κεφάλαιο 5.....	81
5.1 Εισαγωγή.....	81
5.2 Στατιστική ανάλυση και ενεργειακά φάσματα.....	81
5.2.1 Κατανομή Reyleigh.....	81
5.2.2 Χαρακτηριστικά ύψη κύματος που παρατηρούνται στην κατανομή Reyleigh .....	82
5.2.3 Συσχέτιση πληροφοριών από καταγραφές.....	82
5.2.4 Κατανομή των ακραίων τιμών του ύψους κύματος .....	83
5.2.5 Φάσματα που χρησιμοποιούνται στην παράκτια Μηχανική.....	83
5.2.5.1 Φάσμα JONSWAP .....	84
5.2.5.2 Φάσμα P-M (Pierson-Moskowitz).....	84
5.2.5.3 Φάσμα Bretschneider .....	85
5.2.6 Σύνδεση πεδίο χρόνου με πεδίο συχνοτήτων .....	86
5.3 Ανάλυση πειράματος TLP_00_NR .....	87
5.3.1 Παρουσίαση χρονοσειρών T1239+T1240_1.6_0.1_TLP_00_NR.....	87
5.3.2 Παρουσίαση Στατιστικών αποτελεσμάτων TLP_00_NR.....	90
5.3.3 Στοχαστική ανάλυση χρονοσειράς πειράματος T1239_1.6_0.1_TLP_00_NR.....	103
5.3.4 Έλεγχος στασιμότητας TLP_00_NR.....	105
5.3.5 Έλεγχος μοναδιαίας ρίζας (Dickey Fuller Test) TLP_00_NR .....	107
5.4 Παρουσίαση φάσματος για την περίπτωση TLP_00_NR .....	107
5.5 Κατανομή σημαντικού ύψους $H_s$ για την περίπτωση TLP_00_NR.....	112
5.6 Ανάλυση πειράματος SB_20_R .....	115
5.6.1 Παρουσίαση χρονοσειρών T1439_1.6_0.1_και T1440_1.6.0.1 SB_20_R.....	116
5.6.2 Παρουσίαση στατιστικών αποτελεσμάτων SB_20_R.....	118
5.6.3 Στοχαστική ανάλυση χρονοσειράς πειράματος T1439_1.6_0.1_και T1440_1.6.0.1 TLP_20_R.....	128
5.7 Παρουσίαση φάσματος για την περίπτωση SB_20_R .....	131
5.8 Κατανομή σημαντικού ύψους $H_s$ για την περίπτωση SB_20_R.....	136
5.9 Σύγκριση ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης για τέσσερις περιπτώσεις .....	138

5.10 Σύγκριση ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης για τέσσερις περιπτώσεις .....	164
5.11 Σύγκριση κατανομών σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις TLP_0_NR ..	189
5.12 Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τη SB .....	206
5.13 Παρουσίαση συντελεστών MKN για τη TLP_00_NR .....	222
5.14 Παρουσίαση συντελεστών MKN 4 περιπτώσεων για τη TLP .....	230
5.15 Παρουσίαση συντελεστών MKN για τη SB_00_NR .....	235
5.16 Παρουσίαση συντελεστών MKN 4 περιπτώσεων για τη SB.....	240
Συμπεράσματα.....	247
Προτάσεις.....	251
Βιβλιογραφία.....	253

## Εισαγωγή

Η αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια, προκειμένου να καλυφθούν οι αυξανόμενες ανάγκες που προκύπτουν. Τα τελευταία χρόνια, στα περισσότερα μέρη του κόσμου, η ενεργειακή επάρκεια επιτυγχάνεται με τη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε αυτές συγκαταλέγονται τα στερεά και υγρά καύσιμα, (όπως ο λιγνίτης και το πετρέλαιο) και τέλος, η πυρηνική ενέργεια. Η εμπειριστατωμένη μελέτη και η επακόλουθη γνώση της τεχνολογίας τους, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας με χαμηλό κόστος.

Εν προκειμένω όμως, οφείλουμε να αναφέρουμε ότι η καύση ορυκτών και υγρών καυσίμων είναι επιβλαβής για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Επιπλέον, παρόλο που για την παραγωγή ενέργειας δεν απαιτούνται υπέρογκα χρηματικά ποσά, η ύπαρξη ολιγοπωλίων οδηγεί εν τέλει στην αύξηση της τιμής για τους καταναλωτές.

Τέλος, η χρήση πυρηνικής ενέργειας προκαλεί δυσεπίλυτα προβλήματα όσον αφορά τη διαχείριση και την ασφαλή αποθήκευση των ραδιενεργών αποβλήτων, ενώ, συν τοις άλλοις, πάντα ελλοχεύει ο κίνδυνος πρόκλησης μόλυνσης εξαιτίας ατυχήματος ή και δολιοφθοράς.

Τα προβλήματα που ενσκήπτουν εξαιτίας των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ένα από τα οποία είναι και το ότι τείνουν να εξαντληθούν, δεδομένου ότι η χρήση τους είναι συνεχής, ενδεχομένως και αλόγιστη ενίοτε, οδηγούν αναπότρεπτα στην ανάγκη χρήσης και των ανανεώσιμων πηγών, οι οποίες παρουσιάζουν κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα, όπως το ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον και ανεξάντλητες.

Στις ανανεώσιμες πηγές εντάσσονται η αιολική, η ηλιακή, η κυματική ενέργεια, καθώς και η γεωθερμία και η βιομάζα. Η χερσαία αιολική ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας στον κόσμο σε ποσοστιαία βάση.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες, και ειδικότερα οι δυτικές και μεσοδυτικές περιοχές της, έχουν αναπτύξει σε μεγαλύτερο βαθμό την αιολική ενέργεια, χάρη στο ότι ο άνεμος είναι πιο ισχυρός και αυτές είναι πιο αραιοκατοικημένες συγκριτικά με την υπόλοιπη χώρα. Όμως, εξαιτίας αυτής της ανάπτυξης, προκύπτει το μείζον πρόβλημα της δυσκολίας μεταφοράς της ενέργειας στα μεγάλα αστικά κέντρα που βρίσκονται κοντά στις ακτές (Musial, 2004).

Οι παράκτιες περιοχές, στις οποίες κατοικούν οι περισσότεροι άνθρωποι, μπορούν να τροφοδοτηθούν με ενέργεια μέσω των παράκτιων αιολικών πάρκων. Στην Ευρώπη, δεν υπάρχουν μεγάλες χερσαίες εκτάσεις αλλά συναντώνται πολλές θαλάσσιες περιοχές όπου τα ύδατα είναι ρηχά, οι οποίες θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Άλλωστε, στις περιοχές που βρίσκονται γύρω από τη Βόρεια θάλασσα και τη Βαλτική, ήδη έχουν εγκατασταθεί θαλάσσια πάρκα, η συνολική ισχύς των οποίων ανέρχεται σε 900 MW (Watson, 2005).

Κάποια πρόσθετα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η εγκατάσταση αιολικής ενέργειας σε ανοιχτές θάλασσες είναι τα εξής (Henderson, 2003):

- Ο άνεμος κινείται πιο γρήγορα, με λιγότερη ένταση τύρβης και με μικρότερη διάτμηση στη θάλασσα απ' ό τι στη στεριά.
- Οι οπτικές και ακουστικές ενοχλήσεις περιορίζονται με τις πλωτές ανεμογεννήτριες, αφού είναι τοποθετημένες σε μεγάλη απόσταση από την ακτή.
- Δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος των ανεμογεννητριών στη θάλασσα, εν αντιθέσει με ότι ισχύει αναφορικά με τις χερσαίες, όπου είναι δύσκολο να μεταφερθούν, οδικώς ή σιδηροδρομικώς, μεγάλα τμήματα μιας μεγάλης ανεμογεννήτριας.
- Υπάρχουν διαθέσιμες μεγάλες εκτάσεις στη θάλασσα, σε αντίθεση με τους εδαφικούς περιορισμούς που υφίστανται στις χερσαίες περιοχές.

Κάποια από τα προβλήματα που προκαλούνται εξαιτίας της χρήσης θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι τα εξής:

- Τα φορτία που δέχονται οι ανεμογεννήτριες στη θάλασσα είναι περισσότερα από τις αντίστοιχες στην ξηρά. Πιο συγκεκριμένα, στη θάλασσα υπάρχουν υδροδυναμικά φορτία που προκαλούνται από τα κύματα και φορτία που προκύπτουν εξαιτίας των θαλάσσιων ρευμάτων. Επιπροσθέτως, υπάρχει και ο παράγων διάβρωση, κατόπιν της συνεχόμενης επαφής με το νερό.
- Το κόστος συντήρησης είναι σαφώς μεγαλύτερο στη θάλασσα, εξαιτίας της δυσκολίας πρόσβασης που υπάρχει.
- Όσον αφορά τις πλωτές ανεμογεννήτριες, ιδιαίτερα αυξημένο είναι το απαιτούμενο κόστος για την κατά περίπτωση εγκατάσταση, και πιο συγκεκριμένα, τη θεμελίωση, αν πρόκειται για πακτωμένες στον πυθμένα, και τη διαδικασία αγκύρωσης, αν πρόκειται για ανεμογεννήτριες ευρισκόμενες πάνω σε πλατφόρμες.



# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Εισαγωγή

Μια πλωτή ανεμογεννήτρια (Floating Wind Turbine) είναι τοποθετημένη σε μία υπεράκτια πλωτή κατασκευή, δεδομένου ότι δεν είναι εφικτό να στερεωθεί σε μεγάλα βάθη. Μία συστοιχία από πολλές πλωτές ανεμογεννήτριες, οι οποίες βρίσκονται σε προκαθορισμένη απόσταση μεταξύ τους, με απώτερο σκοπό να μην επηρεάζεται η απόδοση εκάστης εξ αυτών από την επίδραση των ανεμογεννητριών που είναι πέριξ αυτής, συνιστά ένα αιολικό πλωτό πάρκο.

Με την τοποθέτηση πολλών ανεμογεννητριών μαζί επιτυγχάνεται μείωση κόστους, χάρη στην κοινή χρήση υποδομών, όπως είναι οι εγκαταστάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό δε θα γινόταν αν τοποθετούνταν η κάθε μία μεμονωμένα.

Η χρήση των αιολικών πάρκων στη θάλασσα μειώνει την οπτική ρύπανση, εξασφαλίζει καλύτερο κατάλυμα για ψάρεμα και συντελεί στην ασφαλή χάραξη της διέλευσης των ακτοπλοϊκών οδών. Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα έναντι των χερσαίων αιολικών πάρκων, είναι το ότι, λόγω της απουσίας των τοπογραφικών χαρακτηριστικών (όπως τα βουνά), που υπάρχουν στα πάρκα στη στεριά, διαταράσσοντας με αυτό τον τρόπο τη ροή του ανέμου, οι άνεμοι στις θάλασσες φυσούν με μεγαλύτερη συχνότητα και είναι πιο δυνατοί, καθιστώντας τις πλωτές ανεμογεννήτριες πιο αποδοτικές.

## 1.2 Πλεονεκτήματα Μειονεκτήματα

Από το 2003, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες περιορίζονταν σε βάθη νερού 30 m, με τη βάση να είναι σταθερά στερεωμένη στον πυθμένα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, σε βάθος νερού της τάξεως των 600 m, όπου το αιολικό δυναμικό βρίσκεται σε υψηλό επίπεδο, πιστεύεται ότι διευκολύνεται η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τα αστικά κέντρα (Musial et al, 2003).

Οι κύριοι λόγοι για την ανάπτυξη των σταθερών δομών στον πυθμένα, είναι οι εξής:

- Η αποδεδειγμένη γνώση της τεχνολογίας στερέωσης στον πυθμένα της θάλασσας από γέφυρες κ.ά.
- Η εύκολη σύνδεση των καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το στρόβιλο προς την ακτή.
- Η περιορισμένη επίδραση στην κίνηση της ανεμογεννήτριας, η οποία προκαλείται από τα κύματα, τον άνεμο και τα θαλάσσια ρεύματα.

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε τα εξής μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών αυτού του τύπου:

- Περιορίζονται σε ρηγά νερά.
- Είναι δύσκολη και δαπανηρή η απομάκρυνσή τους.
- Το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό.

Από την άλλη πλευρά, οι πλωτές ανεμογεννήτριες υπερτερούν έναντι των ανεμογεννητριών σταθερού τύπου επειδή μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερα θαλάσσια βάθη και γιατί η απομάκρυνσή τους μετά την παύση της λειτουργίας τους είναι τεχνικά ευκολότερη και έχει πολύ χαμηλό κόστος.

Κάποια από τα μειονεκτήματα, που χρήζουν διερεύνησης, είναι:

- Η επίδραση των κυμάτων, του ανέμου και των ρευμάτων στην κίνηση της πλωτής ανεμογεννήτριας.
- Η διαδικασία εγκατάστασης.
- Γενικά θέματα σχεδιασμού, όπως η σταθερότητα.

Κατόπιν των προαναφερομένων, συνάγεται ότι μέχρι εκείνη τη χρονική περίοδο, οι ερευνητικές προσπάθειες που είχαν λάβει χώρα για τις πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ήταν περιορισμένες εξαιτίας του υψηλού κόστους. Έτσι, είχε δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη διερεύνηση της τεχνικής και της οικονομικής βιωσιμότητας.

### 1.3 Triple floater

Η εργασία του A.R Henderson επικεντρώνεται σε περιοχές, σε βάθος νερού που προσεγγίζει τα 50 m. Εν προκειμένω, προτάθηκε μία σειρά από ιδέες για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών και αυτές συγκρίθηκαν με βάση το πρόγραμμα MARIN. Το εν λόγω πρόγραμμα χρησιμοποιεί ως παραμέτρους το βάρος, τις διαστάσεις, τη σταθερότητα κ.λπ., προκειμένου να προκύψει η καλύτερη δυνατή λύση, που σε αυτή την περίπτωση ήταν το μοντέλο Triple floater, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1 (Henderson, 2004).

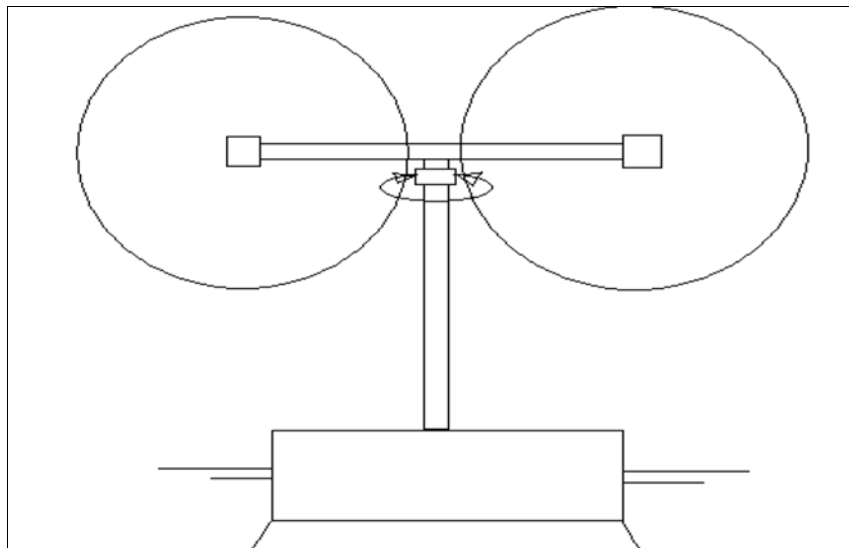
Η συσκευή triple floater αποτελείται από τρεις κυλινδρικούς πλωτήρες οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρούμενους κυλινδρικούς σωλήνες, έτσι ώστε οι τρεις πλωτήρες να βρίσκονται στις κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου. Στο κέντρο της δομής, μεταξύ των πλωτήρων στηρίζεται ο πύργος (Εικόνα 1.1). Οι διαστάσεις και η απόσταση των πλωτήρων καθορίστηκαν με βάση τις απαιτήσεις για τη σταθερότητα. Το triple floater απαιτεί λιγότερο χάλυβα από τη δομή με χρήση ενός πλωτήρα (spar buoy).



**Εικόνα 1.1 Triple Floater (Πηγή: Musial, 2003)**

#### **1.4 Ανεμογεννήτρια σε σχήμα T**

Αν επρόκειτο να τοποθετηθούν δύο όμοιες ανεμογεννήτριες στον ίδιο πύργο, αυτό θα γινόταν σε σχήμα T (Εικόνα 1.2). Η μάζα στην κορυφή του πύργου θα ήταν πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που θα είχε μία τουρμπίνα και θα απαιτούσε μεγαλύτερο πλωτήρα για την αντιμετώπιση της αυξημένης ροπής και του αυξημένου βάρους. Για το λόγο αυτό δεν προτιμήθηκε πύργος με δύο τουρμπίνες (Henderson, 2004).



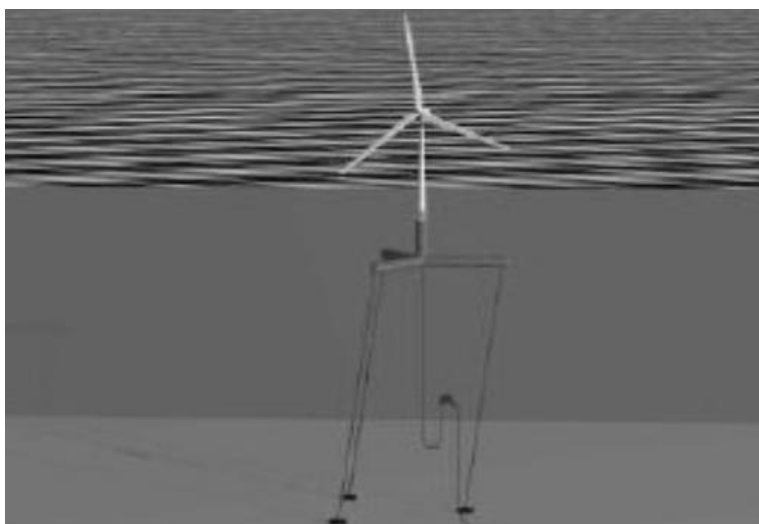
**Εικόνα 1.2 Multi turbine Floater (Πηγή: Henderson, 2004)**

### 1.5 Ανεμογεννήτρια τύπου Tension Leg

Στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.3) παρουσιάζεται η συσκευή που χρησιμοποιεί μικρότερη μετακινούμενη διάμετρο και για την επίτευξη ευστάθειας χρησιμοποιεί το σχηματισμό tension leg, ώστε να δημιουργηθεί προένταση. Η χρήση της προέντασης συνηθίζεται σε βαθιά νερά και όχι τόσο σε ρηχά, γιατί στα μεγαλύτερα βάθη επιτυγχάνονται βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά τη σταθερότητα.

Η τεχνολογία αυτή αυξάνει την κατακόρυφη ακαμψία του πλωτού συστήματος και με αυτό τον τρόπο η περίοδος κατακόρυφης ταλάντωσης μπορεί να μετακινηθεί έξω από την περιοχή φάσματος υψηλής ενέργειας (Musial, 2003).

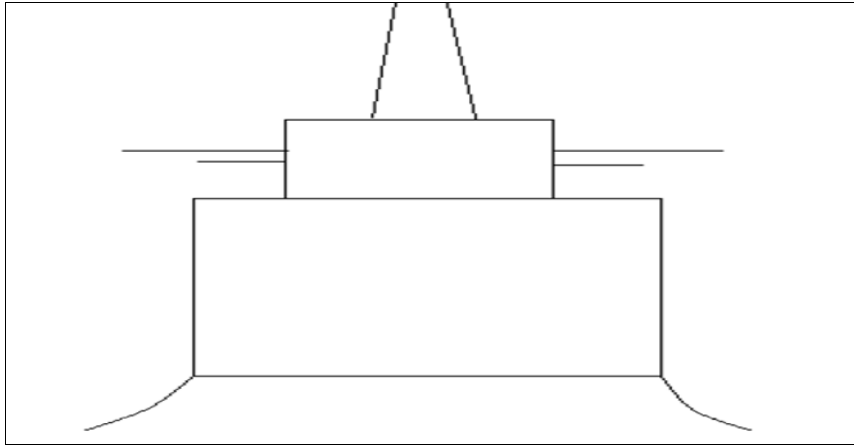
Από άποψη στατικής σταθερότητας, αυτή η προένταση μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο μάζας που βρίσκεται στο σημείο σύνδεσης του tension leg. Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει μετατόπιση προς τα κάτω του εικονικού κέντρου βάρους, και του κέντρου άνωσης (σε απόλυτη έννοια), δεδομένης της πρόσθετης πλευστότητας που απαιτείται για την αντιστάθμιση της προέντασης.



Εικόνα 1.3 Tension Leg (Πηγή: Musial, 2003)

### 1.6 Μοντέλο Spar Buoy

Το μοντέλο spar buoy (Εικόνα 1.4) αποτελείται από έναν μεγάλο κατακόρυφο κύλινδρο, που αναφέρεται ως δίσκος, και έναν μικρότερο άνω κύλινδρο, ο οποίος προεξέχει της επιφάνειας του νερού και πάνω του στηρίζεται ο πύργος. Από άποψη αρχικής σταθερότητας, δεν είναι εφικτή η τοποθέτηση της συσκευής σε βάθη νερού κάτω από τα 50 m, άρα επιλέγονται τα μεγάλα βάθη, επειδή κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο, λόγω του μεγάλου μεγέθους της, ώστε να επιτευχθεί επαρκής στατική σταθερότητα.



**Εικόνα 1.4 Spar (Πηγή: Henderson, 2004)**

### **1.7 Quadruple floater**

Παρεμφερή στοιχεία με τη δομή του triple floater υπάρχουν και στην τεχνολογία Quadruple floater (Εικόνα 1.5). Οι διαστάσεις των πλωτήρων σε αυτή την περίπτωση είναι ίδιες με την αντίστοιχη των τριών, με μικρότερη όμως τη μεταξύ τους απόσταση. Ένα μειονέκτημα εν προκειμένω αφορά το ότι αναμένεται χρήση περισσότερου χάλυβα, εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας υλικών που απαιτείται για τη σύνδεση των τεσσάρων πλωτήρων.



**Εικόνα 1.5 Quadruple floater (Πηγή: Henderson, 2004)**

### **1.8 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών βάση στατικής ευστάθειας**

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, μέχρι τις αρχές του 2000 οι περισσότερες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εγκαθίσταντο σε ρηγά νερά και τοποθετούνταν στον πυθμένα. Αυτές οι υποδομές περιλαμβάνουν βάσεις βαρύτητας

και ενός πασσάλου, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέσα στο νερό, σε βάθος 30 m, όπως οι τρίποδες και το πλέγμα πλαισίων (π.χ. «jackets»), που χρησιμοποιούνται σε βάθη περίπου 50 μέτρων.

Από την άλλη πλευρά, σε χώρες όπως οι Η.Π.Α., Κίνα, Ιαπωνία, Νορβηγία, επιβάλλεται η εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι τεράστιοι υπεράκτιοι πόροι που διαθέτουν, δεδομένου ότι, όσον αφορά κάποιο βάθος νερού, οι πλωτές ανεμογεννήτριες είναι η πιο αποδοτική επένδυση, συγκριτικά με αυτές άλλου τύπου.

Πολυάριθμες πλωτές πλατφόρμες στήριξης έχουν διαμορφωθεί, οι οποίες είναι κατάλληλες για χρήση υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία όσον αφορά τα συστήματα πρόσδεσης και τις δεξαμενές έρματος που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου (O & G).

Ωστόσο, οι πλατφόρμες μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με την επίτευξη βασικών προϋποθέσεων στατικής ευστάθειας στην pitch και τη roll διεύθυνση. Οι τρεις βασικοί τύποι είναι η TLP, η οποία διατηρεί την ευστάθεια κυρίως μέσω του συστήματος πρόσδεσης και της περίσσειας άνωσης, ο πλωτήρας spar buoy, ο οποίος διατηρεί την ευστάθεια από το βαθύ βύθισμα σε συνδυασμό με το έρμα, και η φορηγίδα, που χρησιμοποιεί μία μεγάλη περιοχή ισάλου με ρηχό βύθισμα για τη διατήρηση της ευστάθειας.

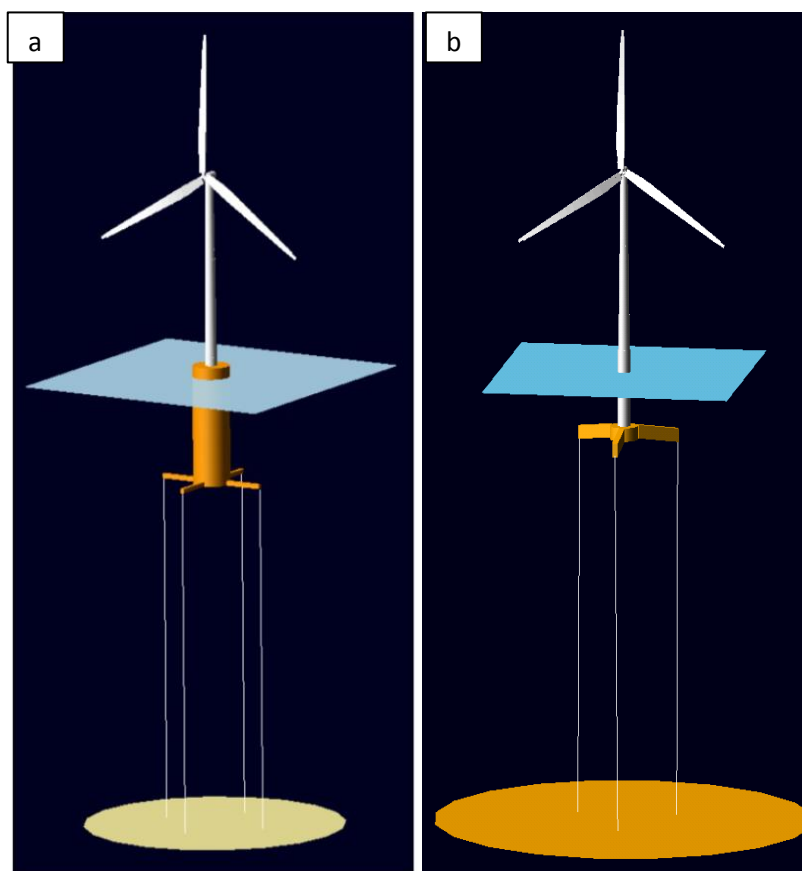
Υβριδικά συστήματα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό αυτών των τριών μεθόδων σταθερότητας. Για παράδειγμα, ένα semisubmersible είναι μία υβριδική έννοια που στηρίζεται στη μεγάλη περιοχή ισάλου, καθώς και στο αρκετά βαθύ βύθισμα και στο έρμα για τη διατήρηση της ευστάθειας.

Τα αρχικά τρία project περιλαμβάνουν το MIT / NREL, το TLP, το OC3-Hywind Spar και τη φορηγίδα Ενέργειας ΙΤΙ, η οποία ενσωματώνει μια ιδέα από κάθε μία από τις τρεις παραπάνω κύριες κατηγορίες της ευστάθειας. Οι τρεις νέες συσκευές περιλαμβάνουν την UMaine TLP, την UMaine-Hywind Spar, καθώς και την UMaine semisubmersible. Κάθε πλατφόρμα περιγράφεται εν συντομία παρακάτω, με περισσότερες λεπτομέρειες για τις προδιαγραφές να είναι διαθέσιμες για το MIT / NREL TLP (Jonkman & Matha, 2010), για τα OC3-Hywind spar buoy (Jonkman, 2009 D) και για τη φορηγίδα Ενέργειας ΙΤΙ (Jonkman, 2007).

### **1.8. α ) Μοντέλο MIT/NREL TLP και UMaine TLP**

Το MIT / NREL TLP (Εικόνα 1.6 α) προέρχεται από τη μετατροπή μιας πλατφόρμας τύπου TLP. Είναι μία κυλινδρική πλατφόρμα, με έρμα από σκυρόδεμα και αγκυροβολημένη από τέσσερα κάθετα ζεύγη τενόντων σε ένταση. Κάθε ζεύγος των τενόντων συνδέεται με τέσσερις ράβδους, οι οποίες βρίσκονται οριζόντια από το κάτω μέρος της πλατφόρμας. Το συγκεκριμένο έρμα χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι η δομή από το συνδυασμό τουρμπίνας-πλατφόρμας του συστήματος

παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια λειτουργίας, ακόμη και χωρίς τους τένοντες, σε ήπιες καιρικές συνθήκες.

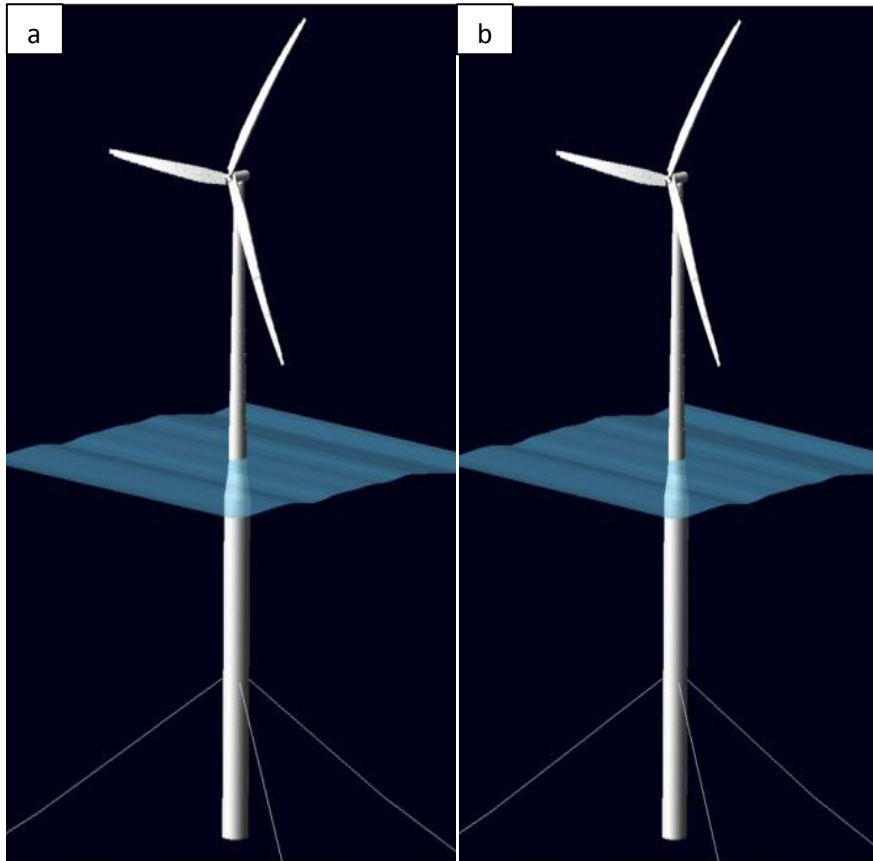


**Εικόνα 1.6 a) MIT/NREL TLP b) UMaine TLP (Πηγή: Matha, 2009)**

Το U Maine TLP είναι ένα πολύ μικρότερο και ελαφρύτερο ως σύστημα, σε σύγκριση με το MIT / NREL TLP (Εικόνα 1.6 b). Διαθέτει μία κυλινδρική πλατφόρμα που έχει έρμα, αλλά έχει μόνο τρία πόδια που προεξέχουν από αυτήν τη βάση. Κάθετοι τένοντες (τεντωμένοι) εκτείνονται από τις άκρες καθενός από τα τρία σκέλη προς το βυθό όπου είναι αγκυροβολημένα. Η συνολική τάση σε αυτά τα καλώδια, που οφείλεται στην περίσσεια άνωση στο σύστημα, είναι λιγότερη από το μισό της έντασης στο MIT / NREL TLP. Το ύψος του πύργου είναι ίδιο και για τα συστήματα TLP, αλλά οι ιδιότητες του πύργου τροποποιήθηκαν ώστε να είναι σύμφωνες με το UMaine TLP. Η UMaine TLP δημιουργήθηκε από το πανεπιστήμιο του Maine, με κλίμακα (1/50).

### **1.8. β ) Μοντέλο OC3- Hywind Spar και UMaine Spar**

Η OC3-Hywind (Spar buoy) διαμορφώνεται σε βάθος 320 m (Εικόνα 1.7 a), είναι μία πλατφόρμα που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Offshore Code Comparison Collaboration, και μιμείται τη spar buoy, με κάποιες προσαρμογές για να μπορεί να υποστηρίξει τη NREL 5 MW ανεμογεννήτρια.



**Εικόνα 1.7 a) Μοντέλο OC3- Hywind Spar b) UMaine Spar. (Πηγή: Jonkman, 2011)**

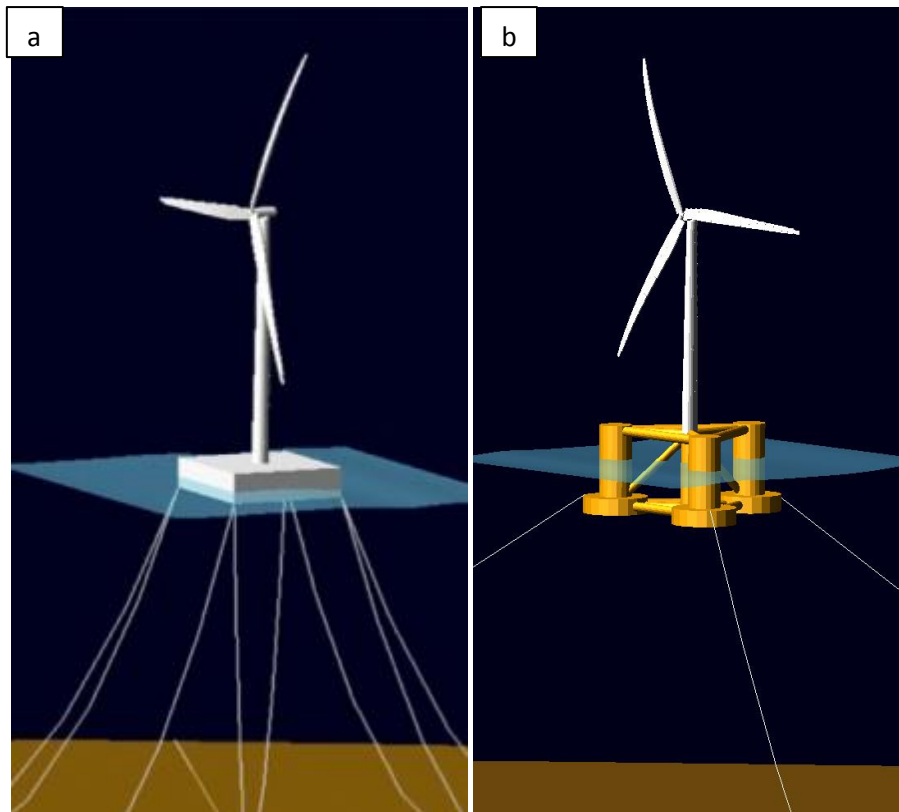
Το OC3-Hywind σύστημα διαθέτει μία λεπτή σημαδούρα δοκό με τρεις αλυσοειδείς γραμμές ελλιμενισμού. Οι γραμμές παρατάσσονται στην πλατφόρμα μέσω ενός τριγώνου, ώστε να αυξηθεί η ακαμψία περιστροφής (yaw) των αγκυροβολίων.

Η UMaine-Hywind δοκός (Εικόνα 1.7 b) είναι ίδια με την OC3-Hywind, με τη διαφορά ότι διαμορφώνεται σε βάθος 200 m, κάτι το οποίο απαιτεί ελαφρές τροποποιήσεις στο σύστημα πρόσδεσης.

### **1.8. γ ) Μοντέλο ITI Energy Barge και UMaine Semi**

Η φορτηγίδα ITI Energy (Εικόνα 1.8 a) έχει τετραγωνικό σχήμα και έρμα με θαλασσινό νερό. Για να αποτρέψει τη μετατόπιση, η πλατφόρμα είναι αγκυροβολημένη από ένα σύστημα οκτώ χαλαρών αλυσοειδών γραμμών που σχηματίζουν ανά δύο γωνία ίση με  $45^\circ$ .





**Εικόνα 1.8 a) Μοντέλο ITI Energy Barge b) UMaine Semi (Πηγή: Jonkman, 2011)**

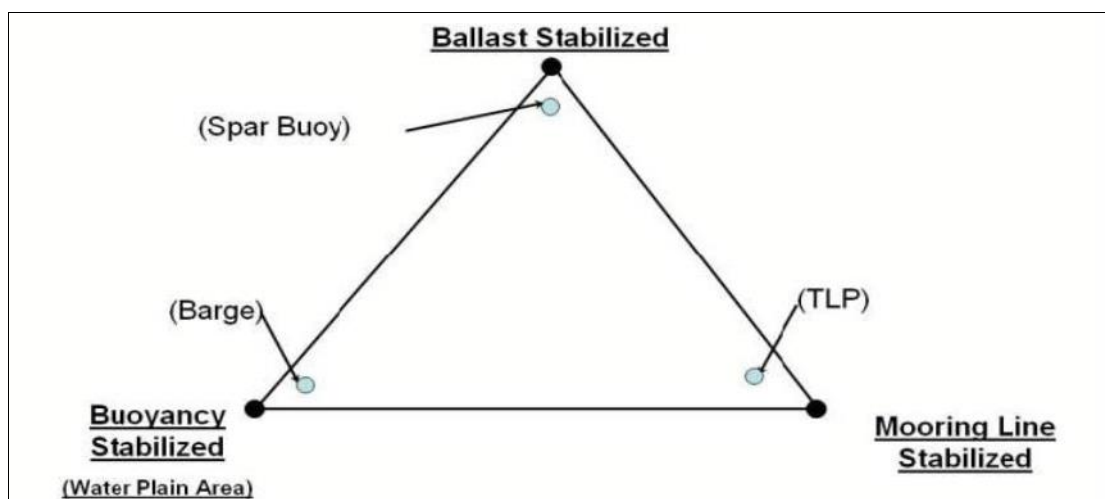
Η UMaine semisubmersible (Εικόνα 1.15 b) είναι ένα γενικό μοντέλο ενός semisubmersible μοντέλου και αποτελείται από μία κύρια στήλη, που επισυνάπτεται στον πύργο, και τρεις άλλες στήλες που είναι συνδεδεμένες με την κύρια στήλη μέσα από μία σειρά κυλινδρικών σωμάτων μικρότερης διαμέτρου.

### **1.9 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών με βάση την επίτευξη στατικής σταθερότητας**

Μεγάλος αριθμός ερευνητικών δημοσιεύσεων έχει αντικείμενο τη μελέτη της εγκατάστασης πλωτών αιολικών πάρκων στα ανοιχτά των ευρωπαϊκών θαλασσών, για να επιτευχθεί ο στόχος που έχει θέσει η Ε.Ε. για την εγκατάσταση θαλάσσιων αιολικών πάρκων, της τάξεως των 50GW, μέχρι το 2020. Προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία του σχεδιασμού, το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) έχει αναπτύξει ένα πλαίσιο με την ονομασία «Τρίγωνο Σταθερότητας», το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 1.16 (Crozier, 2011), όπου ο γενικός σχεδιασμός μιας πλωτής πλατφόρμας, μπορεί να ταξινομηθεί σε συνάρτηση με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί για την επίτευξη στατικής σταθερότητας, δηλαδή τη ροπή επαναφοράς της πλατφόρμας.

Οι τρεις μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

- Πλευστότητα στην επιφάνεια του νερού (Buoyancy Stabilized), με πλατφόρμες τύπου Barge.
- Ευστάθεια με χρήση έρματος (Ballast Stabilized), με την αξιοποίηση πλατφορμών τύπου Spar Buoy.
- Οι πλατφόρμες τύπου TLP, οι οποίες χρησιμοποιούν την προένταση για την επίτευξη ευστάθειας (Mooring Line Stabilized).



**Εικόνα 1.16** Τρίγωνο Σταθερότητας για τον διαχωρισμό των πλωτών συστημάτων (Πηγή: Crozier, 2011)

### 1.10 Προβολή χαρακτηριστικής γωνίας

Υπάρχουν δύο μεθοδολογίες αναφορικά με τη διάταξη που πρέπει να έχουν οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους (σε ένα πάρκο ανεμογεννητριών) ώστε να μην επηρεάζει η μία την άλλη. Η παράμετρος που υπολογίζεται είναι η χαρακτηριστική γωνία  $\theta_w$ , εικόνα 2.1.

Αρχικά έχουμε τη μέθοδο (Sanderhoff, 1993) που υπολογίζει τη γωνία με βάση την εξίσωση (1.1):

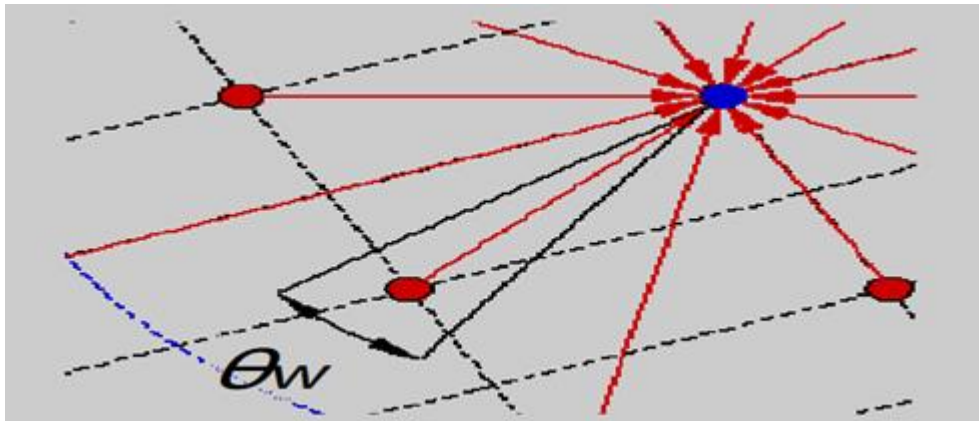
$$\theta_w = \text{atan}\left(\frac{1}{s}\right) + \text{atan}(k) \quad (1.1)$$

Όπου:

- S ισούται με  $d/D_0$
- d η απόσταση των ανεμογεννητριών
- $D_0$  η διάμετρος των απόνερων που δημιουργούνται από τις τουρμπίνες
- k σταθερά

Η δεύτερη μέθοδος (Frandsen, 2007) υπολογίζει τη γωνία με βάση την εξίσωση (1.2):

$$\theta_w = \frac{1}{2} \left( \text{atan} \left( \frac{1}{s} \right) + 10^\circ \right) \quad (1.2)$$



Εικόνα 1.17 Γωνία μεταξύ των ανεμογεννητριών (Πηγή: Jacquemin, 2010)



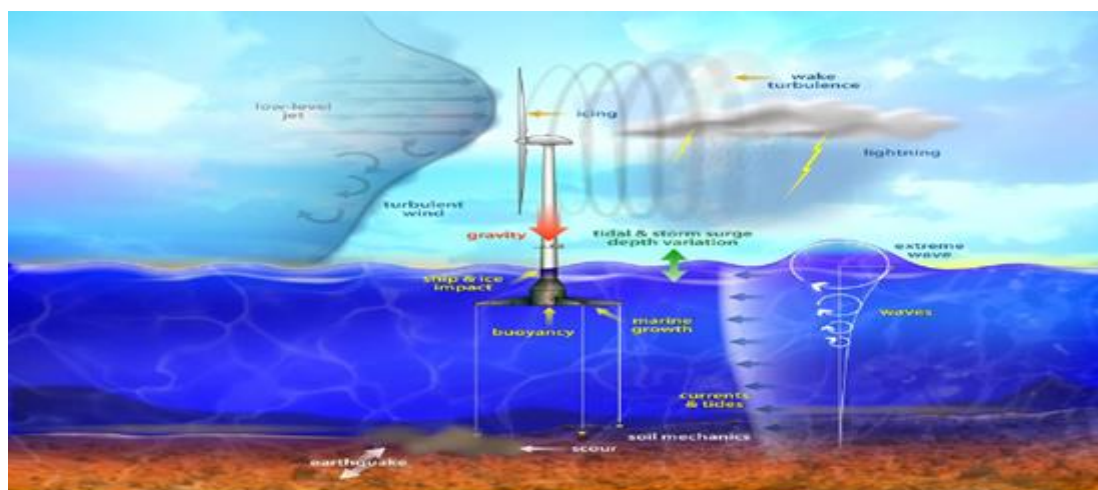
## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης θαλάσσιων κατασκευών

Στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου θα αναφέρουμε τις δυνάμεις που δέχεται μία πλωτή ανεμογεννήτρια από το περιβάλλον, ενώ στο δεύτερο μέρος τα διάφορα συστήματα αγκύρωσης που υπάρχουν για τα ποικίλα πλωτά συστήματα.

Μία υπεράκτια ανεμογεννήτρια υφίσταται σε πολλά περιβαλλοντικά φορτία. Οι πιο συνηθισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες που επιδρούν σε μία πλωτή ανεμογεννήτρια, κατά σειρά σημαντικότητας, οι οποίες απεικονίζονται στην εικόνα 2.1 (Jonkman, 2009), είναι οι εξής:

- Άνεμος
- Κύματα
- Ρεύματα
- Βαρύτητα
- Άνωση
- Φορτία αλληλεπίδρασης εδάφους κατασκευής (αγκύρωση)
- Πάγος
- Αστραπές
- Διάβρωση
- Σεισμοί



Εικόνα 2.1 Φορτίσεις που δέχεται η ανεμογεννήτρια από το περιβάλλον (Πηγή: Jonkman, 2009)

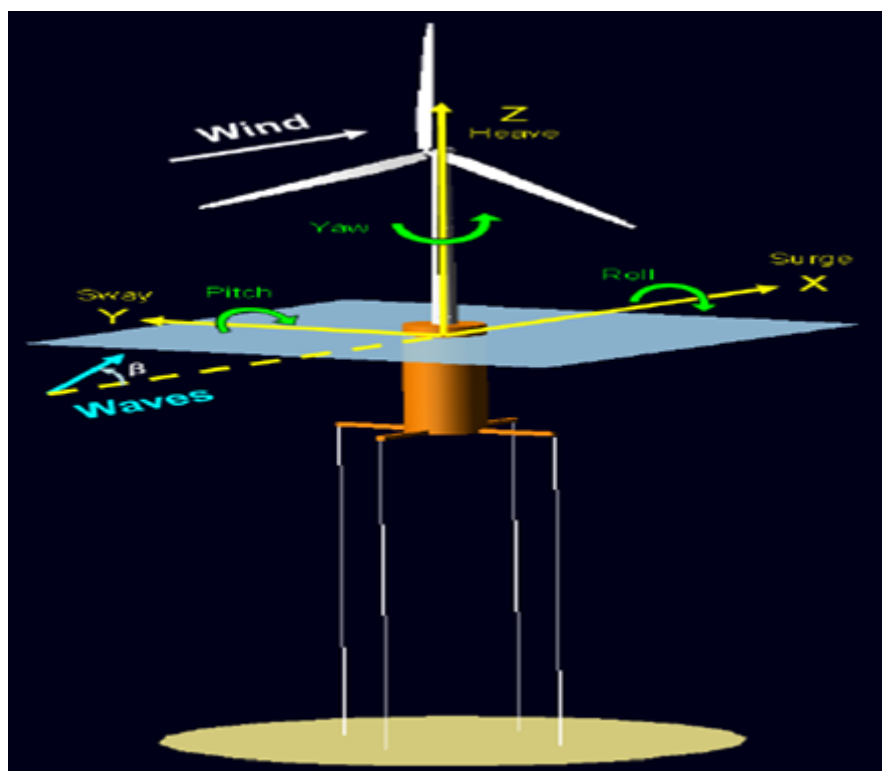
## 2.2 Γενικευμένες κινήσεις

Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι, αντί των κινήσεων και των ροπών, λαμβάνει χώρα η χρήση των γενικευμένων κινήσεων. Η αντιστοιχία των γενικευμένων κινήσεων με τις κινήσεις και τις ροπές είναι:

Κινήσεις (X,Y,Z) ( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ ) (surge, sway, heave)

Στροφές στους άξονες (X,Y,Z) ( $\xi_4, \xi_5, \xi_6$ ) (roll, pitch, yaw), (Jonkman, 2009):

Η διάταξη των γενικευμένων κινήσεων σε μία ανεμογεννήτρια τύπου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2 Γενικευμένες κινήσεις ανεμογεννήτριας (Πηγή: Jonkman, 2009)

## 2.3 Περιγραφή των συνθηκών περιβάλλοντος

Η μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας μιας πλωτής κατασκευής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιόπιστη σχεδίασή της. Στοιχεία που ασκούν στην κατασκευή δυνάμεις ή επιδρούν στην εν γένει λειτουργία της είναι ο άνεμος, οι θαλάσσιοι κυματισμοί, τα θαλάσσια ρεύματα, καθώς και η γεωμορφολογία του πυθμένα, ή, σε πιο σπάνιες περιπτώσεις, το κατά πόσον η περιοχή λειτουργίας είναι σεισμογενής, εφόσον πρόκειται για θαλάσσιες κατασκευές.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες περιγράφονται, κυρίως, με τη βοήθεια στοιχείων που προκύπτουν μετά από μακροχρόνιες μετρήσεις ή παρατηρήσεις στον τόπο εγκατάστασης και λειτουργίας της κατασκευής.

Για την αξιόπιστη σχεδίαση μιας θαλάσσιας πλωτής κατασκευής απαιτούνται στοιχεία που σχετίζονται τόσο με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που θα επικρατήσουν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας της, όσο και με εκείνες τις ακραίες καταστάσεις που αναμένεται να ενσκήψουν στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής και ενδεχομένως θα προκαλέσουν τις μεγαλύτερες καταπονήσεις ή θα επιδράσουν αρνητικά στη λειτουργία τους. Γι' αυτό, η σχεδίαση της πλατφόρμας θα πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει και στην επενέργεια αυτών των ακραίων περιβαλλοντικών καταστάσεων (survival condition).

#### 2.4 Πεδίο ανέμου

Για τον προσδιορισμό των φορτίων (Μαυράκος, 1999) που επάγονται σε μία θαλάσσια κατασκευή από τον άνεμο, πρέπει να γνωρίζουμε την καθ' ύψος κατανομή της μέσης ταχύτητάς του. Συνεπεία της πνοής του ανέμου, γίνεται η ακόλουθη παραδοχή για τη στιγμιαία τιμή της:

$$V = \bar{V}_{tz} + V' \quad (2.1)$$

Όπου η μέση τιμή της ταχύτητας και η στατική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής  $V$ . Το μέγεθος είναι συνάρτηση της καθ' ύψος απόστασης του θεωρούμενου σημείου από την επιφάνεια της θάλασσας και του χρονικού διαστήματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχηματισμό της μέσης τιμής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις για την περιοχή λειτουργίας της κατασκευής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ακόλουθος εκθετικός τύπος:

$$\bar{V}_{tz} = \alpha \bar{V}_{1hr10} \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^\beta \quad (2.2)$$

Όπου

$\bar{V}_{tz}$  η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος  $z$  και για χρονικό διάστημα  $t$ , και  $\bar{V}_{1hr10}$  η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας για χρονικό διάστημα 1hr.

Όταν χρησιμοποιείται η στοχαστική διαδικασία προσδιορισμού των φορτίων από τον άνεμο, θα πρέπει να είναι γνωστό το φάσμα κατανομής του. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, που ισχύουν για τους θαλάσσιους κυματισμούς, ο άνεμος μπορεί να εκληφθεί ως μία διαδικασία κατά Gauss. Στο πεδίο των συχνοτήτων, μία τέτοια διαδικασία περιγράφεται πλήρως όταν είναι γνωστό το φάσμα κατανομής της ενέργειάς της. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Νορβηγικού Νηογνώμονα, το τελευταίο δίνεται από την εξής σχέση:

$$f \cdot S(f) = 4k\tilde{V}_{1hr10} \cdot \frac{\tilde{f}}{(2 + \tilde{f})^{5/6}}$$

Όπου:

$\tilde{f}$ : η αδιάστατη συχνότητα ( $\tilde{f} = f \cdot \frac{L}{\tilde{V}_{1hr10}}$ )

S: η πυκνότητα φάσματος ( $m^2/Hz$ )

f: η συχνότητα (Hz)

L: το μέγεθος κλίμακας (m). Συνήθως λαμβάνετε  $L=1800m$

k: συντελεστής τριβής που εξαρτάται από την κατάσταση της θάλασσας.

## 2.5 Θαλάσσια ρεύματα

Για τον προσδιορισμό της καθ' ύψος διανομής της ταχύτητας των θαλάσσιων ρευμάτων, τα θεωρούμε συνήθως ως υπέρθεση ρεύματος που δημιουργείται από το πεδίο ανέμου και ρεύματος που προκαλείται από παλίρροιες (Μαυράκος, 1999). Για τα πρώτα, τα ρεύματα αέρα, θεωρούμε γραμμική εξάρτηση της ταχύτητάς τους από το βάθος, ενώ για τα δεύτερα, τα ρεύματα παλίρροιας, αποδεχόμαστε, αντίστοιχα, εκθετική εξάρτηση.

Με αυτές τις σκέψεις μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{\rhoευμ}(z) = V_{\piαλ}(z) + V_{\alphaνεμ}(z) \quad (2.3)$$

$$V_{\alphaνεμ}(z) = 0 \quad \text{για } z < -d_0 \quad (2.4)$$

Όπου:

$V_{\rhoευμ}(z)$ : η συνολική ταχύτητα του ρεύματος σε απόσταση z από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.

$V_{\piαλ}$ : η ταχύτητα του ρεύματος παλίρροιας στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.

$V_{\alphaνεμ}$  : η ταχύτητα ρεύματος η οποία προκαλείται από τον άνεμο στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.

d : το βάθος του νερού μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια.

$d_0$  : το βάθος αναφοράς για ρεύματα τα οποία προκαλούνται από τον άνεμο

( $d_0 = 50m$ ). Κάτω από το βάθος αυτό θεωρείται μηδενική η ταχύτητά τους.



$z$  : η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια, θετική με κατεύθυνση προς τα πάνω.

Για τις διάφορες περιοχές της Γης υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις των ταχυτήτων των ρευμάτων που προκαλούνται από παλίρροιες. Αντίθετα σε περίπτωση έλλειψης μετρήσεων για τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκαλούνται από τον άνεμο δεχόμαστε, ότι στην επιφάνεια ανοικτής θάλασσας ισχύει η σχέση:

$$V_{ανεμ} = 0.2\bar{V}_{1hr10} \quad (2.5)$$

## 2.6 Θαλάσσιοι κυματισμοί

Η επιφάνεια της θάλασσας είναι ένα συνεχές μέσο με άπειρους βαθμούς ελευθερίας και ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Πάνω στην επιφάνεια του νερού μπορεί να βρεθούν κυματισμοί οποιασδήποτε συχνότητας. Ο λόγος για τον οποίο βρίσκονται επιφανειακά κύματα μέσα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων είναι το ότι οι δυνάμεις που τα προκαλούν βρίσκονται σε ορισμένο εύρος. Επίσης, καθοριστικό ρόλο παίζει και το ότι η ταχύτητα απορρόφησης ενέργειας λόγω συνεκτικότητας είναι πολύ μεγαλύτερη σε κύματα υψηλών συχνοτήτων απ' ότι σε αντίστοιχα χαμηλών (Μαυράκος, 1999).

Οι βασικές εξισώσεις κατά την εξέταση της κίνησης ασυμπίεστου ρευστού είναι:

Οι εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (2.6)$$

Όπου  $\vec{V}$  το διάνυσμα της ταχύτητας (u,v,w) ,

p η πίεση ,

$\mu$  ο συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας ,

$\rho$  η πυκνότητα και

$\vec{F}$  οι εξωτερικά επιβεβλημένες δυνάμεις (ανά μονάδα μάζας).

Η εξίσωση συνέχειας:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.7)$$

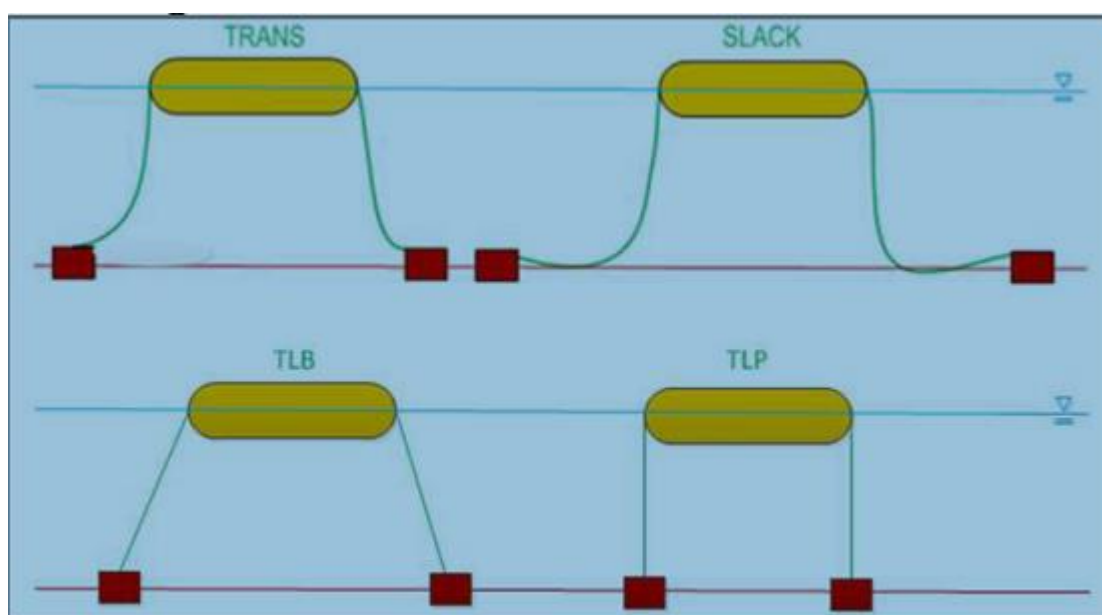
## 2.7 Συστήματα αγκύρωσης πλωτών συστημάτων

Η φέρουσα ικανότητα του κάθε συστήματος αγκύρωσης εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στον πυθμένα. Ο πρωταρχικός μηχανισμός για την αντίσταση στις

δυνάμεις που εφαρμόζονται στην πλατφόρμα είναι η διατμητική αντοχή του εδάφους του πυθμένα.

Το μέγεθος της άγκυρας είναι ένας σημαντικός παράγοντας, καθώς μια πολύ μεγάλη άγκυρα μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύ μεγαλύτερο στρώμα εδάφους, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης.

Η ικανότητα συγκράτησης της άγκυρας επηρεάζεται από την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Αν η δύναμη εφαρμόζεται παράλληλα στον πυθμένα, η χρήση μιας άγκυρας μπορεί να είναι αποτελεσματική χωρίς βαθιά σφήνωση γιατί, καθώς εφαρμόζονται οι δυνάμεις αντίστασης, η άγκυρα σφηνώνεται βαθύτερα στο βυθό της θάλασσας. Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα που αξιοποιείται σε ένα catenary (αλυσοειδές) σύστημα αγκύρωσης.



**Εικόνα 2.3 Συστήματα αγκύρωσης (Πηγή: Santos, 2013)**

Ένα τυπικό σύστημα αγκυροβόλησης τύπου Catenary (Εικόνα 2.3) χρησιμοποιεί βαριά αλυσίδα από το σημείο προσάρτησης στον πυθμένα όπου αντιδρούν οι μέσες οριζόντιες δυνάμεις. Στο Catenary σύστημα αγκύρωσης επιδρούν, κατά κύριο λόγο, οριζόντιες δυνάμεις πρόσδεσης και απαιτούν έτσι μικρότερη ακρίβεια κατά την τοποθέτησή τους, με αποτέλεσμα το κόστος εγκατάστασης να μειώνεται. Πλατφόρμες που χρησιμοποιούν Catenary σύστημα αγκύρωσης έχουν μεγαλύτερη κίνηση προς κάθε κατεύθυνση, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συστήματα αγκύρωσης τύπου taut leg (Εικόνα 2.3) ή vertical tension leg (Santos, 2013).

Η αποτελεσματικότητα της άγκυρας κάθετου φορτίου (vertical load anchor) εξαρτάται από το βάθος της ενσφήνωσης, που για να επιτευχθεί απαιτεί χρήση μεγάλης σφήνας μεταξύ της άγκυρας και της επιφάνειας του εδάφους. Η βαθιά ενσφήνωση είναι το «κλειδί» για τη μεγιστοποίηση του μεταβαλλόμενου φορτίου. Ως

εκ τούτου, οι κάθετα φορτισμένες άγκυρες έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης. Κατόπιν αυτού, προκύπτει ότι το βέλτιστο σύστημα αγκύρωσης είναι η εύρεση αυτού που εμφανίζει υψηλό κατακόρυφο φορτίο χαμηλού κόστους και εγκαθίσταται εύκολα.

Μία πλατφόρμα τύπου TLP χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου. Αυτού του είδους οι πλατφόρμες χρησιμοποιούν σύστημα taut vertical legs για αγκύρωση. Οι κάθετοι τένοντες επιτρέπουν στην πλατφόρμα να κινείται οριζόντια στην επιφάνεια του νερού (κατά surge και sway), απορροφώντας εν μέρει τα φορτία από τον άνεμο και τα κύματα.

Για πολύ βαθιές εφαρμογές, κατακόρυφοι τένοντες χρησιμοποιούν σωλήνες από χάλυβα, οι οποίοι προσφέρουν πολύ δυνατές συνδέσεις με την άγκυρα και το κοίλο κέντρο τους εξασφαλίζει στον τένοντα ουδέτερη πλευστότητα.

Το κόστος για τα διάφορα συστήματα αγκύρωσης εξαρτάται από το κόστος των υλικών της άγκυρας και το κόστος εγκατάστασης. Μία επιπρόσθετη δαπάνη είναι αυτή των γραμμών αγκύρωσης, οι οποίες μπορεί να είναι κατασκευασμένες από αλυσίδες, καλώδια ή σωλήνες.

Τα διάφορα είδη αγκυρών του πυθμένα είναι τα παρακάτω (Musial, 2003):

## **2.8 Gravity base anchor (άγκυρα βαρύτητας)**

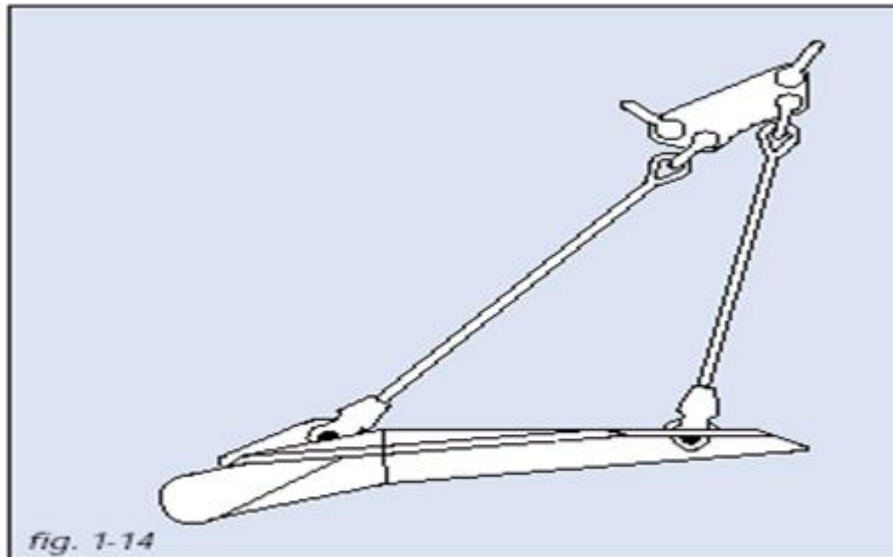
Οι άγκυρες τέτοιου τύπου παρέχουν κάθετες ή οριζόντιες δυνάμεις στην πλατφόρμα. Η ικανότητα μεταφοράς φορτίου είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ βάρους και πλευστότητας. Η πρώτη ύλη για την κατασκευή είναι φθηνή, αλλά απαιτείται μεγάλη ποσότητα για την εκπόνηση του τελικού σχεδίου. Άγκυρες βαρύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε TLPs πλατφόρμες.

## **2.9 Drag-Embedded Anchor**

Οι άγκυρες τέτοιου τύπου είναι κατάλληλες για εφαρμογές όπου η κίνηση της άγκυρας, με την πάροδο του χρόνου μπορεί να μην είναι μείζονος σημασίας. Οι άγκυρες αυτές ρίχνονται στη θάλασσα και σύρονται για την επίτευξη βαθιάς εμπέδωσης. Το βάρος της αλυσίδας που συνδέεται με τον κορμό προκαλεί ένταση γραμμής για την επίτευξη καλύτερης και βαθύτερης αγκύρωσης (Bruce anchor group).

Επιπλέον, ο εν λόγω τύπος άγκυρας συγκαταλέγεται στους φτηνότερους και είναι κατάλληλος για συστήματα όπου επικρατούν οριζόντιες δυνάμεις πρόσδεσης και η ακριβής τοποθέτηση δεν είναι απαραίτητη. Μία κατηγορία αυτού του τύπου που έχει αναπτυχθεί ονομάζεται Vertical Load Anchor (VLAs) και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5.

Οι άγκυρες αυτές έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά υψηλών κατακόρυφων φορτίων και η χρησιμοποίησή τους ενδείκνυται σε πλατφόρμες στήριξης ανεμογεννητριών.



**Εικόνα 2.5 View of Vertical Load Anchor (Πηγή: Musial, 2003)**

### **2.10 Driven Pile Anchor**

Η Driven pile anchor είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη άγκυρα για υπεράκτιες μονάδες παραγωγής πετρελαίου. (Κάποιοι μεγάλοι πάσσαλοι και το σφυρί που χρησιμοποιείται για την τοποθέτησή της παρουσιάζονται στην εικόνα 2.6.) Οι καθοδηγούμενοι πάσσαλοι έχουν εγκατασταθεί με την άσκηση κάποιας δόνησης ή με τη χρήση ενός σφυριού προκειμένου να τοποθετηθούν μέσα στο βυθό.

Η μεγάλη εμπειρία που πηγάζει από την κατασκευή υπεράκτιων εξεδρών εκ μέρους των εταιρειών άντλησης πετρελαίου, οδηγεί στο αβίαστο συμπέρασμα ότι η χρήση πασσάλων είναι πολύ αξιόπιστη όσον αφορά την εφαρμογή υψηλών κατακόρυφων φορτίων. Βασικό μειονέκτημά τους είναι το ότι, όταν πρέπει να τοποθετηθούν άπαξ και διά παντός, απαιτείται απόλυτη ακρίβεια κατά τη σχετική διαδικασία και ως εκ τούτου το κόστος εγκατάστασης φτάνει σε δυσθεώρητα ύψη.



**Εικόνα 2.6 Driven Piles (Πηγή: Musial, 2003)**

### 2.11 Suction Anchor (Άγκυρες αναρρόφησης)

Οι άγκυρες αναρρόφησης (Εικόνα 2.7) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη εναλλακτική λύση όσον αφορά την καθοδήγηση πασσάλου για τη σφήνωση της άγκυρας. Οι άγκυρες αναρρόφησης χρησιμοποιούν έναν μακρύ σωλήνα που είναι ανοιχτός στο κάτω άκρο και κλειστός στο άνω. Στο κλειστό άκρο υπάρχουν τοποθετημένες αντλίες, έτσι ώστε, όταν ο σωλήνας πέσει κατακόρυφα στο βυθό της θάλασσας, το νερό να μπορεί να αντληθεί και ο σωλήνας να αναρροφάται μέσα στον πυθμένα της θάλασσας. Η γραμμή αγκύρωσης συνδέεται με ένα μπλοκ στο μέσο του σωλήνα, επιτρέποντας στην τάση να εφαρμοστεί στο σωλήνα κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Αυτή η προσέγγιση τοποθετεί τη γραμμή τάσης πολύ καλά κάτω στον πυθμένα, επιτυγχάνοντας μεγάλη σφήνωση στο έδαφος για την καλύτερη στήριξη της γραμμής φόρτισης.



Εικόνα 2.7 Suction Anchor (Πηγή: Musial, 2003)

### 2.12 Driven anchor plate

Ένας άλλος τύπος αγκύρωσης είναι το σύστημα Driven anchor plate. Πρόκειται για μία ενσωματωμένη πλάκα αγκύρωσης, όπως δίδεται στην εικόνα 2.8. Το σύστημα αυτό αξιοποιεί ορισμένες ίδιες αρχές με το σύστημα Suction anchor, χρησιμοποιεί όμως λιγότερα υλικά, άρα έχουμε και την επακόλουθη συμπίεση του κόστους.

Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι το ότι, όταν τα φορτία έντασης εφαρμόζονται στην πλάκα, περιστρέφεται στο έδαφος, κάτι που της επιτρέπει να φέρει μία κατά πολύ μεγαλύτερη σφήνωση στο έδαφος. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το ότι μπορεί να τοποθετηθεί με ακρίβεια, ενώ είναι και σε θέση να στηρίζει υψηλά κάθετα φορτία, τα οποία δεν είναι δυνατόν να ολισθήσουν. Στη διαδικασία εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία άγκυρα αναρρόφησης, ούτως ώστε να επιτευχθεί η εμπέδωση, ή να λάβει χώρα μία κρούση στη θέση του.

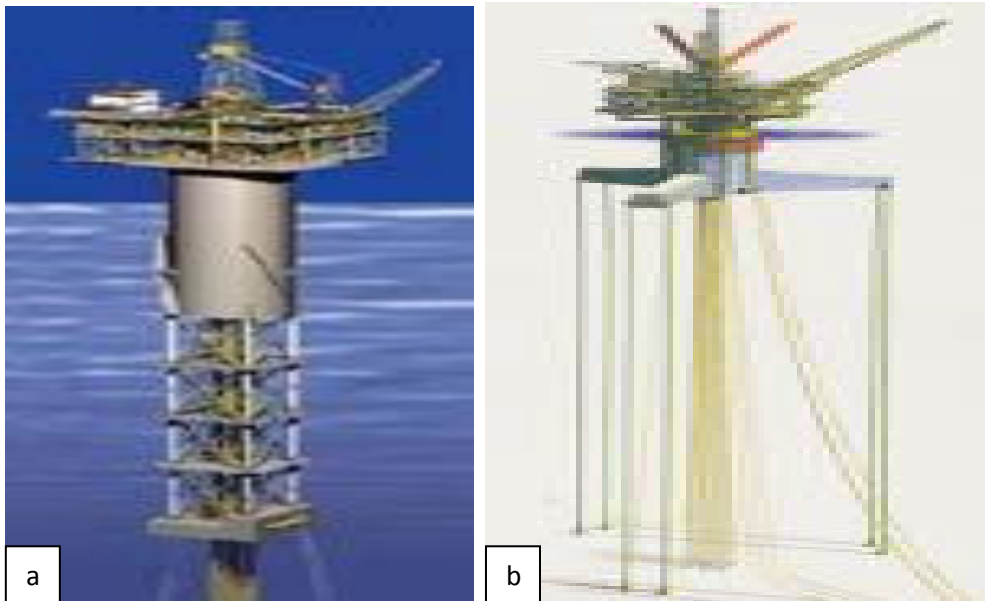


**Εικόνα 2.8 Driven anchor plate (Πηγή: Musial, 2003)**

Δυο άλλες τεχνολογίες είναι η Torpedo embedded anchor και η Drilled and Grouted pile.

### **2.13 Τύπος Catenary Mooring System (αλυσοειδές σύστημα αγκύρωσης)**

Επί σειρά ετών, το μοντέλο τύπου Spar buoy, πλεονέκτημα του οποίου είναι η ελαχιστοποίηση της heave κίνησης που προκαλείται από τη ροή των κυμάτων, χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη βιομηχανία άντλησης πετρελαίου. (Στην εικόνα 2.9 α φαίνεται η δομή της πλατφόρμας Spar buoy.) Δεδομένου ότι οι πλατφόρμες αυτού του τύπου επιτυγχάνουν βύθισμα με τη βοήθεια της μεγάλης μάζας και του έρματος, δεν απαιτείται χρησιμοποίηση κάθετου (Vertical) συστήματος αγκύρωσης (που χρησιμοποιείται στις TLP για την επίτευξη βυθίσματος) αλλά αλυσοειδούς τύπου (Catenary Mooring System), που δεν απαιτεί ακρίβεια όσον αφορά την εγκατάσταση, γεγονός που συντελεί στον περιορισμό του σχετικού κόστους.



**Εικόνα 2.9 a) Spar buoy και b) TLP (Πηγή: Musial, 2003)**

#### **2.14 Types of Vertical Moored Systems**

Με την αξιοποίηση των κάθετων συστημάτων αγκυροβόλησης, η κατασκευή (πλατφόρμα) αγκυροβολείται στο βυθό της θάλασσας με κάθετους τένοντες. Με αυτόν τον τρόπο τα συστήματα αγκύρωσης εξασφαλίζουν τη σταθερότητα στις πλατφόρμες, με το μικρότερο δυνατό ρίσκο συγκριτικά με άλλα συστήματα. Συν τοις άλλοις, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη πλωτών ανεμογεννητριών, με ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη σταθερότητα.

Ένα σχέδιο πλατφόρμας που αναπτύχθηκε από τη βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου, όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα (Εικόνα 2.9 b), είναι η TLP, η οποία επιτυγχάνει εξαιρετική σταθερότητα με πολλαπλούς τένοντες από κάθε πλευρά της βάσης της κατασκευής.

Οι άγκυρες που θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη πλατφορμών τύπου TLP, οι οποίες θα επιδεικνύουν μεγάλη αντοχή σε κάθετα φορτία, επιβάλλεται να αντέχουν σε πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις συγκριτικά με ότι απαιτείται για συστήματα ελλιμενισμού τύπου Catenary Mooring anchor.





## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Εισαγωγή

Στη Μηχανική, μείζονος σημασίας τμήμα της ανάλυσης αποτελεί η διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο σκοπός του εκάστοτε πειράματος είναι η επιβεβαίωση των αριθμητικών κωδίκων, ώστε να καταστεί εφικτή στη συνέχεια η μελέτη περισσότερων περιπτώσεων που είναι δύσκολο να προκύψουν (λόγω των πολλών συνδυασμών που πηγάζουν από τις τιμές των παραμέτρων) απ' αυτό. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε δημοσιεύσεις που σχετίζονται με τον τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων σε πλωτές ανεμογεννήτριες. Η περιγραφή έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, την παρουσίαση της δεξαμενής δοκιμών, καθώς και με τα απαραίτητα όργανα μέτρησης.

### 3.2 Barge Floater

Ένα από τα πλωτά συστήματα που μελετήθηκαν για τη στήριξη ανεμογεννήτριας 5 MW (G.V. Kumar, 2013) είναι ο πλωτήρας τύπου φορτηγίδα (Barge Floater). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα μοντέλο με κλίμακα 1/100 του προτύπου (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Barge Floater (Πηγή: G.V. Kumar, 2013)

### 3.2.1 Χαρακτηριστικά συσκευής Barge Floater

Τα χαρακτηριστικά του προτύπου προκύπτουν άμεσα από τα αντίστοιχα του μοντέλου με τον πολλαπλασιασμό της κλίμακας, δηλαδή  $\times 100$  για τα χαρακτηριστικά που έχουν ως μονάδα μέτρησης το μέτρο (m),  $\times 100^3$  για τα χαρακτηριστικά με μονάδα ( $m^3$ ) και (kg) ενώ τα αντίστοιχα ( $m^3$ )  $\times$  (kg) του πίνακα 3.1 πολλαπλασιάζονται με  $100^5$ .

<b>Πίνακας 3.1</b>			
	<b>MODEL (1:100)</b>	<b>Scale=100</b>	<b>PROTOTYPE</b>
B/L RATIO	1	$\times 100$	1
Length (m)	0.4	$\times 100$	40
Breadth (m)	0.4	$\times 100$	40
Draft (m)	0.04	$\times 100$	4
Free Board (m)	0.06	$\times 100$	6
Moonpool (W×L×H)	0.4m×0.4m×0.1m	$\times 100$	40m×40m×10m
Mass, include ballast (kg)	5.452	$\times 100^3$	5452000
Water Displacement ( $m^3$ )	0.006	$\times 100^3$	6000
Roll/Pitch inertia about CM ( $kg.m^2$ )	0.073	$\times 100^5$	726900000
Yaw inertia about CM ( $kg.m^2$ )	0.145	$\times 100^5$	1453900000
Water depth (m)	1	$\times 100$	100

### 3.2.2 Χαρακτηριστικά στροβίλου τύπου NREL 5 MW

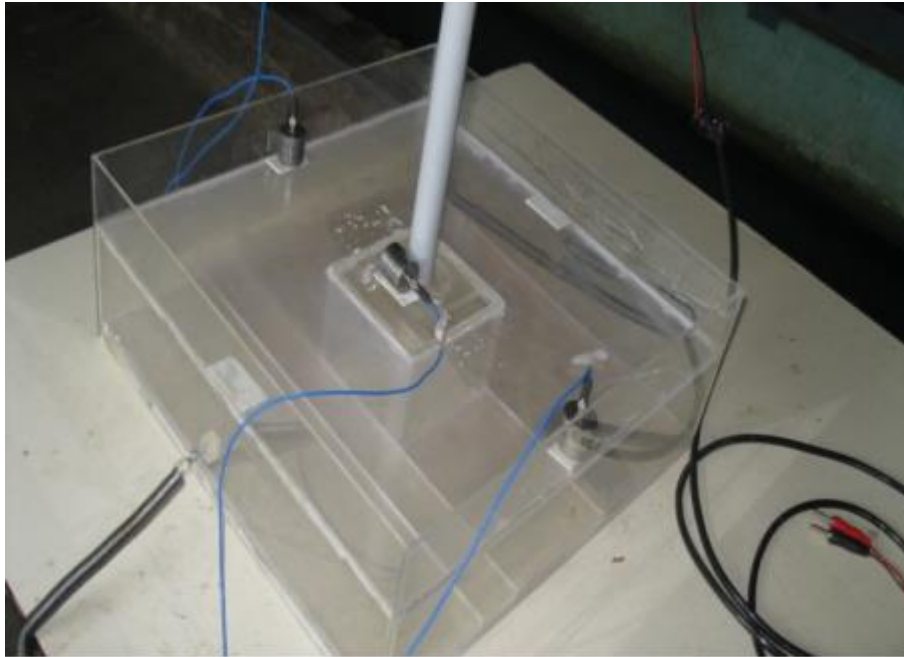
Η ανεμογεννήτρια τύπου NREL 5 MW αποτελείται από τρεις λεπίδες, είναι και αυτή κατασκευασμένη με κλίμακα 1/100, ενώ η πρότυπη μπορεί να παράγει ενέργεια 5 MW. Τα χαρακτηριστικά του προτύπου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

<b>Πίνακας 3.2</b>	
	<b>Τιμές</b>
Rating	5 MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 blades
Rotor diameter (m)	126
Hub diameter (m)	3
Hub Height (m)	90
Rated Tip Speed (m/s)	80
Overhang (m)	5
Shaft Tilt	$5^0$
Precone	$2.5^0$
Rotor Mass (kg)	110.000

Nacelle Mass (kg)	240.000
Tower Mass (kg)	347.0460

### 3.2.3 Όργανα μέτρησης

Η φορτηγίδα ήταν τοποθετημένη στο κέντρο της δεξαμενής με οριζόντιες γραμμές αγκύρωσης για να αποφευχθεί η μετατόπιση. Το εύρος της περιόδου του κύματος κυμαινόταν από 0.2 έως 2 s. Για την παραγωγή δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν όργανα που μετρούν το ύψος κύματος, καθώς και όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης. Τα όργανα μέτρησης του κύματος τοποθετήθηκαν ένα μέτρο μπροστά από τη συσκευή, για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στο κέντρο για να υπολογιστεί η surge απόκριση, ενώ με την τοποθέτησή τους στην άκρη της φορτηγίδας υπολογίστηκαν η κίνηση heave και η pitch περιστροφή (Εικόνα 3.2). Οι φυσικές συχνότητες στη διεύθυνση heave υπολογίστηκαν σε 0.8 s, ενώ στην περιστροφή pitch βρέθηκαν ίσες με 1.4 s και υπολογίστηκαν με τη λογαριθμική μέθοδο.

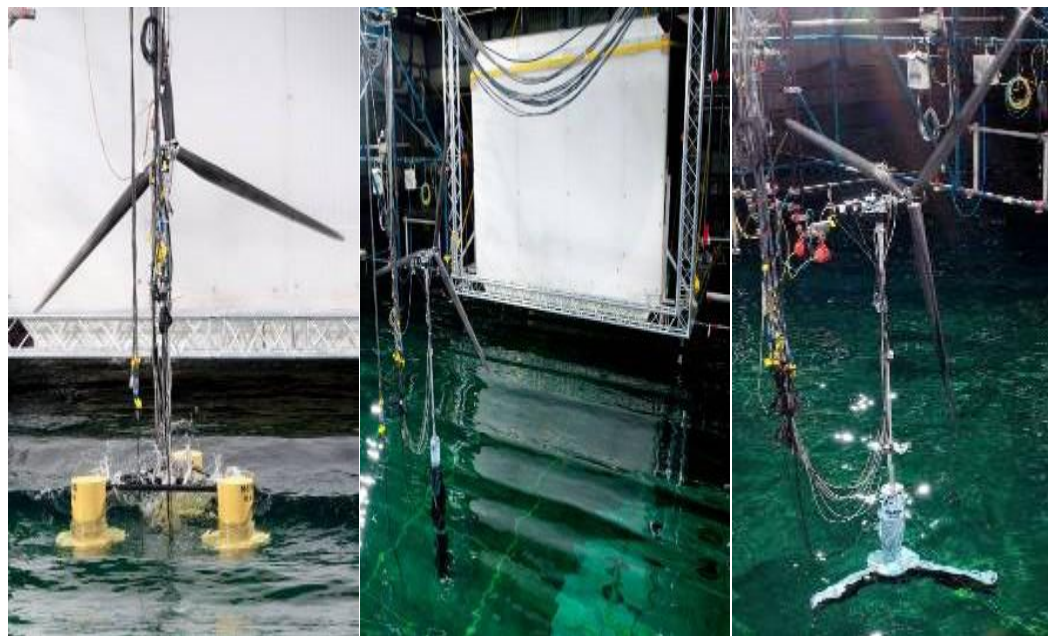


Εικόνα 3.2 Επιταχυνσιόμετρα (Πηγή: G.V. Kumar, 2013)

### 3.3 Πειράματα για TLP Spar και Semi

Σε αυτή την εργασία (R.Kimball et all, 2012) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και ο τρόπος διεξαγωγής των πειραμάτων (στη δεξαμενή δοκιμών MARIN) για τρία διαφορετικά πλωτά συστήματα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία μοντέλα σε κλίμακα 1/50, Semi (Εικόνα 3.3 a), TLP (Εικόνα 3.5 c) και Spar (Εικόνα 3.5 b). Η Semi κατασκευή μελετήθηκε μέσω πειραμάτων και από άλλους ερευνητές (Masciola et all, 2013).

Τα πειράματα διεξήχθησαν στην Ολλανδία, στη δεξαμενή MARIN, διαστάσεων 43×36×10.2 m και βάθους 4 m. Για τη βαθμονόμηση της δεξαμενής τοποθετήθηκαν κοντά σε αυτήν όργανα μέτρησης του κύματος κατά τη διάρκεια των δοκιμών βαθμονόμησης.



(1)

(2)

(3)

**Εικόνα 3.3 1) Semi 2) Spar 3) TLP (Πηγή: R.Kimball et al, 2012)**

<b>Πίνακας 3.3</b>			
Platform Type	TLP	Spar	Semi
Mass w/ Turbine (mt)	1361	7980	14040
Displacement (mt)	2840	8230	14265
Draft (m)	30	120	20
CG Above Keel (m)	64.1	43.7	10.1
Mooring Spread Diameter (m)	60	890	1675
Roll Radius of Gyration (m)	52.6	53.5	31.6
Pitch Radius of Gyration (m)	52.7	53.6	32.3
Natural Surge Period (s)	39.3	43	107
Natural Sway Period (s)	39.3	42.8	112
Natural Heave Period (s)	1.25	28.1	17.5
Natural Roll Period	3.7	32	26.9

(s)			
Natural Pitch Period (s)	3.7	31.5	26.8
Natural Yaw Period (s)	18.2	5.5	82.3
Tower Fore-Aft Fundamental Bending Frequency (Hz)	0.28	0.43	0.35
Tower Side-Side Fundamental Bending Frequency (Hz)	0.29	0.44	0.38

Τα πειράματα έγιναν μέσω προσομοίωσης διάφορων συνθηκών περιβάλλοντος. Έτσι, έλαβε χώρα μια σειρά γραμμικών κυματισμών για ποικίλες συχνότητες, ενώ η προσομοίωση των τυχαίων κυματισμών πραγματοποιήθηκε με χρήση του φάσματος JONSWAP. Επιπλέον, επιλέχθηκε φάσμα λευκού θορύβου για τον υπολογισμό των RAO's και για την αξιολόγηση των κινήσεων απόκρισης της πλατφόρμας.



**Εικόνα 3.4 Γεννήτρια ανέμου (Πηγή: R. Kimball et all, 2012)**

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ανέμου (Εικόνα 3.4) περιελάμβανε 35 ανεμιστήρες και όργανα μέτρησης της ταχύτητας στους τρεις άξονες. Συν τοις άλλοις, χρησιμοποιήθηκε σύστημα ελέγχου των ανεμιστήρων και

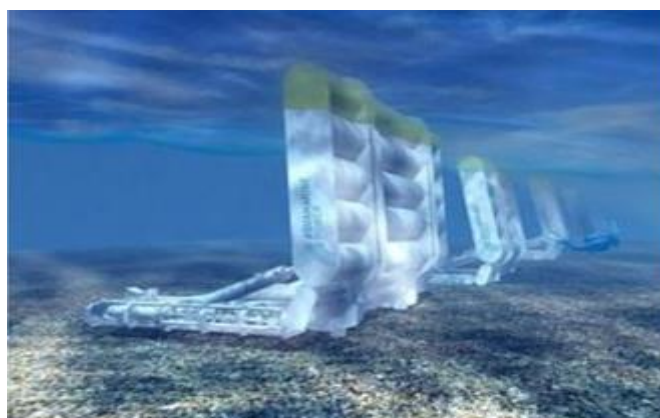
μία κυψελοειδής δομή (Εικόνα 3.4) στην αρχή, για να αποφευχθεί στροβιλισμός στη ροή του ανέμου που θα επηρέαζε την απόδοση του στροβίλου.

### 3.4 Πειράματα για Wind Wave Float

Σε αυτή την ενότητα θα παραθέσουμε πειραματικά δεδομένα για τη Wind Wave Float κατασκευή (A. Peiffer, 2012). Η πλατφόρμα αυτή έχει κατασκευαστεί για να υποστηρίξει μία ανεμογεννήτρια των 5 MW και να παράγει ενέργεια από τα κύματα.

Η κυματική ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από την κίνηση των κυμάτων. Υπάρχουν πολλές συσκευές που έχουν σχεδιαστεί γι' αυτόν το σκοπό (Thresher, 2014). Ένα μειονέκτημα αυτών των συσκευών είναι η μεγάλη καταπόνηση που υφίστανται εξαιτίας των ισχυρών δυνάμεων που αναπτύσσονται από τα κύματα.

Η Wind Wave Float συσκευή, που αποσκοπεί στην ανάκτηση της κυματικής ενέργειας, αξιοποιεί το σχεδιασμό της κατασκευής OWC's (Oscillating Wave Surge Converters). Αυτού του είδους οι συσκευές εκμεταλλεύονται την ενέργεια των κυμάτων κατά τη surge διεύθυνση (Folley, 2014). Δύο τύποι της εν λόγω τεχνολογίας είναι η συσκευή Aquamarine Oyster (Εικόνα 3.5) και η AW-Energy Wave roller (Εικόνα 3.6).



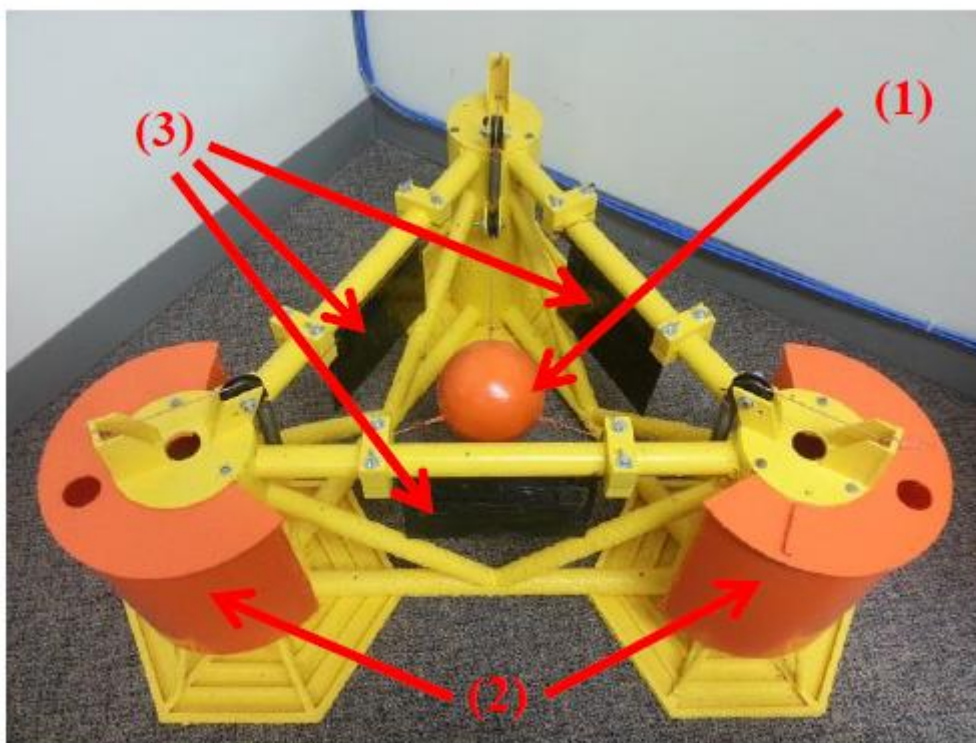
Εικόνα 3.5 Συσκευή Aquamarine Oyster (Πηγή: A. Peiffer, 2012)



Εικόνα 3.6 Συσκευή AW-Energy Wave roller (Πηγή: A. Peiffer, 2012)

### 3.4.1 Συσκευή Wind Wave Float

Η συσκευή Wind Wave Float φαίνεται στην εικόνα 3.7. Αποτελείται από, (1) την κεντρική πορτοκαλί σφαίρα, η οποία καλείται SWDE (Spherical Wave Energy Device), (2) τα δύο πορτοκαλί κελύφη που στηρίζονται στη στήλη ταλαντευόμενου υγρού, και (3) τα τρία μαύρα περύγια. Στον πίνακα 3.4 παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των περυγίων.



Εικόνα 3.7 Wind Wave Float (Πηγή: A. Peiffer, 2012)

Πίνακας 3.4	
Flap length	16.00 (m)
Flap width	11.00 (m)
Flap thickness	0.20 (m)
Flap draft	4.75 (m)
Flap mass	72.6 (te)
Flap moment of inertia $I_x$	2.278 ( $te.m^2$ )
Flap moment of inertia $I_y$	731 ( $te.m^2$ )
Flap moment of inertia $I_z$	1.548 ( $te.m^2$ )
Flap wetted volume	14.92 $m^3$
Line's pretension	Variable
Line's stiffness	Variable

### 3.4.2 Διεξαγωγή πειραμάτων

Τα πειράματα διεξήχθησαν στη δεξαμενή (μήκους 61 m) του εργαστηρίου του UC Berkeley, με ένα μοντέλο σε κλίμακα 1/78.5 από ακριλικό υλικό, ενώ τα πτερύγια κατασκευάστηκαν από φύλλα άνθρακα. Βάρη από μόλυβδο χρησιμοποιήθηκαν μέσα στις στήλες για να επιτευχθεί η ενδεδειγμένη θέση του κέντρου βάρους. Τα πτερύγια ήταν συνδεδεμένα στη δομή με έδρανα και με ελατήρια (με στροφική δυσκαμψία 0.5 kN/rad), προκειμένου να επιτευχθεί περιστροφική ακαμψία. Η pitch θέση των πτερυγίων μετρήθηκε μέσω αισθητήρων, ενώ το ύψος κύματος καταγράφηκε από όργανα μέτρησης του ύψους που ήταν τοποθετημένα μπροστά από τη συσκευή. Οι κινήσεις παρακολούθηθηκαν με τη χρήση ενός λογισμικού παρακολούθησης (καταγραφή σε βίντεο) με υψηλή ευκρίνεια ανάλυσης.

Οι δοκιμές έγιναν για απλούς (REGULAR) κυματισμούς, για διάφορα ύψη κύματος και για διάφορες περιόδους κύματος. Τα εν λόγω πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την παρουσία των πτερυγίων αλλά και με αυτά να απουσιάζουν, με απώτερο σκοπό να μελετηθεί η επίδραση που έχουν αυτά στα προκύπτοντα αποτελέσματα.

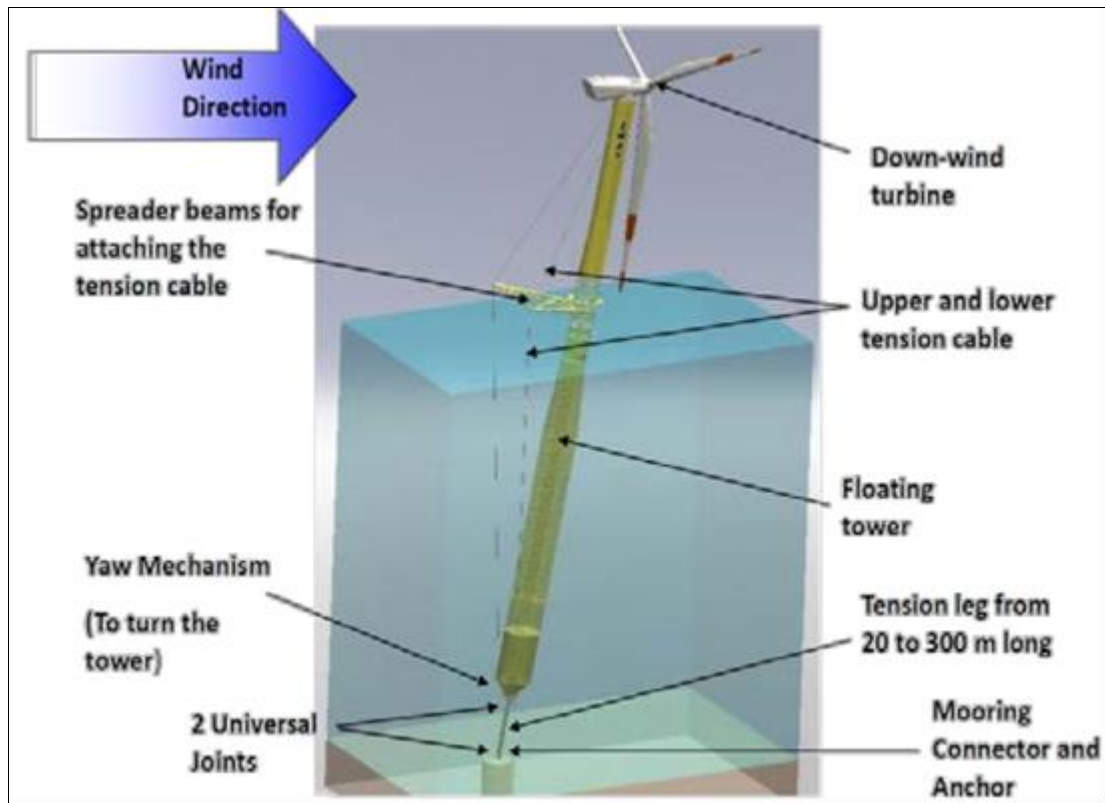
### 3.5 SWAY Spar

Η SWAY Spar (Εικόνα 3.8) είναι μία πλωτή ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια και χρησιμοποιεί για σύστημα πρόσδεσης, ώστε να επιτευχθεί υδροστατική σταθερότητα, μία ράβδο. Το κάτω μέρος της SWAY Spar στερεώνεται στη ράβδο μέσω μιας άρθρωσης, ενώ το άλλο άκρο της ράβδου είναι συνδεδεμένο με μία μεγάλη χαλύβδινη μάζα (άγκυρα), που είναι τοποθετημένη στον πυθμένα. Η διάταξη αυτή επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια (συμπεριλαμβανομένου του πύργου) να περιστρέφεται κατά τη yaw διεύθυνση μέσω της άρθρωσης που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πύργου.

Το παθητικό σύστημα εκτροπής (στο κάτω μέρος του πύργου) εξαλείφει το κόστος από τη χρήση ενός ενεργού συστήματος περιστροφής που βρίσκεται στο πάνω μέρος της ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια διαθέτει μεμονωμένο σύστημα ελέγχου πτερυγίων στην pitch διεύθυνση, καθώς η άτρακτος (nacelle) είναι στερεωμένη σε μία βέλτιστη γωνία, ώστε ο άξονας του Ρότορα να προσανατολίζεται οριζοντίως (παράλληλα προς τον άνεμο), όταν κατά τη λειτουργία ο πύργος περιστρέφεται κατά την pitch περιστροφή. Επιπροσθέτως, με τη χρήση των καλωδίων τάσης και των συνδετικών δοκών (spreader beams) επιτυγχάνεται ακαμψία του πύργου, με αποτέλεσμα να μειώνονται τα φορτία κόπωσης και να είναι σε θέση ο πύργος να μεταφέρει μεγαλύτερη τουρμπίνα.

Η κλίμακα του μοντέλου είναι 1/6.5 και εγκαταστάθηκε μαζί με τα όργανα μέτρησης στη Νορβηγία το 2012, κατόπιν συνεργασίας των εργαστηρίων NREL και SWAY AS.





**Εικόνα 5.8 SWAY Spar (Πηγή: Kox, 2013)**

Στον πίνακα 3.5 παρατίθενται οι προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας SWAY Spar.

