



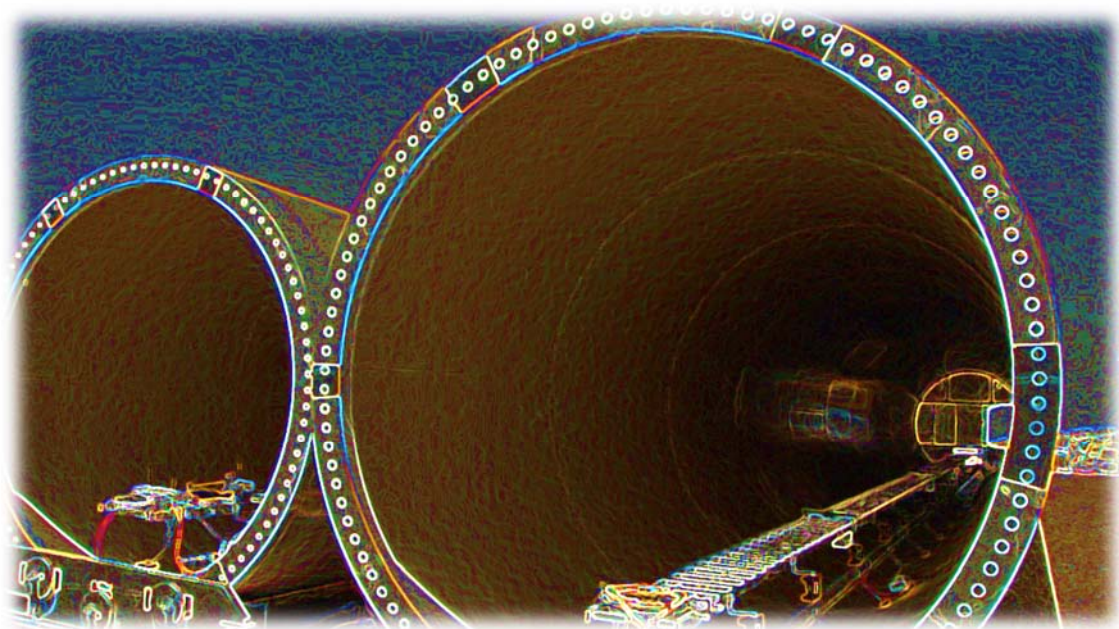
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Ηλία Δ. Θανάσουλα**

## **ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΣΕΩΝ ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Επιβλέπων Καθηγητής

**Χ. Γαντές**

Αθήνα, Ιούλιος 2014

ΕΜΚ ΜΕ 2014/02



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Ηλία Δ. Θανάσουλα**

**ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

---

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Επιβλέπων Καθηγητής

**Χ. Γαντές**

Αθήνα, Ιούλιος 2014

EMK ME 2014/02

Θανάσουλας Η. Δ. (2014)  
Κόπωση συνδέσεων σε πύλones ανεμογεννητριών  
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2014/02  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Thanasoulas I. D. (2014)  
Fatigue analysis of wind turbine towers connections  
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2014/02  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

*Στην οικογένεια μου,*

*Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χ. Γαντέ για την επιστημονική καθοδήγηση και τη συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.*

*Επιπλέον οφείλω να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου, για την πολύτιμη συνεισφορά της.*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2014/02

## **Κόπωση συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών**

**Ηλίας Δ. Θανάσουλας**  
Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2014

### **Περίληψη**

Τα τελευταία χρόνια μεγάλο ενδιαφέρον αναπτύσσεται για την αιολική ενέργεια και τη διερεύνηση ποικίλων θεμάτων που αφορούν το σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι ανεμογεννήτριες μεγαλώνουν συνεχώς, αυξάνοντας το ύψος των πυλώνων και το μήκος των πτερυγίων, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων που τις καταπονούν.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αρχικά διερευνήθηκαν τα φορτία ανέμου καθώς και η επιρροή τους στην απόκριση της ανεμογεννήτριας, πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις και μεταβάλλοντας καίρια στοιχεία του προσομοιώματος, μέσω κατάλληλων λογισμικών της National Renewable Energy Laboratory (NREL). Για μια τυπική ανεμογεννήτρια ισχύος 1.5 mW, οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι η μέση ταχύτητα 10 λεπτών του ανέμου και η ένταση τύρβης του, η γωνία πρόπτωσης του ανέμου καθώς και παράμετροι που αφορούν μηχανολογικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, επηρεάζουν όμως καθοριστικά τα εντατικά μεγέθη στον πυλώνα. Τέτοιες παράμετροι είναι το σύστημα κλίσης πτερυγίων και το σύστημα περιστροφής της ατράκτου.

Εν συνεχεία προσομοιώθηκαν αριθμητικά με πεπερασμένα στοιχεία τυπικές συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα και εκτελέστηκαν μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας υπό τα πραγματικά δυναμικά φορτία ανέμου που υπολογίστηκαν αρχικά. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται μέσω διπλών δακτυλιοειδών ελασμάτων, τα οποία είναι εργοστασιακά συγκολλημένα σε κάθε τμήμαχος του πυλώνα στις θέσεις αποκατάστασης της συνέχειας, και κοχλιώνονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Η μεταβίβαση της έντασης μεταξύ των δύο τμημάτων του πυλώνα γίνεται μέσω δυνάμεων επαφής στη σύνδεση, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα μη γραμμικό. Για την ανάλυση του προβλήματος, οι κοχλίες και τα ελάσματα της υπό μελέτη σύνδεσης προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία διαφόρων τύπων, τρισδιάστατων και δισδιάστατων. Οι επαφές ανάμεσα στα ελάσματα, της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλία και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα λήφθηκαν υπόψη με κατάλληλα στοιχεία επαφής.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε κόπωση για τα μέλη της σύνδεσης, συνολικά στο χρόνο ζωής της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με το EN 1993-1-9. Οι δράσεις κόπωσης υπολογίστηκαν από τεχνητές ιστορίες ανέμου που παρήχθησαν, και εν κατακλείδι προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το σωστό σχεδιασμό αυτού του τύπου συνδέσεων.





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

POSTGRADUATE THESIS  
EMK ME 2014/02

# **Fatigue analysis of wind turbine towers connections**

**Ilias D. Thanasoulas**

Supervised by Prof. Charis J. Gantes

July 2014

## **Abstract**

Nowadays, in-line with the objective of growing energy production from renewable sources, wind turbine dimensions increase in order to take better advantage of the available wind potential. Namely, taller towers introduce higher wind velocities, while longer blades provide larger incident area. As a result, the wind load acting on wind turbine towers increases significantly.

In the present postgraduate thesis, the wind loads due to artificial wind pressure time histories, obtained via an appropriate aerodynamic approach, and the dynamic response of wind turbines are initially investigated through parametric analysis. For this purpose three public domain computational engineering tools from National Renewable Energy Laboratory (NREL) are used. For a wind turbine of rated power 1.5 mW, mean 10-minute wind speed, turbulence intensity and angle of the average wind speed were chosen to be investigated. As far as the control systems of modern wind turbines, blade pitch control and yaw orientation system were chosen to be investigated due to their importance for the design forces of the tower.

Additionally, several numerical models simulating typical connections between adjacent parts of tubular wind turbine towers are created with the finite element program ADINA, in order to perform nonlinear dynamic analysis. Such connections are realized by means of double ring flanges that are pre-welded on the adjacent shell parts and are bolted together with fully preloaded bolts. Contact elements are appropriately used to introduce the connection's nonlinear behavior due to the interaction between flanges and bolts and between nuts and flanges. The parts of the connections are simulated with various types of finite elements such as 3d-solid, shell and beam elements.

Finally, these models are used for fatigue checks according to Annex A of EN 1993-1-9, taking realistically into consideration the dynamic nature of applied wind loads as mentioned. Artificial wind pressure time histories are used for this purpose, and the cumulative damage at all parts of the connection is estimated, for the whole life time of the wind turbine. In conclusion, useful results are obtained for the proper design of such connections against fatigue failure.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>	<b>11</b>
1.1	Ο ΑΝΕΜΟΣ.....	11
1.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	13
<b>2</b>	<b>ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....</b>	<b>17</b>
2.1	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ IEC-61400-1.....	17
2.2	Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	21
2.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ .....	21
2.4	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ .....	23
2.5	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ .....	31
<b>3</b>	<b>ΠΥΛΩΝΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ .....</b>	<b>63</b>
3.1	Ο ΠΥΛΩΝΑΣ .....	63
3.2	Η ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ.....	65
3.3	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΧΛΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	65
3.3.1	Ποιοτική διερεύνηση .....	65
3.3.2	Αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.....	67
3.3.3	Προσεγγιστικός αναλυτικός υπολογισμός αξονικής δύναμης κοχλία .....	78
3.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ .....	78
3.4.1	Κάμψη σύνδεσης .....	81
3.4.2	Διάτμηση σύνδεσης.....	89
<b>4</b>	<b>ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ .....</b>	<b>91</b>
4.1	Η ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	91
4.2	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....	93
4.3	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΨΗ.....	94
4.4	ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΑ.....	95
4.4.1	Γεωμετρία σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας στον πυλώνα .....	96
4.4.2	Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης.....	99
4.4.3	Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων της λεπτομέρειας .....	101
4.4.4	Μέτρηση κύκλων .....	102
4.4.5	Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού.....	103
4.4.6	Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης .....	104
4.4.7	Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών .....	106
4.4.8	Γενικευμένος έλεγχος κόπωσης καθ' ύψος του πυλώνα .....	107
<b>5</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>113</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>117</b>