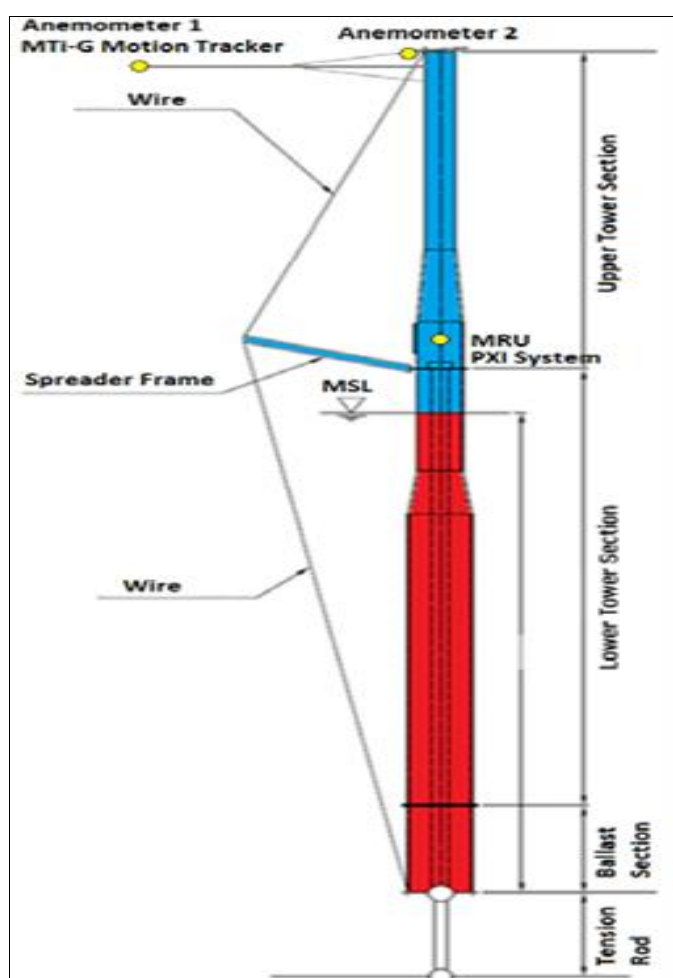
<b>Πίνακας 3.5</b>	
Foundation Manufacturer	SWAY
Make, Model of Turbine	SWAY 1/6.5 <sup>th</sup> scale prototype
Production Year of turbine	2011
Rotation Axis	Horizontal
Orientation	Downwind
Number of Blades	3
Rotor Diameter (m)	14.9
Hub height (m)	~13
Control	Individual Pitch Control
Tower type	Tubular
Floater type	Spar Buoy

### 3.5.1 Όργανα μέτρησης

Οι κινήσεις της πλατφόρμας μετρήθηκαν με δύο μονάδες αναφοράς κίνησης (Motion Reference Units). Η μία μονάδα βρισκόταν στον πύργο, ακριβώς πάνω από την ίσαλο γραμμή, και η άλλη στο ύψος της ατράκτου. Η κατεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου μετρήθηκαν με δύο ανεμόμετρα, τα οποία μετρούσαν στους τρεις άξονες

κάνοντας χρήση της τεχνολογίας υπερήχων. Το ένα ήταν τοποθετημένο στο ύψος της ατράκτου και το άλλο κοντά στη βάση της.

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση των κυμάτων μετρήθηκαν με όργανα μέτρησης που ήταν τοποθετημένα σε έναν τρίποδα 12 (m) ευρισκόμενο βορειοανατολικά της τουρμπίνας και σε βάθος περίπου 20 m. Τα δεδομένα από τα όργανα που ήταν πάνω στην άτρακτο αποθηκεύονταν σε σύστημα που ήταν πάνω στην ανεμογεννήτρια (χωρίς χρήση καλωδίων, αφού κάτι τέτοιο θα επηρέαζε τις μετρήσεις), ενώ τα δεδομένα από τα όργανα μέτρησης των κυματισμών μεταφέρονταν στην ακτή μέσω καλωδίων. Τα όργανα πάνω στην ανεμογεννήτρια χρησιμοποίησαν το χρόνο GPS για την επίτευξη συγχρονισμένων μετρήσεων. Η θέση των οργάνων φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Εικόνα 5.9 Θέση οργάνων μέτρησης (Πηγή: Kox, 2013)

### 3.6 Πλατφόρμα OC4-DeepCWind Semi-Submersible

Η πλατφόρμα σε κλίμακα 1/40 (Εικόνα 3.10) σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης για μία σειρά πειραμάτων τα οποία έγιναν από το πανεπιστήμιο υπό διάφορες συνθήκες κύματος (Robertson, 2013). Η πλατφόρμα αυτή

χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση πρόσθετων πειραμάτων σε διαφορετικές συνθήκες κύματος και σε διαφορετική δεξαμενή δοκιμών ECN (Ecole Centrale de Nantes), διάρκειας τεσσάρων εβδομάδων (Manjock, 2014).

### 3.6.1 Υλικά κατασκευής

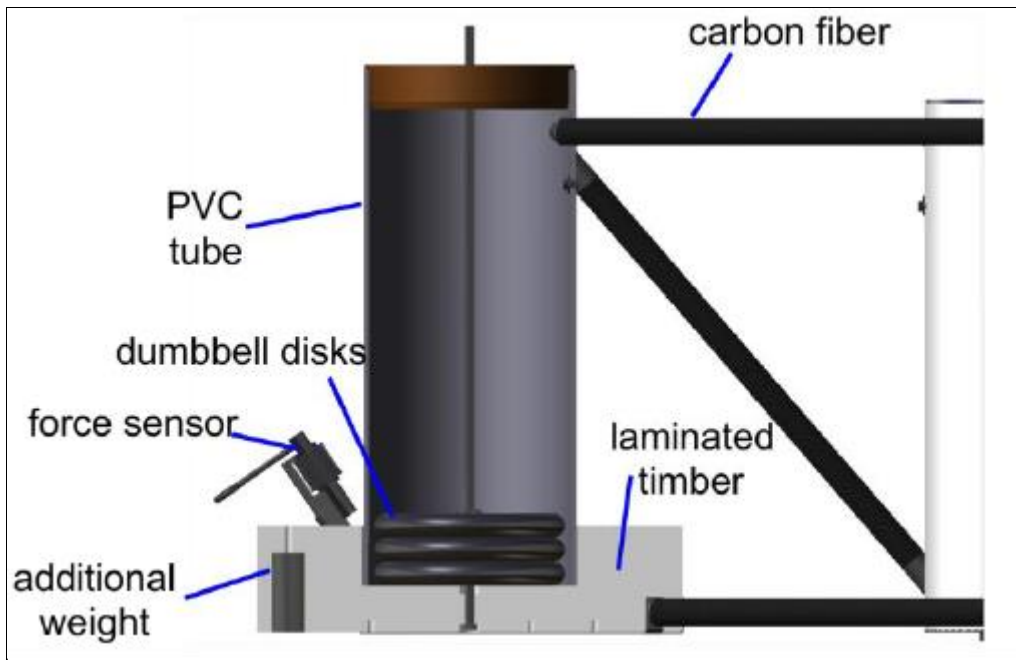
Το μοντέλο πλήρους κλίμακας (πρότυπο) είναι κατασκευασμένο από χάλυβα και έρμα, με νερό μέσα στις στήλες του. Το μοντέλο σε κλίμακα είναι κατασκευασμένο από σωλήνες PVC, με την κεντρική στήλη να έχει ενισχυθεί με ίνες άνθρακα και πολυμερή, εξαιτίας της καταπόνησης που υφίσταται από τη σύνδεσή του με τον πύργο και το στρόβιλο. Επίσης, οι στήλες βάσης είναι φτιαγμένες από πλαστικοποιημένο ξύλο και στεγανοποιούνται με βερνίκι, ώστε να δέχονται χαλύβδινους δίσκους που χρησιμοποιούνται ως έρμα για να επιτευχθεί το επιθυμητό κέντρο βάρους (Robertson, 2013).



**Εικόνα 3.10 Πλατφόρμα OC4-DeepCWind Semi-Submersible (Πηγή: Robertson, 2013)**

### 3.6.2 Όργανα μέτρησης

Στην πλατφόρμα υπήρχαν αισθητήρες μέτρησης της επιτάχυνσης (μεταφορική και περιστροφική) στους έξι βαθμούς ελευθερίας. Για τη μέτρηση των δυνάμεων χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας μέτρησης δύναμης ο οποίος ήταν στερεωμένος σταθερά στη στήλη βάσης, μαζί με το σύστημα αποθήκευσης των δεδομένων (Εικόνα 3.11). Με αυτό τον τρόπο απευφεύγετο η χρήση καλωδίων μετάδοσης των δεδομένων από την πλωτή εξέδρα στο σταθερό καταγραφέα, αφού σε αυτή την περίπτωση προκαλείται αλλοίωση των αποτελεσμάτων (Robertson, 2013). Η δειγματοληψία των δεδομένων έγινε σε συχνότητα 100 Hz.



Εικόνα 3.11 Σχέδιο πλατφόρμας και όργανα μέτρησης (Πηγή: Robertson, 2013)

### 3.6.3 Χαρακτηριστικά δεξαμενής δοκιμών

- Το μήκος της δεξαμενής ήταν 50 m, το πλάτος 30 m, το βάθος 5 m, ενώ υπήρχε και μία κεντρική τάφρος διαστάσεων 5 m × 5 m και βάθους 10 m
- 48 πτερύγια σε ελεγχόμενη θέση και λειτουργία
- Περίοδοι κύματος από 0.8 έως 5 s
- Μέγιστο ύψος κύματος 1 m για απλούς αρμονικούς κυματισμούς
- Σημαντικό ύψος 0.8 m για τυχαίους κυματισμούς
- Κατεύθυνση κυματισμών 0 έως 45 μοίρες
- Ταχύτητα ανέμου 0 έως 15 m/s
- Εναέρια και υποθαλάσσια οπτικά συστήματα ανίχνευσης κίνησης
- Σύστημα ελέγχου γραμμών αγκύρωσης από 4 όργανα μέτρησης

### 3.6.4 Κλίμακα λ

Στους πίνακες 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται οι μετατροπές των χαρακτηριστικών του μοντέλου με βάση την κλίμακα λ σε χαρακτηριστικά του προτύπου (Manjock, 2014).

<b>Πίνακας 3.6</b>	
Χαρακτηριστικά	$\lambda$
Mass	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda^3$
Mass moment of inertia (J)	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda^5$
Area moment of inertia (I)	$\lambda^4$
Water velocity	$\lambda^{1/2}$
Air velocity	$\lambda^{1/2} \beta^{-1}$
Acceleration	1
Time	$\lambda^{1/2}$
Frequency	$\lambda^{-1/2}$
Angle	1
Force	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda^3$
Moment	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda^4$
Stiffness (9E)	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda$
Stress	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda$
Power	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \lambda^{7/2}$
Thrust coefficient ( $C_T$ )	$(\rho_{wp}/\rho_{wm}) \beta^2$

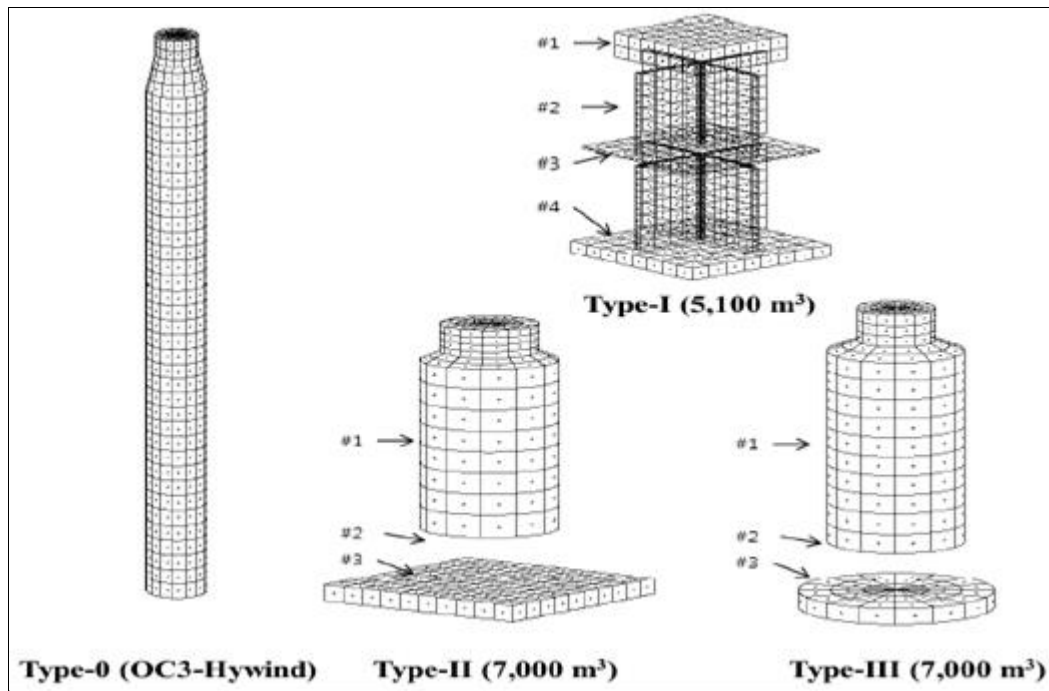
<b>Πίνακας 3.7</b>	
Geometric height (z)	$\lambda$
Wind speed (V)	$\lambda^{1/2} \beta^{-1}$
Turbulent wind frequency (f)	$\lambda^{-1/2}$
Turbulence intensity	1
Wind profile power coefficient ( $\alpha$ )	1
Water depth	$\lambda$
Velocity	$\lambda^{-1/2}$
Significant wave height	$\lambda$
Peak period	$\lambda^{1/2}$
Wind wave misalignment	1

### 3.7 Σύγκριση πλωτών ανεμογεννητριών

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε μία σειρά πειραμάτων τα οποία έγιναν με σκοπό τη σύγκριση μεταξύ τριών πλωτών ανεμογεννητριών, δυνάμενων να στηρίξουν μία ανεμογεννήτρια 5 MW. Ως πλατφόρμα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε η OC3-Hywind (Jonkman, 2010).

#### 3.7.1 Σχήματα και χαρακτηριστικά των πλωτών ανεμογεννητριών

Στην εικόνα 3.12 φαίνονται τα σχήματα που έχουν τα τέσσερα πλωτά σώματα, ενώ στην εικόνα 3.13 παρουσιάζονται το εκτόπισμα, η διάμετρος και το ύψος για τα τέσσερα συστήματα.



Εικόνα 3.12 Τέσσερις τύποι πλωτών συστημάτων (Πηγή: Kim, 2014)

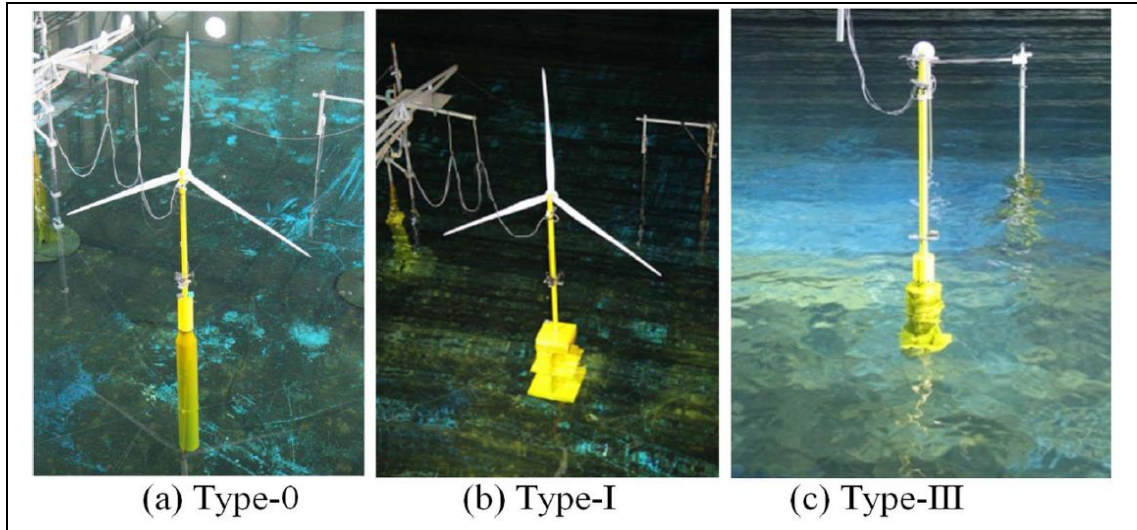
Type	Displacement [m <sup>3</sup> ]	Body	Diameter or breadth [m]	Height [m]	GMt [m]
0	8,074	#1	6.9/9.4	120.0	20.0
I	5,100	#1	16.0	6.0	6.3
		#2	22.0	41.0	
		#3	22.0	0.5	
		#4	24.2	3.0	
II	7,000	#1	10.0/14.0	37.0	5.5
		#2	—	10.0	
		#3	21.8	3.0	
III	7,000	#1	8.0/14.0	44.0	6.0
		#2	—	9.6	
		#3	20.0	3.0	

Εικόνα 3.13 Χαρακτηριστικά των πλωτών συστημάτων (Πηγή: Kim, 2014)

### 3.7.2 Πειραματική διαδικασία

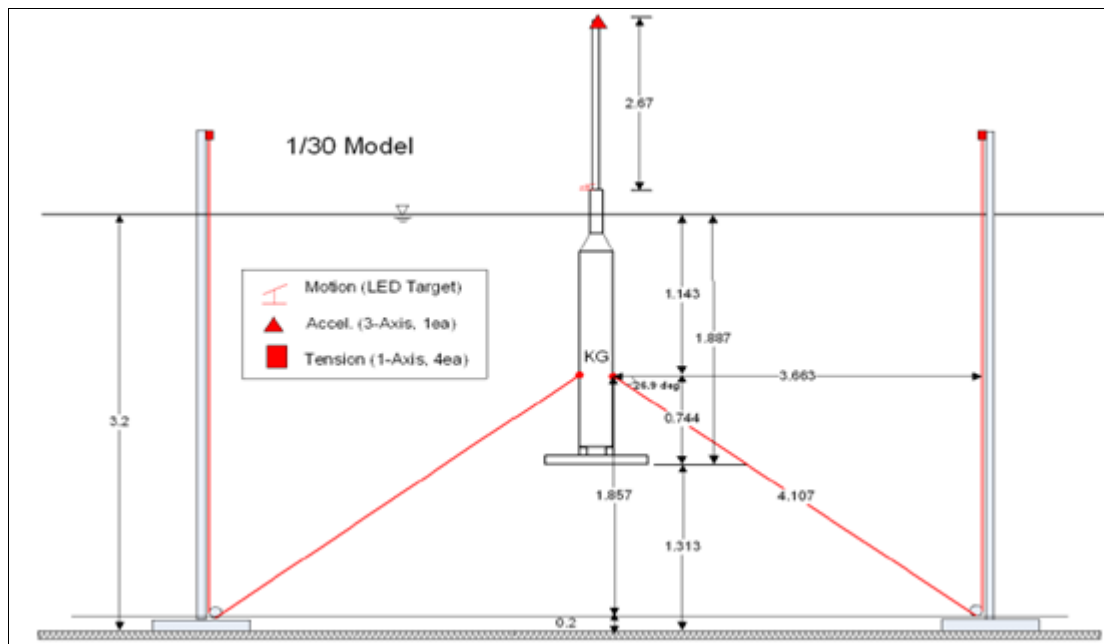
Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τρία πλωτά συστήματα, οι τύποι 0, I και III. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα για τους τύπους 0 και I σε κλίμακα 1/45, ενώ το μοντέλο για τον τύπο III επιλέχθηκε βάσει κλίμακας 1/30 (Εικόνα 3.14). Τα πειράματα διεξήχθησαν στην πειραματική δεξαμενή του ινστιτούτου στην Κορέα (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering).

Οι υπολογισμοί των RAO's έγιναν για απλούς αρμονικούς κυματισμούς, για διάφορα ύψη κύματος και για περιόδους από 5 s έως 25 s. Το σημαντικό ύψος κύματος του τυχαίου κυματισμού ήταν 2.4 m με περίοδο  $T_p$  10 s, ενώ οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν εντός τριών ωρών, σε πραγματική κλίμακα.



**Εικόνα 3.14 Type 0 & I 1/45, Type III 1/30 (Πηγή: Kim, 2014)**

Οι κινήσεις στους έξι βαθμούς ελευθερίας και οι επιταχύνσεις της ατράκτου μετρήθηκαν στο κέντρο βάρους και στη θέση της ατράκτου, η οποία βρίσκεται 80 μέτρα πάνω από το κατάστρωμα των πλωτήρων. Επίσης, μετρήθηκαν οι τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, οι οποίες ήταν συνδεδεμένες στο κέντρο βάρους του μοντέλου σε κλίμακα 1/30 (Εικόνα 3.15).



**Εικόνα 3.15 Mooring Lines 1/30 (Πηγή: Kim, 2014)**

### 3.8 Πλατφόρμα Towing Tank

Στην ενεργειακή πολιτική της Ιαπωνίας έχει συμπεριληφθεί, κυρίως μετά το σοβαρότατο ατύχημα στη Φουκουσίμα, η προσπάθεια για σταδιακή μείωση του ποσοστού παραγωγής της πυρηνικής ενέργειας. Προς αυτή την κατεύθυνση, από το 2011, στο νησί Fukuoka της Ιαπωνίας, τοποθετήθηκε κοντά στις ακτές μία πλωτή κατασκευή που συνδύαζε την παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο και τον ήλιο. Στην εικόνα 5.16 φαίνεται η κατασκευή με τις έξι στήλες, τις δύο έλικες και τη συστοιχία των ηλιακών πάνελ (Kyozuka, 2014).

#### 3.8.1 Χαρακτηριστικά προτύπου

Η διάμετρος της πλατφόρμας είναι 18 m, η διάμετρος του πλωτού κυλίνδρου ισούται με 3.5 m, η διάμετρος των στροβίλων είναι της τάξεως των 3.4 m, ενώ το ύψος του κάθε πύργου είναι 7 m. Το βύθισμα βρίσκεται στα 2.4 m, ενώ το εκτόπισμα ισοδυναμεί με 140 ton. Η κάθε τουρμπίνα σχεδιάστηκε για να παράγει ενέργεια 3 kW, ενώ η παραγωγή ηλιακής ενέργειας ανέρχεται σε 1.5 kW.



Εικόνα 3.16 Πλατφόρμα RIAM (Πηγή: Kyozuka, 2014)

#### 3.8.2 Όργανα μέτρησης

Η πλατφόρμα εφοδιάστηκε με όργανα μέτρησης της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου, καθώς και με όργανα μέτρησης του ύψους κύματος κοντά στην πλατφόρμα. Για τη μέτρηση της κίνησης της πλατφόρμας επιλέχθηκαν όργανα που έφταναν τους έξι βαθμούς ελευθερίας, με χρήση της τεχνολογίας GPS για την αποτελεσματικότερη επίτευξη συγχρονισμού των δεδομένων. Υπήρχε ένα όργανο μέτρησης της τάσης στη μία γραμμή αγκύρωσης. Επιπλέον, υπήρχε όργανο μέτρησης



της περιστροφής των δύο τουρμπινών, ενώ δεν απουσίαζαν τα όργανα μέτρησης της παραγόμενης ενέργειας από τις έλικες και από τα ηλιακά πάνελ. Τέλος, υπήρχαν όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας στο πλωτό σώμα και στο νερό.

### 3.9 Παρουσίαση πειραματικών δοκιμών

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται πειράματα που έχουν διεξαχθεί πάνω σε πλωτές ανεμογεννήτριες από το 2006 και εντεύθεν, βάσει της χρονολογίας διεξαγωγής, του τύπου μοντέλου που ελέγχθηκε, της κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε, του μοντέλου του Ρότορα και των περιπτώσεων που αναλύθηκαν (Manjock, 2014).

Πίνακας 3.8						
Έτος έκδοσης	Τύπος κατασκευής	Project	Κλίμακα	Μοντέλο Ρότορα	Περιπτώσεις λειτουργίας	Σχόλια
2006	Spar Buoy	Hywind	1/47	n.A. / Rotor used	n.A.	- Challenging dynamic aspects - control algorithms
2007	Semi-Submersible	Ishihara et all	1/150	1) No wind: Concentrated mass 2) Operating condition: disk with holes (Froude scaled thrust) 3) Survival condition: equivalent slender plate	SI4, DLC 1.x , 6.x	- New floater Design - Verify numerical model (for calculation of eigenmodes) - damping ratio of vertical motion - optical motion measurements
2009	Spar Buoy	Utsunomiya et all	1/22.5	n.A. / no Rotor used	SI, DLC 6.x	- Validation of simulation method
2009	Semi-Submersible	Ishihara et all	1/100	Concentrated mass	SI	- investigate influence of heave plates - optical motion measurements
2009	Semi-Submersible	Windfloat	1/105	Thrust scaled drag disk	SI, DLC 1.x ,	- 100 year waves + design wind speed - tower not to

						scale
2011	SB, TLP	Myhr et all	1/100	Concentrated mass	SI	- Comparison between model & experiment
2011	SB	Shin	1/128	Froude scaling	SI, DLC 1.x	- Characteristic & significant motions, RAO
2012	Moored by Spring-tensioned-leg	Shin et all	1/128	n.A. / Rotor used	SI	- Preliminary engineering development - Estimate motion characteristics of platform
2012	SB	Utsunomiya et all	1/34.5	- Froude scaled thrust - new blades	DLC 6.x	- Validate dynamic analysis tool results for extreme environmental conditions
2012	SB	Sethuraman et all	1/100	Concentrated mass	SI	- Validate numerical model - Focus on non linearities from mooring lines
2012	TLP	Ren et all	1/60	Froude scaled thrust	SI, DLC 6.x	- Square buoy - Validate numerical model
2012	TLP, SB	Olinger et all	1/100	Concentrated mass	SI	- Wireless data acquisition - Data acquisition for numerical model validation
2013	SS	GustoMSC	1/50	- Froude scaled thrust	n.A.	- Active blade pitch

				- new blades		
2013	TLP	Gicon	1/25	n.A. / Rotor used	n.A.	- Analysing eigenmodes
2013	SB	Utsunomiya et all	1/10	1 kW, yaw-free wind turbine	SI, DLC 1.x	- Hybrid Spar buoy
2013	SB	Chujo et all	1/100	- Froude scaled thrust (maintain - ratio) - New blades	DLC 1.x	- Blade pitch control - Analyse floater motion and rotor speed fluctuation
2013	SS	WINFLO	1/40 1/25	- Froude scaled thrust (maintain drag and torque) - New blades	SI, DLC 1.x	- Validate numerical modelling - Validate floater and mooring design for prototype - New floater design
2013	SS	Philippe et all	1/50	n.A. / Rotor used	SI, DLC 1.x	- Dutch Trifloater - Compare numerical model
2013	SS,TLP,SB	DeepCWind	1/50	Geometric scaling	SI, DLC 1.x	- Extensive study on floater behaviour - Generate publicly available data for numerical model validation
2013	SS	Iijima et all	1/100	Froude scaled thrust	SI, DLC 1.x, DLC 6.x	□ New floater design
2013	TLP	Wehmeyer et all 2013	1/80	Concentrated mass	SI, DLC 6.x	- Assess behaviour of mooring lines

2013	SS	Ishida et all, 2013	1/2	100 kW turbine	GPD6	-
2014	SS	VoltturnUS	1/8	Modified 20 kW pitch regulated commercial turbine to apply peak scaled thrust	GPD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- concrete semi-submersible hull and composite tower</li> <li>- demonstrate full-scale design, materials, construction techniques and deployment methods</li> <li>- validate numerical design tools for near full-scale floating turbines</li> </ul>
2014	SS	SAEMar	1/60	Concentrated mass	SI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mooring line design methodology</li> </ul>
2014	TLP	GICON	1/37	MARIN rotor	SI, DLC 1.x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Froude scaled tower bending frequency</li> <li>- Mismatch of platform and rotor scaling</li> <li>- Preparation of prototype tests</li> </ul>
2014	SS	GustoMSC Tri-Floater	1/50	MARIN rotor	DLC 1.x, 6.x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- numerical model validation</li> <li>- active blade pitch control</li> </ul>
2014	SS	Azcona et all, 2014	1/40	Ducted fan	SI, 1.x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- validating rotor model</li> </ul>

## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Εισαγωγή

Τα κεφάλαια που ακολουθούν αναφέρονται στα πειράματα που διεξήχθησαν στη δεξαμενή δοκιμών HyIV-DHI-01 (S. Mavrakos, G. Tomasicchio, F. D’Alessandro, J. Wolbring, et al., 2012). Η σχετική εργασία είχε τίτλο “Dynamic response of floating offshore wind turbines under random waves and wind action”. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση των δεδομένων που αφορούν τη δυναμική συμπεριφορά δύο ανεμογεννητριών. Τα δύο πλωτά συστήματα που εξετάζονται είναι η ανεμογεννήτρια τύπου TLP και η ανεμογεννήτρια τύπου Spar Buoy.

Μέσω των εν λόγω πειραμάτων εξετάστηκε η συνδυασμένη επίδραση των γραμμών αγκύρωσης και της ανεμογεννήτριας (wind turbine) στην απόκριση του πλωτού σώματος, με σκοπό να μελετηθούν ενδελεχώς οι υδροδυναμικές πτυχές μιας πλωτής ανεμογεννήτριας κατόπιν της επίδρασης απλών και τυχαίων κυματισμών, καθώς και όταν δρουν μαζί ο άνεμος και τα κύματα.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων, η διάταξη των μοντέλων κατά τις δοκιμές, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν τα πειράματα και γενικότερα όλη η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε.

### 4.2 Περιγραφή μοντέλων

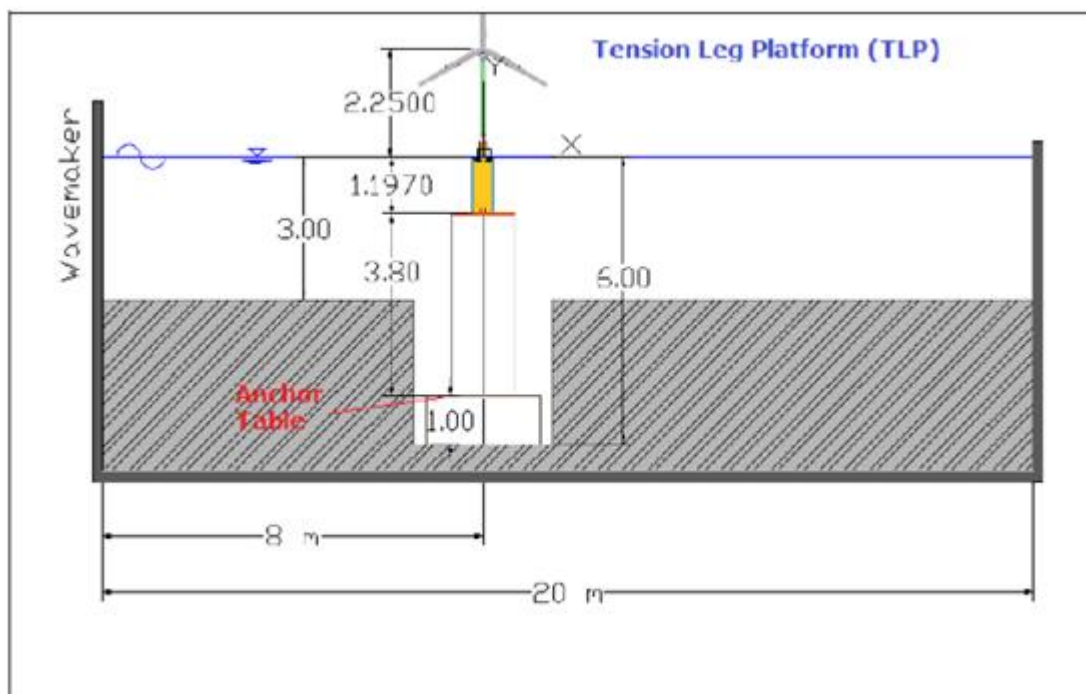
Τα πειράματα έλαβαν χώρα στην πειραματική δεξαμενή DHI, στο Horshom της Δανίας. Κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο φυσικά μοντέλα σε κλίμακα 1:40 ( $\lambda=40$ ) σε σχέση με τα πρωτότυπα. Το μοντέλο TLP σχεδιάστηκε με βάση το πρωτότυπο TLP του πανεπιστημίου MIT/NREL, ενώ το μοντέλο Spar Buoy βασίστηκε στο πρωτότυπο OC3-Hywind SB (Jonkman, 2009).

#### 4.2.1 Το μοντέλο TLP

Το υλικό με το οποίο κατασκευάστηκε το μοντέλο TLP είναι το πλαστικό με πυκνότητα ( $1.200 \text{ kg/m}^3$ ). Υπάρχουν δύο κύλινδροι που συναπαρτίζουν το μοντέλο TLP. Αρχικά θα αναφερθούμε στον κύριο κύλινδρο, ο οποίος έχει εξωτερική διάμετρο 450 mm και ύψος 1.197 m και είναι δομημένος με τέτοιον τρόπο ώστε το άνω μέρος του κυλίνδρου να εφάπτεται στην επιφάνεια του νερού (SWL). Στον κύλινδρο μπορούν να προστεθούν όργανα και έρμα. Στο πάνω μέρος του κύριου κυλίνδρου βιδώνεται ένας μικρότερος κύλινδρος, που έχει διάμετρο 162.5 mm και ύψος 300 m. Ο μικρός κύλινδρος ενώνεται με τον πύργο της ανεμογεννήτριας (σε ύψος 0.3 m πάνω από το SWL) μέσω του εξαρτήματος που μετρά τις έξι δυνάμεις και

ροπές ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ). Σε ύψος 2.25 m υπάρχει εξάρτημα που μετρά τις τέσσερις δυνάμεις και ροπές ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ).

Η διάταξη στην εργαστηριακή δεξαμενή και οι διαστάσεις του μοντέλου TLP παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1 που ακολουθεί.



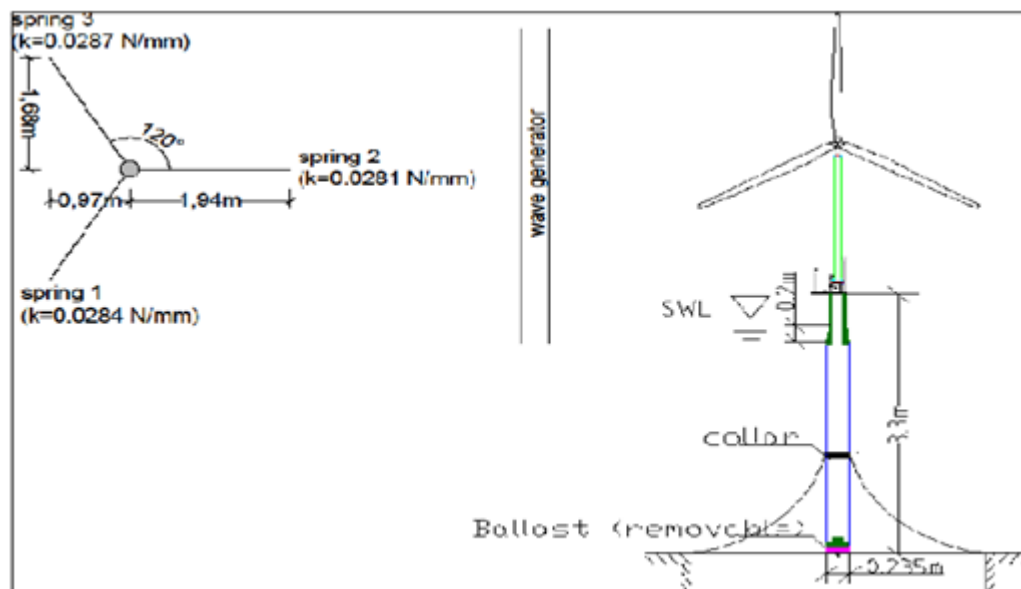
**Εικόνα 4.1 Διαστάσεις και διάταξη του TLP στη δεξαμενή (Πηγή: Mavrakos, 2012)**

Το σύστημα αγκύρωσης του μοντέλου TLP αποτελείται από 4 γραμμές αγκύρωσης, με την κάθε γραμμή να είναι αγκυρωμένη σε βάθος 5 m. Στο κάτω μέρος της TLP βρισκόταν μία χαλύβδινη πλάκα, όπου συνδέονταν τα τέσσερα αλουμινένια πόδια αγκύρωσης της κατασκευής. Ο συντελεστής ελατηρίου στην άκρη κάθε ποδιού κυμαινόταν από 10.3 N/mm έως 13.08 N/mm. Οι γραμμές αγκύρωσης αποτελούνταν από καλώδια 8 mm και με ακαμψία 40 N/mm. Η συνολική δύναμη προέντασης στους τένοντες υπολογίστηκε να είναι 49.6 kg. Για να επιτευχθεί ισορροπία, έρμα και μικρές σφαίρες, συνολικού βάρους 92.5 kg, τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος του μοντέλου.

Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζονται η διάταξη της αγκύρωσης και οι συντελεστές ελατηρίων για κάθε γραμμή αγκύρωσης.



Το σύστημα αγκύρωσης για το SB μοντέλο αποτελείται από τρεις γραμμές αγκύρωσης, συνδεδεμένες με τον κύλινδρο μέσω ενός κολάρου σε βύθισμα ίσο με 1.75 m κάτω από το SWL. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ δύο γραμμών αγκύρωσης είναι 120ο (Εικόνα 4.4).



**Εικόνα 4.4 Διάταξη αγκύρωσης του SB (Πηγή: Mavrakos, 2012)**

Οι γραμμές αγκύρωσης είχαν προενταθεί με 1.5 kg ανά γραμμική ένταση, με συντελεστή ακαμψίας 6.25 N/mm.

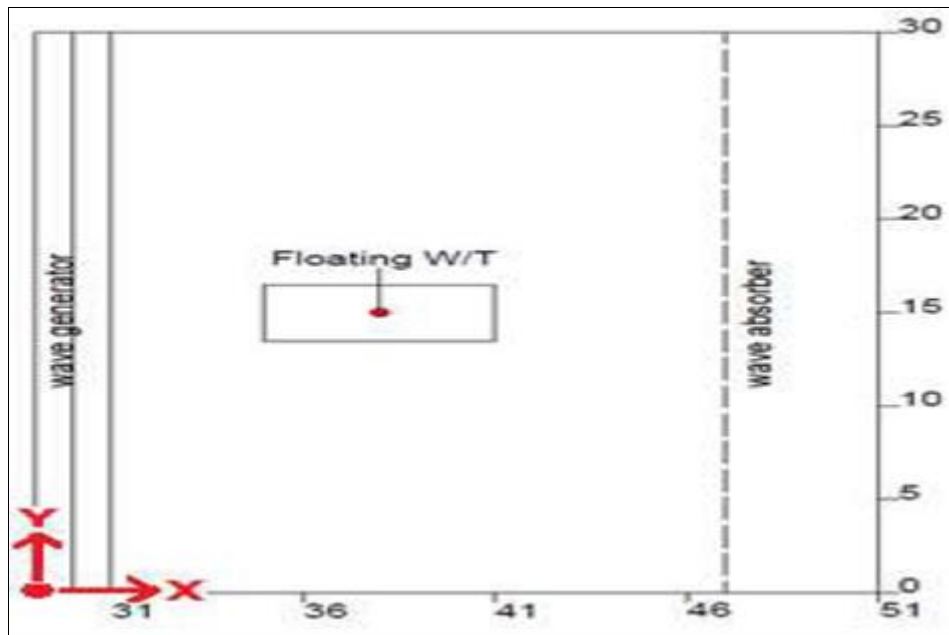
Η άτρακτος, οι λεπίδες και ο Ρότορας του πύργου παρέμειναν ίδια και στα δύο μοντέλα. Στην κορυφή του πύργου υπήρχαν όργανα μέτρησης των τεσσάρων δυνάμεων και ροπών ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ).

#### 4.2.3 Χαρακτηριστικά δεξαμενής

Η δεξαμενή όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είχε διαστάσεις  $x=51$ ,  $y=30$  και εμφάνιζε θετική φορά προς τα πάνω στον άξονα  $z$ . Η γεννήτρια που βρισκόταν στο δεξιό μέρος αποτελείτο από εξήντα ατομικά ελεγχόμενα πτερύγια με μήκος 1.5 m, που ήταν ικανά να παράγουν φάσματα κύματος πολλαπλών κατευθύνσεων. Στην άλλη πλευρά ( $x=46$  m) υπήρχε ο αποσβεστήρας των κυμάτων, η παρουσία του οποίου απέβλεπε στο να ελαχιστοποιείται η επίδραση από την αντανάκλαση των κυμάτων. Στο κέντρο της δεξαμενής υπήρχε μία τάφρος βάθους 6 m, με διαστάσεις 4 x 6 m (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5).

Τα δύο μοντέλα τοποθετήθηκαν στη δεξαμενή στο κέντρο της τάφρου και σε απόσταση 7 m από τη γεννήτρια κύματος. Οι δοκιμές έγιναν με παραγωγή κυμάτων στις 0ο και τις 20ο μοίρες, τα δε μοντέλα κινούνταν με έξι βαθμούς ελευθερίας από την κυματική και την αιολική δύναμη.





Εικόνα 4.5 Διάταξη δεξαμενής πειραμάτων (Πηγή: Mavrakos, 2012)

### 4.3 Όργανα μέτρησης

Για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των δεδομένων τοποθετήθηκαν 11 όργανα μέτρησης κύματος (wave gauges) γύρω από τις συσκευές. Αυτό έγινε επειδή στη δεξαμενή υπάρχουν φαινόμενα αντανάκλασης των κυμάτων στα τοιχώματά της, με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του κύματος που παρέχει η γεννήτρια κυμάτων να είναι διαφορετικά από τα πραγματικά. Η διόρθωση λαμβάνει χώρα βάσει των οργάνων μέτρησης (wave gauges). Η μέτρηση της αντανάκλασης των κυμάτων (ώστε να επιτευχθεί η βαθμονόμησή τους) πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση 6 μετρητών κύματος (wave gauges array) στο κέντρο της τάφρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.6.

Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι συντεταγμένες ( $x, y, z=0$ ) των 6 μετρητών.

Πίνακας 4.1		
	x	y
Wg01	36.5	16.5
Wg02	36.5	15
Wg03	36.5	13.5
Wg04	39.5	16.5
Wg05	39.5	15
Wg06	39.5	13.5
Wg_array	33.9	15

Ο σχεδιασμός, καθώς και τα όργανα μέτρησης της ατράκτου του πύργου και της ανεμογεννήτριας, ήταν τα ίδια και για τους δύο τύπους (TLP και SB).

Στη βάση του πύργου και σε απόσταση 0.3 m από το επίπεδο στάθμης του νερού (SWL) συνδέθηκαν οι μετρητές τριών δυνάμεων και τριών ροπών. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι τρεις δυνάμεις  $6comp F_x, F_y, F_z$  και οι τρεις αντίστοιχες ροπές  $6comp M_x, M_y, M_z$ .

Στην κορυφή του πύργου (ύψος πύργου 1.615 m. +0.3 m. απόσταση πύργου με SWL) 1.915 m. (δηλαδή μεταξύ πύργου και ατράκτου) τοποθετήθηκαν οι μετρητές για τον υπολογισμό των δύο δυνάμεων  $4comp F_x, F_y$ , καθώς και των αντίστοιχων δύο ροπών  $4comp M_x$  και  $4comp M_y$ .

Τρία επιταχυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν κάτω από την άτρακτο, στην κορυφή του πύργου και στο κάτω μέρος του πύργου.

Τέσσερις μετρητές μέτρησης τύπου-S τοποθετήθηκαν σε κάθε γραμμή πρόσδεσης για το TLP μοντέλο, προκειμένου να γίνει η καταγραφή των εφαρμοσμένων δυνάμεων στις γραμμές αγκύρωσης. Αντίστοιχα, για τον ίδιο λόγο, τρεις αντίστοιχοι μετρητές χρησιμοποιήθηκαν στο SB μοντέλο.

#### 4.4 Συγχρονισμός οργάνων

Η καταγραφή των δεδομένων αρχίζει όταν η γεννήτρια κύματος ξεκινήσει και σταματά όταν παρέλθει ο προκαθορισμένος χρόνος διάρκειας του πειράματος. Στη συνέχεια σταματά η γεννήτρια και ξεκινά η ίδια διαδικασία. Η συχνότητα μέτρησης των δεδομένων ήταν 40 Hz, δηλαδή τα όργανα λάμβαναν δεδομένα κατά  $1/40 = 0.025$  s.

##### 4.4.1 Βαθμονόμηση οργάνων

Οι ενδείξεις όλων των οργάνων δεν αποτυπώνονται σε φυσικές μονάδες μέτρησης (π.χ. N, m, ή Nm) αλλά σε Volt. Ο παρακάτω πίνακας 4.2 δείχνει τη σχέση μεταξύ της μονάδας ένδειξης και των φυσικών, μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς.

Πίνακας 4.2	
Όργανο μέτρησης [μονάδα μέτρησης]	Συνάρτηση μεταφοράς
Wg1 [m]	$y=0.0429x -0.0069$
Wg2 [m]	$y=0.0383x -0.002$
Wg3 [m]	$y=0.0324x +0.0042$
Wg4 [m]	$y=0.0365x +0.0016$
Wg5 [m]	$y=0.0355x -0.0009$
Wg6 [m]	$y=0.0376x -0.0004$

Wg7[m]	$y=0.027x +0.0079$
Wg8 [m]	$y=0.0333x +0.0017$
Wg9 [m]	$y=0.0302x +0.0049$
Wg10 [m]	$y=0.0352x +0.001$
Wg11 [m]	$y=0.0353x +0.0011$
6compFx [N]	$y=9.8184x -0.1286$
6compFy [N]	$y=9.71567x -0.0927$
6compFz [N]	$y=-3.2443 -0.0322$
6compMx [Nm]	$y=8.8459x -0.1430$
6compMy [Nm]	$y=6.9587x -0.1679$
6compMz [Nm]	$y= - 9.8773x +0.022$
4compFx [N]	$y=9.7939x -0.0338$
4compFy [N]	$y=9.7521x -0.1112$
4compMx [Nm]	$y=9.9328x -0.0979$
4compMy [Nm]	$y=9.7219x -0.2625$
Mooring1 (TLP) [N]	$y=98.192x-0.8979$
Mooring2 (TLP) [N]	$y=98.024x-0.6104$
Mooring3 (TLP) [N]	$y=97.931x-0.3852$
Mooring4 (TLP) [N]	$y=97.751x-0.8635$
Mooring1 (SB) [N]	$y=9.8348x-0.1066$
Mooring2 (SB) [N]	$y=9.8161x-0.0979$
Mooring3 (SB) [N]	$y=9.8541x-0.0803$
TLP <sub>x</sub> /SB <sub>x</sub> [m]	$y=0.06x$
TLP <sub>y</sub> /SB <sub>y</sub> [m]	$y=0.06x$
TLP <sub>z</sub> /SB <sub>z</sub> [m]	$y=0.04x$
TLP <sub>roll</sub> /SB <sub>roll</sub> [grad]	$y=0.04x$

TLP <sub>pitch</sub> /SB <sub>pitch</sub> [grad]	y=0.04x
TLP <sub>yaw</sub> /SB <sub>yaw</sub> [grad]	y=0.18x
ACC [G]	y=0,2 x
Pressure gauges (cell) [N/m <sup>2</sup> ]	y=0.1x
ADV [m/s <sup>2</sup> ]	y=1x
Rotation [rpm]	38/7 πλήρης κλίμακα

Ο παραπάνω πίνακας με τις συναρτήσεις μεταφοράς συμπληρώθηκε κατόπιν εργασιών που εκπονήθηκαν πρόσφατα (Κτωρής, 2015, Κοζύρης, 2014).

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι συναρτήσεις μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για τη δύναμη 6compFy πραγματοποιήθηκε μία σειρά από πειράματα, όπου, π.χ., ασκήθηκε δύναμη που ισοδυναμεί με βάρος (0, 0.5, 1, 2, 3, 5), στο κέντρο βάρους του κάθε μοντέλου, στη x διεύθυνση (surge) και σε συνθήκες απόλυτης ηρεμίας, χωρίς κυματισμούς. Με αυτό τον τρόπο κατέστη εφικτό να καταγραφούν οι τιμές από το αντίστοιχο όργανο μέτρησης.

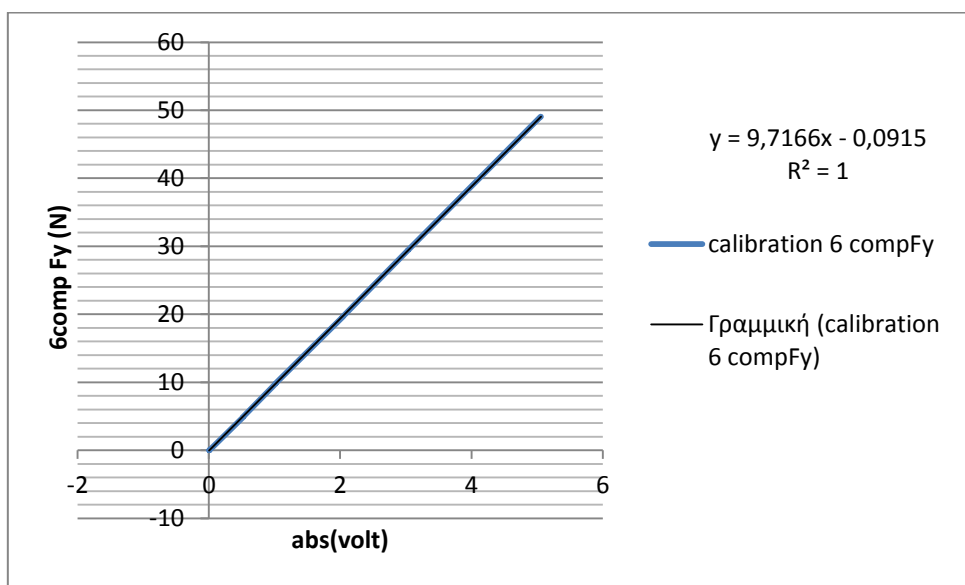
#### 4.4.2 Calibration για τη δύναμη 6compFy

Σε αυτή την παράγραφο παραθέτουμε τα δεδομένα που προέκυψαν από τα πειράματα που έγιναν για τη βαθμονόμηση της δύναμης στη βάση της ανεμογεννήτριας (και για τους δύο τύπους), στη surge διεύθυνση. Όλα τα στοιχεία περιλαμβάνονται στον πίνακα 4.4 που ακολουθεί.

<b>Πίνακας 4.4</b>					
	grams	Kg	1N=9,81kg	6comp Fy	abs
T1014	0	0	0	0,005104	0,005104
T1015	0	0	0	0,0056	0,0056
T1016	0	0	0	0,005466	0,005466
T1017	0	0	0	-0,00702	0,00702
T1023	0	0	0	0,007076	0,007076
T1022	500	0,5	4,905	-0,52468	0,52468

T1028	500	0,5	4,905	0,51969	0,51969
T1021	1000	1	9,81	-1,01803	1,01803
T1027	1000	1	9,81	1,012909	1,012909
T1020	2000	2	19,62	-2,03983	2,03983
T1026	2000	2	19,62	2,03702	2,03702
T1019	3000	3	29,43	-3,03438	3,03438
T1025	3000	3	29,43	3,033587	3,033587
T1018	5000	5	49,05	-5,05342	5,05342
T1024	5000	5	49,05	5,058627	5,058627

Τοποθετώντας σε γράφημα την απόλυτη τιμή των μετρήσεων (στήλη 6 του πίνακα 4.4), στον άξονα x, και τις δυνάμεις σε Newton στον y άξονα (στήλη 4) και κάνοντας χρήση της παλινδρόμησης (μέσω του excel), λαμβάνουμε τη σχέση δύναμης με καταγραφή του οργάνου σε volt.



**Σχήμα 4.3.1 Calibration για τη δύναμη 6compFy**

Οπότε η σχέση είναι η παρακάτω:

$$y = 9,7166x - 0,0915$$

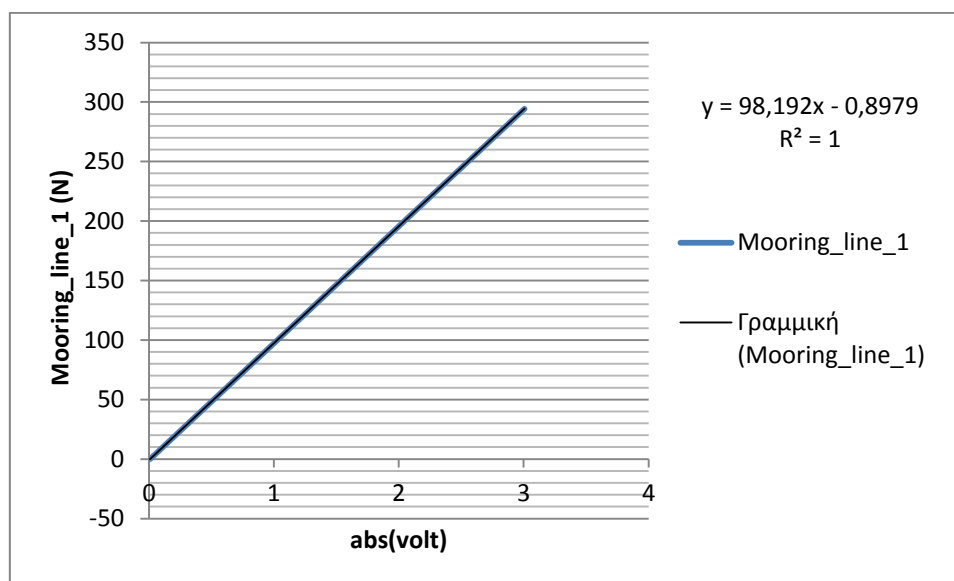
Πρόκειται για τιμή που προσεγγίζει πολύ τη συνάρτηση μεταφοράς του πίνακα 4.2

#### 4.4.3 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring 1

Στον πίνακα 4.5 υπάρχουν τα δεδομένα που προέκυψαν για τη βαθμονόμηση της δύναμης στην πρώτη γραμμή αγκύρωσης για την TLP.

Πίνακας 4.5					
	grams	kg	1N=9,81kg	Mooring_line_1	abs
T1149	0	0	0	0,008969	0,008969
T1050	5000	5	49,05	0,508663	0,508663
T1151	10000	10	98,1	1,008869	1,008869
T1152	20000	20	196,2	2,006529	2,006529
T1153	30000	30	294,3	3,006629	3,006629

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη παράγραφο κατασκευάζουμε το διάγραμμα 4.3.2



Σχήμα 4.3.2 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring\_1

Οπότε η σχέση είναι η παρακάτω:

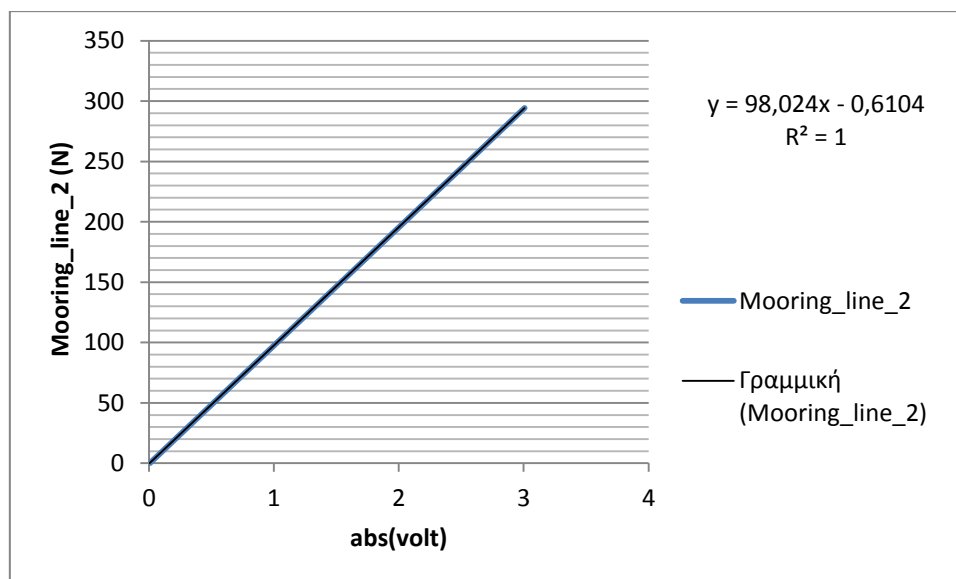
$$y = 98.192x - 0,8979$$

Πρόκειται για τιμή ίδια με αυτήν του πίνακα 4.2.

#### 4.4.4 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring 2

**Πίνακας 4.6**

	grams	kg	1N=9,81kg	Mooring_line_1	abs
T1154	0	0	0	0,00623678	0,006237
T1155	5000	5	49,05	0,506298	0,506298
T1156	10000	10	98,1	1,006735	1,006735
T1157	20000	20	196,2	2,009052	2,009052
T1158	30000	30	294,3	3,007821	3,007821



**Σχήμα 4.3.3 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring 2**

Οπότε η σχέση είναι η παρακάτω:

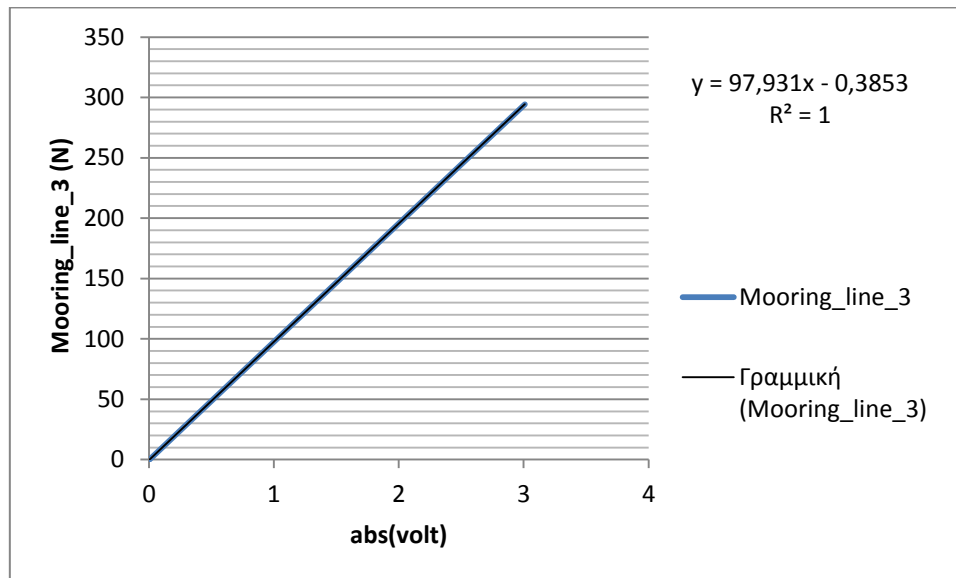
$$y = 98.024x - 0,6104$$

#### 4.4.5 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring 3

**Πίνακας 4.7**

	grams	kg	1N=9,81kg	Mooring_line_1	abs
T1160	0	0	0	0,004351	0,004351
T1161	5000	5	49,05	0,504649	0,504649

T1162	10000	10	98,1	1,005676	1,005676
T1163	20000	20	196,2	2,006473	2,006473
T1164	30000	30	294,3	3,009737	3,009737



**Σχήμα 4.3.4 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring\_3**

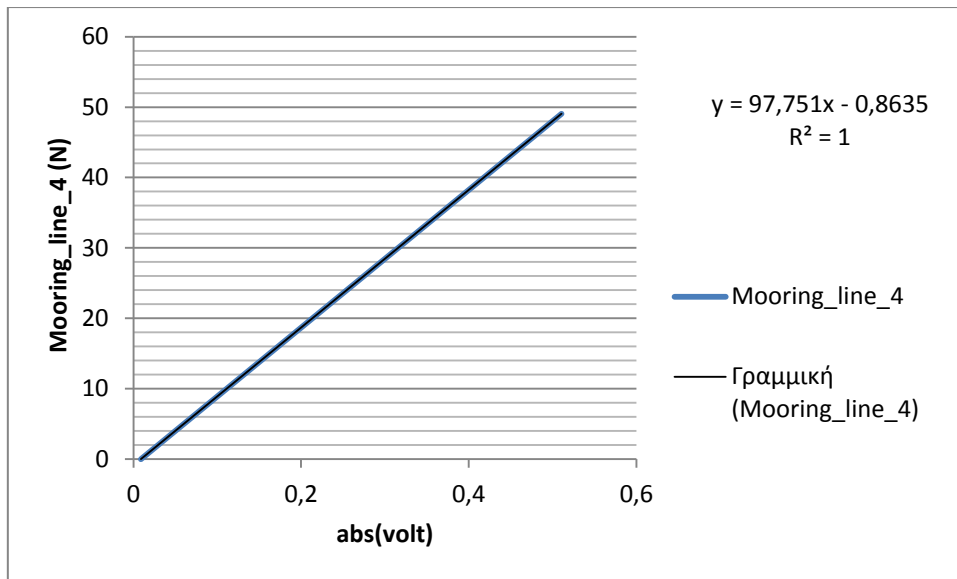
Οπότε η σχέση είναι η παρακάτω:

$$y = 97.931x - 0,3853$$

#### 4.4.6 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring 3

Πίνακας 4.8					
	grams	kg	1N=9,81kg	Mooring_line_1	abs
T1165	0	0	0	0,008834	0,008834
T1166	5000	5	49,05	0,510621	0,510621





**Σχήμα 4.3.4 Calibration για τη δύναμη TLP\_Mooring\_4**

Οπότε η σχέση είναι η παρακάτω:

$$y = 97.751x - 0,8635$$

Η περιστροφή έχει διατηρηθεί σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών, ανερχόμενη σε 38 rpm, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα περιστροφής 11 rpm σε πλήρη κλίμακα. Κατόπιν αυτού συνάγεται ότι ο συντελεστής μετάβασης από το μοντέλο σε πλήρη κλίμακα είναι 38/11 (δηλαδή για την προσομοίωση της δύναμης που ασκείται από τη μία περιστροφή σε πλήρη κλίμακα, το μοντέλο πρέπει να περιστραφεί κατά 38/11 φορές).

Μετά τη διεξαγωγή δοκιμών για την εύρεση της σχέσης μεταξύ ώθησης και περιστροφικής ταχύτητας σε κλίμακα μοντέλου, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- 1) Η ταχύτητα περιστροφής 32 rpm αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 5.0 m/s.
- 2) Η ταχύτητα περιστροφής 38 rpm αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 5.9 m/s.
- 3) Η ταχύτητα περιστροφής 42 rpm αντιστοιχεί σε ταχύτητα ανέμου 6.5 m/s.

#### **4.5 Πειραματική διαδικασία**

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να προσομοιωθούν τρεις βασικές μετεωρολογικές συνθήκες.

- 1) Εξετάστηκε η δυναμική συμπεριφορά της πλωτής κατασκευής χωρίς περιστροφή της ανεμογεννήτριας, δηλαδή χωρίς την επίδραση του ανέμου αλλά μόνο των κυμάτων.
- 2) Πραγματοποιήθηκε μία σειρά πειραμάτων που συνίσταντο στο συνδυασμό της επίδρασης των κυμάτων και της περιστροφής πάνω στα μοντέλα.

3) Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση στις εξέδρες υπό εξαιρετικά ακραίες συνθήκες κυματισμού (1/50 χρόνια), χωρίς περιστροφή.

#### 4.6 Πρόγραμμα δοκιμών

Στον πίνακα 4.9 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί των μεταβλητών του κάθε πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά και τους δύο τύπους ανεμογεννητριών, έλαβε χώρα μία σειρά πειραμάτων. Η πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε αφορούσε στο εάν τα κύματα ήταν απλοί ή τυχαίοι κυματισμοί. Εν συνεχεία, η δεύτερη και η τρίτη παράμετρος σχετίζονταν με τα χαρακτηριστικά του κύματος (ύψος και περίοδος), ενώ ως τέταρτη παράμετρος ελήφθησαν υπόψη τα στοιχεία που προκύπτουν όταν η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία ή όχι (Μαυράκος, 2012).

Πίνακας 4.9									
H [cm]	[s]	REG/IRR	[deg]		Rotation		Model		
2.5	1.6	REG	0	20	NR	R	TLP	SB	
3.9	2.0		0	20	NR	R	TLP	SB	
4.5	2.4		0	20	NR	R	TLP	SB	
10	1.8		0	20	NR	R	TLP	SB	
15			0	20	NR	R	TLP	SB	
20			0	20	NR	R	TLP	SB	
25			0	20	NR	R(0 <sup>0</sup> )		SB	
15	2.0		0	20	NR	R	TLP	SB	
15	2.4		0	20	NR	R	TLP	SB	
30	2.0		0	20	NR	R(0 <sup>0</sup> )		SB	
30	2.4		0	20	NR	R(0 <sup>0</sup> )		SB	
10	1.6		IRR	0	20	NR	R	TLP	SB
15	1.6			0	20	NR	R(0 <sup>0</sup> )	TLP	SB
20	2.0			0	20	NR	R		SB

#### 4.7 Αναγωγή με βάση το συντελεστή κλίμακας ( $\lambda$ )

Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε τις αναγωγές με βάση το συντελεστή κλίμακας, από τα μοντέλα του πειράματος στις πραγματικές κατασκευές. Οι αναγωγές γίνονται στα μήκη, τις μάζες, τους όγκους και τις ροπές, και για τους δύο τύπους ανεμογεννητριών.

Πιο συγκεκριμένα, η αναγωγή των χαρακτηριστικών που μετρώνται σε μέτρα (m) του μοντέλου (π.χ., μήκος, ακτίνα) στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πλήρους μοντέλου, επίσης σε μέτρα (m), λαμβάνει χώρα με τον πολλαπλασιασμό του συντελεστή κλίμακας ( $\lambda$ ). Η αναγωγή επιφανειών και όγκων με αντίστοιχες μονάδες μέτρησης  $m^2$  και  $m^3$  πραγματοποιείται με πολλαπλασιασμό της επιφάνειας του μοντέλου με το τετράγωνο του συντελεστή κλίμακας ( $\lambda^2$ ) και του κύβου ( $\lambda^3$ ) του συντελεστή κλίμακας με τον όγκο του μοντέλου.

Επίσης παρατίθενται τα χαρακτηριστικά που με μονάδα μέτρησης το kg ανάγονται στο πραγματικό μοντέλο με πολλαπλασιασμό της τιμής του αντίστοιχου χαρακτηριστικού με τον κύβο ( $\lambda^3$ ) του συντελεστή κλίμακας επί την τιμή 1.025. Το 1.025 πολλαπλασιάζεται και στην περίπτωση της πυκνότητας των υλικών (η οποία μετράται σε kg/m) αλλά και της ροπής αδράνειας (με μονάδες kg\*m).

<b>Πίνακας 4.10 Χαρακτηριστικά μοντέλου TLP με αναγωγή κλίμακας</b>			
	Scaled model	Scale factor	Full scale
Διάμετρος πλατφόρμας	0.45 m	* $\lambda$	18 m
Βύθισμα (Draft)	1.1973 m	* $\lambda$	47.89 m
Radius to fairleads anchor	0.675 m	* $\lambda$	27 m
Depth to fairleads anchor	1.1973 m	* $\lambda$	47.89 m
CM location below still water level	1.0153 m	* $\lambda$	40.61 m
Tower height (hub level)	2.25 m	* $\lambda$	90 m
Tower mass	5.2973 kg	*1.025 * $\lambda^3$	347500 kg
Mass (floating system) including ballast	131.0976 kg	*1.025 * $\lambda^3$	8600000 kg
Water displacement	0.1903 m <sup>3</sup>	* $\lambda^3$	= $\pi*r^2*draft$ =12180 m <sup>3</sup>
Roll inertia about CM_z	5.4459 kg*m <sup>2</sup>	*1.025 * $\lambda^5$	5.72 10 <sup>8</sup> kg*m <sup>2</sup>
Unstretched line length	3.7925 m	$\lambda$	151.7 m
Line diameter	0.0032 m	$\lambda$	0.127 m
Line mass density	0.0707 kg/m	*1.025 * $\lambda^2$	116 m

<b>Πίνακας 4.11 Μάζες τμημάτων του TLP</b>			
	Scaled model	Scale factor	Full scale
Rotor mass	1.6768 kg	$\lambda^3 * 1.025$	110000 kg
Nacelle mass	3.6585 kg	$\lambda^3 * 1.025$	240000 kg
Tower mass	5.2973 kg	$\lambda^3 * 1.025$	347500 kg
Mass (floating system) including ballast	131.0976 kg	$\lambda^3 * 1.025$	8600000 kg
TOTAL MASS	141.7302 kg	$\lambda^3 * 1.025$	9297500 kg
Water displacement	0.1903 m <sup>3</sup>	$*\lambda^3$	12180 m <sup>3</sup>
Buoyance (=water displacement * water density)	190.3125 kg	$\lambda^3 * 1.025$	12484500 kg
Line tension (=Buoyance-Total Mass)/4	12.1456 kg	$\lambda^3 * 1.025$	796750 kg

<b>Πίνακας 4.12 Χαρακτηριστικά μοντέλου SB με αναγωγή κλίμακας</b>			
	Scaled model	Scale factor	Full scale
Platform Diameter Below Taper	0.235 m	$*\lambda$	9.4 m
Depth to the platform base below SWL	3 m	$*\lambda$	120 m
Platform Diameter Above Taper	0.1625 m	$*\lambda$	6.5 m
Depth to Top of Taper below SWL	0.1 m	$*\lambda$	4 m
Depth to Bottom of Taper below SWL	0.3 m	$*\lambda$	12 m
Tower height	2.2125 m	$*\lambda$	88.5 m

Hub level	2.25 m	* $\lambda$	90 m
Hub diameter	0.075 m	* $\lambda$	3 m
Tower Mass	5.2973 kg	*1.025 * $\lambda^3$	347500 kg
Radius to fairleads	0.235 m	* $\lambda$	9.4 m
Radius to anchors	21.3475	* $\lambda$	853.9 m
Depth to fairleads	1.75 m	* $\lambda$	70 m
Depth to anchors	8 m	* $\lambda$	320 m
CM location below SWL	2.2479 m	* $\lambda$	89.9155 m
Roll inertia about CM_z	40.2915 kg*m <sup>2</sup>	*1.025 * $\lambda^5$	4.23 10 <sup>9</sup> kg*m <sup>2</sup>
Water displacement	0.1255 m <sup>3</sup>	* $\lambda^3$	8029 m <sup>3</sup>
Mass (floating system) including ballast	113.8160 kg	*1.025* $\lambda^3$	7466330 kg
Unstretched line length	22.555 m	$\lambda$	902.2 m
Line diameter	0.0023 m	$\lambda$	0.09 m
Line mass density	0.0474 kg/m	*1.025 * $\lambda^2$	77.71 m
Angle between adjacent lines	120 deg	* $\lambda^0$	120 deg

**Πίνακας 4.13 Μάζες τμημάτων του SB**

	Scaled model	Scale factor	Full scale
Rotor mass	1.6768 kg	$\lambda^3*1.025$	110000 kg
Nacelle mass	3.6585 kg	$\lambda^3*1.025$	240000 kg
Tower mass	5.2973 kg	$\lambda^3*1.025$	347500 kg

Mass (floating system) including ballast	113.816 kg	$\lambda^3 * 1.025$	7466330 kg
TOTAL MASS	124.4486 kg	$\lambda^3 * 1.025$	8163830 kg
Water displacement	0.1255 m <sup>3</sup>	$*\lambda^3$	8029 m <sup>3</sup>
Buoyance (=water displacement * water density)	125.4531 kg	$\lambda^3 * 1.025$	8229725 kg
Buoyance –Total Mass	1.0045 kg	$\lambda^3 * 1.025$	65895 kg
Line Mass density	0.0474 kg/m	$*1.025 * \lambda^2$	77.71
Suspended line (=Buoyance-Total Mass)/Line mass/3	7.0663 m	$*\lambda$	282.6535 m

Τα δεδομένα που λαμβάνουμε από κάθε όργανο μέτρησης για κάθε πείραμα (δηλαδή για ίδιο ύψος κύματος και την ίδια περίοδο) δημιουργούν μία χρονοσειρά με σταθερό βήμα κάθε φορά. Πιο συγκεκριμένα, η χρονοσειρά παράγει δεδομένα κάθε 0.025 s.

#### 4.8 Παρουσίαση χρονοσειρών

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στα πειράματα είναι οι εξής:

1. Αν ο κυματισμός είναι απλός ή τυχαίος (regular ή irregular).
2. Περιστροφή ή όχι της τουρμπίνας της ανεμογεννήτριας (Rotation ή No Rotation).
3. Γωνία πρόσπτωσης του κύματος στην ανεμογεννήτρια 0 μοίρες ή 20 μοίρες.
4. Διάφοροι συνδυασμοί χαρακτηριστικών του αρχικού κυματισμού που δίνει η γεννήτρια κύματος και όχι του πραγματικού κυματισμού που μετρούν τα 11 όργανα, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο (συνδυασμός ύψους και περιόδου κύματος).

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, οι πρώτοι 11 μετρητές (σε συγκεκριμένη διάταξη) μετρούν το ύψος κύματος, οι επόμενοι έξι αναφέρονται στις έξι δυνάμεις (δυνάμεις surge sway και heave και τις ροπές roll pitch και yaw) στη βάση της ανεμογεννήτριας, ενώ οι επόμενοι τέσσερις στις τέσσερις δυνάμεις (surge και sway και τις ροπές roll και pitch) στην κορυφή της ανεμογεννήτριας.

Οι επόμενες τέσσερις αφορούσαν τις 4 δυνάμεις στις γραμμές προέντασης για την TLP και τρεις για τη SB. Υπήρχαν τρία όργανα μέτρησης επιτάχυνσης, ένα όργανο

μέτρησης περιστροφής και δύο μετρητές πίεσης. Επιπλέον, υπήρχαν έξι μετρητές κίνησης (σε m) και περιστροφής (σε μοίρες), ενώ, τέλος, σε κάποια πειράματα υπήρχαν και τρεις μετρητές ταχύτητας.





## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Εισαγωγή

Στο πείραμα, εκτός από τις περιπτώσεις των απλών αρμονικών κυματισμών, έλαβε χώρα και μία σειρά από τυχαίους κυματισμούς, δηλαδή στοχαστικά κύματα (μη προβλέψιμα). Ουσιαστικά, για την παραγωγή των τυχαίων κυματισμών πραγματοποιείται μία υπέρθεση πολλών απλών γραμμικών κυματισμών. Εμείς από την πλευρά μας, μεταβάλλουμε τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε απλού κύματος στο πείραμα για να προσομοιώσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα τα στοχαστικά κύματα.

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την επεξεργασία αυτών των δεδομένων. Οι βασικές παράμετροι των πειραμάτων είναι και σε αυτή την περίπτωση τα δύο μοντέλα (SB και TLP), η περιστροφή ή όχι της έλικας και η γωνία πρόσπτωσης (0 και 20 μοίρες).

### 5.2 Στατιστική ανάλυση και ενεργειακά φάσματα

Οι ανεμογενείς κυματισμοί είναι στοχαστικά μεγέθη που ακολουθούν συγκεκριμένους πιθανολογικούς νόμους κατανομής. Οι ανά χρονικές στιγμές  $\Delta(t)$  τιμές της στάθμης  $h(t)$  συνιστούν στοχαστικό φαινόμενο που ακολουθεί την κατανομή Gauss.

Τα  $H_i$  τα οποία είναι οι μέγιστες διαφορές στάθμης μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μηδενικής προς τα άνω διάβασης, είναι και αυτά στοχαστικά μεγέθη και ακολουθούν τη Reyleigh κατανομή (Κουτίτας, 1998).

#### 5.2.1 Κατανομή Reyleigh

Η κατανομή που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των τυχαίων κυματισμών είναι η κατανομή Reyleigh. Για την κατανομή Reyleigh ισχύουν τα εξής (Lars Bergdahl, 2009 και D.J.T. CARTER, 1982):

Η πιθανότητα μία τυχαία μεταβλητή  $H_i$  (η οποία αναφέρεται σε ένα τυχαίο ύψος κύματος) να είναι μεγαλύτερη μιας τιμής  $H$ , δίνεται από τον τύπο:

$$P(H_i \geq H) = e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (5.1)$$

Όπου  $H_{rms}$  η μέση τετραγωνική τιμή ύψους κύματος, και η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum H_i^2}{N}}$$

Η συνάρτηση κατανομής δίνεται από τη σχέση:

$$P(H_i \leq H) = 1 - P(H_i \geq H) = 1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (5.2)$$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (η οποία ευρίσκεται με την παραγωγή της συνάρτησης κατανομής), δηλαδή η πιθανότητα η τιμή  $H$  να βρίσκεται μεταξύ του  $H - \delta H$  και του  $H + \delta H$ , είναι (Κουτίτας, 1998):

$$p(H - \delta H \leq H \leq H + \delta H) = \frac{d(P(H_i \leq H))}{dH} = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Χαρακτηριστικά ύψη κύματος που παρατηρούνται στην κατανομή Reyleigh

Το μέσο ύψος κύματος δίνεται από τη σχέση (Κουτίτας, 1998):

$$\bar{H} = H_{100} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} H_{rms} \quad (5.4)$$

Σημαντικό ύψος κύματος είναι η μέση τιμή του ανώτερου 33% των υψών κυμάτων. Η τιμή  $H_s$  (σημαντικό ύψος κύματος) χρησιμοποιείται συχνά γιατί συμπίπτει με την τιμή ύψους κύματος που δίνει ένας ναυτικός κατόπιν της οπτικής παρατήρησης της θάλασσας και η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_s = H_{33} = \sqrt{2} H_{rms} \quad (5.5)$$

Μέγιστο πιθανό ύψος κύματος: Σε δείγμα  $N$  τιμών  $H$ , πρόκειται για το ύψος  $H$  με πιθανότητα υπέρβασης  $1/N$ , βρίσκεται από την κατανομή Reyleigh και ισούται με (Κουτίτας, 1998):

$$H_{max} = H_{rms} \sqrt{\ln N} \quad (5.6)$$

### 5.2.3 Συσχέτιση πληροφοριών από καταγραφές

Στη συνέχεια παραθέτουμε τις ποσότητες που μπορούμε να υπολογίσουμε από μία χρονοσειρά που μετρά τη διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας.

Τυπική απόκλιση της χρονοσειράς της ελεύθερης επιφάνειας (Κουτίτας, 1998):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum n_i^2}{N}} \quad (5.7)$$

Δυναμική ενέργεια κύματος

$$E_{\delta} = \frac{1}{T_L} \int_{\theta}^{T_L} \rho g \eta \left( \frac{\eta}{2} \right) dt = \rho g \frac{\sigma^2}{2} \quad (5.8)$$

Μηχανική ενέργεια κύματος

$$E = 2 E_{\delta} = \rho g \sigma^2 \quad (5.9)$$

ή

Μηχανική ενέργεια κύματος

$$E = \frac{\rho g \sum_{i=1}^N \frac{H_i^2}{N}}{8} = \rho g \frac{H_{rms}^2}{8} = \rho g \frac{H_s^2}{16} \quad (5.10)$$

Ένα άμεσο αποτέλεσμα (με εξίσωση των δύο σχέσεων για τη μηχανική ενέργεια) που προκύπτει από τις σχέσεις 5.8 και 5.9 για την τυπική απόκλιση της χρονοσειράς της ελεύθερης επιφάνειας με το σημαντικό ύψος κύματος, είναι:

$$\rho g \sigma^2 = \rho g \frac{H_s^2}{16} \quad \text{ή} \quad H_s = 4\sigma \quad (5.11 \text{ a})$$

Η σχέση 5.11 a μέσω της 5.5 δίνει :

$$H_{rms} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma \quad (5.11 \text{ b})$$

#### 5.2.4 Κατανομή των ακραίων τιμών του ύψους κύματος

Οι ακραίες τιμές ύψους κύματος, όπως π.χ., τα σημαντικά ύψη από μια σειρά Μ όπου καταγράφονται κυματισμοί  $H_{s_1}, H_{s_2}, \dots, H_{s_M}$  κατά τη διάρκεια μιας μακράς περιόδου, αποτελούν στοχαστική μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Weibull με γενική μορφή (Κουτίτας, 1998):

$$P(H_i \geq H_s) = e^{-\left(\frac{H_s-c}{\alpha}\right)^b} \quad (5.12)$$

Για  $c=0$  και  $b=1$ , η σχέση για την πιθανότητα υπέρβασης γίνεται μονοπαραμετρική

$$P(H_i \geq H_s) = e^{-\frac{H_s}{\alpha}} \quad \text{ή} \quad \ln(P(H_i \geq H_s)) = -\frac{H_s}{\alpha} \quad (5.13)$$

Η αντίστοιχη συνάρτηση κατανομής ισούται με:

$$P(H_i \leq H_s) = 1 - P(H_i \geq H_s) = 1 - e^{-\left(\frac{H_s-c}{\alpha}\right)^b} \quad (5.14)$$

#### 5.2.5 Φάσματα που χρησιμοποιούνται στην παράκτια Μηχανική

Τα ενεργειακά φάσματα ορίζονται ως οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν την κατανομή της  $E(\omega)$ , δηλαδή το πώς είναι κατανεμημένη η περιεχόμενη μηχανική ενέργεια στις διάφορες συχνότητες που περιέχονται σε έναν σύνθετο κυματισμό (Mackay 2011).

### 5.2.5.1 Φάσμα JONSWAP

Τα φάσματα αυτά κατασκευάστηκαν χάρη σε εκτεταμένες μετρήσεις και αναλύσεις στη Βόρεια θάλασσα

$$E(f) = ag^2(2\pi)^{-4}f^{-5}\exp\left[-1.25\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right]\gamma\exp\left(\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2f_p^2}\right) \quad (5.15)$$

$$\alpha = \frac{0.076}{\left(g\frac{F}{U_{10}^2}\right)^{0.22}} \quad (5.16)$$

$$f_p = \frac{3.5g}{U_{10}\left(g\frac{F}{U_{10}^2}\right)^{0.33}} \quad (5.17)$$

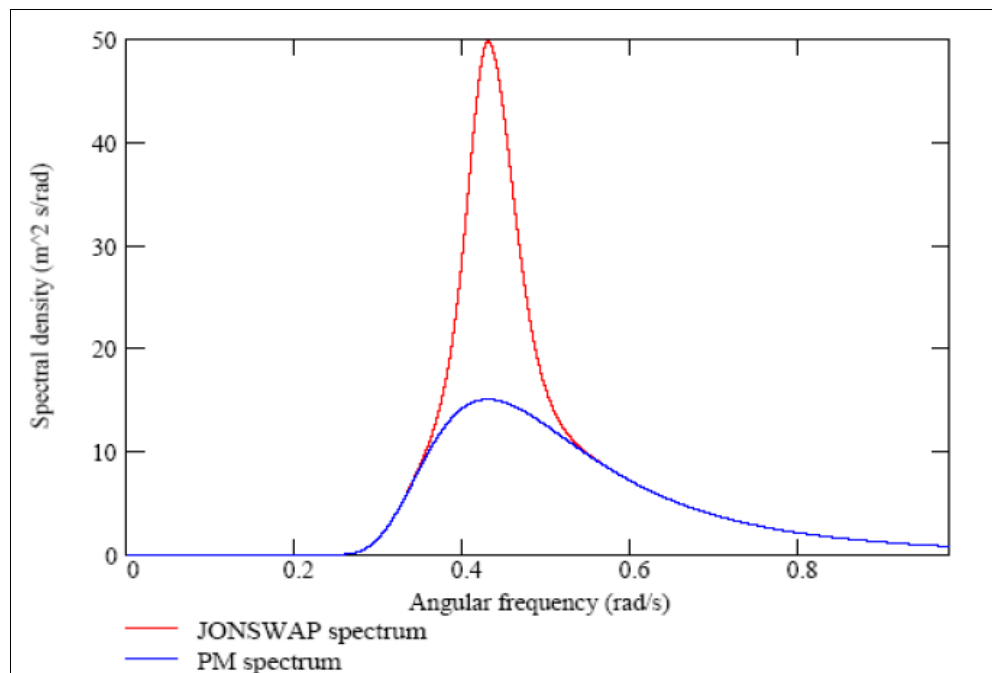
### 5.2.5.2 Φάσμα P-M (Pierson-Moskowitz)

Τα φάσματα αυτού του τύπου αφορούν πλήρως ανεπτυγμένους κυματισμούς, όπου ουσιαστικά η διάρκεια πνοής του ανέμου  $t_D$  και το μήκος αναπτύγματος  $F$  είναι απεριόριστα (Pierson 1964).

$$E(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4f^5}\exp\left[-5\left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \quad (5.18)$$

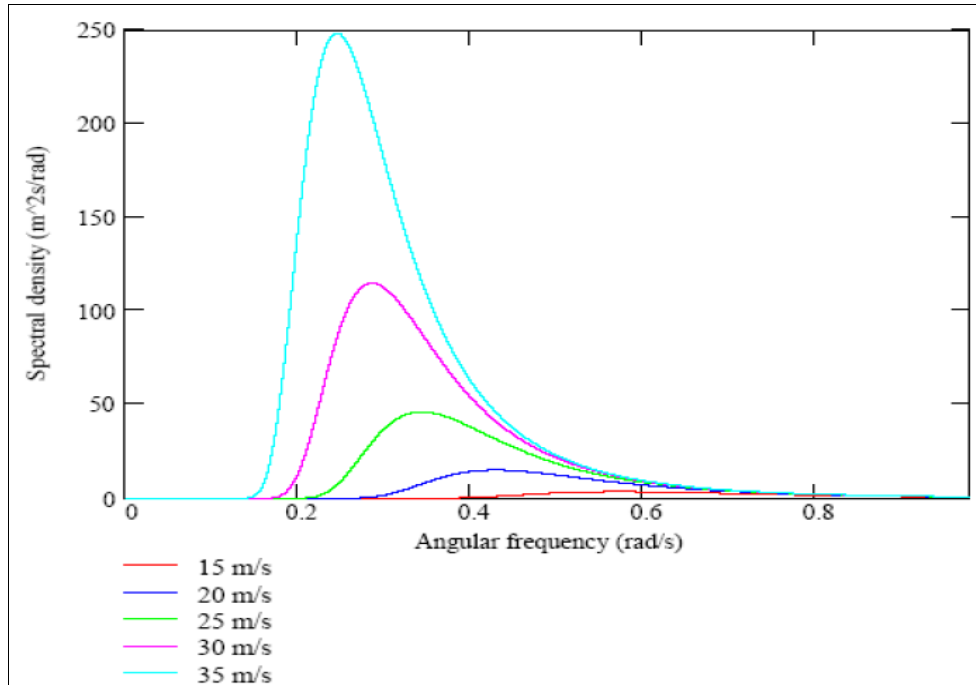
$$f_p = \frac{0.7916g}{2\pi U_{10}} \quad (5.19)$$

Στο Σχήμα 5.2.1 παραθέτουμε μια ενδεικτική μορφολογία ενεργειακών φασμάτων για τα δύο είδη φάσματος



**Εικόνα 5.2.1 Μορφολογία ενεργειακών φασμάτων JONSWAP και P-M (Πηγή: Bergdahl, 2009)**

Η εξέλιξη ενός ενεργειακού φάσματος με τη συνεχιζόμενη πνοή ανέμου, μορφολογικά περιγράφεται στο σχήμα 5.2.2, απ' όπου φαίνεται η μεταφορά ενέργειας από τις υψηλότερες συχνότητες στις χαμηλότερες με την πάροδο του χρόνου (αύξηση του ύψους κύματος και της περιόδου)  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$



**Εικόνα 5.2.2** Εξέλιξη του ενεργειακού φάσματος για διάφορες ταχύτητες του ανέμου (Πηγή: Bergdahl, 2009)

### 5.2.5.3 Φάσμα Bretschneider

Το φάσμα Bretschneider μπορεί να γραφεί σε αδιάστατη μορφή, με τη βοήθεια της μέγιστης τιμής της φραστικής πυκνότητας. Το φάσμα Bretschneider (με δύο παραμέτρους) δίνεται από τη σχέση (Bretschneider, 1959):

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^5 \frac{\left( \overline{H}^{1/3} \right)^2}{\omega_p} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right\} \quad (5.20)$$

όπου

$\omega_p$  είναι η συχνότητα κορυφής,

$\overline{H}^{1/3} = H_s = 4\sqrt{m_o}$  είναι το (φασματικό) σημαντικό ύψος κύματος.

$T_p = 2\pi / \omega_p$  η περίοδος κορυφής του φάσματος

Θέτοντας  $\omega = \omega_p$  στον τύπο του φάσματος Bretschneider θα έχουμε το φάσμα

Bretschneider συχνότητας κορυφής, δηλαδή:

$$S(\omega_p) = \frac{5}{16} \frac{\left(\bar{H}_{1/3}\right)^2}{\omega_p} \exp\left(-\frac{5}{4}\right) \quad (5.21)$$

Το φάσμα μπορεί να καταστεί αδιάστατο διαιρώντας το γενικό τύπο του φάσματος BretSchneider με το φάσμα Bretschneider συχνότητας. Κατόπιν αυτού, ουσιαστικά προκύπτει το φάσμα οποιασδήποτε συχνότητας ( $\omega$ ). Ως προς τη μέγιστη συχνότητα  $\omega_p$  σε ποσοστό, με μέγιστο τη μονάδα, είναι:

$$\frac{S(\omega)}{S(\omega_p)} = \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \exp\left\{\frac{5}{4}\left(1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right)\right\} \quad (5.22)$$

Επιπλέον, το φάσμα BretSchneider μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή σύνθετων καταστάσεων θάλασσας. Έτσι το εν λόγω φάσμα ορίζεται με τη βοήθεια δύο παραμέτρων, π.χ. της (κυκλικής) συχνότητας κορυφής  $\omega_p$  και του σημαντικού κύματος  $H^{1/3}$ , και δίνεται από τη σχέση:

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \frac{\left(\bar{H}_{1/3}\right)^2}{\omega_p} \exp\left\{-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right\} \quad (5.23)$$

Εφαρμόζεται σε θάλασσες που αποσβένονται και έχει μία κορυφή (unimodal). Εν ολίγοις, πρόκειται για φάσμα στενής λωρίδας όπου η ενέργεια συγκεντρώνεται γύρω από μία συχνότητα, τη συχνότητα κορυφής  $\omega_p$ .

Η περίοδος κορυφής του φάσματος ορίζεται από τη σχέση:  $T = \frac{2\pi}{\omega_p}$

Συνεπώς, το φάσμα BretSchneider δεν είναι κατάλληλο για την περιγραφή σύνθετων καταστάσεων, μιας και για να περιγραφούν οι συγκεκριμένες καταστάσεις χρειάζονται δύο κορυφές, άρα και δύο κεντρικές συχνότητες, ενώ το φάσμα BretSchneider παρουσιάζει μόνο μία.

### 5.2.6 Σύνδεση πεδίο χρόνου με πεδίο συχνοτήτων

Ισχύει η ακόλουθη υδροδυναμική σχέση στο πεδίο του χρόνου

$$\left(\tilde{M} + A(\omega)\ddot{\tilde{\xi}}(t)\right) + B(\omega)\dot{\tilde{\xi}}(t) + C\tilde{\xi}(t) = \tilde{F}(\omega)e^{j\omega t} \quad (5.24)$$

όπου:

$\tilde{M}$  είναι ο 6x6-πίνακας των αδρανειακών συντελεστών,

$\tilde{A}(\omega)$  είναι ο 6x6-πίνακας των πρόσθετων (υδροδυναμικών) αδρανειακών συντελεστών,

$\tilde{B}(\omega)$  είναι ο 6x6-πίνακας των (υδροδυναμικών) συντελεστών απόσβεσης,

$\tilde{C}$  είναι ο 6x6-πίνακας και των υδροστατικών συντελεστών, και

$\tilde{F}(\omega)$  είναι 6x1-πίνακας, με στοιχεία τις υδροδυναμικές φορτίσεις (δυνάμεις και ροπές) που αναπτύσσονται πάνω στο πλωτό μέσο λόγω των προσπιπτόντων κυματισμών.

Οι υδροδυναμικής προέλευσης συντελεστές  $\tilde{A}(\omega)$ ,  $\tilde{B}(\omega)$ , και  $\tilde{F}(\omega)$  εξαρτώνται από τη συχνότητα ταλάντωσης  $\omega$  της κατασκευής (συχνότητα συνάντησης). Έτσι, με την παρούσα μορφή ισχύουν μόνο στο πεδίο συχνοτήτων και όχι στο πεδίο του χρόνου (Mazarakos, T., P., et al. 2014a, 2014b, 2015).

### 5.3 Ανάλυση πειράματος TLP\_00\_NR

Στην περίπτωση μας εδώ (IRREGULAR WAVES), πραγματοποιήθηκαν 34 πειράματα για τους δύο τύπους πλωτών ανεμογεννητριών, με παραμέτρους την περιστροφή ή όχι της έλικας και της γωνίας πρόσπτωσης 0 και 20 μοίρες. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα μοντέλο δημιουργήθηκαν δεδομένα από πειράματα για έκαστο συνδυασμό που προέκυψε από τις δύο παραμέτρους (πρώτον 0 μοίρες χωρίς περιστροφή της έλικας, δεύτερον 20 μοίρες χωρίς περιστροφή, τρίτον 0 μοίρες με περιστροφή της έλικας και τέταρτον 20 μοίρες με περιστροφή), με κάθε συνδυασμό να περιλαμβάνει τουλάχιστον τρία πειράματα.

Στη παρούσα (όπως και στην επόμενη) ενότητα θα ακολουθήσουμε την εξής διαδικασία για την ανάλυση των τυχαίων κυματισμών:

Αρχικά θα παραθέσουμε σε γραφήματα τις χρονοσειρές από τα δεδομένα για κάθε όργανο μέτρησης με την αντίστοιχη μέση τιμή. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε το ιστόγραμμα για κάθε χρονοσειρά και τον πίνακα με τα στατιστικά δεδομένα, όπως το συντελεστή κύρτωσης, το συντελεστή ασυμμετρίας, καθώς και το στατιστικό μη παραμετρικό έλεγχο για την κανονικότητα των δεδομένων από κάθε χρονοσειρά. Στο επόμενο βήμα θα εξεταστεί (μέσω γραφημάτων) η στασιμότητα της κάθε χρονοσειράς και θα παρουσιάσουμε τα αντίστοιχα φάσματα. Τέλος, θα παραθέσουμε σε σχήματα τις τιμές για το σημαντικό ύψος, αναφορικά με διάφορα ποσοστά.

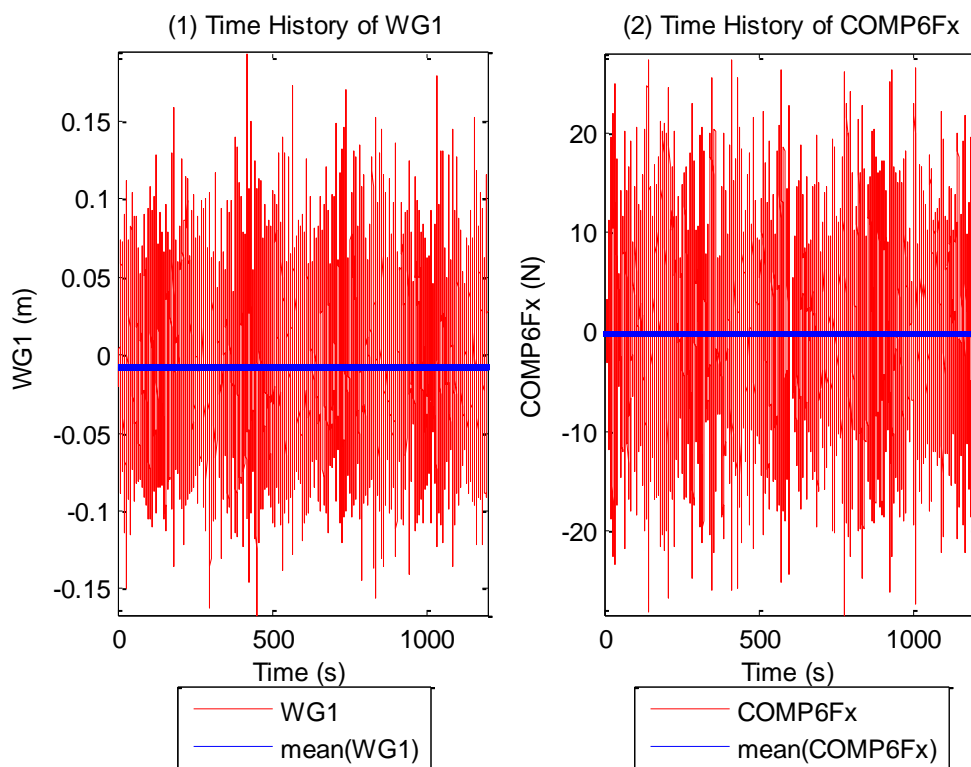
#### 5.3.1 Παρουσίαση χρονοσειρών T1239+T1240\_1.6\_0.1\_TLP\_00\_NR

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουμε τις χρονοσειρές (με κόκκινο χρώμα) που προκύπτουν από κάθε όργανο μέτρησης, παρατηρώντας έτσι την εξέλιξή τους

μέσα στο χρόνο. Επίσης, με την ευθεία μπλε γραμμή στα ίδια σχήματα παραθέτουμε την αντίστοιχη μέση τιμή για κάθε χρονοσειρά.

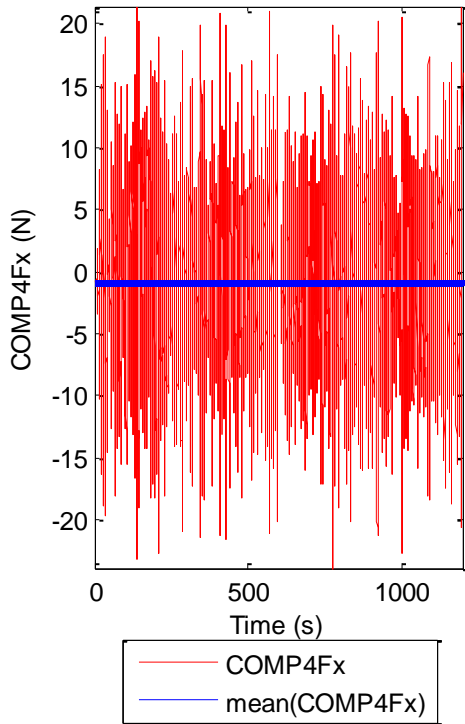
Για τα ίδια χαρακτηριστικά του κυματισμού και εξαιτίας του μεγάλου αριθμού δεδομένων, στα περισσότερα IRREGULAR πειράματα παρήχθησαν δύο αρχεία txt. Έτσι, στο παρόν πείραμα έχουμε την πρώτη σειρά δεδομένων T1239 και την αμέσως επόμενη T1240\_b (όπου το b σημαίνει ότι είναι το δεύτερο στη σειρά). Επειδή και το δεύτερο πείραμα ξεκινά από το μηδέν, την πρώτη στήλη του χρόνου την αντικαθιστούμε με τον πίνακα I μιας στήλης και ορίζουμε ο αριθμός των σειρών να συμπίπτει με τον αριθμό των σειρών του πίνακα C.

```
A=load('T1239.txt');
B=load('T1240.txt');
A=A(:, [2:end]);
B=B(:, [2:end]);
C=[A;B];
[n,m]=size(C);
I=[1:n]';
C=[I C];
save('C1.txt','C','-ascii')
```

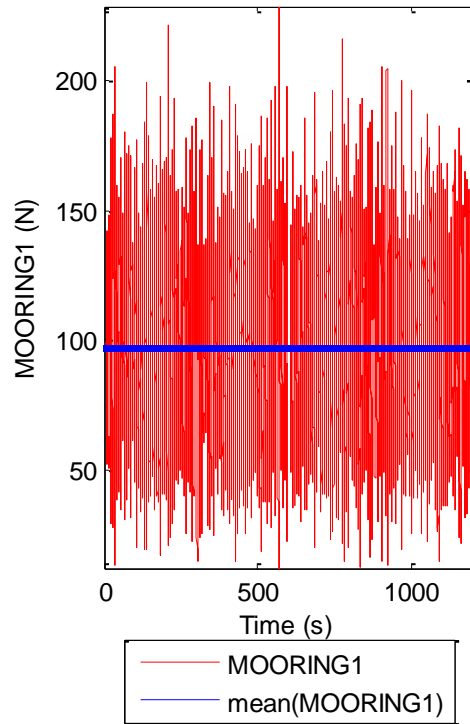




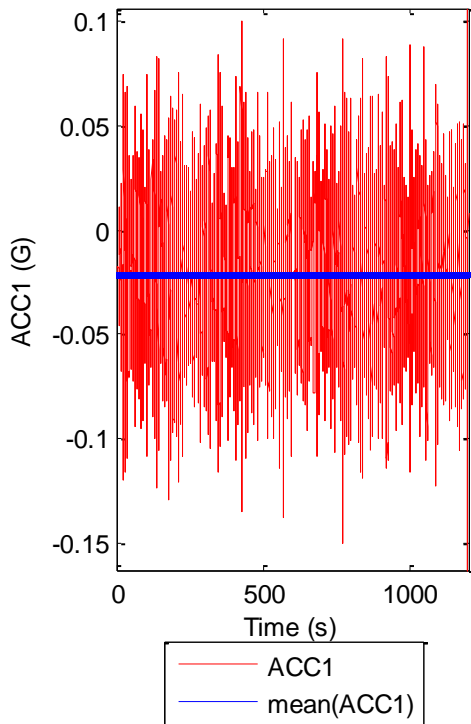
(3) Time History of COMP4Fx



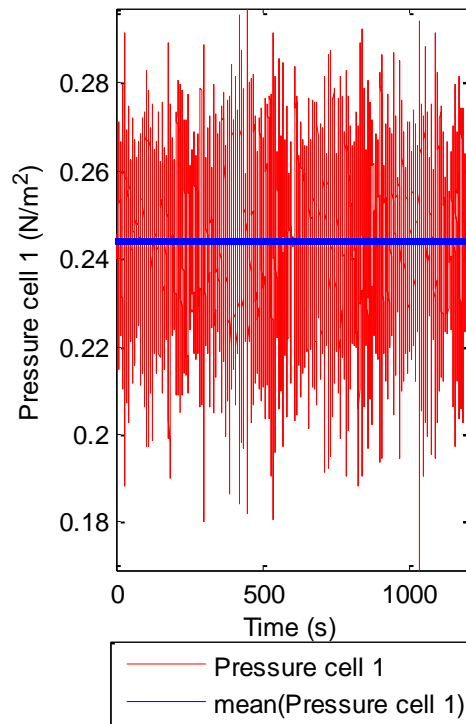
(4) Time History of MOORING1

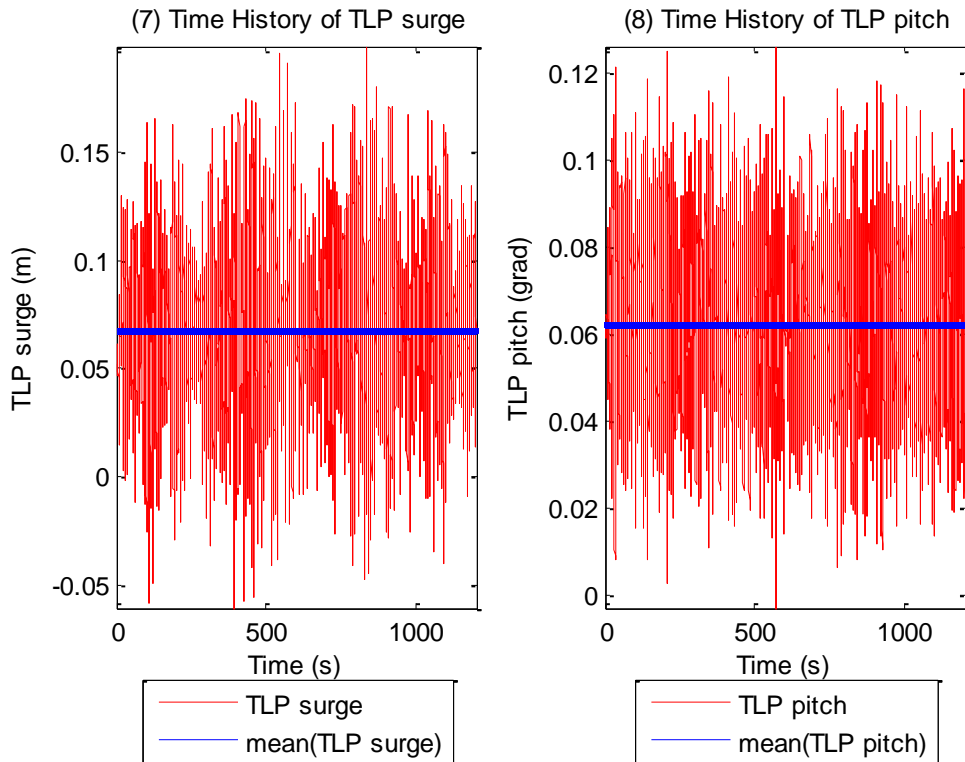


(5) Time History of ACC1



(6) Time History of Pressure cell 1





**Σχήματα 5.3.1 (1-8)** Χρονοσειρές (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός (Pressure 1) από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις χρονοσειρές για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.3.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.3.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.3.1) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.3.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.3.1) (5), για το ένα από τα δύο όργανα πίεσης (Σχήμα 5.3.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.3.1) (7-8).

Από τα σχήματα φαίνεται η μη επανάληψη μιας σταθερής κυματομορφής που είχαμε κατά την ανάλυση των γραμμικών κυματισμών, και χωρίς την εμφάνιση κάποιας τάσης. Τα δύο αυτά αποτελέσματα είναι οι δύο ελάχιστες προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί μια χρονοσειρά στάσιμη.

### 5.3.2 Παρουσίαση Στατιστικών αποτελεσμάτων TLP\_00\_NR

Τα χαρακτηριστικά του πειράματος παρατίθενται στον πίνακα 5.1.

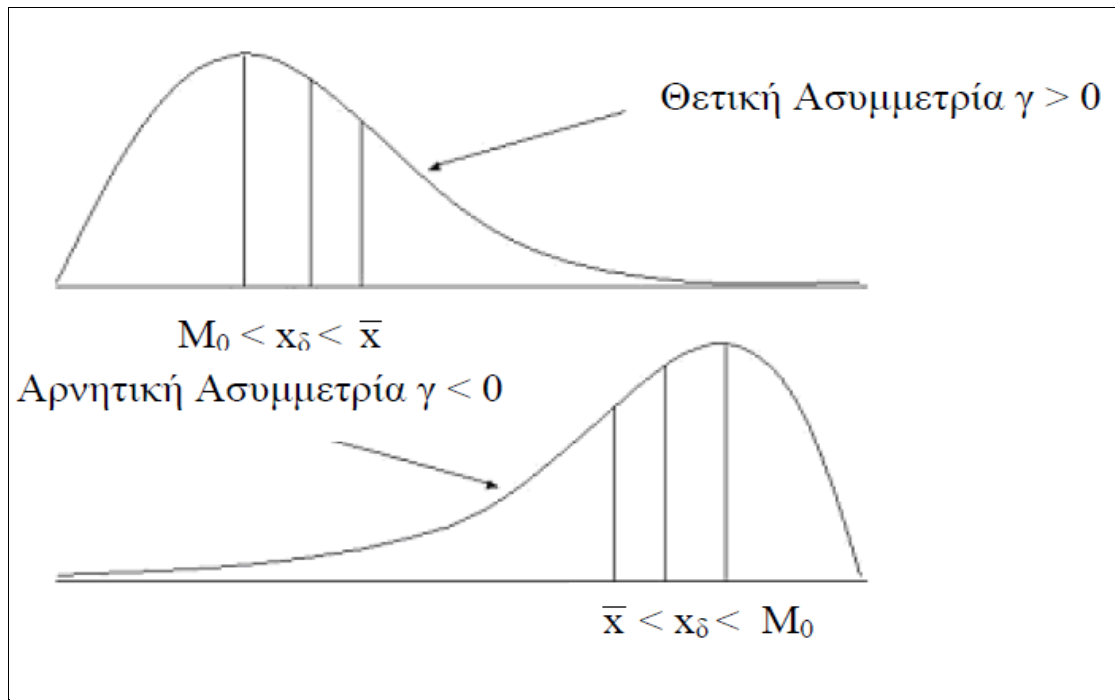
<b>Πίνακας 5.1</b>	<b>Χαρακτηριστικά Πειράματος</b>
Τύπος μοντέλου	TLP
Ύψος κύματος (m)	0.100
Περίοδος κύματος (s)	1.6
Τύπος κύματος	IRREGULAR
Γωνία πρόσπτωσης κυμάτων (deg)	0
Περιστροφή η μη του Ρότορα	NO ROTATION

Στον πίνακα 5.2 παραθέτουμε τα στατιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή, καθώς επίσης και την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων του σημαντικού ύψους κύματος (σχέση 5.29). Στον πίνακα 5.3 υπάρχουν τα αποτελέσματα για το συντελεστή ασυμμετρίας, το συντελεστή κύρτωσης, καθώς και η τιμή P value από τον μη παραμετρικό έλεγχο κανονικότητας των δεδομένων, όπως και τα αποτελέσματα από τον έλεγχο μοναδιαίας ρίζας.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H_s^2} \quad (5.29)$$

Στη δεύτερη στήλη του πίνακα 5.3 παραθέτουμε το συντελεστή ασυμμετρίας για κάθε όργανο μέτρησης (και ορίζεται από τη σχέση 5.30). Μία κατανομή ενός πληθυσμού όπου η κορυφή, η διάμεσος και η μέση τιμή συμπίπτουν, καλείται συμμετρική (Φουσκάκης, 2010). Στην περίπτωση κατά την οποία οι περισσότερες παρατηρήσεις, καθώς και η διάμεσος και η μέση τιμή βρίσκονται δεξιά της κορυφής, έχουμε τη θετική ασυμμετρία. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν τα δεδομένα βρίσκονται αριστερά, παρουσιάζουν αρνητική ασυμμετρία (Σχήμα 5.3.1.8).

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{\left\{ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right\}^3} \quad (5.30)$$



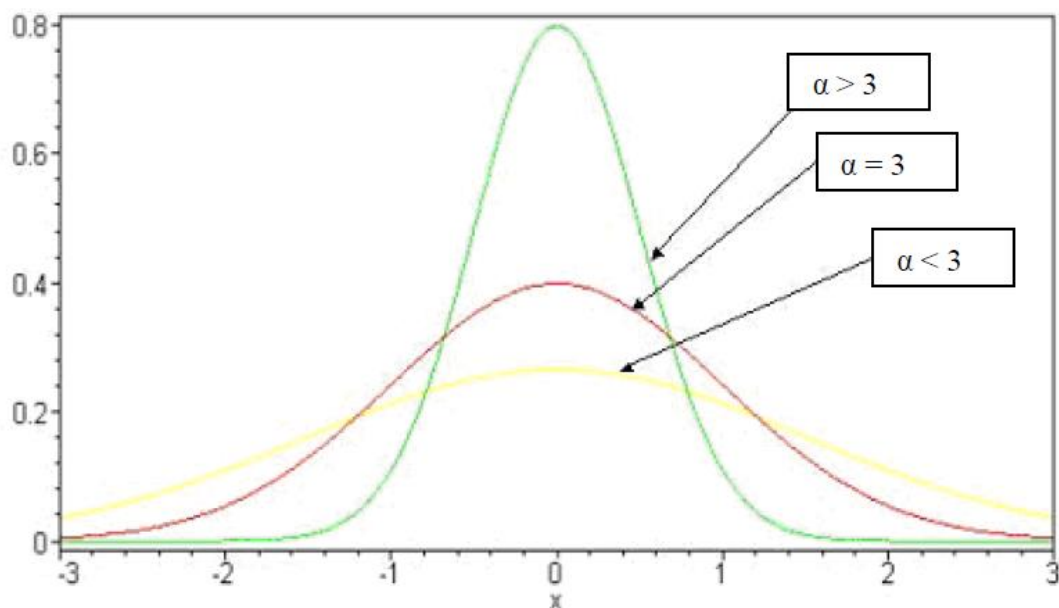
**Σχήμα 5.3.1.8** θετική και αρνητική ασυμμετρία [Πηγή: Φουσκάκης, 2010]

Στην τρίτη στήλη υπάρχουν τα αποτελέσματα από το συντελεστή κυρτότητας. Ένα μέτρο το οποίο εκφράζει το βαθμό κυρτότητας μιας κατανομής είναι ο συντελεστής κύρτωσης του Pearson (Φουσκάκης, 2010) και ορίζεται από τη σχέση

$$a = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{\left\{ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \right\}^4} \quad (5.31)$$

Η κατανομή που έχει σχετικά μεγάλη μέγιστη συχνότητα (κορυφή), άρα και μεγάλη συγκέντρωση τιμών γύρω από το μέσο, λέγεται λεπτόκυρτη, ενώ στην περίπτωση που η μέγιστη συχνότητά της είναι σχετικά μικρή, λέγεται πλατύκυρτη. Επίσης, οι κατανομές που προσεγγίζουν την κανονική κατανομή καλούνται μεσόκυρτες.

Έτσι, στο σχήμα 5.3.1.9 έχουμε μία αναπαράσταση για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις.



**Σχήμα 5.3.1.9 Κατανομές για διάφορες τιμές του συντελεστή  $\alpha$  [Πηγή: Φουσκάκης, 2010]**

Για να ελέγξουμε αν μία κατανομή μιας μεταβλητής είναι συμβατή με την κανονική κατανομή, εφαρμόζουμε το test Kolmogorov Smirnov, βάσει του οποίου ελέγχουμε τη μηδενική υπόθεση (όπου μηδενική υπόθεση είναι το ότι η υπό έλεγχο κατανομή δε διαφέρει από την κανονική) έναντι της εναλλακτικής υπόθεσης ότι διαφέρει. Ο έλεγχος αυτός είναι ένας μη παραμετρικός έλεγχος, αφού δε γνωρίζουμε τις παραμέτρους της κατανομής, καθώς και ποια κατανομή ακολουθούν. (Για περισσότερες πληροφορίες, Corder, G., 2009.) Έτσι, στην τέταρτη στήλη του πίνακα 5.3 αναγράφονται τα αποτελέσματα αυτού του ελέγχου για όλες τις κατανομές των δεδομένων από τα όργανα.

Οι πίνακες που προκύπτουν από το Matlab υπολογίζουν τις παραμέτρους για κάθε κατανομή αλλά κυρίως τη στατιστική συνάρτηση, βάσει της οποίας γίνεται ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης (αν το δείγμα ακολουθεί τη συγκεκριμένη κατανομή). Το αποτέλεσμα θα κριθεί από την τιμή, το ελάχιστο επίπεδο σημαντικότητας μέσω του οποίου απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση (ή P value), ή από την τιμή asymptotic significant.

Οι έλεγχοι στηρίζονται στη σύγκριση της τιμής Asymp. με το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ , με βάση το οποίο γίνονται οι έλεγχοι. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται εξ αρχής ποια θα είναι η τιμή του  $\alpha$  (συνήθως 5% ή 10%), ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή P value και συγκρίνεται με την τιμή του  $\alpha$ . Έτσι, αν P value.  $>\alpha$ , αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση (για κανονικότητα του δείγματος) σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha\%$ .

Το πρόγραμμα Matlab εξασφαλίζει άμεσα την απάντηση, χωρίς να χρειαστεί να προβούμε σε σύγκριση της P value με το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ . Έτσι, όταν  $h=1$ , απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση. (Υπενθυμίζουμε ότι στο μεν Dickey Fuller Test

η μηδενική υπόθεση συνίσταται στο ότι η χρονοσειρά έχει μοναδιαία ρίζα, άρα δεν είναι στάσιμη, ενώ στο 1\_sample\_k.s.test η μηδενική υπόθεση ορίζει ότι η υπό εξέταση κατανομή ακολουθεί την τυποποιημένη κανονική κατανομή.)

Παρατηρώντας προσεκτικά όλους τους ελέγχους, διαπιστώνουμε ότι η τιμή  $h=1$ , κάτι που σημαίνει ότι και για τους δύο ελέγχους απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση, δηλαδή οι χρονοσειρές δεν έχουν μοναδιαία ρίζα, άρα είναι στάσιμες. Επίσης, από το δεύτερο έλεγχο απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση σε όλες τις περιπτώσεις, ότι δηλαδή οι κατανομές περιγράφονται ικανοποιητικά από την τυποποιημένη κανονική κατανομή. Σε όλους τους ελέγχους, το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$  επιλέχθηκε να είναι 5% (όπου  $\alpha$  το ελάχιστο επίπεδο σημαντικότητας με το οποίο απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση).

Σε όλα τα αποτελέσματα που αφορούν τα όργανα μέτρησης παρατηρούμε ότι η τιμή  $h$  είναι μονάδα. (Υπενθυμίζουμε εδώ ότι στο Matlab, όταν η κριτική τιμή  $h$  είναι μονάδα, απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση δεν την απορρίπτουμε.) Εν ολίγοις, απορρίπτονται η κανονικότητα και η ύπαρξη μοναδιαίας ρίζας για όλα τα όργανα μέτρησης.

<b>Πίνακας 5.2</b>					
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)	Hrms
Wg1 (m)	-0.0078	0.0449	-0.1668	0.1937	0,1253
Wg2 (m)	-0.0037	0.0417	-0.1534	0.1904	0,1171
Wg3 (m)	0.0023	0.0341	-0.1270	0.1590	0,0956
Wg4 (m)	0.0017	0.0375	-0.1294	0.1793	0,1043
Wg5 (m)	-0.0010	0.0355	-0.1200	0.1409	0,0986
Wg6 (m)	-0.0010	0.0374	-0.1339	0.1635	0,1034
Wg7 (m)	-0.0066	0.0305	-0.1025	0.1504	0,0867
Wg8 (m)	6.8433e-005	0.0368	-0.1293	0.1588	0,1024
Wg9 (m)	0.0037	0.0331	-0.1251	0.1547	0,0948
Wg10 (m)	-4.8895e-004	0.0373	-0.1458	0.1720	0,1045
Wg11 (m)	-2.9931e-004	0.0374	-0.1413	0.1742	0,1046
6comp_Fx (N)	-0.1683	8.4261	-28.4853	27.9900	23,879

6comp_Fy(N)	1.0553	1.2991	-4.2635	6.3754	4,1272
6comp_Fz (N)	24.8199	5.3797	12.4569	34.3768	15,1174
6comp_Mx (N*m)	-2.5193	1.7529	-9.2324	4.1225	6,0704
6comp_My (N*m)	-1.2945	14.4186	-51.1668	46.6528	41,1025
6comp_Mz (N*m)	-0.0279	0.1967	-0.7342	0.7455	0,5587
4comp_Fx (N)	-0.7679	6.6821	-23.8832	21.3964	19,1794
4comp_Fy (N)	0.3680	0.8999	-3.1971	4.1549	2,6535
4comp_Mx (N*m)	-0.0407	0.1081	-0.3778	0.2793	0,3158
4comp_My (N*m)	-0.1905	0.8916	-3.4713	3.0163	2,5882
Mooring_2 (N)	88.8251	9.1724	34.6744	119.1906	84,6774
Mooring_1(N)	96.8980	31.6792	12.3826	228.5729	26,5801
Mooring_4 (N)	88.4513	9.5911	31.2802	124.2138	78,0976
Mooring_3(N)	98.6274	28.5989	6.4772	231.8091	27,6601
Acc_1 (G)	-0.0210	0.0309	-0.1630	0.1065	0,0947
Acc_2 (G)	0.0094	0.0165	-0.0528	0.0712	0,0515
Acc_3 (G)	-0.9579	0.0133	-1.0333	-0.8649	0,0439
Pres.cell_1 (N/m^2)	0.2442	0.0156	0.1691	0.2971	0,0411
Pres.cell_2 (N/m^2)	0.0901	0.0230	-0.0115	0.1576	0,0663
TLP_x (m)	0.0682	0.0378	-0.0607	0.1990	0,0683
TLP_y (m)	-0.0282	0.0096	-0.0612	0.0069	0,0128
TLP_z (m)	-0.0872	0.0022	-0.1007	-0.0794	0,0077

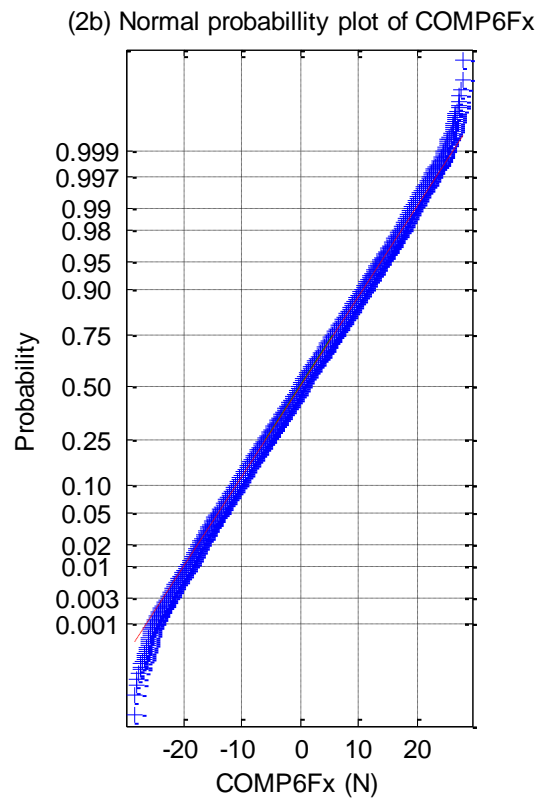
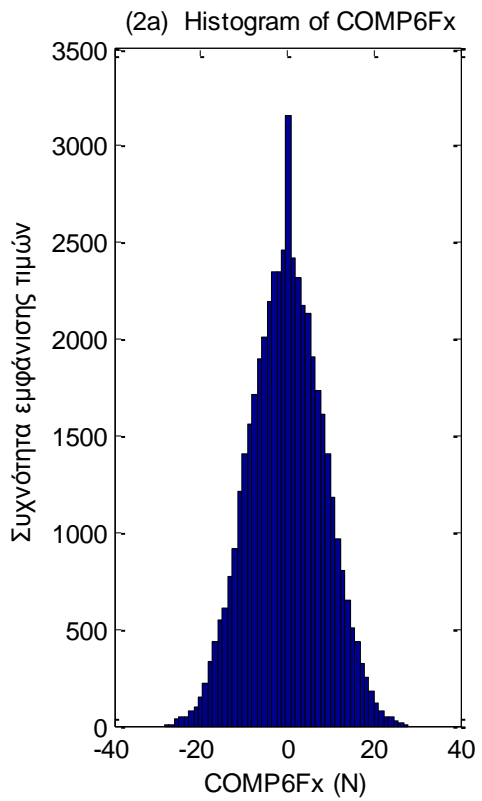
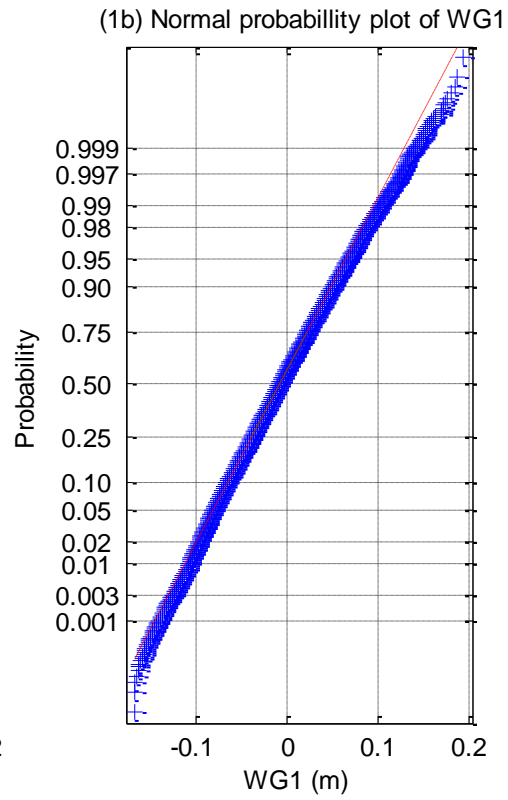
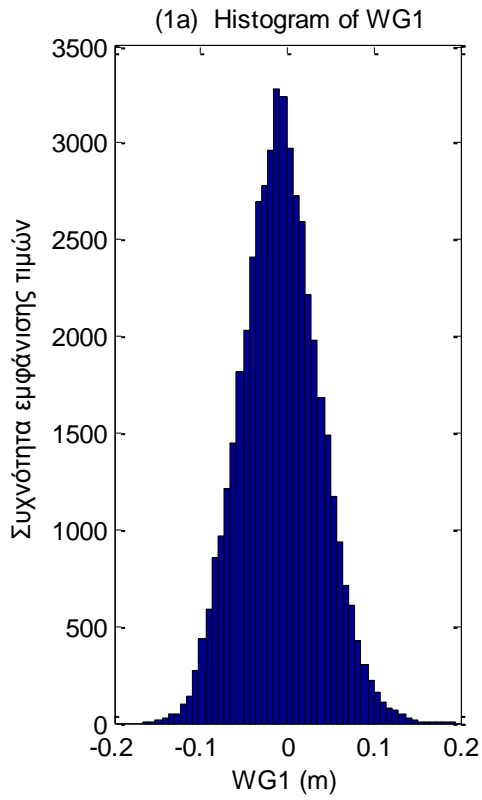
TLP_roll (grad)	0.0421	0.0026	0.0327	0.0515	0,0085
TLP_pitch (grad)	0.0622	0.0168	-0.0031	0.1260	0,0501
TLP_yaw (grad)	0.0432	0.0261	-0.0617	0.1460	0,0705

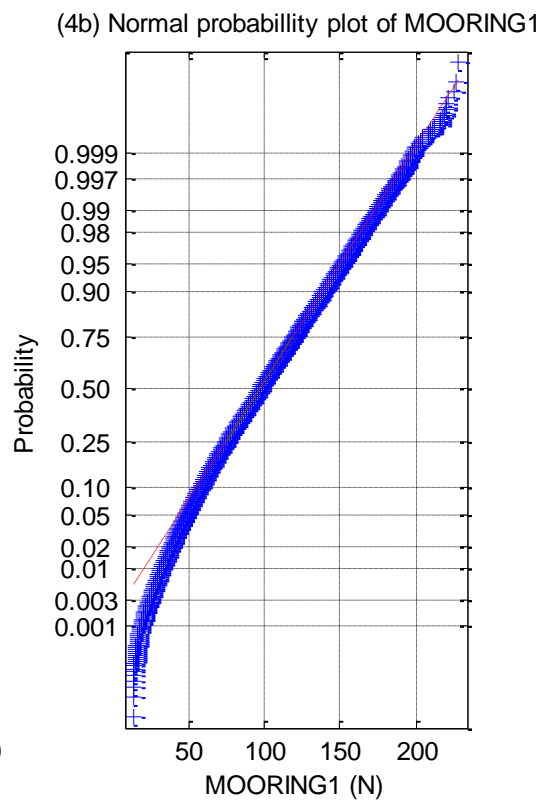
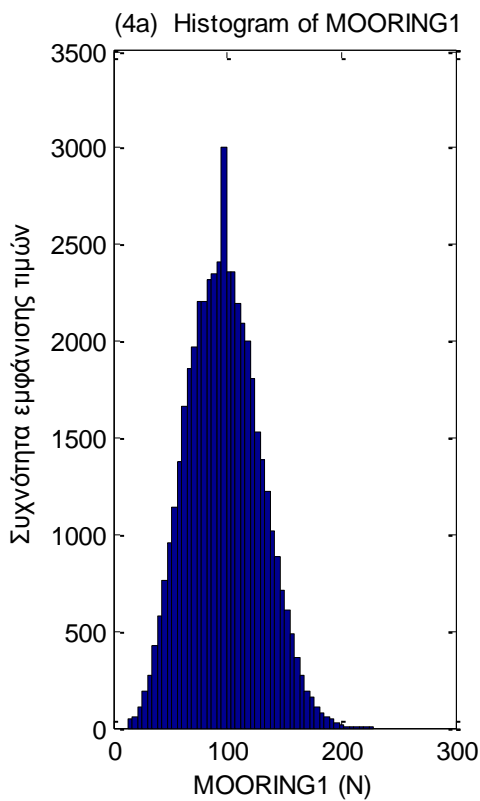
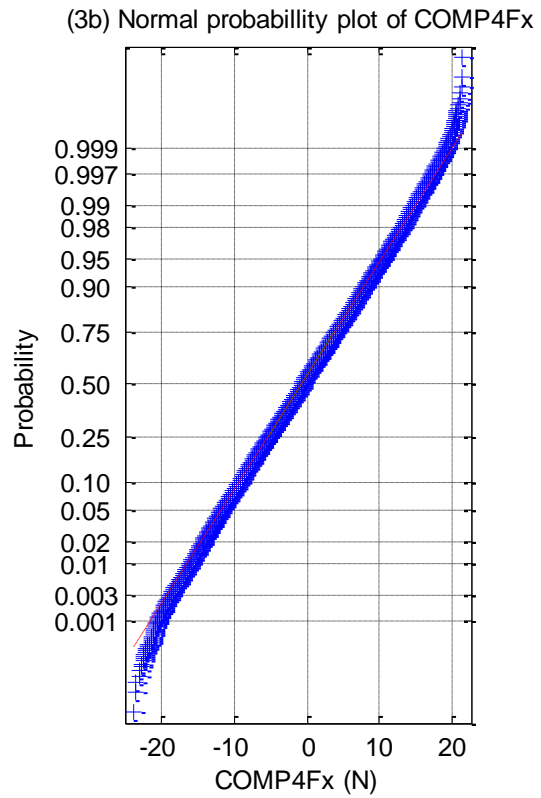
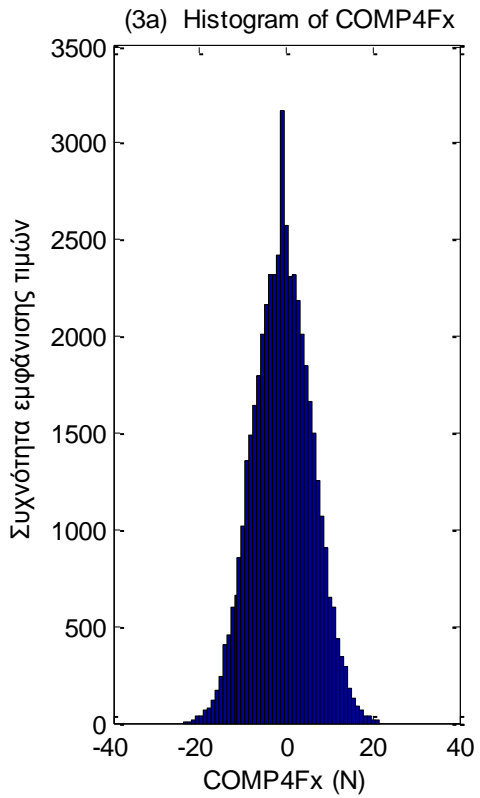
<b>Πίνακας 5.3</b>				
	Συντελεστής Ασυμμετρίας	Συντελεστής Κυρτότητας	1_sample_k.s.test h	Dickey Fuller Test
Wg1 (m)	0.1337	3.0652	1	1
Wg2 (m)	0.1636	3.1213	1	1
Wg3 (m)	0.1555	3.1429	1	1
Wg4 (m)	0.2072	3.2750	1	1
Wg5 (m)	0.1771	3.1838	1	1
Wg6 (m)	0.1891	3.2735	1	1
Wg7 (m)	0.1727	3.1225	1	1
Wg8 (m)	0.2052	3.1599	1	1
Wg9 (m)	0.1959	3.1580	1	1
Wg10 (m)	0.1815	3.1357	1	1
Wg11 (m)	0.1857	3.1361	1	1
6comp_Fx (N)	4.1513e-004	2.8475	1	1
6comp_Fy(N)	-0.0201	3.0619	1	1
6comp_Fz (N)	0.3021	2.0912	1	1
6comp_Mx (N*m)	-0.0050	3.0333	1	1
6comp_My (N*m)	2.5611e-006	2.8676	1	1
6comp_Mz (N*m)	0.0179	2.9066	1	1

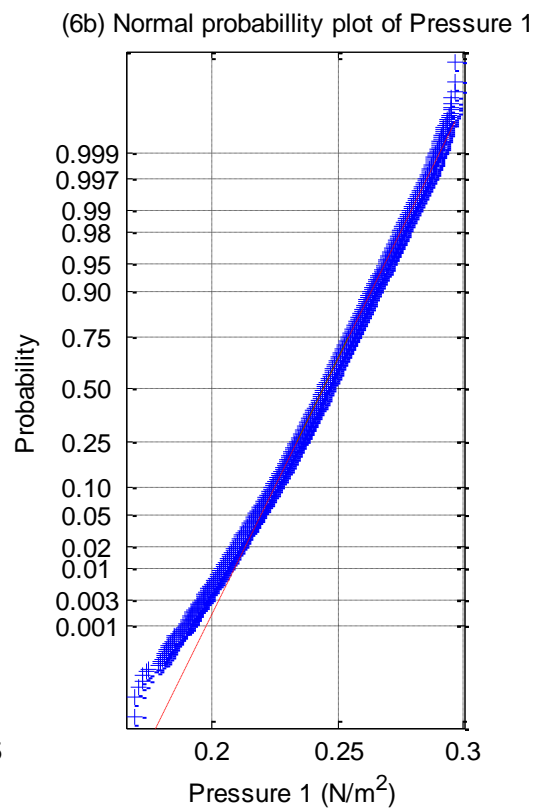
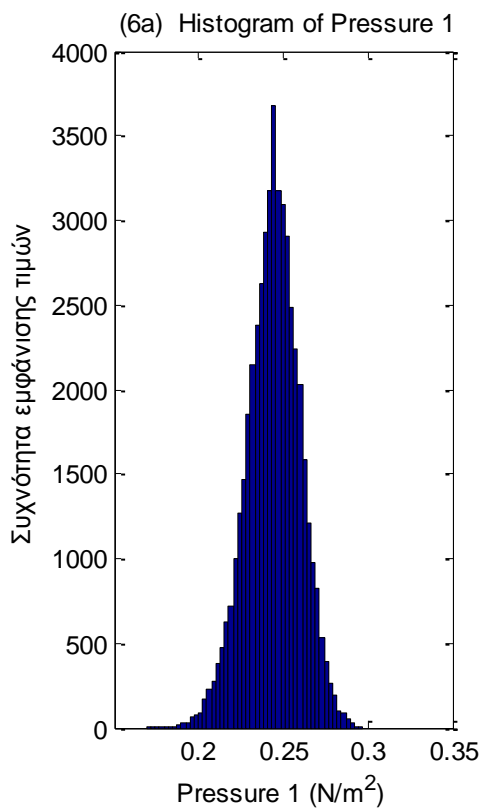
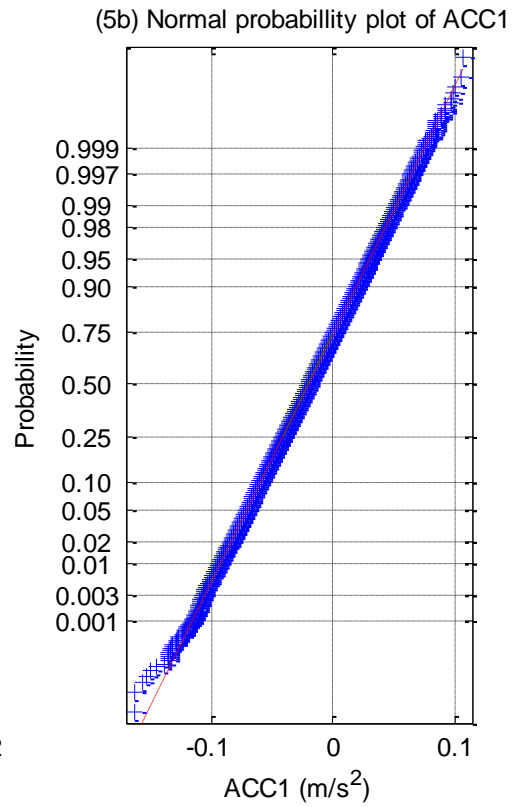
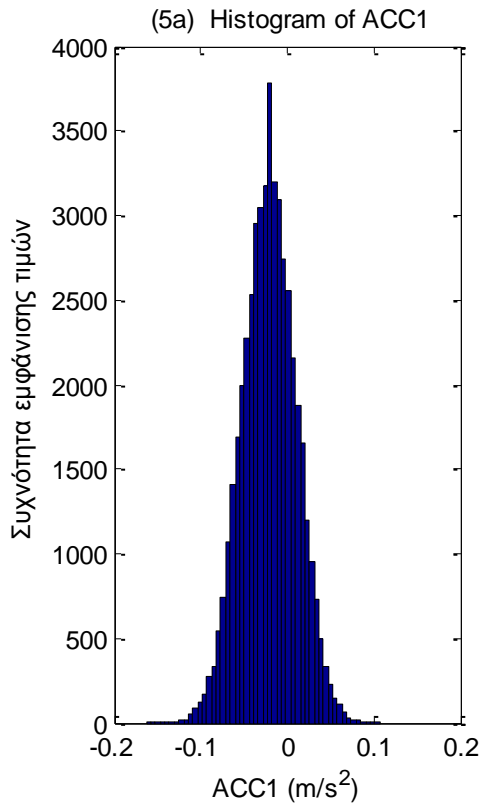


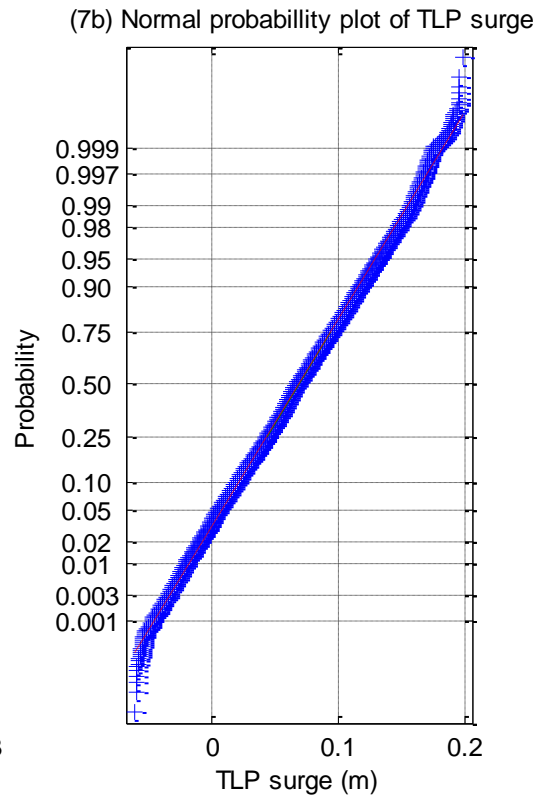
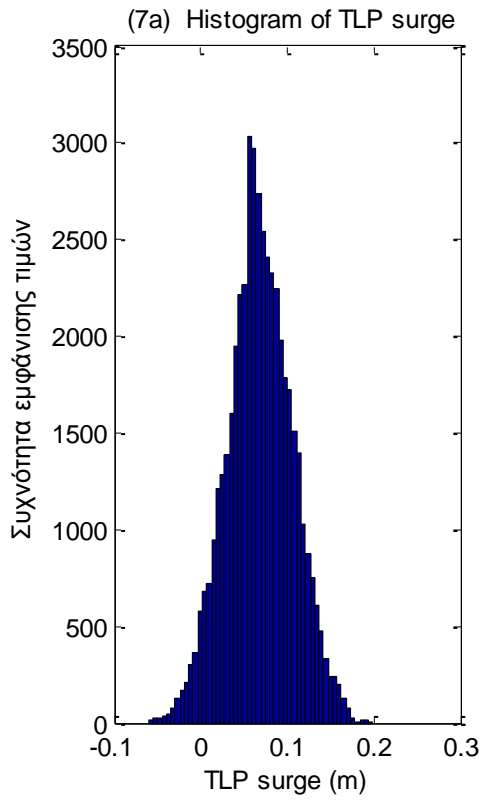
4comp_Fx (N)	-0.0012	2.8596	1	1
4comp_Fy (N)	0.0032	3.0851	1	1
4comp_Mx (N*m)	-0.0339	2.4238	1	1
4comp_My (N*m)	-0.0115	2.8861	1	1
Mooring_2 (N)	-0.5959	3.7363	1	1
Mooring_1(N)	0.2085	2.8053	1	1
Mooring_4 (N)	-0.5835	3.5515	1	1
Mooring_3(N)	0.1552	3.0297	1	1
Acc_1 (G)	-0.0117	3.0123	1	1
Acc_2 (G)	-0.0018	3.0500	1	1
Acc_3 (G)	0.2791	4.4246	1	1
Rotation (rpm)	0.0758	2.9548	-	-
Pres.cell_1 (N/m)	-0.2225	3.2822	1	1
Pres.cell_2 (N/m)	-0.4994	3.6707	1	1
TLP_x (m)	0.0018	2.9401	1	1
TLP_y (m)	-0.0347	2.9074	1	1
TLP_z (m)	-0.5690	3.5643	1	1
TLP_roll (grad)	-0.0868	2.8754	1	1
TLP_pitch (grad)	0.0689	2.9801	1	1
TLP_yaw (grad)	-0.0076	2.9685	1	1

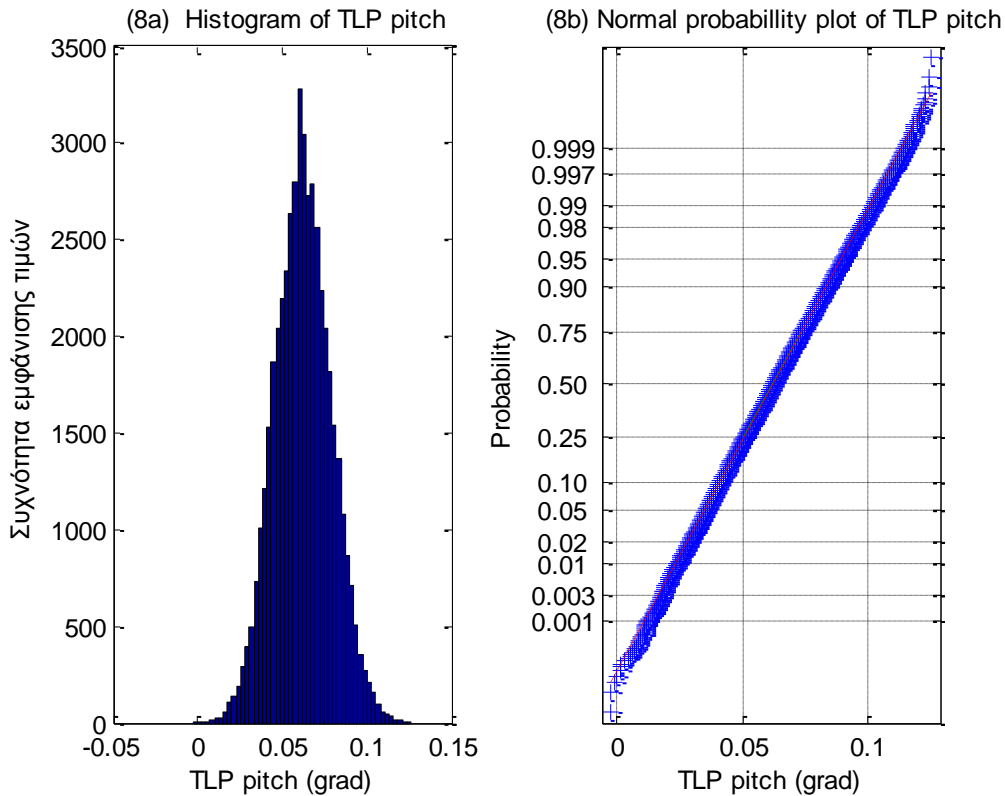
Στα σχήματα που ακολουθούν παραθέτουμε στο α) τα ιστογράμματα και στο β) τα γραφήματα ελέγχου κανονικότητας από τις χρονοσειρές της προηγούμενης ενότητας (5.3.2).











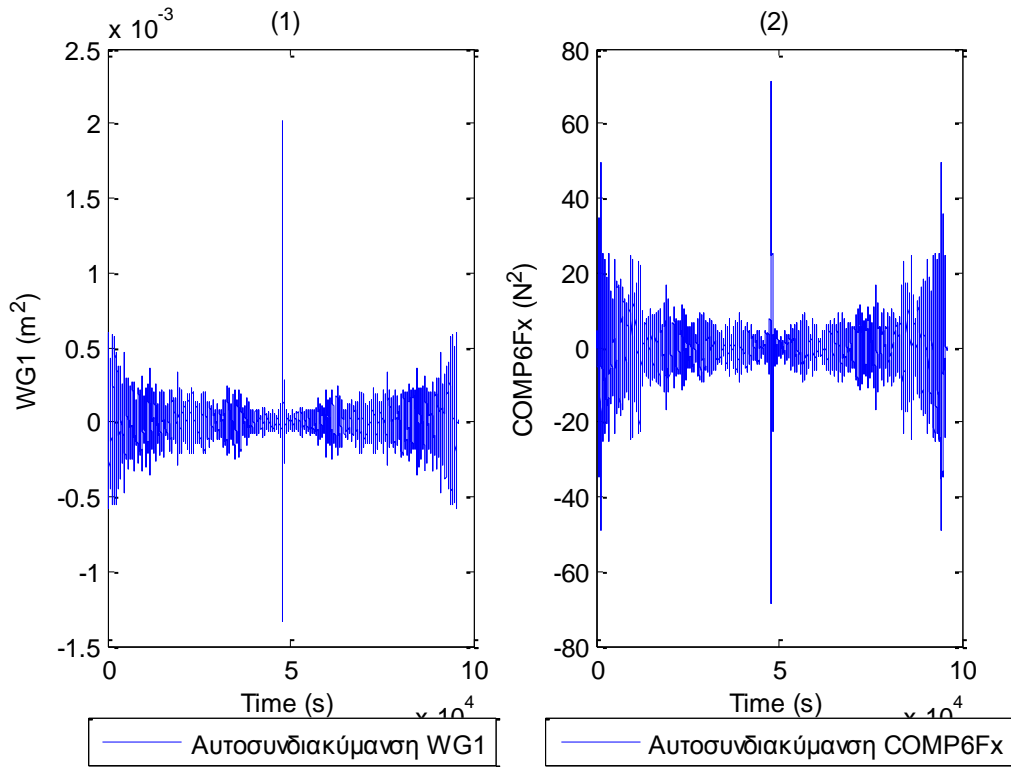
**Σχήματα 5.3.2 (1-8)** α) Ιστογράμματα και β) γραφήματα ελέγχου κανονικότητας (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός (Pressure 1) από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

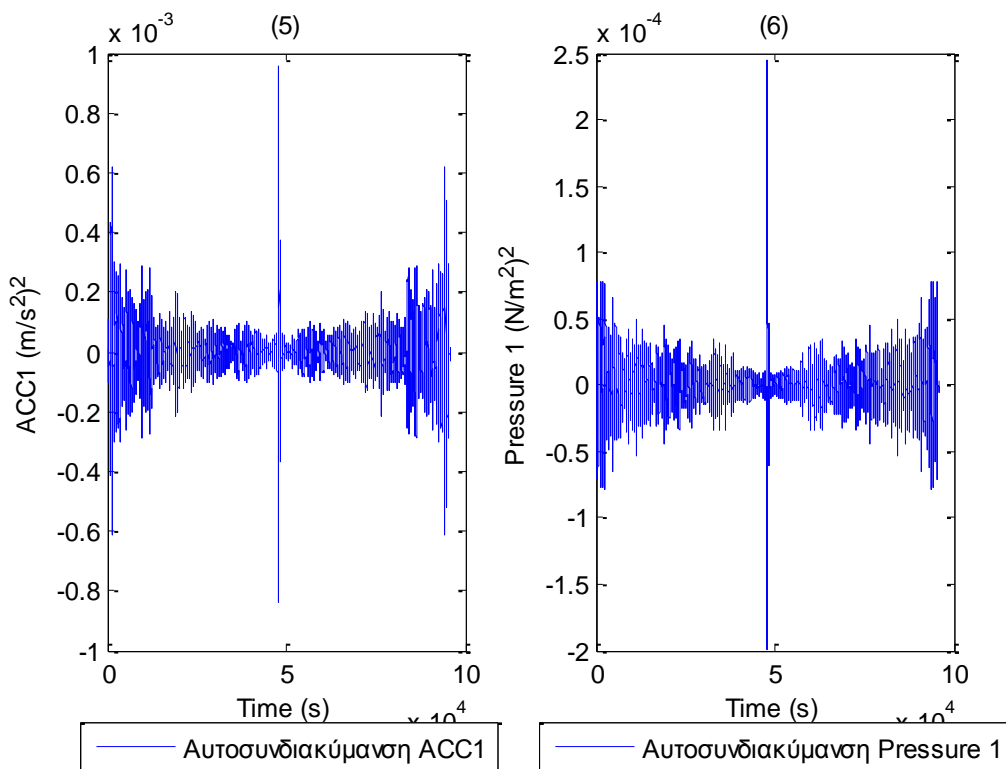
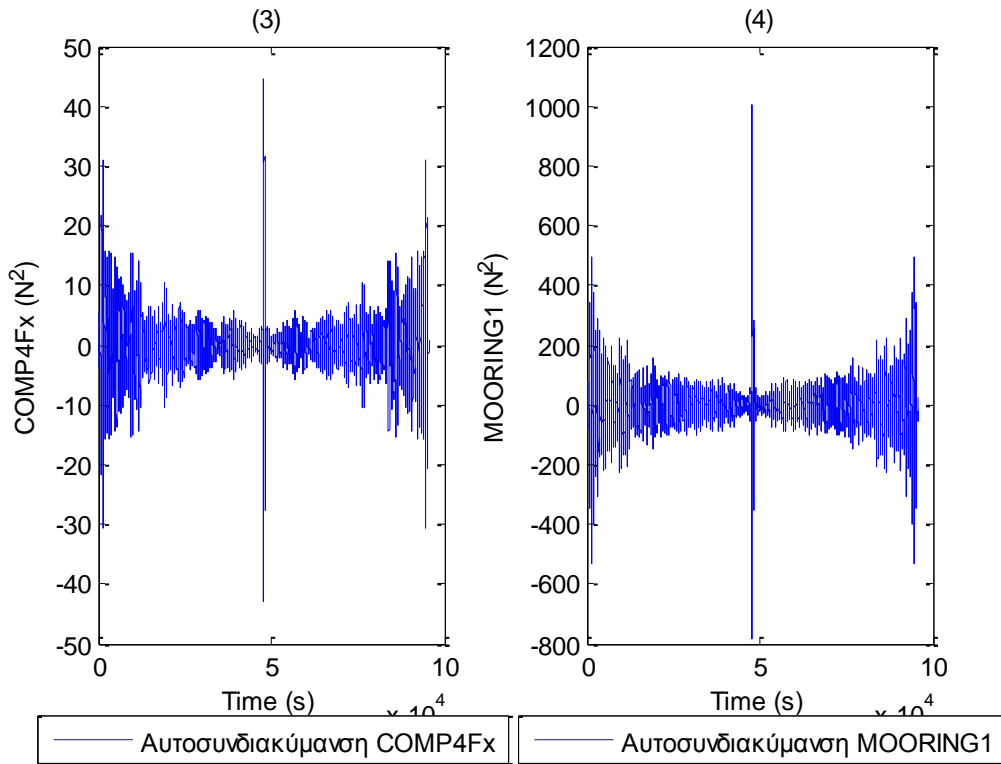
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε α) τα ιστογράμματα και β) τα γραφήματα ελέγχου κανονικότητας για το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήματα 5.3.2) (1), για τη μια (στη surge διεύθυνση) από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.3.2.) (2), για τη μια (στη surge διεύθυνση) από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.3.2) (3), τη μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.3.2) (4), το ένα (ACC 1) από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.3.2) (5), για το ένα (Pressure 1) από τα δύο όργανα πίεσης (Σχήμα 5.3.2) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.3.2) (7-8).

Από τα αποτελέσματα του ελέγχου για την κανονικότητα (Πίνακας 5.3), απορρίφτηκε η μηδενική υπόθεση για ύπαρξη κανονικότητας των δεδομένων, για διάστημα εμπιστοσύνης 95% , όμως, μελετώντας τα σχήματα, διαπιστώνουμε ότι φαίνεται να υπάρχει κανονικότητα των δεδομένων και το κεντράρισμα γύρω από τη μέση τιμή. Επιπλέον, εξετάζοντας όλα τα δεδομένα από τα όργανα μέτρησης, βλέπουμε ότι σε κάποιες περιπτώσεις έχουμε θετική συμμετρία, σε άλλες αρνητική, ενώ παρατηρούμε και τις τρεις περιπτώσεις κύρτωσης.

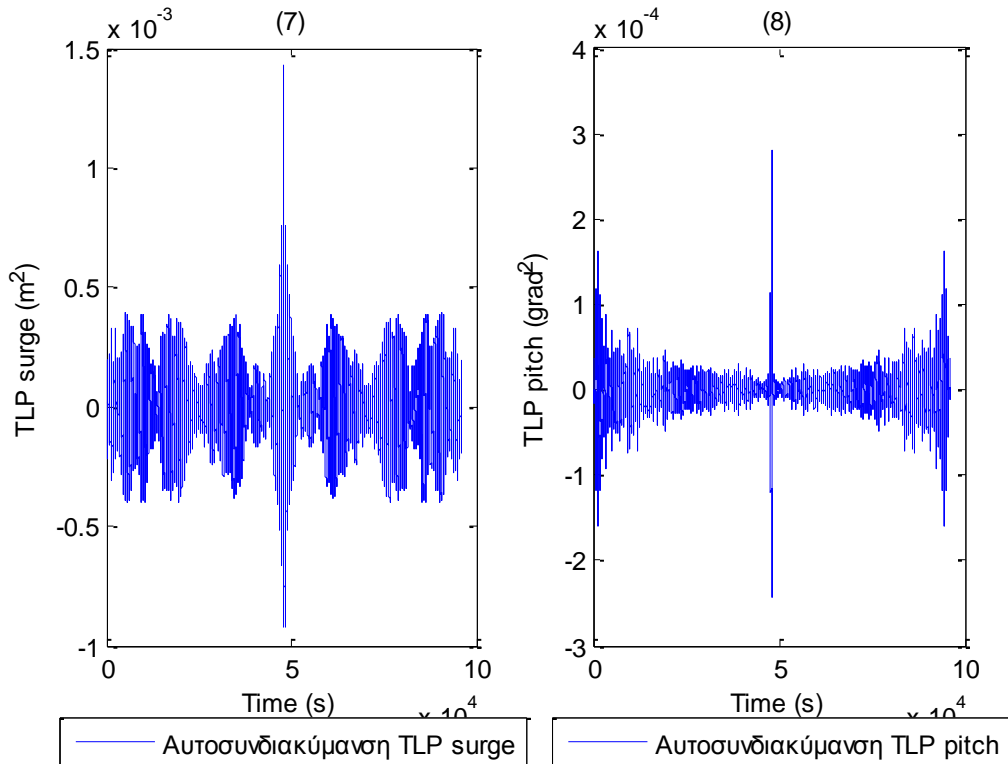
### 5.3.3 Στοχαστική ανάλυση χρονοσειράς πειράματος T1239\_1.6\_0.1\_TLP\_00\_NR

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, του γραφήματος αυτό-συνδιακύμανσης για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει από τα δεδομένα κάθε όργανο μέτρησης.









**Σχήματα 5.3.3 (1-8)** Συναρτήσεις Αυτό-συνδιακύμανσης (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός (Pressure 1) από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις συναρτήσεις αυτο-συνδιακύμανσης, για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.3.3) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.3.3) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.3.3) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.3.3) (4), το ένα από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.3.3) (5), για το ένα από τα δύο όργανα πίεσης (Σχήμα 5.3.3) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.3.3) (7-8).

Από τα σχήματα συνάγεται ότι η αυτο-συνδιακύμανση είναι συμμετρική ως προς την τιμή της χρονικής μετατόπισης, δηλαδή προκύπτει απ' όλα τα γραφήματα ότι η αυτο-συνδιακύμανση για μία θετική χρονική μετατόπιση, είναι ταυτόσημη με την αυτο-συνδιακύμανση για μία αρνητική χρονική μετατόπιση.

### 5.3.4 Έλεγχος στασιμότητας TLP\_00\_NR

Κάθε παρατήρηση μιας χρονοσειράς αποτελεί μία τυχαία μεταβλητή, δηλαδή μία στοχαστική διαδικασία. Οι στόχοι της στοχαστικής ανάλυσης των χρονολογικών

σειρών είναι η μελέτη της στοχαστικής διαδικασίας διαμόρφωσης των δεδομένων και η διενέργεια προβλέψεων. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες "χρονολογικών" σειρών, με συνηθέστερες τα υποδείγματα λευκού θορύβου, τυχαίας διαδρομής, τα αυτοπαλίνδρομα (AR) υποδείγματα, τα υποδείγματα κινητών μέσων (MA), τα αυτοπαλίνδρομα κινητών μέσων (ARIMA), τα υποδείγματα Box Jenkins κ.ά. (Box, 1976).

Το σημαντικότερο βήμα στην ανάλυση των χρονολογικών σειρών είναι η ανάλυση της τάσης. Ως εξαρτημένη μεταβλητή, τα υποδείγματα μέτρησης της τάσης μιας σειράς έχουν τις τιμές της χρονολογικής σειράς και ως ανεξάρτητη τη χρονική περίοδο. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις τάσης είναι η γραμμική, η λογαριθμική, η πολυωνυμική και η εκθετική τάση.

Οι κυριότερες έννοιες που πρέπει να ελεγχθούν όσον αφορά την ανάλυση των χρονοσειρών είναι η στασιμότητα και η εργοδικότητα (J. Hamilton, 1994). Μία χρονολογική σειρά καλείται στάσιμη όταν ο μέσος και η διακύμανση δε μεταβάλλονται διαχρονικά και επιπλέον, η συνδιακύμανση των τιμών της σε δύο χρονικές περιόδους εξαρτάται μόνο από τις χρονικές υστερήσεις και όχι από το χρονικό σημείο στο οποίο υπολογίζονται (δεύτερης τάξης στασιμότητα). Η ισοδυναμία για τη στασιμότητα μιας χρονοσειράς, είναι η μη επανάληψη μιας σταθερής κυματομορφής (η οποία να επαναλαμβάνεται μέσα στη χρονοσειρά), και η απουσία τάσης της χρονοσειράς.

Υπενθυμίζουμε τους ορισμούς της συνδιακύμανσης και της αυτο-συνδιακύμανσης:

Για δύο τυχαίες μεταβλητές  $X$  και  $Y$ , η σχέση της συνδιακύμανσης (covariance) δίνεται από τη σχέση (J. Hamilton, 1994):

$$\text{Cov}(X, Y) = E(X - \mu_X)(Y - \mu_Y) \quad (5.31)$$

Η σχέση της αυτοσυνδιακύμανσης (auto covariance)  $\gamma_{it}$  ( $i$  τάξης) για μια τυχαία μεταβλητή  $X_t$  με την  $X_{t-i}$  της ίδιας χρονοσειράς (δηλαδή με  $i$  καθυστέρηση χρόνου) δίνεται από τη σχέση (J. Hamilton, 1994):

$$\gamma(i, t) = E(X_t - \mu_t)(X_{t-i} - \mu_{t-i}) \quad (5.32)$$

Ο έλεγχος της στασιμότητας γίνεται:

- Με τη γραφική παραστασή της
- Μελετώντας τη γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης αυτοσυνδιακύμανσης
- Με τον έλεγχο της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας (Dickey Fuller Test) (J. Hamilton, 1994)

### 5.3.5 Έλεγχος μοναδιαίας ρίζας (Dickey Fuller Test) TLP\_00\_NR

Για τον έλεγχο της μοναδιαίας ρίζας με βάση το Dickey Fuller Test θεωρούμε αρχικά το παρακάτω υπόδειγμα (J. Hamilton, 1994):

$$X_t = aX_{t-1} + u_t$$

Ακολουθώντας, λαμβάνοντας τις πρώτες διαφορές, προκύπτει ότι

$$X_t - X_{t-1} = (a-1)X_{t-1} + u_t$$

Έτσι, το κριτήριο Dickey Fuller Test βασίζεται στον παρακάτω έλεγχο:

$$H_0 \rightarrow a = 1$$

$$H_1 \rightarrow a < 1$$

Η μηδενική υπόθεση  $H_0$  γίνεται δεκτή στην περίπτωση που η  $t$  στατιστική συνάρτηση του  $a$  είναι μικρότερη από την  $t$  στατιστική συνάρτηση των Dickey Fuller Test, απ' όπου συνάγεται η ύπαρξη της μοναδιαίας ρίζας, άρα η χρονολογική σειρά δεν είναι στάσιμη.

Από τους ελέγχους που διεξήχθησαν στις χρονοσειρές όλων των οργάνων, προέκυψαν τα αποτελέσματα που υπάρχουν στην τελευταία στήλη του πίνακα 5.3. Εν προκειμένω, παρατηρούμε ότι για όλες τις χρονοσειρές, η τιμή  $h=1$ , και αντιστοιχεί στην απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης. Η πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης, δηλαδή της ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας στις χρονοσειρές, μας οδηγεί στο συμπέρασμα (από τον ορισμό του ελέγχου) ότι οι χρονοσειρές δεν έχουν μοναδιαία ρίζα, δηλαδή οι σειρές είναι στάσιμες (για 95% διάστημα εμπιστοσύνης) .

### 5.4 Παρουσίαση φάσματος για την περίπτωση TLP\_00\_NR

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στα φάσματα που προκύπτουν από τις χρονολογικές σειρές των προηγούμενων ενοτήτων. Το πρώτο που πρέπει να επισημανθεί σε αυτή την ανάλυση είναι ότι η διέγερση είναι στοχαστικό σήμα άπειρης ενέργειας, άρα και άπειρων ορίων, γεγονός το οποίο δε μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε το μετασχηματισμό Fourier, ο οποίος για να χρησιμοποιηθεί προϋποθέτει πεπερασμένα όρια. Επομένως, δεν μπορούμε να υπολογίσουμε, και κατά συνέπεια να αναπαραστήσουμε, το αντίστοιχο φάσμα απευθείας. Έτσι, για την παραγωγή του φάσματος χρησιμοποιούμε τον υπολογισμό της ντετερμινιστικής συνάρτησης αυτο-συνδιακύμανσης, η οποία ταυτίζεται με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Αυτό οφείλεται στο ότι η μέση τιμή του σήματος είναι μηδέν (Αθανασούλης, 2007).

Από εκεί μπορούμε να εξάγουμε το φάσμα της διέγερσης, πραγματοποιώντας μετασχηματισμό Fourier στη συνάρτηση αυτο-συνδιακύμανσης. (Οι διαφορές του

χρόνου  $\tau = t_2 - t_1 \rightarrow \infty$ , η συνάρτηση αυτο-συνδιακύμανσης τείνει στο μηδέν, άρα η ενέργεια είναι πεπερασμένη.)

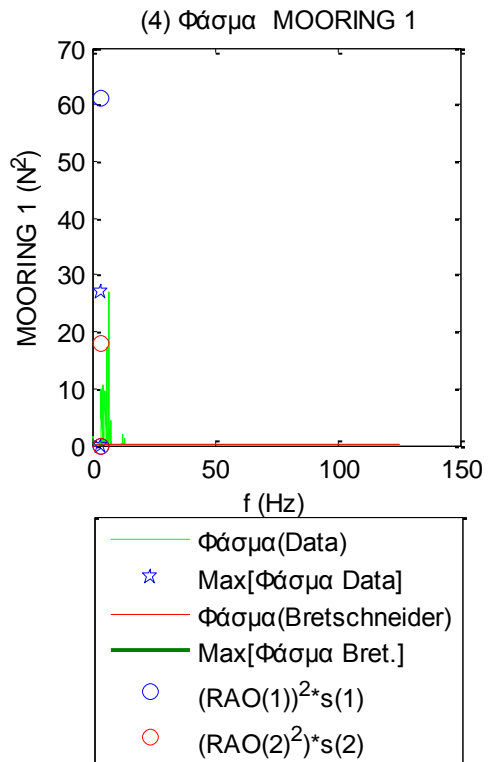
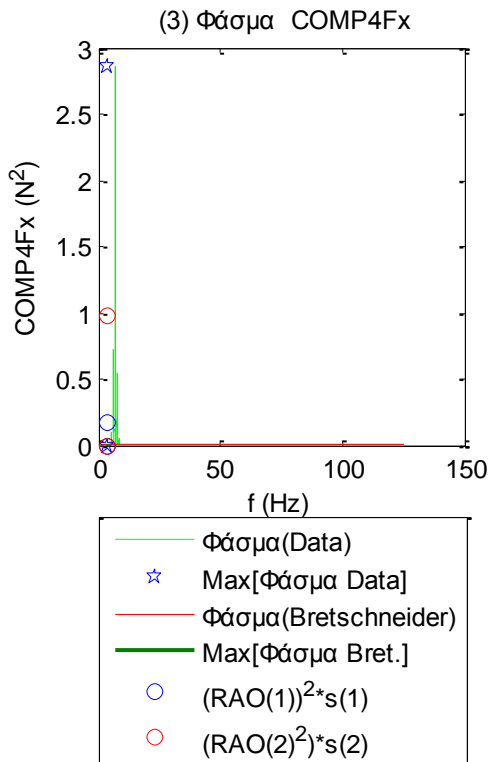
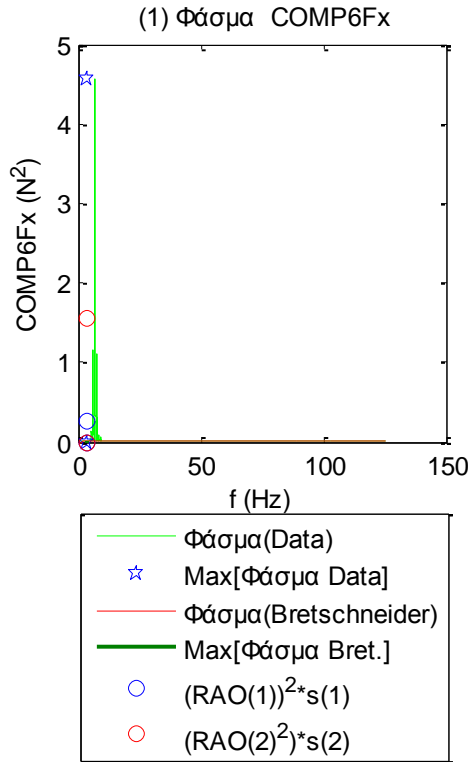
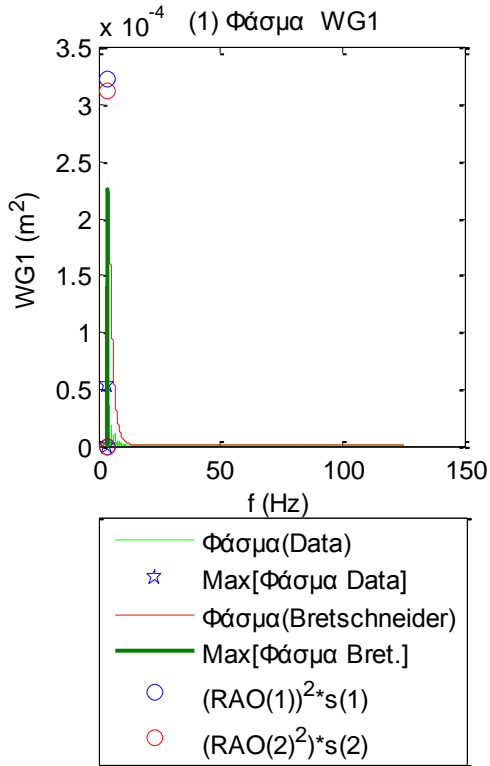
Όλα τα παραπάνω είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν λόγω του ότι η όλη διαδικασία είναι στάσιμη (ή ασθενώς στάσιμη), αφού η μέση τιμή της συνάρτησης είναι ανεξάρτητη του χρόνου και εργοδική, μιας και η μέση τιμή του χρόνου ταυτίζεται με τη μέση τιμή της ολότητας.

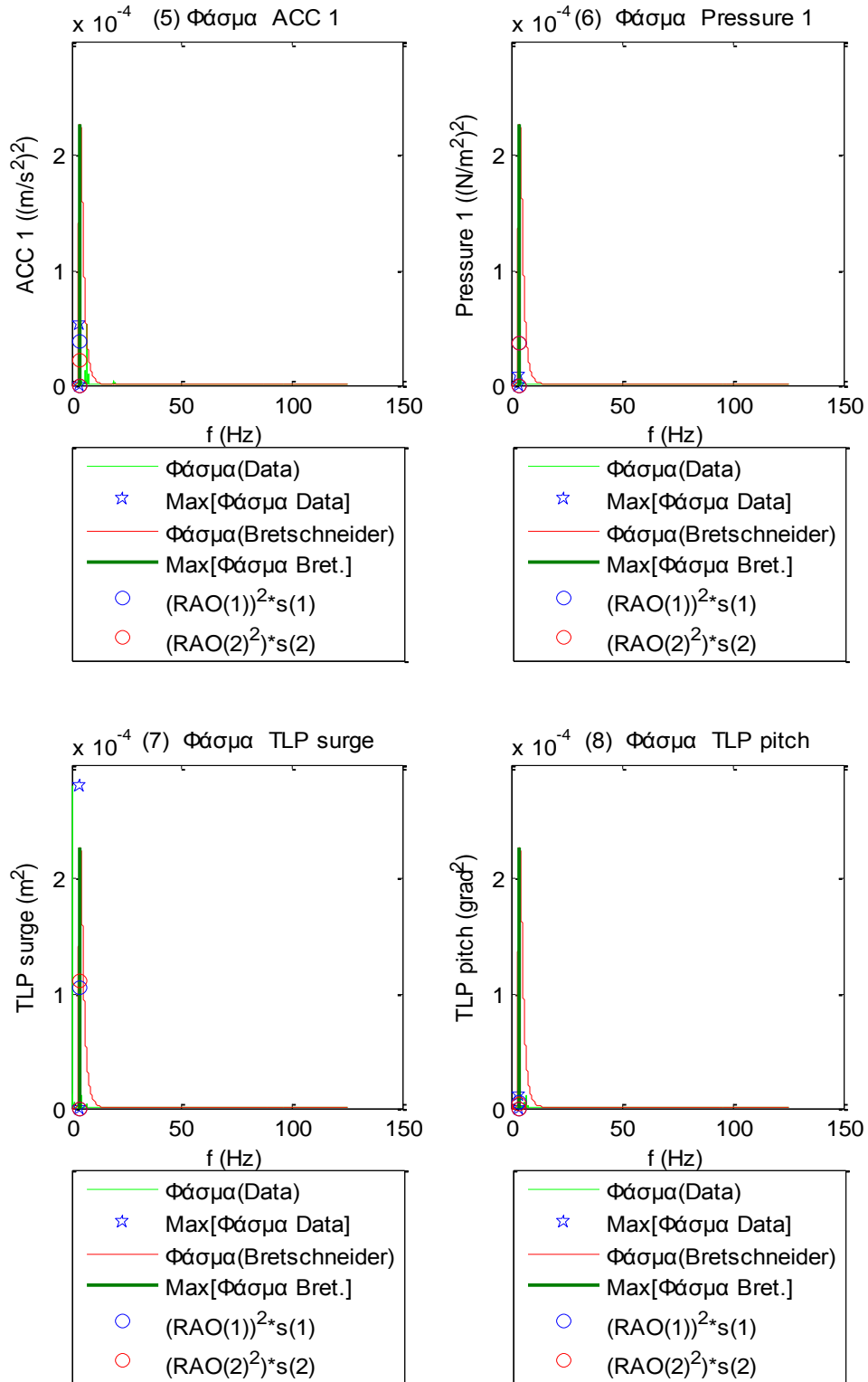
Στον πίνακα 5.4 παρατίθενται, στη δεύτερη στήλη, τα αποτελέσματα για τις τιμές των RAO's όσον αφορά το πείραμα (T1239+T1240) με περίοδο  $T=1.6$  s και ύψος κορυφής  $H_s=0.025$  m, ενώ στην τρίτη στήλη του ίδιου πίνακα παρουσιάζουμε τα αντίστοιχα RAO's από το πείραμα T1239 με περίοδο  $T=1.8$  s και αντίστοιχο ύψος κορυφής  $H_s=0.1$  m. Η ύπαρξη αυτών των αποτελεσμάτων είναι επιβεβλημένη στον προγραμματισμό, ούτως ώστε να επιτευχθεί μία σύγκριση με την ανάλυση του φάσματος.

<b>Πίνακας 5.4</b>		
	πείραμα T1230 $T=1.6$ s , $H_s=0.025$ m	πείραμα T1233 $T=1.8$ s , $H_s=0.1$ m
Wg1	RAOwg1_1=1.1902	RAOwg1_2=1.2691
Wg2	RAOwg2_1=1.0639	RAOwg2_2=1.2789
Wg3	RAOwg3_1=0.8325	RAOwg3_2=1.0205
Wg4	RAOwg4_1=0.8760	RAOwg4_2=1.0279
Wg5	RAOwg5_1=0.9480	RAOwg5_2=0.9487
Wg6	RAOwg6_1=0.9533	RAOwg6_2=1.0522
Wg7	RAOwg7_1=0.7881	RAOwg7_2=0.8426
Wg8	RAOwg8_1=1.000	RAOwg8_2=1.0000
Wg9	RAOwg9_1=0.9166	RAOwg9_2=0.8965
Wg10	RAOwg10_1=1.0092	RAOwg10_2=1.0222
Wg11	RAOwg11_1=1.0036	RAOwg11_2=1.0403
6comp_Fx	RAOCOMP6Fx_1=33.3621	RAOCOMP6Fx_2=89.6568
6comp_Fy	RAOCOMP6Fy_1=11.3814	RAOCOMP6Fy_2=11.7684
6comp_Fz	RAOCOMP6Fz_1=22.3945	RAOCOMP6Fz_2=64.3388

6comp_Mx	RAOCOMP6Mx_1=16.0266	RAOCOMP6Mx_2=17.6756
6comp_My	RAOCOMP6My_1=57.1903	RAOCOMP6My_2=152.4973
6comp_Mz	RAOCOMP6Mz_1= 0.9550	RAOCOMP6Mz_2=2.0204
4comp_Fx	RAOCOMP4Fx_1= 27.1100	RAOCOMP4Fx_2=71.1590
4comp_Fy	RAOCOMP4Fy_1=8.2131	RAOCOMP4Fy_2=8.7566
4comp_Mx	RAOCOMP4Mx_1=1.4029	RAOCOMP4Mx_2=1.1923
4comp_My	RAOCOMP4My_1=5.5978	RAOCOMP4My_2=9.2881
Mooring_2	RAOMooring2_1=198.6461	RAOMooring2_2=106.7716
Mooring_1	RAOMooring1_1=518.2955	RAOMooring1_2=305.2802
Mooring_4	RAOMooring4_1=190.5678	RAOMooring4_2=113.4513
Mooring_3	RAOMooring3_1=125.6435	RAOMooring3_2=300.2293
Acc_1	RAOAcc1_1=0.4067	RAOAcc1_2=0.3337
Acc_2	RAOAcc2_1=0.1373	RAOAcc2_2=0.1609
Acc_3	RAOAcc3_1=0.0737	RAOAcc3_2=0.1042
Pres.cell_1	RAOPressure_cell_1_1=0.4015	RAOPressure_cell_1_2=0.4328
Pres.cell_2	RAOPressure_cell_2_1=0.5163	RAOPressure_cell_2_2=0.5273
TLP_x	RAOTLP_x_1=0.6788	RAOTLP_x_2=0.7554
TLP_y	RAOTLP_y_1=0.1136	RAOTLP_y_2=0.0330
TLP_z	RAOTLP_z_1=0.0508	RAOTLP_z_2=0.0273
TLP_roll	RAOroll_1=0.0781	RAOroll_2=0.0217
TLP_pitch	RAOpitch_1=0.1487	RAOpitch_2=0.1341
TLP_yaw	RAOyaw_1=1.1443	RAOyaw_2=0.7479

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, των γραφημάτων με τα φάσματα για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει βάσει των δεδομένων από κάθε όργανο μέτρησης.





**Σχήματα 5.4.1 (1-8)** Φάσματα για το (1) ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός (Pressure 1) από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις συναρτήσεις των φασμάτων, για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.4.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της A/Γ (Σχήμα 5.4.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της A/Γ (Σχήμα 5.4.1) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.4.1) (4), το ένα από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.4.1) (5), για το ένα από τα δύο όργανα πίεσης (Σχήμα 5.4.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.4.1) (7-8).

Με το κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται το φάσμα Bretschneider, με το πράσινο αναπαρίσταται το φάσμα του κύματος, με την μπλε γραμμή αναπαρίσταται το σημείο όπου το φάσμα του κύματος παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή ( $\omega_p$ ), του, και με τους μπλε και κόκκινους κύκλους το φάσμα που προκύπτει με τη βοήθεια του αντίστοιχου RAO από τα πειράματα των απλών κυματισμών.

Παρατηρούμε ότι τόσο το φάσμα Bretschneider όσο και το φάσμα από κάθε χρονοσειρά, και κυρίως αυτό των 11 οργάνων μέτρησης του ύψους κύματος, παρουσιάζουν τη μέγιστη συχνότητα την ίδια χρονική στιγμή. Επιπροσθέτως, μπορούμε να πούμε ότι τα περισσότερα φάσματα είναι φάσματα στενής λωρίδας, όπως το φάσμα Bretschneider, όπου η φασματική μάζα είναι απόλυτα συγκεντρωμένη γύρω από τη συχνότητα κορυφής, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται μέσω των υπολογισμών των τιμών φάσματος από τα RAO's.

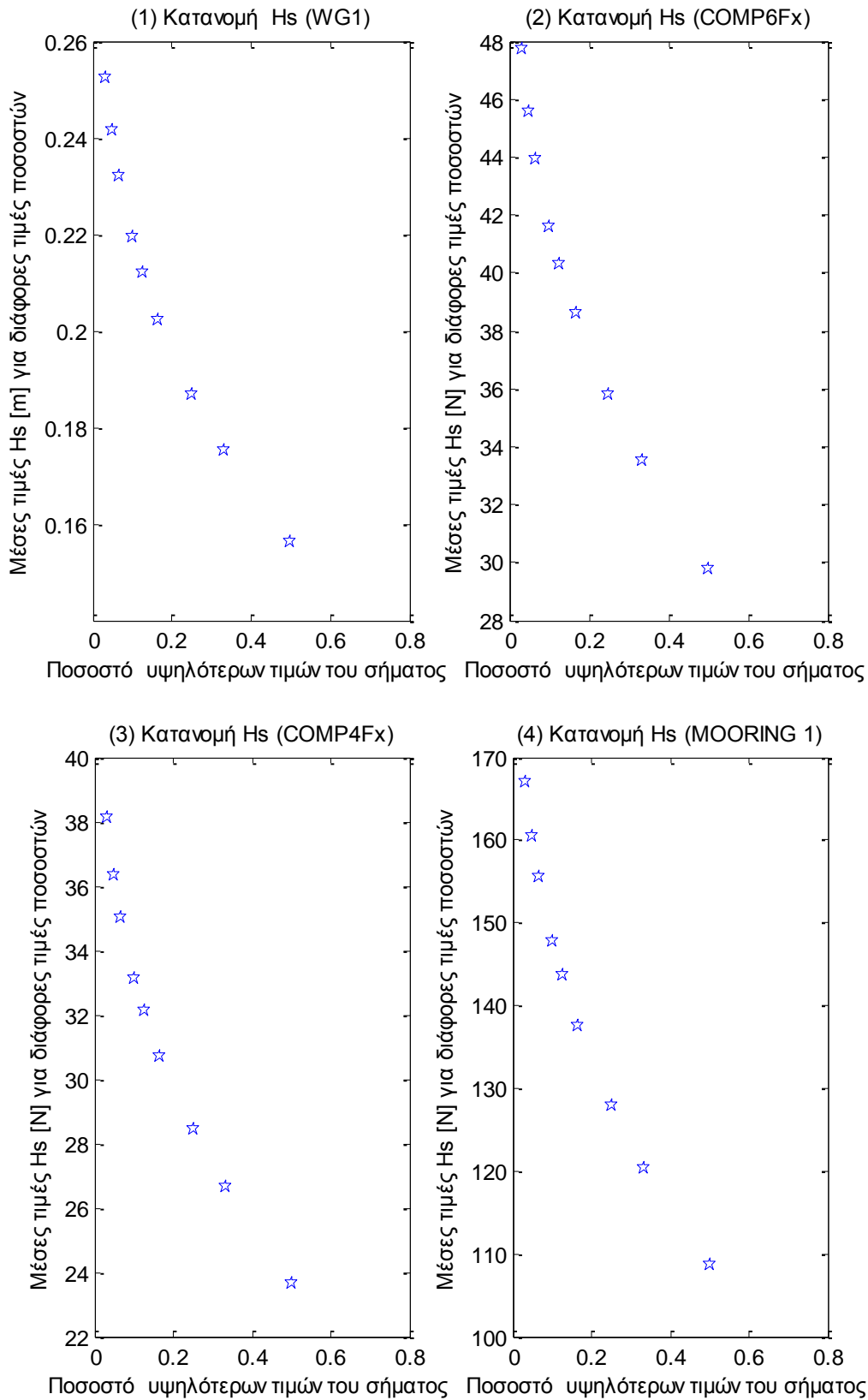
### **5.5 Κατανομή σημαντικού ύψους $H_s$ για την περίπτωση TLP\_00\_NR**

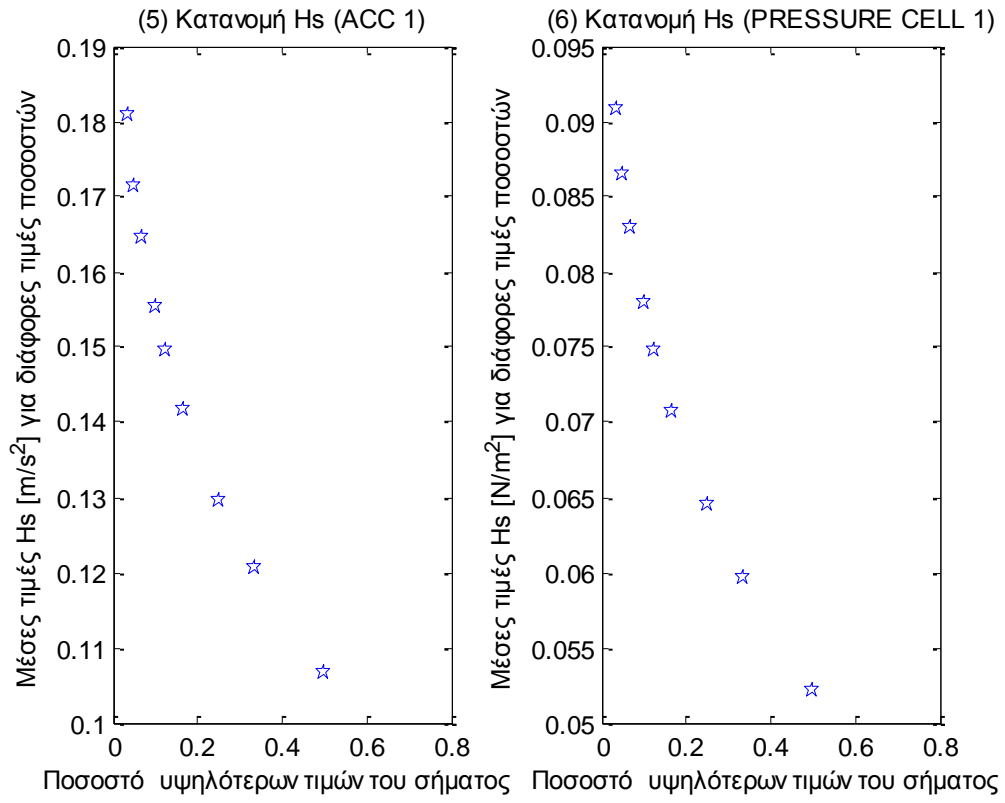
Το επόμενο ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της RMS τιμής, δηλαδή της σημαντικής και της μέσης τιμής των  $k$  υψηλότερων τιμών του σήματος. Όπου  $k = [1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15, 1/30]$ , που σημαίνει, π.χ., για το 1/2 ότι υπολογίζουμε το μέγιστο ύψος τιμών στο σύνολο του σήματος που βρίσκεται στο 1/2 των υψηλότερων τιμών του σήματος. Με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και για τα υπόλοιπα ποσοστά, 1/3 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15 και 1/30. Υπολογίζουμε το σημαντικό ύψος  $H_s$  για 8 τιμές προκειμένου να τα τοποθετήσουμε όλα σε κοινό γράφημα και να παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται το σημαντικό ύψος καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος.

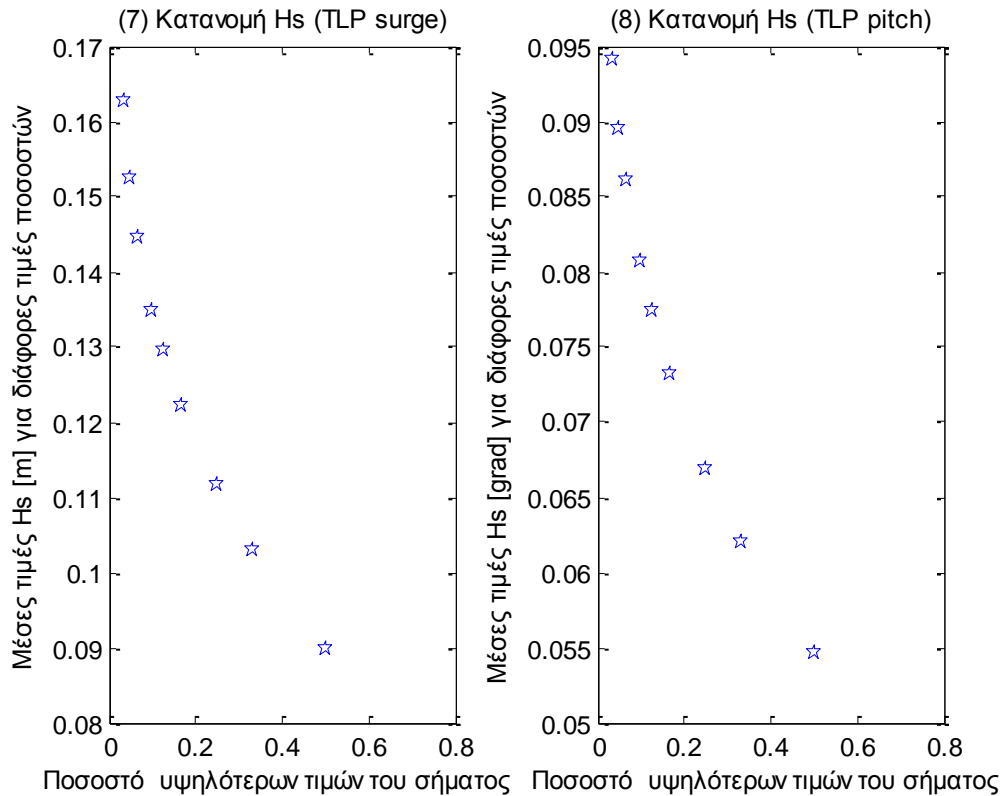
Η υπο-ρουτίνα (η οποία έχει υπολογιστεί σε Matlab) έχει γραφεί έτσι ώστε να υπολογίζει τα ύψη ενός σήματος βάσει των δειγματοληπτικών διακριτών σημείων του. Αυτό το επιτυγχάνει «σπάζοντας» το σήμα σε περιόδους μηδενικής υπέρβασης, δηλαδή σε χρονικά διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών υπερβάσεων του σήματος από το επίπεδο ηρεμίας. Στη συνέχεια, σε κάθε τμήμα από αυτά εντοπίζεται το μέγιστο και το ελάχιστο και τα προσθέτει κατά απόλυτη τιμή. Το άθροισμα που προκύπτει αποτελεί το ύψος που αντιστοιχεί σε κάθε περίοδο. Εν συνεχεία γίνεται υπολογισμός του μέγιστου ύψους των τιμών στο σύνολο του σήματος που βρίσκεται στο  $k$  ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος.



Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, των γραφημάτων για την κατανομή του σημαντικού ύψους Hs για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει βάσει των δεδομένων από κάθε όργανο μέτρησης.







**Σχήματα 5.5.1 (1-8)** Κατανομή σημαντικού ύψους Hs για το (1) ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός (Pressure 1) από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης, (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τη κατανομή σημαντικού ύψους Hs, για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.5.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.5.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.5.1) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.5.1) (4), το ένα από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.5.1) (5), για το ένα από τα δύο όργανα πίεσης (Σχήμα 5.5.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.5.1) (7-8).

Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος που χρησιμοποιούμε, αυξάνεται η τιμή του σημαντικού ύψους Hs (αναμενόμενο αποτέλεσμα). Επιπλέον, μπορούμε να επισημάνουμε ότι αυτή η αύξηση για όλα τα όργανα φαίνεται να είναι γραμμική.

## 5.6 Ανάλυση πειράματος SB\_20\_R

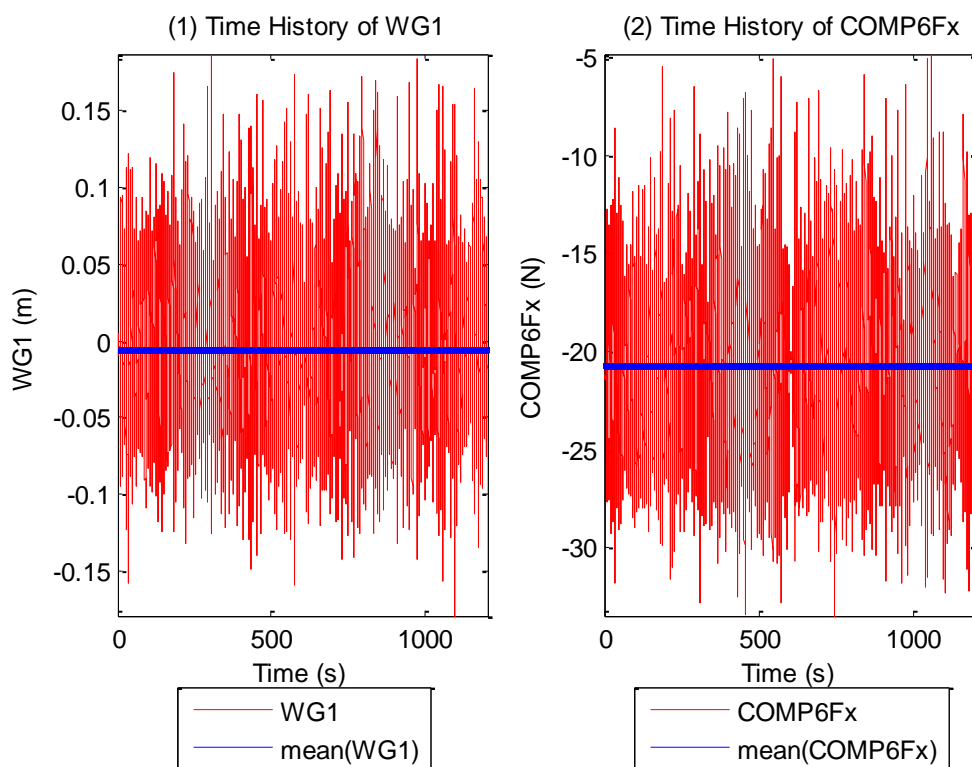
Με οδηγό την προηγούμενη ενότητα, θα μελετήσουμε τα πειράματα από τους τυχαίους κυματισμούς (IRREGULAR WAVES) για τη SB, με παραμέτρους την

περιστροφή της έλικας και με γωνία πρόσπτωσης 20 μοιρών, ακολουθώντας την εξής διαδικασία για την ανάλυση των τυχαίων κυματισμών:

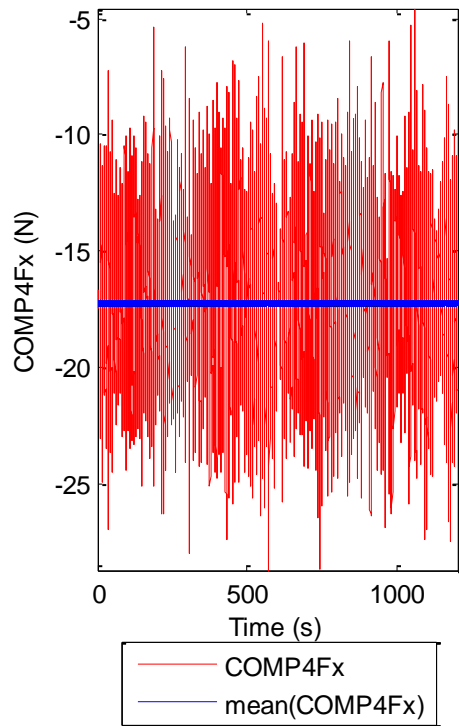
Παραθέτουμε, αρχικά, σε γραφήματα, τις χρονοσειρές από τα δεδομένα για κάθε όργανο μέτρησης με την αντίστοιχη μέση τιμή. Έπονται η παρουσίαση του ιστογράμματος (για κάθε χρονοσειρά) και ο πίνακας με τα στατιστικά δεδομένα, όπως είναι ο συντελεστής κύρτωσης, ο συντελεστής ασυμμετρίας, καθώς και ο στατιστικός, μη παραμετρικός έλεγχος για την κανονικότητα των δεδομένων από κάθε χρονοσειρά. Στο επόμενο βήμα θα εξεταστεί (μέσω γραφημάτων) η στασιμότητα της κάθε χρονοσειράς και θα παρουσιάσουμε τα αντίστοιχα φάσματα. Τέλος, θα παραθέσουμε, υπό μορφή σχημάτων, τις τιμές για το σημαντικό ύψος, για διάφορα ποσοστά.

### 5.6.1 Παρουσίαση χρονοσειρών T1439\_1.6\_0.1\_ και T1440\_1.6.0.1 SB\_20\_R

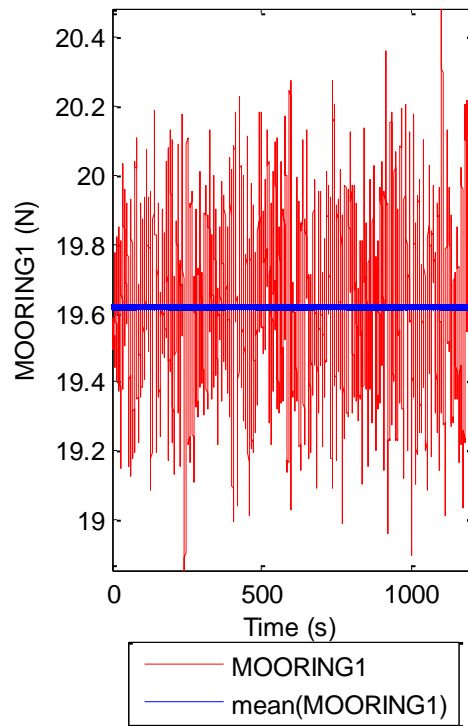
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουμε τις χρονοσειρές (με κόκκινο χρώμα) που προκύπτουν από κάθε όργανο μέτρησης, παρατηρώντας έτσι την εξέλιξή τους μέσα στο χρόνο. Επίσης, με την ευθεία μπλε γραμμή, στα ίδια σχήματα παραθέτουμε την αντίστοιχη μέση τιμή για κάθε χρονοσειρά.