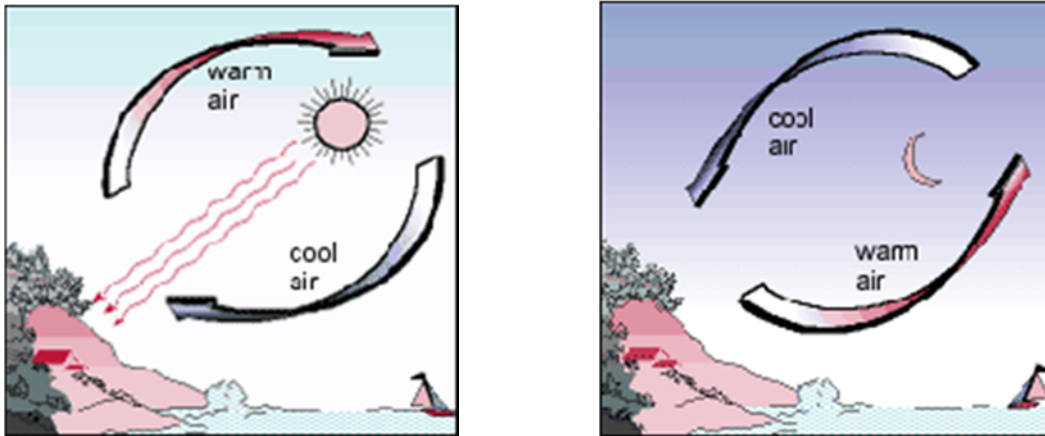
# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## 1.1 Ο ΑΝΕΜΟΣ

Είναι γνωστό από τη φυσική ότι όταν μια αέρια μάζα θερμανθεί, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Ο αέρας της ατμόσφαιρας θερμαίνεται κυρίως από την επαφή του με τη θερμή επιφάνεια της γης. Ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Ένα στρώμα αέρα, που θα έρθει σε επαφή με τη γήινη επιφάνεια θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Τη θέση του θα καλύψει ένα στρώμα ψυχρότερου αέρα, που με τη σειρά του θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Αυτή η κυκλική-ανοδική-καθοδική κίνηση θερμών και ψυχρών ρευστών μαζών, ονομάζεται Κατακόρυφη μεταφορά.

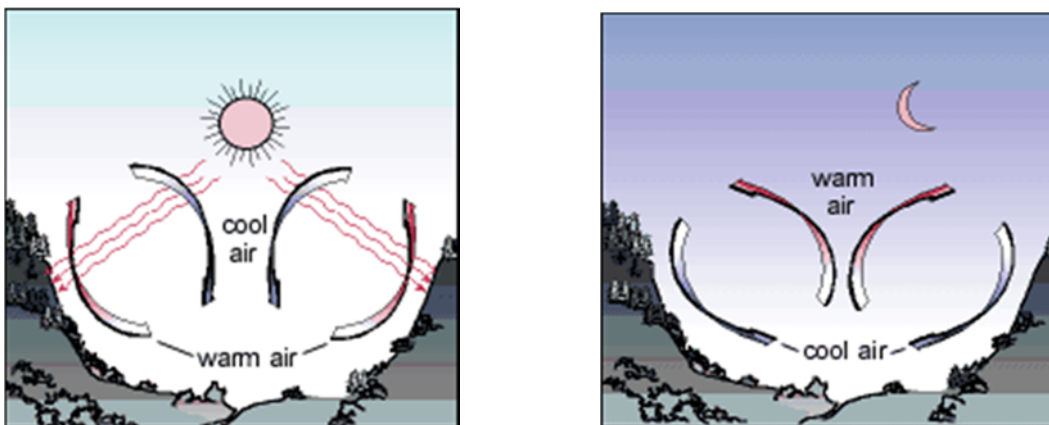
Ο ισημερινός θερμαίνεται πολύ περισσότερο από τους πόλους. Έτσι λοιπόν οι αέριες μάζες στον Ισημερινό θερμαίνονται, εκτονώνονται και ανέρχονται με αποτέλεσμα να αντικαθίστανται από τις ψυχρές αέριες μάζες των πόλων. Αν η Γη δεν περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα της, η κίνηση του αέρα θα ακολουθούσε τη διαδικασία της Κατακόρυφης μεταφοράς και οι αέριες μάζες θα μετακινούνταν από τους Πόλους προς τον Ισημερινό και πάλι πίσω στους Πόλους. Η ημερήσια περιστροφή της Γης προκαλεί την εκτροπή των ανέμων και περιπλέκει την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Επιπλέον, η διαφορετική θερμική συμπεριφορά της στεριάς από τη θάλασσα, αλλά και η ανομοιομορφία του εδάφους (βουνά, κοιλάδες, κλπ) προκαλούν τοπικά φαινόμενα και ανέμους.

Επομένως, οι άνεμοι είναι αέριες μάζες που κινούνται εξαιτίας των διαφορετικών βαρομετρικών πιέσεων που προκαλούνται κυρίως από την άνιση θέρμανση των διαφόρων περιοχών της γης από τον ήλιο. Η ξηρά έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από τη θάλασσα, κι αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ψύχεται και να θερμαίνεται πιο γρήγορα από τη θάλασσα. Έτσι, η ξηρά την ημέρα είναι θερμότερη από τη θάλασσα, με αποτέλεσμα ψυχρότερες αέριες μάζες να μετακινούνται από τη θάλασσα προς την ξηρά για να αντικαταστήσουν τις θερμές μάζες που ανέρχονται και δημιουργούν με τον τρόπο αυτό τη γνωστή θαλάσσια αύρα (Σχήμα 1-1). Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας που η θάλασσα είναι θερμότερη από την ξηρά. Ο αέρας που είναι σε επαφή με τη θάλασσα θερμαίνεται, ανέρχεται και αντικαθίσταται από ψυχρότερο που προέρχεται από τη στεριά.



Σχήμα 1-1: Θαλάσσια αύρα

Τα βουνά κατά τη διάρκεια της ημέρας θερμαίνονται γρηγορότερα από τις γειτονικές κοιλάδες. Έτσι ο αέρας που έρχεται σε επαφή με την πλαγιά θερμαίνεται, και θερμαινόμενος ανέρχεται για να αντικατασταθεί από τις ψυχρότερες μάζες της κοιλάδας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουμε τοπικά άνεμους που πνέουν από την κοιλάδα προς το βουνό. Το αντίθετο θα συμβεί κατά τη διάρκεια της νύχτας (Σχήμα 1-2).



Σχήμα 1-2: Αύρα βουνού-κοιλάδας

Επομένως, ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος περιβάλλει τη Γη βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, εξ' αιτίας μιας σειράς παραμέτρων, των οποίων οι πιο σημαντικές είναι:

- Η ηλιακή ακτινοβολία και ο τρόπος που φτάνει στη Γη
- Η ανομοιογένεια του ανάγλυφου της Γης (στεριά, θάλασσα, υψομετρικές διαφορές)
- Η περιστροφική κίνηση της γης

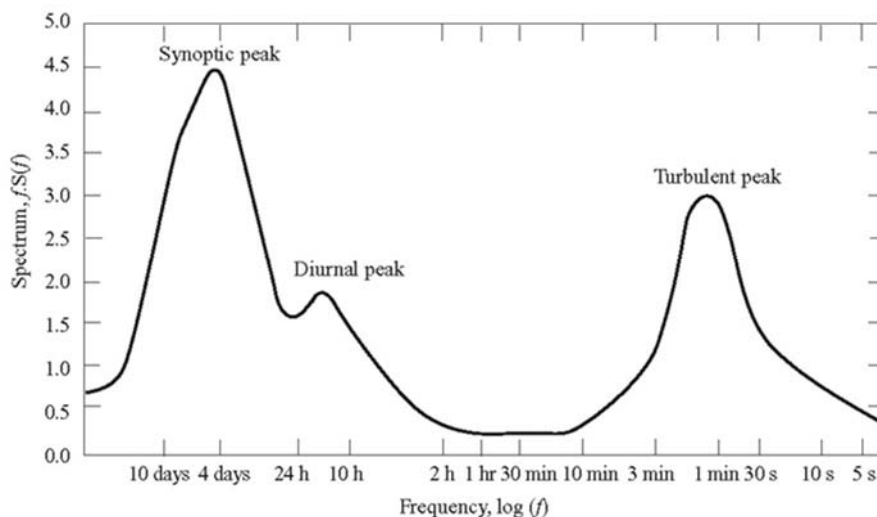
Όπως γίνεται αντιληπτό η τοπογραφία αποτελεί βασική παράμετρο για την πρόβλεψη των ανέμων που αναπτύσσονται τοπικά σε κάθε περιοχή. Έξιςου σημαντικός και καθοριστικός παράγοντας είναι και ο χρόνος για τα μεγέθη ανέμου που αναμένουμε να εμφανιστούν.

Έχει παρατηρηθεί ότι σε δεδομένη περιοχή ο άνεμος μπορεί να διαφέρει από χρόνο με χρόνο, και πιο αισθητά σε μεγαλύτερη κλίμακα όπως σε δεκάδες χρόνια (long-term variations). Η αιτία του φαινομένου

δεν έχει εξηγηθεί πλήρως, κάτι που καθιστά τη μακροχρόνια πρόβλεψη και το σχεδιασμό αιολικών πάρκων αβέβαιη σε βάθος χρόνου. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή ότι ο άνεμος ακολουθεί ξεκάθαρη τάση μεταβολών σε μεγάλη κλίμακα χρόνου μπορεί να οφείλεται στη διακύμανση της θερμοκρασίας του πλανήτη με τα χρόνια, ή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου λόγω της ανθρωπίνης δραστηριότητας. Σε κλίμακα μερικών ετών το φαινόμενο el nino ή εκρήξεις ηφαιστείων στον πλανήτη είναι μερικές από τις πιθανές αιτίες αυτών των μεταβολών.

Σε κλίμακα μικρότερη του ενός έτους, η διακύμανση του ανέμου από εποχή σε εποχή (Annual and Seasonal Variations), οφείλεται στην αλλαγή της θερμοκρασίας λόγω της αλλαγής κλίσης του άξονα περιστροφής της Γης. Σε κλίμακα μερικών ημερών (synoptic variations), παρατηρείται αύξηση των ανέμων ανά 4 περίπου ημέρες λόγω μεταφοράς μεγάλων αέριων μαζών από περιοχές υψηλών βαρομετρικών πιέσεων σε χαμηλότερων. Διακύμανση του ανέμου εντός της ημέρας (diurnal variations) οφείλεται στην πτώση της θερμοκρασίας τη νύχτα και στη μεταφορά αέριων μαζών από τη στεριά στη θάλασσα και από τα βουνά στις κοιλάδες όπως περιγράφηκε παραπάνω, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αυξομείωση στην ταχύτητα των ανέμων ανά 12 ώρες. Τέλος η διακύμανση του ανέμου σε χρόνο μικρότερο των 10 λεπτών ονομάζεται τύρβη (turbulence), δεν προσδιορίζεται ντετερμινιστικά και δημιουργείται λόγω της ακανόνιστης ροής του αέρα λόγω της τριβής του με την επιφάνεια της Γης. Η τύρβη του ανέμου είναι καθοριστικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και την αντοχή των ανεμογεννητριών σε κόπωση (πολύ μεγάλος αριθμός κύκλων έντασης) αλλά και για την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας (πολύ συχνές αυξομειώσεις τάσης).

Ο Van der Hoven (1957) παρουσίασε ένα φάσμα συχνοτήτων (Διάγραμμα 1-3) με τις μεταβολές της ταχύτητας ανέμου στο Brookhaven, New York δείχνοντας τις αιχμές στην ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχούν στα χρονικά διαστήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

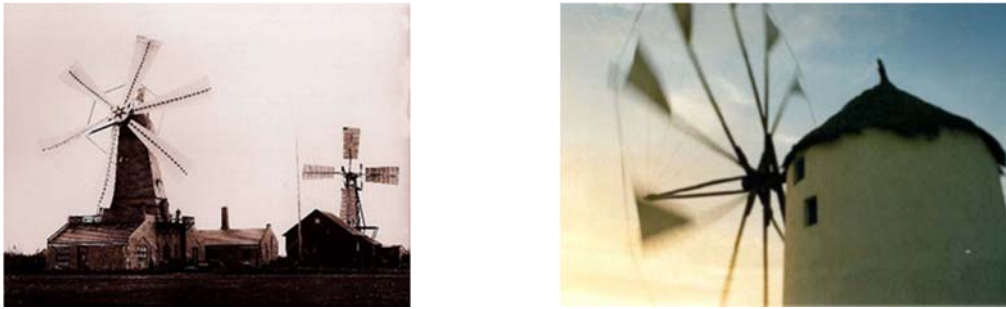


Διάγραμμα 1-3: Φάσμα συχνοτήτων Van der Hoven (1957)

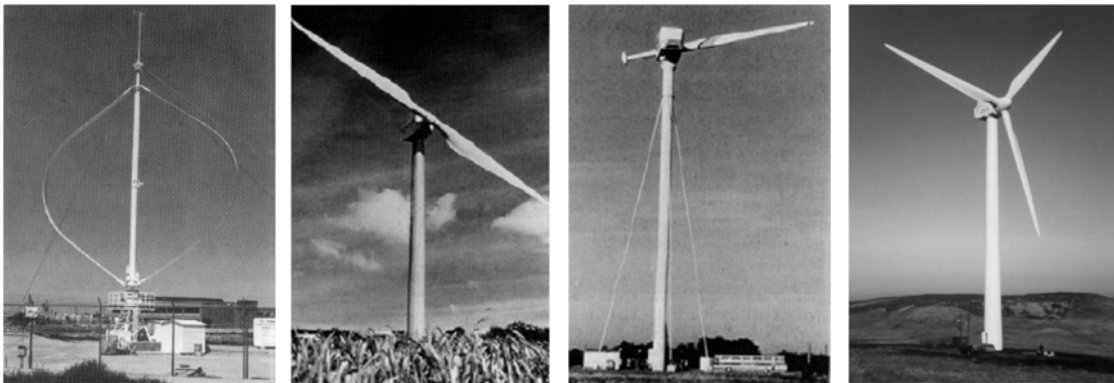
## 1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ποικιλία των μηχανών που επινοήθηκαν και προτάθηκαν για να δεσμεύσουν την αιολική ενέργεια είναι σημαντική και περιλαμβάνει πρωτότυπες επινοήσεις. Διάφορα είδη μηχανών οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα έχουν προταθεί κατά καιρούς (Σχήμα 1-4). Οι σύγχρονοι "ανεμόμυλοι" ονομάζονται ανεμογεννητρίες και διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Η

πλειοψηφία των σύγχρονων μηχανών μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική και τα μεγέθη τους ποικίλουν από μηχανές που παράγουν μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες Watt και φτάνουν τα μερικά megawatt. Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργίας των παραδοσιακών ανεμόμυλων, με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (Σχήμα 1-5) κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης των πτερυγίων τους στον άνεμο, είτε με (κακή) εκμετάλλευση της άνωσης που ασκείται πάνω τους. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες η κίνηση οφείλεται στην άνωση, η οποία αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να γίνει υπερδεκαπλάσια της αντίστασης.

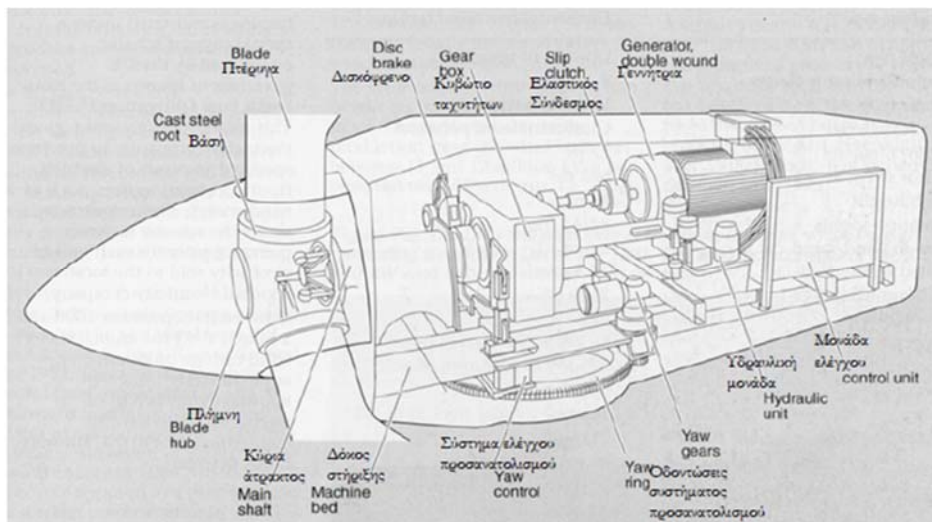


Σχήμα 1-5: Παραδοσιακοί ανεμόμυλοι



Σχήμα 1-6: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα

Στις μέρες μας ο πιο γνωστός τύπος ανεμοκινητήρα, που έχει εφαρμοσθεί ευρύτατα στην πράξη είναι του δρομέα οριζόντιου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται στη συντριπτική τους πλειοψηφία από τρία ή δύο πτερύγια που θυμίζουν έντονα έλικα αεροπλάνου ή ελικοπτερού. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν μοντέρνα αεροδυναμική σχεδίαση, που οφείλεται στην πρόοδο που έχει επιτευχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στο σχεδιασμό των αεροπορικών πτερυγίων και ελίκων. Τα κύρια μέρη των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα (Σχήμα 1-7) είναι ο δρομέας, το σύστημα αύξησης στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων), το σύστημα πέδησης, τα έδρανα του άξονα και οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και τα θεμέλια. Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Κάθε πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης.



Σχήμα 1-7: Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Ο πυλώνας αποτελεί ένα σημαντικό συστατικό στοιχείο σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Η σύγχρονη τάση είναι η κατασκευή υψηλών πυλώνων ώστε να γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας και, ως γνωστόν, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος. Τα δυο βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι πυλώνες είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Οι τύποι πυλώνων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα περιλαμβάνουν δικτυωτούς μεταλλικούς πυλώνες, σωληνωτούς πυλώνες από χάλυβα χωρίς ή με καλώδια και πυλώνες από σκυρόδεμα. Ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα που παρατηρούνται κατά την κατασκευή των τελευταίας γενιάς ανεμογεννητριών με τα πολλά megawatt, αποτελεί η μεταφορά και η ανέγερση τους (Σχήμα 1-8). Για πυλώνες με ύψος μεγαλύτερο των 100 m απαιτούνται διάμετροι στη βάση του πυλώνα μεγαλύτερες των 5 m. Αυτό κάνει αδύνατη τη μεταφορά των προκατασκευασμένων τμημάτων μέσω των οδικών αξόνων. Σε τέτοιες περιπτώσεις ενδέχεται κάποιοι τύποι πυλώνων (π.χ. χαλύβδινοι δικτυωτοί, ή πυλώνες από σκυρόδεμα) να υπερτερούν κάποιων άλλων. Πάντως, γίνεται εμφανής η ανάγκη εύρεσης βέλτιστων λύσεων για το θέμα των πολύ υψηλών πυλώνων.