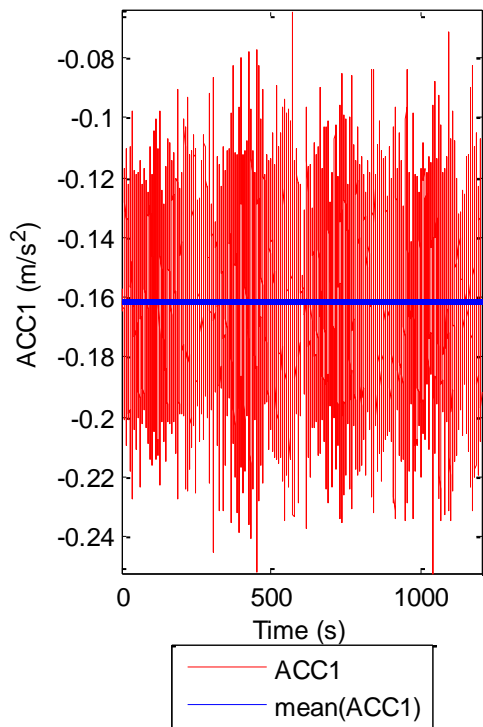
(3) Time History of COMP4Fx



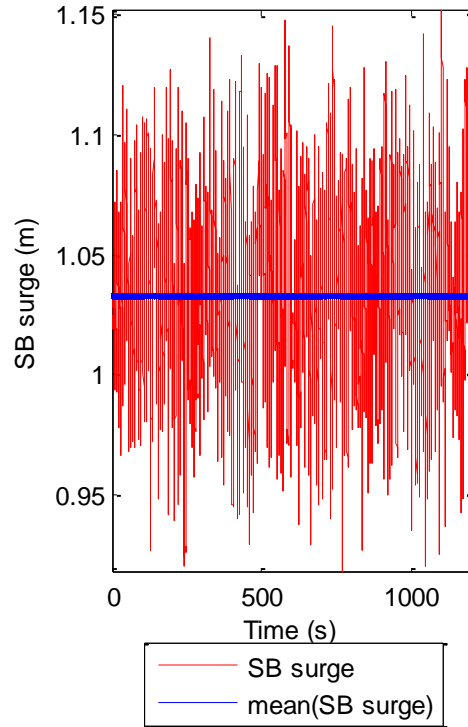
(4) Time History of MOORING1

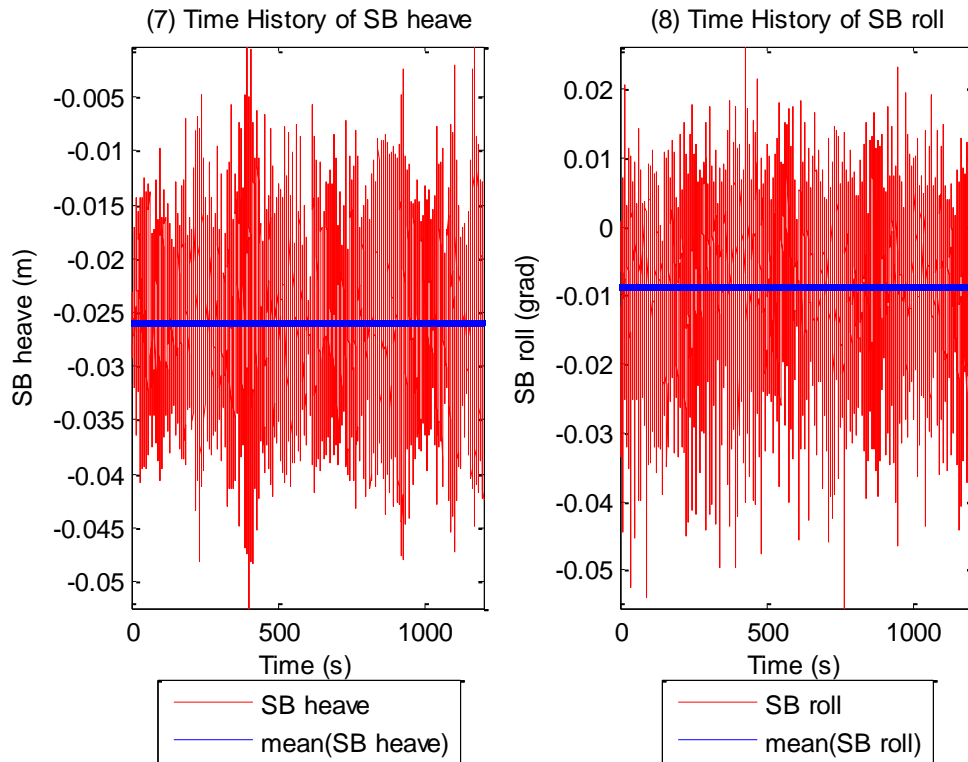


(5) Time History of ACC1



(6) Time History of SB surge





**Σχήματα 5.6.1 (1-8)** Χρονοσειρές (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις χρονοσειρές για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.6.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.6.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.6.1) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.6.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.6.1) (5), για τη μετατόπιση στη surge διεύθυνση, (Σχήμα 5.6.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.6.1) (7-8). Από τα σχήματα καθίσταται σαφής η μη επανάληψη μιας σταθερής κυματομορφής που είχαμε στην ανάλυση των γραμμικών κυματισμών, αλλά δε φαίνεται να υπάρχει κάποια εμφανής τάση.

### 5.6.2 Παρουσίαση στατιστικών αποτελεσμάτων SB\_20\_R

Τα χαρακτηριστικά του πειράματος που έχουν να κάνουν με τις παραμέτρους του κύματος και της λειτουργίας της Α/Γ αναγράφονται στον πίνακα 5.5.

<b>Πίνακας 5.5</b>		Χαρακτηριστικά Πειράματος	
Τύπος μοντέλου		SB	
Ύψος κύματος (m)		0.10	
Περίοδος κύματος (s)		1.6	
Τύπος κύματος		IRREGULAR	
Γωνία πρόσπτωσης κυμάτων (deg)		0	
Περιστροφή ή μη του Ρότορα		NROTATION	

Τα στατιστικά αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 5.6, με τη μέση τιμή στη 2η στήλη, ενώ ακολουθούν η ελάχιστη στην 3η, η μέγιστη στην 4η, η τυπική απόκλιση στην 5η στήλη και τέλος την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων του ύψους κύματος (Hrms). Κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο παρουσιάστηκε ο αντίστοιχος πίνακας για την TLP, συμπληρώθηκε και ο πίνακας 5.7 για τη SB. Πιο αναλυτικά, παρατίθενται ο συντελεστής ασυμμετρίας, ο συντελεστής κύρτωσης, καθώς και το αποτέλεσμα από το μη παραμετρικό έλεγχο για την κανονικότητα των χρονοσειρών και τον έλεγχο της μοναδιαίας ρίζας (το h, και στους δύο ελέγχους, βγήκε ίσο με μονάδα, γεγονός που συνεπάγεται απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης).

<b>Πίνακας 5.6</b>					
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστη τιμή (Min)	Μέγιστη τιμή (Max)	Hrms
Wg1 (m)	-0.0053	0.0480	-0.1792	0.1871	0.1334
Wg2 (m)	0.0009	0.0441	-0.1390	0.2011	0.1225
Wg3 (m)	0.0079	0.0372	-0.1220	0.1829	0.1035
Wg4 (m)	0.0013	0.0001	0.0011	0.0016	0.0002
Wg5 (m)	-0.0005	0.0410	-0.1364	0.1783	0.0384
Wg6 (m)	0.0005	0.0419	-0.1387	0.2357	0.0393
Wg7 (m)	0.0080	0.0322	-0.0925	0.1448	0.0303
Wg8 (m)	0.0028	0.0383	-0.1220	0.1739	0.0360
Wg9 (m)	0.0064	0.0348	-0.1070	0.1620	0.0326

Wg10 (m)	0.0023	0.0389	-0.1295	0.1663	0.0365
Wg11 (m)	0.0028	0.0398	-0.1415	0.1722	0.0373
6comp_Fx (N)	-20.7114	3.7868	-33.4296	-4.8401	3.7165
6comp_Fy(N)	-8.1039	1.5831	-14.8329	-0.3885	1.5554
6comp_Fz (N)	34.0798	1.0737	22.6305	34.3768	1.3661
6comp_Mx (N*m)	-0.2400	2.1718	-10.1274	10.2350	2.2485
6comp_My (N*m)	-35.8134	5.9048	-59.3484	-10.4726	6.2673
6comp_Mz (N*m)	-0.7482	0.0931	-1.1922	-0.2314	0.1942
4comp_Fx (N)	-17.1430	2.9620	-28.6786	-4.5684	3.7176
4comp_Fy (N)	-0.1807	1.0586	-5.3158	4.6799	1.3137
4comp_Mx (N*m)	1.7697	0.1021	1.3260	2.2150	0.1553
4comp_My (N*m)	-1.0709	0.3006	-2.4310	0.2328	0.4905
Mooring_1 (N)	19.6229	0.2238	18.8556	20.4820	0.1270
Mooring_2(N)	11.1819	0.1704	10.5303	11.8226	0.1113
Mooring_3 (N)	11.3594	0.1195	10.9309	11.7585	0.0648
Acc_1 (G)	-0.1609	0.0256	-0.2519	-0.0645	0.0312
Acc_2 (G)	0.0129	0.0189	-0.0711	0.1093	0.0256
Acc_3 (G)	-0.9459	0.0047	-0.9656	-0.9241	0.0062
SB_x (m)	1.0334	0.0346	0.9172	1.1516	0.0279
SB_y (m)	0.2868	0.0151	0.2189	0.3431	0.0128
SB_z (m)	-0.0260	0.0068	-0.0525	-0.0003	0.0055

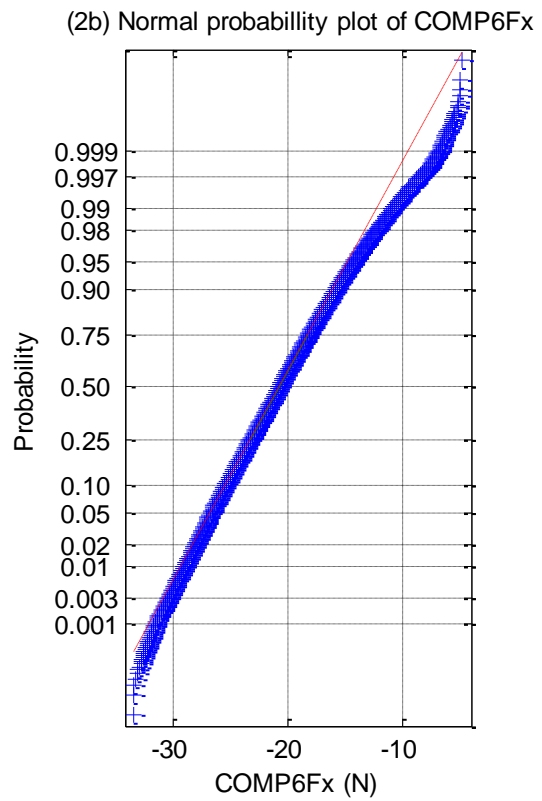
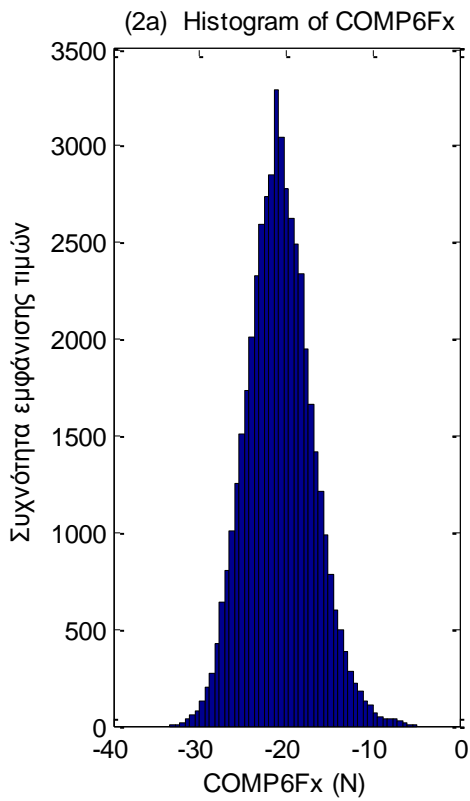
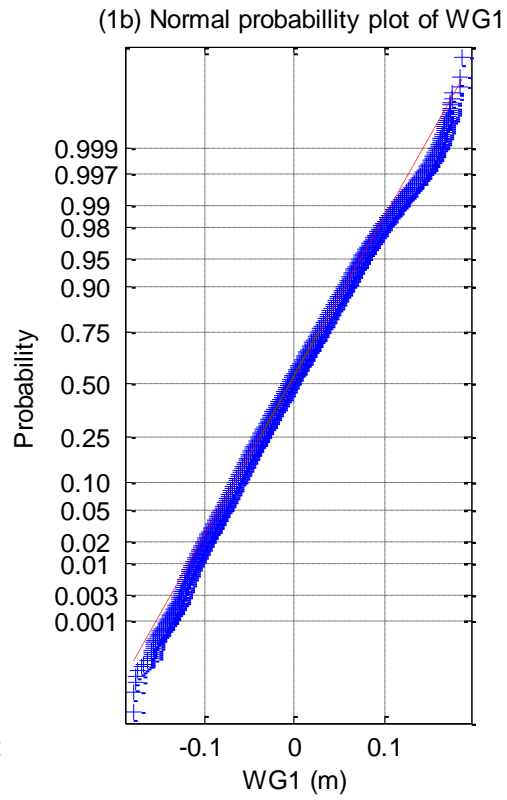
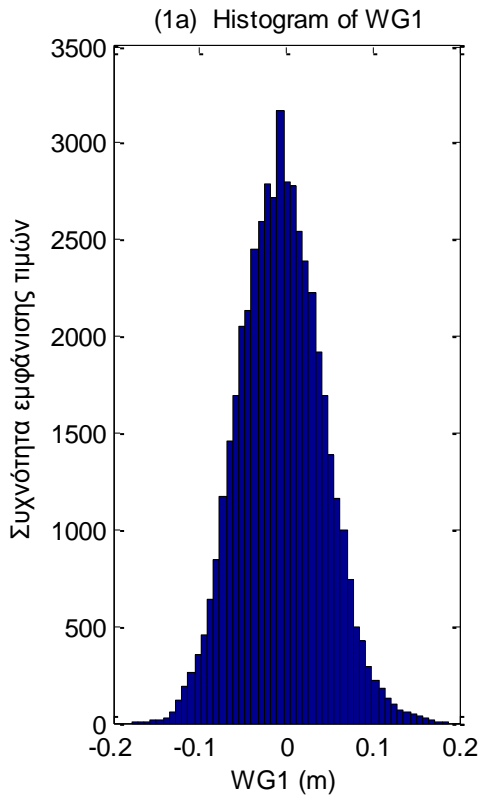


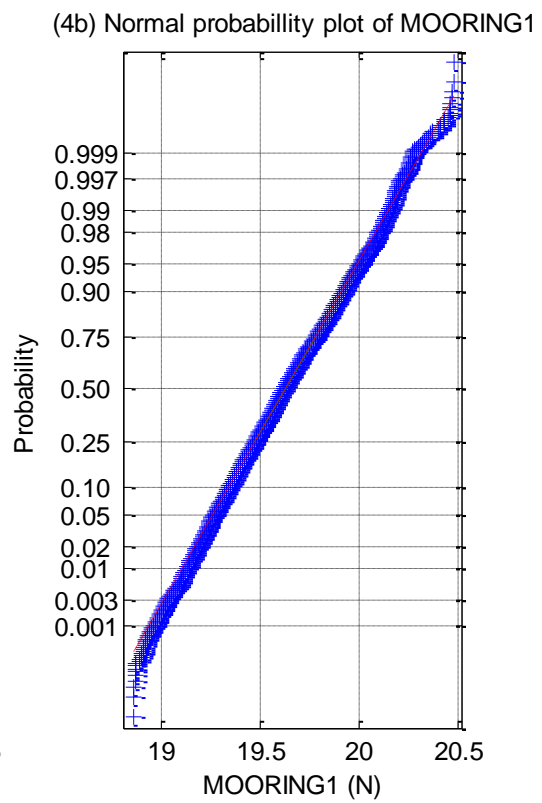
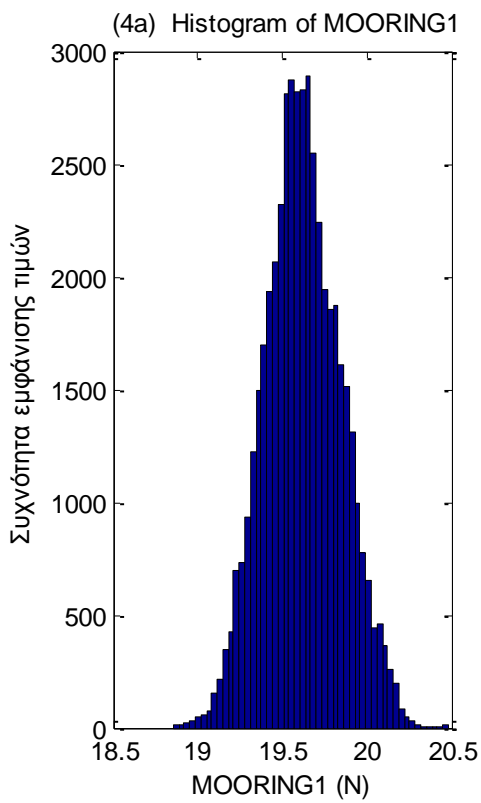
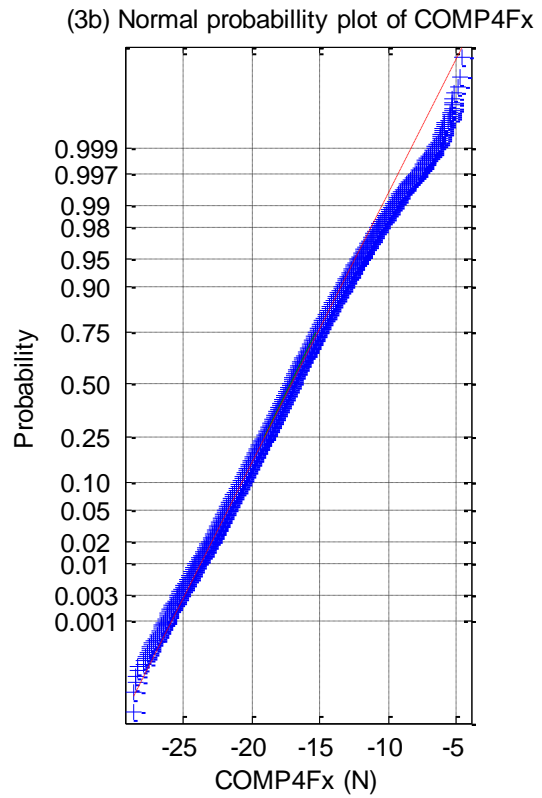
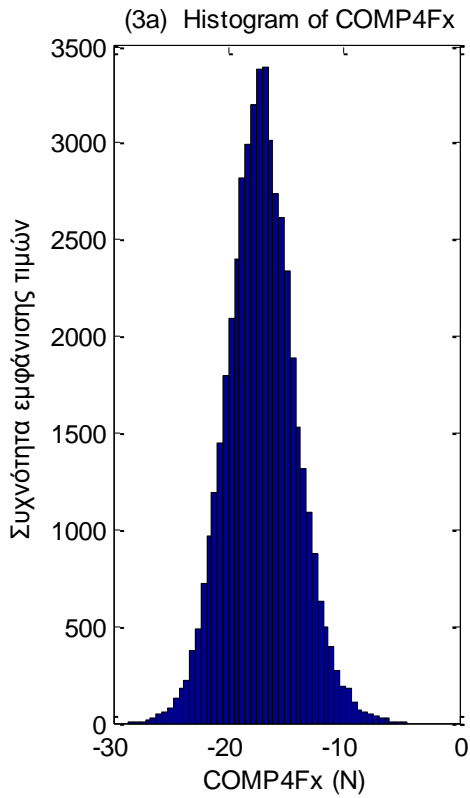
SB_roll (grad)	-0.0087	0.0087	-0.0555	0.0262	0.0103
SB_pitch (grad)	0.4139	0.0148	0.3593	0.4644	0.0130
SB_yaw (grad)	0.1114	0.1499	-0.5940	0.7997	0.1543

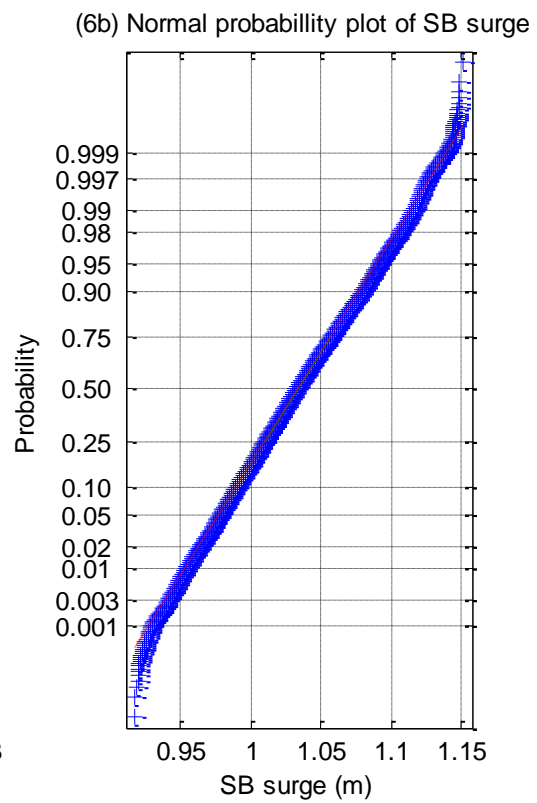
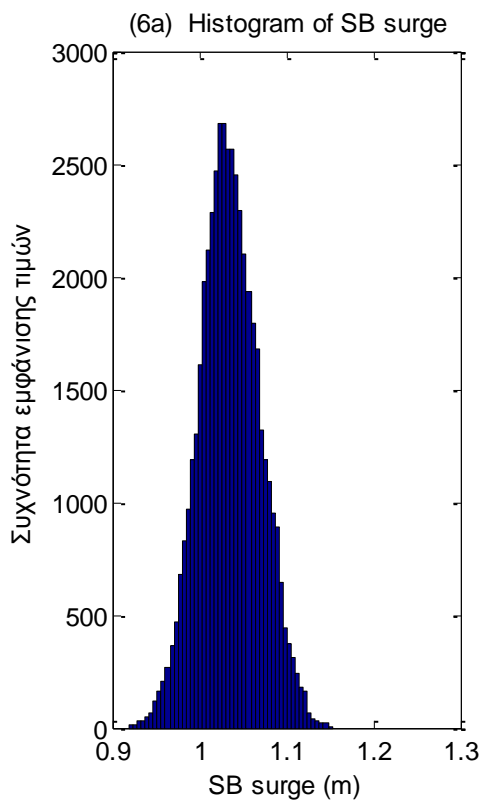
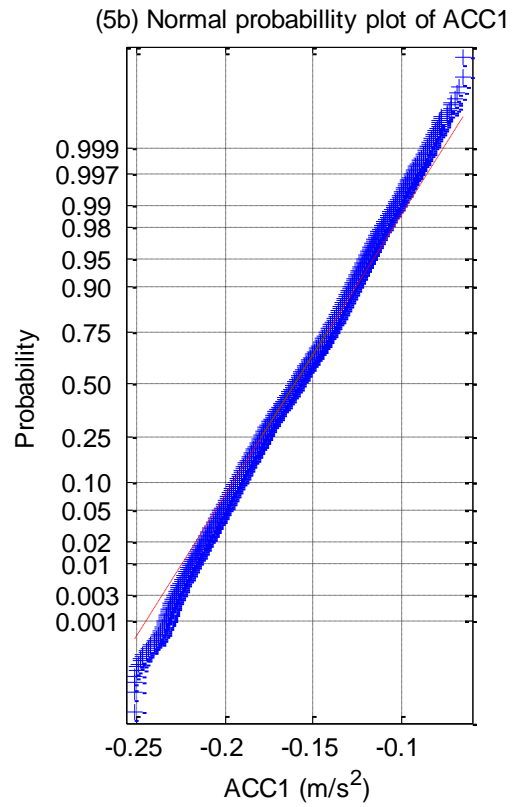
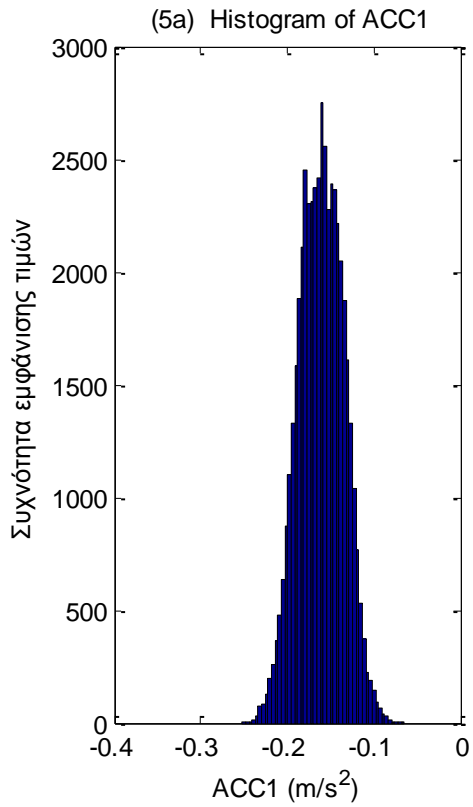
<b>Πίνακας 5.7</b>				
	Συντελεστής Ασυμμετρίας	Συντελεστής Κυρτότητας	1_sample_k.s.test P value	Dickey Fuller Test
Wg1 (m)	0.1628	3.0767	1	1
Wg2 (m)	0.2045	3.1919	1	1
Wg3 (m)	0.2077	3.1582	1	1
Wg4 (m)	0.0217	2.7376	1	1
Wg5 (m)	0.1851	3.0902	1	1
Wg6 (m)	0.2186	3.1699	1	1
Wg7 (m)	0.2130	3.1401	1	1
Wg8 (m)	0.1761	3.1268	1	1
Wg9 (m)	0.1410	3.0974	1	1
Wg10 (m)	0.1483	3.1219	1	1
Wg11 (m)	0.1449	3.0893	1	1
6comp_Fx (N)	0.2482	3.2919	1	1
6comp_Fy(N)	0.2190	3.4286	1	1
6comp_Fz (N)	-4.7480	29.1610	1	1
6comp_Mx (N*m)	0.0646	3.0913	1	1
6comp_My (N*m)	0.1337	3.4927	1	1
6comp_Mz (N*m)	0.0138	3.2291	1	1

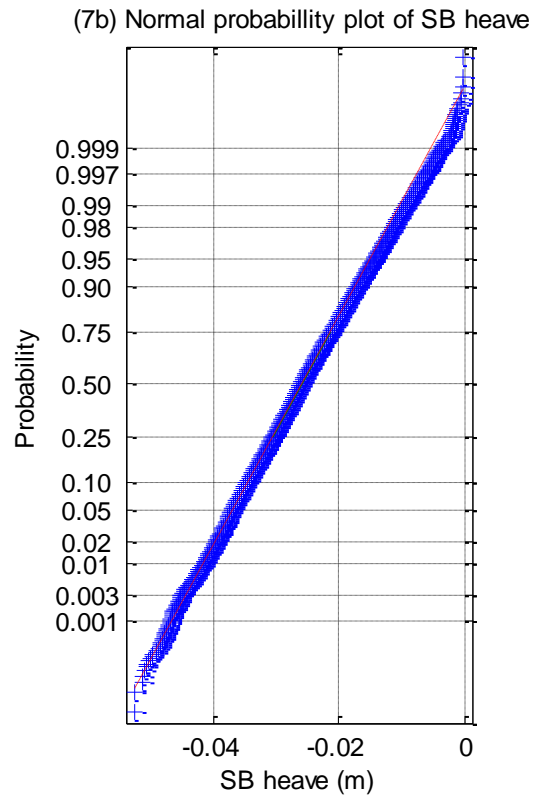
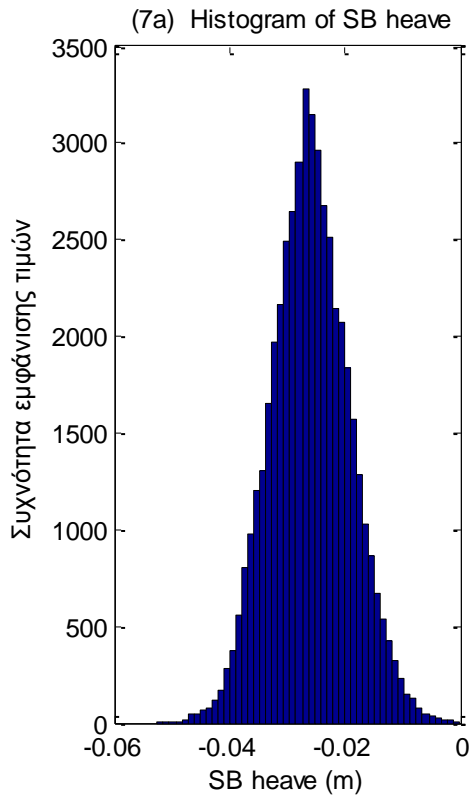
4comp_Fx (N)	0.1406	3.3438	1	1
4comp_Fy (N)	-0.0665	3.1251	1	1
4comp_Mx (N*m)	0.0418	2.9879	1	1
4comp_My (N*m)	-0.0278	3.5530	1	1
Mooring_1 (N)	0.1031	2.8704	1	1
Mooring_2(N)	-0.1285	3.0741	1	1
Mooring_3 (N)	0.0386	3.0517	1	1
Acc_1 (G)	-0.0309	2.7055	1	1
Acc_2 (G)	-0.0250	3.1212	1	1
Acc_3 (G)	0.0727	3.3636	1	1
SB_x (m)	0.0861	2.9128	1	1
SB_y (m)	0.0108	3.0736	1	1
SB_z (m)	0.0916	3.0937	1	1
SB_roll (grad)	-0.1878	3.3269	1	1
SB_pitch (grad)	0.0033	3.1067	1	1
SB_yaw (grad)	-0.0298	3.3071	1	1

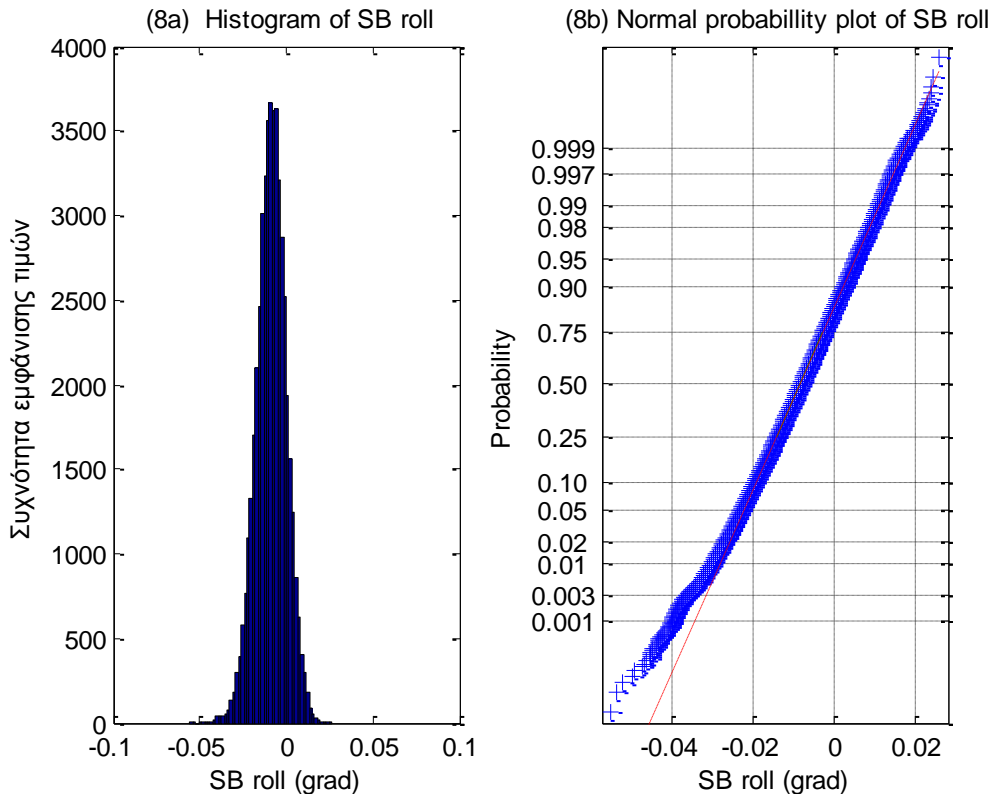
Στα σχήματα που ακολουθούν παραθέτουμε στο a) τα ιστογράμματα και στο b) τα γραφήματα ελέγχου κανονικότητας από τις χρονοσειρές της προηγούμενης ενότητας.











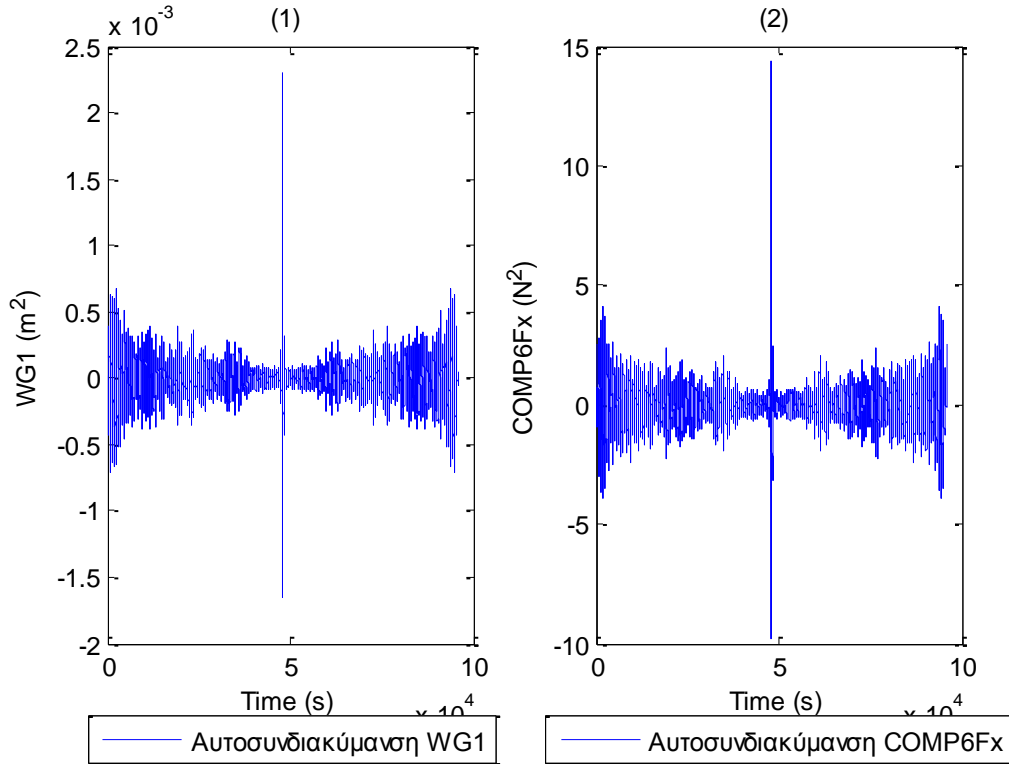
**Σχήματα 5.6.2 (1-8)** α) Ιστογράμματα και β) γραφήματα ελέγχου κανονικότητας για (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα Ιστογράμματα και τα γραφήματα ελέγχου κανονικότητας για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.6.2) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.6.2) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.6.2) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.6.2) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.6.2) (5), για τη μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (Σχήμα 5.6.2) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.6.2) (7-8).

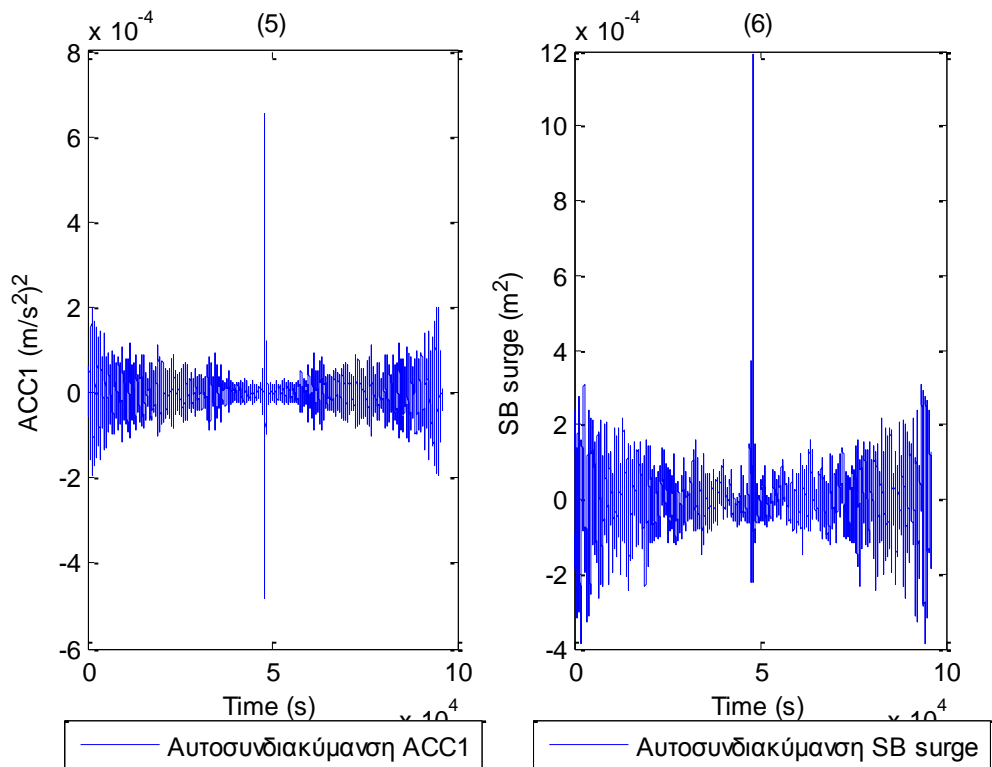
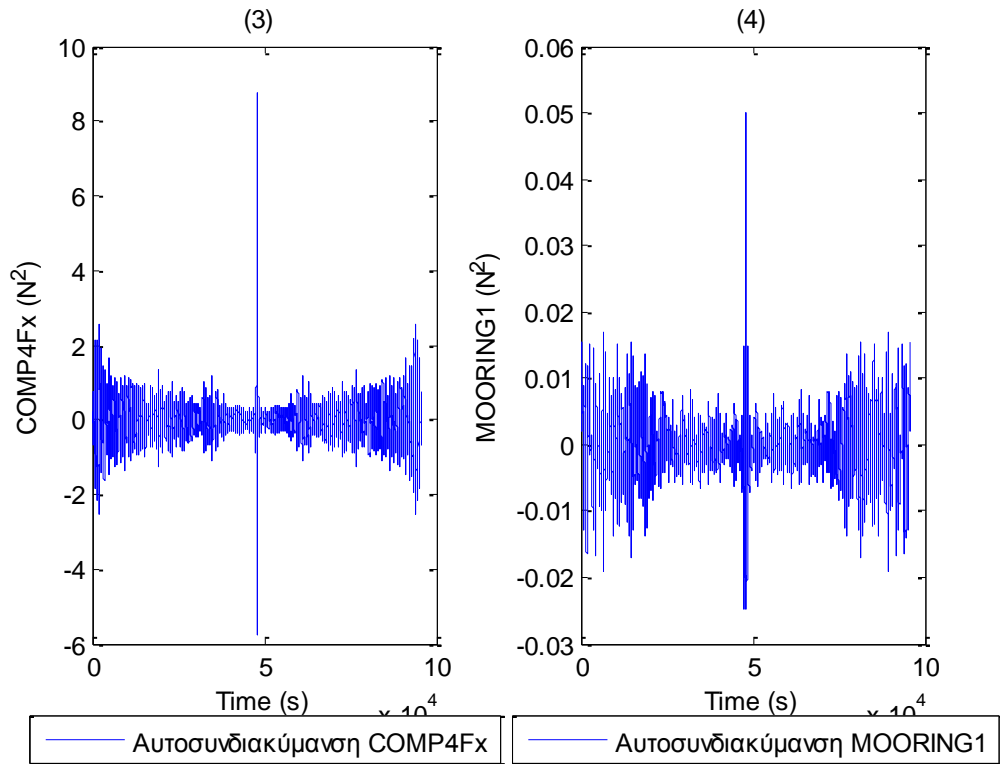
Κατόπιν των αποτελεσμάτων του ελέγχου για την κανονικότητα (Πίνακας 5.5), απερρίφθη η μηδενική υπόθεση για ύπαρξη κανονικότητας των δεδομένων, για 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Όμως, από τα σχήματα (5.6.2) προκύπτουν η ύπαρξη μιας κανονικότητας και το κεντράρισμα γύρω από τη μέση τιμή (εξαιρουμένων των χρονοσειρών WG4, 6comp Fz, επειδή ενέσκηψε κάποιο πρόβλημα στα δύο όργανα, και της χρονοσειράς για την περιστροφή Rotation, επειδή η περιστροφή έγινε με σταθερό ρυθμό). Επιπλέον, όσον αφορά τα δεδομένα που απορρέουν από τα όργανα μέτρησης, σε κάποιες περιπτώσεις έχουμε θετική, σε άλλες αρνητική συμμετρία, ενώ παρατηρούμε και τις τρεις περιπτώσεις κύρωσης.

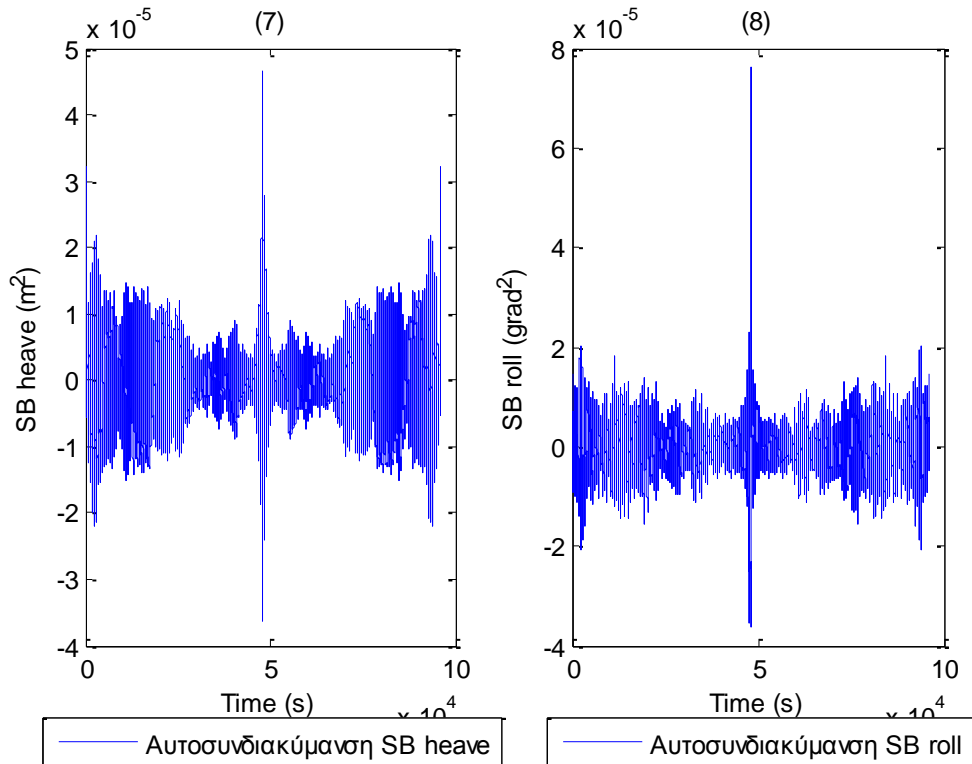
### 5.6.3 Στοχαστική ανάλυση χρονοσειράς πειράματος T1439\_1.6\_0.1 και T1440\_1.6.0.1 TLP\_20\_R

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, του γραφήματος αυτο-συνδιακύμανσης για κάθε χρονοσειρά (για τη SB) που προκύπτει μέσω των δεδομένων από κάθε όργανο μέτρησης.









**Σχήματα 5.6.3 (1-8)** Συναρτήσεις Αυτοσυνδιακύμανσης για (1) ενός από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις συναρτήσεις αυτοσυνδιακύμανσης για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.6.3) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.6.3) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.6.3) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.6.3) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.6.3) (5), για τη μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (Σχήμα 5.6.3) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.6.3) (7-8).

Από τα σχήματα προκύπτει (όπως και στην προηγούμενη ενότητα για την TLP) ότι η αυτο-συνδιακύμανση είναι συμμετρική ως προς την τιμή της χρονικής μετατόπισης. Εν ολίγοις, φαίνεται απ' όλα τα γραφήματα ότι η αυτο-συνδιακύμανση για μία θετική χρονική μετατόπιση είναι ταυτόσημη με την αυτο-συνδιακύμανση για μία αρνητική χρονική μετατόπιση.

### 5.7 Παρουσίαση φάσματος για την περίπτωση SB\_20\_R

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στα φάσματα που προκύπτουν από τις χρονολογικές σειρές των προηγούμενων ενοτήτων. Έτσι, για την παραγωγή του φάσματος, εξαιτίας των λόγων που αναφέρθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα για την TLP, χρησιμοποιούμε τον υπολογισμό της ντετερμινιστικής συνάρτησης αυτο-συνδιακύμανσης, η οποία ταυτίζεται με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η μέση τιμή του σήματος είναι μηδέν.

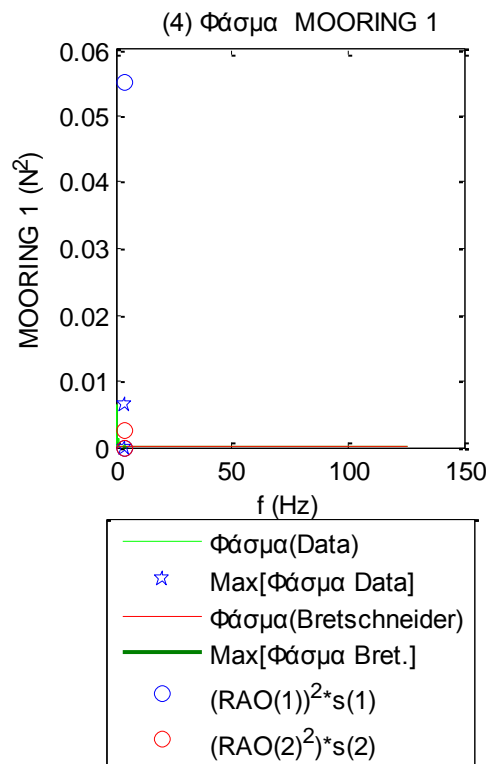
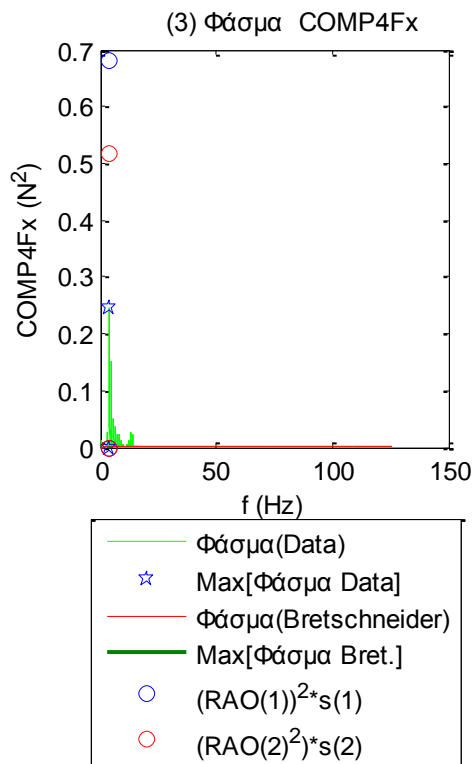
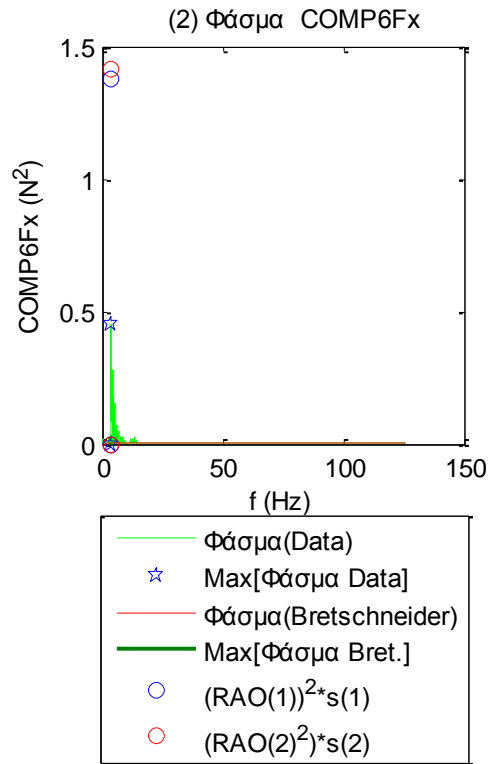
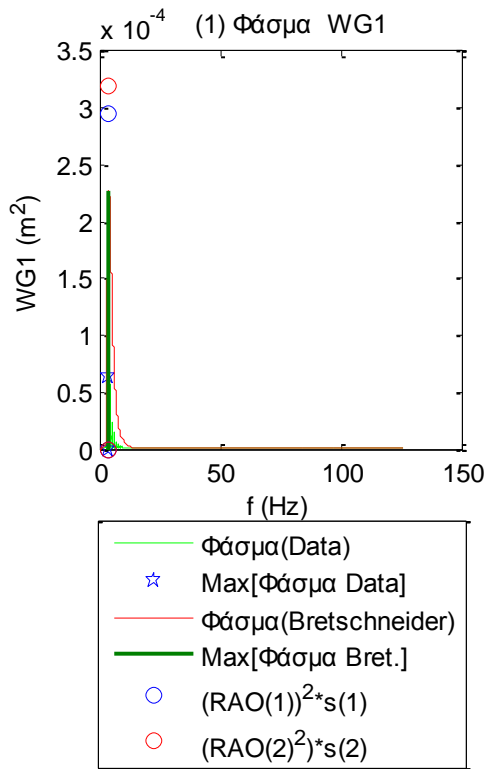
Όλα τα παραπάνω είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν χάρη στο ότι η όλη διαδικασία είναι στάσιμη (ή ασθενώς στάσιμη), δεδομένου ότι η μέση τιμή της συνάρτησης είναι ανεξάρτητη του χρόνου και εργοδική, μιας και η μέση τιμή του χρόνου ταυτίζεται με τη μέση τιμή της ολότητας.

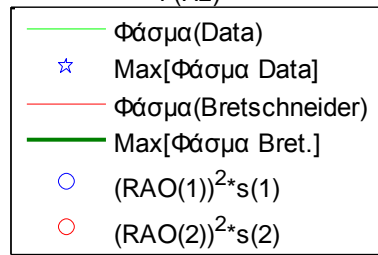
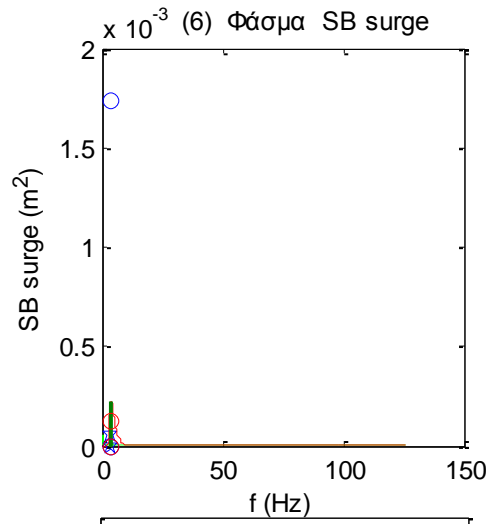
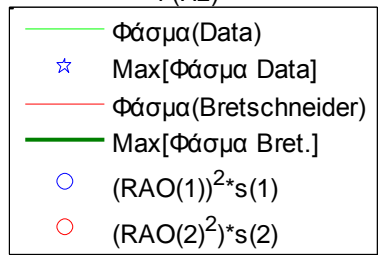
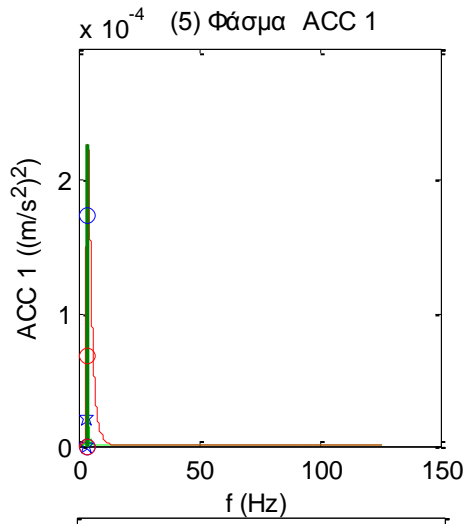
Στον πίνακα 5.8 παρατίθενται, στη δεύτερη στήλη, τα αποτελέσματα για τις τιμές των RAO's όσον αφορά το πείραμα T1424, με περίοδο  $T=1.6$  s και ύψος κορυφής  $H_s=0.025$  m, ενώ στην τρίτη στήλη του ίδιου πίνακα παρουσιάζουμε τα αντίστοιχα RAO's από το πείραμα T1424, με περίοδο  $T=1.8$  s και αντίστοιχο ύψος κορυφής  $H_s=0.1$  m. Τα αποτελέσματα αυτά είναι εκ των ων ουκ άνευ για τον προγραμματισμό, ώστε να επιτευχθεί μία σύγκριση με την ανάλυση του φάσματος.

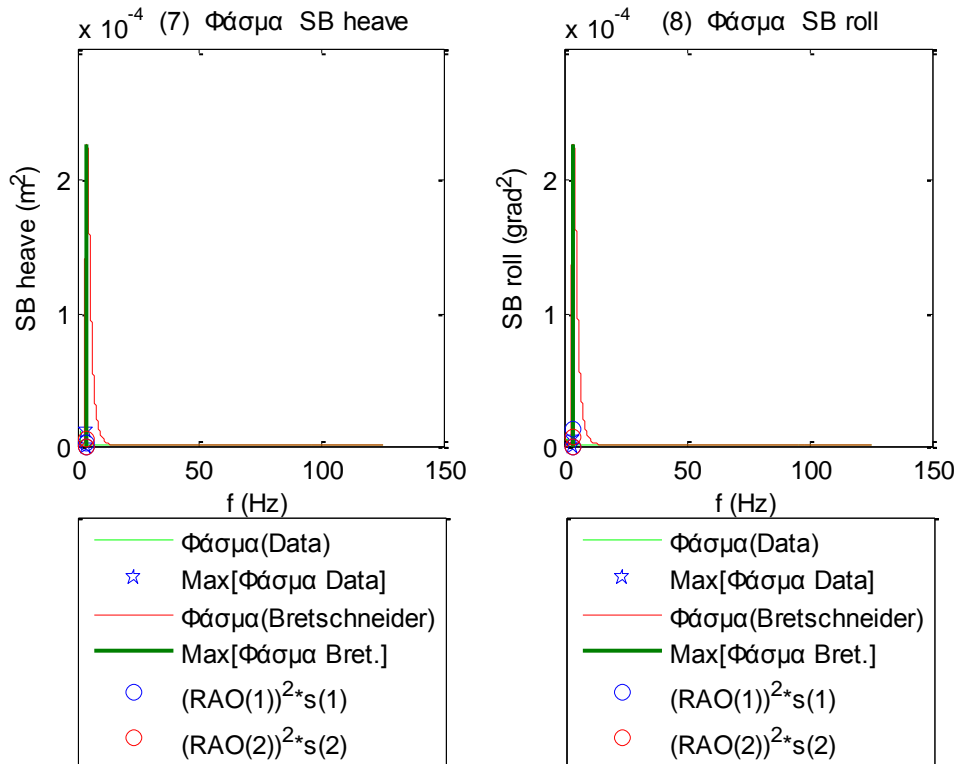
<b>Πίνακας 5.8</b>		
	πείραμα T1424 $T=1.6$ s , $H_s=0.025$ m	πείραμα T1427 $T=1.8$ s , $H_s=0.1$ m
Wg1	RAOwg1_1=1.1362	RAOwg1_2=1.2841
Wg2	RAOwg2_1=1.3137	RAOwg2_2=1.1454
Wg3	RAOwg3_1=0.9251	RAOwg3_2=0.9160
Wg4	RAOwg4_1=0.0065	RAOwg4_2=0.0025
Wg5	RAOwg5_1=1.0539	RAOwg5_2=0.9766
Wg6	RAOwg6_1=1.1161	RAOwg6_2=1.1223
Wg7	RAOwg7_1=0.8064	RAOwg7_2=0.8177
Wg8	RAOwg8_1=1.0000	RAOwg8_2=1.0000
Wg9	RAOwg9_1=0.9523	RAOwg9_2=0.9315
Wg10	RAOwg10_1=1.0870	RAOwg10_2=1.0470
Wg11	RAOwg11_1=1.1279	RAOwg11_2=1.0799

6comp_Fx	RAOCOMP6Fx_1=77.6634	RAOCOMP6Fx_2=85.5548
6comp_Fy	RAOCOMP6Fy_1=28.7740	RAOCOMP6Fy_2=23.0487
6comp_Fz	RAOCOMP6Fz_1=23.4712	RAOCOMP6Fz_2=39.1463
6comp_Mx	RAOCOMP6Mx_1=43.1598	RAOCOMP6Mx_2=29.6309
6comp_My	RAOCOMP6My_1=88.9390	RAOCOMP6My_2=101.7610
6comp_Mz	RAOCOMP6Mz_1=1.6200	RAOCOMP6Mz_2=0.7952
4comp_Fx	RAOCOMP4Fx_1=54.6289	RAOCOMP4Fx_2=51.6878
4comp_Fy	RAOCOMP4Fy_1=20.0897	RAOCOMP4Fy_2=14.3705
4comp_Mx	RAOCOMP4Mx_1=3.2256	RAOCOMP4Mx_2=1.1291
4comp_My	RAOCOMP4My_1=5.9823	RAOCOMP4My_2=2.6900
Mooring_1	RAOMooring1_1=15.5620	RAOMooring1_2=3.5960
Mooring_2	RAOMooring2_1=5.9511	RAOMooring2_2=2.9657
Mooring_3	RAOMooring3_1=5.3044	RAOMooring3_2=1.7197
Acc_1	RAOAcc1_1=0.8716	RAOAcc1_2=0.5893
Acc_2	RAOAcc2_1=0.2867	RAOAcc2_2=0.2032
Acc_3	RAOAcc3_1=0.1010	RAOAcc3_2=0.1115
TLP_x	RAOTLP_x_1=2.7567	RAOTLP_x_2=0.8088
TLP_y	RAOTLP_y_1=0.5447	RAOTLP_y_2=0.2182
TLP_z	RAOTLP_z_1=0.1069	RAOTLP_z_2=0.1550
TLP_roll	RAOroll_1=0.2317	RAOroll_2=0.1890
TLP_pitch	RAOpitch_1=0.8710	RAOpitch_2=0.3088
TLP_yaw	RAOyaw_1=4.6369	RAOyaw_2=4.0917

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις ενότητες που ακολουθούν, των γραφημάτων με τα φάσματα για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει βάσει των δεδομένων από κάθε όργανο μέτρησης.







**Σχήματα 5.7.1 (1-8)** Φάσματα για (1) ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις συναρτήσεις φάσματος για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.7.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.7.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.7.1) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.7.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.7.1) (5), για τη μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (Σχήμα 5.7.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.7.1) (7-8).

Με το κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται το φάσμα Bretschneider, με το πράσινο αναπαρίσταται το φάσμα του κύματος, με την μπλε γραμμή αναπαρίσταται το σημείο όπου το φάσμα του κύματος παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή ( $\omega_p$ ), του, ενώ με τους μπλε και κόκκινους κύκλους το φάσμα που προκύπτει με τη βοήθεια του αντίστοιχου RAO.

Παρατηρούμε ότι τόσο το φάσμα Bretschneider όσο και το φάσμα από κάθε χρονοσειρά, και κυρίως αυτό των 11 οργάνων μέτρησης του ύψους κύματος, παρουσιάζουν τη μέγιστη συχνότητα την ίδια χρονική στιγμή. Συν τοις άλλοις, μπορούμε να πούμε ότι τα περισσότερα φάσματα είναι φάσματα στενής λωρίδας, όπως το φάσμα Bretschneider, όπου η φασματική μάζα είναι απόλυτα συγκεντρωμένη

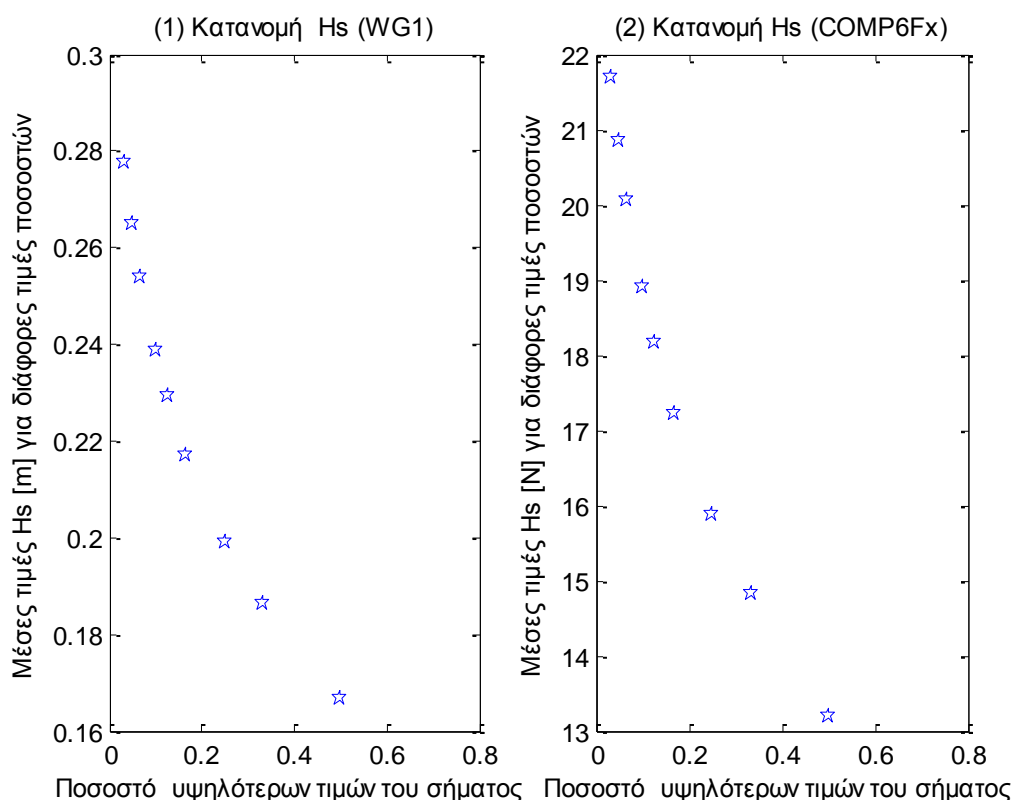
γύρω από τη συχνότητα κορυφής, γεγονός που αποδεικνύεται από τους υπολογισμούς των τιμών φάσματος από τα RAO's.

### 5.8 Κατανομή σημαντικού ύψους Hs για την περίπτωση SB\_20\_R

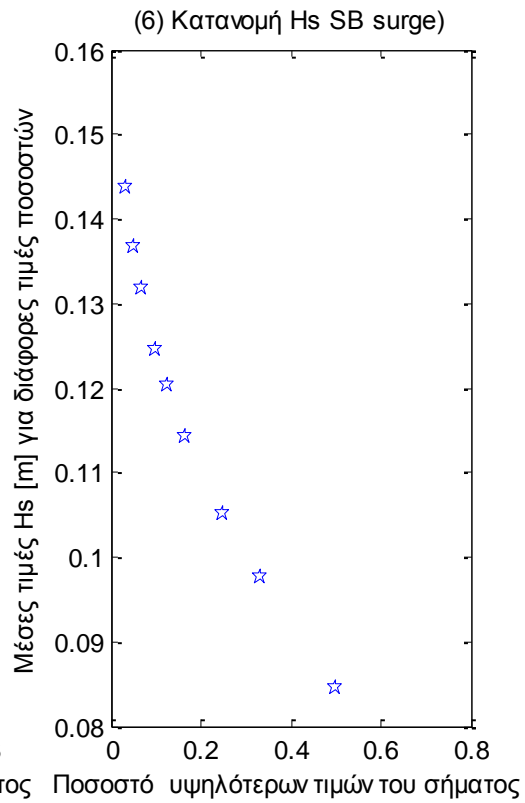
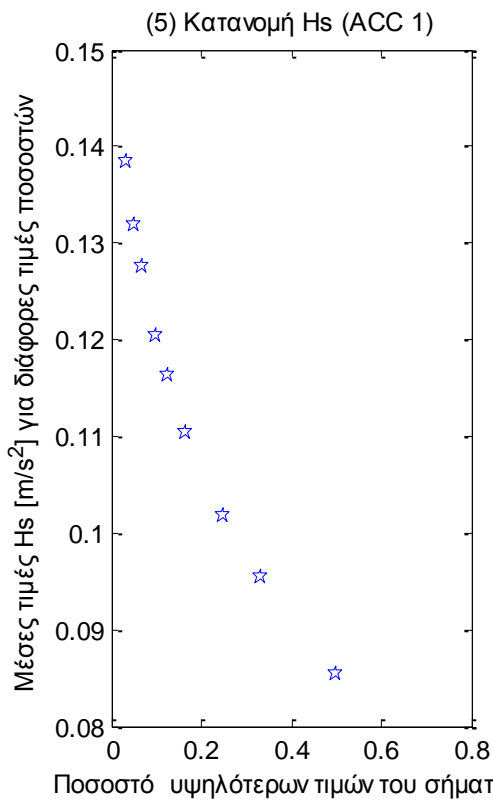
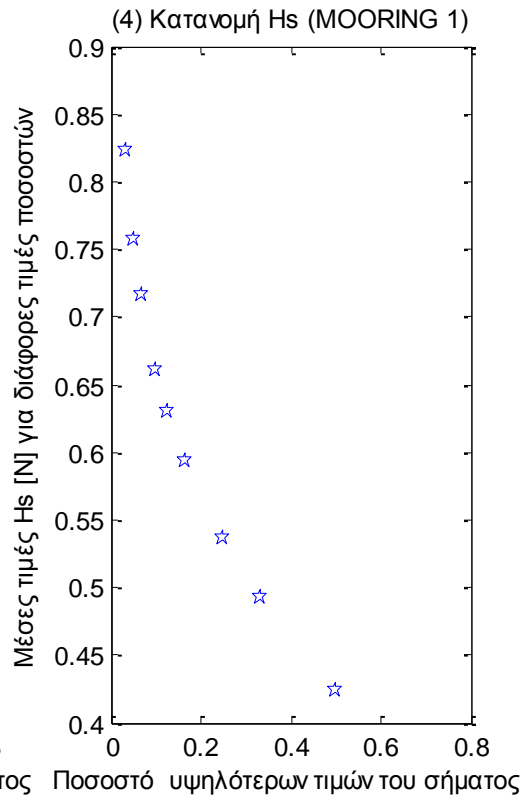
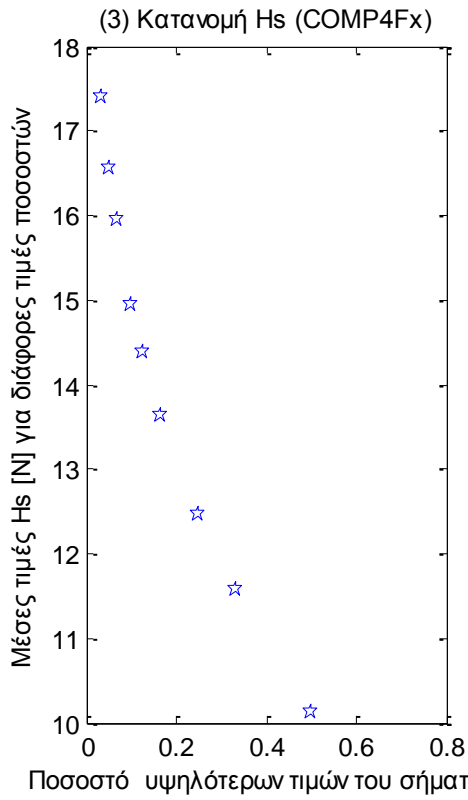
Το επόμενο ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της RMS τιμής της σημαντικής και της μέσης τιμής των k υψηλότερων τιμών του σήματος, όπου  $k = [1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15, 1/30]$ . Αυτό θα γίνει με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο ορίστηκαν, στην αντίστοιχη προηγούμενη ενότητα, για την TLP τα ποσοστά  $1/3, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15$  και  $1/30$ .

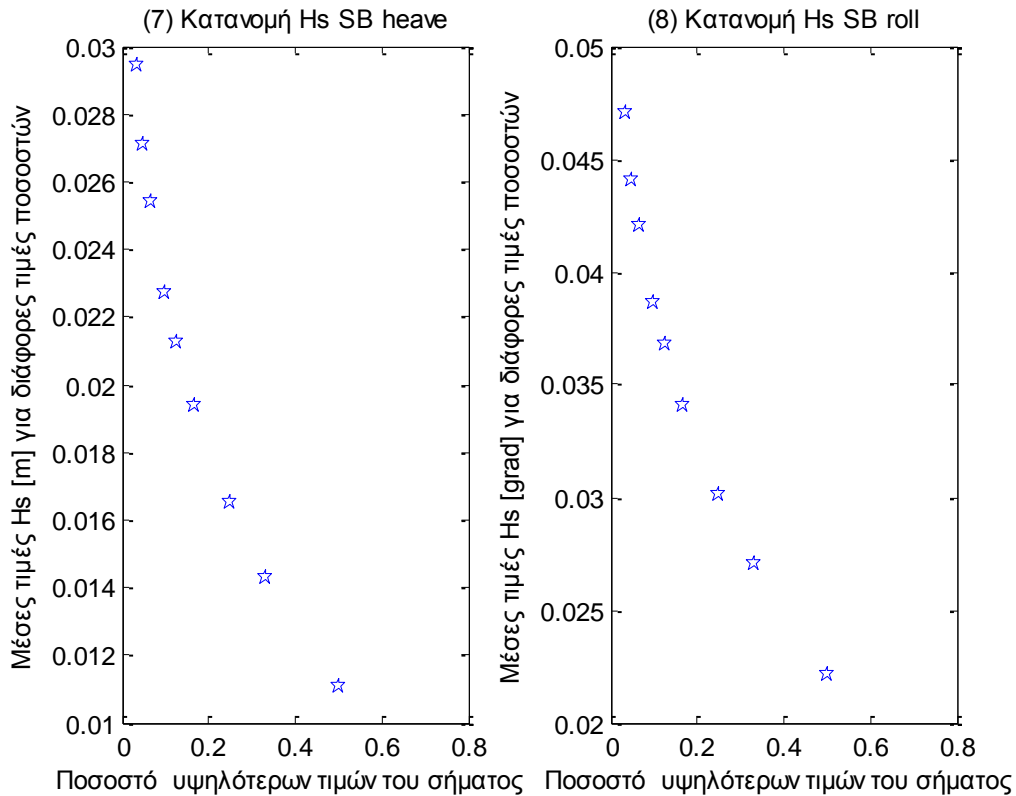
Στη συνέχεια υπολογίζουμε το σημαντικό ύψος Hs για 8 τιμές, ώστε να τα τοποθετήσουμε όλα σε κοινό γράφημα και να παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται το σημαντικό ύψος καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος.

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, των γραφημάτων για την κατανομή του σημαντικού ύψους Hs για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει από τα δεδομένα κάθε οργάνου μέτρησης.









**Σχήματα 5.8.1 (1-8)** Κατανομή σημαντικού ύψους Hs για (1) ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος, (2) της δύναμης στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) της δύναμης στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

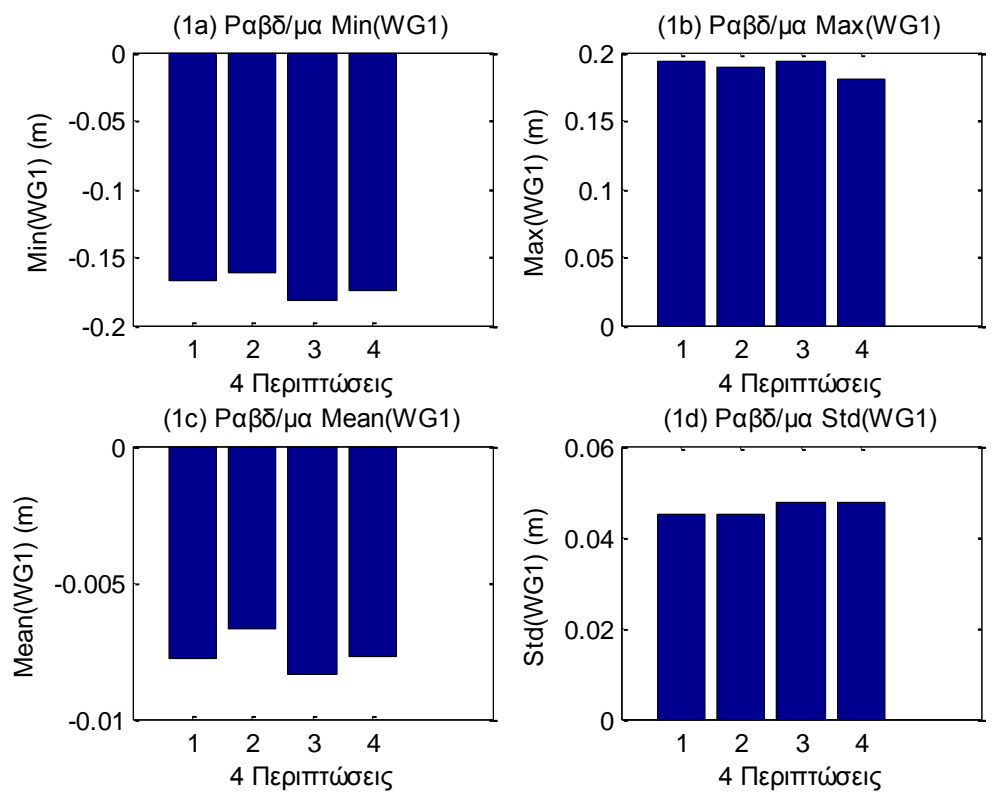
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τη κατανομή σημαντικού ύψους Hs για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.8.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.8.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.8.1) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.8.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.8.1) (5), για τη μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (Σχήμα 5.8.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.8.1) (7-8).

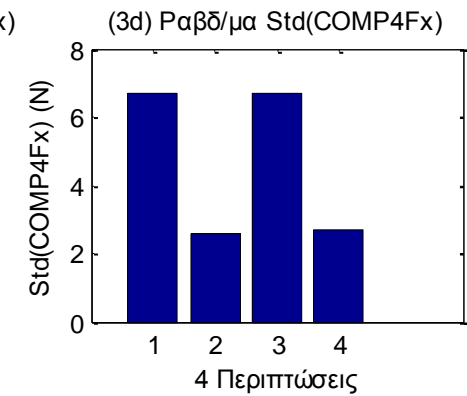
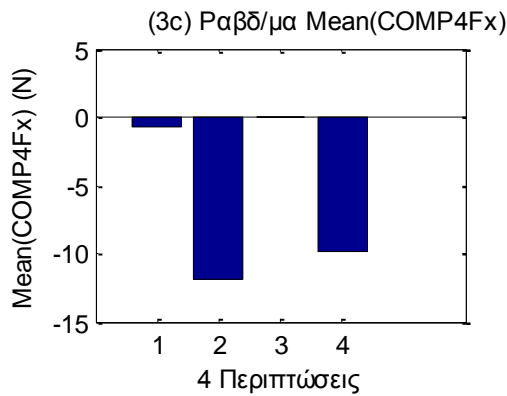
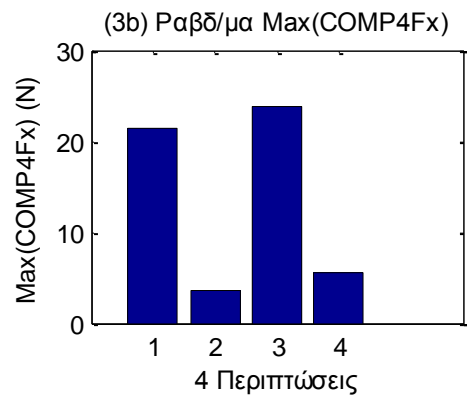
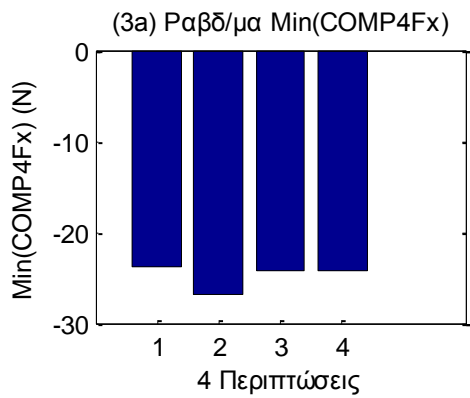
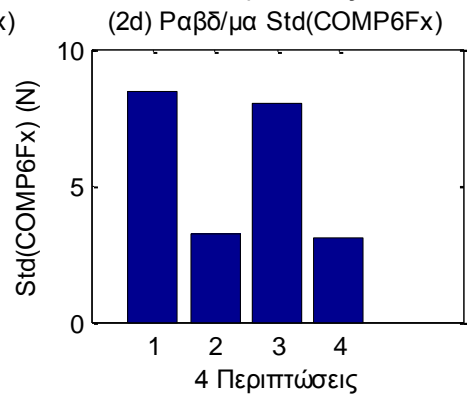
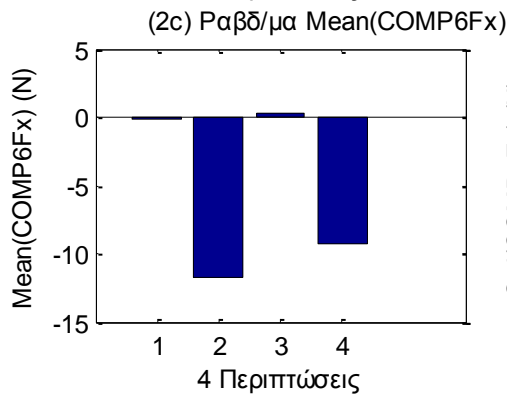
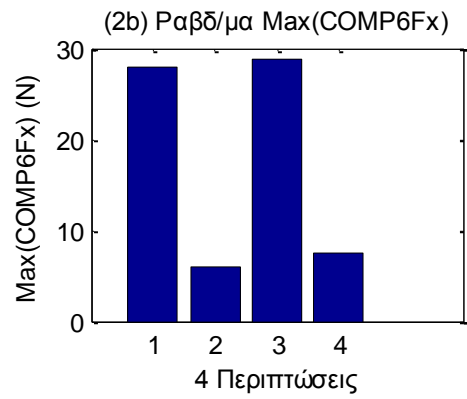
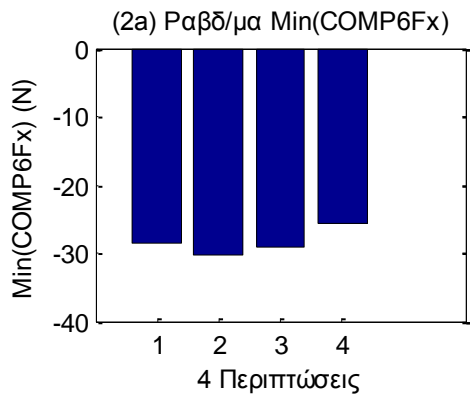
Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος που χρησιμοποιούμε, αυξάνεται η τιμή του σημαντικού ύψους Hs (αναμενόμενο αποτέλεσμα). Επιπροσθέτως, αυτή η αύξηση για όλα τα όργανα φαίνεται να είναι γραμμική.

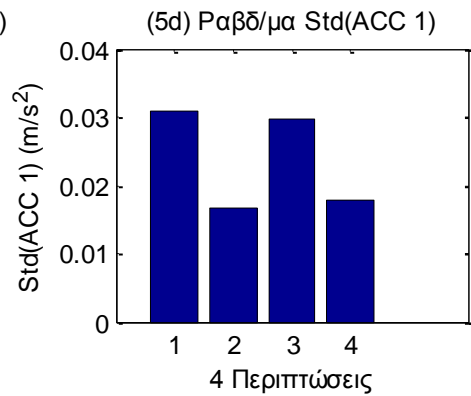
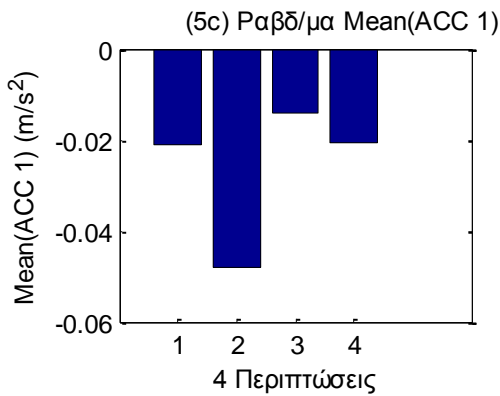
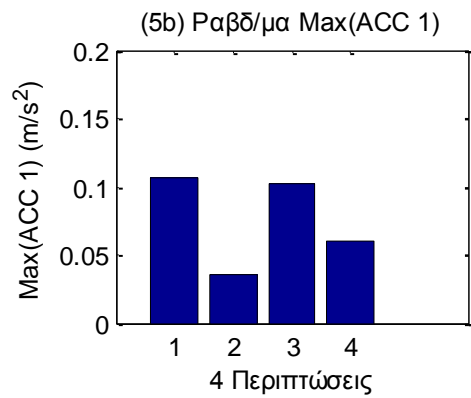
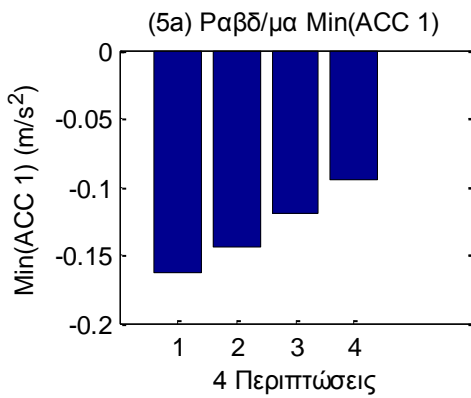
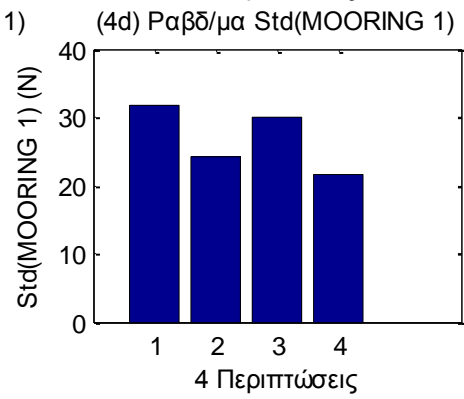
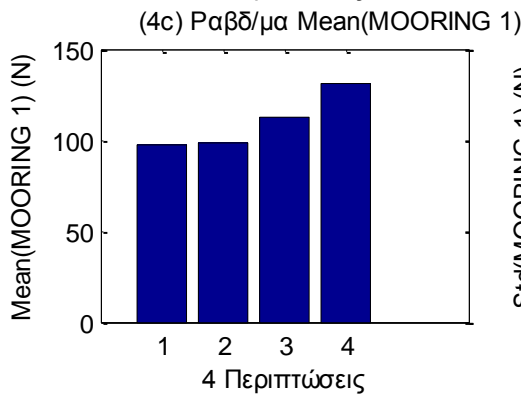
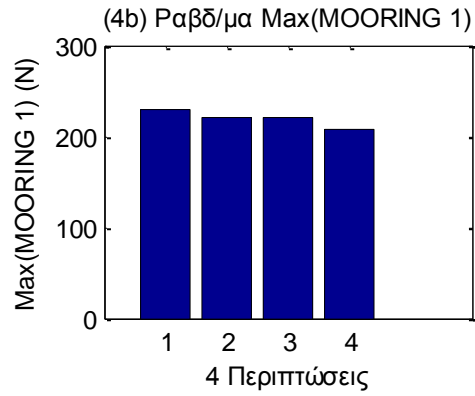
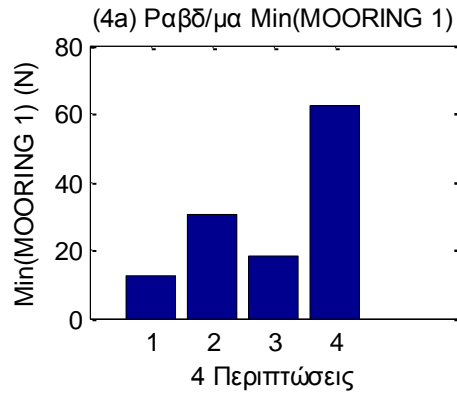
### 5.9 Σύγκριση ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης για τέσσερις περιπτώσεις

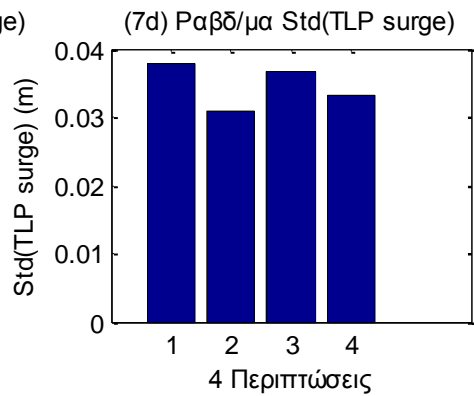
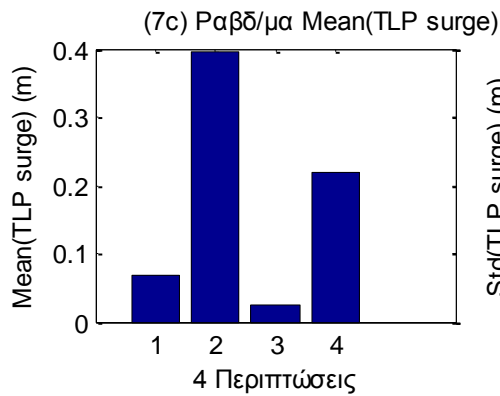
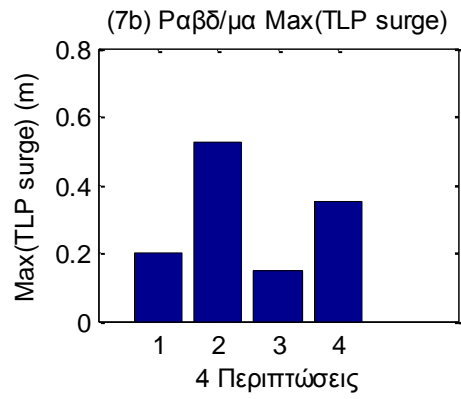
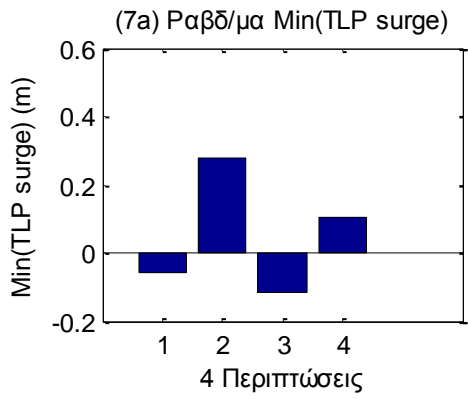
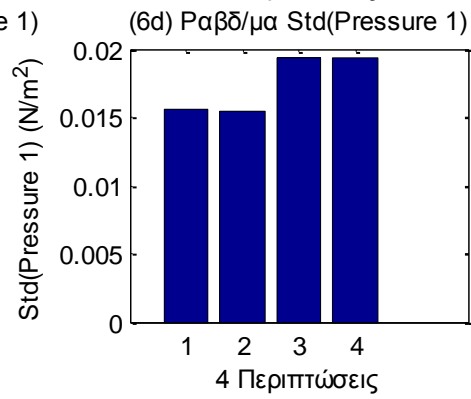
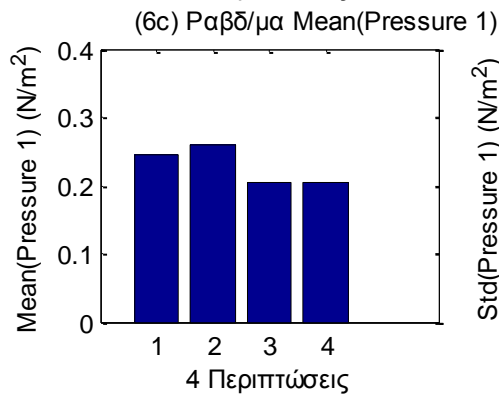
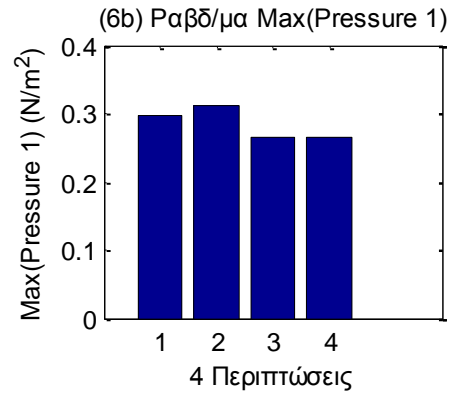
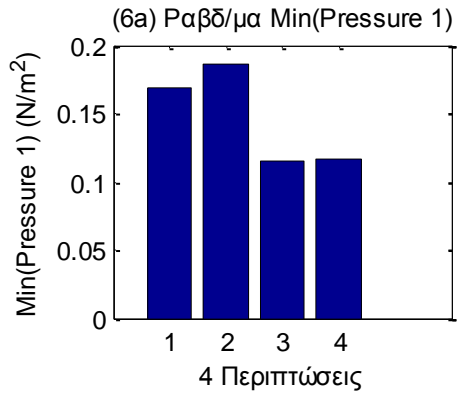
Στις δύο επόμενες ενότητες θα παρουσιάσουμε τη μεταβολή της ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, για την TLP θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις (1) TLP\_00\_NR, (2) TLP\_20\_NR, (3)

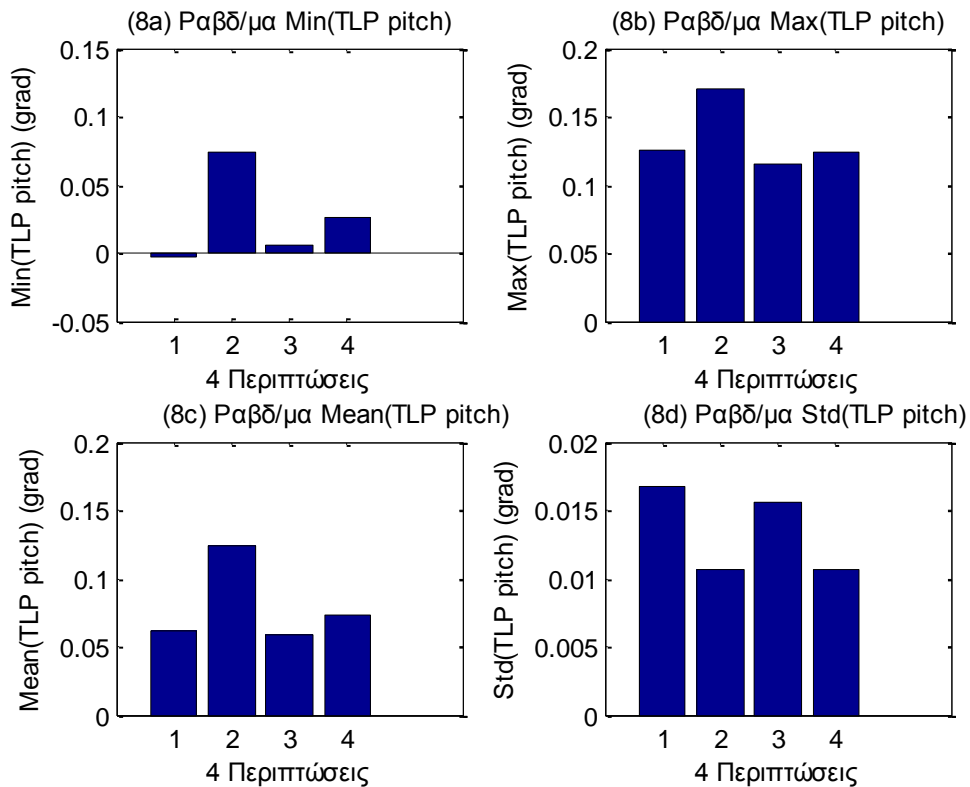
TLP\_00\_R και (4) TLP\_20\_R. Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, αρχικά με τα ραβδοδιαγράμματα, και στη συνέχεια με τα κοινά γραφήματα για κάθε χρονοσειρά (που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες) που προκύπτει από τα δεδομένα κάθε οργάνου μέτρησης.









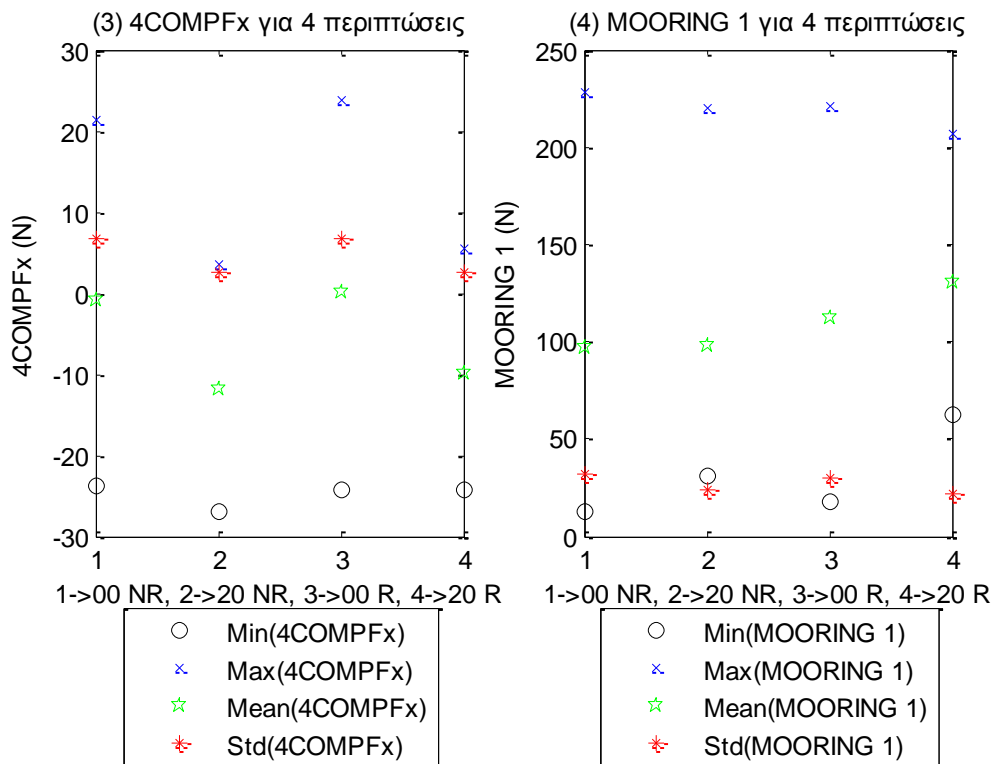
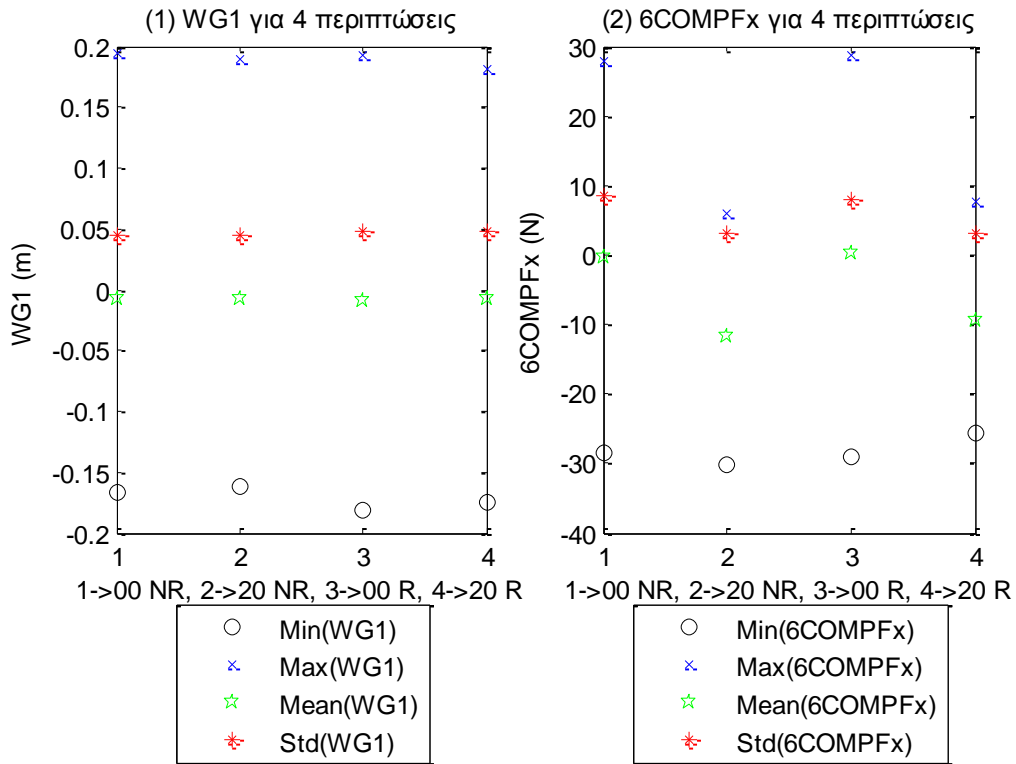


**Σχήματα 5.9.1** Ραβδοδιαγράμματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

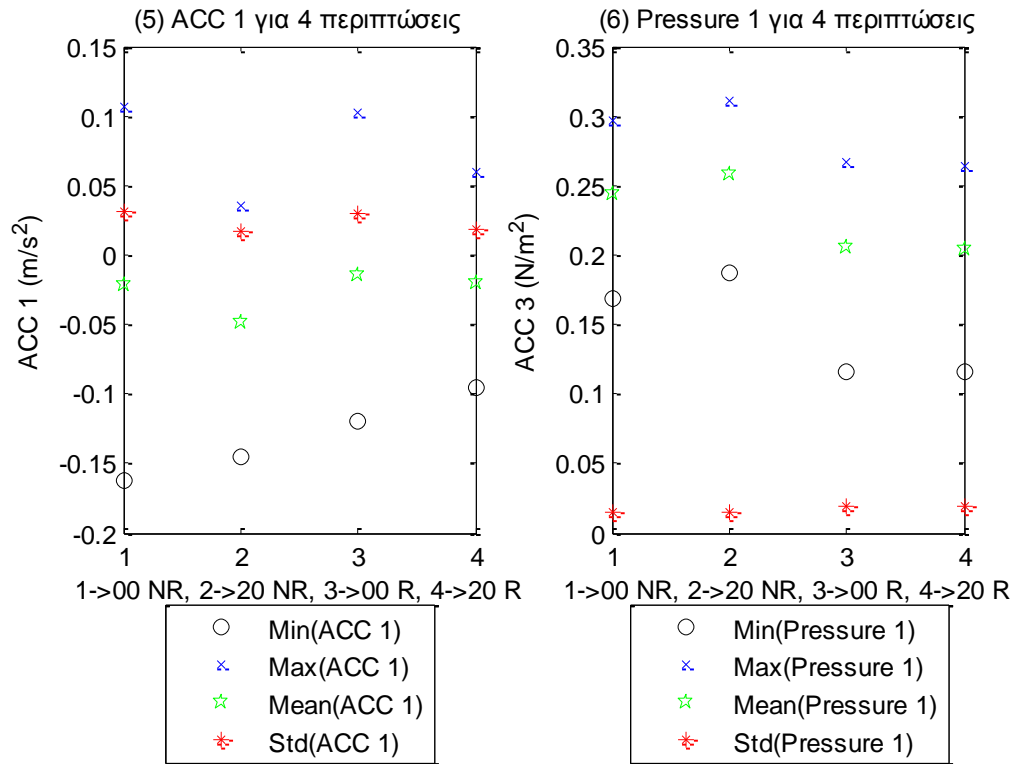
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα ραβδοδιαγράμματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.9.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/Γ (Σχήμα 5.9.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.9.1) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.9.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.9.1) (5), του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (Σχήμα 5.9.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.9.1) (7-8).