Σχήμα 1-8: Ανέγερση σωληνωτού πυλώνα από χάλυβα





## 2 ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 2.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ IEC-61400-1

Το πρότυπο IEC 61400-1 [4] θέτει τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού που πρέπει να ικανοποιούν οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια έναντι αστοχιών κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, σεισμός, κλπ) επιδρούν πάνω στην ανεμογεννήτρια αφού όχι μόνο προκαλούν εντάσεις φορτίζοντας την αλλά επηρεάζουν και τη λειτουργία της (ταχύτητα περιστροφής δρομέα). Αυτές οι εξωτερικές συνθήκες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τις συνήθεις (normal) και τις ακραίες (extreme). Οι συνήθεις συνθήκες αφορούν καταστάσεις σχεδιασμού που επαναλαμβάνονται συχνά κατά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας ενώ οι ακραίες αφορούν καταστάσεις σχεδιασμού που εμφανίζονται σπάνια (περίοδος επαναφοράς 1 ή 50 έτη). Όπως είναι φυσικό οι περιβαλλοντικές συνθήκες ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία που είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Για να καλυφθεί η πλειάδα των περιπτώσεων, στο IEC 61400-1 οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε κατηγορίες όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1, ανάλογα με τη μέση ταχύτητα αναφοράς 10 λεπτών και την ένταση τύρβης του ανέμου της περιοχής. Σκοπός της κατηγοριοποίησης αυτής, δεν είναι να δώσει ακριβή περιγραφή των συνθηκών που επικρατούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή αλλά να προσομοιώσει όσο το δυνατόν περισσότερες διαφορετικές συνθήκες.

Wind turbine class	I	II	III
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5
A $I_{ref}$		0.16	
B $I_{ref}$		0.14	
C $I_{ref}$		0.12	

Πίνακας 2-1: Βασικές κατηγορίες σχεδιασμού ανεμογεννητριών

Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο ύψος της πλήμνης (hub height), όπου:

- $V_{ref}$  η μέση ταχύτητα αναφοράς ανέμου 10 λεπτών
- $I_{ref}$  η αναμενόμενη ένταση τύρβης για  $V_{ref}=15$  m/s

Ως ένταση τύρβης (turbulence intensity)  $I$  ορίζεται το αδιάστατο πηλίκο της τυπικής απόκλισης “ $\sigma$ ” προς τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου των 10 λεπτών “ $\mu$ ”:

$$I = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2-1)$$

Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας που ορίζουν το πεδίο του ανέμου στο χώρο είναι:

- Η διαμήκης - παράλληλη στη διεύθυνση της μέσης ταχύτητας
- Η εγκάρσια - κάθετη στη διαμήκη διεύθυνση και βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο
- Η κατακόρυφη - κάθετη τόσο στη διαμήκη διεύθυνση όσο και στο οριζόντιο επίπεδο

Για την τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου στις 3 διευθύνσεις ανεξάρτητα από το ύψος θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &\geq 0.7 \sigma_1 \\ \sigma_3 &\geq 0.5 \sigma_1 \end{aligned} \quad (2-2)$$

όπου:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  η τυπική απόκλιση στην διαμήκη, την εγκάρσια και την κατακόρυφη διεύθυνση του ανέμου αντίστοιχα.

Η διακύμανση του ανέμου από τη μέση τιμή των 10 λεπτών δεν αρκεί να εφαρμόζεται για το μέτρο της ταχύτητας μόνο στο ύψος της πλήμνης αλλά σε όλο το ύψος των πτερυγίων και στις 3 διευθύνσεις.

Για συνήθεις συνθήκες ανέμου, η μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου των 10 λεπτών στο ύψος της πλήμνης, θεωρείται σύμφωνα με το IEC-61400 ότι ακολουθεί την κατανομή Rayleigh (2-3):

$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp[-\pi \cdot (V_{hub} / 2V_{ave})^2] \quad (2-3)$$

όπου:

$P_R(V_{hub})$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μέσης ταχύτητας 10 λέπτου του ανέμου  
 $V_{ave} = 0.2 V_{ref}$  ανάλογα με την κατηγορία σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ’ ύψος περιγράφεται από τον εκθετικό νόμο (power law) (2-4). Η μέση τιμή της ταχύτητας στη διαμήκη διεύθυνση ως συνάρτηση του ύψους είναι:

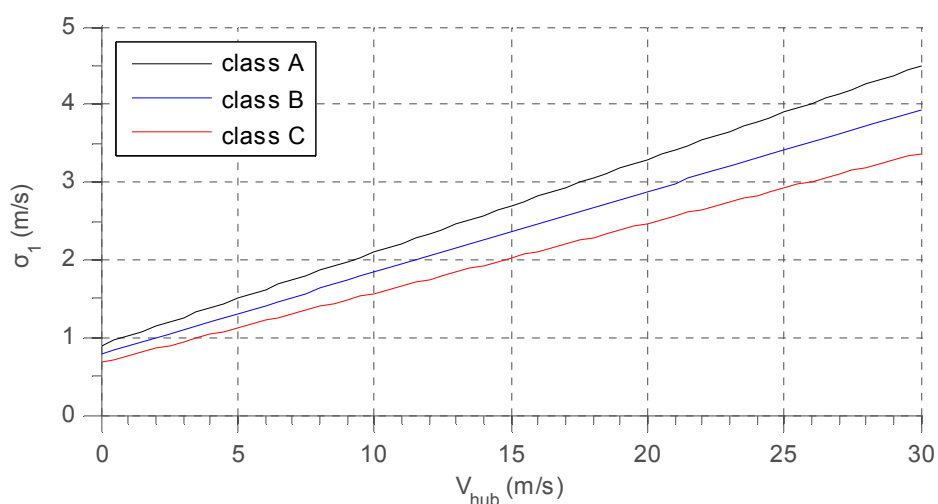
$$V_z = V_{hub} (z / z_{hub})^a \quad (2-4)$$

Ο συντελεστής  $a$  λαμβάνεται ίσος με 0.20

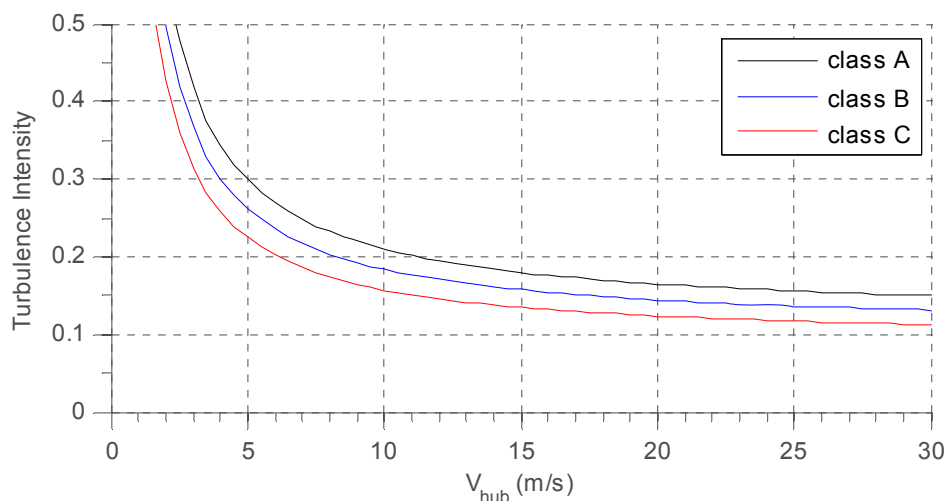
Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση εξαρτάται από το μέτρο της μέσης ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης και μπορεί να λαμβάνεται σταθερή καθ’ ύψος. Η  $\sigma_1$  υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2-5), η γραφική παράσταση της οποίας απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2-2.

$$\sigma_1 = I_{ref} (0.75V_{hub} + b) \quad (2-5)$$

όπου:  $b = 5.6 \text{ m/s}$



Διάγραμμα 2-2: Τυπική απόκλιση του ανέμου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας



Διάγραμμα 2-3: Ένταση τύρβης του ανέμου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας

Η τυρβώδης συνιστώσα του ανέμου έχει μηδενική μέση τιμή και το συχνοτικό της περιεχόμενο μπορεί να υπολογίζεται σύμφωνα με ένα από τα ακόλουθα προσομοιώματα:

- Mann (1994) uniform shear turbulence model
- Kaimal (1972) spectrum and exponential coherence model

Παρακάτω θα αναφερθούν οι παράμετροι που αφορούν το φάσμα τύπου Kaimal αφού αυτό χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των χρονιστοριών ταχύτητας ανέμου στην παρούσα εργασία.