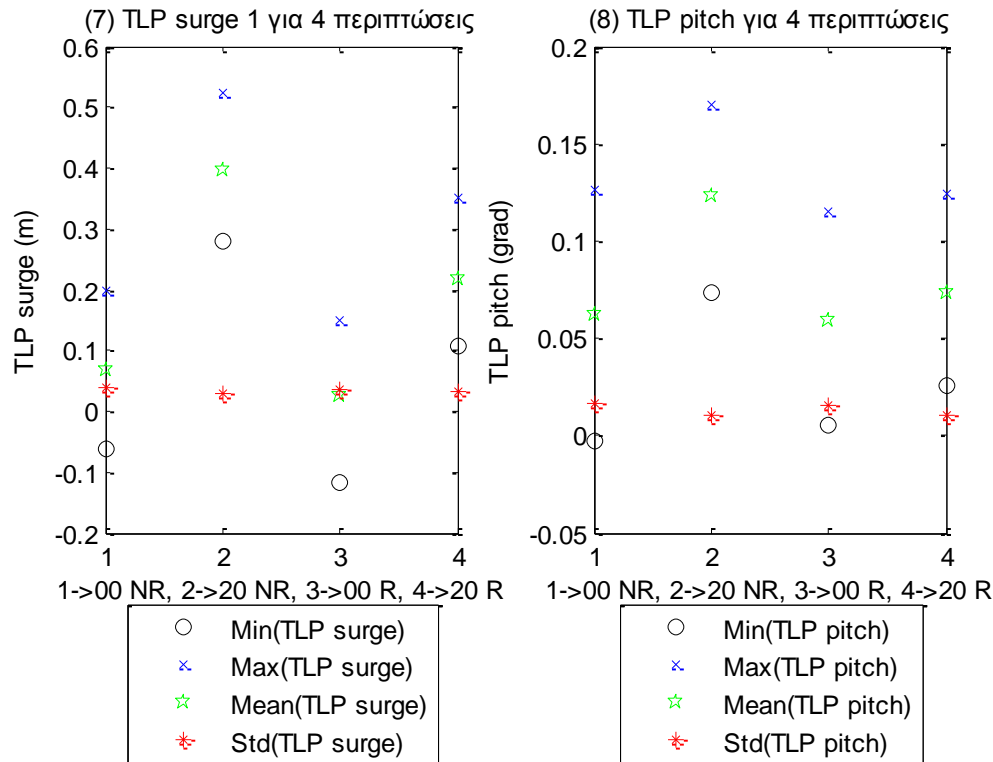
Παρατηρούμε σημαντικές διαφορές σε όλα τα ραβδοδιαγράμματα για την ελάχιστη τη μέγιστη και τη μέση τιμή, ενώ, υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στα αντίστοιχα ραβδοδιαγράμματα για τη τυπική απόκλιση. Στο όργανο μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων είναι μικρές.

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρατίθενται σε κοινά γραφήματα η ελάχιστη, η μέγιστη, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε όργανο μέτρησης για τη TLP.









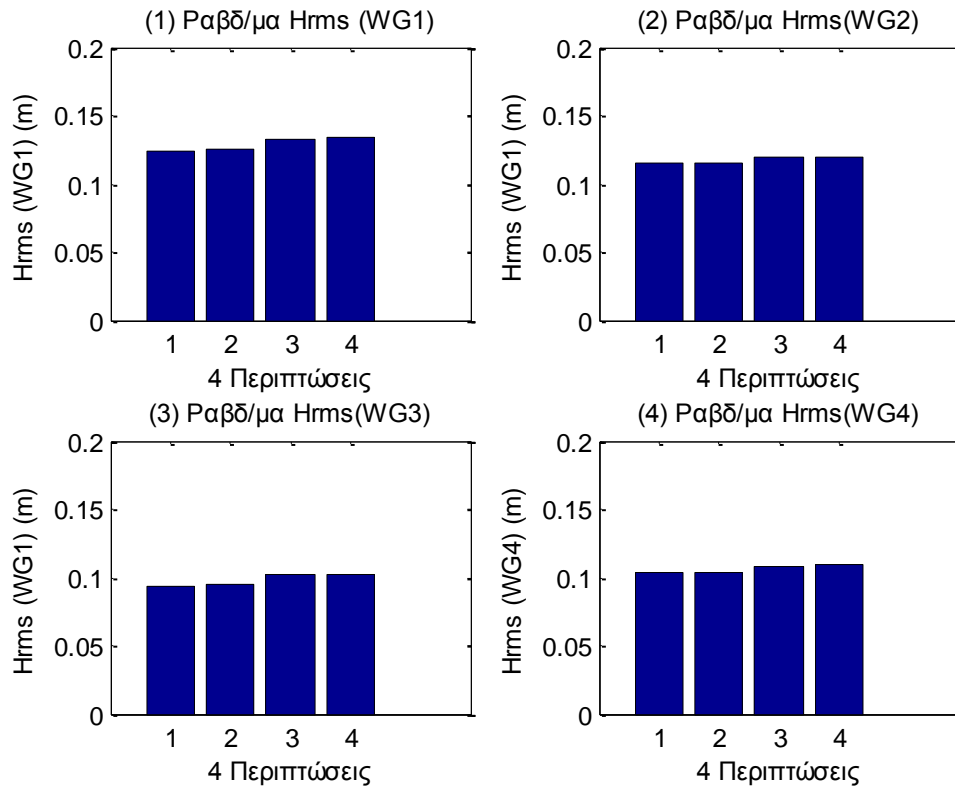
**Σχήματα 5.9.2 (1-8)** Κοινά γραφήματα min, max, mean και std για τέσσερις περιπτώσεις για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα κοινά γραφήματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.9.2) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/Γ (Σχήμα 5.9.2) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.9.2) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.9.2) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.9.2) (5), του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (Σχήμα 5.9.2) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.9.2) (7-8).

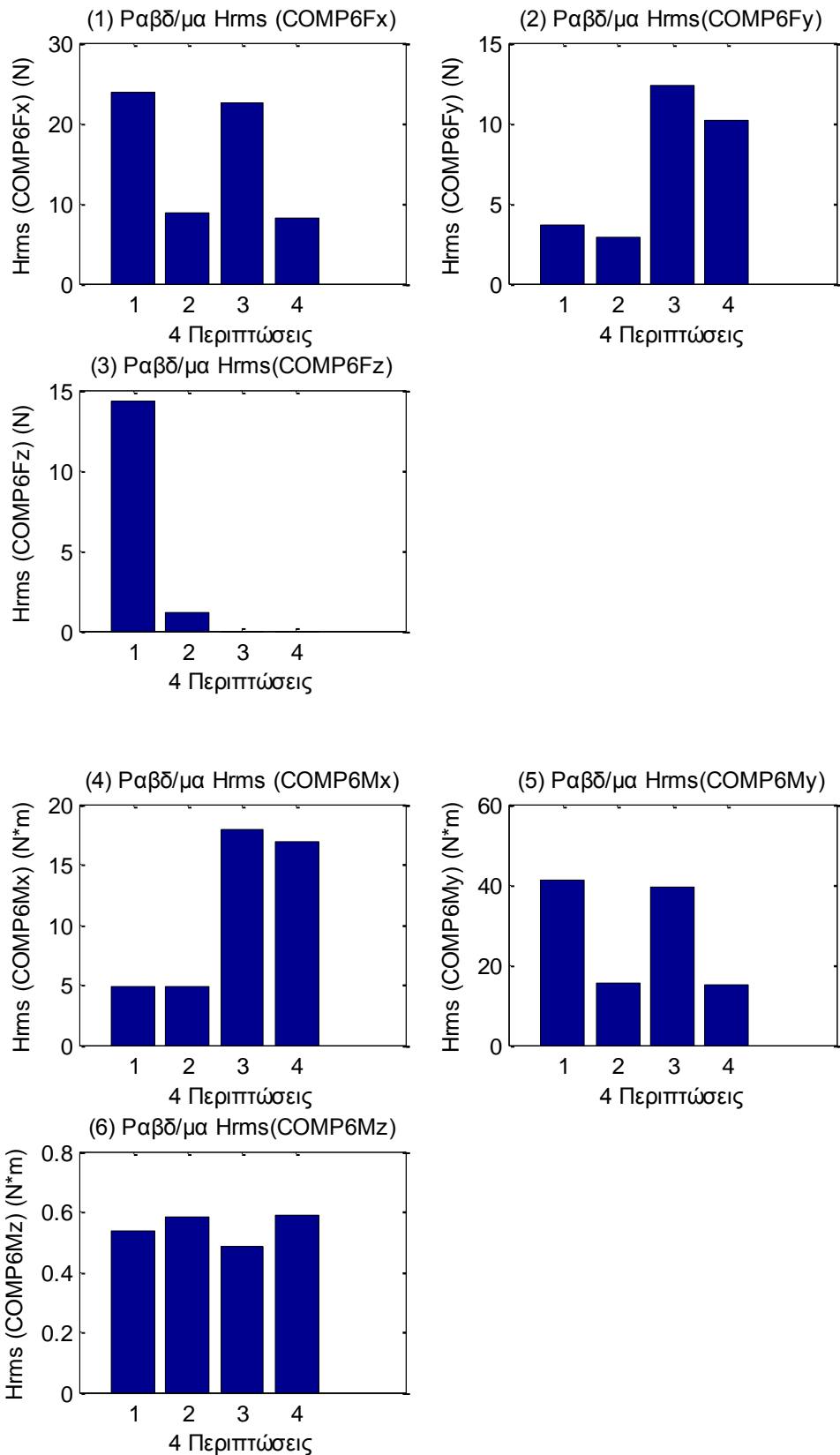
Παρατηρούμε ότι σε όλα τα σχήματα η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή είναι στα άκρα των διαγραμμάτων, ενώ στο μέσο είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, εκτός κάποιων περιπτώσεων (από τα όργανα acc3, TLP sway, TLP heave και TLP yaw), όπου η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή είναι και οι δύο αρνητικές τιμές. Στο όργανο μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων είναι μικρές. Γενικά μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις στη τυπική απόκλιση.

Στη συνέχεια, της παρούσας ενότητας, θα παρουσιάσουμε μέσω ραβδοδιαγραμμάτων τη μεταβολή της τετραγωνικής ρίζας της μέσης τιμής των τετραγώνων του ύψους κύματος ( $H_{rms}$ ) σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις.

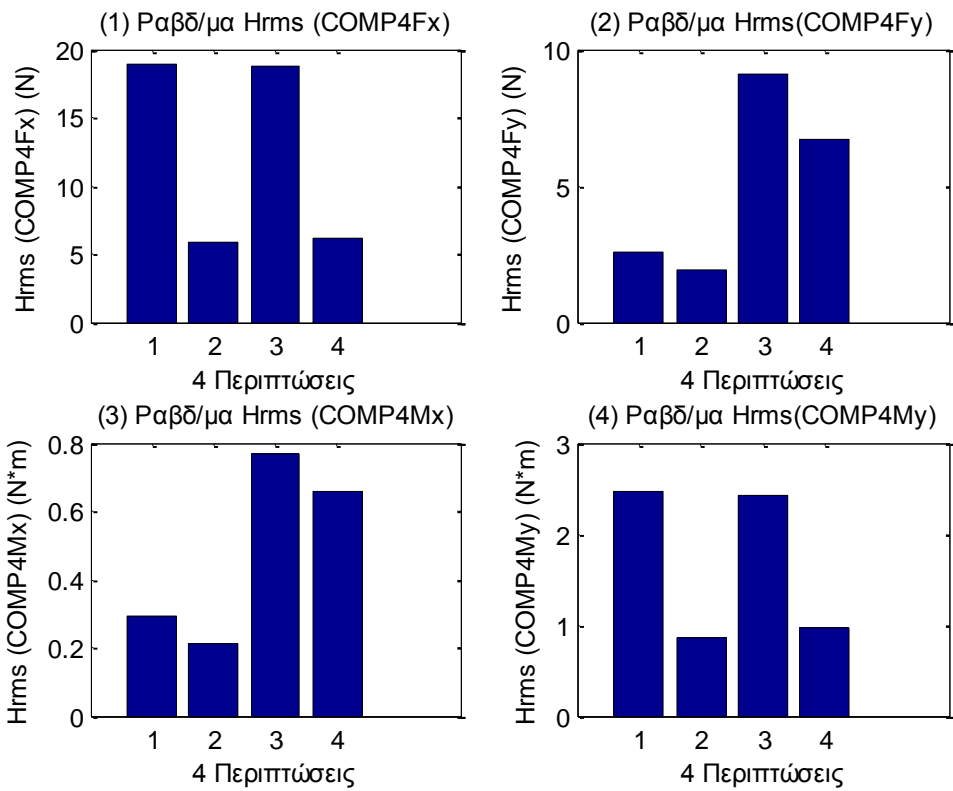
Συγκεκριμένα, για την TLP θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις (1) TLP\_00\_NR, (2) TLP\_20\_NR, (3) TLP\_00\_R και (4) TLP\_20\_R.



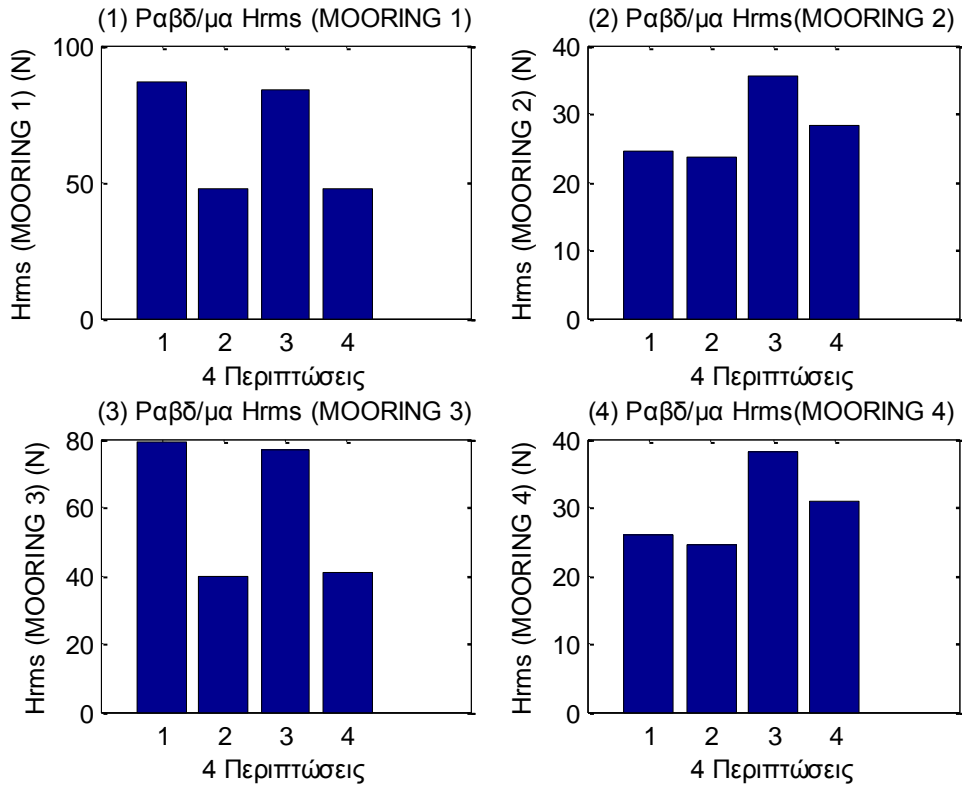
**Σχήματα 5.9.3.1 (1-4)** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα τέσσερα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος



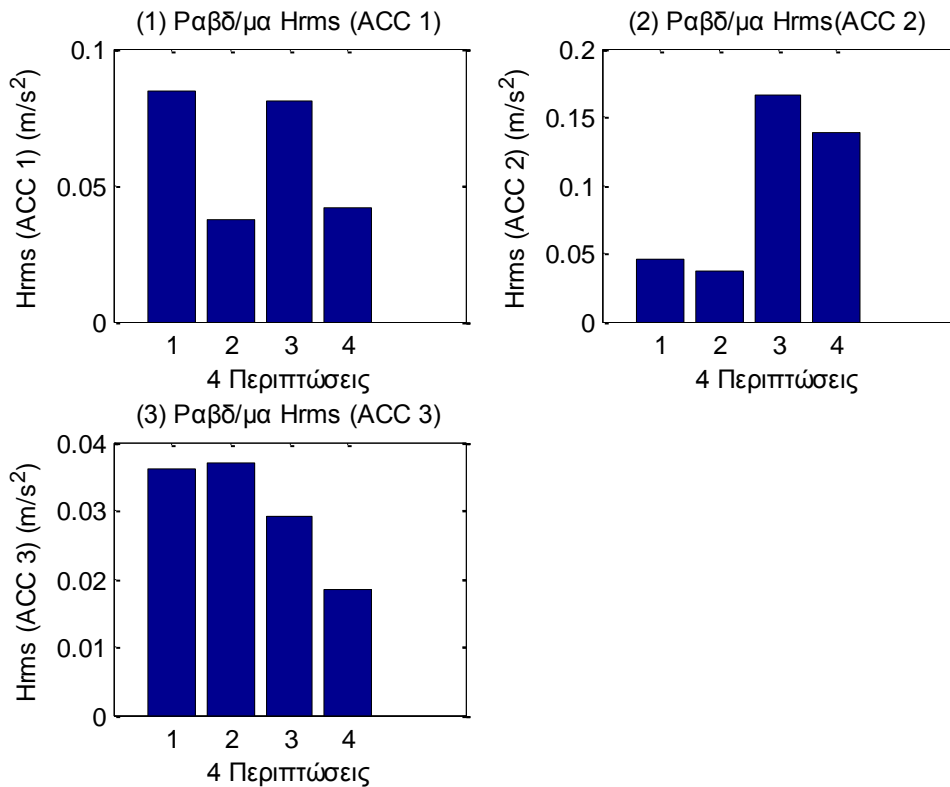
**Σχήματα 5.9.3.2** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις, για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw



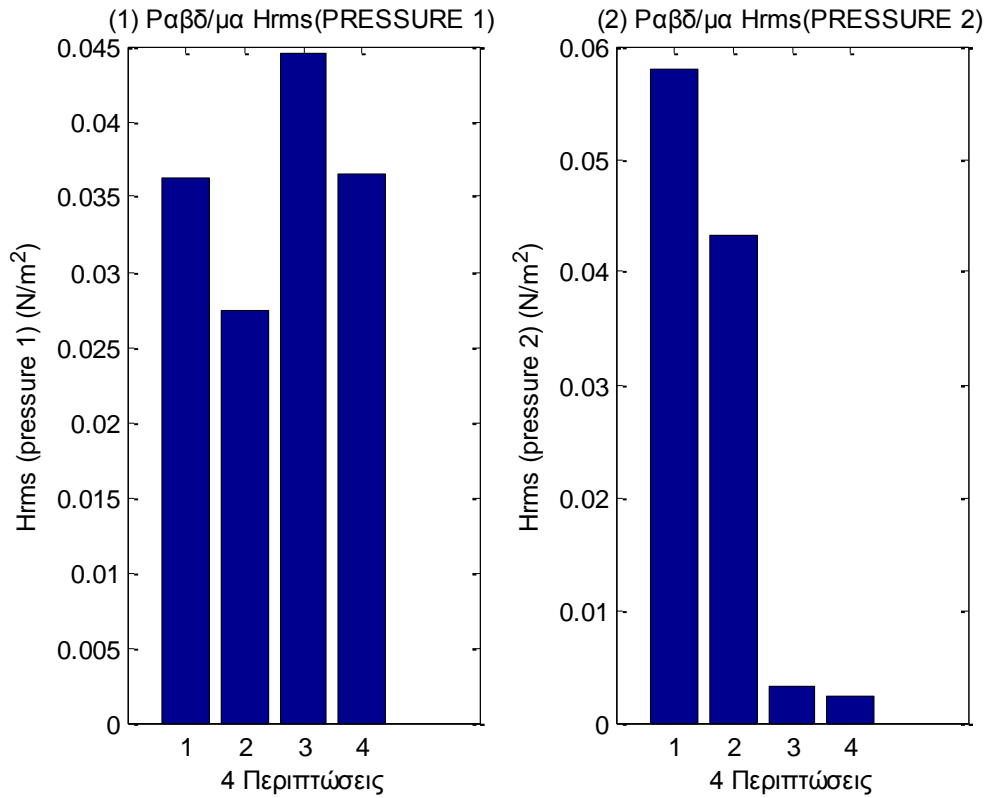
**Σχήματα 5.9.3.3** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις, για τις δυο δυνάμεις στις δυο διευθύνσεις (1) surge και (2) sway και των δυο ροπών στους αντίστοιχους δυο άξονες (3) roll και (4) pitch



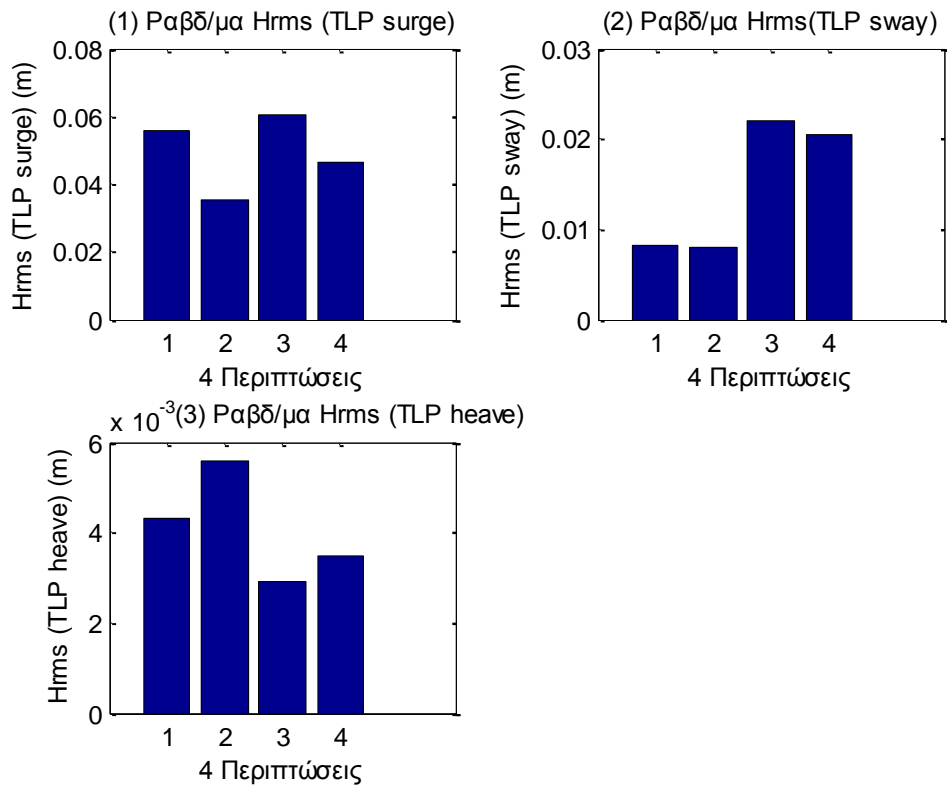
**Σχήματα 5.9.3.4** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τις δυνάμεις στις 4 γραμμές αγκύρωσης

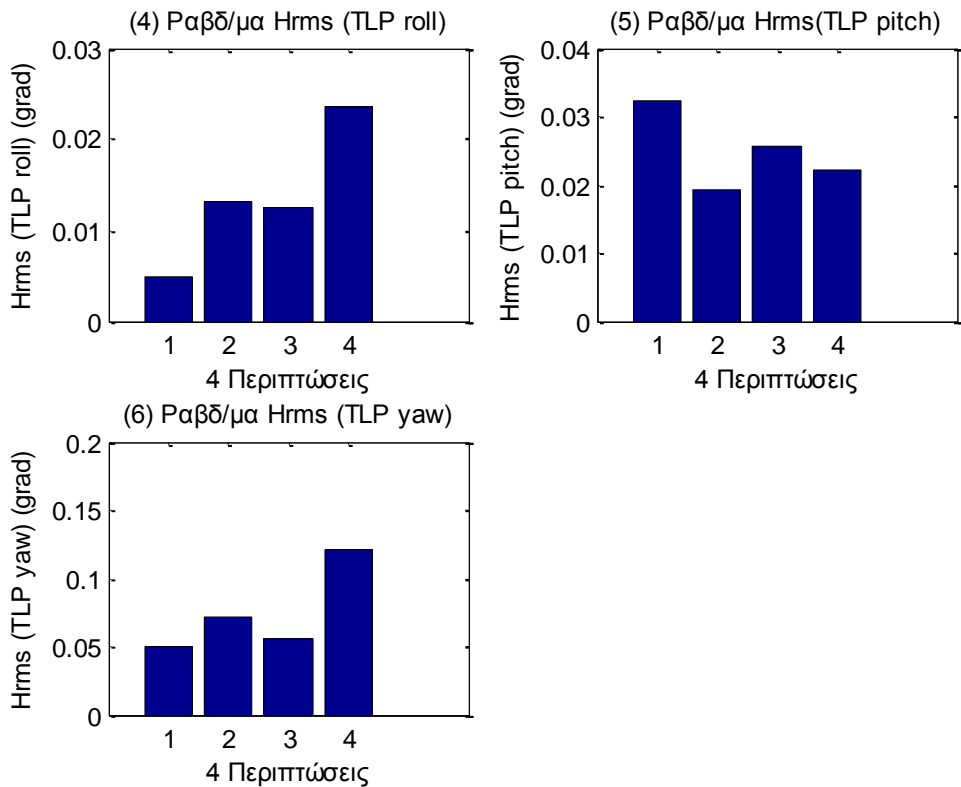


**Σχήματα 5.9.3.5 (1-3)** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης (1) Acc 1, (2) Acc 2 και (3) Acc 3



**Σχήματα 5.9.3.6 (1-2)** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα δυο όργανα μέτρησης της πίεσης





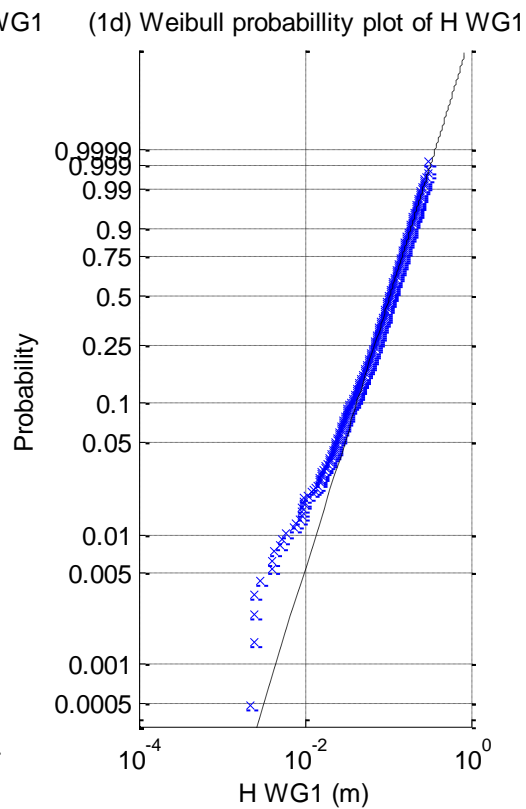
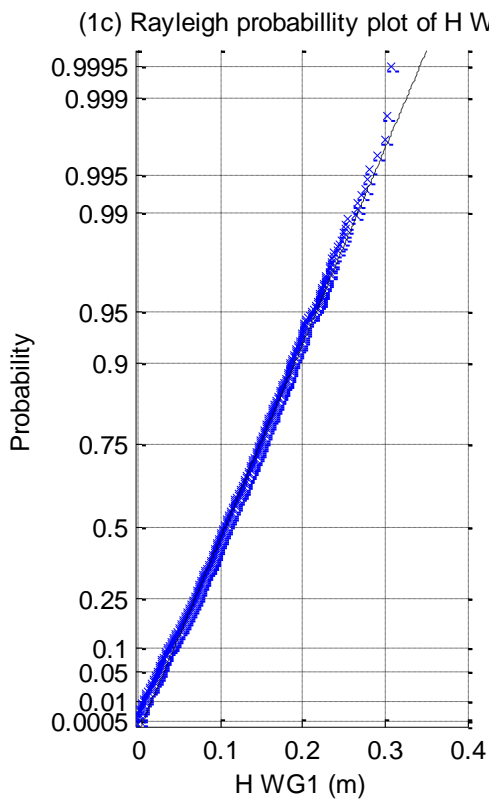
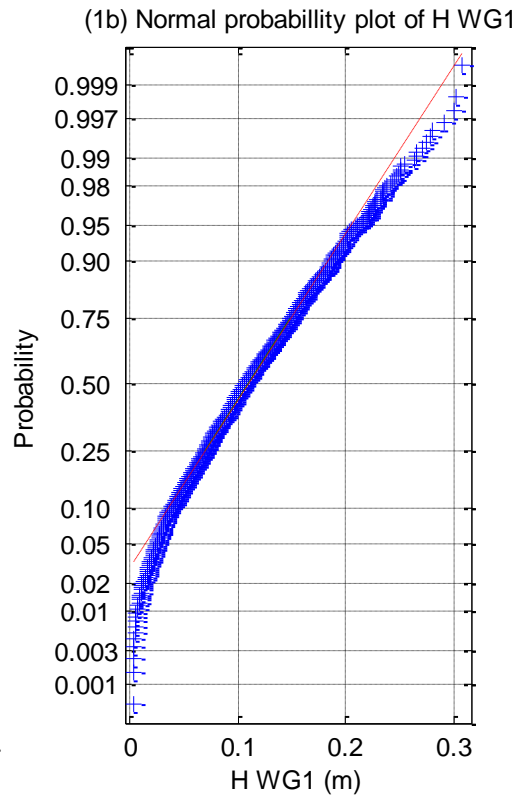
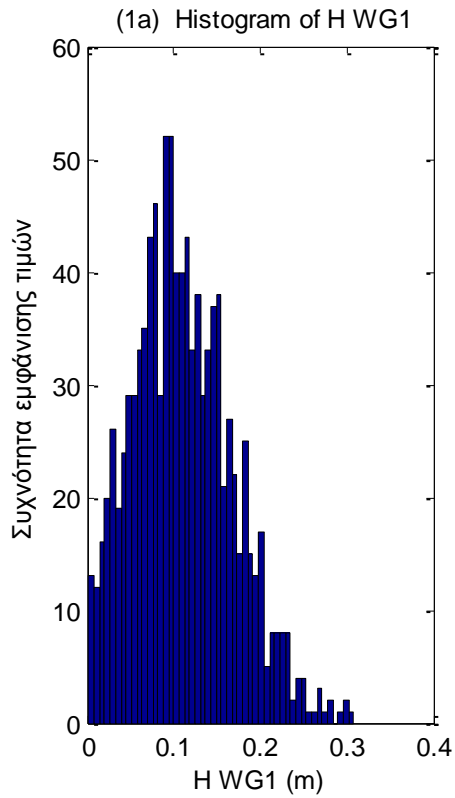
**Σχήματα 5.9.3.7** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις μετατοπίσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

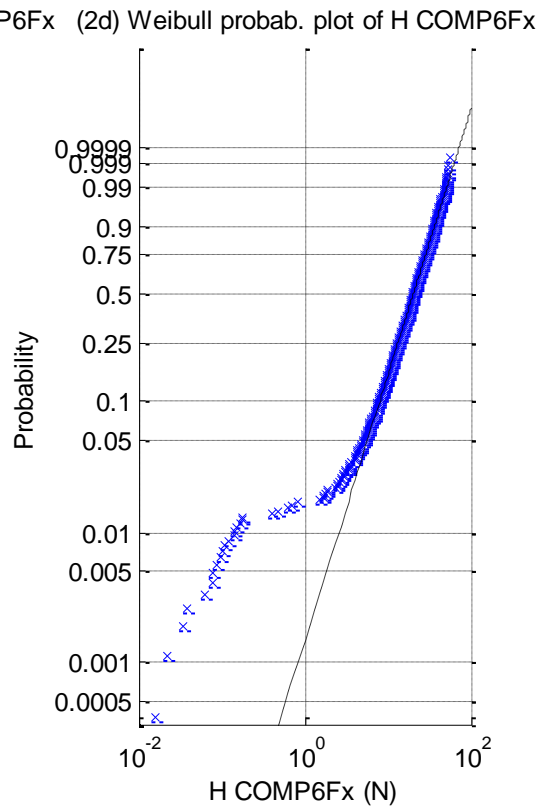
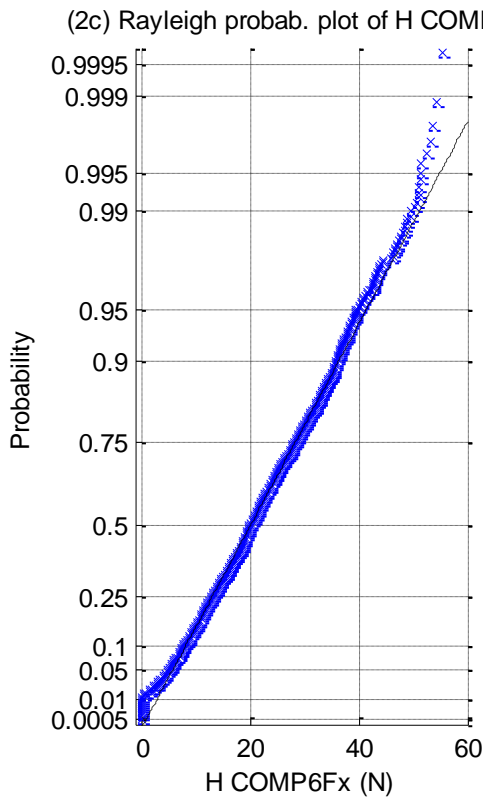
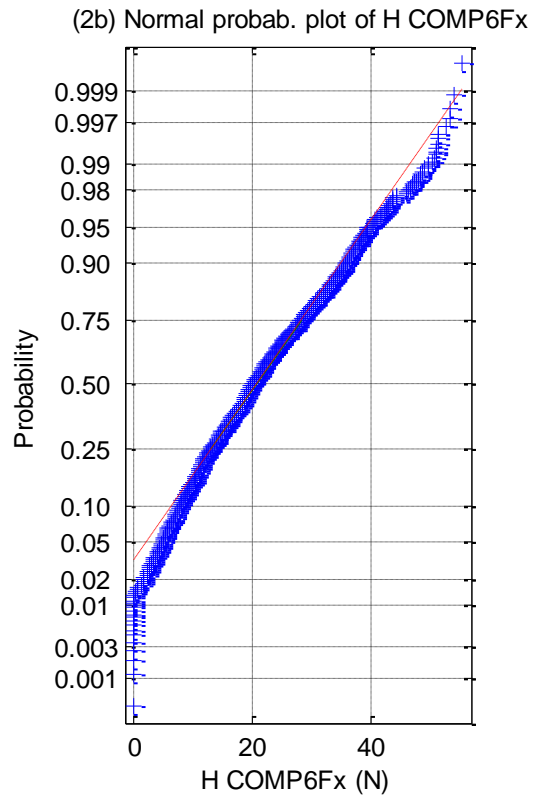
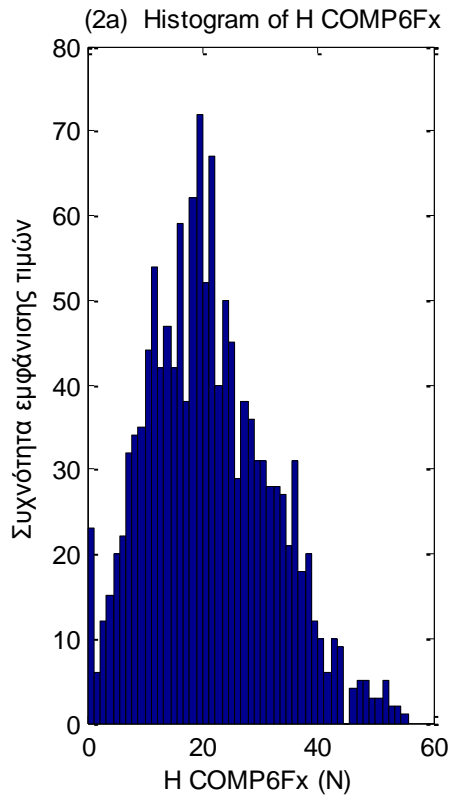
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα Ραβδοδιαγράμματα για την τιμή της  $H_{rms}$  για τα τέσσερα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήματα 5.9.3.1) (1—11), για τις τρεις δυνάμεις και τις τρεις ροπές στη βάση της Α/Γ (Σχήματα 5.9.3.2) (1-6), για τις δύο δυνάμεις και τις δύο ροπές στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήματα 5.9.3.3) (1-4), τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήματα 5.9.3.4) (1-4), για τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήματα 5.9.3.5) (1-3), για τα δυο όργανα μέτρησης της πίεσης (Σχήματα 5.9.3.6) (1-2) και, τέλος, για τις τρεις μετατοπίσεις και τις τρεις περιστροφές (Σχήματα 5.9.3.7) (1-6).

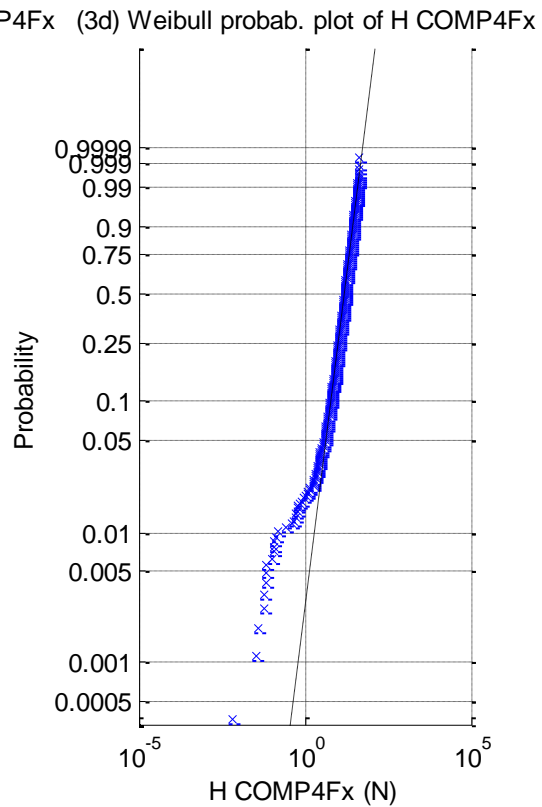
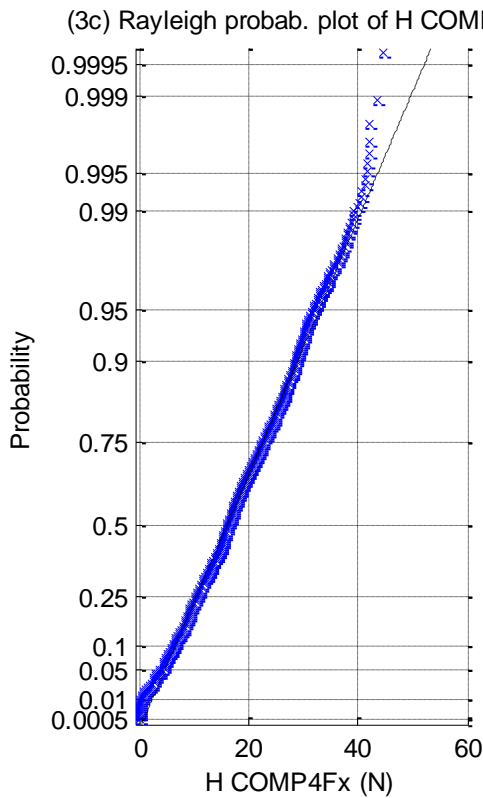
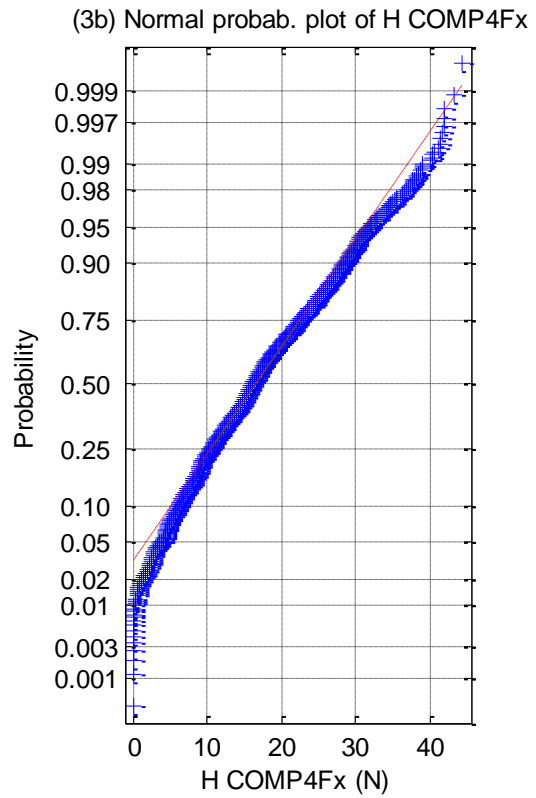
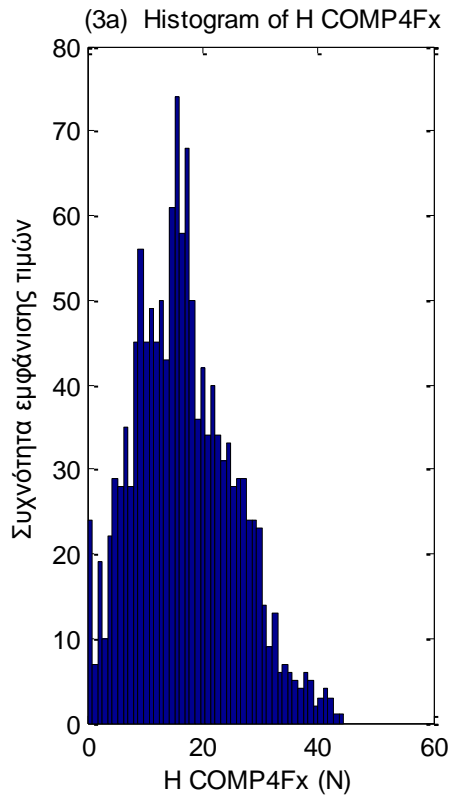
Παρατηρούμε σημαντικές διαφορές σε όλα τα ραβδοδιαγράμματα για την τιμή της  $H_{rms}$ , ενώ, στα έντεκα όργανα μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων είναι μικρές.

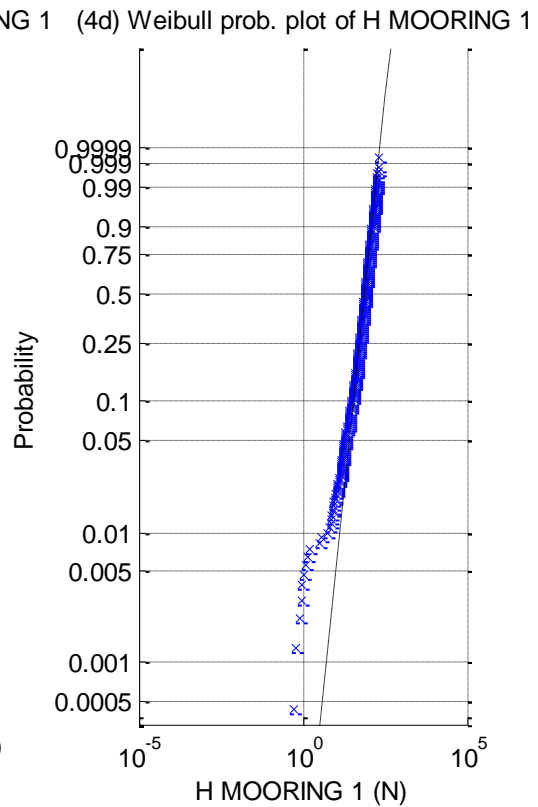
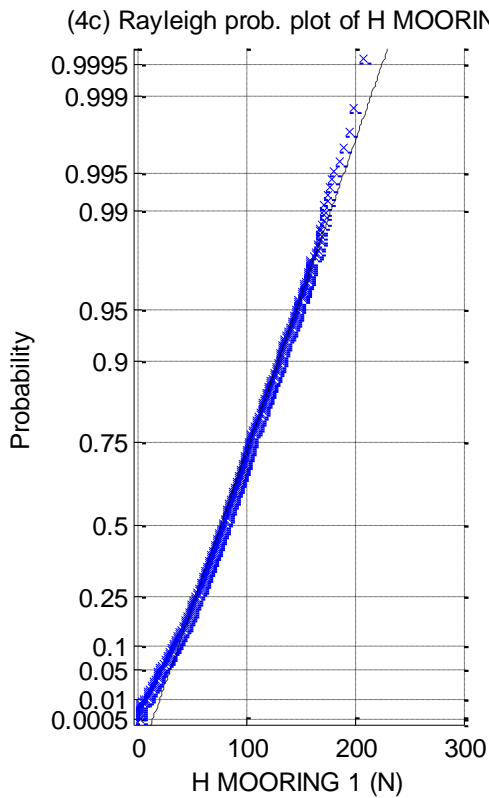
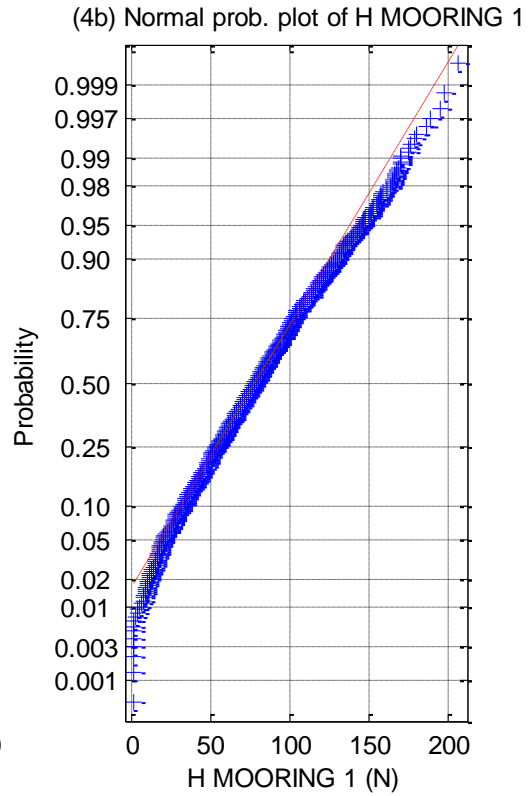
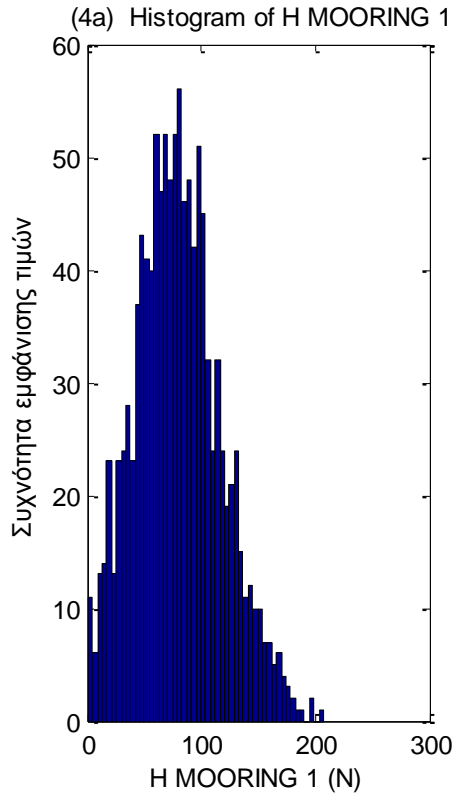
Στο επόμενο μέρος της παρούσας ενότητας θα παρουσιάσουμε (a) το ιστόγραμμα της κατανομής των  $H_i$  (όπου το  $H$  υπενθυμίζουμε, ότι, είναι το ύψος κύματος σαν διαφορά διαδοχικών ελαχίστων και μεγίστων τιμών της χρονοσειράς κάθε οργάνου), (b) το Normal probability plot, (c) το Rayleigh probability plot και (d) το Weibull probability plot για κάθε χρονοσειρά, από κάθε όργανο μέτρησης.

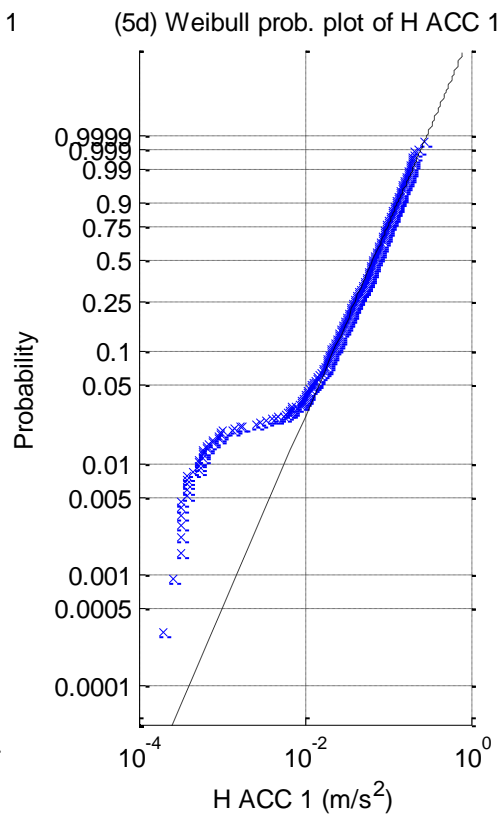
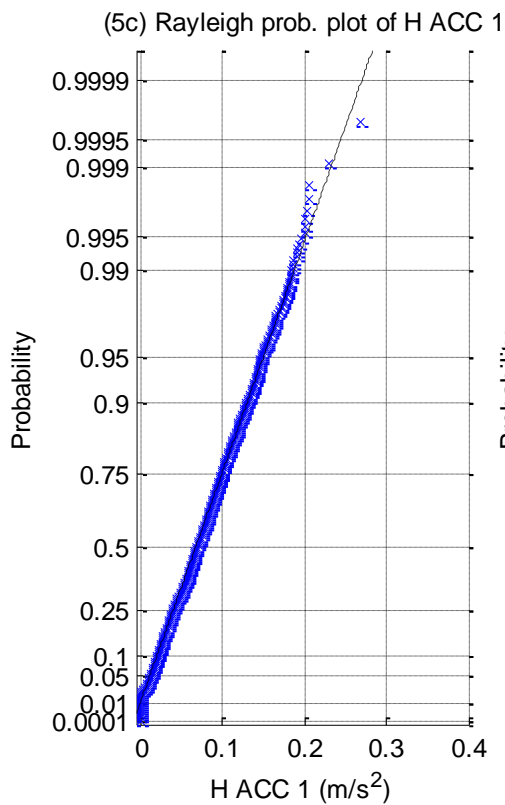
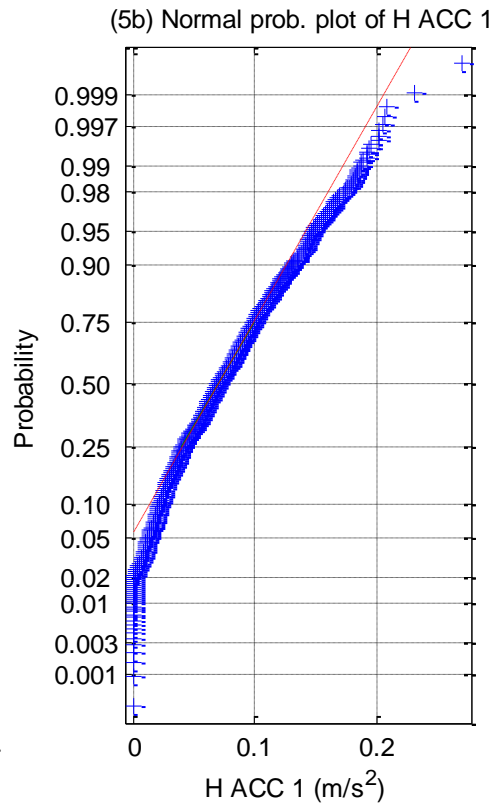
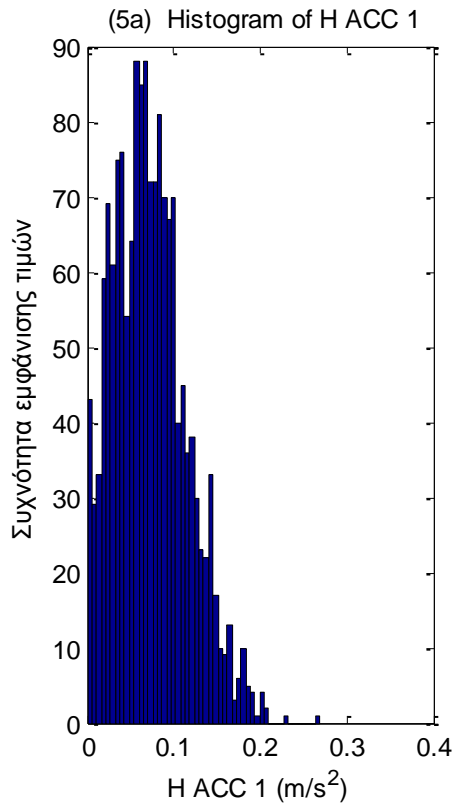


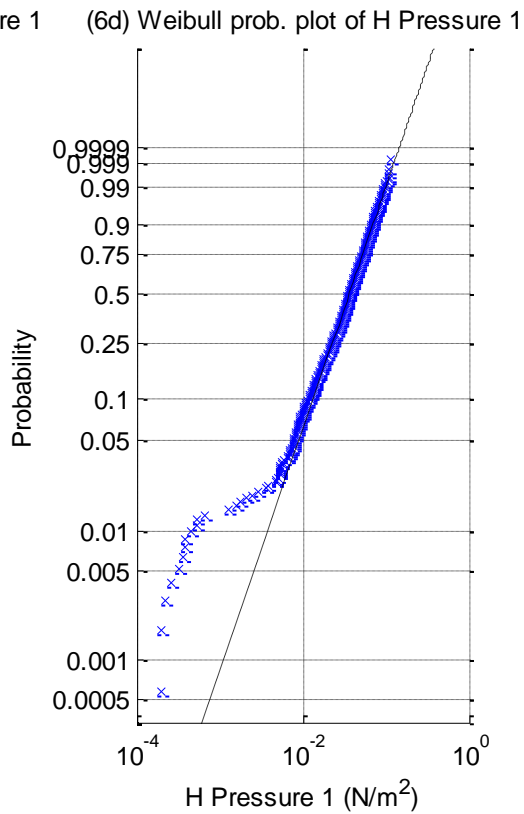
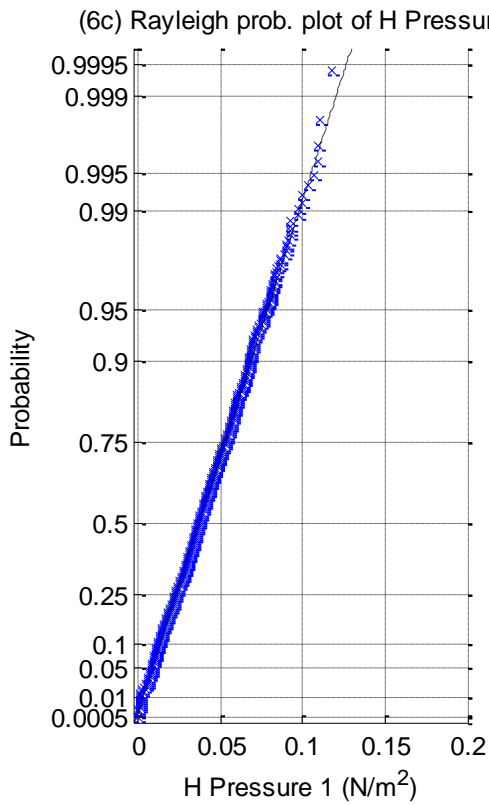
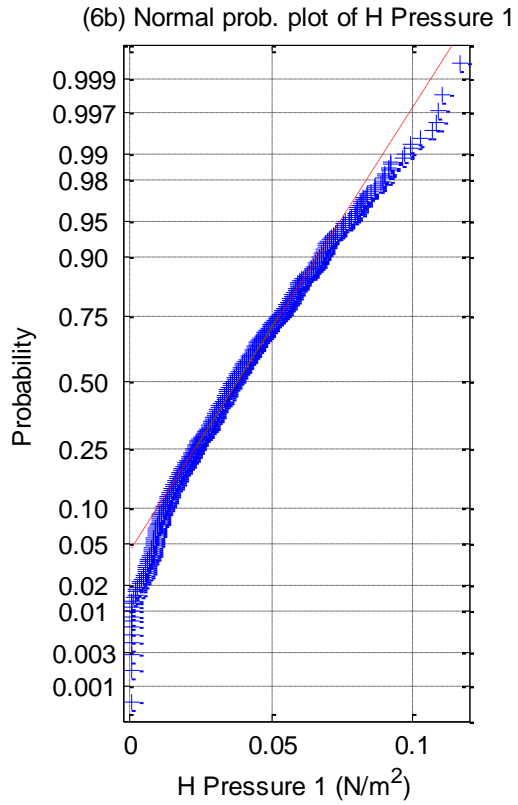
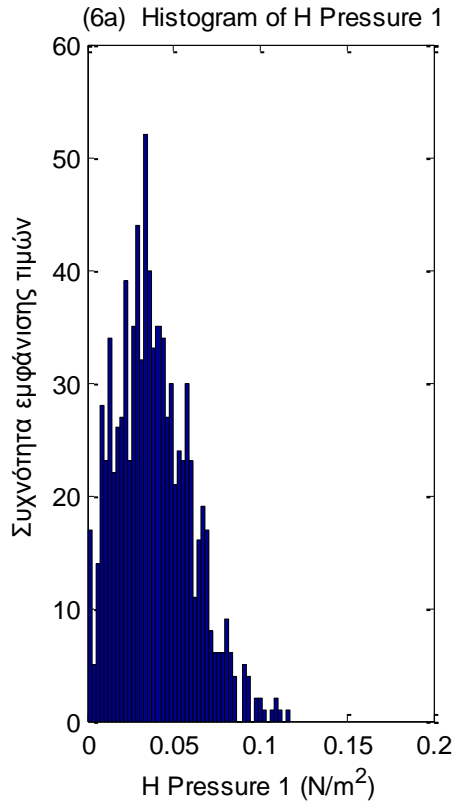


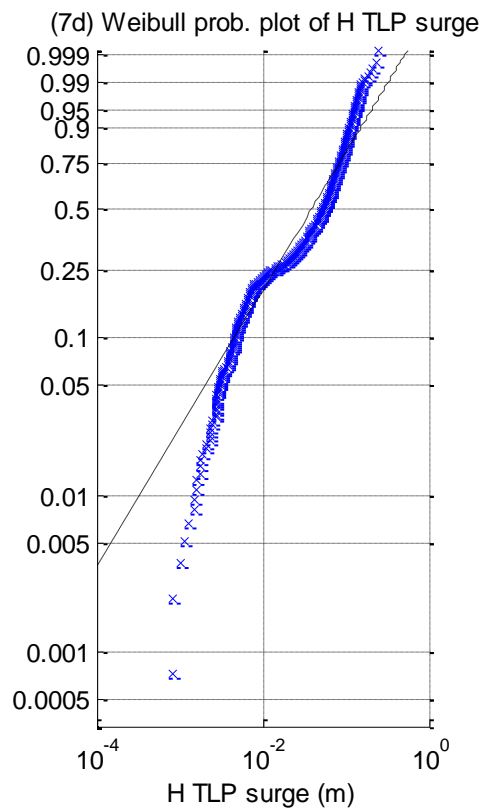
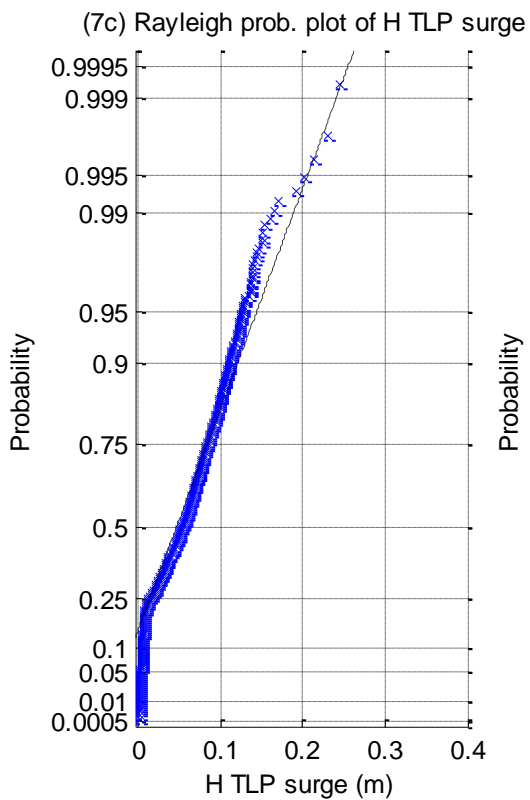
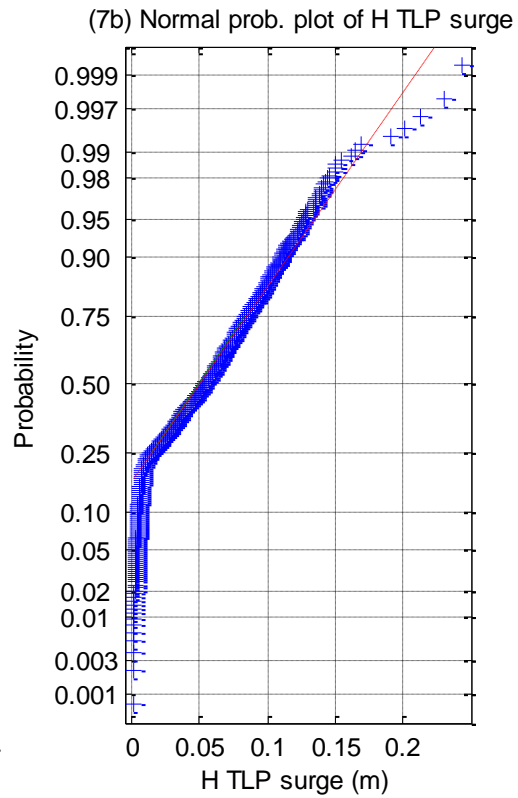
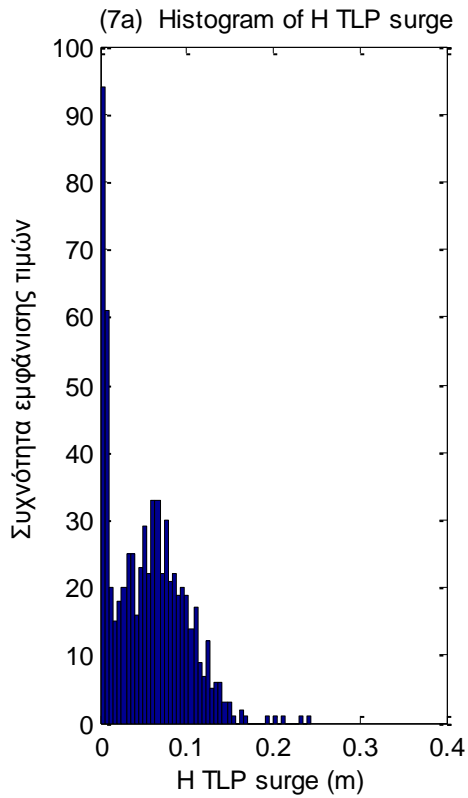


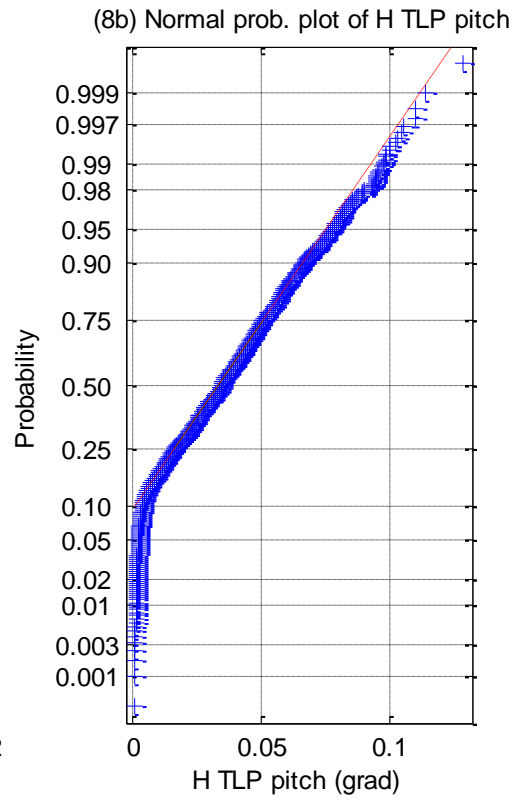
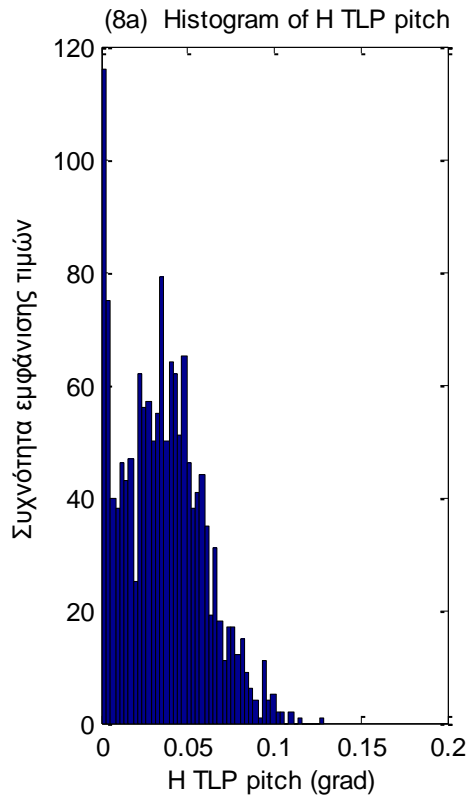




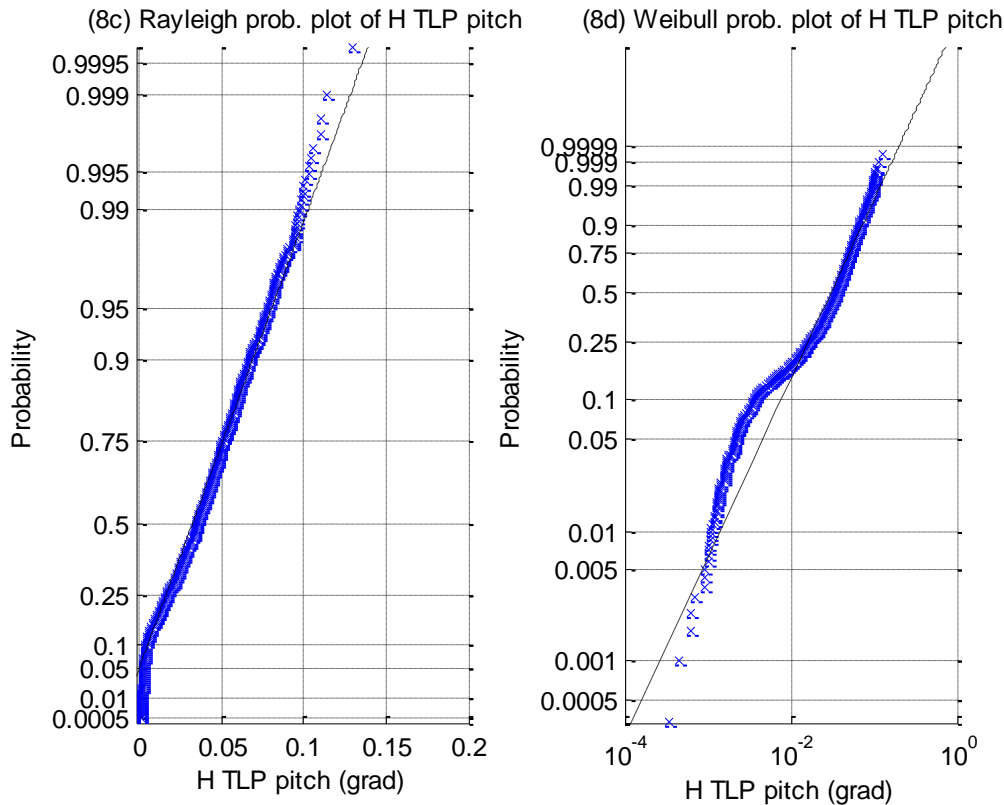












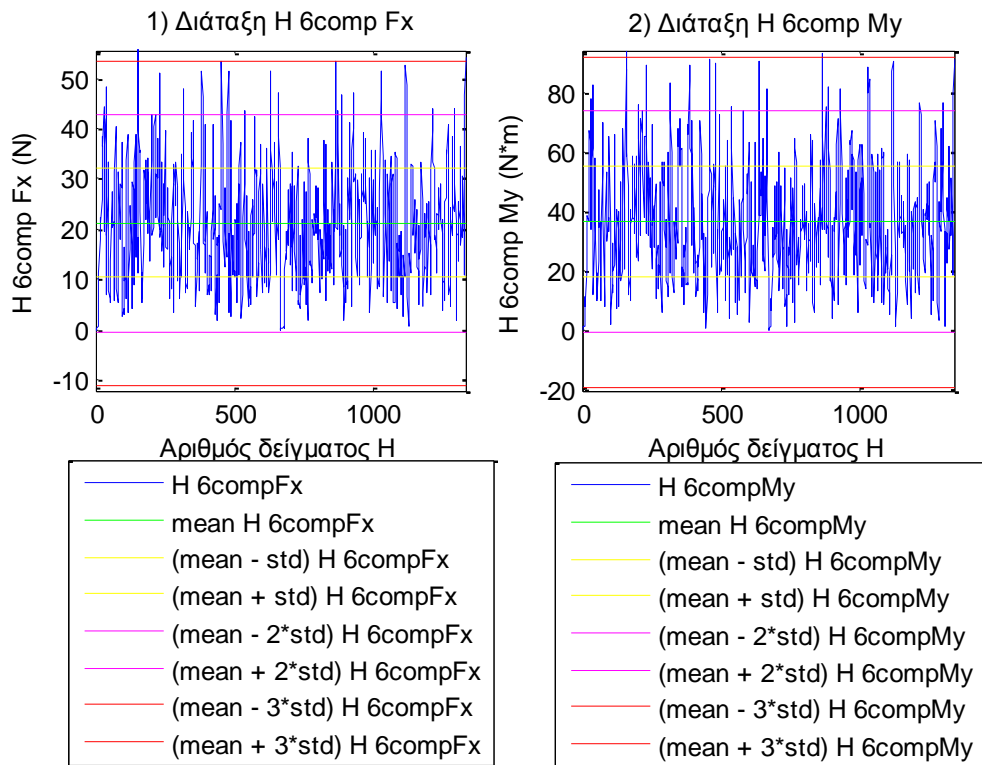
**Σχήματα 5.9.4 (1-8)** a) Ιστογράμματα , b) γραφήματα ελέγχου κανονικότητας, c) έλεγχος κατανομής Rayleigh και d) έλεγχος κατανομής Weibull για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (7) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση και (8) της pitch περιστροφής

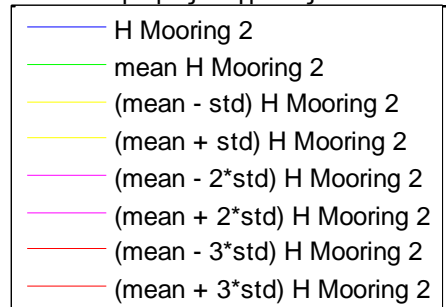
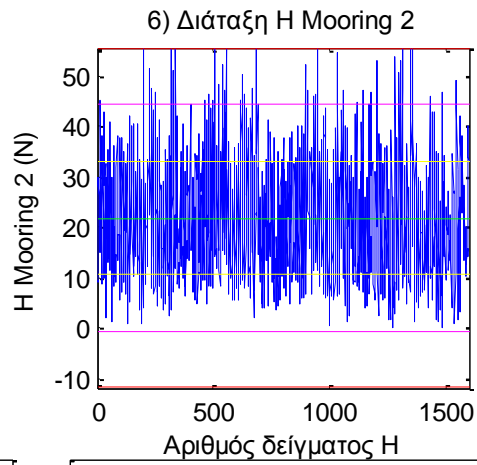
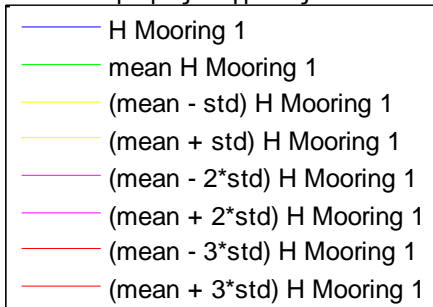
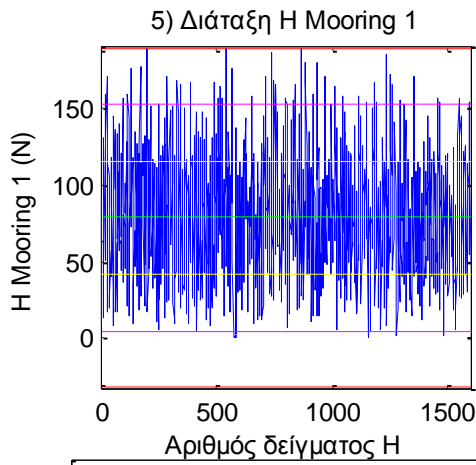
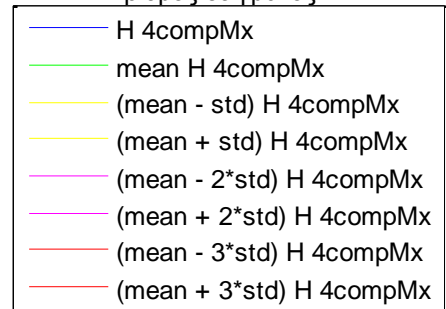
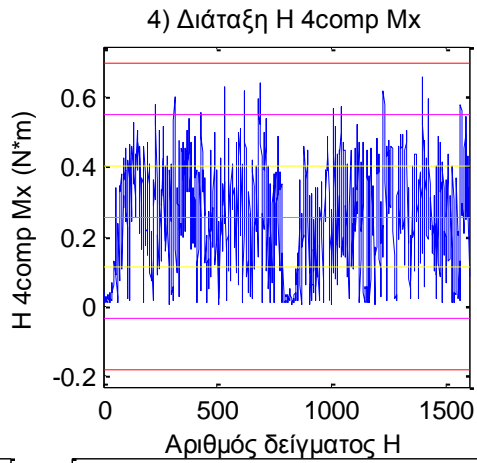
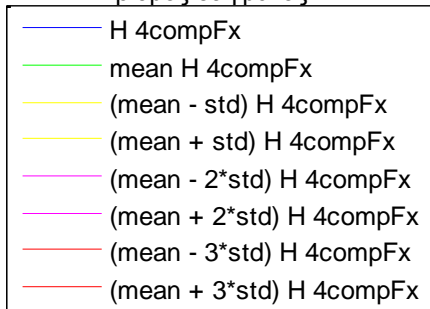
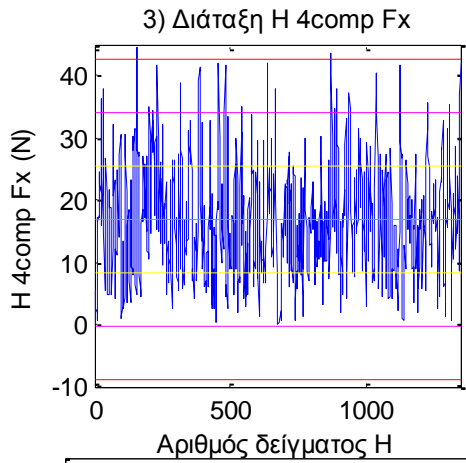
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε a) τα ιστογράμματα , b) τα γραφήματα ελέγχου κανονικότητας, c) έλεγχος κατανομής Rayleigh και d) έλεγχος κατανομής Weibull για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.9.4) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.9.4) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.9.4) (3), τη μια από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.9.4) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.9.4) (5), του ενός από τα δύο όργανα μέτρησης της πίεσης (Pressure 1), (Σχήμα 5.9.4) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη surge και pitch περιστροφή (Σχήματα 5.9.4) (7-8).

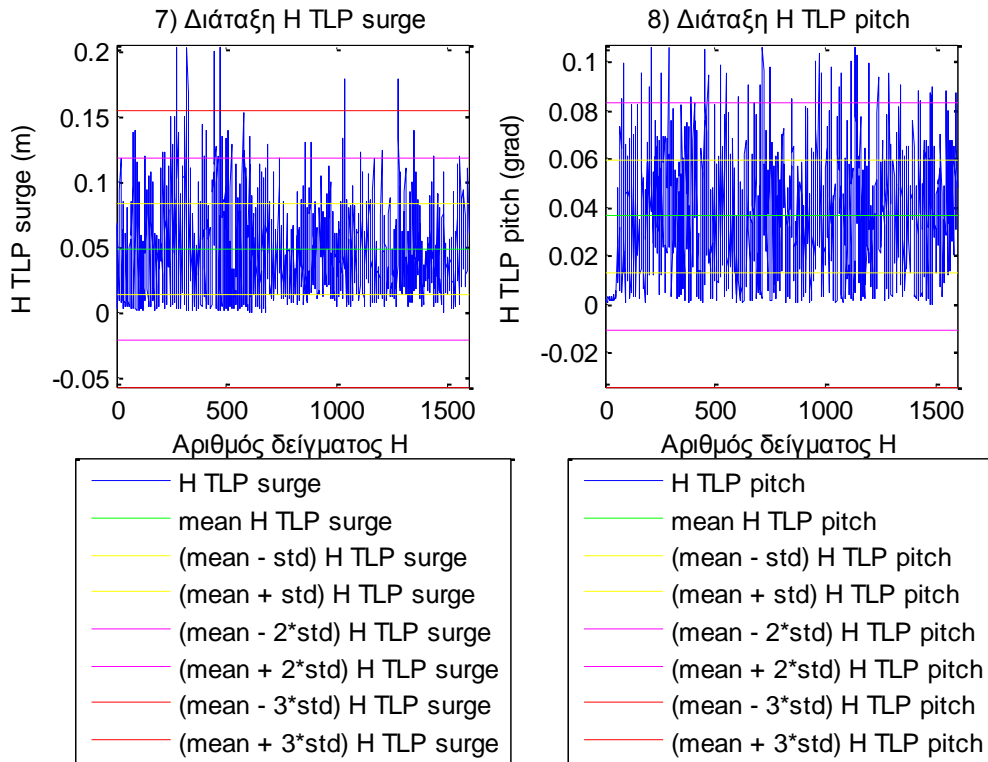
Από τα αποτελέσματα του ελέγχου για την κατανομή των H για κάθε όργανο μέτρησης (όπου ως H ορίζουμε το ύψος κύματος, που προκύπτει ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας) παρατηρούμε ότι, τα H είναι πιο κοντά στην κατανομή Rayleigh και την κανονική και λιγότερο στην κατανομή Weibull.

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας ενότητας θα παρουσιάσουμε τη διάταξη των  $H_i$  (όπως εμφανίζονται) (με H όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο) με τη μέση τιμή και με τα εξής τρία όρια  $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ ,  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$  και  $[\mu - 3\sigma, \mu +$

3σ]. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι, στον άξονα των x μετράμε τον αριθμό δείγματος των  $H_i$ , και όχι χρόνο. Στη περίπτωση όπου η σειρά εμφάνισης των  $H_i$  είναι μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών (δηλαδή ακολουθούν την κανονική κατανομή και είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους), τότε τα όρια αυτά αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το 68%, το 95% και το 99.7% διάστημα εμπιστοσύνης, ή χρησιμοποιούνται με κατάλληλες τεχνικές σαν διαγράμματα ελέγχου (Αντζουλάκος, 2009).





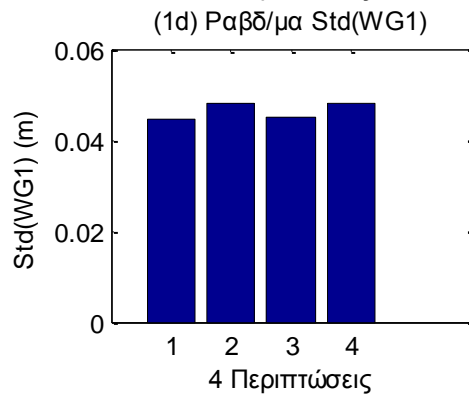
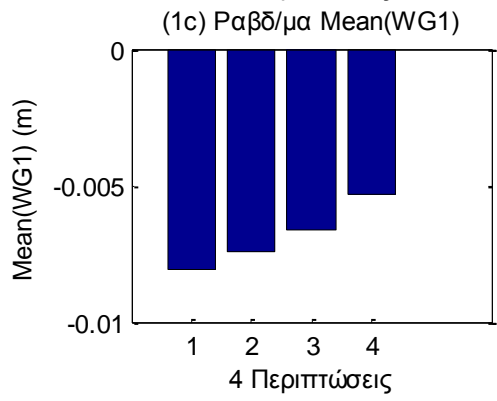
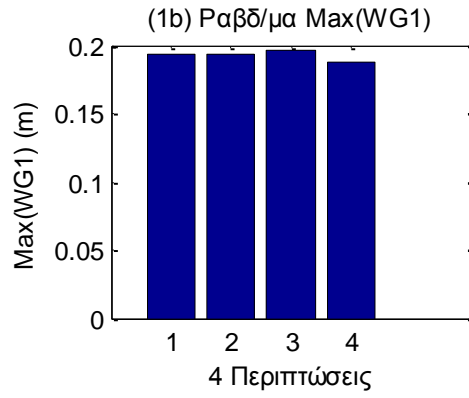
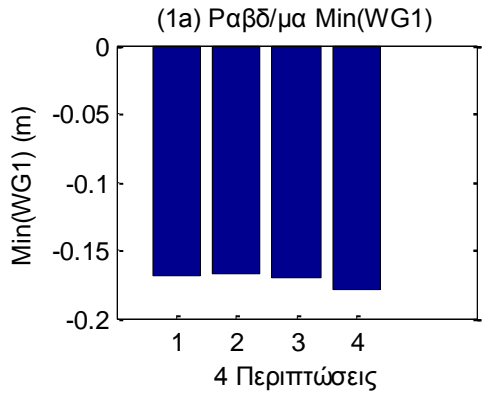


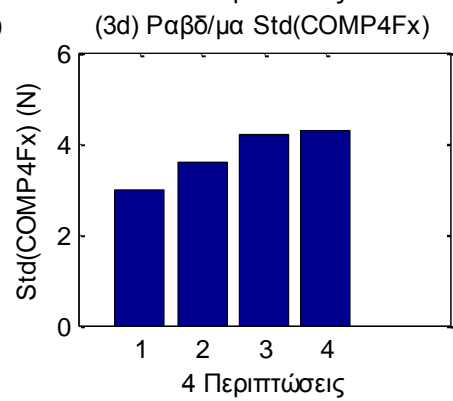
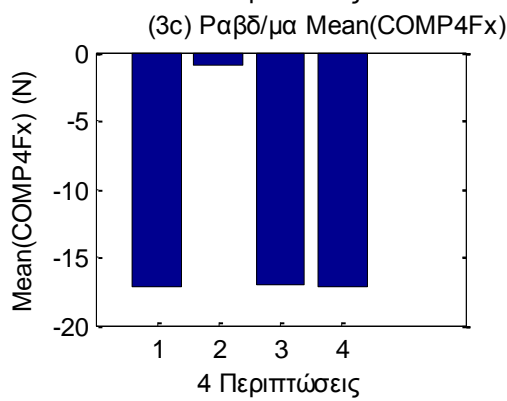
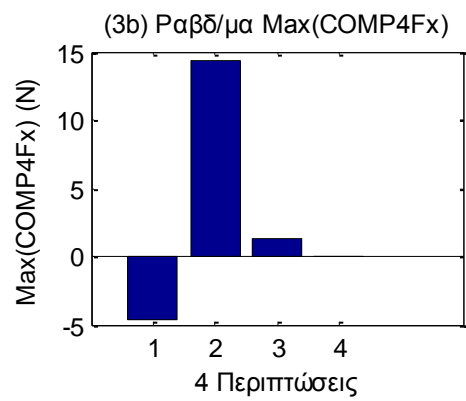
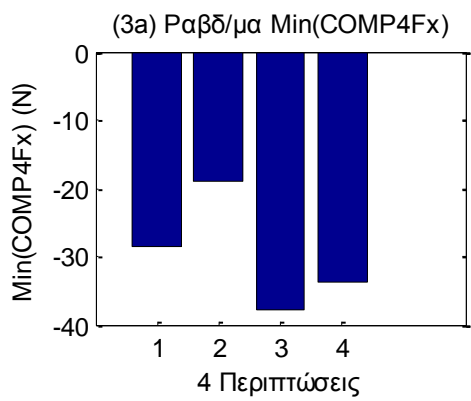
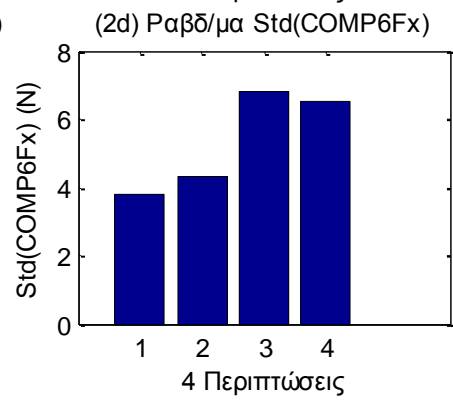
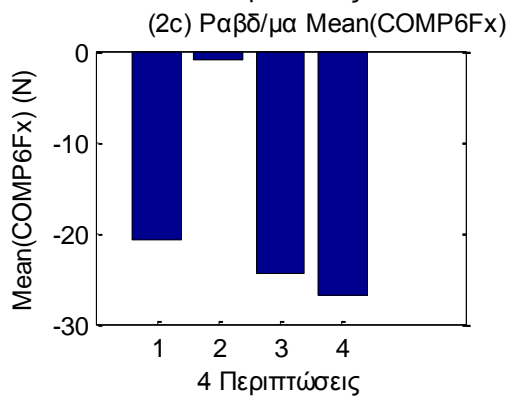
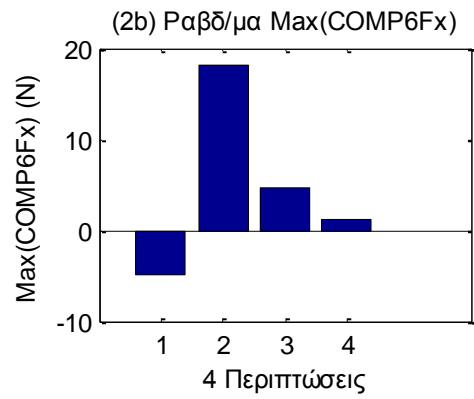
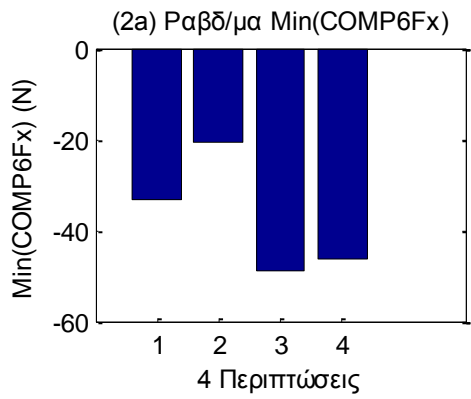
**Σχήματα 5.9.5 (1-8)** Διαγράμματα διάταξης του H για (1) τη δύναμη στη βάση της A/Γ στη surge διεύθυνση (2) τη ροπή η βάση της A/Γ στη pitch περιστροφή, (3) τη δύναμη και (4) τη ροπή στο Ρότορα της A/Γ, (5) και (6) τις δύο δυνάμεις (Mooring 1 και 2 ) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, και (7) τη μετατόπιση στη surge διεύθυνση και (8) τη pitch περιστροφή

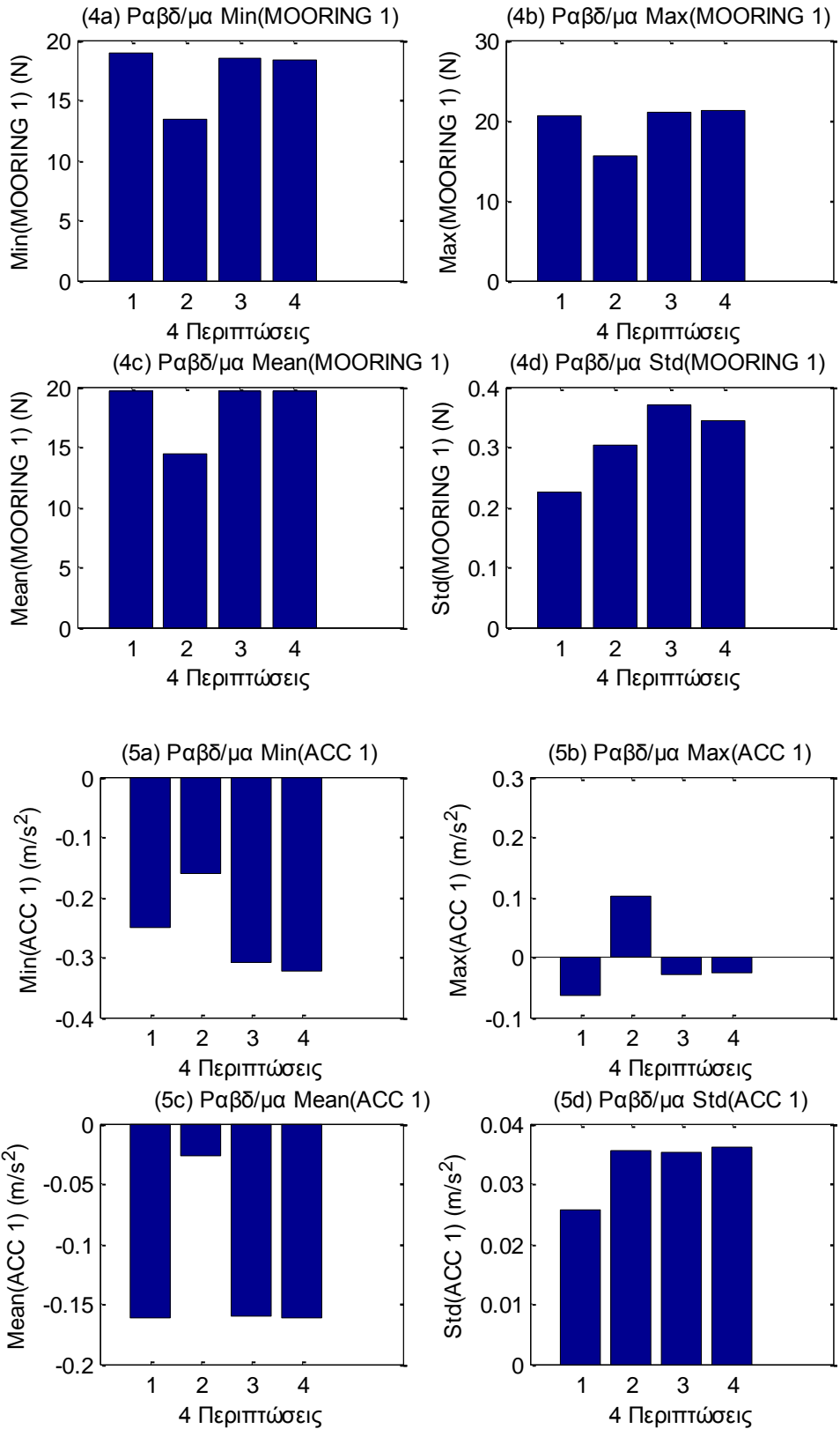
Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι, (με εξαίρεση τα διαγράμματα για τις κινήσεις) τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών κατανέμονται ομοιόμορφα σε αυτά τα τρία διαστήματα και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν διαγράμματα ελέγχου.

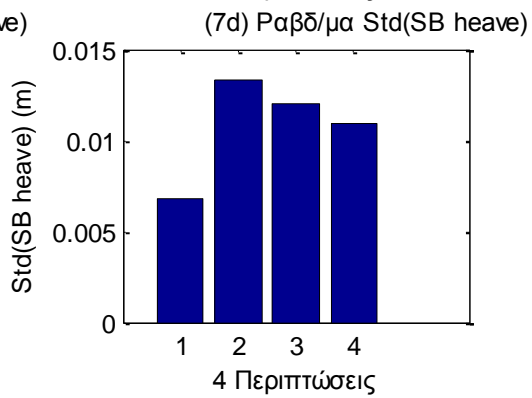
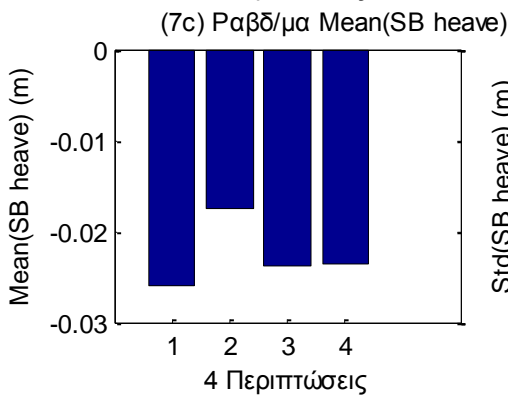
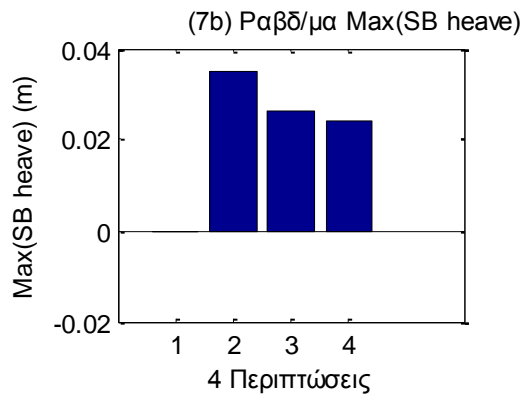
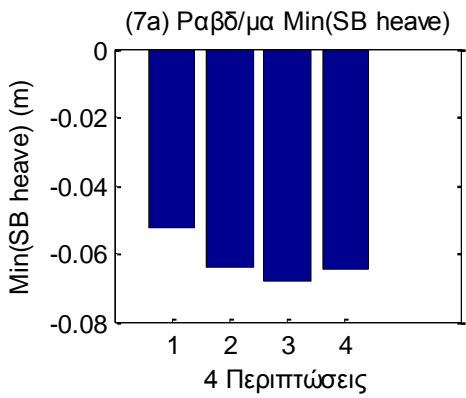
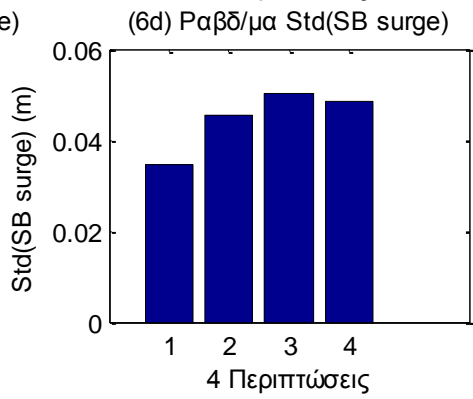
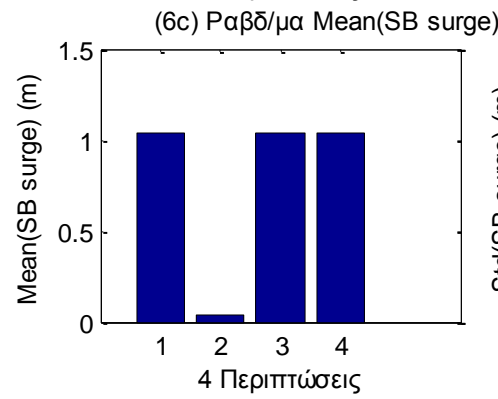
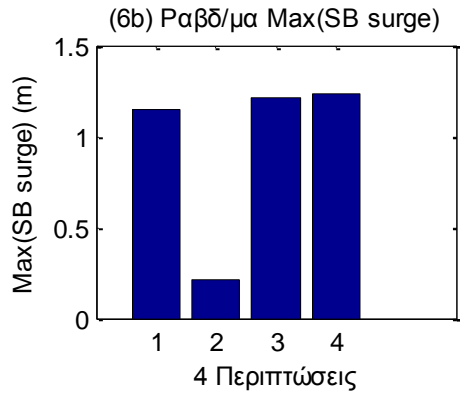
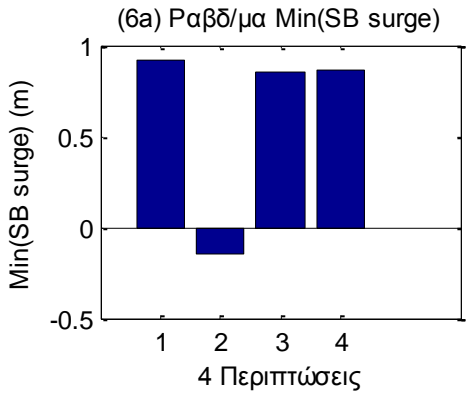
### 5.10 Σύγκριση ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης για τέσσερις περιπτώσεις

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάσουμε τη μεταβολή της ελάχιστης, μέγιστης, μέσης τιμής και διακύμανσης σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, για την SB θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις SB\_00\_NR, SB\_20\_NR, SB\_00\_R και SB\_20\_R. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την προηγούμενη ενότητα, παραθέτουμε στα επόμενα γραφήματα αρχικά, τα ραβδοδιαγράμματα, και στη συνέχεια με τα κοινά γραφήματα για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει από τα δεδομένα κάθε οργάνου μέτρησης.