Kaimal (1972) spectrum and exponential coherence model

Η φασματική πυκνότητα της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου (power spectral density) δίνεται από την εξίσωση (2-6):

$$\frac{f \cdot S_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{4 \cdot f \cdot L_k / V_{hub}}{(1 + 6 \cdot f \cdot L_k / V_{hub})^{5/3}} \quad (2-6)$$

όπου:  $f$  η συχνότητα της τύρβης σε Hertz,

$k$  ο δείκτης που αναφέρεται στην διεύθυνση της συνιστώσας του ανέμου (1,2 ή 3)

$S_k$  η φασματική πυκνότητα

$\sigma$  η τυπική απόκλιση της ταχύτητας στη συγκεκριμένη συνιστώσα

$L_k$  το ολοκλήρωμα κλίμακας τύρβης (Πίνακας 2-4)

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} S_k(f) df \quad (2-7)$$

	Velocity component index (k)		
	1	2	3
Standard deviation $\sigma_k$	$\sigma_1$	0,8 $\sigma_1$	0,5 $\sigma_1$
Integral scale, $L_k$	8,1 $\Lambda_1$	2,7 $\Lambda_1$	0,66 $\Lambda_1$

Πίνακας 2-4: Παράμετροι φάσματος τύπου Kaimal

Η διαμήκης κλίμακα τύρβης  $\Lambda_1$ , στο ύψος του hub δίνεται από την εξίσωση (2-8):

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60\text{m} \\ 42\text{m}, & z \geq 60\text{m} \end{cases} \quad (2-8)$$

Οι τιμές της ταχύτητας εντός του πεδίου του ανέμου θα πρέπει να παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ τους. Έτσι για όλα τα σημεία, η διαμήκης ταχύτητα εντός του κανάβου θα πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη συνάρτηση:

$$\text{Coh}(r, f) = \exp[-12((f \cdot r / V_{hub})^2 + (0.12r / L_c)^2)^{0.5}] \quad (2-9)$$

όπου:  $\text{Coh}(r, f)$  η συνάρτηση συνοχής για συχνότητα  $f$

$r$  η προβολή της απόστασης δύο σημείων στο κατακόρυφο επίπεδο

$L_c = 8.1\Lambda_1$  η κλίμακα της συνοχής

## 2.2 Η ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ανεμογεννήτρια που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα τριών πτερυγίων, ονομαστικής ισχύος 1500 kW, μεταβλητής ταχύτητας, τα κυριότερα χαρακτηριστικά της οποίας συνοψίζονται στον Πίνακα 2-5:

Hub height (m)	84.29
Tower height (m)	82.39
Rotor diameter (m)	70.00
Max tower external diameter at base (m)	5.625
Min tower external diameter at top (m)	2.831
Hub diameter (m)	3.50
Tower mass (kg)	123003.39
Blade mass (kg) (each one)	3912.59
Hub mass (kg)	15148.00
Nacelle mass (kg)	51170.00
Rotor mass (kg)	26885.77
Tower-top mass (kg)	78055.77
Total mass (kg)	201059.16

Πίνακας 2-5: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

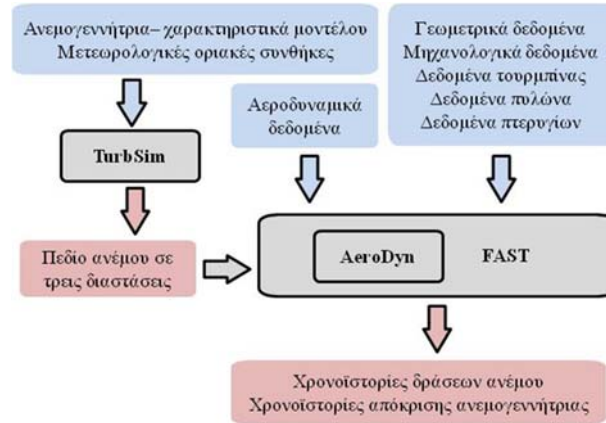
Η ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει τα επιμέρους συστήματα ελέγχου των σύγχρονων ανεμογεννητριών τα οποία είναι:

- Κλίσης πτερυγίων (pitch control)
- Μετατροπών ισχύος και γεννήτριας
- Περιστροφής της ατράκτου (yaw control)

## 2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τρία ελεύθερα για το κοινό υπολογιστικά εργαλεία από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL) [17] και το κέντρο National Wind Technology Center (NTWC) [18] των ΗΠΑ, το TurbSim [16], το AeroDyn [14] και το FAST [15], με τα οποία μπορούν να παραχθούν αξιόπιστες και ρεαλιστικές τεχνητές χρονοϊστορίες ταχύτητας και φορτίων ανέμου καθ' ύψος των πυλώνων ανεμογεννητριών. Με το λογισμικό TurbSim παράγεται ένα ρεαλιστικό πεδίο ανέμου, το λογισμικό AeroDyn εφαρμόζει την αεροδυναμική θεωρία των πτερυγίων και με το λογισμικό FAST υπολογίζονται τα δυναμικά φορτία που δρουν στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Στο Σχήμα 2-6 απεικονίζεται σχηματικά η λειτουργία των τριών λογισμικών.

Σημειώνεται ότι τα λογισμικά FAST και AeroDyn έχουν αξιολογηθεί από τον Germanischer Lloyd Wind Energie και έχουν κριθεί κατάλληλα για «τον υπολογισμό των φορτίων ανεμογεννητριών στην ξηρά και για το σχεδιασμό και την πιστοποίηση». Οι ηλεκτρονικές εκδόσεις του εκδοθέντος πιστοποιητικού και έκθεσης είναι διαθέσιμες στην επίσημη ιστοσελίδα του NREL [17].



Σχήμα 2-6: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας των τριών λογισμικών TurbSim, AeroDyn και FAST

Οι χρονοϊστορίες ταχύτητας ανέμου παράγονται από το λογισμικό TurbSim. Το TurbSim είναι ένας στοχαστικός προσομοιωτής πλήρους και τυρβώδους πεδίου ανέμου, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μοντέλο για την αριθμητική προσομοίωση χρονοϊστοριών των τριών συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου σε σημεία ενός δισδιάστατου, κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου, ορθογωνικού πλέγματος, το οποίο θεωρείται σταθερό στο χώρο. Το πλέγμα πρέπει να περικλείει το θεωρητικό δίσκο που δημιουργείται από τη σάρωση των πτερυγίων. Τα απαραίτητα δεδομένα του TurbSim είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, τα οποία καθορίζουν το πλέγμα, όπως το ύψος της ανεμογεννήτριας, η διάμετρος του δίσκου, και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Το τελευταίο περιλαμβάνει το μοντέλο τυρβώδους ροής, το προφίλ του ανέμου (σύνθετος ή ακραίο) και την ταχύτητα αναφοράς του, η οποία χρειάζεται για να καθοριστεί το πεδίο του ανέμου, όπως αυτό ορίζεται στον ισχύοντα κανονισμό IEC [4]. Το TurbSim δημιουργεί χρονοϊστορίες για τις τρεις συνιστώσες ταχύτητας του ανέμου, τη συνιστώσα  $u$ , κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου κάθετα στο θεωρητικό δίσκο, τη συνιστώσα  $v$ , η οποία είναι οριζόντια και παράλληλη στο θεωρητικό δίσκο και τη συνιστώσα  $w$ , η οποία είναι κατακόρυφη και παράλληλη στο θεωρητικό δίσκο.

Τα αποτελέσματα του TurbSim χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τα λογισμικά AeroDyn και FAST για τον υπολογισμό των χρονοϊστοριών των φορτίων ανέμου στην κορυφή του πλώνα. Το AeroDyn, το οποίο λειτουργεί μέσα από το FAST, υπολογίζει σύμφωνα με την αεροδυναμική θεωρία των πτερυγίων, τις δυνάμεις άωσης  $F_L$  (Lift force) και αντίστασης  $F_D$  (Drag force) και τις αντίστοιχες ροπές σε κάθε στοιχείο των πτερυγίων, οι οποίες αποτελούν κατανομημένες δράσεις κατά μήκος των πτερυγίων. Σε συνδυασμό με το FAST, οι δράσεις αυτές ολοκληρώνονται κατά μήκος κάθε πτερυγίου και με τη μεταφορά τους ως δύναμη και ροπή στο κέντρο του δρομέα υπολογίζονται οι χρονοϊστορίες δυνάμεων και ροπών. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητα ως δεδομένα η γεωμετρία, τα μηχανολογικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του πλώνα. Στα στοιχεία αυτά περιλαμβάνονται:

- Παράμετροι λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και βασική γεωμετρία, όπως, διάταξη και συστήματα ελέγχου, περιβαλλοντικές και αρχικές συνθήκες, μάζα και αδράνεια.
- Στοιχεία γεωμετρίας και αδρανειακών χαρακτηριστικών του πλώνα και των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.
- Δεδομένα πλατφόρμας, στην περίπτωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.
- Δεδομένα για την περίπτωση που η ανεμογεννήτρια έχει σύστημα αναδίπλωσης σε περίπτωση υπερτάχυνσης, όπως, αν υπάρχει ουρά, και τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της.

## 2.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

Η παραγωγή των χρονοϊστοριών ταχύτητας ανέμου έγινε με το λογισμικό Turbsim v.1.06.00 [16] του National Renewable Energy Laboratory. Όλες οι χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν αναφέρονται σε συνήθεις (normal) συνθήκες ανέμου στο ύψος της πλήμνης (hub height) και παρήχθησαν με βήμα (time step) 0.05 sec για συνολική διάρκεια 600 sec. Η παραγωγή τους έγινε όπως προβλέπεται στο πρότυπο IEC 61400-1 και σύμφωνα με το φάσμα συχνοτήτων τύπου Kaimal (2-6).