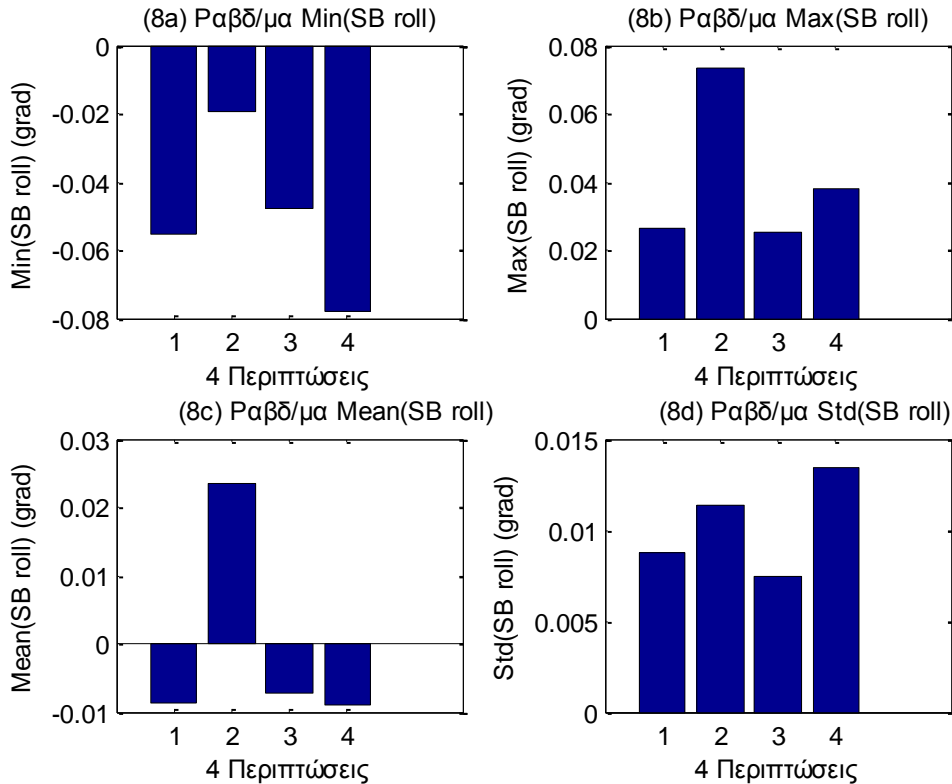










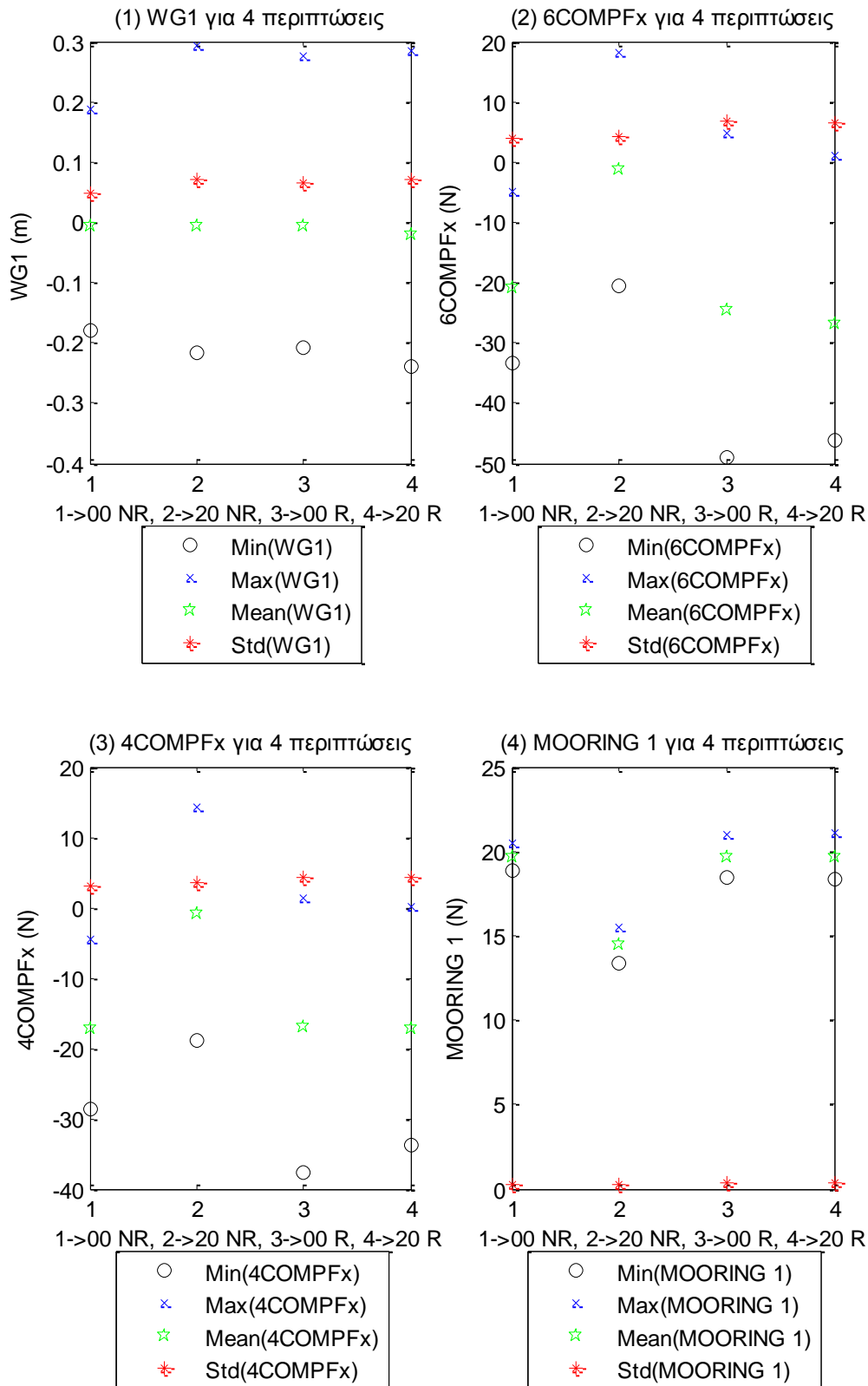


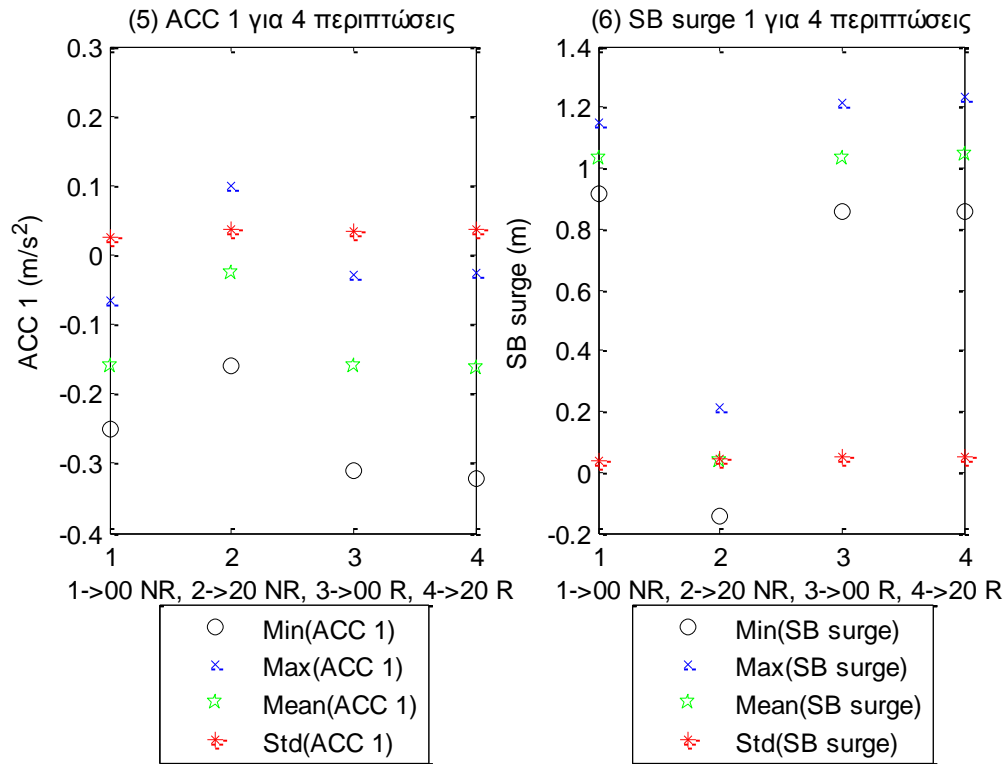
**Σχήματα 5.10.1 (1-8)** Ραβδοδιαγράμματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) για τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

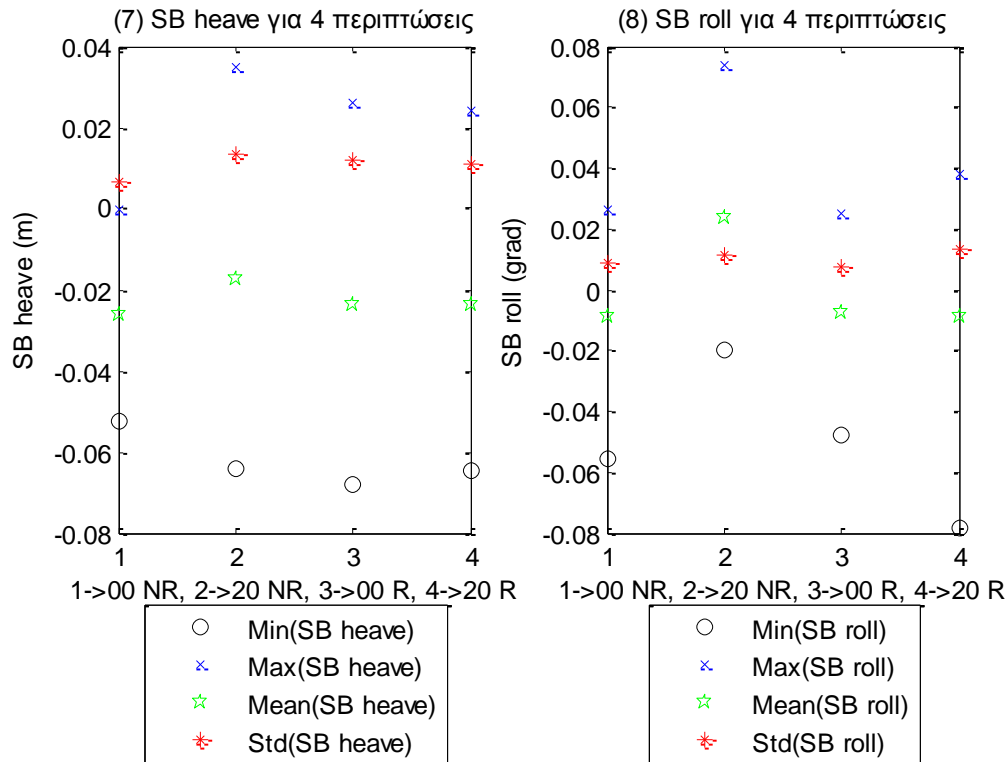
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα ραβδοδιαγράμματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.10.1) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/Γ (Σχήμα 5.10.1) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.10.1) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.10.1) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.10.1) (5), για τη μετατόπιση στη surge, (Σχήμα 5.10.1) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.10.1) (7-8).

Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση (όπως και στην αντίστοιχη ενότητα 5.9 για την TLP) σημαντικές διαφορές σε όλα τα ραβδοδιαγράμματα για την ελάχιστη τη μέγιστη και τη μέση τιμή, ενώ, υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στα αντίστοιχα ραβδοδιαγράμματα για τη διακύμανση. Στα έντεκα όργανα μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων δεν είναι σημαντικές. Συνεχίζουμε με την παράθεση των κοινών γραφημάτων για την ελάχιστη, τη μέγιστη, τη μέση τιμή καθώς επίσης και την τυπική απόκλιση.

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρατίθενται σε κοινά γραφήματα η ελάχιστη, η μέγιστη, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση για κάθε όργανο μέτρησης για τη SB.







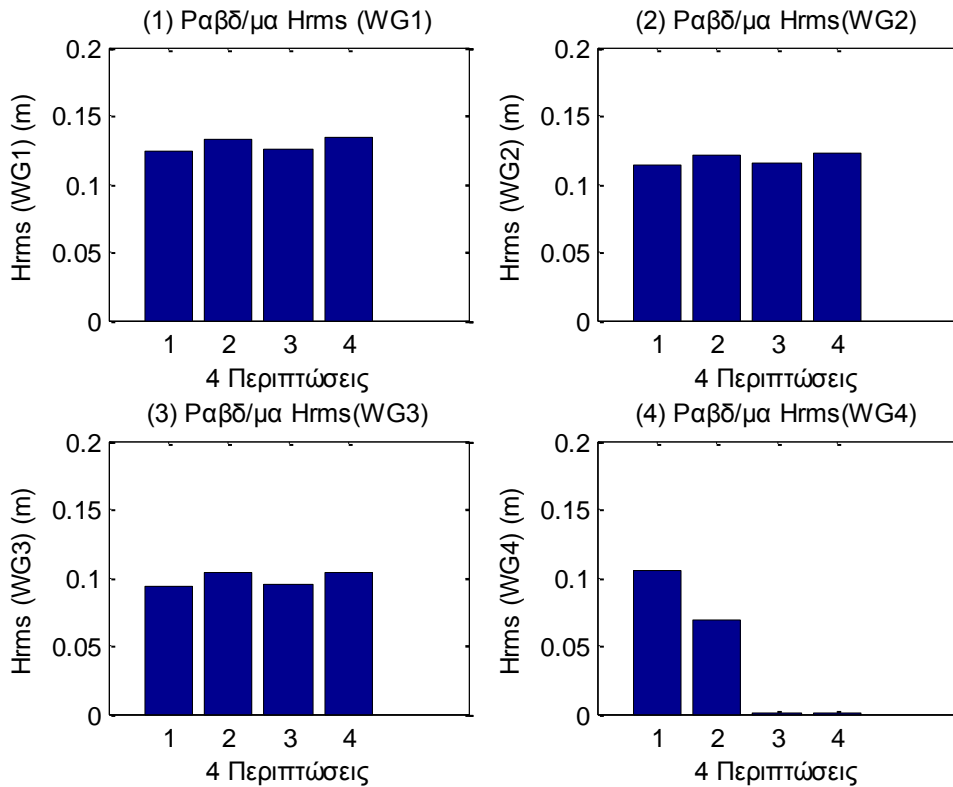
**Σχήματα 5.10.2 (1-8)** Κοινά γραφήματα min, max, mean και std για τέσσερις περιπτώσεις για τέσσερις περιπτώσεις για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) για τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα κοινά γραφήματα (a) min, (b) max, (c) mean και (d) std για τέσσερις περιπτώσεις για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.10.2) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/Γ (Σχήμα 5.10.2) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.10.2) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.10.2) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.10.2) (5), για τη μετατόπιση στη surge, (Σχήμα 5.10.2) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.10.2) (7-8).

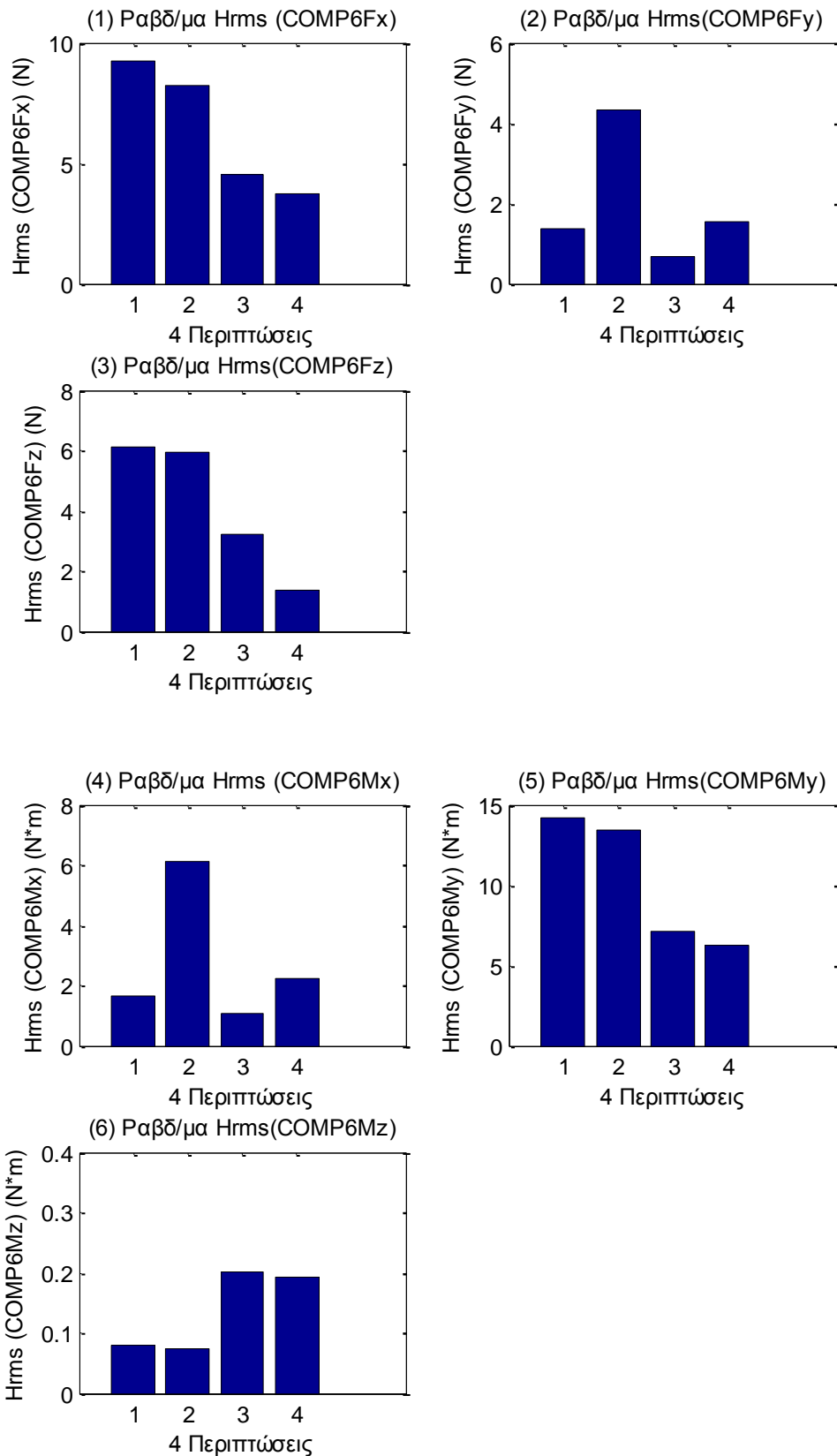
Παρατηρούμε ότι στα περισσότερα σχήματα η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή είναι στα άκρα των διαγραμμάτων, ενώ στο μέσο είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, εκτός κάποιων περιπτώσεων, όπου η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή είναι και οι δύο αρνητικές τιμές. Στο όργανο μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων είναι μικρές. Και σε αυτή την περίπτωση (της SB) παρατηρούμε μικρές διακυμάνσεις στις τιμές της τυπικής απόκλισης για τις τέσσερις περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε μέσω ραβδοδιαγραμμάτων, τη μεταβολή της τετραγωνικής ρίζας της μέσης τιμής των τετραγώνων του ύψους κύματος ( $H_{rms}$ ) σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις.

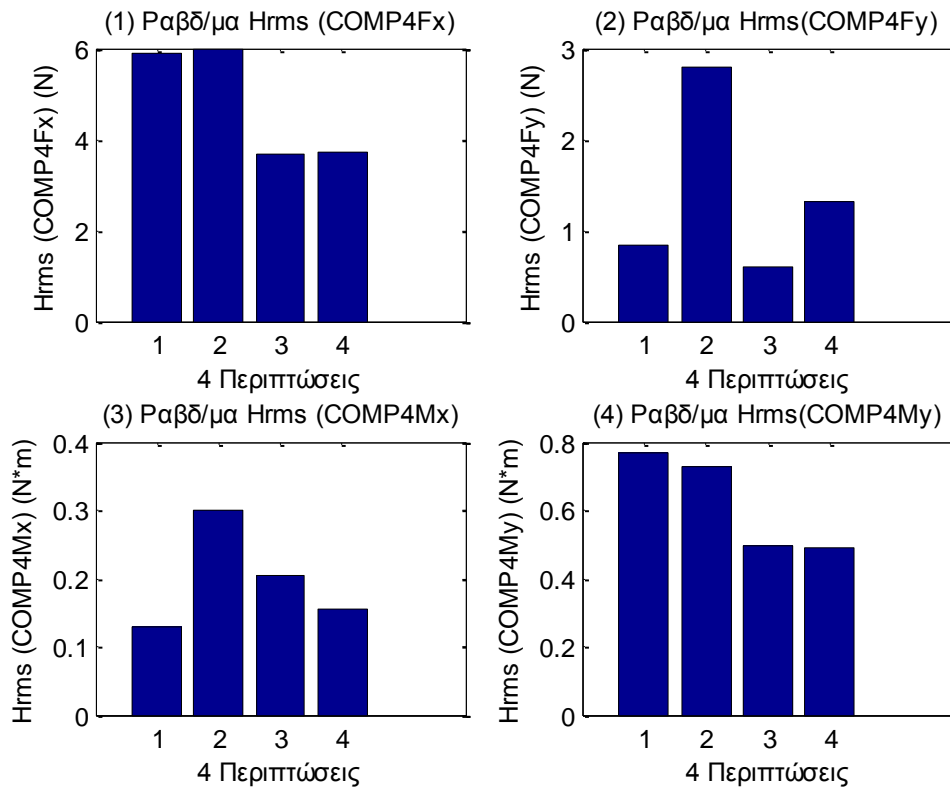
Συγκεκριμένα, για την TLP θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις (1) SB\_00\_NR, (2) SB\_20\_NR, (3) SB\_00\_R και (4) SB\_20\_R.



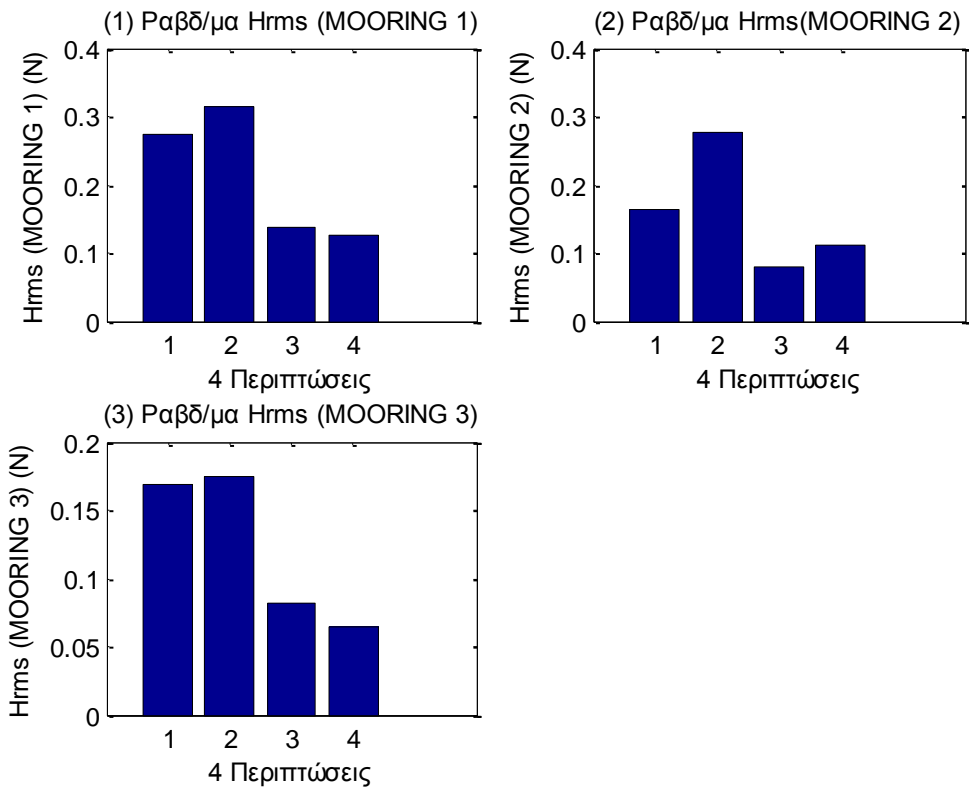
**Σχήματα 5.10.3.1 (1-11)** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα τέσσερα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος



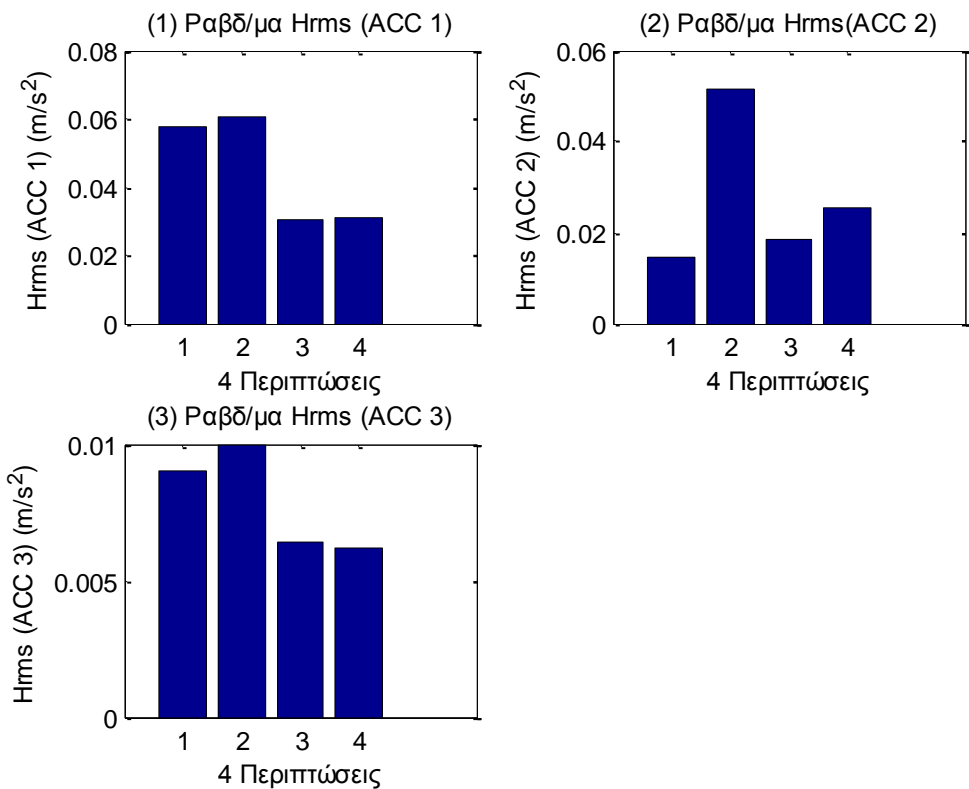
**Σχήματα 5.10.3.2** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις, για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw



**Σχήματα 5.10.3.3** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις, για τις δυο δυνάμεις στις δυο διευθύνσεις (1) surge και (2) sway και των δυο ροπών στους αντίστοιχους δυο άξονες (3) roll και (4) pitch

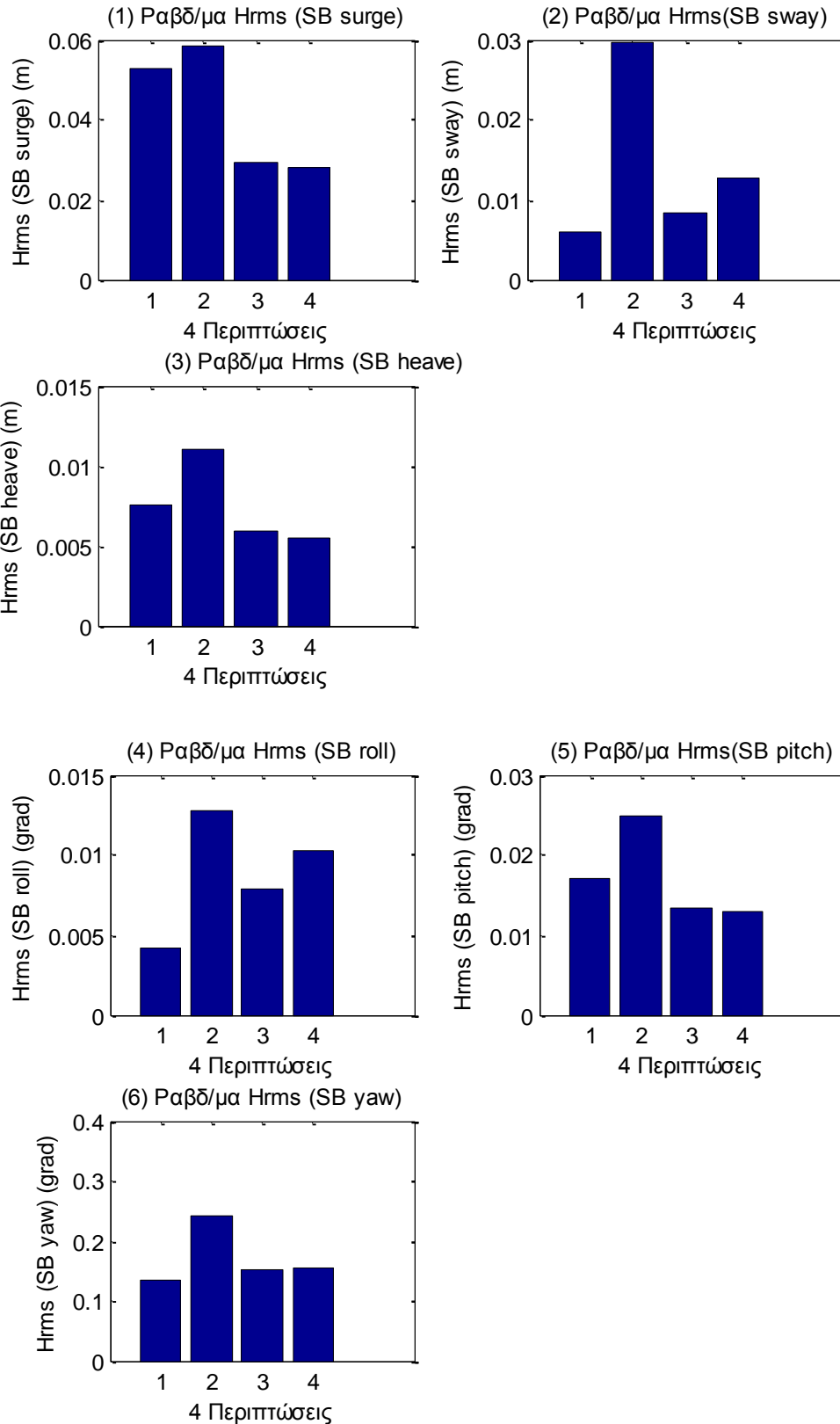


**Σχήματα 5.10.3.4** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τις δυνάμεις στις 3 γραμμές αγκύρωσης



**Σχήματα 5.10.3.5 (1-3)** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης (1) Acc 1, (2) Acc 2 και (3) Acc 3



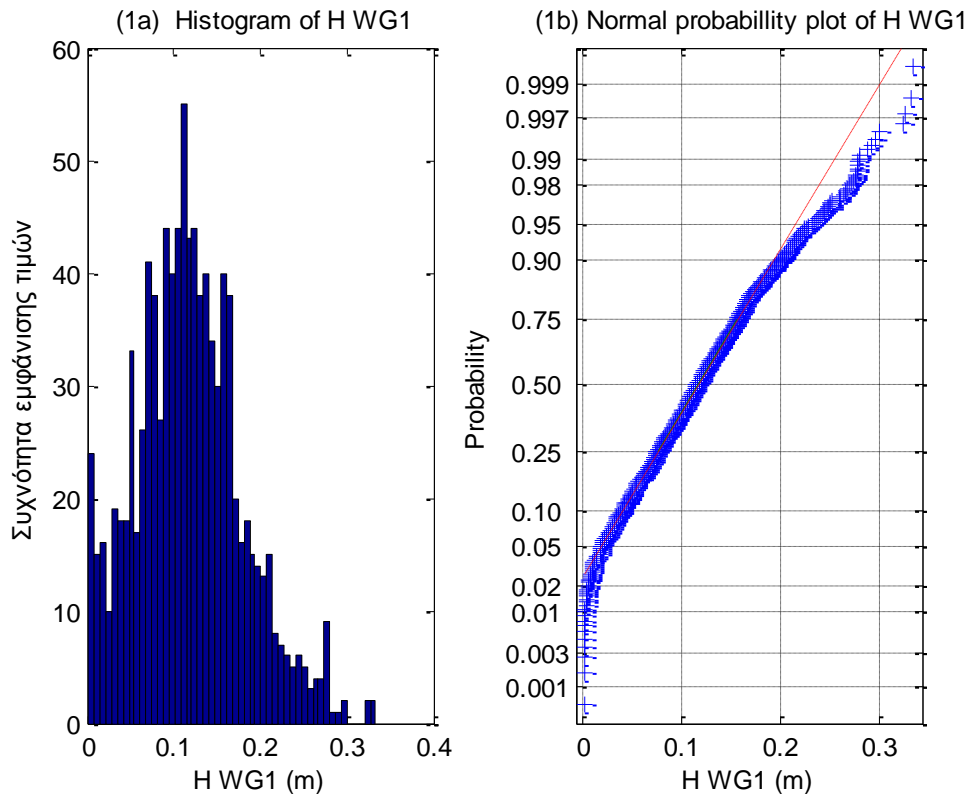


**Σχήματα 5.10.3.6** Ραβδοδιαγράμματα  $H_{rms}$  για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις μετατοπίσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

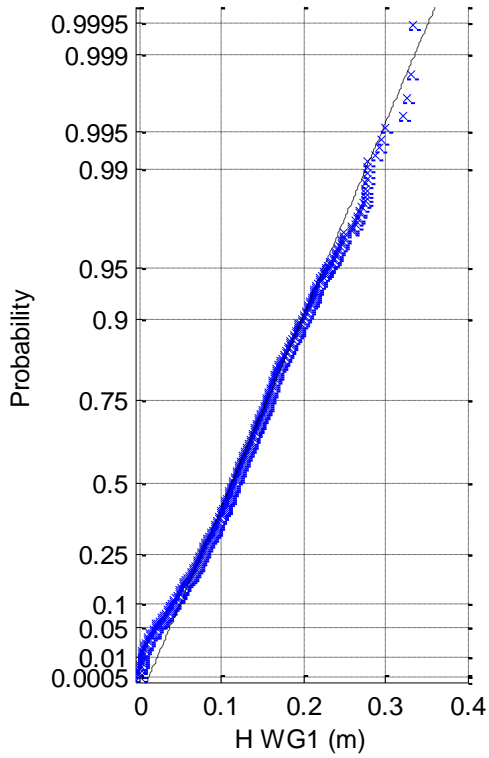
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τα Ραβδοδιαγράμματα για την τιμή της  $H_{rms}$  για τα τέσσερα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήματα 5.10.3.1) (1—4), για τις τρεις δυνάμεις και τις τρεις ροπές στη βάση της Α/Γ (Σχήματα 5.10.3.2) (1-6), για τις δύο δυνάμεις και τις δύο ροπές στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήματα 5.10.3.3) (1-4), τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήματα 5.10.3.4) (1-3), για τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήματα 5.10.3.5) (1-3), και, τέλος, για τις τρεις μετατοπίσεις και τις τρεις περιστροφές (Σχήματα 5.10.3.6) (1-6).

Από τα παραπάνω ραβδοδιαγράμματα δεν παρατηρούμε σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων για την τιμή της  $H_{rms}$ .

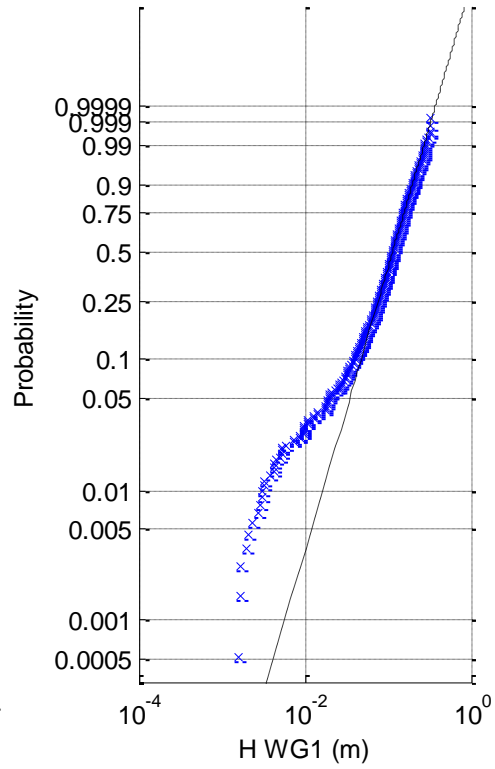
Στο τελευταίο μέρος της παρούσας ενότητας θα παρουσιάσουμε (α) το ιστογράμμο της κατανομής των  $H_i$  (όπου το  $H$  υπενθυμίζουμε, ότι, είναι το ύψος κύματος σαν διαφορά διαδοχικών ελαχίστων και μεγίστων τιμών της χρονοσειράς κάθε οργάνου), (β) το Normal probability plot, (γ) το Rayleigh probability plot και (δ) το Weibull probability plot για κάθε χρονοσειρά, από κάθε όργανο μέτρησης.



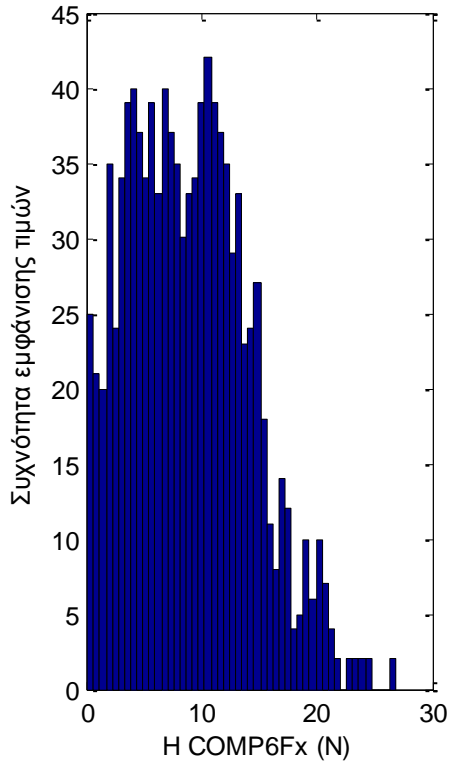
(1c) Rayleigh probability plot of H WG1



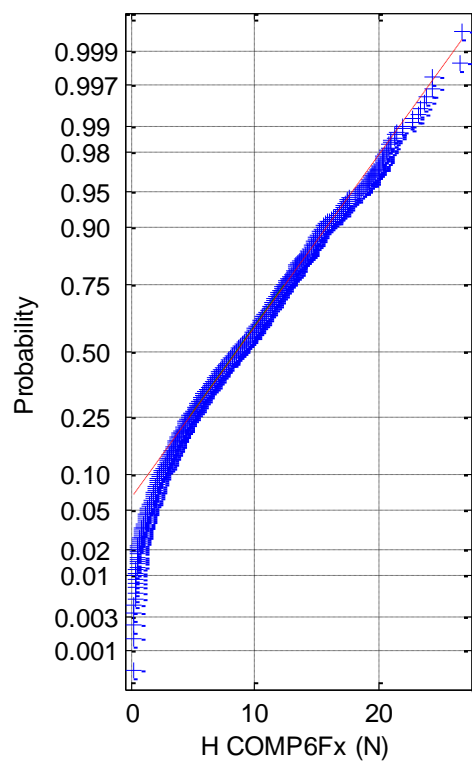
(1d) Weibull probability plot of H WG1



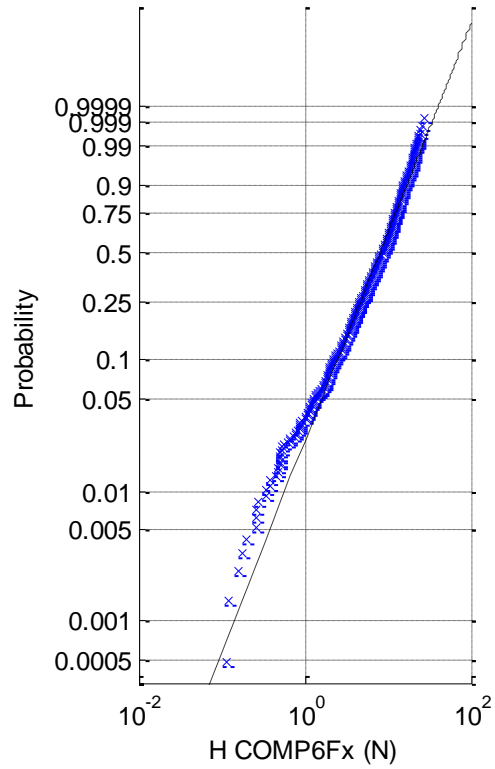
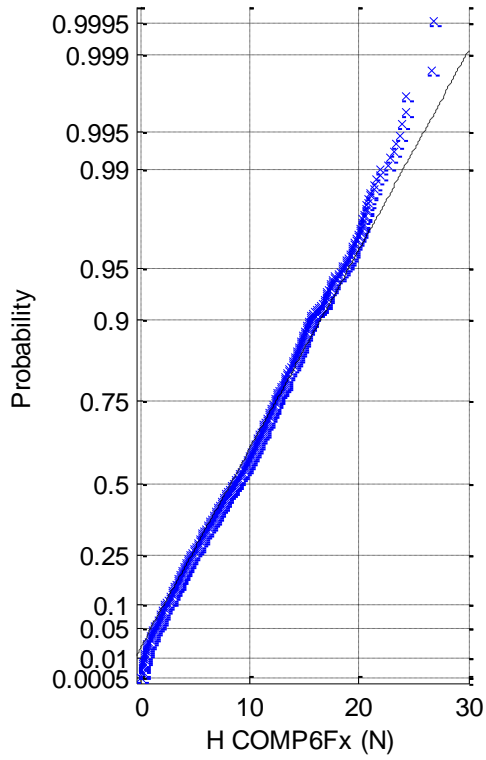
(2a) Histogram of H COMP6Fx



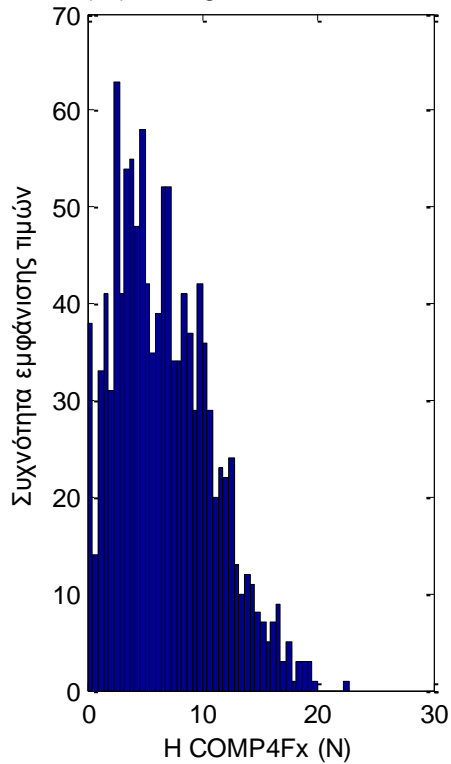
(2b) Normal probab. plot of H COMP6Fx



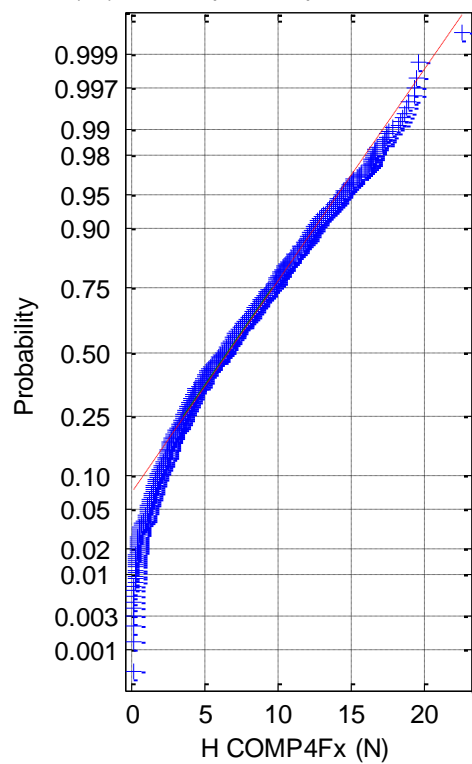
(2c) Rayleigh probab. plot of H COMP6Fx (2d) Weibull probab. plot of H COMP6Fx



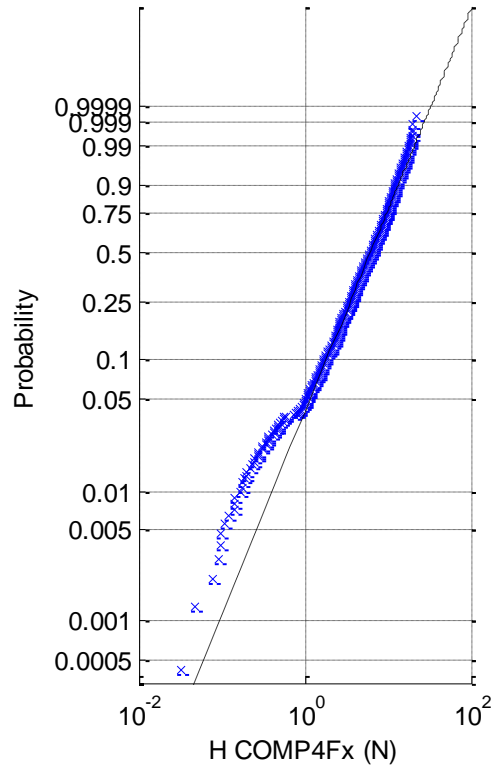
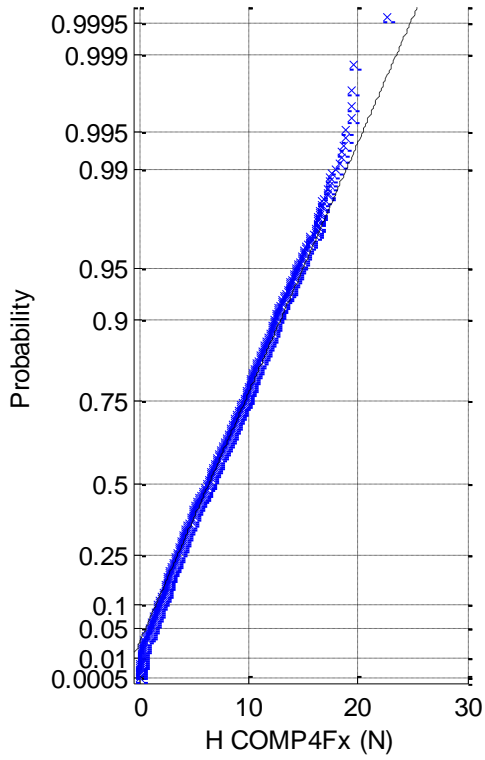
(3a) Histogram of H COMP4Fx



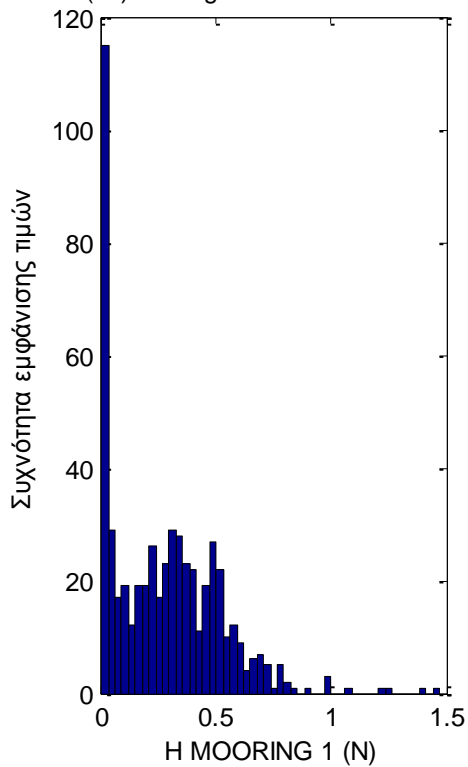
(3b) Normal probab. plot of H COMP4Fx



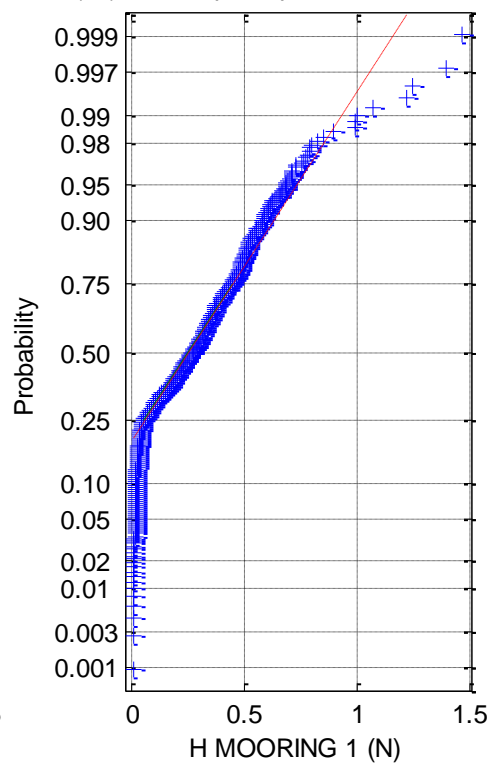
(3c) Rayleigh probab. plot of H COMP4Fx (3d) Weibull probab. plot of H COMP4Fx



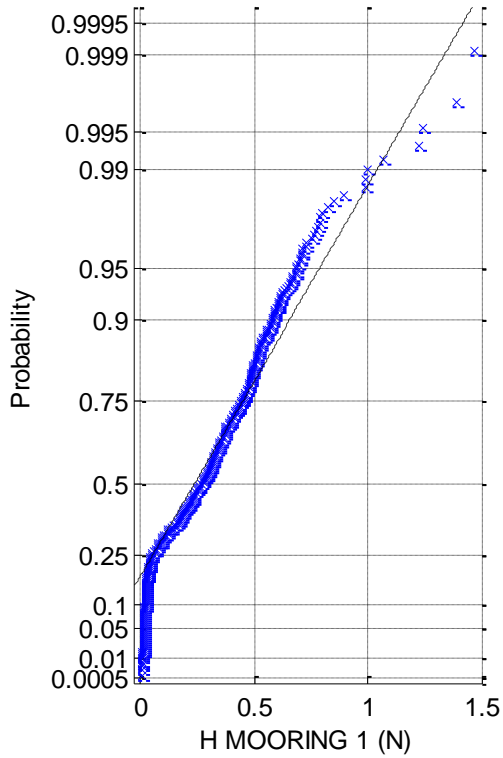
(4a) Histogram of H MOORING 1



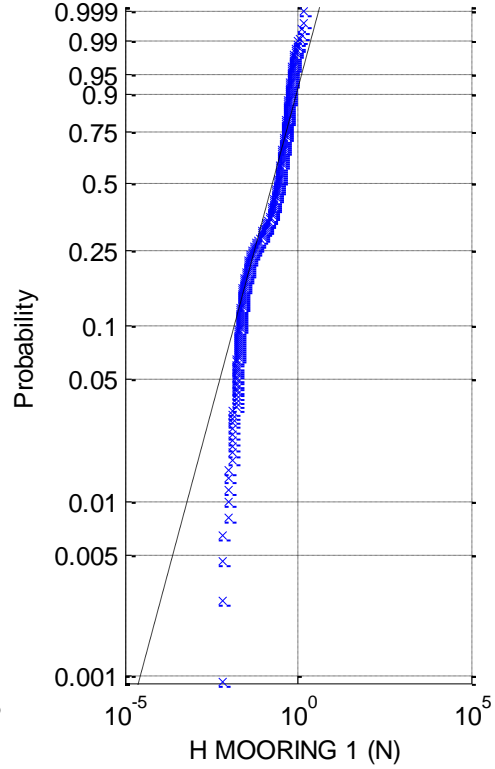
(4b) Normal prob. plot of H MOORING 1



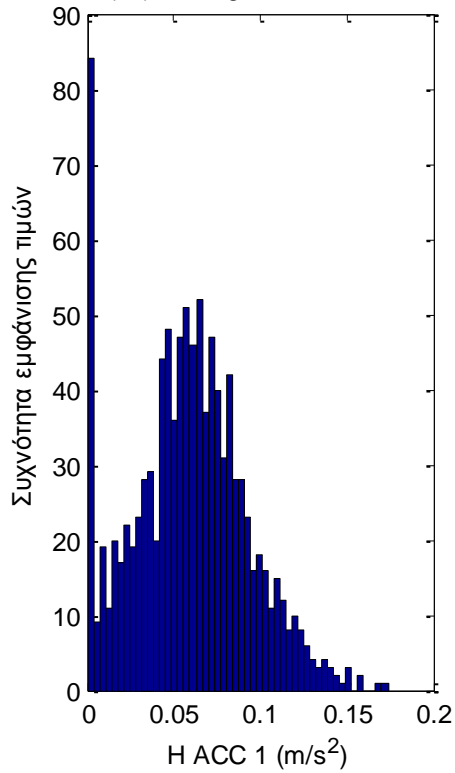
(4c) Rayleigh prob. plot of H MOORING 1



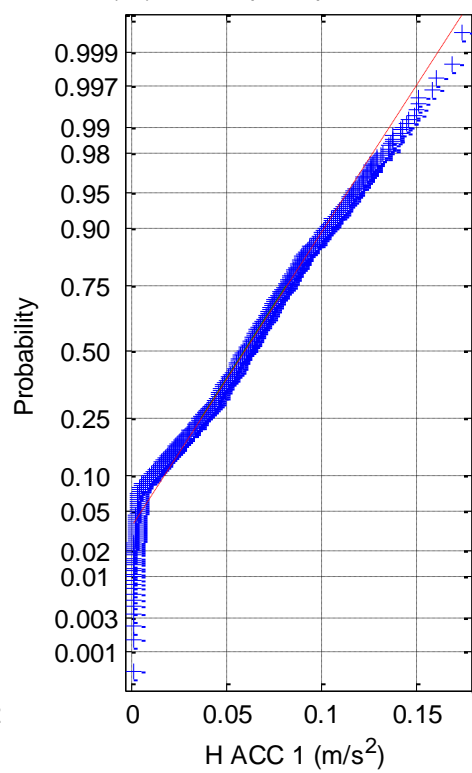
(4d) Weibull prob. plot of H MOORING 1



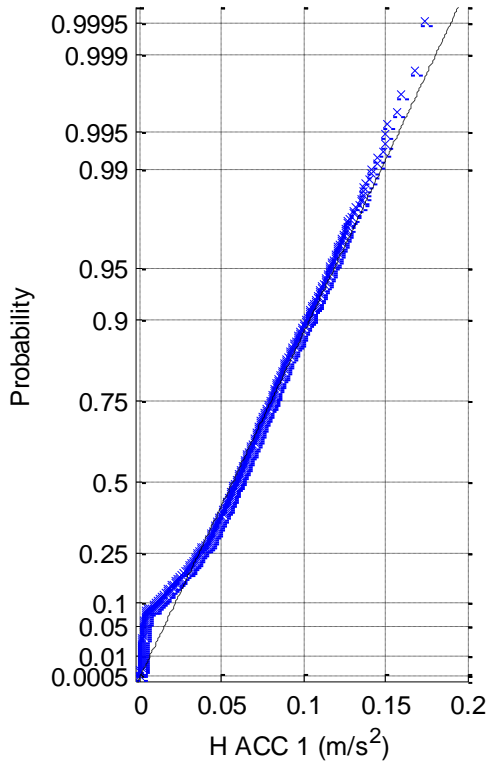
(5a) Histogram of H ACC 1



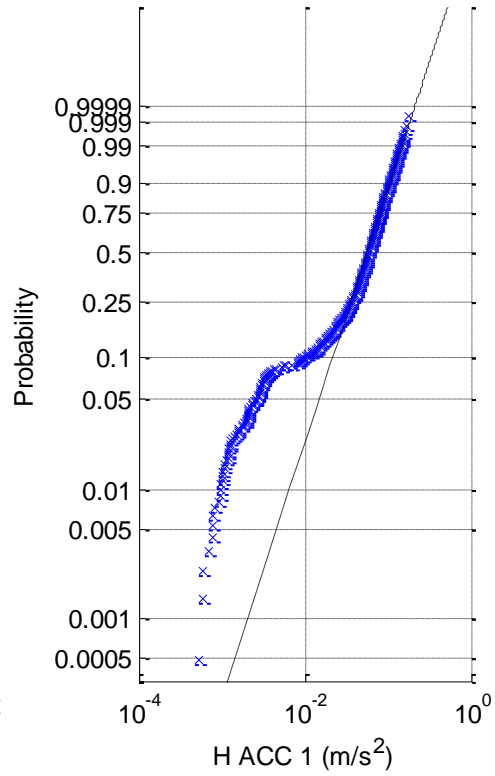
(5b) Normal prob. plot of H ACC 1



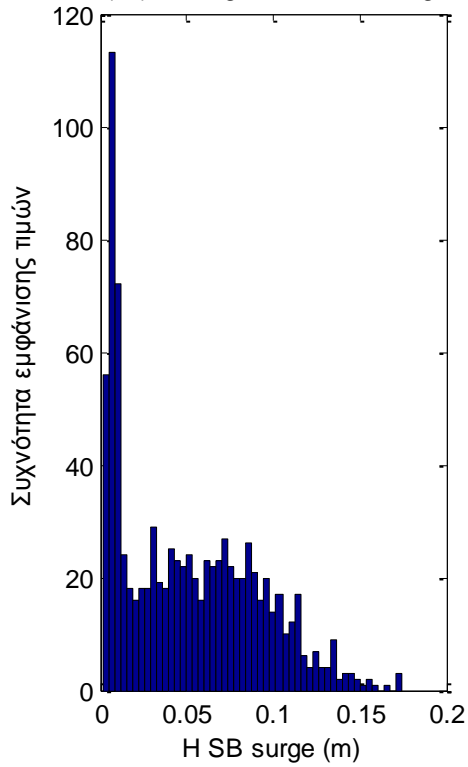
(5c) Rayleigh prob. plot of H ACC 1



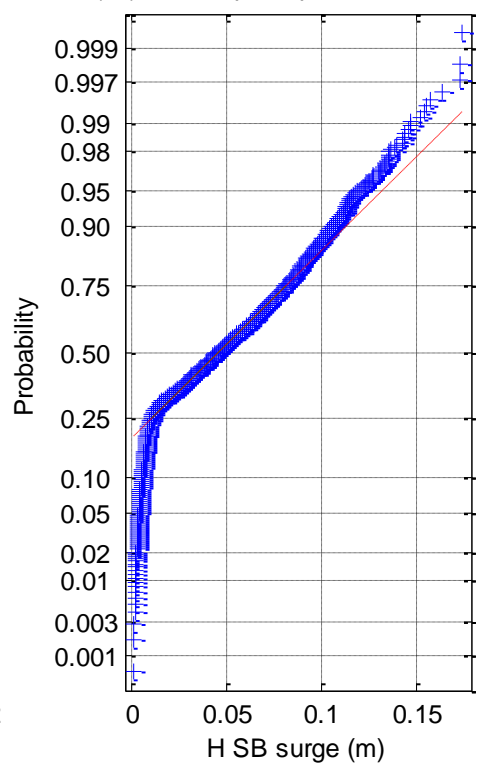
(5d) Weibull prob. plot of H ACC 1



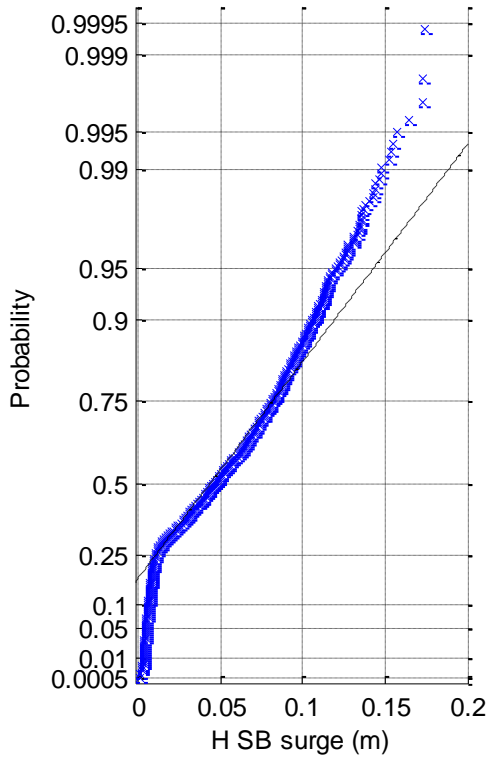
(6a) Histogram of H SB surge



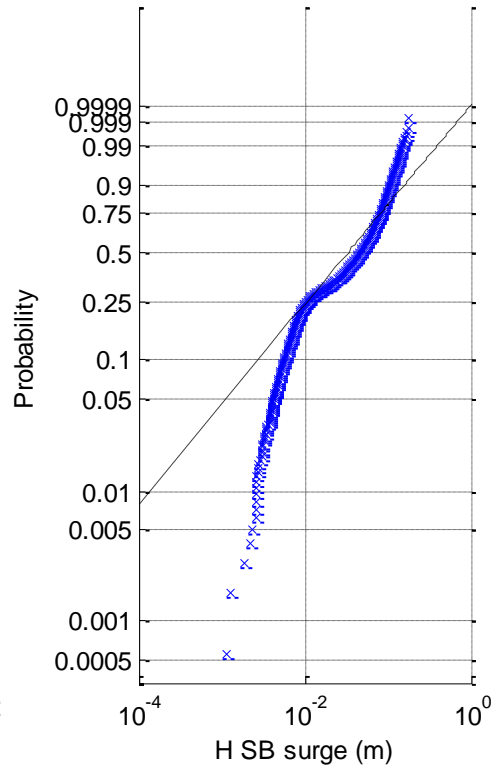
(6b) Normal prob. plot of H SB surge



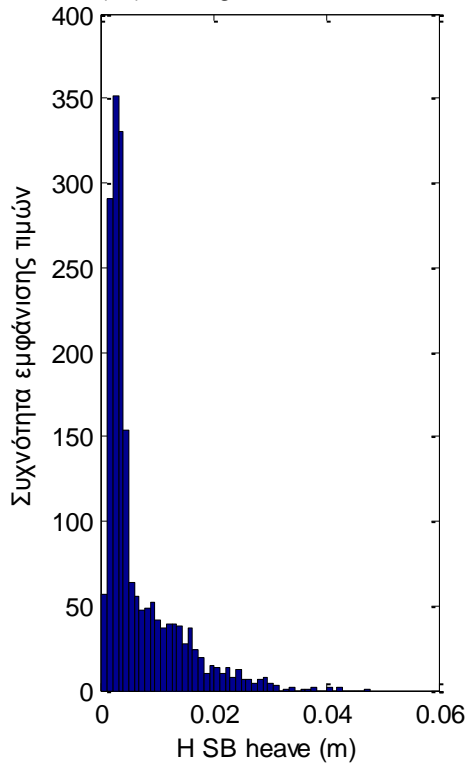
(6c) Rayleigh prob. plot of H SB surge



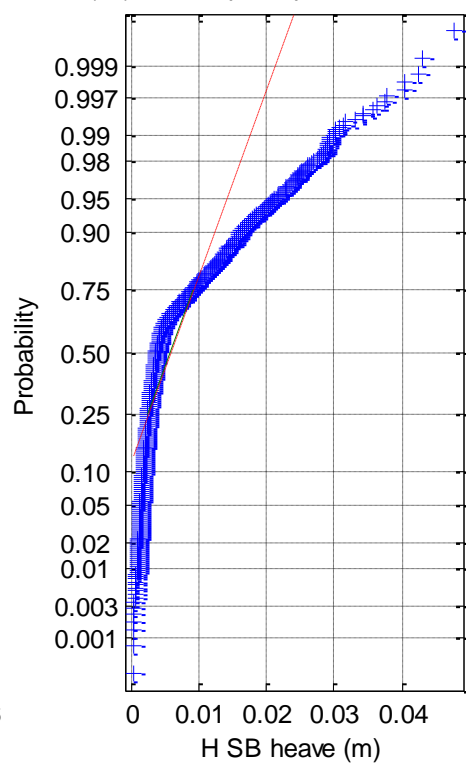
(6d) Weibull prob. plot of H SB surge



(7a) Histogram of H SB heave

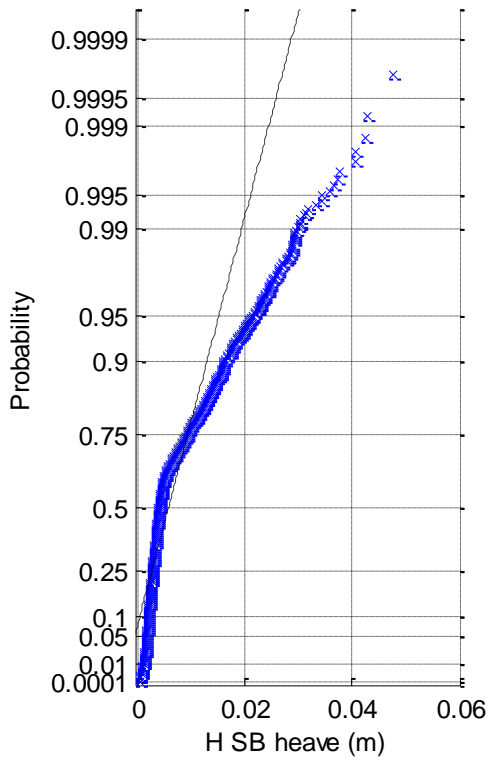


(7b) Normal prob. plot of H SB heave

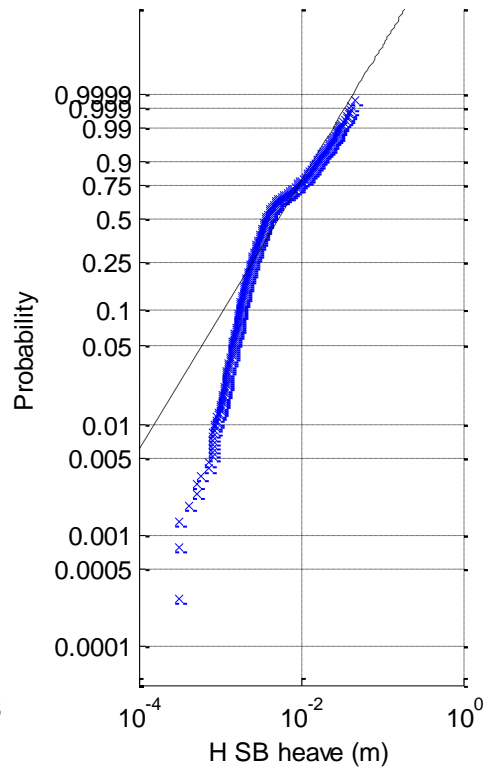




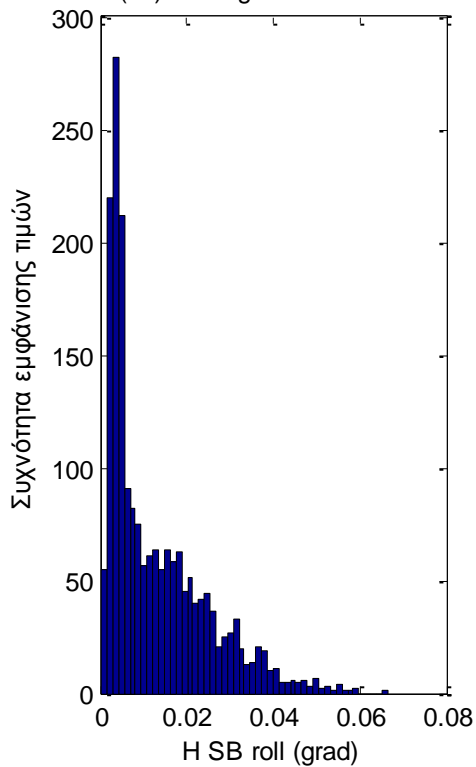
(7c) Rayleigh prob. plot of H SB heave



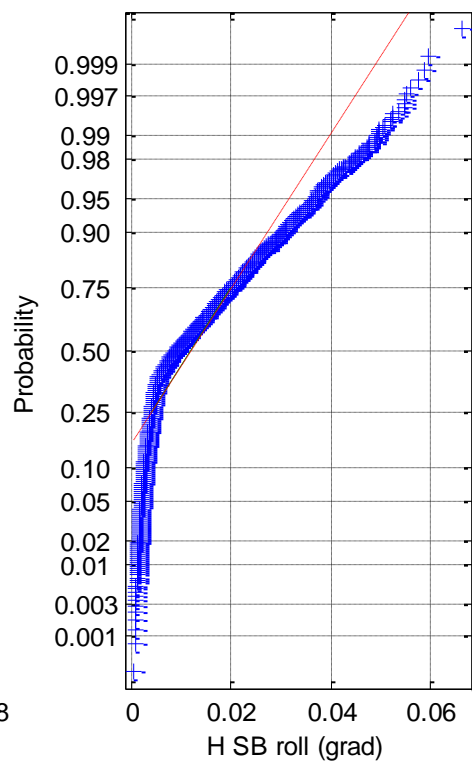
(7d) Weibull prob. plot of H SB heave

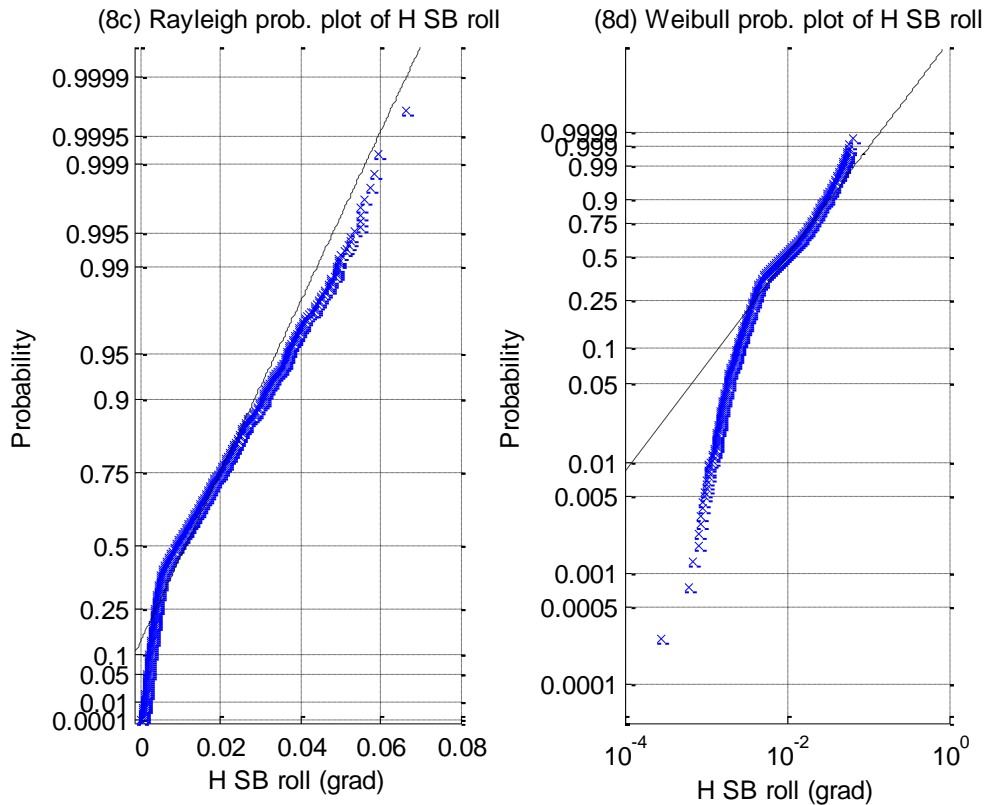


(8a) Histogram of H SB roll



(8b) Normal prob. plot of H SB roll





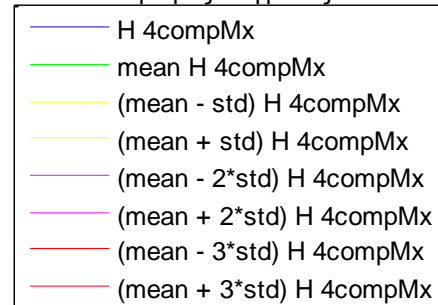
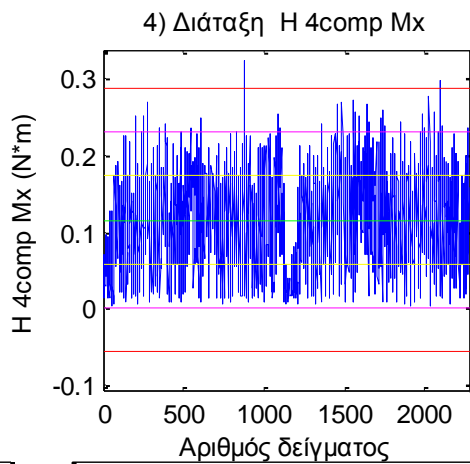
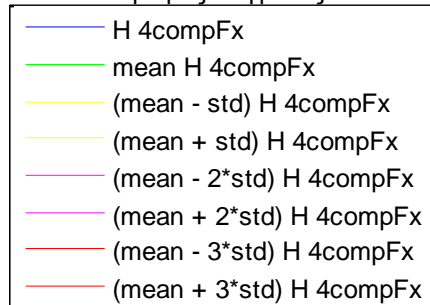
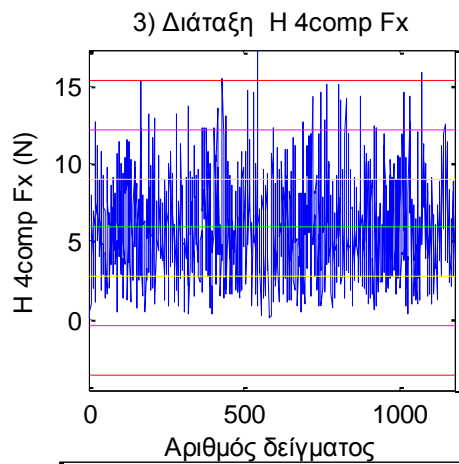
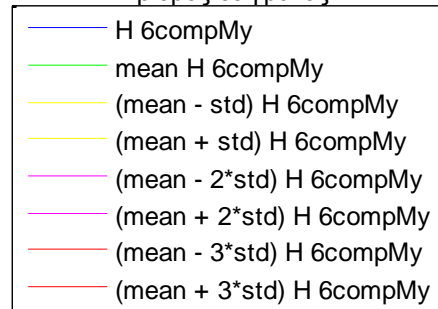
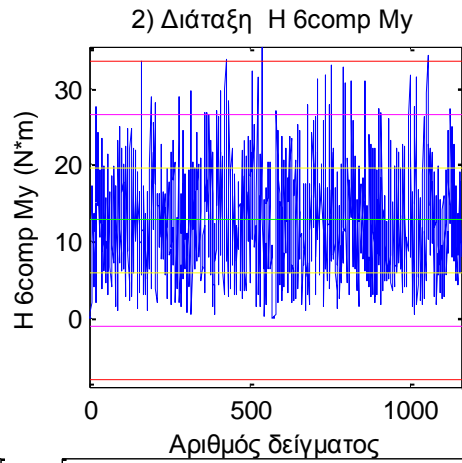
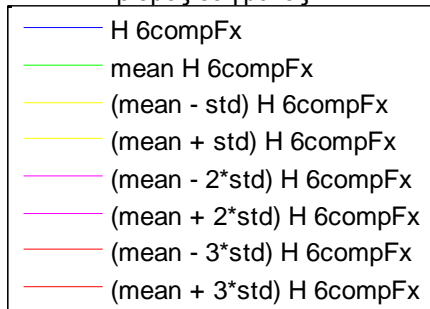
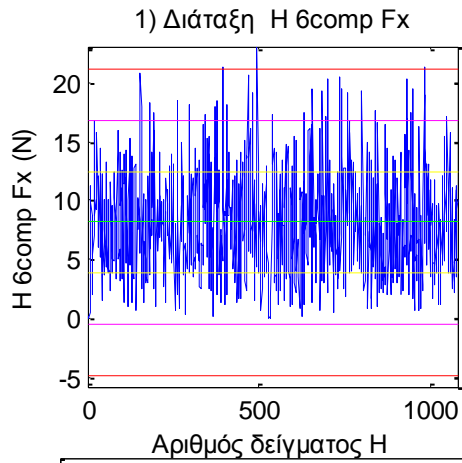
**Σχήματα 5.10.4 (1-8)** a) Ιστογράμματα , b) γραφήματα ελέγχου κανονικότητας, c) έλεγχος κατανομής Rayleigh και d) έλεγχος κατανομής Weibull για (1) το ένα από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (2) για τη δύναμη στη βάση της Α/Γ στη surge διεύθυνση, (3) τη δύναμη στο Ρότορα της Α/Γ, (4) της μια (Mooring 1) από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης, (5) του ενός (ACC 1) από τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης, (6) της μετατόπισης στη surge διεύθυνση, (7) της μετατόπισης στη heave διεύθυνση και (8) της roll περιστροφής

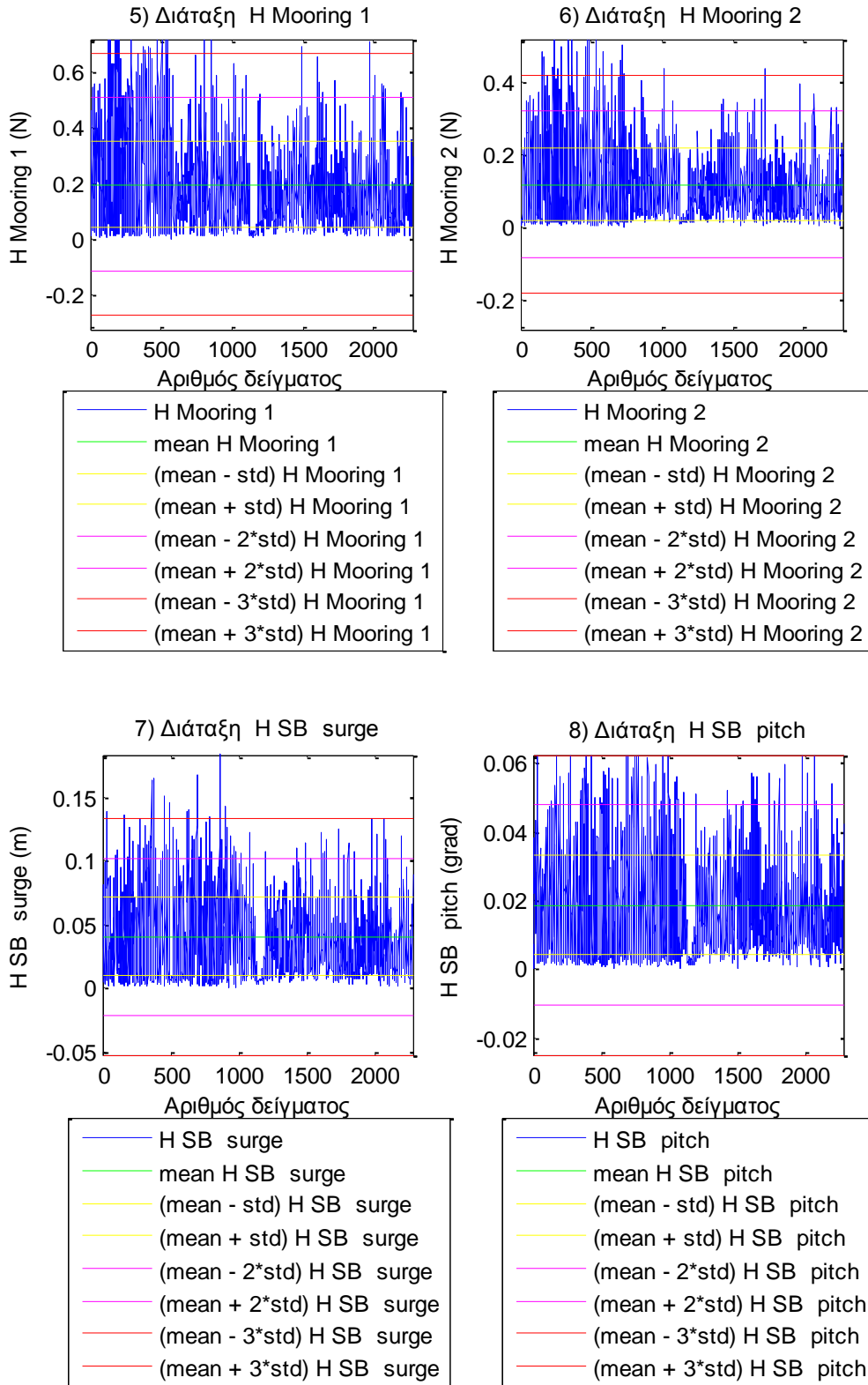
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε a) Ιστογράμματα , b) γραφήματα ελέγχου κανονικότητας, c) έλεγχος κατανομής Rayleigh και d) έλεγχος κατανομής Weibull για το 1 από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήμα 5.10.4) (1), για τη μια από τις τρεις δυνάμεις στη βάση της Α/ Γ (Σχήμα 5.10.4) (2), για τη μια από τις δύο δυνάμεις στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήμα 5.10.4) (3), τη μια από τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήμα 5.10.4) (4), τη μια χρονοσειρά από τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήμα 5.10.4) (5), για τη μετατόπιση στη surge, (Σχήμα 5.10.4) (6) και, τέλος, για τη μετατόπιση στη heave και roll περιστροφή (Σχήματα 5.10.4) (7-8).

Τα αποτελέσματα του ελέγχου για την κατανομή των H για κάθε όργανο μέτρησης δείχνουν, ότι και σε αυτή την περίπτωση (SB) , τα H είναι πιο κοντά στην κατανομή Rayleigh και την κανονική και λιγότερο στην κατανομή Weibull.

Στα παραρτήματα TLP και SB υπάρχουν στις τελευταίες παραγράφους η ανάλυση για τις χρονοσειρές από όλα τα όργανα που παραλήφθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (για εξοικονόμηση χώρου).

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας ενότητας θα παρουσιάσουμε τη χρονοσειρά των  $H_i$  με τη μέση τιμή και με τα τρία όρια όπως έγινε στην παράγραφο 5.9.





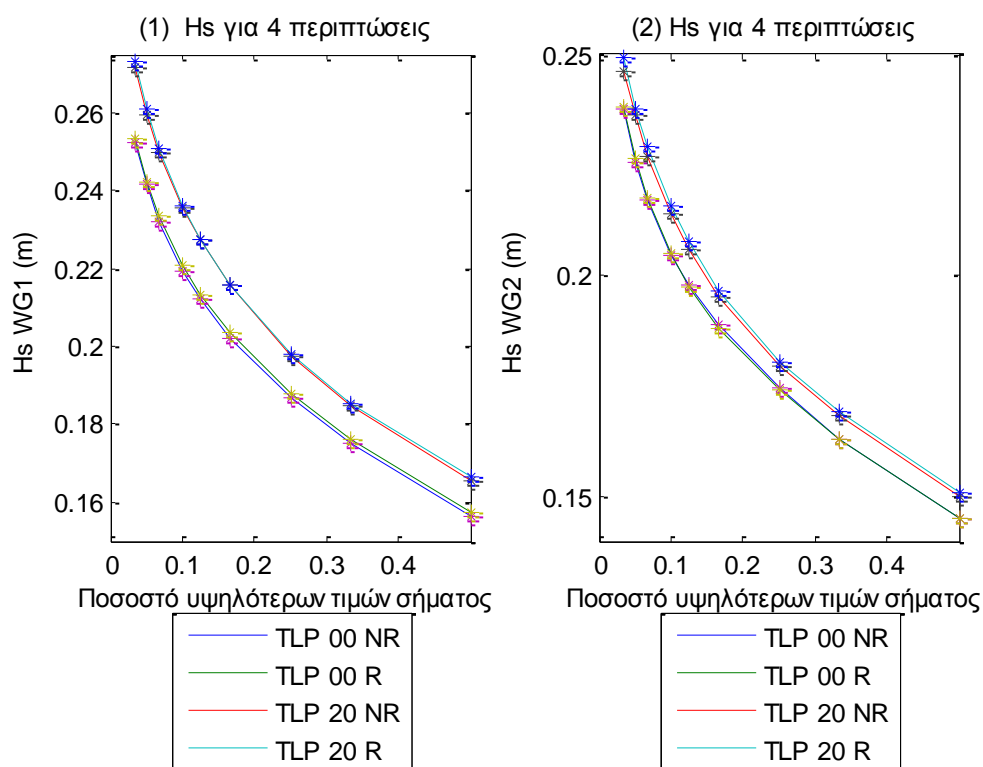
**Σχήματα 5.10.5 (1-8)** Διαγράμματα διάταξης του H για (1) τη δύναμη στη βάση της A/Γ στη surge διεύθυνση (2) τη ροπή η βάση της A/Γ στη pitch περιστροφή, (3) τη δύναμη και (4) τη ροπή στο Ρότορα της A/Γ, (5) και (6) τις δύο δυνάμεις (Mooring 1 και 2) από τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης, και (7) τη μετατόπιση στη surge διεύθυνση και (8) τη pitch περιστροφή

Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι, (με εξαίρεση τα διαγράμματα για τις κινήσεις και τις δυνάμεις στις δύο γραμμές αγκύρωσης) τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών κατανέμονται ομοιόμορφα σε αυτά τα τρία διαστήματα.

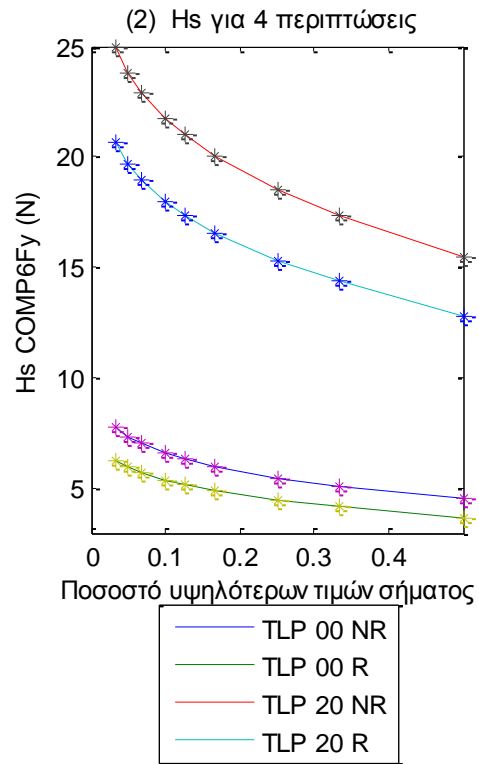
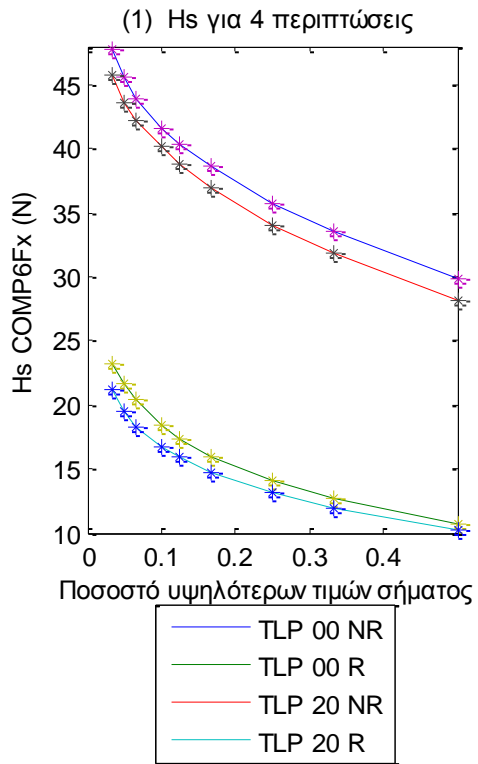
### 5.11 Σύγκριση κατανομών σημαντικού ύψους $H_s$ για τέσσερις περιπτώσεις TLP\_0\_NR

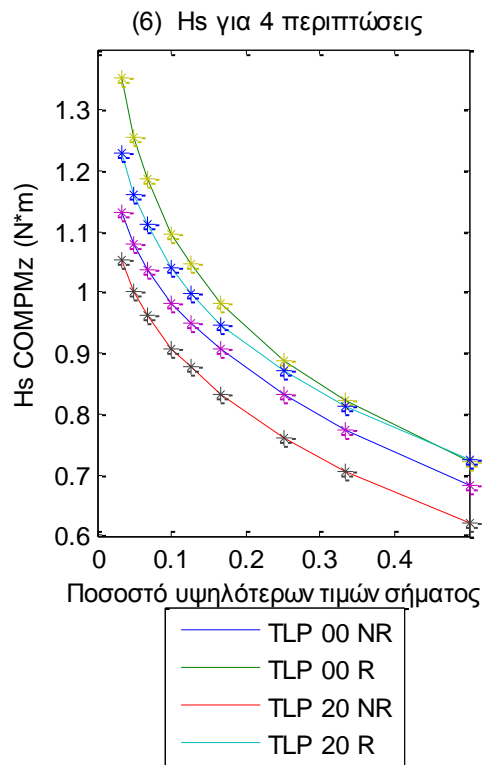
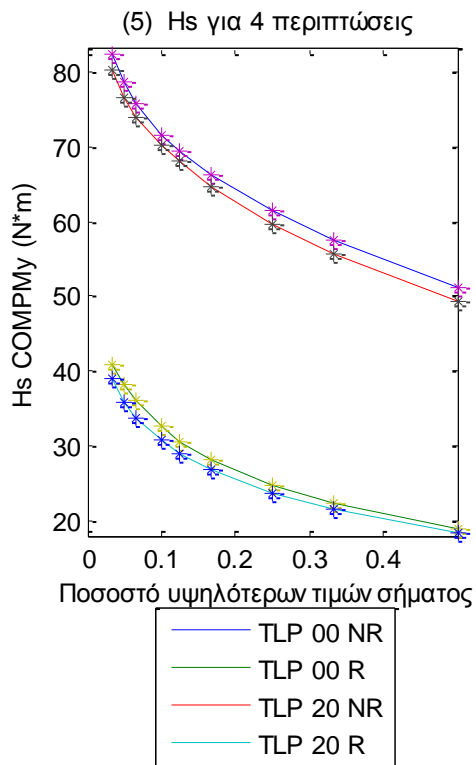
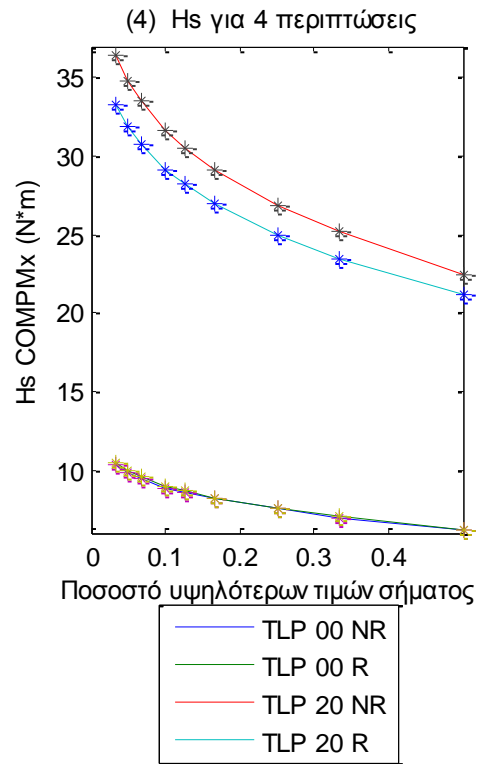
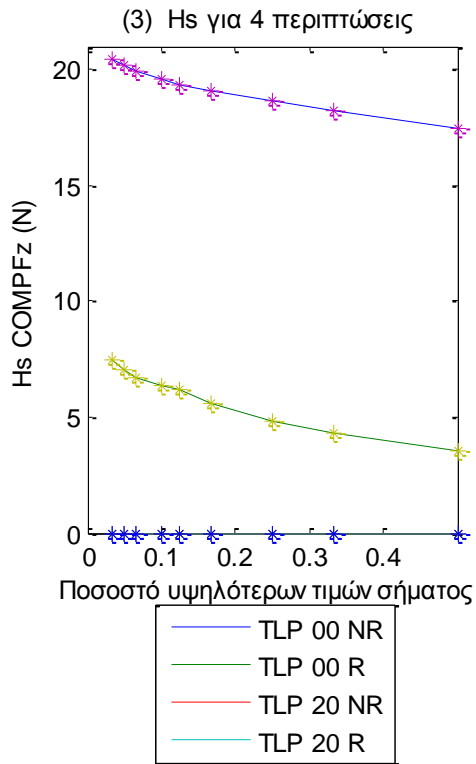
Στις δύο τελευταίες ενότητες θα παρουσιάσουμε τη μεταβολή της κατανομής του σημαντικού ύψους σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, για την TLP θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις TLP\_00\_NR, TLP\_20\_NR, TLP\_00\_R και TLP\_20\_R. Υπολογίζουμε για κάθε περίπτωση την κατανομή του σημαντικού ύψους των υψηλότερων τιμών για κάθε όργανο μέτρησης και τις παραθέτουμε άπασες σε κοινά γραφήματα. Ισχύουν τα ίδια ποσοστά σήματος [1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15, 1/30] που χρησιμοποιήσαμε στις αντίστοιχες προηγούμενες ενότητες.

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, των γραφημάτων για τις κατανομές του σημαντικού ύψους  $H_s$  για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει από τα δεδομένα κάθε οργάνου μέτρησης.

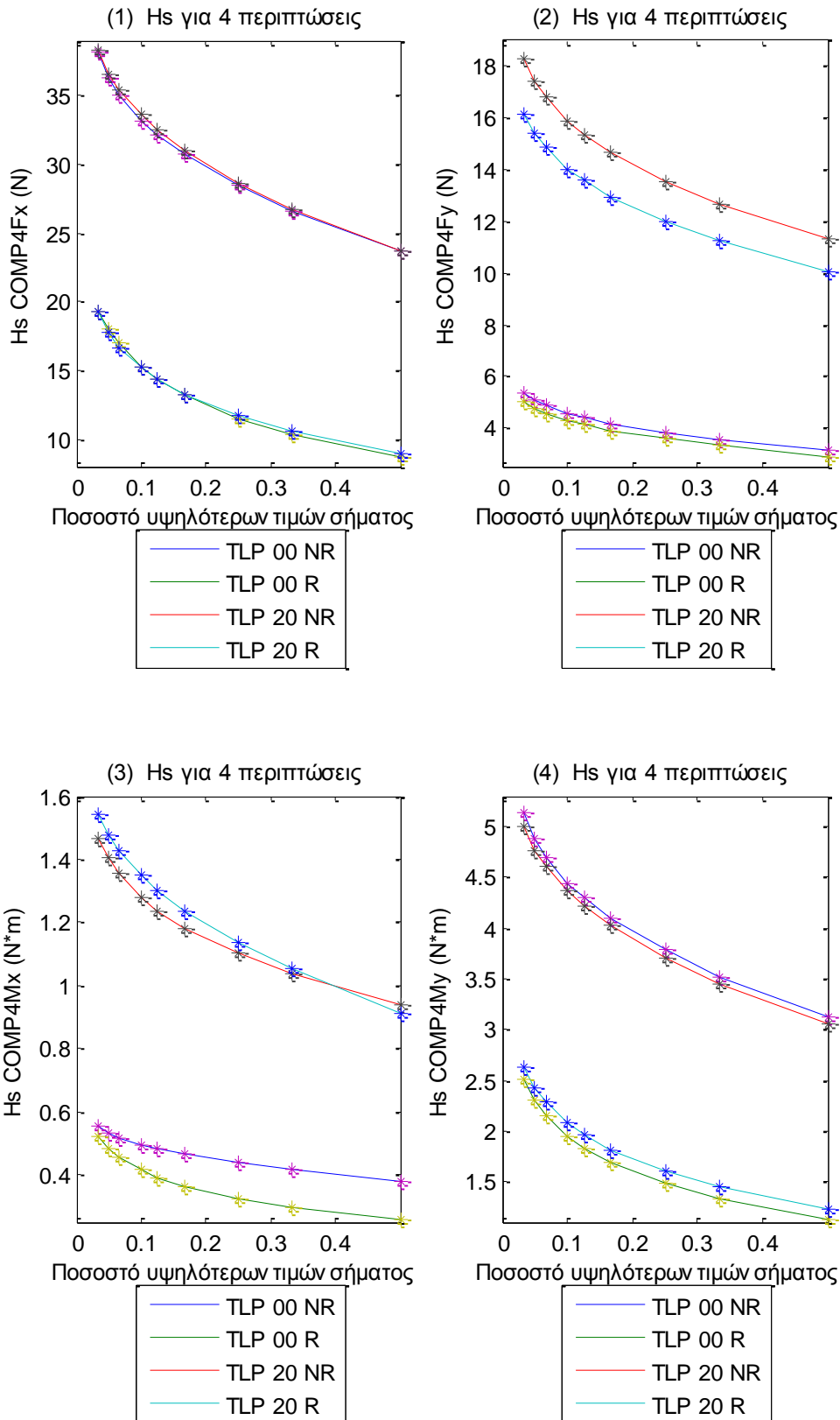


**Σχήματα 5.11.1 (1-2)** Κατανομές σημαντικού ύψους  $H_s$  για τέσσερις περιπτώσεις για τα δύο από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος



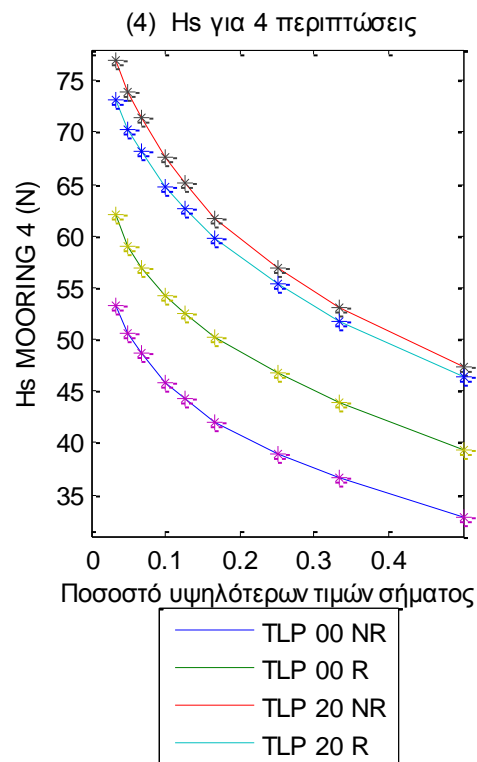
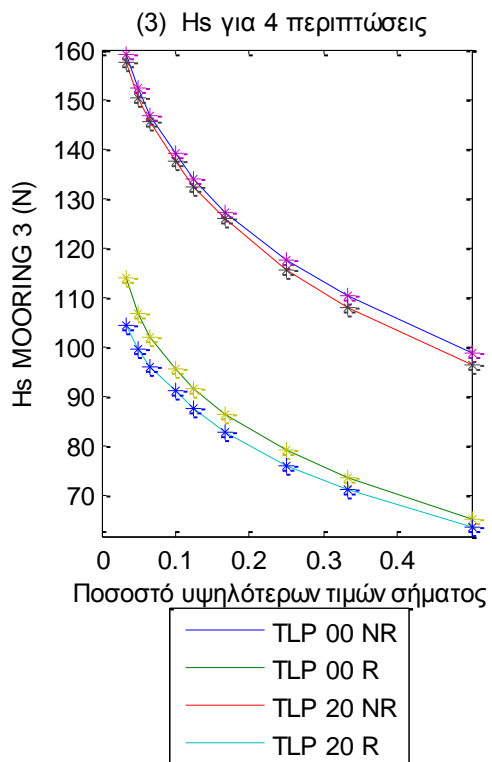
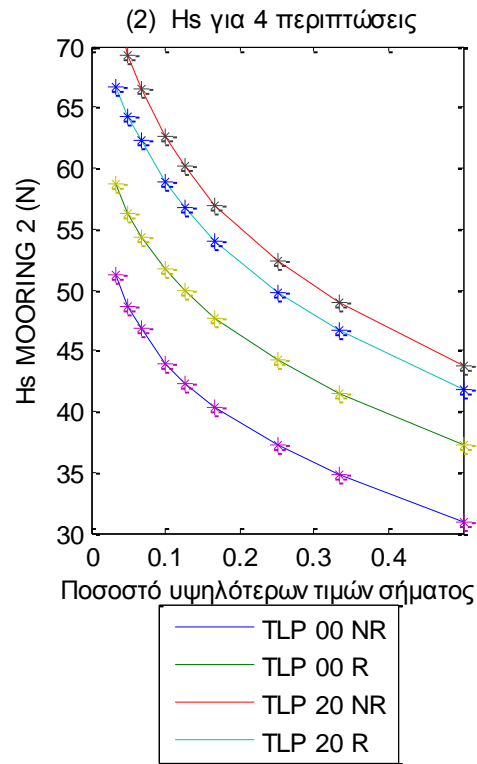
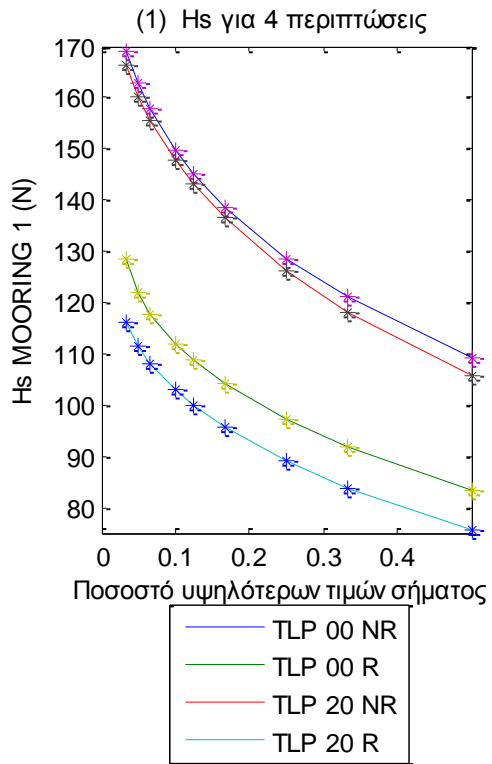


**Σχήματα 5.11.2** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

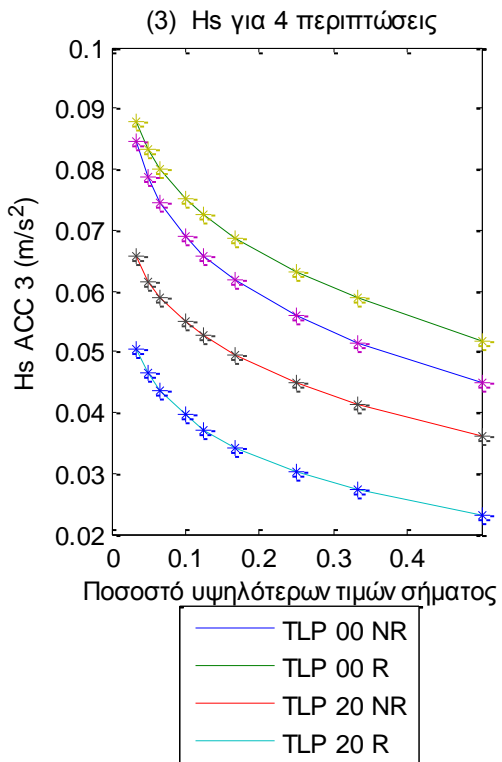
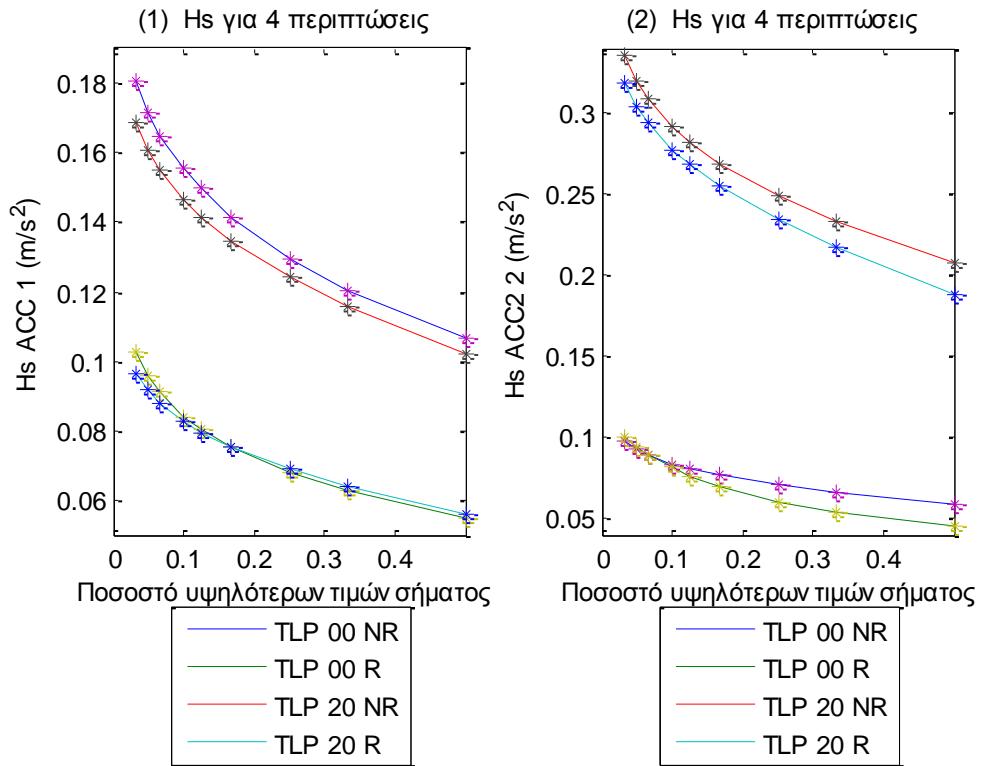


**Σχήματα 5.11.3** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις δύο δυνάμεις (1-2) και τις δύο ροπές (3-4) στο Ρότορα της Α/Γ

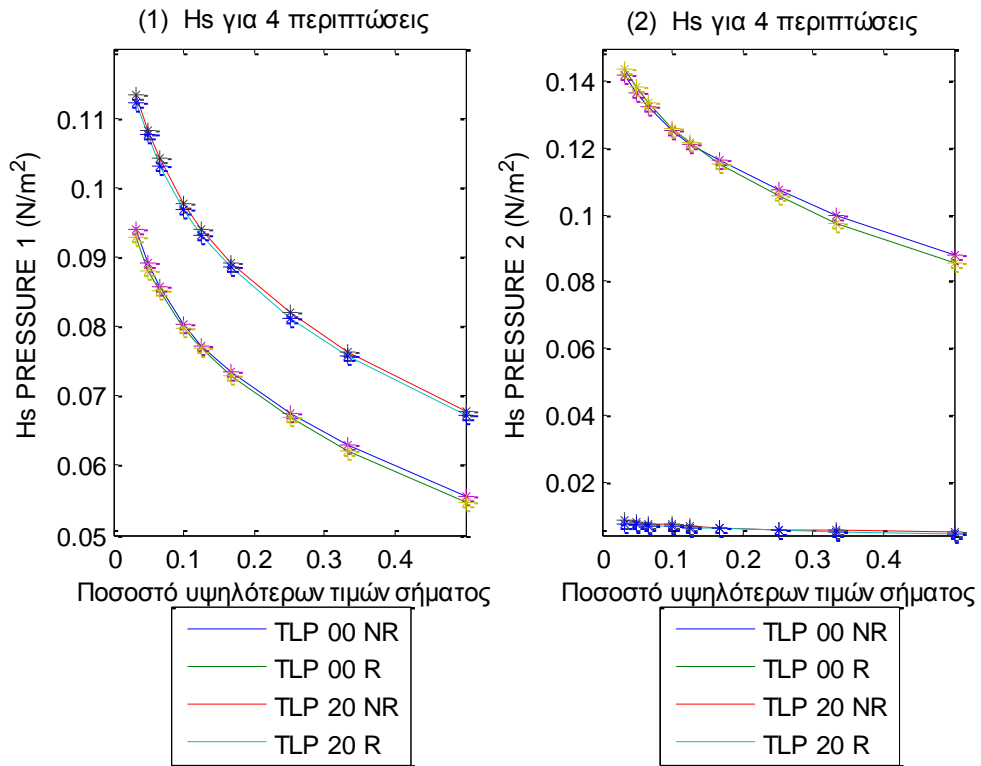




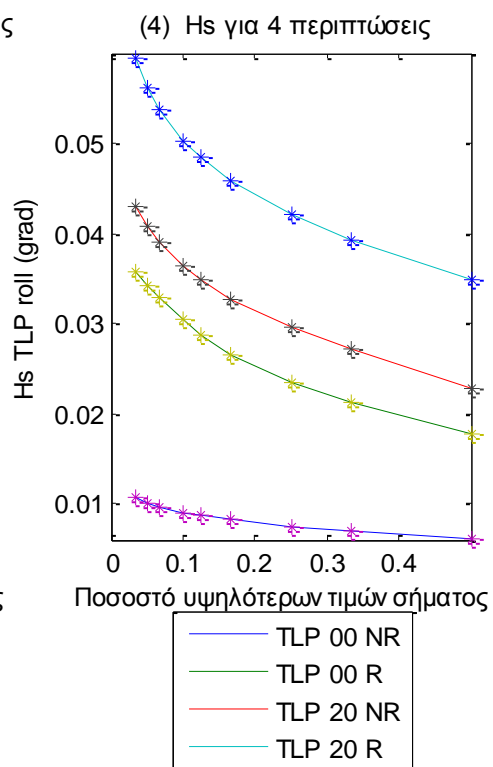
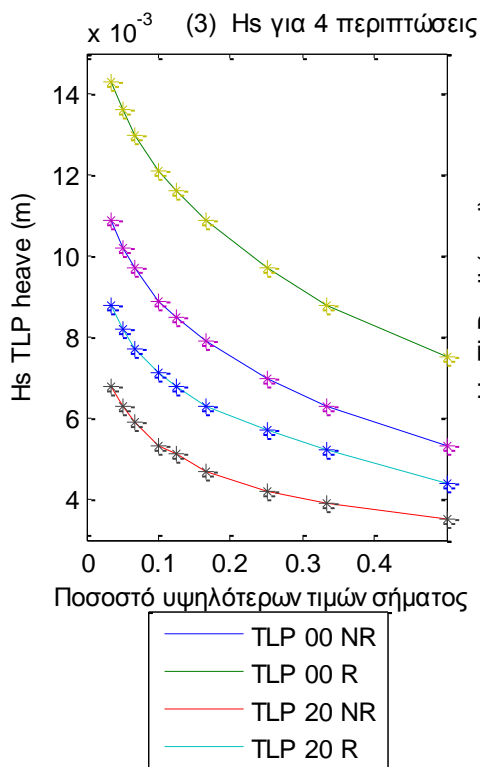
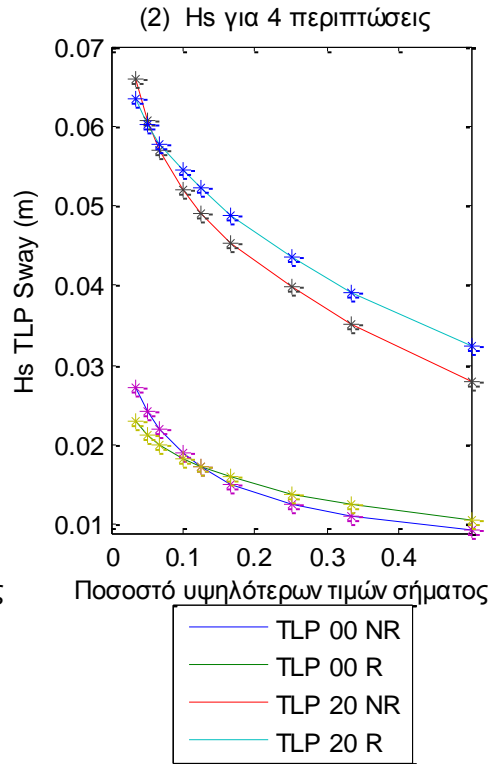
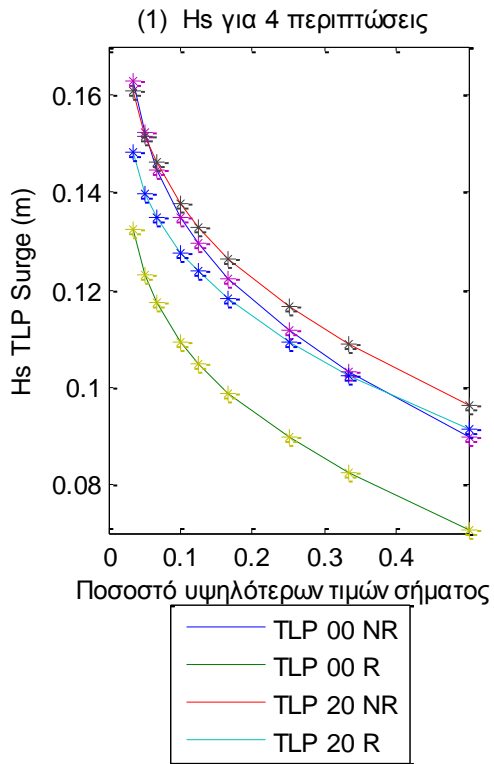
**Σχήματα 5.11.4 (1-4)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις δυνάμεις στις 4 γραμμές αγκύρωσης

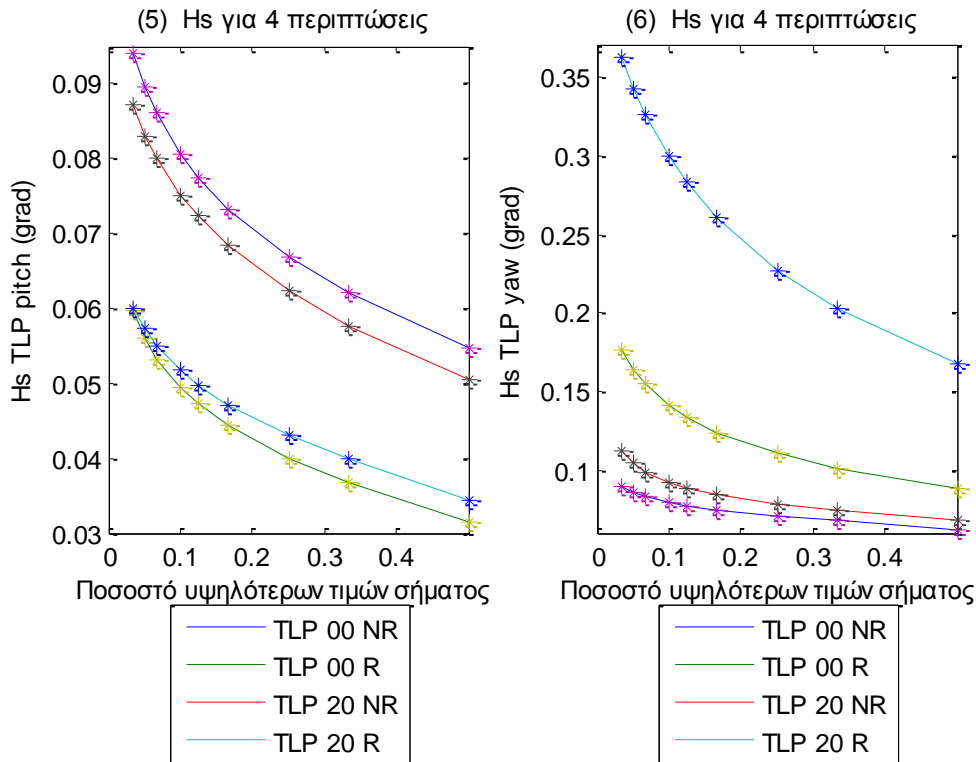


**Σχήματα 5.11.5 (1-3)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης (1) ACC 1, (2) ACC 2 και (3) ACC 3



**Σχήματα 5.11.6 (1-3)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τα δυο όργανα μέτρησης της πίεσης (1) Pressure 1 και (2) Pressure 2





**Σχήματα 5.11.7** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις μετατοπίσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις κατανομές του σημαντικού ύψους Hs για τα δύο από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήματα 5.11.1) (1—2), για τις τρεις δυνάμεις και τις τρεις ροπές στη βάση της Α/Γ (Σχήματα 5.11.2) (1-6), για τις δύο δυνάμεις και τις δύο ροπές στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήματα 5.11.3) (1-4), τις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης (Σχήματα 5.11.4) (1-4), τις χρονοσειρές για τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήματα 5.11.5) (1-3), τις χρονοσειρές για τα δυο όργανα μέτρησης της πίεσης (Σχήματα 5.11.6) (1-2) και, τέλος, για τις τρεις μετατοπίσεις και τις τρεις περιστροφές (Σχήματα 5.11.7) (1-6).

Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος που χρησιμοποιούμε, αυξάνεται η τιμή του σημαντικού ύψους Hs με γραμμικό τρόπο. Επιπροσθέτως, παρατηρούμε ότι, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι κλίσεις είναι σχεδόν ίδιες. Στα έντεκα όργανα μέτρησης του κύματος, οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων είναι αμελητέες. Όσον αφορά τα υπόλοιπα όργανα μέτρησης, οι διαφορές μεγαλώνουν και σε κάποιες περιπτώσεις αλλάζει και η σειρά.

Στον πίνακα 5.7 παρατίθενται οι τιμές από τις κατανομές σημαντικού ύψους για όλα τα όργανα μέτρησης από τα τέσσερα πειράματα (όπου τα 4 αρχεία αντιστοιχούν στις 4 περιπτώσεις φόρτισης C1 (TLP\_0\_NR), C2 (TLP\_0\_R), C3 (TLP\_20\_NR), C4 (TLP\_20\_R)).

<b>Πίνακας 5.7</b>				
	C1 (TLP_0_NR)	C2 (TLP_0_N)	C3 (TLP_20_NR)	C4 (TLP_20_R)
WG1 (m)	0,1565	0,1573	0,1656	0,1663
	0,1754	0,1764	0,1848	0,1854
	0,187	0,1881	0,1975	0,1979
	0,2022	0,2034	0,2157	0,2159
	0,2123	0,2134	0,2274	0,2275
	0,2193	0,2207	0,2356	0,2359
	0,2322	0,2338	0,2501	0,2509
	0,2415	0,2421	0,2597	0,2608
	0,2524	0,2532	0,2718	0,2731
WG2 (m)	0,1451	0,1451	0,15	0,1511
	0,1631	0,1632	0,1683	0,1693
	0,1747	0,1744	0,1795	0,1807
	0,1888	0,1883	0,1951	0,1967
	0,1979	0,1976	0,2062	0,2078
	0,2048	0,205	0,2142	0,2157
	0,2171	0,2177	0,2269	0,2294
	0,2255	0,2264	0,2363	0,2378
	0,2377	0,2383	0,2464	0,2493
WG3 (m)	0,1186	0,1197	0,1285	0,1283
	0,1334	0,1345	0,144	0,144
	0,1426	0,1436	0,1542	0,1546
	0,1547	0,1554	0,1674	0,1675
	0,1624	0,1632	0,1765	0,1765
	0,1684	0,1691	0,1832	0,1829
	0,1787	0,1798	0,195	0,1941
	0,1851	0,1864	0,2025	0,201
	0,194	0,1948	0,2119	0,2097
WG4 (m)	0,1309	0,1313	0,1367	0,1384
	0,1482	0,1483	0,1546	0,156
	0,1588	0,1591	0,1656	0,167
	0,1724	0,173	0,1794	0,1806
	0,1813	0,1818	0,1881	0,1898
	0,188	0,1887	0,1943	0,1964
	0,2001	0,2011	0,2054	0,2077
	0,2085	0,2099	0,2137	0,2156
	0,2212	0,2221	0,2238	0,2246
WG5 (m)	0,1249	0,1292	0,1309	0,1319

	0,1406	0,1451	0,1469	0,1479
	0,1507	0,1551	0,157	0,158
	0,1634	0,1683	0,1707	0,172
	0,1721	0,1769	0,18	0,1814
	0,1786	0,1839	0,1872	0,1881
	0,1901	0,196	0,2001	0,2007
	0,1975	0,2037	0,2081	0,2088
	0,2084	0,2131	0,2177	0,2184
WG6 (m)	0,1306	0,1305	0,1475	0,1481
	0,1477	0,1473	0,1656	0,1659
	0,1586	0,1584	0,1768	0,1772
	0,1727	0,1723	0,1911	0,1917
	0,1817	0,1812	0,2008	0,2018
	0,1884	0,1882	0,2088	0,2093
	0,201	0,2012	0,2214	0,2222
	0,2103	0,2107	0,2307	0,2307
	0,2214	0,2232	0,2418	0,2421
WG7 (m)	0,1075	0,1071	0,1097	0,1101
	0,1203	0,1201	0,1231	0,1234
	0,1282	0,1281	0,1322	0,1326
	0,1381	0,1382	0,1437	0,1442
	0,1447	0,1449	0,1512	0,1519
	0,1497	0,15	0,1568	0,1577
	0,1586	0,1583	0,1661	0,1672
	0,1649	0,1643	0,1713	0,1724
	0,1735	0,1722	0,1788	0,1792
WG8 (m)	0,1292	0,1295	0,1305	0,131
	0,1445	0,1451	0,1465	0,147
	0,1543	0,1552	0,1568	0,1574
	0,1671	0,1682	0,1704	0,1712
	0,1759	0,177	0,1798	0,1803
	0,1825	0,1835	0,1868	0,187
	0,1934	0,1951	0,1982	0,1981
	0,1999	0,2025	0,2052	0,205
	0,2084	0,2124	0,2145	0,2148
WG9 (m)	0,1171	0,1175	0,1213	0,1218
	0,131	0,1314	0,1358	0,1363
	0,1401	0,1404	0,1447	0,1457
	0,1518	0,1526	0,1558	0,1577
	0,1596	0,1601	0,1639	0,1657

	0,1654	0,1657	0,1698	0,1716
	0,1764	0,1752	0,1803	0,1819
	0,1829	0,182	0,1876	0,1894
	0,1918	0,1912	0,1969	0,1994
WG10 (m)	0,1311	0,1312	0,1342	0,1348
	0,1468	0,1471	0,1505	0,1514
	0,1573	0,1574	0,1605	0,1617
	0,1702	0,1705	0,1734	0,1748
	0,1791	0,1796	0,1818	0,1834
	0,1852	0,186	0,1881	0,1898
	0,1959	0,1965	0,1989	0,2009
	0,2037	0,2045	0,207	0,2089
	0,2149	0,2163	0,2191	0,2205
WG11 (m)	0,1313	0,1309	0,136	0,1367
	0,1471	0,1472	0,1527	0,1533
	0,1574	0,1572	0,1629	0,1639
	0,1704	0,1706	0,1759	0,177
	0,1788	0,1794	0,1845	0,186
	0,1845	0,1855	0,1907	0,1924
	0,1943	0,1959	0,2015	0,2036
	0,2015	0,2031	0,2094	0,2112
	0,2123	0,2142	0,2219	0,2228
6COMPFx (N)	29,7953	10,7381	28,1536	10,2278
	33,5049	12,6611	31,8143	11,9298
	35,7894	14,0588	34,0897	13,0944
	38,6046	15,9953	37,023	14,7062
	40,3318	17,3647	38,854	15,8740
	41,6113	18,4638	40,1305	16,7914
	43,9162	20,4939	42,2767	18,3276
	45,5769	21,7381	43,6719	19,5324
	47,7344	23,2526	45,759	21,1970
6COMPFy (N)	4,5836	3,699	15,4509	12,8637
	5,1428	4,2039	17,3379	14,3882
	5,5035	4,5195	18,5154	15,3606
	5,9789	4,9056	20,0162	16,5852
	6,3244	5,1658	20,9986	17,3979
	6,5914	5,3722	21,6915	18,0004
	7,0533	5,7261	22,9358	19,0090
	7,362	5,9528	23,813	19,6861
	7,7949	6,3025	24,9871	20,5617



6COMPFz (N)	17,4385	3,5762	0	0,0000
	18,2448	4,3311	0	0,0000
	18,6496	4,8561	0	0,0000
	19,0966	5,5744	0	0,0000
	19,3688	6,1565	0	0,0000
	19,5689	6,3733	0	0,0000
	19,9132	6,7162	0	0,0000
	20,1545	7,0087	0	0,0000
	20,4527	7,4514	0	0,0000
6compMx (N/m <sup>2</sup> )	6,2125	6,2249	22,5013	21,1220
	7,0021	7,0458	25,1825	23,4842
	7,5126	7,554	26,8915	25,0084
	8,1624	8,213	29,0725	26,9627
	8,5694	8,6486	30,5181	28,1919
	8,88	8,9672	31,6263	29,1209
	9,459	9,535	33,5397	30,7481
	9,843	9,9694	34,7805	31,8474
	10,3686	10,4856	36,4527	33,2869
6compMy (N/m <sup>2</sup> )	51,0849	18,9118	49,3085	18,4401
	57,4843	22,3057	55,6936	21,6384
	61,4741	24,7504	59,7058	23,8124
	66,2837	28,1905	64,7648	26,8648
	69,325	30,6667	67,9843	29,0294
	71,6063	32,61	70,2493	30,7522
	75,6069	36,0272	73,9774	33,7169
	78,6485	38,1735	76,4415	35,8693
	82,4115	40,8545	80,1622	39,0636
6compMz (N/m <sup>2</sup> )	0,6843	0,7234	0,62	0,7254
	0,7755	0,8217	0,7062	0,8139
	0,8339	0,8891	0,7623	0,8710
	0,9059	0,9822	0,8321	0,9469
	0,9485	1,047	0,8766	0,9991
	0,981	1,0972	0,9081	1,0392
	1,0387	1,1883	0,9621	1,1107
	1,0781	1,2558	1,0002	1,1614
	1,1333	1,3519	1,0522	1,2303
4compFx (N)	23,6736	8,654	23,6819	9,0058
	26,636	10,3209	26,6986	10,6214
	28,4724	11,5061	28,5983	11,7302

	30,7081	13,2002	30,9769	13,2611
	32,1129	14,3958	32,5036	14,3428
	33,1303	15,3045	33,6091	15,1980
	35,0074	17,0021	35,3608	16,6816
	36,3446	18,044	36,5173	17,7589
	38,1457	19,3016	38,2744	19,2689
4compFy (N)	3,17	2,8976	11,3057	10,0566
	3,5695	3,3165	12,6733	11,2553
	3,8297	3,5772	13,5329	12,0058
	4,1731	3,9046	14,6471	12,9552
	4,3994	4,1169	15,3572	13,5758
	4,5742	4,2745	15,8714	14,0362
	4,8768	4,556	16,8034	14,8596
	5,0822	4,761	17,4065	15,4106
	5,376	5,0278	18,3038	16,1422
4compMx (N/m <sup>2</sup> )	0,3787	0,2598	0,9367	0,9111
	0,4174	0,2971	1,0365	1,0556
	0,4402	0,3237	1,1009	1,1363
	0,4674	0,363	1,1825	1,2377
	0,4847	0,3921	1,2343	1,3016
	0,4969	0,4148	1,2763	1,3477
	0,5182	0,4567	1,3546	1,4250
	0,5335	0,484	1,4036	1,4771
	0,5532	0,5205	1,4665	1,5433
4compMy (N/m <sup>2</sup> )	3,1228	1,1303	3,0466	1,2356
	3,5243	1,3356	3,4459	1,4547
	3,7838	1,4798	3,7068	1,6052
	4,0962	1,6834	4,0212	1,8160
	4,2932	1,8318	4,219	1,9646
	4,4428	1,9468	4,365	2,0768
	4,7014	2,1541	4,6054	2,2800
	4,8869	2,2989	4,7664	2,4257
	5,1375	2,5005	4,9981	2,6365
Mooring 1 (N)	109,2392	83,1771	105,5753	75,4269
	121,0209	91,9385	118,1401	83,8018
	128,6118	97,297	126,2059	89,0561
	138,6887	104,1084	136,4637	95,6521
	145,183	108,5976	143,33	100,0240
	149,6266	111,8575	147,9426	102,9027
	157,79	117,7907	155,5663	107,8680

	162,7214	122,0574	160,3352	111,4460
	169,0935	128,2962	166,4968	115,9493
Mooring 2 (N)	30,8859	37,2331	43,795	41,8522
	34,7967	41,5364	48,9809	46,6455
	37,2178	44,1977	52,4143	49,7070
	40,3296	47,6641	56,9821	53,9139
	42,357	49,9754	60,1558	56,7097
	43,9245	51,657	62,5645	58,8225
	46,7875	54,3795	66,512	62,2224
	48,6821	56,2937	69,2132	64,2496
	51,2432	58,7779	72,6857	66,6863
Mooring 3 (N)	98,9167	65,5605	96,3393	63,7943
	110,2468	73,7311	107,9687	71,2928
	117,3905	79,1688	115,7755	76,1756
	127,2475	86,5186	125,9535	82,8194
	134,0086	91,5815	132,3372	87,6851
	138,9283	95,4913	137,2932	91,1231
	146,7608	101,908	145,3556	96,2111
	152,0707	106,6851	150,4089	99,6651
	158,997	113,8675	157,3253	104,2391
Mooring 4 (N)	32,8797	39,2172	47,3819	46,3176
	36,5586	43,8737	53,056	51,8177
	38,8754	46,7329	56,8164	55,3196
	42,0612	50,2678	61,7595	59,7698
	44,2232	52,5076	65,0946	62,6169
	45,816	54,1375	67,54	64,7016
	48,7376	56,9725	71,4295	68,1291
	50,6136	59,0222	73,9187	70,2832
	53,2226	62,0553	76,9543	73,1887
Acc1 (G)	0,1066	0,0546	0,1022	0,0562
	0,1205	0,0627	0,1157	0,0641
	0,1296	0,068	0,1242	0,0689
	0,1416	0,0752	0,1346	0,0752
	0,1496	0,0802	0,1414	0,0795
	0,1554	0,0841	0,1464	0,0826
	0,1647	0,0912	0,1551	0,0879
	0,1714	0,0959	0,1607	0,0916
	0,1808	0,1025	0,1685	0,0965
Acc2 (G)	0,0585	0,0449	0,2082	0,1885

	0,066	0,0538	0,2331	0,2173
	0,0708	0,0603	0,2489	0,2341
	0,0768	0,0699	0,269	0,2547
	0,0808	0,0765	0,2824	0,2683
	0,0839	0,0815	0,2921	0,2776
	0,0893	0,0892	0,3088	0,2937
	0,0929	0,0941	0,3196	0,3046
	0,0981	0,1009	0,336	0,3192
Acc3 (G)	0,0449	0,0517	0,0362	0,0230
	0,0514	0,0587	0,0413	0,0274
	0,0558	0,063	0,0448	0,0303
	0,0617	0,0687	0,0494	0,0343
	0,0658	0,0724	0,0527	0,0372
	0,0689	0,0751	0,055	0,0396
	0,0746	0,08	0,0589	0,0437
	0,0787	0,0832	0,0616	0,0465
	0,0847	0,0879	0,0657	0,0505
pressure cell 1	0,0556	0,0546	0,0678	0,0672
(N/m <sup>2</sup> )	0,063	0,0621	0,0764	0,0757
	0,0676	0,0668	0,0821	0,0813
	0,0734	0,0728	0,0892	0,0885
	0,0773	0,0768	0,0939	0,0931
	0,0802	0,0797	0,0976	0,0968
	0,0856	0,085	0,1041	0,1031
	0,0891	0,0881	0,1083	0,1075
	0,0939	0,0929	0,1133	0,1122
pressure cell 2	0,0882	0,0855	0,0047	0,0043
(N/m <sup>2</sup> )	0,1	0,0976	0,0053	0,0050
	0,1074	0,1056	0,0057	0,0054
	0,1163	0,1155	0,0063	0,0059
	0,1215	0,1218	0,0067	0,0062
	0,1252	0,1262	0,007	0,0064
	0,1323	0,1334	0,0075	0,0068
	0,1367	0,1382	0,0079	0,0072
	0,142	0,1438	0,0083	0,0075
Surge (m)	0,0898	0,0706	0,0961	0,0912
	0,1031	0,0825	0,1087	0,1022
	0,1116	0,0896	0,1164	0,1091
	0,1221	0,0987	0,1262	0,1180
	0,1295	0,1048	0,1329	0,1237

	0,135	0,1093	0,1377	0,1277
	0,1447	0,1175	0,1461	0,1349
	0,1524	0,1232	0,1517	0,1399
	0,1628	0,1326	0,161	0,1482
Sway (m)	0,0094	0,0106	0,0279	0,0325
	0,0111	0,0125	0,0351	0,0392
	0,0125	0,0139	0,0398	0,0435
	0,0151	0,016	0,0454	0,0487
	0,0173	0,0173	0,0491	0,0522
	0,0191	0,0184	0,0519	0,0544
	0,0221	0,0201	0,0569	0,0578
	0,0242	0,0213	0,0607	0,0602
	0,0272	0,0229	0,0658	0,0635
Heave (m)	0,0053	0,0075	0,0035	0,0044
	0,0063	0,0088	0,0039	0,0052
	0,007	0,0097	0,0042	0,0057
	0,0079	0,0109	0,0047	0,0063
	0,0085	0,0116	0,0051	0,0068
	0,0089	0,0121	0,0053	0,0071
	0,0097	0,013	0,0059	0,0077
	0,0102	0,0136	0,0063	0,0082
	0,0109	0,0143	0,0068	0,0088
Roll (grad)	0,0061	0,0177	0,0228	0,0349
	0,0069	0,0212	0,0271	0,0393
	0,0074	0,0234	0,0296	0,0421
	0,0082	0,0265	0,0327	0,0459
	0,0087	0,0288	0,0348	0,0484
	0,009	0,0304	0,0363	0,0503
	0,0097	0,0328	0,039	0,0537
	0,0101	0,0341	0,0408	0,0561
	0,0107	0,0357	0,043	0,0594
Pitch (grad)	0,0546	0,0315	0,0504	0,0344
	0,0621	0,0367	0,0577	0,0398
	0,0669	0,04	0,0623	0,0431
	0,0732	0,0443	0,0684	0,0471
	0,0775	0,0472	0,0723	0,0498
	0,0807	0,0493	0,0751	0,0518
	0,0861	0,0531	0,08	0,0550
	0,0896	0,0559	0,0831	0,0573
	0,0941	0,0598	0,0873	0,0599

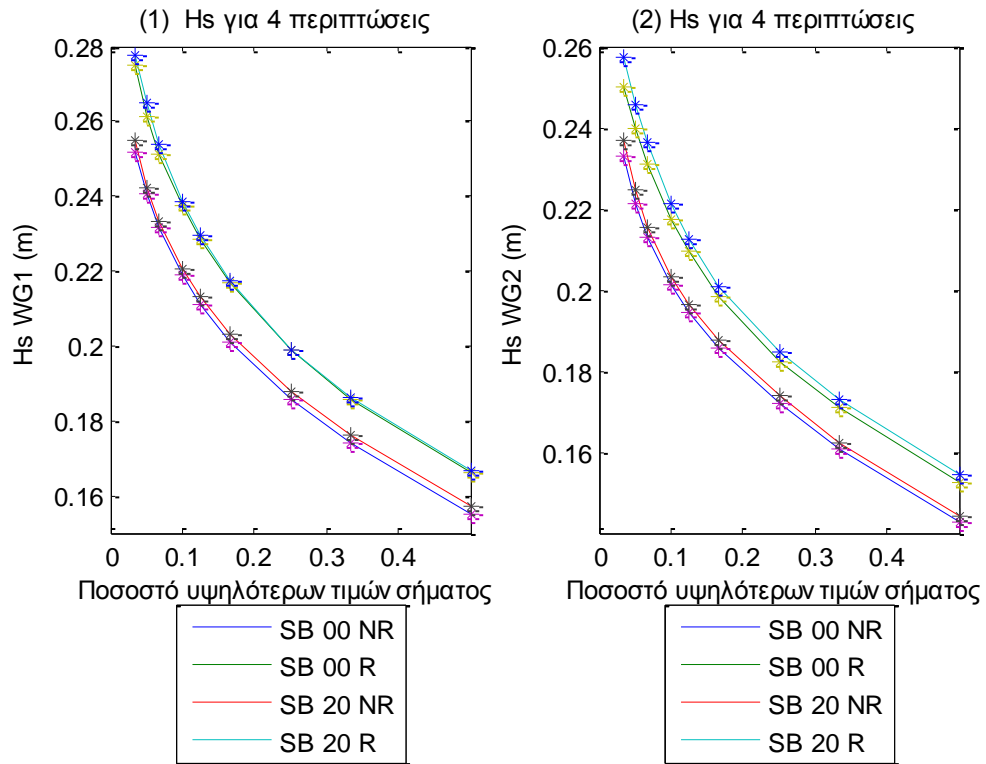
Yaw (grad)	0,0623	0,0884	0,0678	0,1680
	0,0678	0,1013	0,0742	0,2025
	0,0709	0,1105	0,0784	0,2269
	0,0747	0,124	0,0841	0,2606
	0,0773	0,1336	0,0883	0,2835
	0,0792	0,1411	0,0918	0,3000
	0,0829	0,1546	0,0987	0,3269
	0,0857	0,1643	0,1043	0,3430
	0,0899	0,177	0,1128	0,3629

### 5.12 Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τη SB

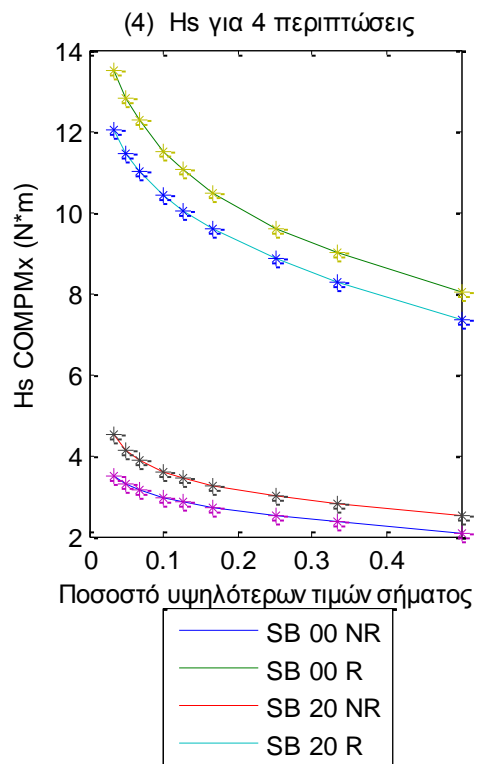
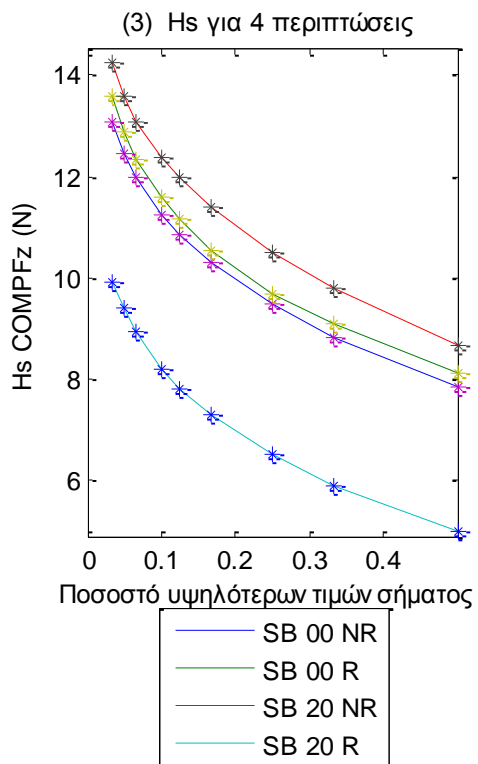
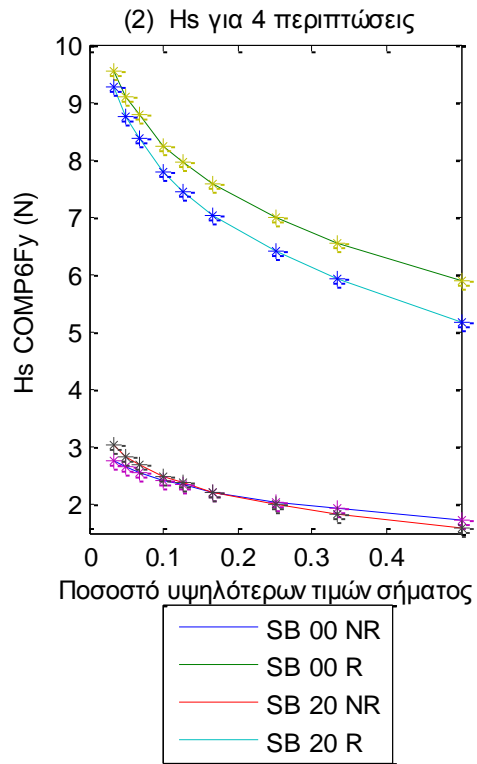
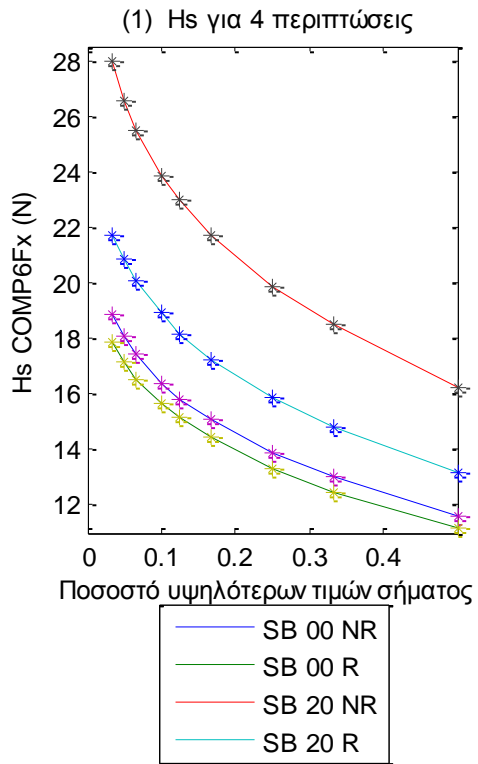
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε τη μεταβολή της κατανομής του σημαντικού ύψους σε σχέση με τέσσερις περιπτώσεις που αφορούν τη SB. Πιο συγκεκριμένα, θα μελετήσουμε τις περιπτώσεις SB\_00\_NR, SB\_20\_NR, SB\_00\_R και SB\_20\_R.

Υπολογίζουμε (μέσω MATLAB) για κάθε περίπτωση την κατανομή του σημαντικού ύψους των υψηλότερων τιμών για κάθε όργανο μέτρησης και τις παραθέτουμε όλες σε κοινά γραφήματα. Ισχύουν τα ίδια ποσοστά σήματος [1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10, 1/15, 1/30] που χρησιμοποιήσαμε στις αντίστοιχες προηγούμενες ενότητες.

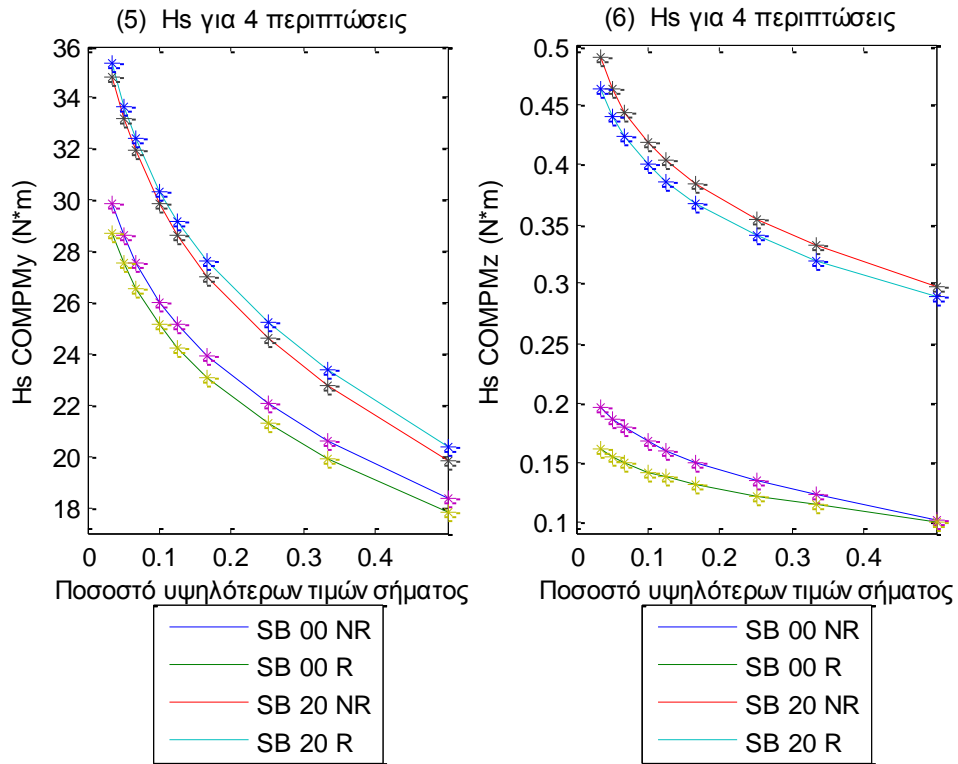
Συνεχίζουμε με την παρουσίαση, στις επόμενες ενότητες, των γραφημάτων για τις κατανομές του σημαντικού ύψους Hs για κάθε χρονοσειρά που προκύπτει βάσει των δεδομένων από κάθε όργανο μέτρησης.



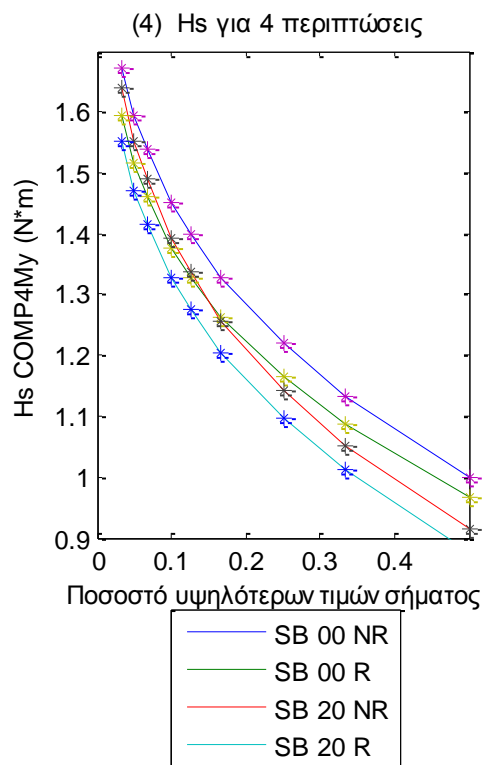
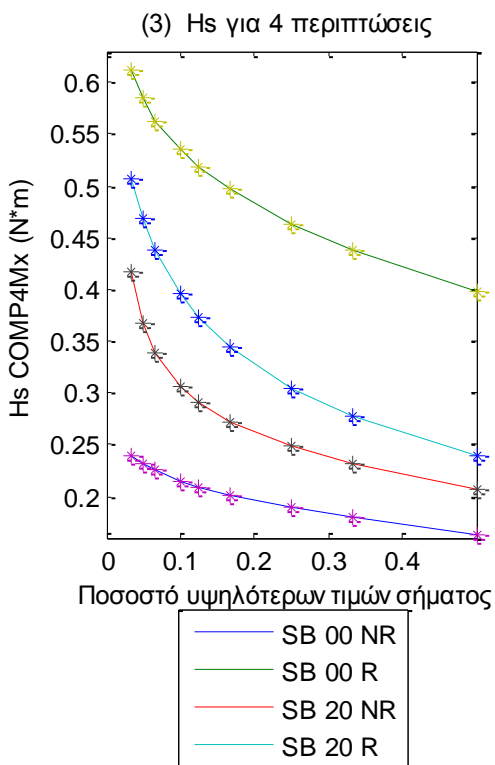
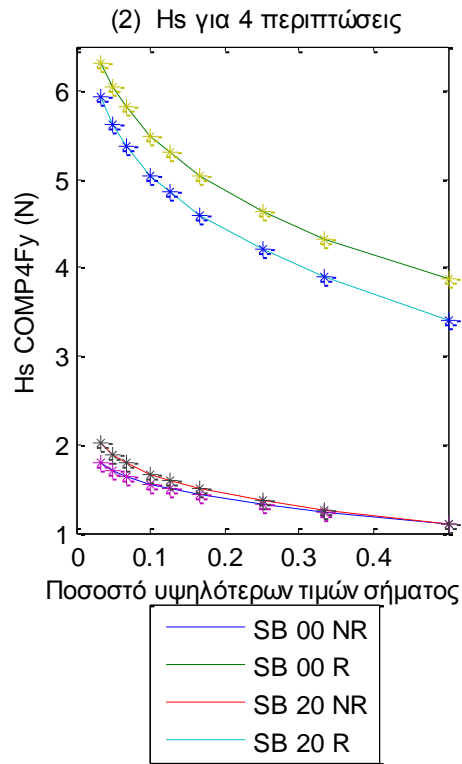
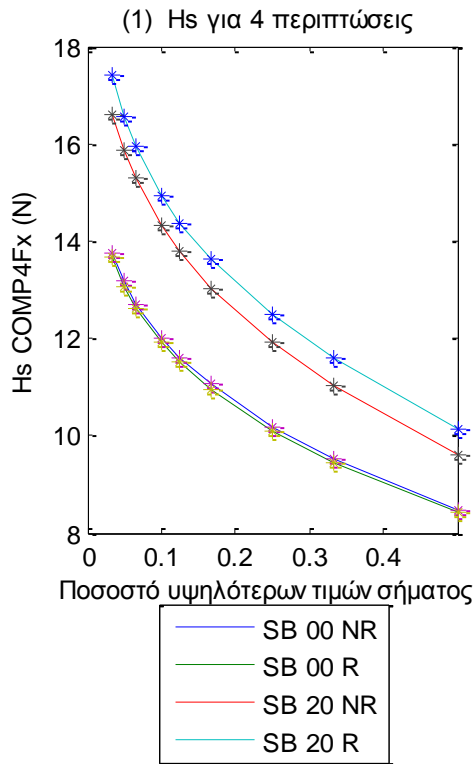
**Σχήματα 5.12.1 (1-2)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τα δύο από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος



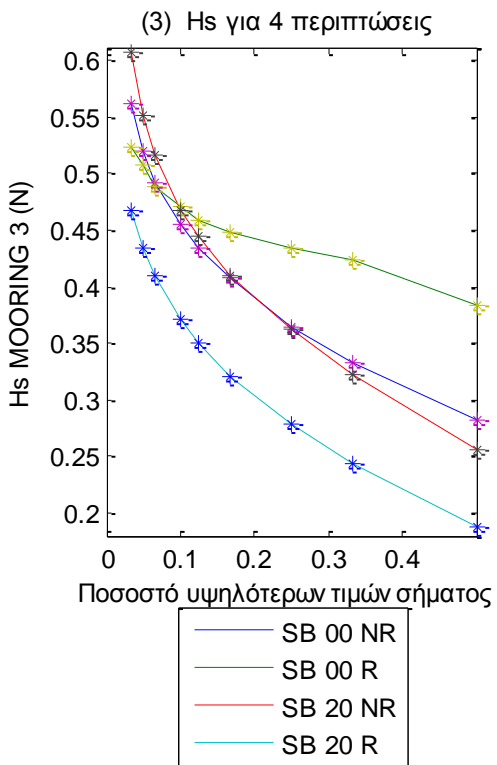
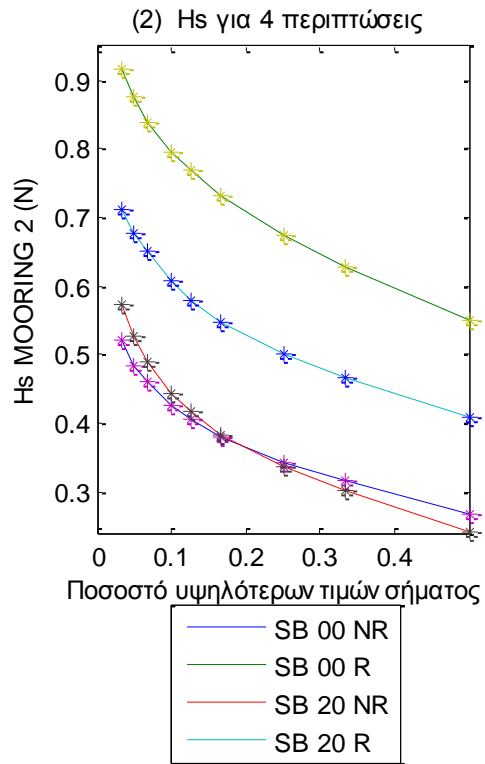
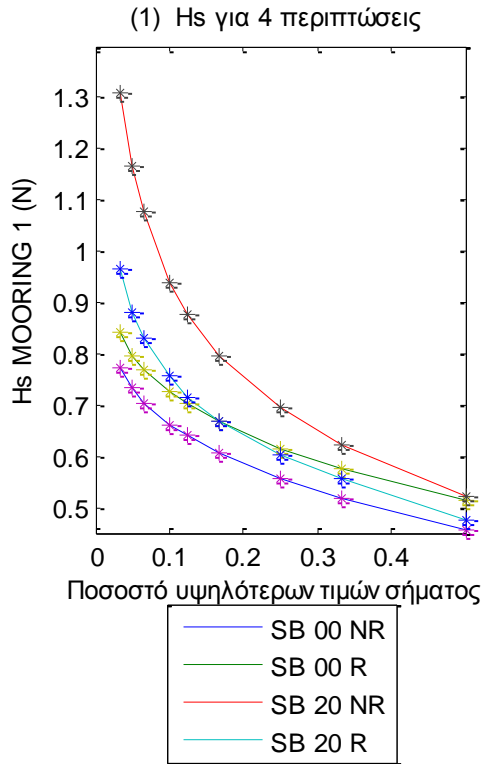




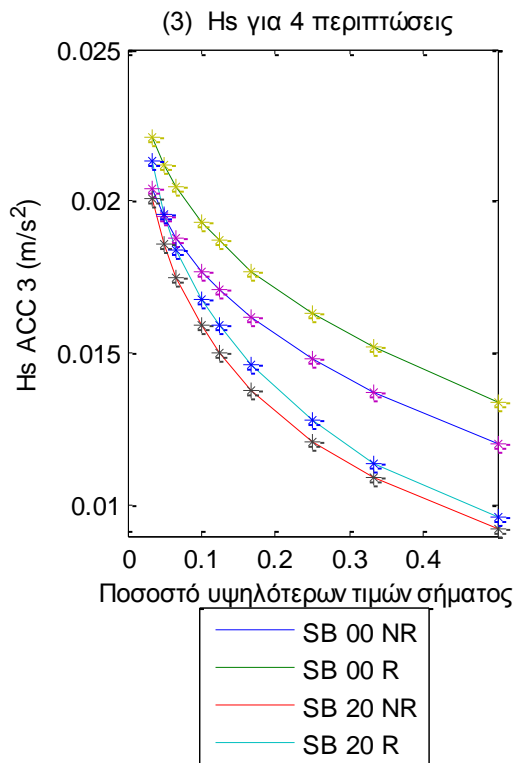
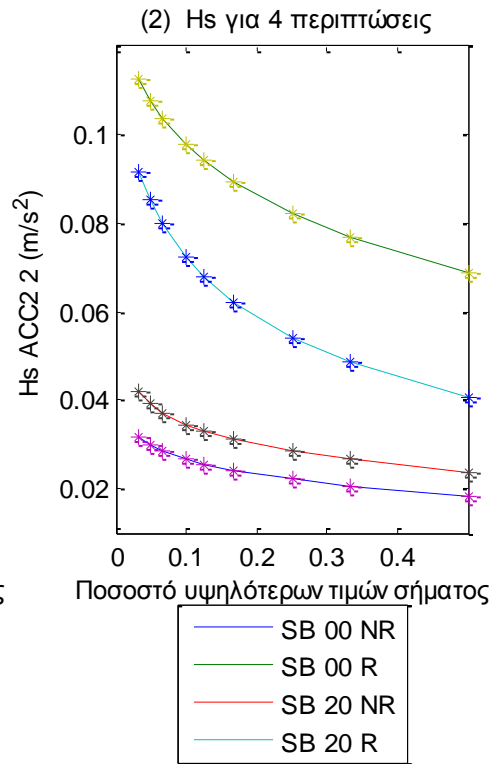
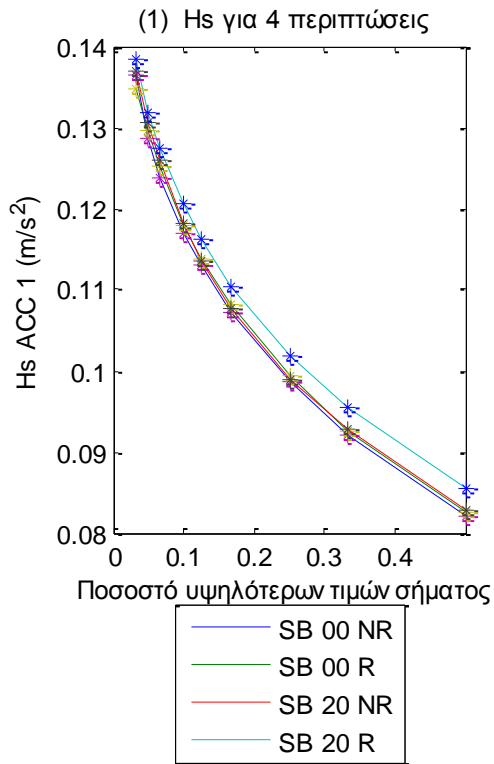
**Σχήματα 5.12.2** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw



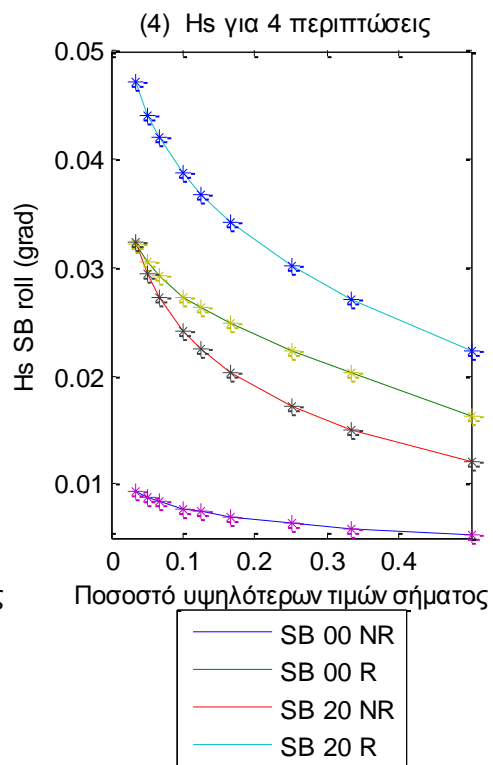
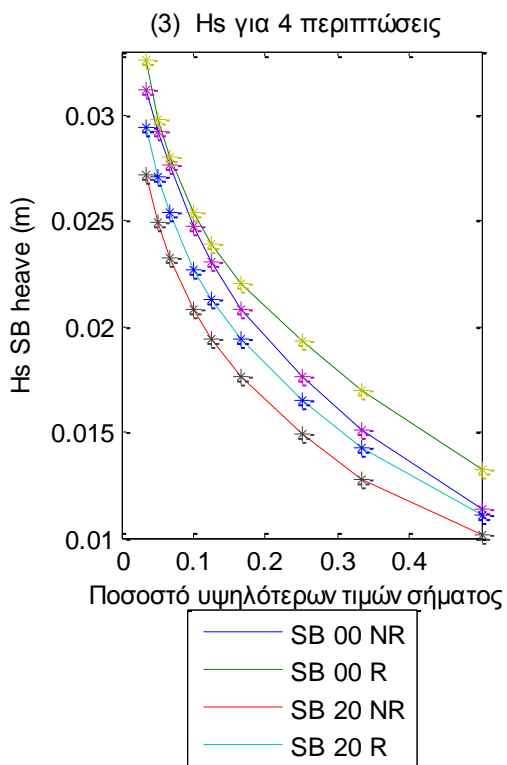
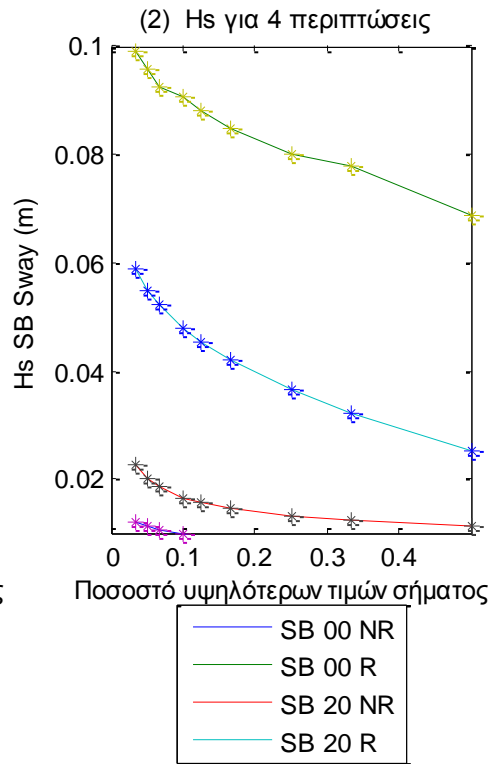
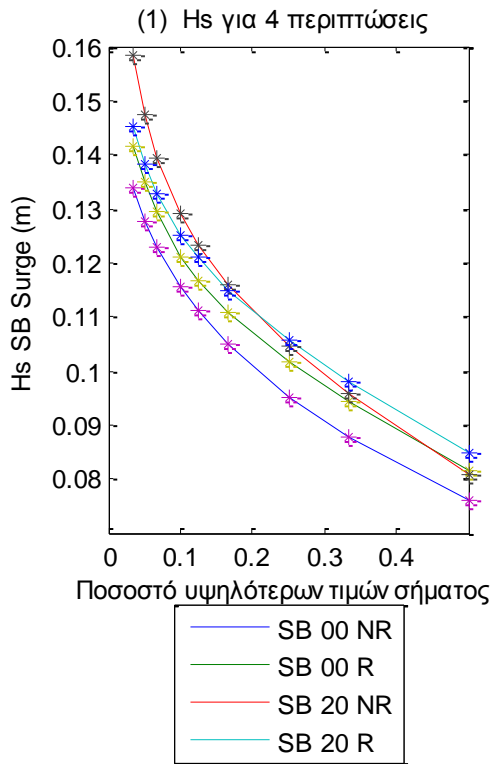
**Σχήματα 5.12.3** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις δύο δυνάμεις (1-2) και τις δύο ροπές (3-4) στο Ρότορα της Α/Γ

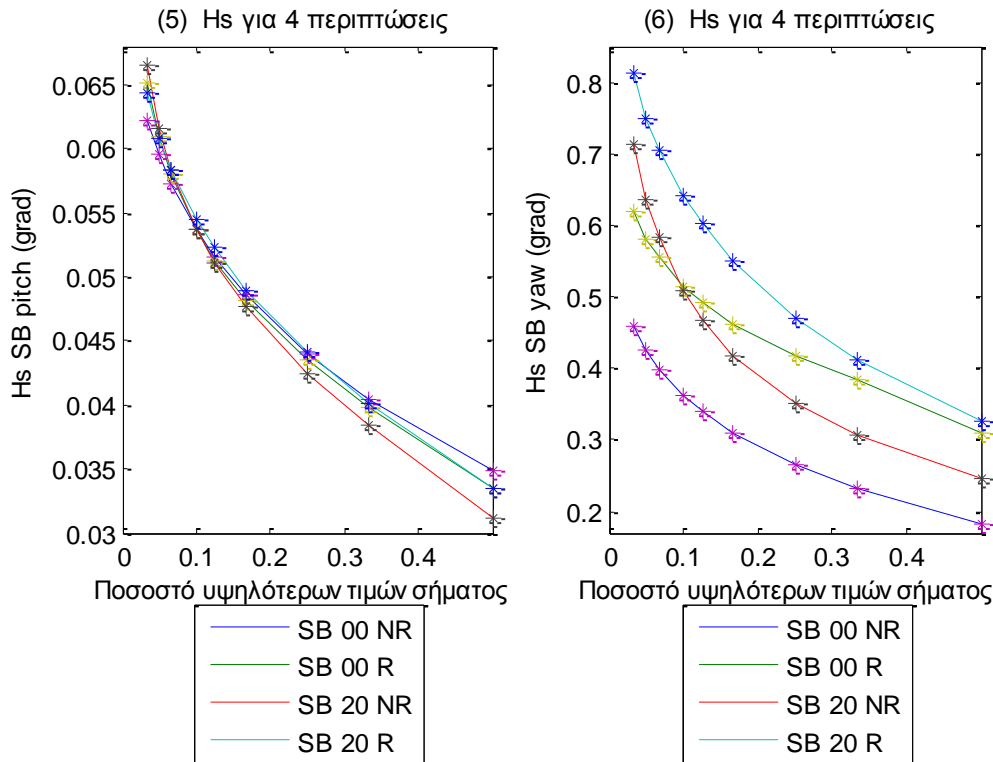


**Σχήματα 5.12.4 (1-3)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις δυνάμεις στις 3 γραμμές αγκύρωσης



**Σχήματα 5.12.5 (1-3)** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τα τρία όργανα μέτρησης της επιτάχυνσης (1) Acc1, (2) Acc2 και (3) Acc3





**Σχήματα 5.12.6** Κατανομές σημαντικού ύψους Hs για τέσσερις περιπτώσεις για τις τρεις μετατοπίσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τις κατανομές του σημαντικού ύψους Hs για τα δύο από τα 11 όργανα μέτρησης του ύψους κύματος (Σχήματα 5.10.1) (1—2), για τις τρεις δυνάμεις και τις τρεις ροπές στη βάση της Α/Γ (Σχήματα 5.10.2) (1-6), για τις δύο δυνάμεις και τις δύο ροπές στο Ρότορα της Α/Γ (Σχήματα 5.10.3) (1-4), τις τρεις γραμμές αγκύρωσης (Σχήματα 5.10.4) (1-4), τις χρονοσειρές για τα τρία επιταχυνσιόμετρα (Σχήματα 5.10.5) (1-3) και, τέλος, για τις τρεις μετατοπίσεις και τις τρεις περιστροφές (Σχήματα 5.10.6) (1-6).

Και σε αυτή την ενότητα προκύπτουν ανάλογα αποτελέσματα με την προηγούμενη. Πιο αναλυτικά, ισχύει ότι καθώς μειώνουμε το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος που χρησιμοποιούμε, αυξάνεται η τιμή του σημαντικού ύψους Hs με γραμμικό τρόπο. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι κλίσεις είναι σχεδόν ίδιες στις περισσότερες περιπτώσεις.

Στα έντεκα όργανα μέτρησης του κύματος, οι διαφορές είναι πολύ μικρές μεταξύ των τεσσάρων περιπτώσεων. Αναφορικά με τα υπόλοιπα όργανα μέτρησης, οι διαφορές μεγαλώνουν και σε κάποιες περιπτώσεις αλλάζει και η σειρά. Οι μεγαλύτερες διαφορές φαίνεται να υπάρχουν μεταξύ της περίπτωσης όπου συναντάται γωνία 0 μοιρών χωρίς περιστροφή και της περίπτωσης όπου έχουμε γωνία 20 μοιρών με περιστροφή.

Στον πίνακα 5.8 παρατίθενται οι τιμές από τις κατανομές σημαντικού ύψους για όλα τα όργανα μέτρησης από τα τέσσερα πειράματα (όπου τα 4 αρχεία αντιστοιχούν στις 4 περιπτώσεις φόρτισης C5 (SB\_0\_NR), C6 (SB\_0\_R), C7 (SB\_20\_NR), C8 (SB\_20\_R)).

<b>Πίνακας 5.8</b>				
	C5 SB_0_NR	C6 SB_0_R	C7 SB_20_NR	C8 SB_20_R
WG1 (m)	0,155	0,1661	0,1572	0,1666
	0,1742	0,1859	0,1763	0,1864
	0,1857	0,1988	0,188	0,1991
	0,201	0,2168	0,203	0,2172
	0,2111	0,2286	0,2132	0,2293
	0,2189	0,2375	0,2204	0,2386
	0,2317	0,2514	0,2331	0,254
	0,2404	0,2611	0,2421	0,2649
	0,2516	0,275	0,2548	0,2778
WG2 (m)	0,1427	0,1522	0,1443	0,1544
	0,1606	0,1709	0,1624	0,1729
	0,1719	0,1824	0,174	0,1844
	0,1854	0,1983	0,1875	0,2008
	0,1946	0,2094	0,1965	0,2122
	0,2011	0,2175	0,2033	0,2212
	0,2131	0,2308	0,2156	0,2361
	0,2213	0,2399	0,2247	0,2455
	0,233	0,2501	0,2367	0,2574
WG3 (m)	0,1174	0,1286	0,1192	0,1298
	0,1323	0,144	0,1342	0,1453
	0,1418	0,1539	0,1439	0,1554
	0,1535	0,1669	0,1558	0,1691
	0,1611	0,1756	0,1635	0,1775
	0,1673	0,1822	0,169	0,1836
	0,1777	0,1931	0,1788	0,1948
	0,1846	0,2003	0,1859	0,201
	0,1936	0,2093	0,1952	0,2092
WG4 (m)	0,1319	0,0749	0,0002	0,0002
	0,1489	0,1101	0,0003	0,0002
	0,1595	0,1282	0,0003	0,0002
	0,1729	0,148	0,0003	0,0003
	0,1822	0,1602	0,0003	0,0003
	0,1889	0,1685	0,0003	0,0003
	0,2008	0,1829	0,0003	0,0003
	0,2087	0,1919	0,0003	0,0003
	0,2194	0,2036	0,0004	0,0003

WG5 (m)	0,1331	0,1422	0,135	0,1439
	0,1501	0,1593	0,1521	0,1611
	0,1608	0,1702	0,1631	0,1724
	0,1748	0,1846	0,1776	0,1873
	0,1836	0,1942	0,1871	0,1978
	0,1907	0,2014	0,1943	0,2051
	0,2036	0,2148	0,2074	0,2182
	0,2125	0,2234	0,2163	0,2264
	0,2235	0,2334	0,2276	0,2364
WG6 (m)	0,1342	0,1449	0,1351	0,1465
	0,1511	0,1628	0,1521	0,1638
	0,1622	0,1739	0,1633	0,1752
	0,1768	0,1886	0,1777	0,1898
	0,1863	0,1982	0,1872	0,1998
	0,1932	0,2051	0,1945	0,207
	0,2056	0,2172	0,2065	0,2199
	0,2149	0,2258	0,2149	0,2286
	0,2279	0,2365	0,2255	0,2396
WG7 (m)	0,1083	0,1114	0,1081	0,1127
	0,1212	0,1251	0,1211	0,1264
	0,1291	0,1344	0,1291	0,1358
	0,1389	0,1462	0,1393	0,1477
	0,1457	0,1539	0,1463	0,1558
	0,151	0,1598	0,152	0,1618
	0,1602	0,1696	0,1617	0,1719
	0,1665	0,1754	0,1678	0,1775
	0,175	0,1831	0,1761	0,185
WG8 (m)	0,127	0,1326	0,1283	0,1342
	0,1427	0,1489	0,1437	0,1506
	0,1522	0,1594	0,1533	0,1616
	0,1646	0,1736	0,1666	0,1752
	0,1728	0,1828	0,1749	0,185
	0,1792	0,1899	0,1812	0,1919
	0,1898	0,2011	0,1926	0,2033
	0,1963	0,208	0,1998	0,2109
	0,2052	0,2174	0,2097	0,2211
WG9 (m)	0,1161	0,1204	0,1159	0,1215
	0,13	0,1349	0,13	0,136
	0,1391	0,144	0,139	0,1452
	0,1511	0,156	0,1511	0,1573
	0,1589	0,164	0,1592	0,1653
	0,1647	0,1706	0,1649	0,1714
	0,1744	0,1811	0,1751	0,1821
	0,1813	0,1886	0,1816	0,1895



	0,1912	0,1985	0,1909	0,1985
WG10 (m)	0,1289	0,1346	0,1289	0,1363
	0,1442	0,1509	0,1446	0,1526
	0,1542	0,1612	0,1547	0,1625
	0,1675	0,1741	0,1681	0,1754
	0,1757	0,1826	0,1767	0,1843
	0,1815	0,1892	0,1827	0,1906
	0,1917	0,2006	0,1935	0,202
	0,1986	0,2079	0,201	0,2096
	0,2086	0,219	0,212	0,2207
WG11 (m)	0,1317	0,1377	0,1321	0,1391
	0,1474	0,1542	0,1489	0,1558
	0,1578	0,1646	0,159	0,1663
	0,1707	0,1781	0,1726	0,1796
	0,1794	0,1867	0,1812	0,1884
	0,1852	0,1929	0,1873	0,1948
	0,195	0,2034	0,1976	0,2061
	0,2023	0,2114	0,2049	0,2142
	0,2128	0,2229	0,2156	0,2254
6COMPFx (N)	11,6107	11,2065	16,2583	13,1975
	13,0006	12,4865	18,4887	14,8332
	13,8962	13,326	19,8861	15,8711
	15,0806	14,4346	21,6986	17,2267
	15,8032	15,1262	22,9545	18,1591
	16,3873	15,6555	23,8521	18,8989
	17,4436	16,5457	25,4823	20,0745
	18,0797	17,1291	26,5213	20,8661
	18,8674	17,8789	27,9866	21,7087
6COMPFy (N)	1,7096	5,893	1,5984	5,1818
	1,9172	6,5652	1,8451	5,9403
	2,0488	6,9991	2,0032	6,4082
	2,2218	7,6084	2,2196	7,0326
	2,3363	7,98	2,371	7,4710
	2,4208	8,2595	2,485	7,8171
	2,5608	8,7934	2,6905	8,3847
	2,6454	9,1233	2,838	8,7882
	2,7468	9,5697	3,0316	9,2888
6COMPFz (N)	7,865	8,1124	8,6661	4,9934
	8,8364	9,081	9,796	5,9071
	9,4712	9,6909	10,5019	6,5069
	10,3119	10,555	11,3959	7,2965
	10,8434	11,1459	11,9797	7,7902
	11,2539	11,5809	12,3811	8,2004

	11,967	12,3464	13,0909	8,9490
	12,4462	12,8819	13,5814	9,4019
	13,0878	13,5932	14,2312	9,9236
6compMx	2,0955	8,0394	2,4957	7,3514
(N*m)	2,3553	8,9792	2,7998	8,2910
	2,5219	9,6087	2,9942	8,8704
	2,73	10,483	3,2596	9,5712
	2,8685	11,0511	3,4517	10,0359
	2,9734	11,4855	3,6044	10,4018
	3,1667	12,2827	3,8987	11,0066
	3,3013	12,8026	4,1312	11,4435
	3,4682	13,5035	4,5021	12,0064
6compMy	18,345	17,7741	19,8208	20,3562
(N*m)	20,5984	19,899	22,7488	23,3831
	22,049	21,2572	24,5882	25,2471
	23,9309	23,0716	27,0207	27,6456
	25,1531	24,2569	28,6373	29,1924
	26,0142	25,1158	29,8288	30,3607
	27,573	26,5554	31,9309	32,3822
	28,6026	27,548	33,2002	33,6582
	29,8274	28,7118	34,835	35,3398
6compMz	0,1016	0,0985	0,2983	0,2884
(N*m)	0,122	0,1138	0,3331	0,3200
	0,1344	0,1214	0,355	0,3402
	0,15	0,1312	0,3838	0,3673
	0,1598	0,1374	0,4039	0,3862
	0,167	0,1416	0,4187	0,4005
	0,179	0,1488	0,445	0,4248
	0,1861	0,1539	0,4646	0,4410
	0,1964	0,1609	0,491	0,4636
4compFx (N)	8,4681	8,433	9,6217	10,1372
	9,5173	9,4537	11,0339	11,5886
	10,1782	10,0934	11,9161	12,4778
	11,0524	10,9585	13,031	13,6334
	11,6095	11,5192	13,7819	14,3782
	11,9976	11,9252	14,3375	14,9510
	12,715	12,6001	15,2964	15,9516
	13,1784	13,0697	15,8463	16,5654
	13,7351	13,6506	16,5911	17,4029
4compFy (N)	1,098	3,8627	1,0965	3,3937
	1,2319	4,3258	1,2633	3,8958
	1,3168	4,6259	1,3669	4,2021
	1,4276	5,0378	1,5051	4,5851

	1,4986	5,3049	1,6	4,8468
	1,5501	5,4855	1,6691	5,0382
	1,6453	5,809	1,7953	5,3721
	1,7109	6,0307	1,8892	5,6092
	1,8001	6,3022	2,018	5,9315
4compMx	0,1632	0,3971	0,2074	0,2392
(N*m)	0,1792	0,4383	0,2317	0,2772
	0,1888	0,4631	0,2484	0,3046
	0,2009	0,4969	0,2723	0,3441
	0,209	0,5189	0,2905	0,3727
	0,215	0,5348	0,306	0,3957
	0,2252	0,5627	0,3384	0,4386
	0,2315	0,5845	0,3664	0,4684
	0,24	0,6125	0,4167	0,5068
4compMy	1	0,9677	0,9151	0,8777
(N*m)	1,1339	10,882	1,0527	1,0115
	1,2193	11,643	1,1422	1,0973
	1,3271	12,630	1,2575	1,2050
	1,3992	13,292	1,336	1,2764
	1,4513	13,770	1,3942	1,3283
	1,5374	14,606	1,4903	1,4147
	1,5949	15,173	1,5531	1,4720
	1,6722	15,955	1,64	1,5533
Mooring 1 (N)	0,4577	0,5143	0,5198	0,4770
	0,5187	0,5745	0,6203	0,5550
	0,5561	0,6148	0,6944	0,6038
	0,6073	0,6667	0,7974	0,6674
	0,6393	0,7033	0,8775	0,7164
	0,6612	0,7275	0,9381	0,7551
	0,7025	0,7694	1,0771	0,8289
	0,7328	0,7963	1,1677	0,8818
	0,7726	0,8438	1,309	0,9673
Mooring 2 (N)	0,2683	0,5494	0,2428	0,4084
	0,3153	0,629	0,3014	0,4654
	0,3436	0,6758	0,3353	0,5005
	0,3805	0,7318	0,3833	0,5477
	0,4061	0,7691	0,4168	0,5798
	0,4268	0,7949	0,4426	0,6068
	0,4609	0,8401	0,4908	0,6506
	0,4847	0,8756	0,5263	0,6786
	0,5212	0,9181	0,5739	0,7125
Mooring 3 (N)	0,2824	0,3829	0,2561	0,1880
	0,3335	0,4238	0,3232	0,2442

	0,3652	0,4339	0,3623	0,2783
	0,4076	0,4475	0,4105	0,3209
	0,4351	0,4585	0,444	0,3500
	0,4559	0,4704	0,4684	0,3721
	0,4922	0,4878	0,5169	0,4095
	0,5199	0,5072	0,5515	0,4343
	0,5624	0,5229	0,6066	0,4679
Acc1 (G)	0,082	0,0825	0,0828	0,0855
	0,092	0,0926	0,0927	0,0954
	0,0986	0,0994	0,099	0,1019
	0,1072	0,1082	0,1076	0,1104
	0,113	0,1139	0,1135	0,1163
	0,117	0,118	0,1182	0,1205
	0,1239	0,1252	0,1259	0,1275
	0,1287	0,1296	0,1307	0,1319
	0,1364	0,1348	0,1369	0,1384
Acc2 (G)	0,0184	0,0686	0,0238	0,0406
	0,0207	0,0768	0,0266	0,0485
	0,0222	0,0823	0,0285	0,0541
	0,0242	0,0895	0,0311	0,0623
	0,0255	0,0944	0,033	0,0679
	0,0266	0,0977	0,0344	0,0723
	0,0284	0,1035	0,0371	0,0801
	0,0298	0,1075	0,0391	0,0852
	0,0315	0,1125	0,0421	0,0918
Acc3 (G)	0,012	0,0134	0,0092	0,0096
	0,0137	0,0152	0,0109	0,0114
	0,0148	0,0163	0,0121	0,0128
	0,0162	0,0177	0,0138	0,0146
	0,0171	0,0187	0,015	0,0159
	0,0177	0,0193	0,0159	0,0168
	0,0188	0,0205	0,0175	0,0184
	0,0195	0,0212	0,0186	0,0196
	0,0204	0,0221	0,0201	0,0213
Surge (m)	0,076	0,0814	0,0809	0,0847
	0,0879	0,0945	0,0957	0,0981
	0,0952	0,1018	0,1046	0,1056
	0,105	0,1107	0,1159	0,1149
	0,1112	0,1167	0,1233	0,1209
	0,1157	0,1212	0,1292	0,1252
	0,1229	0,1293	0,1395	0,1328
	0,1275	0,1348	0,1473	0,1384
	0,134	0,1416	0,1584	0,1451

Sway (m)	0,0072	0,0686	0,0112	0,0251
	0,0079	0,0777	0,0124	0,0320
	0,0084	0,0801	0,0132	0,0365
	0,009	0,0847	0,0145	0,0419
	0,0094	0,088	0,0156	0,0454
	0,0098	0,0906	0,0165	0,0479
	0,0105	0,0925	0,0185	0,0521
	0,0111	0,0958	0,0202	0,0549
	0,0119	0,099	0,0227	0,0590
Heave (m)	0,0114	0,0132	0,0101	0,0111
	0,0151	0,017	0,0128	0,0143
	0,0176	0,0193	0,0149	0,0165
	0,0208	0,022	0,0176	0,0194
	0,023	0,0239	0,0194	0,0213
	0,0247	0,0254	0,0208	0,0227
	0,0276	0,028	0,0232	0,0254
	0,0292	0,0298	0,0249	0,0271
	0,0312	0,0326	0,0272	0,0294
Roll (grad)	0,0052	0,0162	0,0121	0,0222
	0,0059	0,0202	0,015	0,0270
	0,0064	0,0223	0,0172	0,0301
	0,007	0,0248	0,0203	0,0341
	0,0074	0,0263	0,0225	0,0368
	0,0077	0,0273	0,0242	0,0387
	0,0083	0,0293	0,0273	0,0420
	0,0087	0,0305	0,0295	0,0441
	0,0093	0,0322	0,0323	0,0471
Pitch (grad)	0,0348	0,0334	0,0312	0,0334
	0,0405	0,0398	0,0384	0,0401
	0,044	0,0435	0,0425	0,0441
	0,0486	0,0482	0,0477	0,0490
	0,0516	0,0513	0,0511	0,0523
	0,0537	0,0537	0,0537	0,0545
	0,0572	0,0581	0,0584	0,0583
	0,0596	0,0609	0,0616	0,0608
	0,0622	0,0651	0,0665	0,0644
Yaw (grad)	0,1837	0,3106	0,2451	0,3267
	0,2316	0,3848	0,3063	0,4117
	0,2645	0,4182	0,3521	0,4692
	0,3089	0,4619	0,4178	0,5496
	0,3391	0,4916	0,4675	0,6031
	0,3613	0,5141	0,5078	0,6414
	0,3992	0,5545	0,5836	0,7058
	0,4247	0,5803	0,6358	0,7504

	0,4595	0,6193	0,7132	0,8136
--	--------	--------	--------	--------

### 5.13 Παρουσίαση συντελεστών MKN για τη TLP\_00\_NR

Στις δύο τελευταίες ενότητες που ακολουθούν θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα (σε μητρώα και σε διαγράμματα) από τον κώδικα maxCKN.

Τα βήματα του κώδικα είναι τα εξής:

- 1) Χρησιμοποιεί τις απόλυτες τιμές των δεδομένων
- 2) Ορίζουμε τον αριθμό των στηλών που θέλουμε να αναλύσουμε π.χ. τις έξι δυνάμεις και ροπές στη βάση της A/Γ.
- 3) Επιλέγουμε τον αριθμό και το πλήθος maxK (όπου maxK ο αριθμός των μέγιστων τιμών κάθε στήλης, π.χ. για maxK =10 το πρόγραμμα βρίσκει τις 10 πρώτες μέγιστες τιμές κάθε στήλης).

Ο κώδικας επιστρέφει αδιάστατους συντελεστές MKN (όπου MKN η μέση τιμή των K μέγιστων τιμών διαιρεμένη με τη μέση τιμή όλων των τιμών της κάθε χρονοσειράς σε απόλυτες τιμές) όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση

$$MKN = \frac{mean(abs(max[N]_K))}{mean(abs([N]_{TOTAL}))}$$

Για τη κάθε εξεταζόμενη στήλη εκτός από τον συντελεστή MKN των μέγιστων υπολογίζει και τις τιμές των συντελεστών MKN για τις υπόλοιπες στήλες με βάση τις χρονικές στιγμές στις οποίες εμφανίζονται τα maxK της εξεταζόμενης στήλης.

Με τον τρόπο αυτό θέλουμε να ελέγξουμε αν τη στιγμή που παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές μιας δύναμης (ή μιας μετατόπισης) σε μία διεύθυνση παρουσιάζεται ταυτόχρονα και οι μέγιστες τιμές (ή σημαντικό ποσοστό αυτών) μιας δύναμης (ή μιας μετατόπισης) σε μια άλλη διεύθυνση.

Σε αυτή την ενότητα θα παραθέσουμε 5 μητρώα για πέντε τιμές maxK (και συγκεκριμένα με τιμές 10, 100, 500, 1000, και 5000) για τις έξι δυνάμεις και ροπές στη βάση της A/Γ.

#### Περίπτωση C1 MAX K=10

<b>4.1369</b>	2.9248	2.1288	1.6778	4.0835	3.7064
2.5082	<b>4.3532</b>	0.6450	4.0658	1.8903	1.3756
1.0102	0.6230	<b>1.3846</b>	0.7473	1.3846	1.2980
1.0448	3.3452	0.2408	<b>3.4942</b>	0.3737	0.5073
4.1662	2.8465	2.2268	1.5298	<b>4.2473</b>	3.7776
3.9965	2.2866	2.3759	1.0151	4.2002	<b>4.5259</b>

Στο παραπάνω μητρώο (που υπολογίστηκε με βάση τις στήλες των έξι δυνάμεων και ροπών στη βάση της Α/Γ) στην πρώτη σειρά και πρώτη στήλη είναι η τιμή του αδιάστατου συντελεστή ΜΚΝ για την δύναμη στη surge διεύθυνση (δcompFx), ενώ στις υπόλοιπες στήλες της πρώτης σειράς βρίσκονται οι αδιάστατοι συντελεστές ΜΚΝ των υπολοίπων δυνάμεων και ροπών υπολογιζόμενοι στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές που παρουσιάστηκαν οι 10 πρώτες μέγιστες (απόλυτες) τιμές της χρονοσειράς για τη δύναμη δcompFx.

#### Περίπτωση C1 MAX K=100

<b>3.8642</b>	2.6202	2.3092	1.2225	3.8482	3.6343
2.0536	<b>3.7745</b>	0.5022	3.3735	1.8171	1.2580
1.0236	0.6685	<b>1.3846</b>	0.8788	1.1472	1.3125
1.0207	2.8770	0.6127	<b>3.1430</b>	0.9358	0.7782
3.8785	2.5186	2.4068	1.1639	<b>3.9022</b>	3.7226
3.7132	2.1008	2.5267	1.0536	3.7797	<b>4.0184</b>

#### Περίπτωση C1 MAX K=500

<b>3.4610</b>	2.0693	2.3369	1.0851	3.4501	3.2486
1.7700	<b>3.2608</b>	0.5696	2.9363	1.6401	1.1126
1.0180	0.7169	<b>1.3846</b>	0.9109	1.0827	1.2795
1.0629	2.5667	0.8814	<b>2.7893</b>	1.0130	0.9103
3.4725	1.9751	2.4294	1.0509	<b>3.4826</b>	3.3288
3.3112	1.6590	2.5468	0.9666	3.3628	<b>3.5332</b>

#### Περίπτωση C1 MAX K=1000

<b>3.2118</b>	1.8505	2.2695	1.0355	3.1979	3.0354
1.6690	<b>3.0147</b>	0.6919	2.7356	1.4925	1.0551
1.0026	0.7457	<b>1.3846</b>	0.9216	1.0842	1.2565
1.0694	2.4045	0.8535	<b>2.6220</b>	1.0115	0.9344
3.2148	1.7634	2.3617	1.0079	<b>3.2283</b>	3.1014

3.0659 1.4809 2.4842 0.9356 3.1370 **3.2720**

#### Περίπτωση C1 MAX K=5000

**2.5388** 1.3998 2.1560 0.9928 2.5299 2.4165

1.3003 **2.3921** 0.5909 2.1895 1.2134 0.9771

1.0270 0.8058 **1.3826** 0.9459 1.0792 1.2007

1.0064 1.9973 0.8499 **2.1582** 0.9880 0.9455

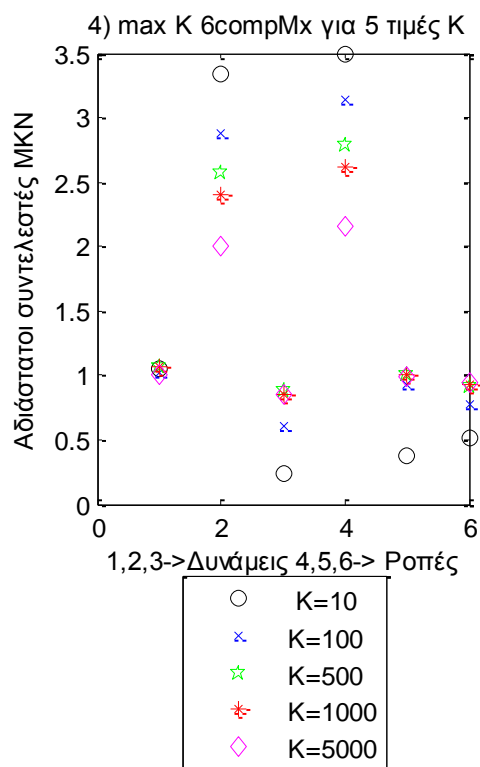
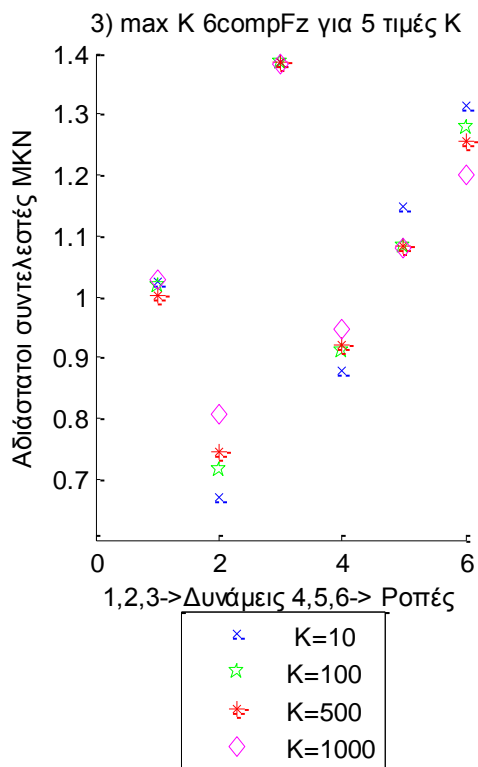
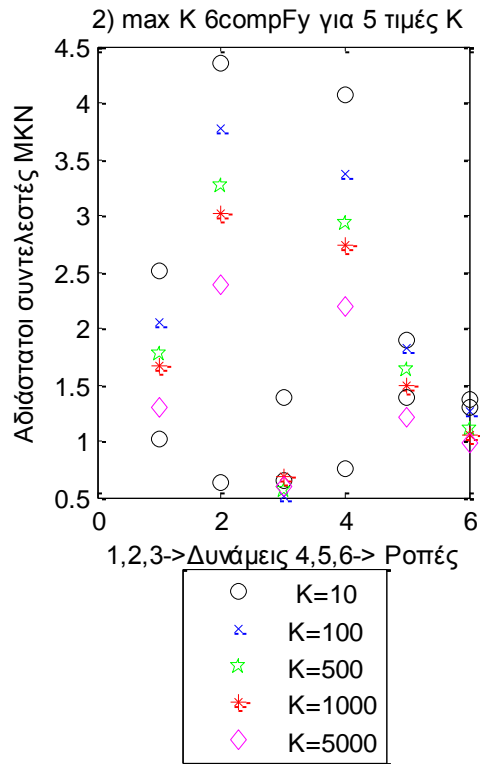
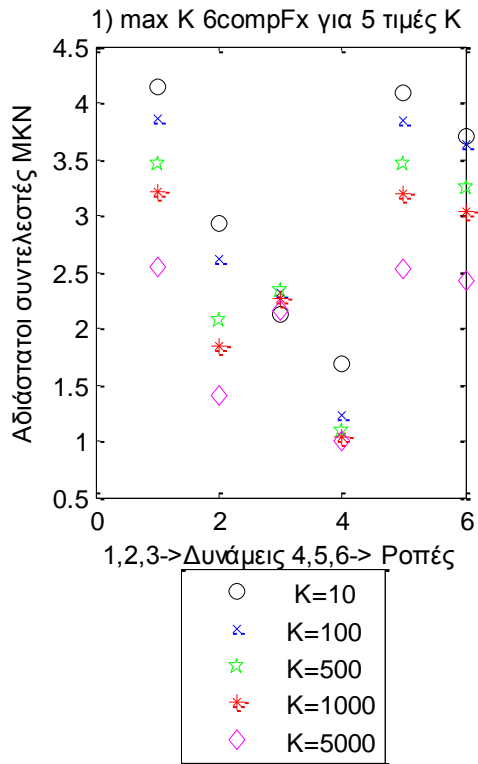
2.5344 1.3271 2.2434 0.9719 **2.5431** 2.4615

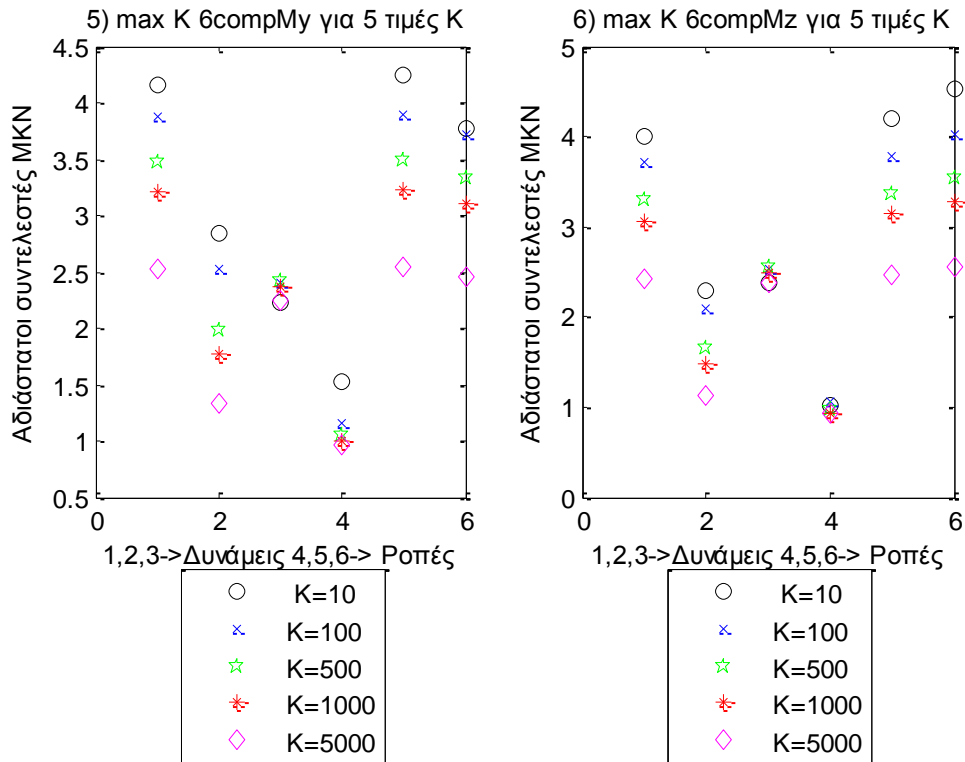
2.4257 1.1313 2.3756 0.9294 2.4685 **2.5497**

Από τα παραπάνω μητρώα φαίνεται ότι υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ της δύναμης στη surge διεύθυνση ( $\delta\text{compF}_x$ ) και των ροπών στις pitch και yaw ροπής ( $\delta\text{compM}_y$   $\delta\text{compM}_z$ ), καθώς επίσης και της δύναμης στη sway διεύθυνση ( $\delta\text{compF}_y$ ) με τη roll ροπή ( $\delta\text{compM}_x$ ) και της δύναμης στη heave ανύψωση με τη yaw ροπή. Μια παρατήρηση που θα πρέπει να αναφέρουμε είναι ότι, καθώς το MAX K αυξάνει (και τείνει στο πλήθος των δεδομένων) οι συντελεστές τείνουν στη μονάδα.