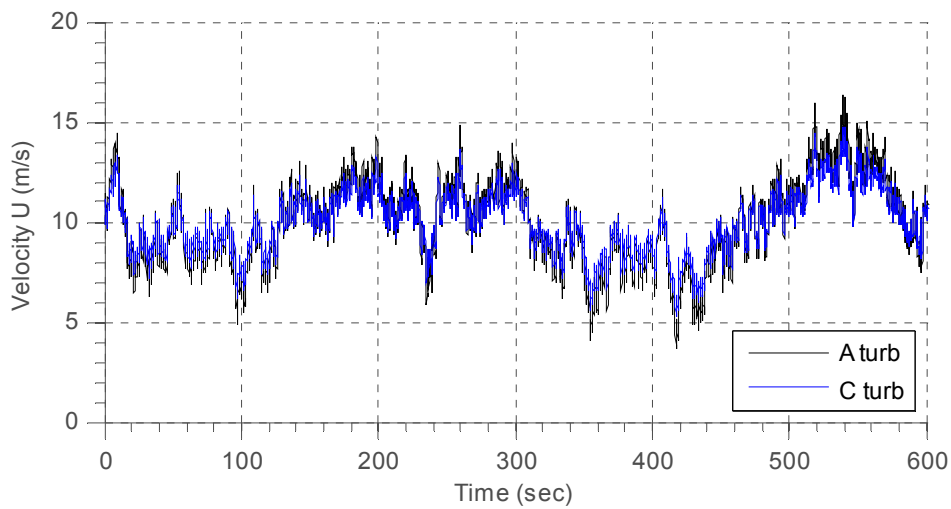
Στα Διαγράμματα 2-7, 2-8 και 2-9 γίνεται σύγκριση δύο χρονοσειρών ταχυτήτων ανέμου για κατηγορίες τύρβης A και C, με μέση ταχύτητα 10 m/s κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Στις άλλες δυο διευθύνσεις η μέση τιμή είναι μηδέν όπως είναι αναμενόμενο αφού η οριζόντια και κατακόρυφη γωνία της μέσης ταχύτητας λήφθηκε μηδέν, όμως υπάρχει η τυρβώδης συνιστώσα. Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (2-10), (2-11), (2-12) που ορίζονται στο IEC 61400-1 και επιβεβαιώνονται από τις χρονοσειρές:

$$\sigma_1 = I_{ref}(0,75V_{hub} + 5.6) \begin{cases} \text{Aclass, } I_{ref} = 0.16, \sigma_1 = 2.096 \\ \text{Cclass, } I_{ref} = 0.12, \sigma_1 = 1.572 \end{cases} \quad (2-10)$$

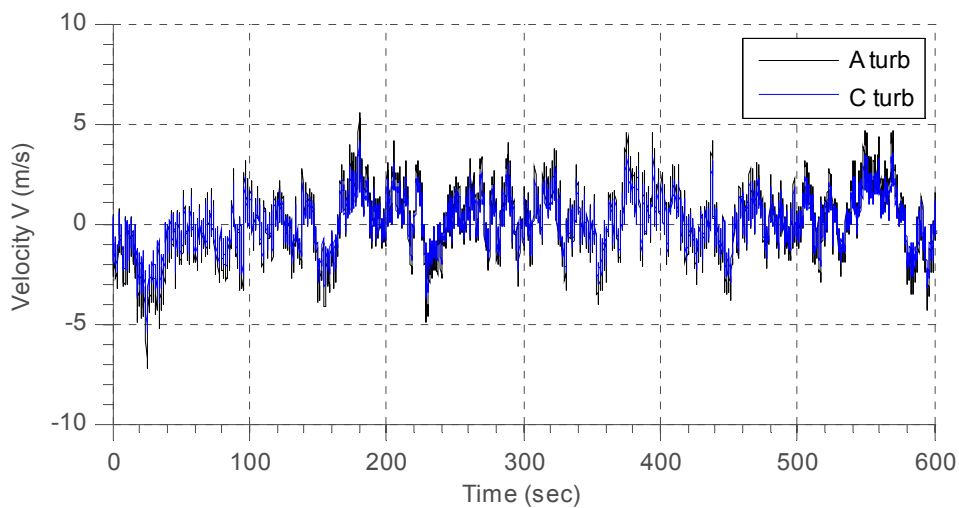
$$\sigma_2 = 0.8\sigma_1 \begin{cases} \text{Aclass, } \sigma_2 = 1.6769 \\ \text{Cclass, } \sigma_2 = 1.2576 \end{cases} \quad (2-11)$$

$$\sigma_3 = 0.5\sigma_1 \begin{cases} \text{Aclass, } \sigma_3 = 1.0480 \\ \text{Cclass, } \sigma_3 = 0.7860 \end{cases} \quad (2-12)$$

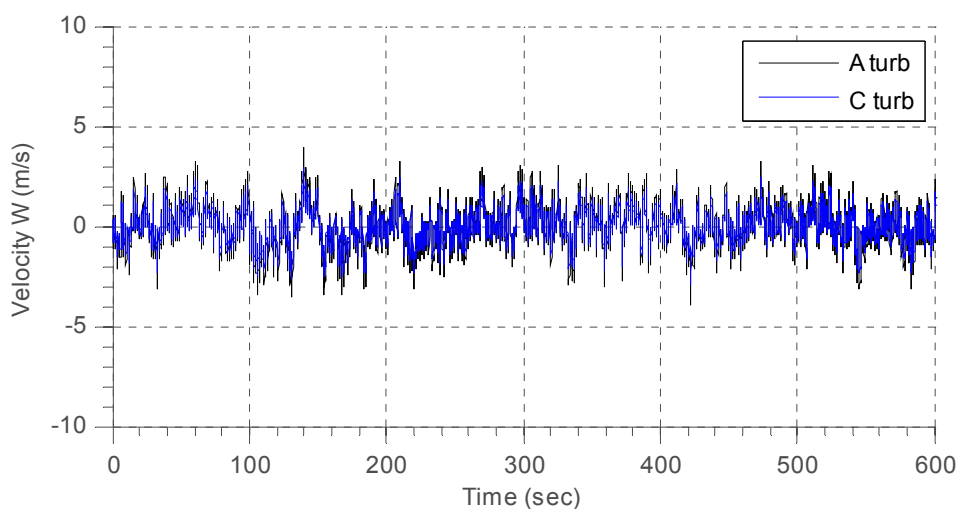




Διάγραμμα 2-7: Ταχύτητα στη διαμήκη διεύθυνση x:  $V_{\text{mean}}=10$  m/s,  $\sigma_A=2.0961$ ,  $\sigma_C=1.5721$

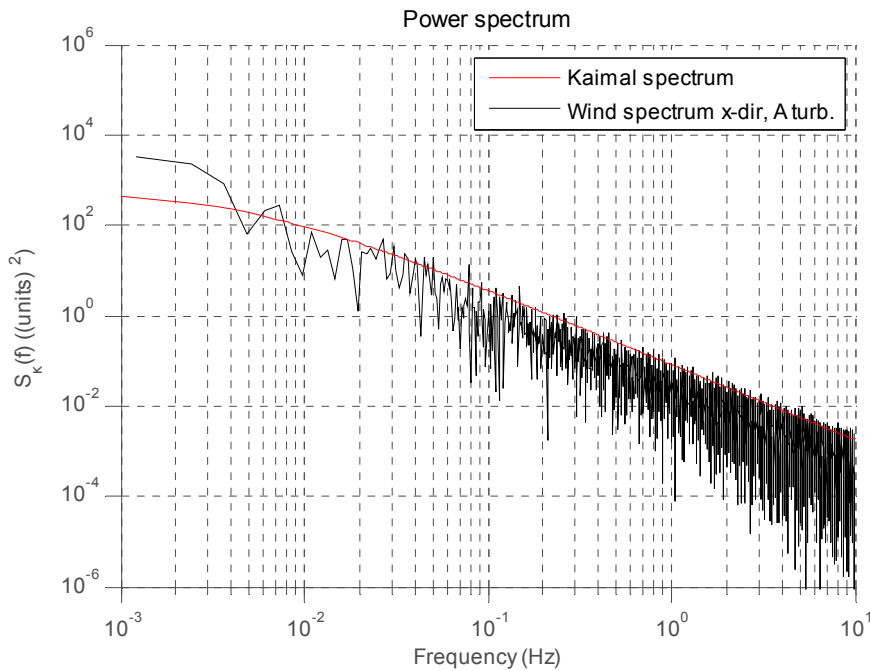


Διάγραμμα 2-8: Ταχύτητα στην εγκάρσια διεύθυνση y:  $V_{\text{mean}}=0$  m/s,  $\sigma_A=1.6769$ ,  $\sigma_C=1.2576$