Συνεχίζουμε με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μητρώων σε κοινά γραφήματα.



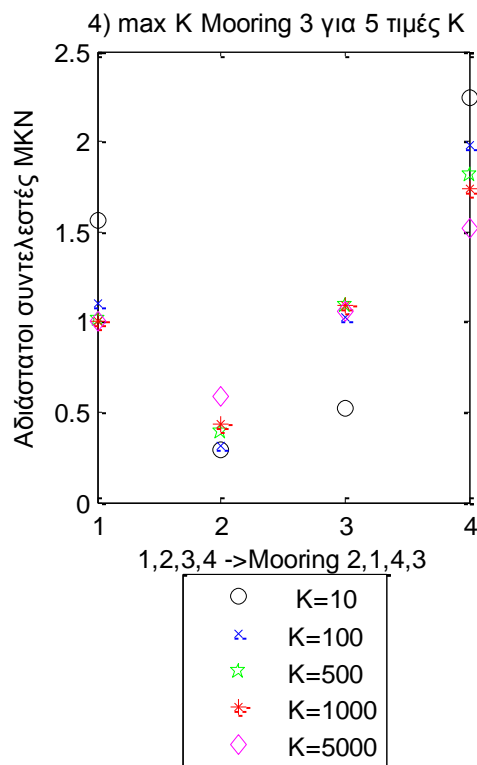
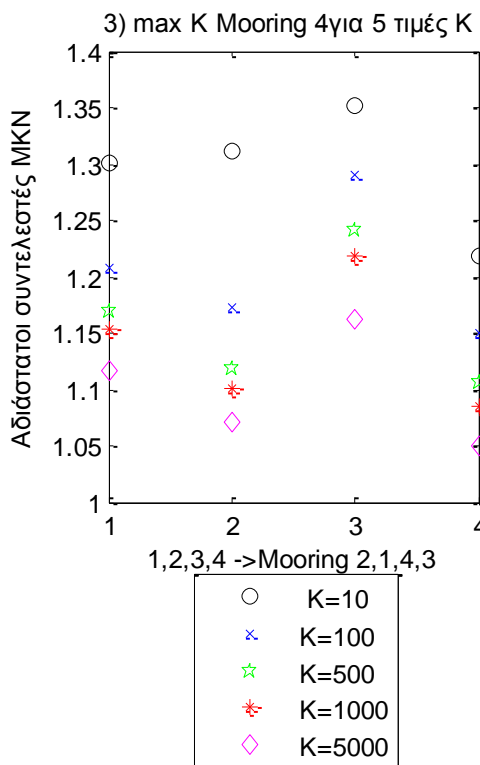
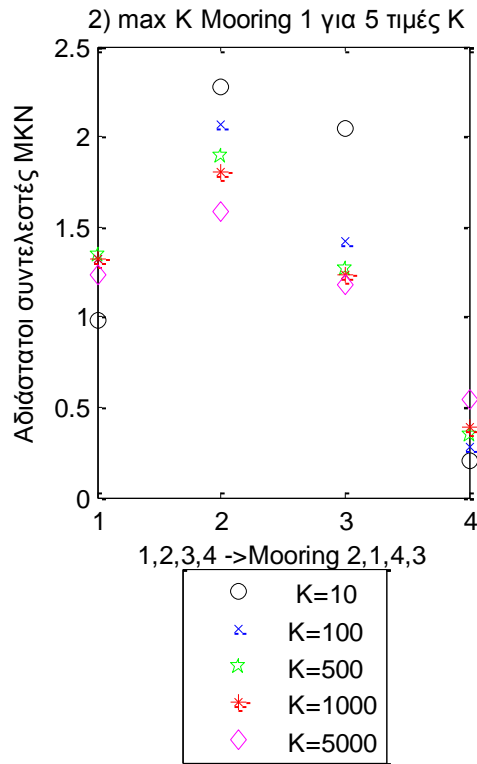
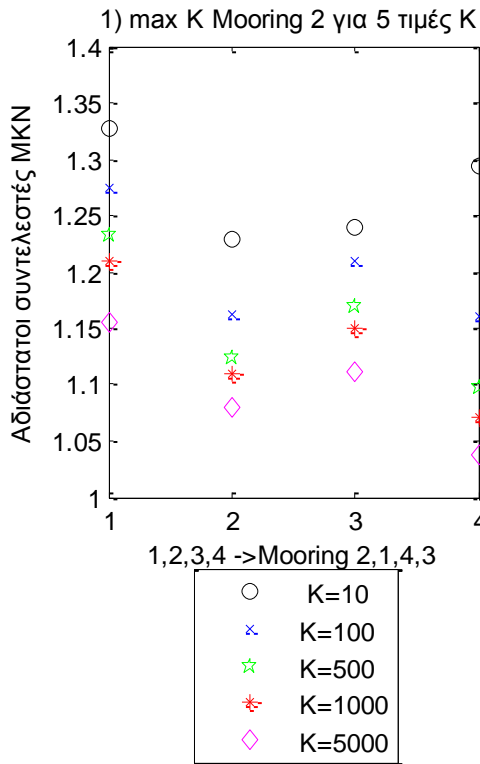




**Σχήματα 5.13.1 (1-6)** Συντελεστές ΜΚΝ (για MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

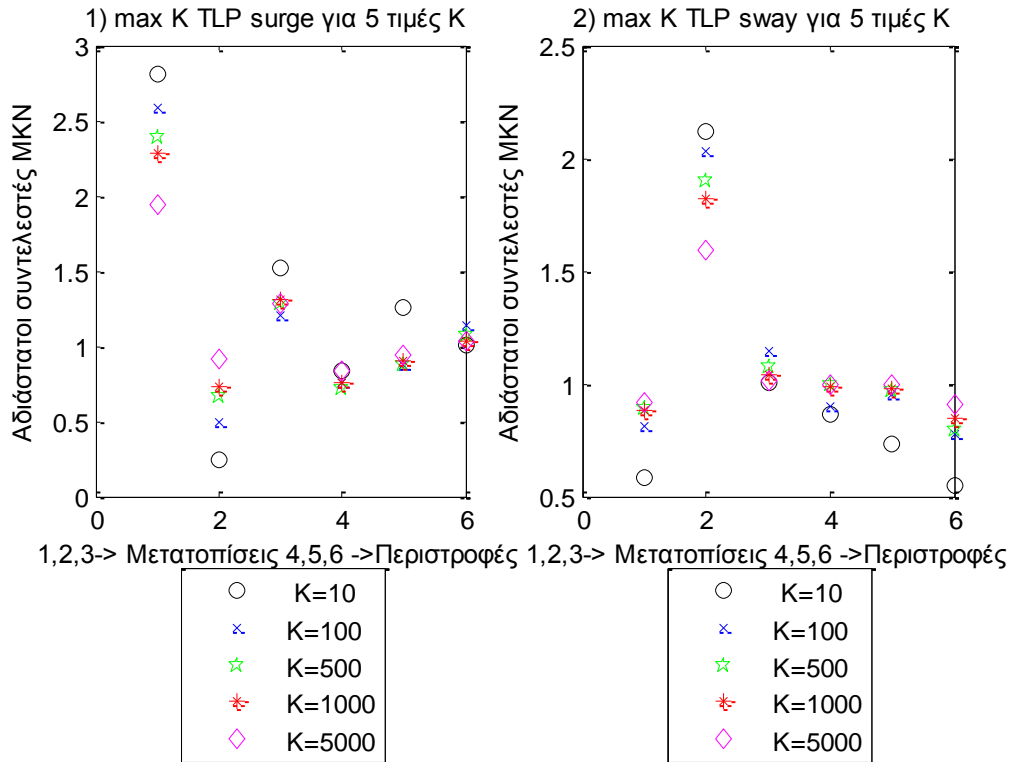
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές ΜΚΝ για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/Γ.

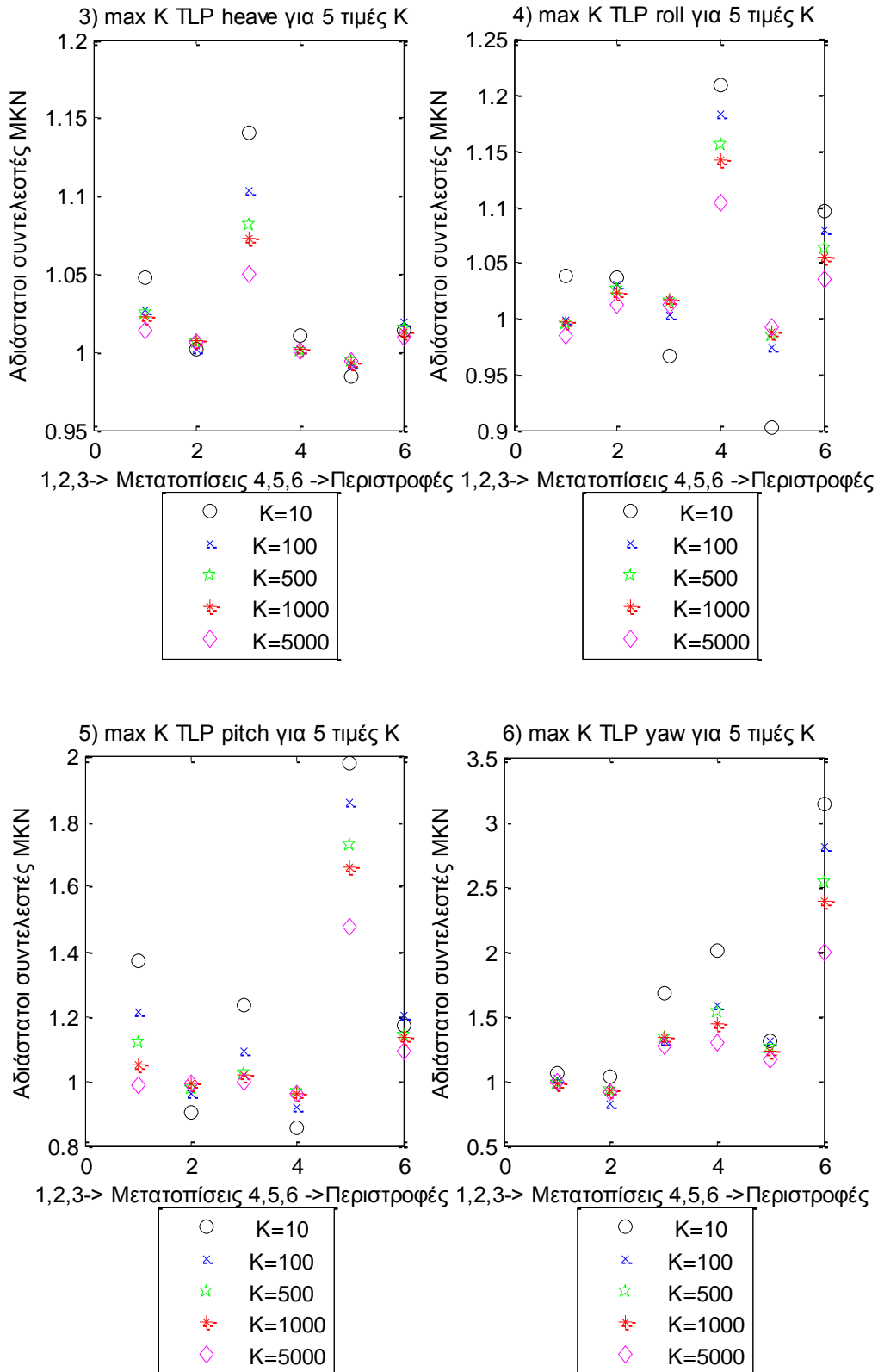
Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ της δύναμης στη surge διεύθυνση (6compFx) και των ροπών στις pitch και yaw ροπής (6compMy 6compMz), καθώς επίσης και της δύναμης στη sway διεύθυνση (6compFy) με τη roll ροπή (6compMx) και της δύναμης στη heave ανύψωση με τη yaw ροπή και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).



**Σχήματα 5.13.2 (1-4)** Συντελεστές ΜΚΝ (για  $\max K=10, 100, 500, 1000$  και  $5000$ ) για τις τέσσερις δυνάμεις στις γραμμές αγκύρωσης

Από τα σχήματα 5.13.2 παρατηρούμε ότι, υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των γραμμών αγκύρωσης 2 και 3 (Mooring 2 και Mooring3) καθώς επίσης και μεταξύ των γραμμών 1 και 4 (Mooring 1 και Mooring4) και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).



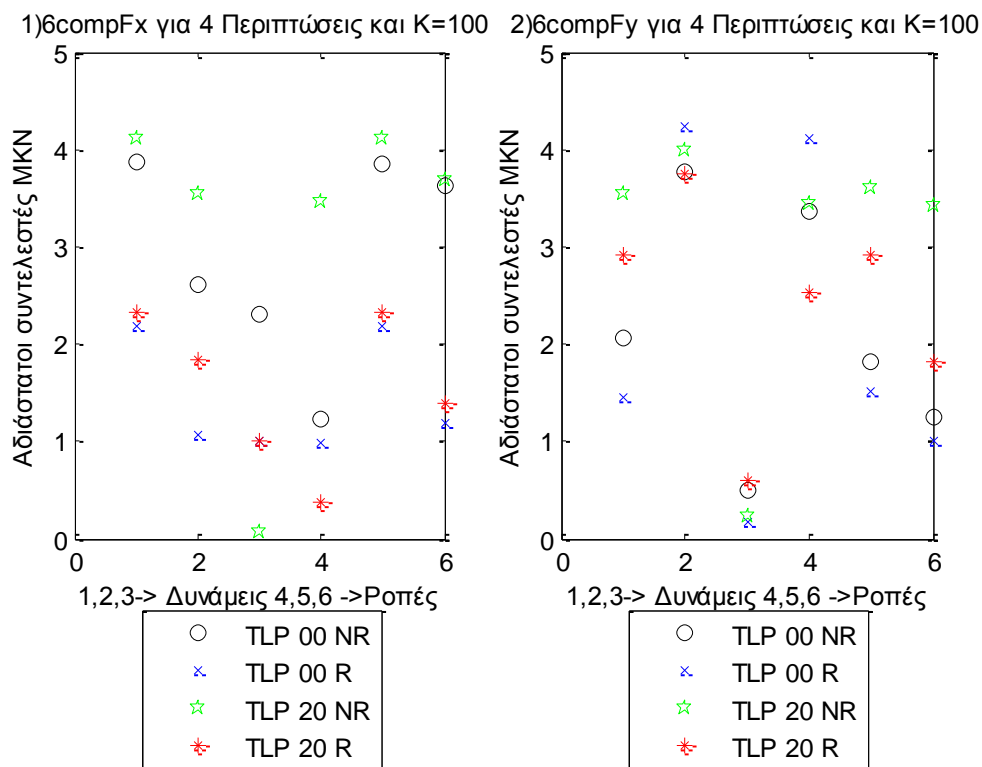


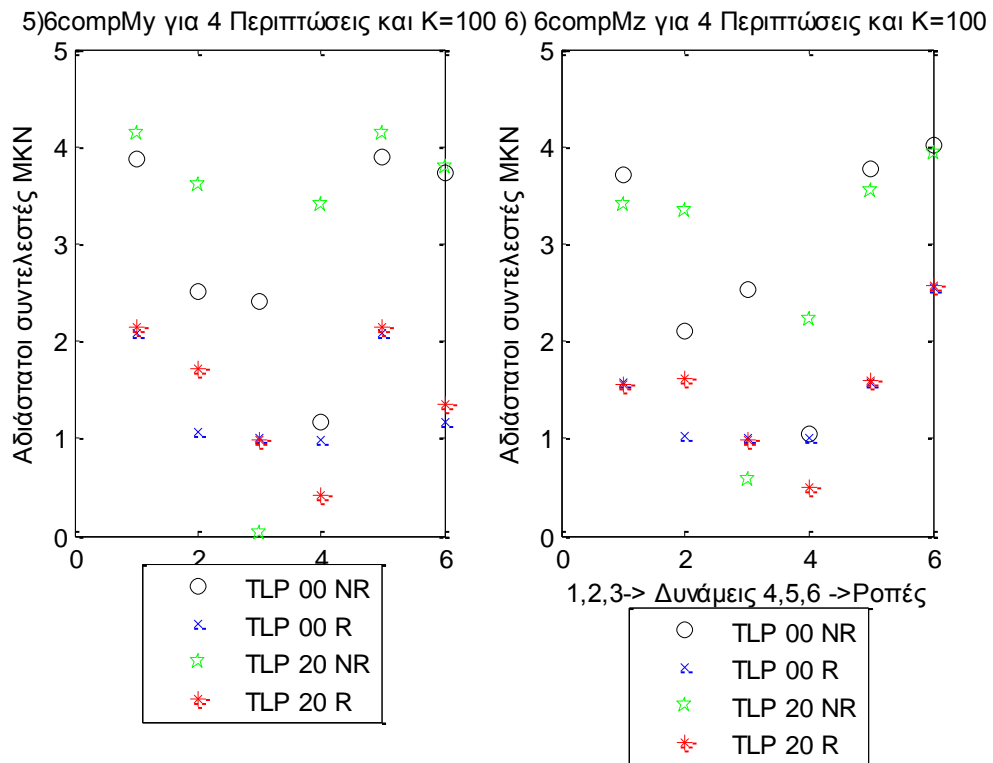
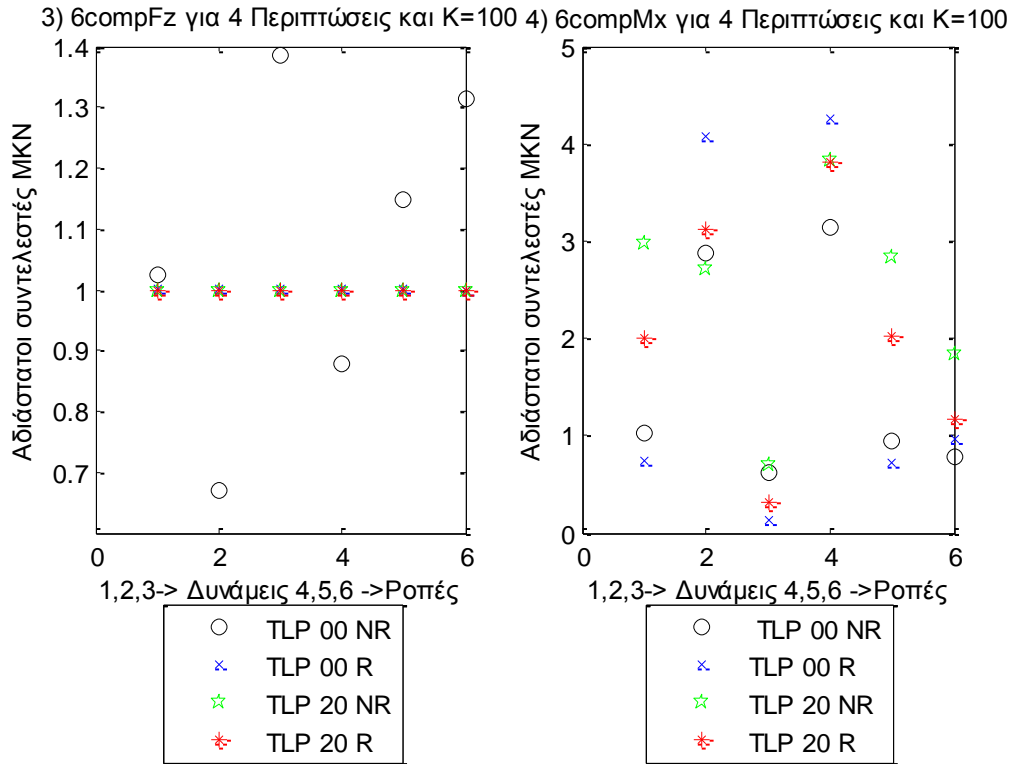
**Σχήματα 5.13.3 (1-6)** Συντελεστές ΜΚΝ (για MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000) για τις τρεις μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

Από τα παραπάνω σχήματα δεν φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των μετατοπίσεων και των περιστροφών. Αφού π.χ. στο σχήμα 5.13.3.1 τα σημεία που αντιστοιχούν στους MKN συντελεστές για τη surge μετατόπιση (δηλαδή στον άξονα των x για x=1) τα οποία έχουν υπολογιστεί με βάση τις 10, 100, 500, 1000 και 5000 μέγιστες τιμές είναι πιο ψηλά από τα αντίστοιχα των σημεία των MKN συντελεστών των υπολοίπων μετατοπίσεων και περιστροφών (δηλαδή στον άξονα των x για x=2, 3, 4, 5 και 6).

#### 5.14 Παρουσίαση συντελεστών MKN 4 περιπτώσεων για τη TLP

Σε αυτήν την ενότητα αυτή θα παραθέσουμε σε γραφήματα τους αδιάστατους συντελεστές MKN για τέσσερις περιπτώσεις φόρτισης, (και συγκεκριμένα στον άξονα των x για x=1 θα αντιστοιχεί στην περίπτωση TLP\_00\_NR, για x=2 αντιστοιχεί στην περίπτωση TLP\_00\_R, για x=3 περίπτωση TLP\_20\_NR και για x=4 αντιστοιχεί στην περίπτωση TLP\_20\_R). Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν για 100 πρώτες μέγιστες τιμές, δηλαδή για MAX K=100.

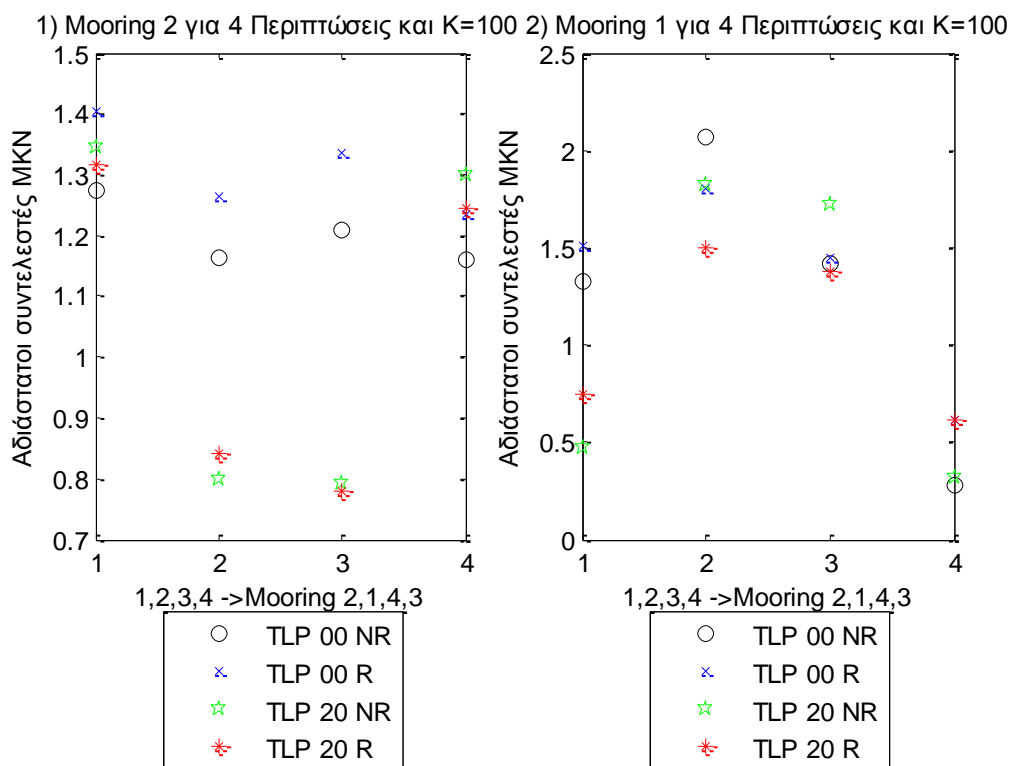




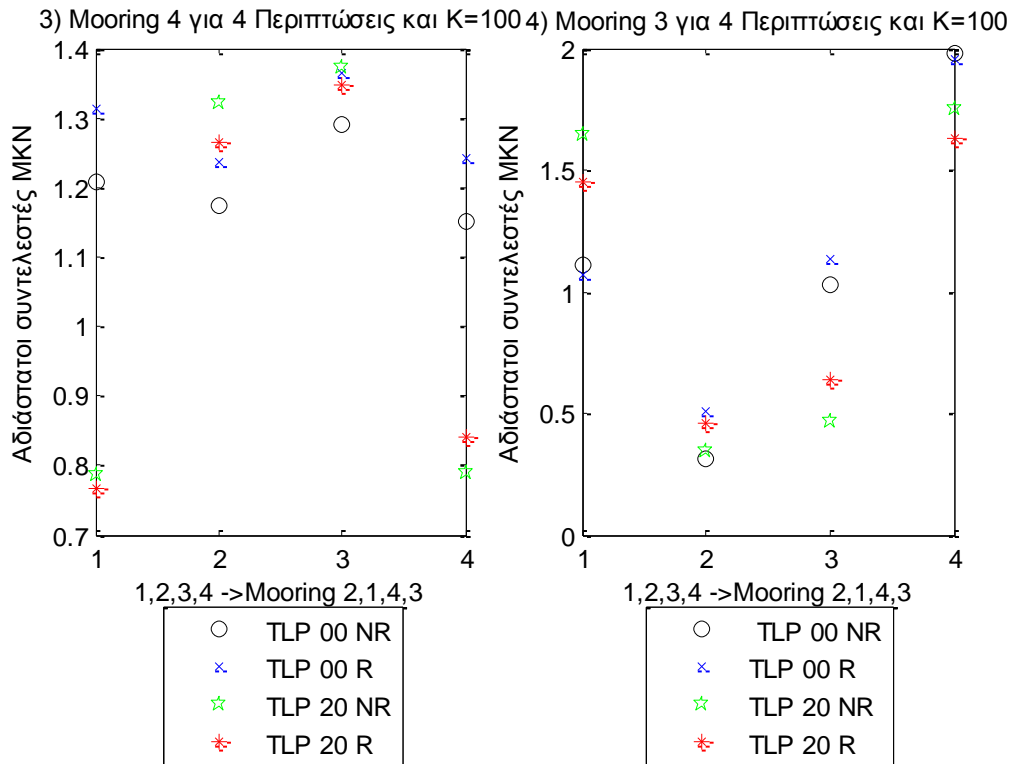
**Σχήματα 5.14.1 (1-6)** Συντελεστές ΜΚΝ για τέσσερις περιπτώσεις (για  $\text{MAX } K=100$ ) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές MKN για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/ Γ, για MAX K=100 και για 4 περιπτώσεις φόρτισης.

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ της δύναμης στη surge διεύθυνση (δcompFx) και των ροπών στις pitch και yaw ροπής (δcompMy δcompMz), καθώς επίσης και της δύναμης στη sway διεύθυνση (δcompFy) με τη roll ροπή (δcompMx) και της δύναμης στη heave ανύψωση με τη yaw ροπή. Μια παρατήρηση που θα πρέπει να αναφέρουμε είναι ότι, καθώς το MAX K αυξάνει (και τείνει στο πλήθος των δεδομένων) οι συντελεστές τείνουν στη μονάδα.



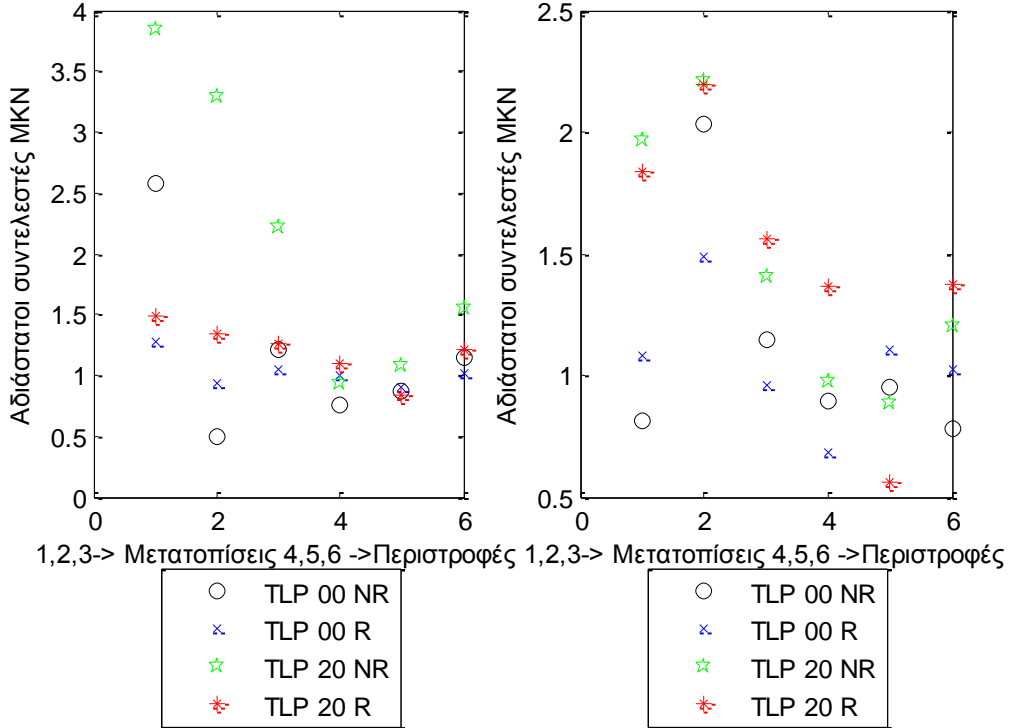




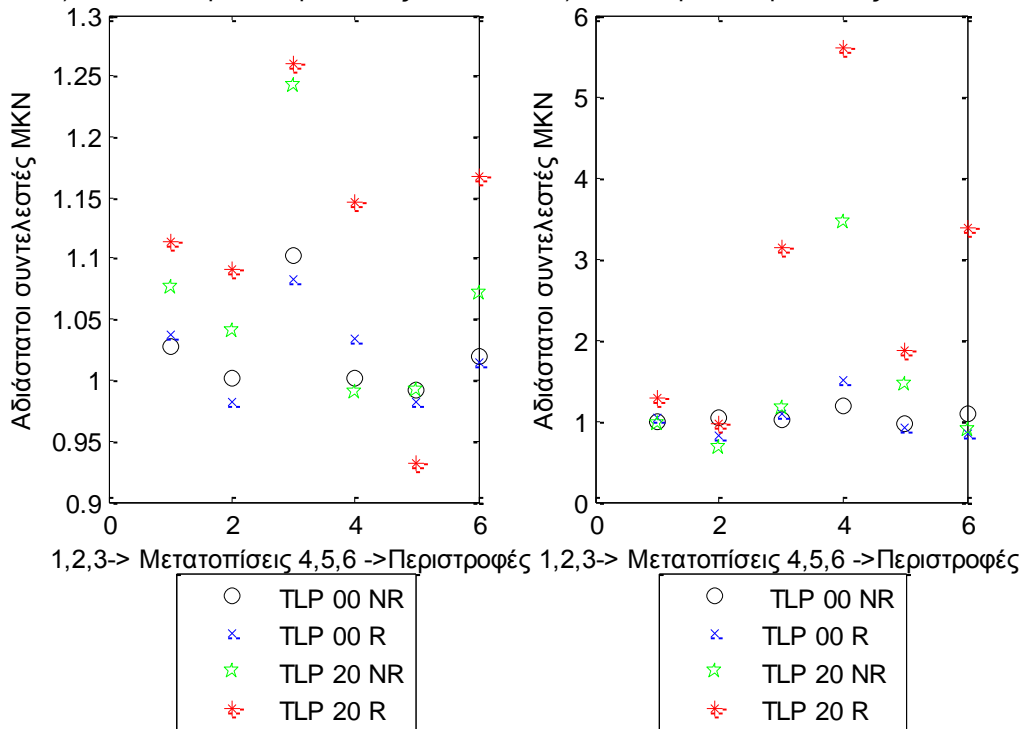
**Σχήματα 5.14.2 (1-4)** Συντελεστές ΜΚΝ για τέσσερις περιπτώσεις (για  $\max K=10, 100, 500, 1000$  και  $5000$ ) για τις τέσσερις δυνάμεις στις γραμμές αγκύρωσης

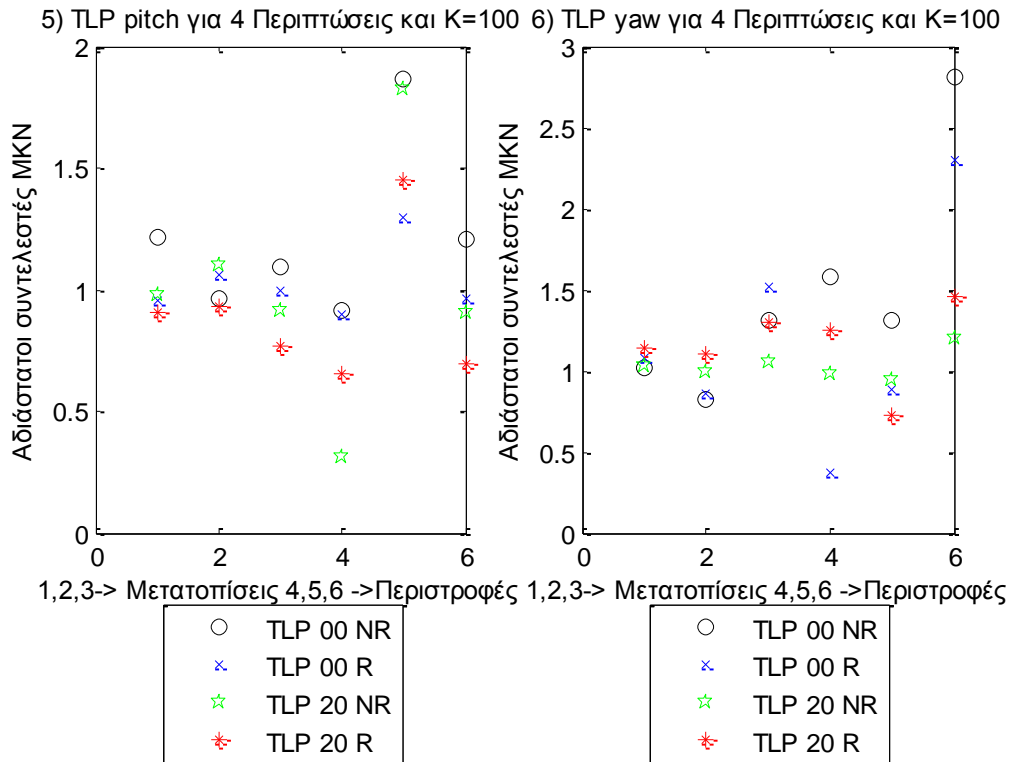
Από τα γραφήματα 5.14.2 (1-4) παρατηρούμε ότι, υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των γραμμών αγκύρωσης 2 και 3 (Mooring 2 και Mooring 3) καθώς επίσης και μεταξύ των γραμμών 1 και 4 (Mooring 1 και Mooring 4) για τις 4 περιπτώσεις (και για  $\max K=100$ ).

1) TLP surge για 4 Περιπτώσεις και K=100 2) TLP sway για 4 Περιπτώσεις και K=100



3) TLP heave για 4 Περιπτώσεις και K=100 4) TLP roll για 4 Περιπτώσεις και K=100





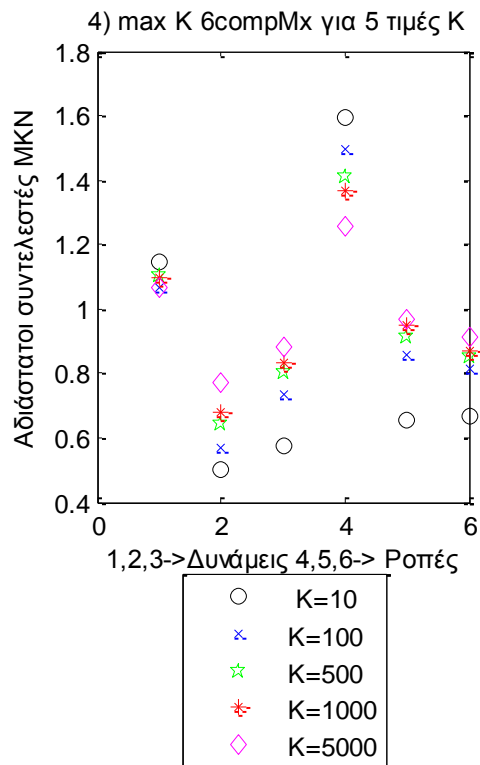
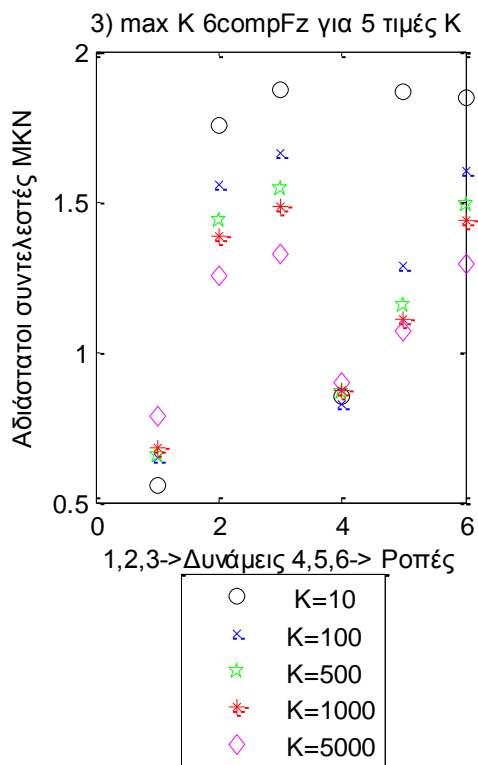
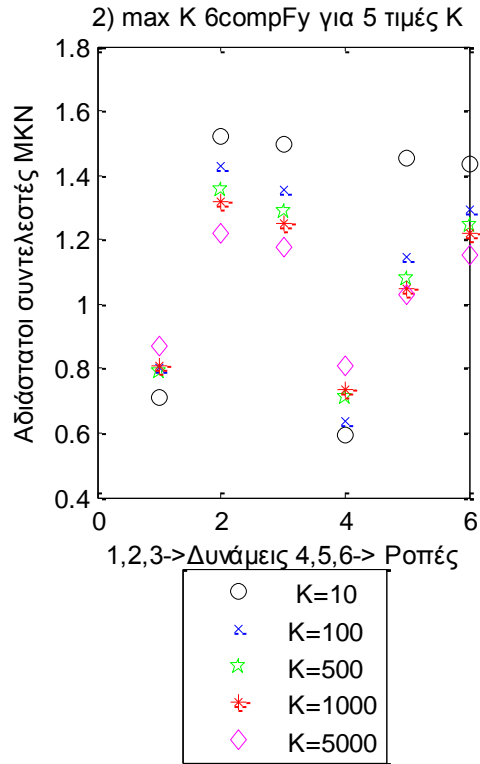
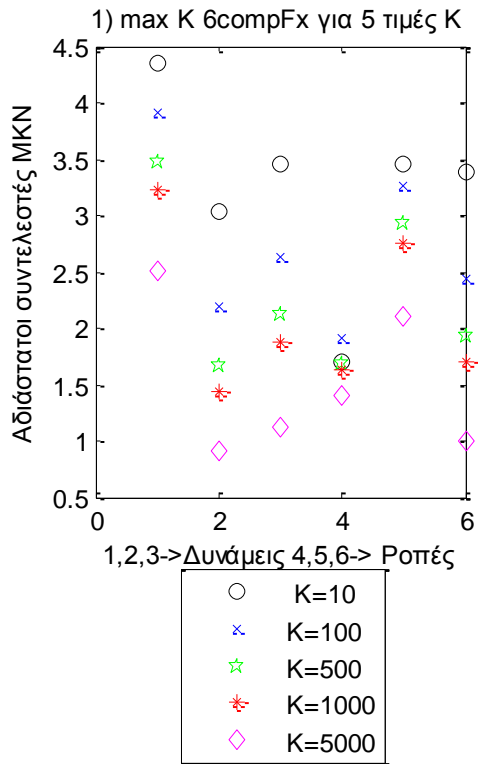
**Σχήματα 5.14.3 (1-6)** Συντελεστές MKN για τέσσερις περιπτώσεις (για MAX K=100) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

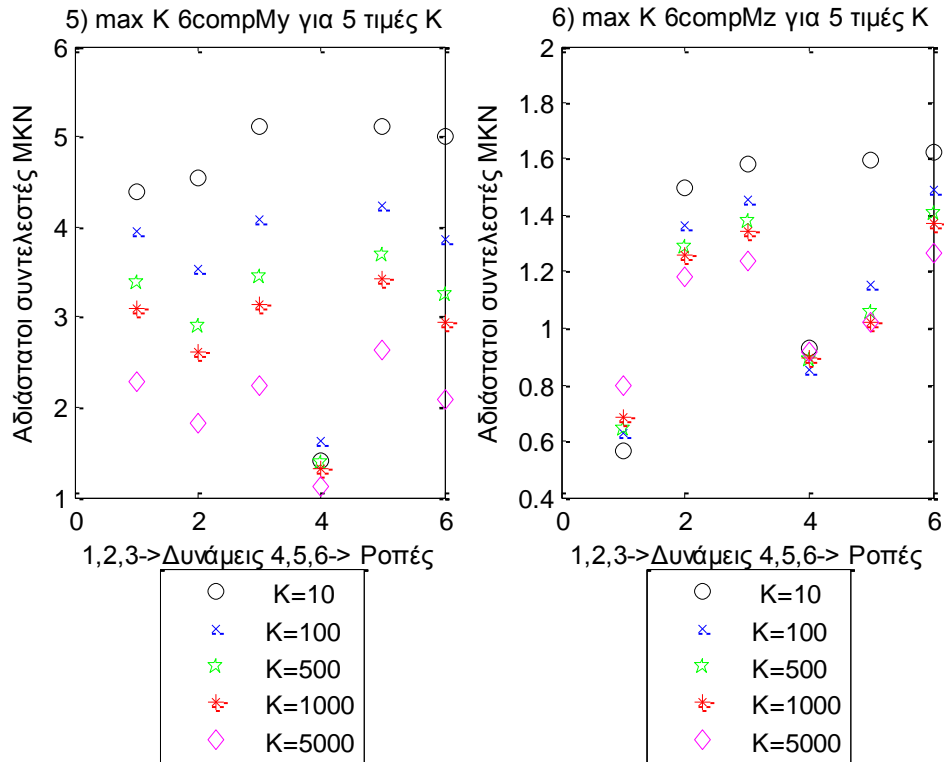
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές MKN για τις τρεις μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/Γ, για MAX K=100 και για 4 περιπτώσεις φόρτισης.

Από τα παραπάνω σχήματα δεν φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των μετατοπίσεων και των περιστροφών.

### 5.15 Παρουσίαση συντελεστών MKN για τη SB\_00\_NR

Σε αυτή την ενότητα θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα των 5 μητρώων σε κοινά γραφήματα για πέντε τιμές maxK (και συγκεκριμένα με τιμές 10, 100, 500, 1000, και 5000) για τις έξι δυνάμεις και ροπές στη βάση της Α/Γ (όπως έγινε στην ενότητα 5.13 για τη TLP).

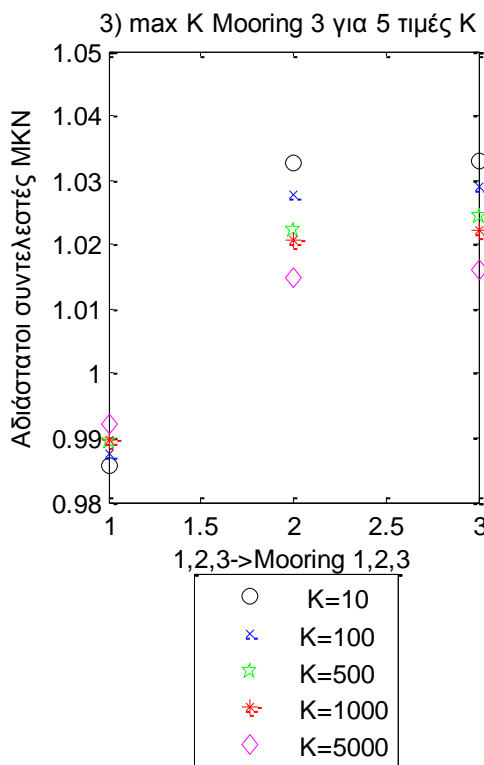
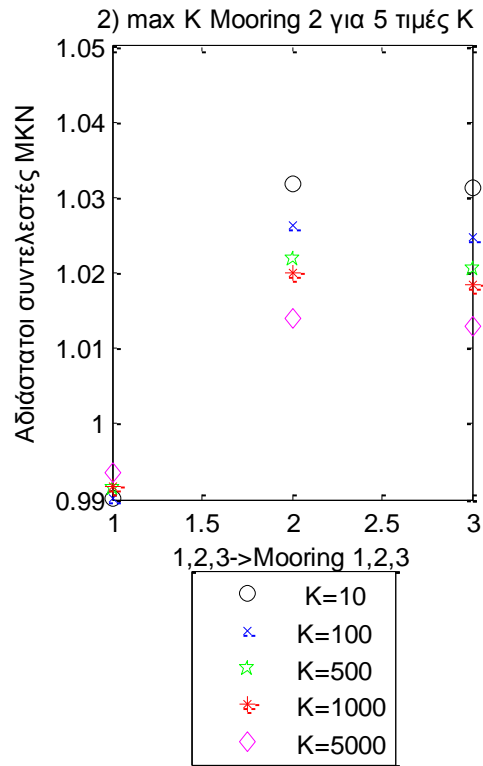
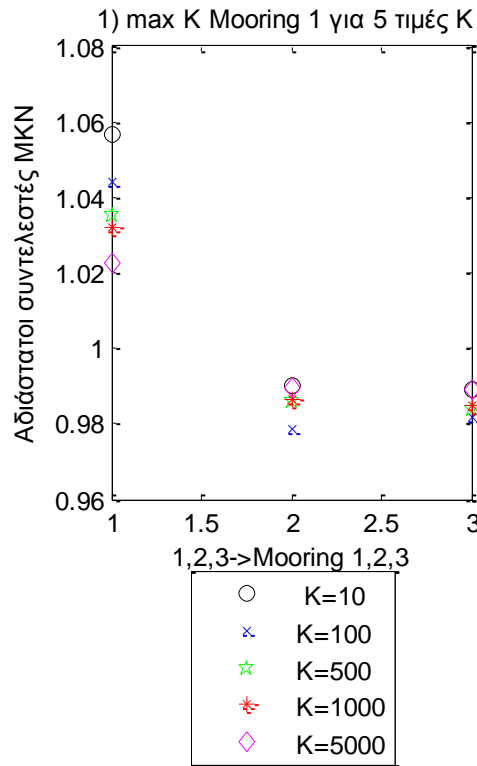




**Σχήματα 5.15.1 (1-6)** Συντελεστές MKN (για MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

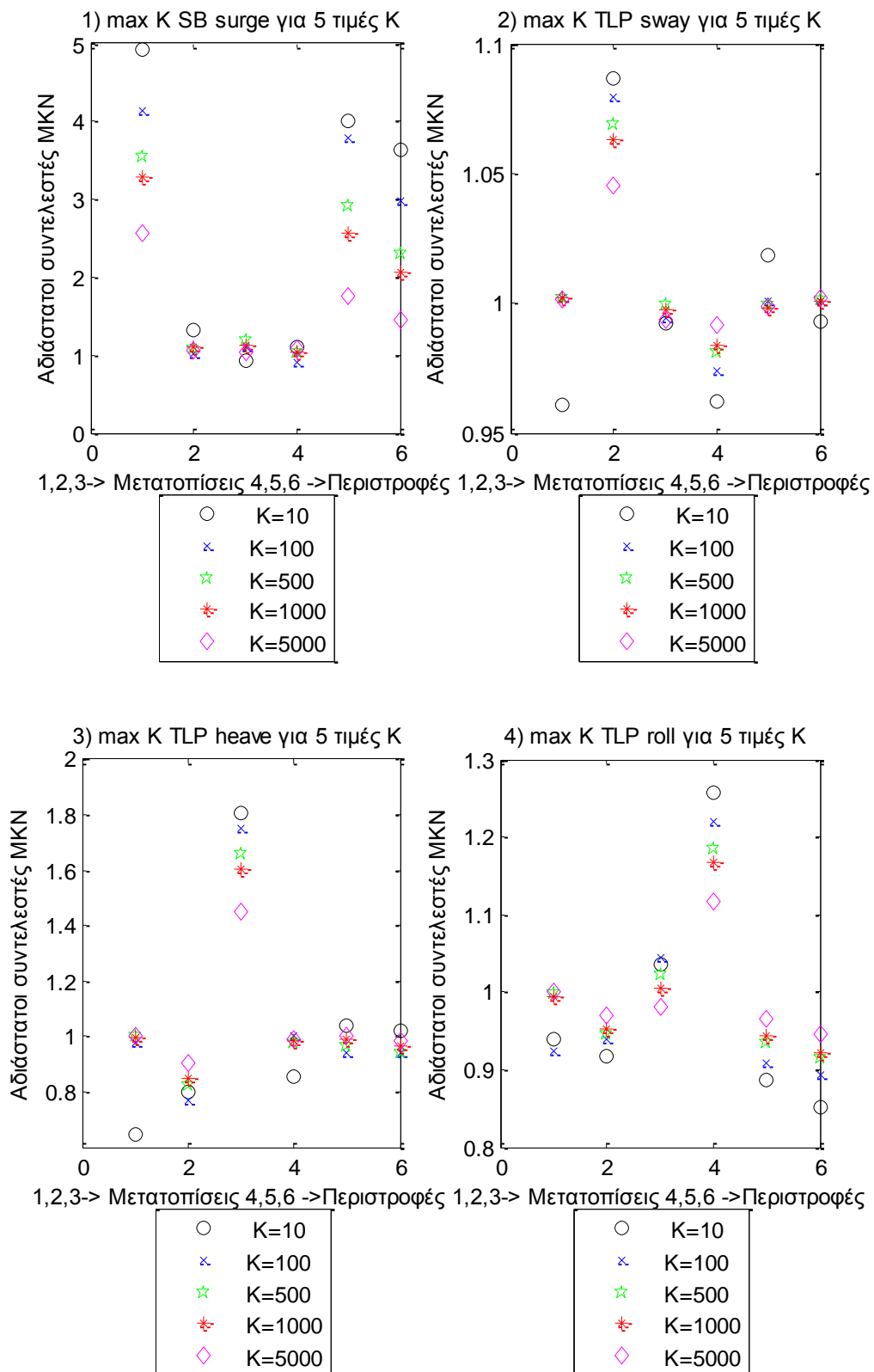
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές MKN για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/Γ.

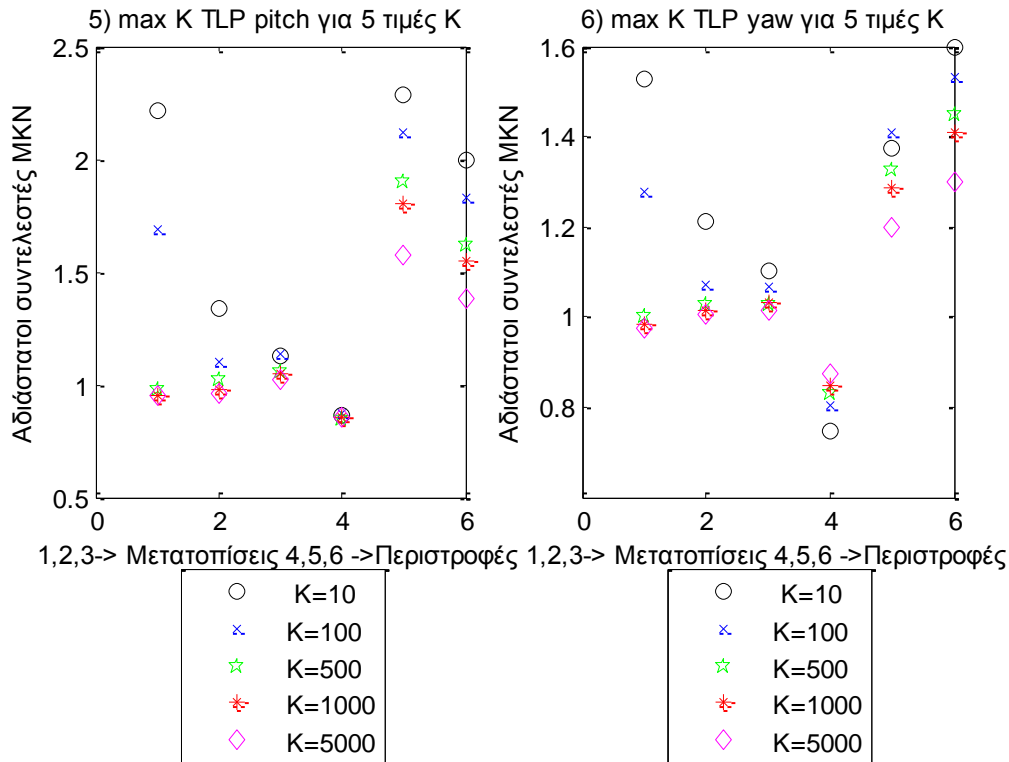
Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των δυνάμεων στη sway διεύθυνση ( $\delta compFy$ ) και στη heave διεύθυνση ( $\delta compFz$ ) και των ροπών στις pitch και yaw περιστροφής και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).



**Σχήματα 5.15.2 (1-3)** Συντελεστές ΜΚΝ (για  $K_{max}=10, 100, 500, 1000$  και  $5000$ ) για τις τρεις δυνάμεις στις γραμμές αγκύρωσης

Από τα σχήματα 5.15.2 παρατηρούμε ότι, υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των γραμμών αγκύρωσης 2 και 3 (Mooring 2 και Mooring3) και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).





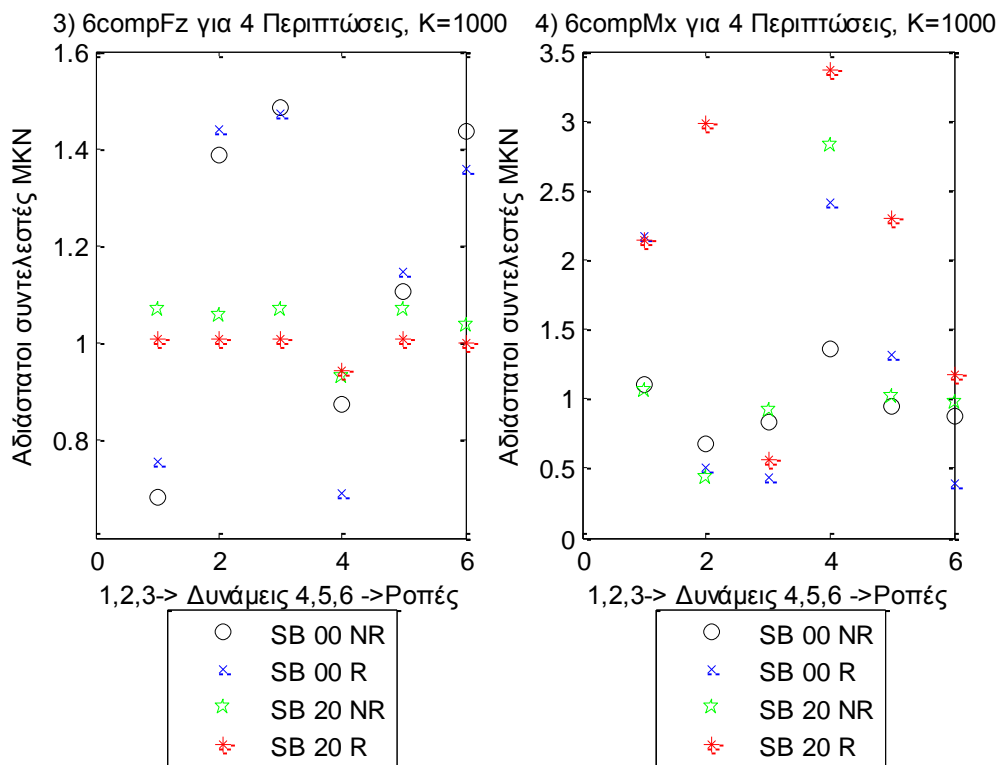
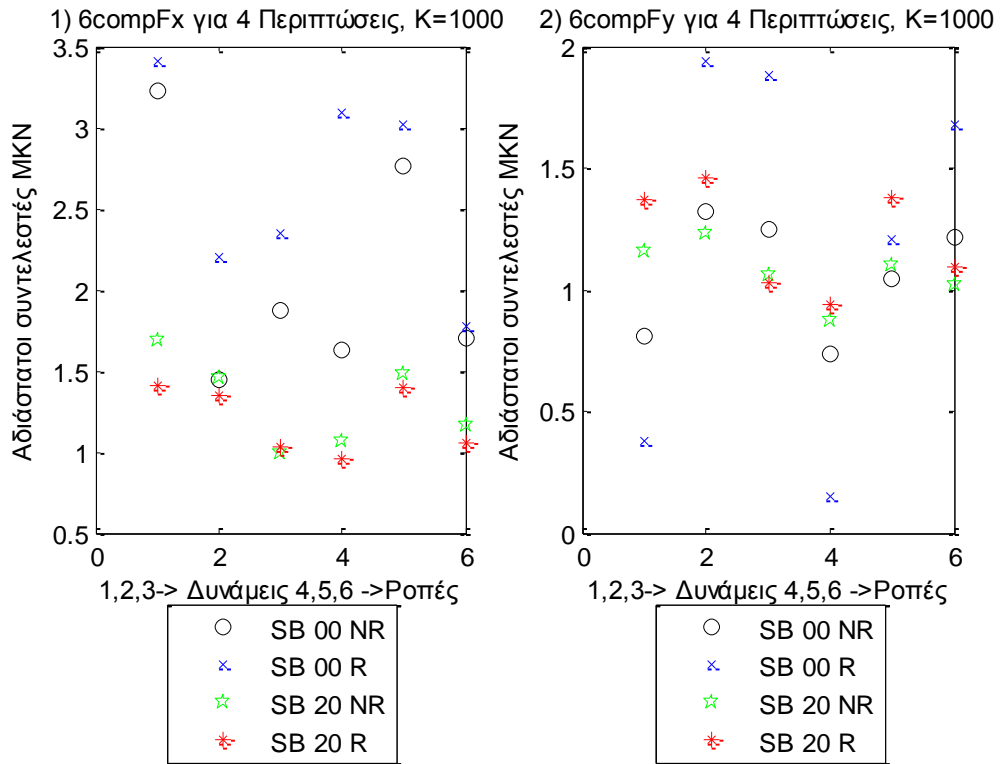
**Σχήματα 5.15.3 (1-6)** Συντελεστές MKN (για MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000) για τις τρεις μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

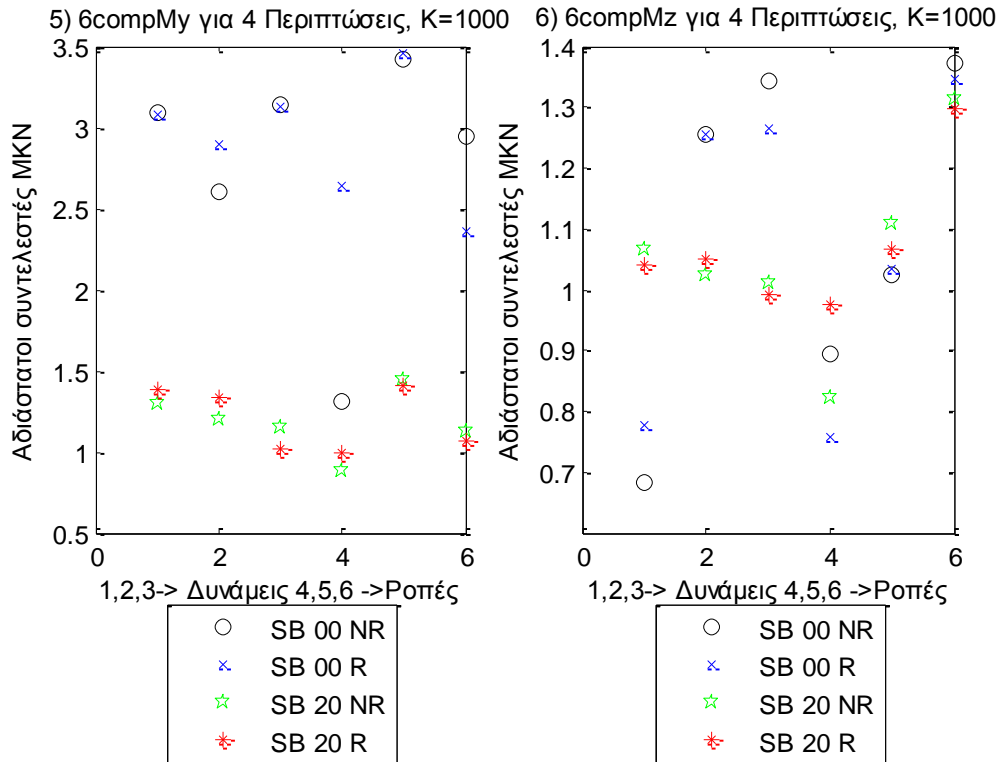
Από τα παραπάνω σχήματα δεν φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των μετατοπίσεων και των περιστροφών, εκτός από την περίπτωση στις περιστροφές pitch και yaw.

### 5.16 Παρουσίαση συντελεστών MKN 4 περιπτώσεων για τη SB

Σε αυτήν την ενότητα αυτή θα παραθέσουμε σε γραφήματα τους αδιάστατους συντελεστές MKN για τέσσερις περιπτώσεις φόρτισης, (και συγκεκριμένα στον άξονα των x για x=1 θα αντιστοιχεί στην περίπτωση SB\_00\_NR, για x=2 αντιστοιχεί στην περίπτωση SB\_00\_R, για x=3 περίπτωση SB\_20\_NR και για x=4 αντιστοιχεί στην περίπτωση SB\_20\_R). Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν για 1000 πρώτες μέγιστες τιμές, δηλαδή για MAX K=1000.



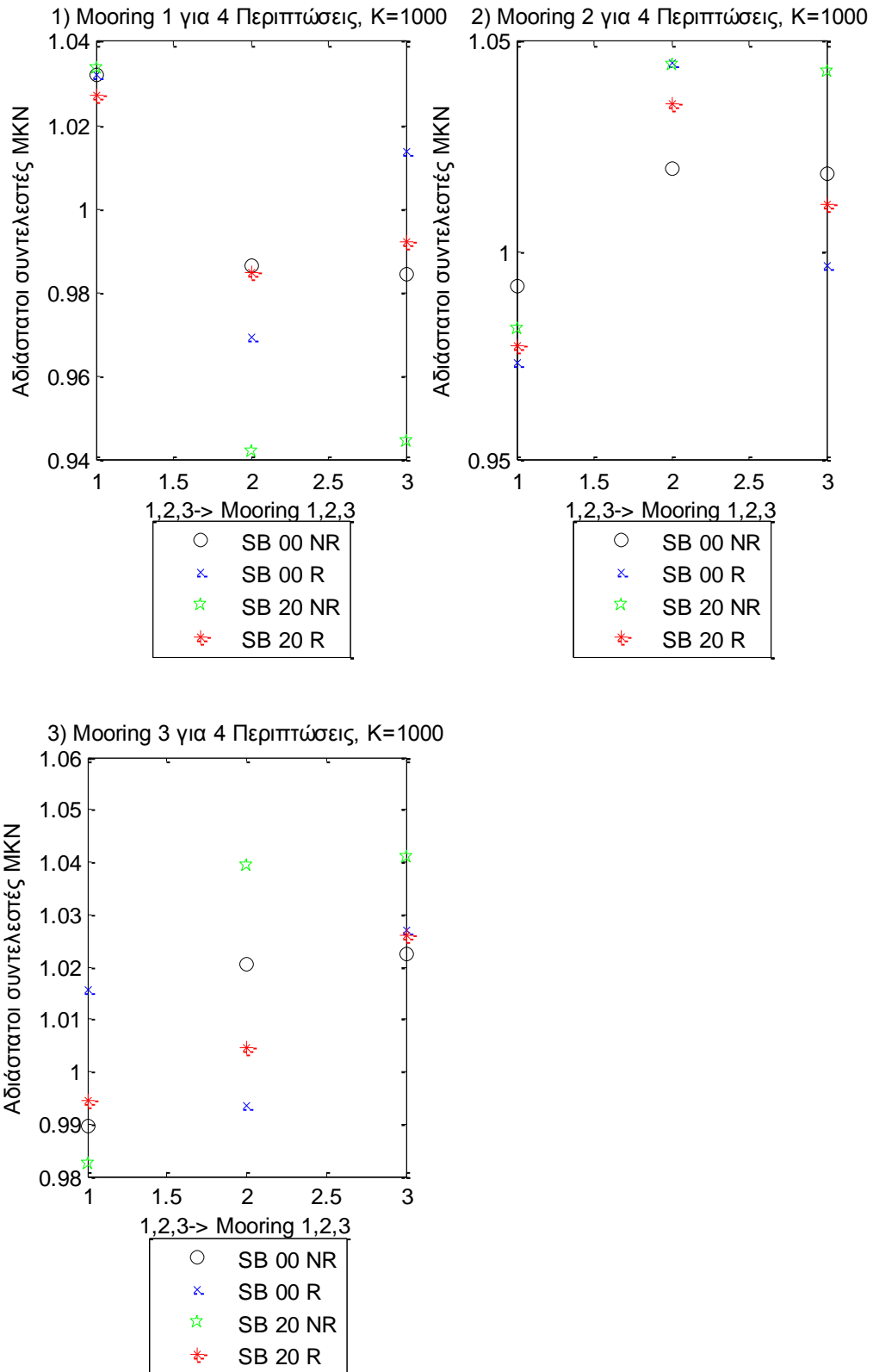




**Σχήματα 5.16.1 (1-6)** Συντελεστές ΜΚΝ για τέσσερις περιπτώσεις (για MAX  $K=1000$ ) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

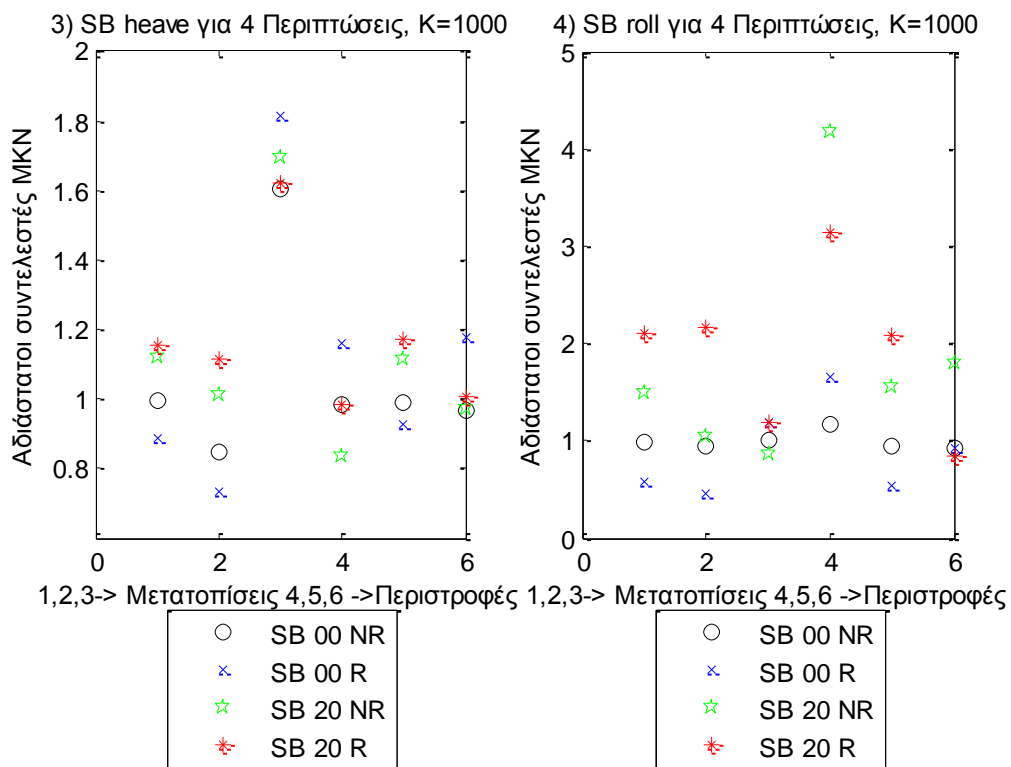
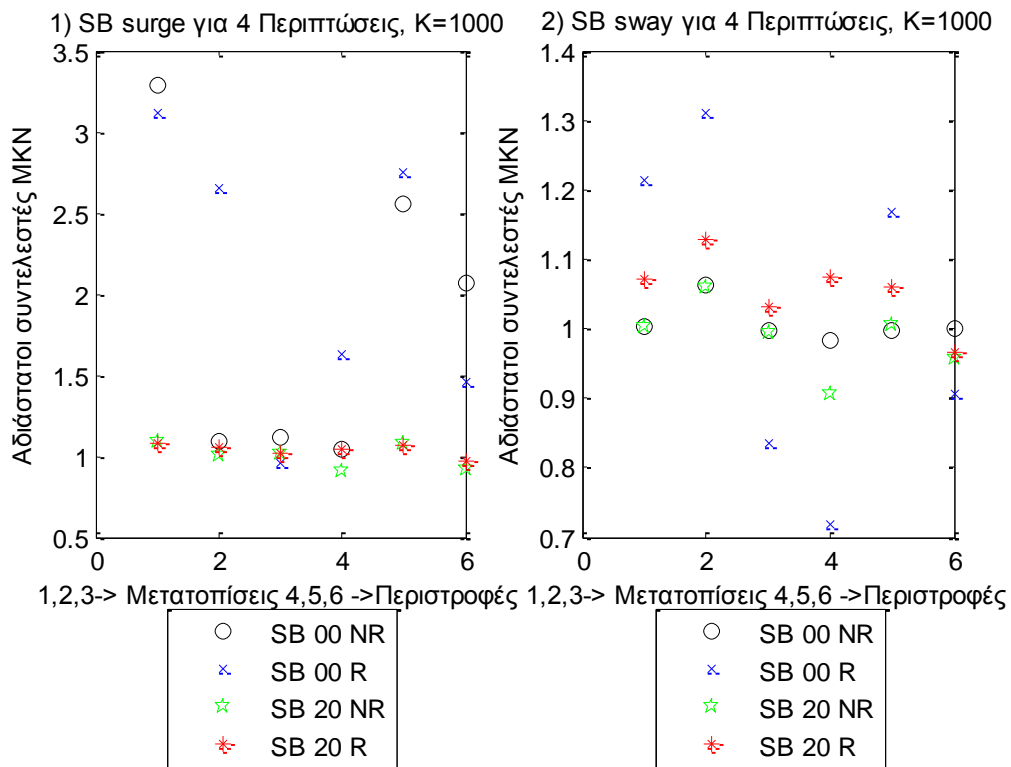
Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές ΜΚΝ για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/Γ, για MAX  $K=1000$  και για 4 περιπτώσεις φόρτισης.

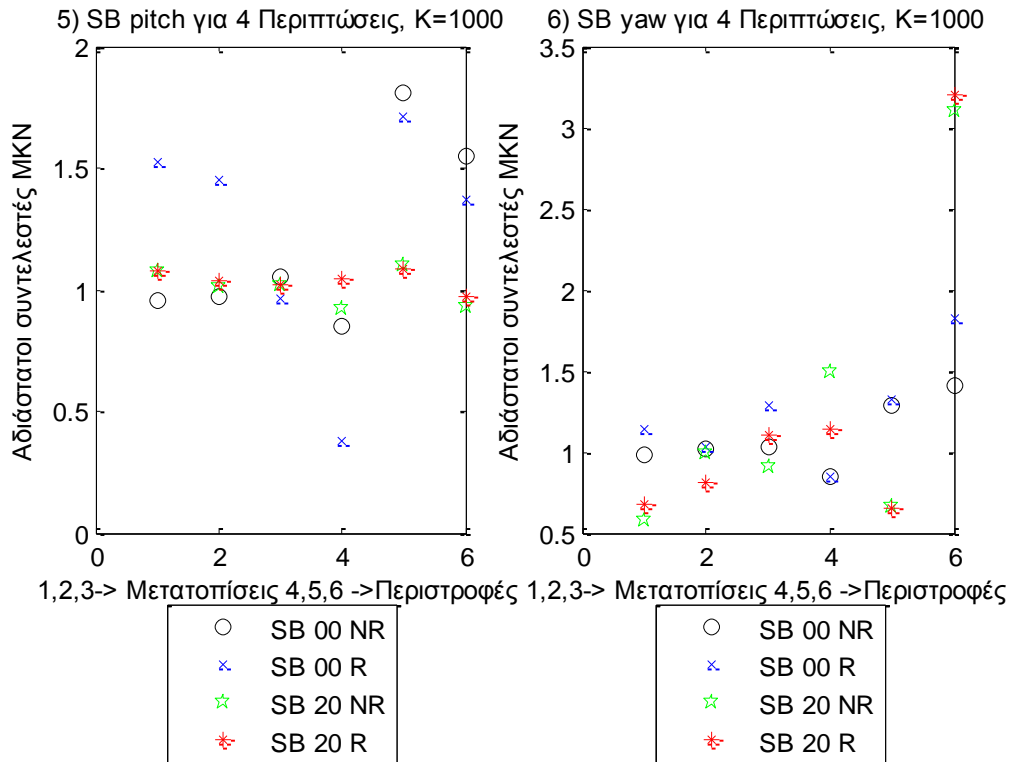
Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ της δύναμης στη surge διεύθυνση ( $\delta comp Fx$ ) και των ροπών στις roll και pitch διεύθυνσης ( $\delta comp Mx$   $\delta comp My$ ), καθώς επίσης και της δύναμης στη sway διεύθυνση ( $\delta comp Fy$ ) με τη δύναμη στη διεύθυνση heave ( $\delta comp Fz$ ) και της ροπής στη yaw περιστροφή ( $\delta comp My$ ).



Σχήματα 5.16.2 (1-3) Συντελεστές ΜΚΝ για τέσσερις περιπτώσεις (για MAX K=1000) για τις τρεις δυνάμεις στις γραμμές αγκύρωσης

Από τα γραφήματα 5.16.2 (1-3) παρατηρούμε ότι, δεν φαίνεται να υπάρχει συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των τριών γραμμών αγκύρωσης 1, 2 και 3 για τις 4 περιπτώσεις (και για MAX K=1000).





**Σχήματα 5.16.3 (1-6)** Συντελεστές ΜΚΝ για τέσσερις περιπτώσεις (για MAX K=1000) για τις τρεις δυνάμεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών ροπών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζουμε τους συντελεστές ΜΚΝ για τις τρεις μετατοπίσεις στις τρεις διευθύνσεις (1) surge, (2) sway και (3) heave και των τριών περιστροφών στους αντίστοιχους τρεις άξονες (4) roll, (5) pitch και (6) yaw στη βάση της Α/ Γ, για MAX K=1000 και για 4 περιπτώσεις φόρτισης.

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται να υπάρχει μια μικρή συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των μετατοπίσεων στις διευθύνσεις surge και sway με τη pitch περιστροφή.



## Συμπεράσματα

Αναλύοντας τους τυχαίους κυματισμούς παρατηρούμε ότι τα δεδομένα δεν κατανομούνται με κανονικότητα, σε έλεγχο που πραγματοποιήθηκε με 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Επιπλέον, για 5% επίπεδο σημαντικότητας δεν απορρίψαμε τη στασιμότητα των χρονοσειρών, γεγονός που μας επέτρεψε να συνεχίσουμε με την ανάλυση του φάσματος μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Όσον αφορά τη σύγκριση των πειραματικών φασμάτων με το φάσμα Bretschneider, παρατηρήσαμε ικανοποιητική συμφωνία στα έντεκα όργανα μέτρησης του ύψους κύματος και για τις δύο πλωτές ανεμογεννήτριες.

Στις τέσσερις γραμμές αγκύρωσης για την περίπτωση TLP παρατηρήθηκε το μεγαλύτερο εύρος φάσματος (σε σχέση με τα υπόλοιπα όργανα). Μικρό εύρος φάσματος παρουσιάστηκε στα φάσματα των οργάνων μέτρησης της επιτάχυνσης και των έξι κινήσεων για την TLP.

Το μέγιστο του φάσματος στη συχνότητα  $T_p$  που δίνεται από τη γεννήτρια κυματισμού, συμπίπτει με το αντίστοιχο μέγιστο για τις τρεις δυνάμεις στη βάση της ανεμογεννήτριας SB (6comp Fx, 6comp Fy και 6comp Fz), τις δύο δυνάμεις στην άτρακτο (4comp Fx και 4comp Fy), καθώς και τις δύο ροπές στη sway διεύθυνση (6comp My και 4comp My) για τη SB.

Η ανάλυση για το σημαντικό ύψος έδειξε ότι οι κατανομές αυξάνονται όταν μειώνεται το ποσοστό των υψηλότερων τιμών του σήματος. Συν τοις άλλοις, μεταξύ των κατανομών από τις τέσσερις περιπτώσεις, οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις δυνάμεις και τις ροπές και οι μικρότερες στα έντεκα όργανα μέτρησης του ύψους κύματος. Πιο συγκεκριμένα

### Για τη TLP

Το σημαντικό ύψος της δύναμης στη surge διεύθυνση, στη βάση της ανεμογεννήτριας (6comp Fx), λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές στην περίπτωση (00 NR). Συγκεκριμένα, ξεκινά από 30 N, για το 50% των υψηλότερων τιμών του σήματος, και καταλήγει σε δύναμη 48 N, για το 3,33% των υψηλότερων τιμών του σήματος. Οι αντίστοιχες χαμηλότερες τιμές του σημαντικού ύψους για τη δύναμη στη surge διεύθυνση λαμβάνονται για την περίπτωση (20 R), που ξεκινά από 13 N, για το 50% των υψηλότερων τιμών του σήματος, και φτάνει σε δύναμη 24 N, για ποσοστό 3.33%.

Αναφορικά με τις δυνάμεις στη sway διεύθυνση, στη βάση και την άτρακτο της ανεμογεννήτριας (6comp Fy), στις περιπτώσεις γωνίας πρόσπτωσης είκοσι μοίρες, τα σημαντικά ύψη είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της μηδενικής γωνίας. Τα ίδια αποτελέσματα παρατηρούμε και για τη ροπή στη surge διεύθυνση (6comp Mx), ενώ όσον αφορά την αντίστοιχη ροπή στη sway (6comp My), οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στη μη περιστροφή και οι χαμηλότερες στην περίπτωση της περιστροφής. Για τις γραμμές αγκύρωσης 1 και 3, οι υψηλότερες τιμές του

σημαντικού ύψους υφίστανται για τη μη περιστροφή και οι χαμηλότερες για την περιστροφή.

Όσον αφορά τη sway μετατόπιση (TLP sway), το σημαντικό ύψος για την περίπτωση της γωνίας πρόσπτωσης 20 μοιρών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σημαντικό ύψος για γωνία μηδέν μοιρών, για τα ίδια ποσοστά των υψηλότερων τιμών του σήματος, ενώ για τη heave ισχύουν τα αντίθετα αποτελέσματα. Στη pitch περιστροφή, τα σημαντικά ύψη για την περίπτωση της μη περιστροφής είναι πάνω από τις αντίστοιχες τιμές της περίπτωσης που αφορά την περιστροφή της έλικας.

Τέλος φαίνεται να υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ της δύναμης στη surge διεύθυνση ( $\delta\text{compF}_x$ ) και των ροπών στις pitch και yaw ροπή ( $\delta\text{compM}_y$   $\delta\text{compM}_z$ ), καθώς επίσης και της δύναμης στη sway διεύθυνση ( $\delta\text{compF}_y$ ) με τη roll ροπή ( $\delta\text{compM}_x$ ) και της δύναμης στη heave ανύψωση με τη yaw ροπή, ενώ για τις γραμμές αγκύρωσης υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των γραμμών αγκύρωσης 2 και 3 (Mooring 2 και Mooring3) και μεταξύ των γραμμών 1 και 4 (Mooring 1 και Mooring4) και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).

## Για τη SB

Το σημαντικό ύψος της δύναμης στη surge διεύθυνση, στη βάση της ανεμογεννήτριας ( $\delta\text{comp F}_x$ ), για την περίπτωση (20 NR) ξεκινά από 16 N για το 50% των υψηλότερων τιμών του σήματος και καταλήγει σε δύναμη 28 N για το 3,33% των υψηλότερων τιμών του σήματος (λαμβάνοντας έτσι τις υψηλότερες τιμές). Οι αντίστοιχες χαμηλότερες τιμές του σημαντικού ύψους για τη δύναμη στη surge διεύθυνση λαμβάνονται για την περίπτωση (00 R), που ξεκινά από 11 N για το 50% των υψηλότερων τιμών του σήματος και φτάνει σε δύναμη 18 N για ποσοστό 3.33%.

Τα σημαντικά ύψη για τη δύναμη στη sway διεύθυνση ( $\delta\text{comp F}_y$ ) και τη ροπή στη surge διεύθυνση ( $\delta\text{comp M}_x$ ), για την περίπτωση της περιστροφής είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα σημαντικά ύψη όπου η έλικα δεν περιστρέφεται. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρούμε και για το σημαντικό ύψος της γραμμής αγκύρωσης 2 και το επιταχυνσιόμετρο 2.

Αναφορικά με την περίπτωση της heave ανύψωσης και της pitch περιστροφής, τα σημαντικά ύψη για τη γωνία πρόσπτωσης μηδέν μοιρών είναι μεγαλύτερα από τις αντίστοιχες τιμές για τα σημαντικά ύψη για γωνία πρόσπτωσης 20 μοιρών, ενώ για τη yaw περιστροφή, οι τιμές για τα σημαντικά ύψη, όσον αφορά την περίπτωση περιστροφής της έλικας, βρίσκονται πάνω από τα αντίστοιχα της περίπτωσης της μη περιστροφής.

Τέλος, επισημάνθηκαν περιπτώσεις όπου σε κάποια πειράματα, ορισμένα όργανα μέτρησης έδωσαν λανθασμένα αποτελέσματα (σταμάτησαν να λειτουργούν), και κυρίως το όργανο μέτρησης της δύναμης στη heave διεύθυνση, στη βάση των δύο μοντέλων (δηλαδή το όργανο  $\delta\text{comp F}_z$ ). Επιπλέον, σε κάποια άλλα πειράματα



(κυρίως στους τυχαίους κυματισμούς) υπήρξε εμφανής αλλαγή των χαρακτηριστικών του κύματος στο ίδιο πείραμα. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται με σαφήνεια στα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα. Σχήμα 6.9.2 (3), Σχήμα 6.9.3 (1), Σχήμα 6.10.5 (3) και Σχήμα 6.10.6 (1).

Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές, υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των δυνάμεων στη sway διεύθυνση ( $\delta_{compFy}$ ) και στη heave διεύθυνση ( $\delta_{compFz}$ ) και των ροπών στις pitch και yaw περιστροφής, καθώς επίσης υπάρχει μια συσχέτιση των μέγιστων τιμών μεταξύ των γραμμών αγκύρωσης 2 και 3 (Mooring 2 και Mooring3) και για τις πέντε τιμές των συντελεστών (MAX K=10, 100, 500, 1000 και 5000).



## Προτάσεις

Όσον αφορά τα υπάρχοντα δεδομένα από τα πειράματα οι προτάσεις είναι οι εξής:

Στο τέλος του τρίτου κεφαλαίου υπάρχει σε πίνακα εκτεταμένη αναφορά σε πειράματα που έχουν γίνει σε πλωτές ανεμογεννήτριες. Θεωρούμε πως θα ήταν επωφελής μία αναλυτική παρουσίαση όλων των πειραμάτων και των στοιχείων που εξήχθησαν από αυτά.

Για τους τυχαίους κυματισμούς (έγινε ανάλυση και σύγκριση με το φάσμα Bretschneider), θα μπορούσε να γίνει μια περεταίρω σύγκριση του φάσματος από τα δεδομένα με το αντίστοιχο φάσμα Jonswar (για διάφορες τιμές των παραμέτρων του φάσματος Jonswar), και στη συνέχεια σύγκρισής του με το αντίστοιχο φάσμα Bretschneider.

Στην παρούσα εργασία τα μητρώα με τους αδιάστατους συντελεστές MKN έγιναν για δυνάμεις και ροπές ή για μετατοπίσεις και περιστροφές, θα μπορούσε στο ίδιο μητρώο να υπάρχουν οι συγκρίσεις δυνάμεων με μετατοπίσεις και περιστροφές ή μετατοπίσεις με δυνάμεις και ροπές ή όποιον άλλο συνδυασμό. Ενώ εκτός των πέντε τιμών  $\max K$  που χρησιμοποιήσαμε (και συγκεκριμένα με τιμές 10, 100, 500, 1000, και 5000) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν και άλλες τιμές.

Επιπλέον έχοντας όργανα μέτρησης του κύματος μπροστά αλλά και πίσω από τις συσκευές θα μπορούσε να γίνει μια ανάλυση πάνω στην ενέργεια που έχουν τα κύματα πριν φτάσουν στις Ανεμογεννήτριες και στην ενέργεια που έχουν μετά (για την περίπτωση της μη περιστροφής της έλικας). Να δειχθεί έτσι το ποσό ενέργειας που απορροφάται από τις Ανεμογεννήτριες και το ποσό ενέργειας που προσδίδουν οι κατασκευές στα κύματα. (λόγο της παρουσίας και της κίνησής τους).

Μια περεταίρω ανάλυση που θα απαιτούσε την διεξαγωγή νέων δοκιμών σε δεξαμενές είναι:

Η διεξαγωγή νέων πειραμάτων για διάφορες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης 45 και 90 μοιρών.

Η τοποθέτηση στο ίδιο πείραμα δύο Ανεμογεννητριών για να αναλυθεί αν υπάρχει κάποια επιπλέον επίδραση από την δεύτερη Ανεμογεννήτρια, αλλά και να βρεθεί μια βέλτιστη απόσταση και διεύθυνση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των δυο πλωτών συστημάτων.

Τέλος θα μπορούσαν να μελετηθούν σε νέα πειράματα κάποιες καταστάσεις ατυχήματος. Μια παράμετρος προς μελέτη θα μπορούσε να είναι η συμπεριφορά των πλωτών συστημάτων αν για κάποιο λόγο σπάσει μια γραμμή αγκύρωσης.



## Βιβλιογραφία

- Αθανασούλης, Γ., (2007). «Θεωρία πιθανοτήτων και Στατιστική. Εφαρμογές στο θαλάσσιο περιβάλλον», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2007.
- Αντζουλάκος, Δ., (2009). «Στατιστικός έλεγχος ποιότητας», Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Πειραιάς, 2009.
- Κουτίτας Χρ., (1998). «Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα », Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη , 1998.
- Μαυράκος, Σ., (1999). «Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1999.
- Κοζύρης, Γ., (2014). «Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς πλωτής Α/Γ τύπου TLP», Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2014.
- Κτωρής, Α., (2015). «Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς πλωτής Α/Γ τύπου SB», Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2015.
- Δ., Φουσκάκης., 2010. «Περιγραφική Στατιστική», Σημειώσεις, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- Bergdahl, L., (2009). «Waves for design of wind-power plants in shallow seas», Lennart, University of Technology, Luleå, SWEDEN.
- BOX, G.E.P. and Jenkins, G.M., (1976). «Series Analysis, Forecasting and Control», Revised Edition Holden Day, San Francisco.
- Breton,S., (2008). «Study of the stall delay phenomenon and of wind turbine blade dynamics using numerical approaches and NREL's wind tunnel tests», Doctoral thesis for the degree of philosophiae doctor, Trondheim.
- Bretschneider, C.L., (1959). «Wave variability and wave spectra for wind generated gravity waves», Tech. Memo, Washington.
- Carter, d.j.t., (1982). «Estimation of wave spectra from wave height and period», institute of oceanographic sciences I.O.S., Report No. 135 198.
- Castro-Santos et all, (2013). «Methodology to calculate mooring and anchoring costs of floating offshore wind devices», International Conference on Renewable Energies and Quality, Bilbao, Spain
- Corder, G. W., Foreman, D. I, (2009). «Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach», Wiley.
- Crozier, A., (2011). «Design og modellering av support structurentil en 10 MW offshore vindturbin», Varen.

Frandsen Sten T., (2007). «Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine cluster», Riso.

Folley, M., Whittaker, T., Osterried, M., (2004). «The Oscillating Wave Surge Converter, Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference», Toulon.

Hamilton, J.D., (1994). «Time Series Analysis», Princeton University Press, Massachusetts.

Henderson, A.R., and Patel, M. H., (2003). «On the Modeling of a Floating Offshore Wind Turbine», Wind Energy Journal 2003; 6:53-86 (DOI: 10.1002/we.83), Copyright.

Henderson, A.R., M.B. Zaaijer, B. Bulder, J. Pierik, R. Huijsmans, M. van Hees, E. Snijders, G. H. Wijnants, M. J. Wolf, (2004). «Floating Windfarms for Shallow Offshore Sites», International society of offshore and polar Engineers.

Huijs Fons, de Ridder Erik-Jan, Savenije Feike, (2014). «Comparison of model tests and coupled simulations for a semi-submersible floating wind turbine», Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE, San Francisco, California, USA.

Jacquemin et all, (2010). «Effective turbulence calculations using /EC b1400-1», Edition 3: Reaching consensus through dialogue on action, Bristol, UK.

Jonkman, J.M., (2007). «Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine», Ph.D. Thesis, Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado.

Jonkman, J.M., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., (2009). «Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development», NREL/TP-500-38060, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Jonkman, J.M., (2009). «D Definition of the Floating System for Phase IV of OC3», NREL/TP-500-47535. NREL: Golden, CO.

Jonkman, J.M, and Matha, D., (2010) «Dynamics of offshore floating wind turbines – analysis of three concepts», Wind Energy, Accepted and Printing Pending, DOI: 10.1002/we.442; NREL/JA- 500-48495. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Jonkman, J.M. and A.N. Robertson, (2011). «Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine», Concepts Presented at the International Society of Offshore and Polar Engineers 2011, Conference Maui, Hawaii June.

Kim, J. and Hong, Y., (2014). «The Shape Design and Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Structures with Damper Structure and Shallow Draft», *Journal of Ocean and Wind Energy*.

Kuozuka, Y., (2014). «Demonstration Experiments of Floating Offshore Wind Power Generation in Hakata Bay'», 5th International Conference on Energy City University of Hong Kong, Hong Kong.

Kimball, R.W., A.J., (2012) «Goupee, experimental comparison of three floating wind turbine concepts», proceedings of the 31st international conference on ocean, offshore and arctic engineering, Rio de Janeiro, Brazil.

Kumar, G.V., (2009). «Panneer Selvam, Experimental Investigations of Barge Floater with Moonpool for 5 MW Wind Turbine», *journal of information, knowledge and research in mechanical engineering*.

Manjock, A., Azcona, J., Bredmose, H., Campagnolo, F., Ricardo P., Sandner, F., (2014). «Methods for performing scale tests for method and model validation of floating wind turbines», INNWIND. EU.

Martin, H.R., (2012). «Methodology for wind/wave basin testing of floating offshore wind turbines», 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Rio de Janeiro.

Masciola, M., A. Robertson, J. Jonkman, (2013). «Assessment of the Importance of Mooring Dynamics on the Global Response of the DeepCwind Floating Semisubmersible Offshore Wind Turbine», U.S. Department of Energy's Wind and Water Power Program.

Mavrakos, S., Katsaounis, G., Mazarakos, T., Manolas, D., Tomasicchio, G., Alessandro., F., Armenio, E., Wolbring, J., Fonseca, N., Penchev, V., (2012). «Dynamic response of floating offshore wind turbines under random waves and wind action HyIV – DHI - 01Offshore wave basin», DHI, Denmark.

Mazarakos, T. P., Mavrakos, S. A., Konispoliatis, D. N., Voutsinas, S., Manolas, D., (2014), «Frequency domain analysis for a coupled hydro- aero- elastic behavior of a moored multi- purpose floating structure», COCONET Workshop for Offshore Wind Farms in the Mediterranean and Black Seas, *Hellenic Center of Marine Research*, Anavissos, Greece.

Thomas P. Mazarakos, Dimitrios Manolas, Thomas Grapsa, Spyros Mavrakos, Vasilis Riziotis, Spyros Voutsinas, (2014), «Conceptual Design and advanced hydro-aero-elastic modelling of a TLP concept for Floating Wind Turbine applications», *1<sup>st</sup> International Conference on Renewable Energies Offshore*, (RENEW 2014), 24 – 26 November 2014, Lisbon, Portugal.

Mazarakos, T. P., Konispoliatis, D. N., Manolas, D., Voutsinas, S.G. and Mavrakos, S. A., (2015), «Coupled hydro – aero – elastic analysis of a multi – purpose floating structure for offshore wind and wave energy sources exploitation », 12<sup>th</sup> International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (12<sup>th</sup> STAB), 14-19 JUNE, Glasgow, Scotland, UK.

Musial, W. and Butterfield, S., (2004) «Future for Offshore Wind Energy in the United States», Energy Ocean Proceedings, Florida, USA.

Musial, W. Butterfield, S. and Boone A., (2003) «Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines», National Renewable Energy Laboratory , USA.

Peiffer, A., Roddier, D., (2012) «Design of an Oscillating Wave Surge Converter on the Wind Float Structure», 4th International Conference on Ocean Energy, Dublin.

Pierson, WJ., Moskowitz, L., (1964) «A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A.», Kitaigorodskii, J Geophysics.

Ridder, E. de, Otto, W., Zondervan, G.J., Savenije, F., Huijs, F.A., (2013). «State of the art model testing techniques for floating wind turbines», European Wind Energy Association EWEA Offshore, Frankfurt.

Ridder, E. de, Otto, W., Zondervan, G.J., Vaz, G., Huijs, F.A., (2014). «Development of a scaled down stock wind turbine for model testing floating wind turbines», 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), San Francisco.

Robertson, A.N., (2013). «Summary of conclusions and recommendations drawn from the DeepCwind scaled floating offshore wind system test campaign», 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Nantes.

Thresher, R., (2014). «Ocean wave energy technology, boem offshore renewable energy workshops nrel research fellow», Sacramento, California.

Walker, J.S., (1996). «Fast Fourier Transforms», CRC Press.

Watson, G., et all, (2005). «A Framework for Offshore Wind Energy Development in the United States», Massachusetts Technology Collaborative (MTC).