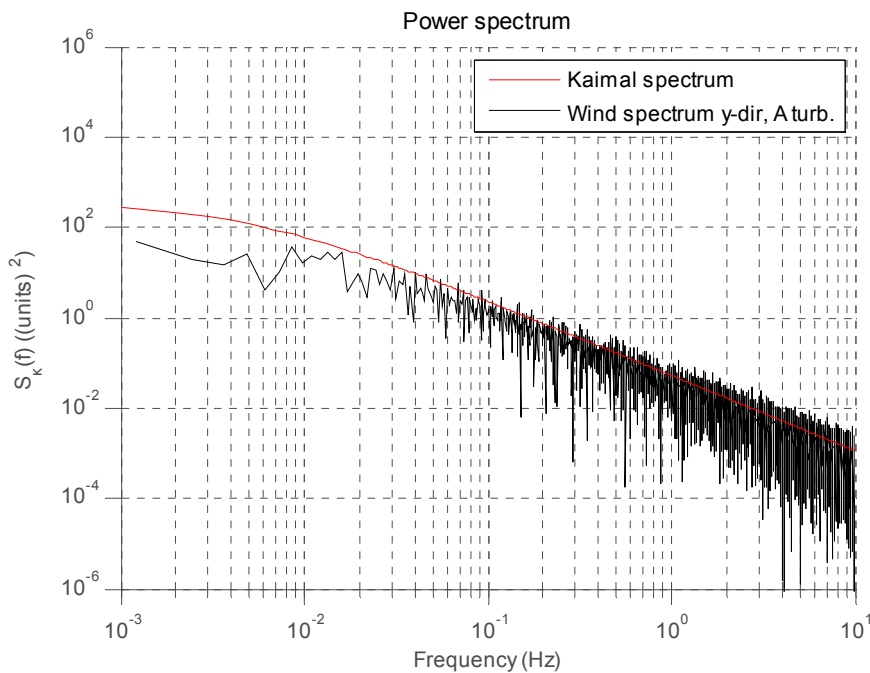


Διάγραμμα 2-9: Ταχύτητα στην κατακόρυφη διεύθυνση z:  $V_{\text{mean}}=0$  m/s,  $\sigma_A=1.0480$ ,  $\sigma_C=0.7860$

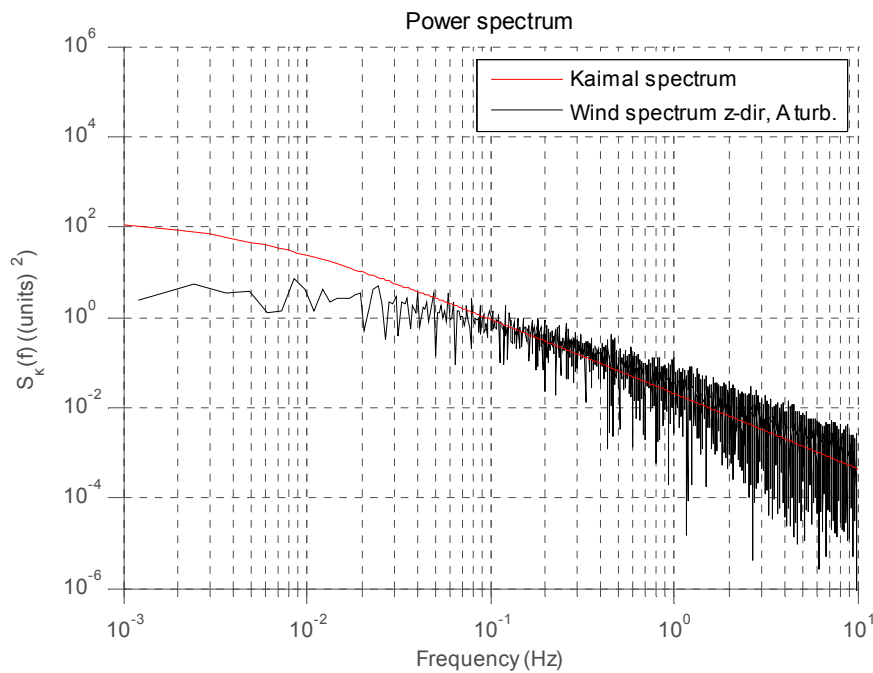
Οι χρονοσειρές μπορούν να αναλυθούν στο πεδίο συχνοτήτων μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του ταχύ μετασχηματισμού Fourier (FFT). Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι  $F_s = 20$  Hz, επομένως οι συχνότητες που μπορούν να απεικονισθούν είναι από τη συχνότητα Nyquist και κάτω:  $F_N = F_s / 2 = 10$  Hz. Στα Διαγράμματα 2-10, 2-11 και 2-12 απεικονίζονται τα φάσματα πυκνότητας (power spectrum) της ταχύτητας ανέμου στη διαμήκη, εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2-10: Φάσμα πυκνότητας ταχύτητας ανέμου στη διεύθυνση x για την κατηγορία τύρβης A

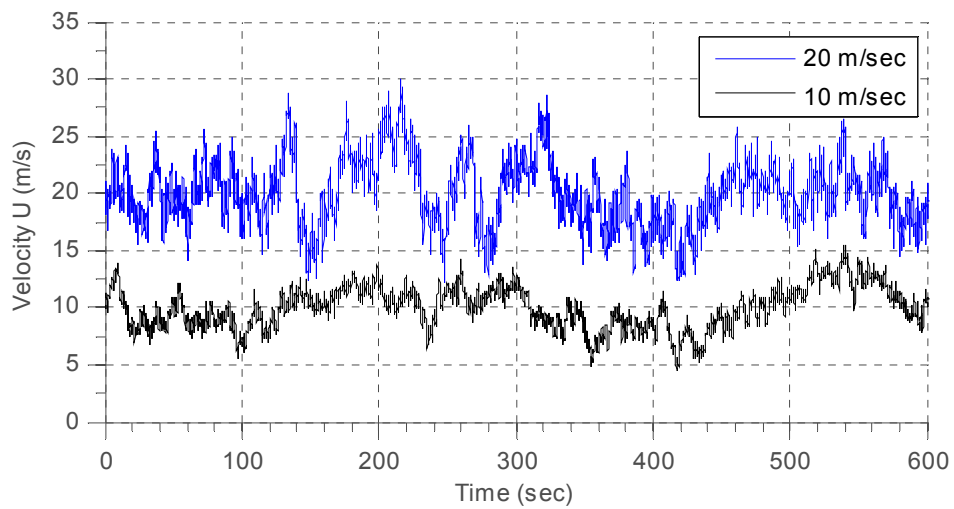
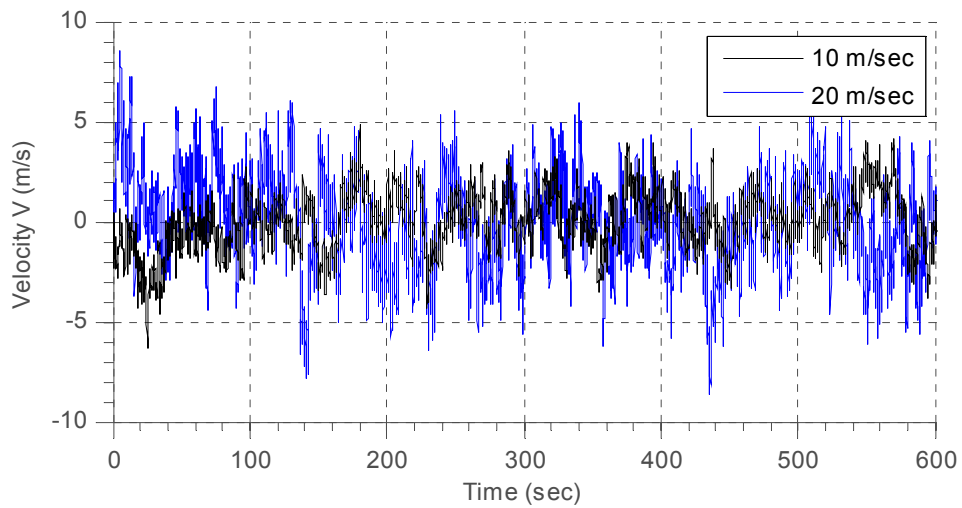
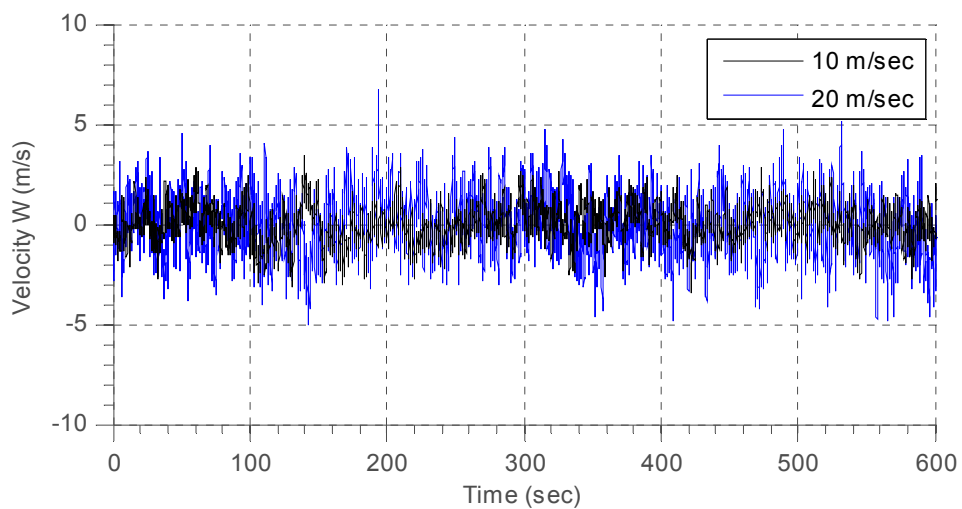


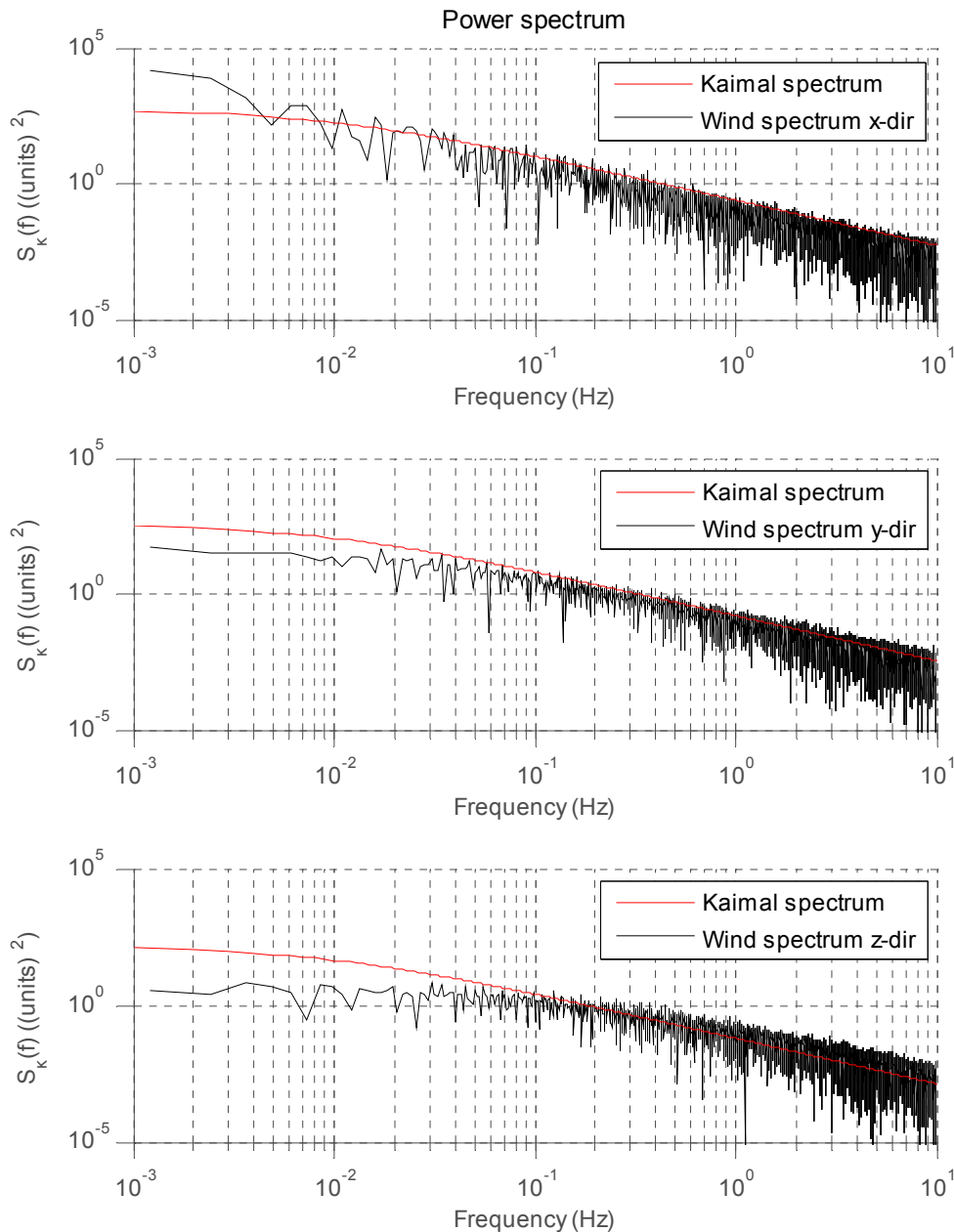
Διάγραμμα 2-11: Φάσμα πυκνότητας ταχύτητας ανέμου στη διεύθυνση y για την κατηγορία τύρβης A



Διάγραμμα 2-12: Φάσμα πυκνότητας ταχύτητας ανέμου στη διεύθυνση z για την κατηγορία τύρβης A

Στα Διαγράμματα 2-13, 2-14, 2-15 γίνεται σύγκριση δύο χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου στις 3 διευθύνσεις με μέσες τιμές στη διαμήκη διεύθυνση 10 m/s και 20 m/s για κατηγορία τύρβης B. Παρατηρούμε τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση που παρουσιάζουν οι τιμές για μεγαλύτερη μέση ταχύτητα ανέμου, όπως αναμένεται. Στο Διάγραμμα 2-16 ακολουθεί η ανάλυση της χρονοσειράς ταχύτητας των 20 m/s στο πεδίο συχνοτήτων.

Διάγραμμα 2-13: Ταχύτητα στη διαμήκη διεύθυνση  $x$  με Β τύρβη:  $\sigma_{10}=1.8341$ ,  $\sigma_{20}=2.8854$ Διάγραμμα 2-14: Ταχύτητα στην εγκάρσια διεύθυνση  $y$  με Β τύρβη:  $\sigma_{10}=1.4673$ ,  $\sigma_{20}=2.3082$ Διάγραμμα 2-15: Ταχύτητα στην κατακόρυφη διεύθυνση  $z$  με Β τύρβη:  $\sigma_{10}=0.9170$ ,  $\sigma_{20}=1.4421$



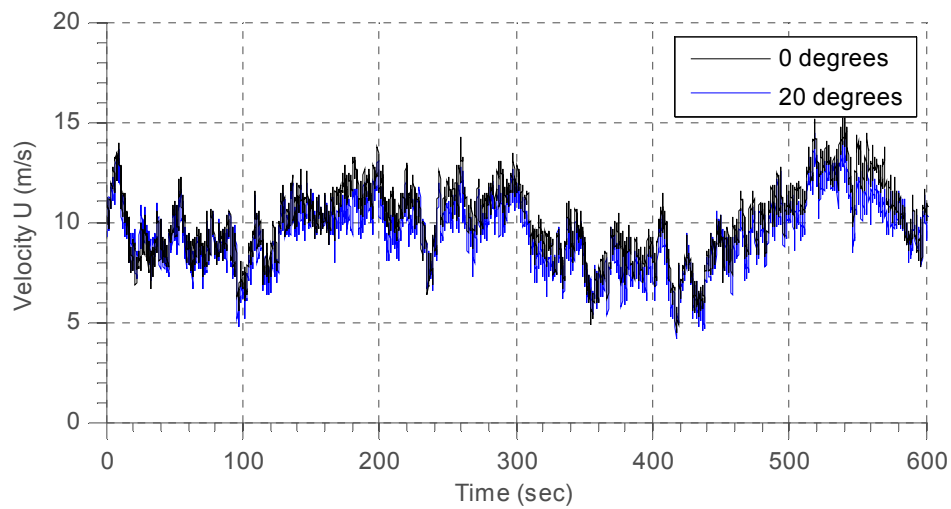
Διαγράμματα 2-16: Φάσματα πυκνότητας ταχύτητας ανέμου με μέση τιμή 20 m/s στις 3 διευθύνσεις

Στα Διαγράμματα 2-17, 2-18 και 2-19 γίνεται σύγκριση δύο χρονοιστοριών ταχύτητας ανέμου για οριζόντιες γωνίες πρόσπτωσης  $0^\circ$  και  $20^\circ$  μοίρες. Και οι δύο χρονοσειρές έχουν μέση τιμή 10 m/s και βρίσκονται σε κατηγορία ανέμου τύρβης Β. Παρατηρούμε ότι για τη μέση τιμή της χρονοσειράς των  $20^\circ$  μοιρών ισχύει:

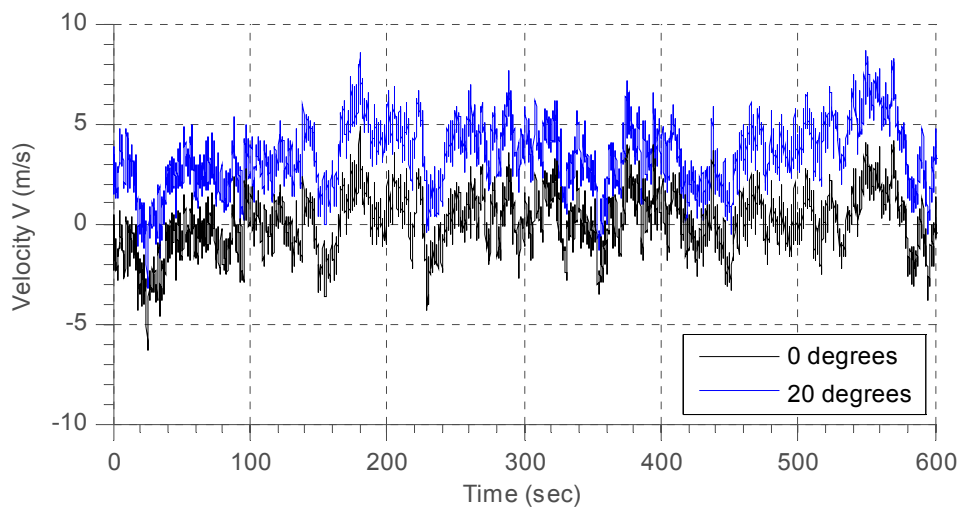
Κατά τη διεύθυνση x:  $V_{20} = V_0 \cos 20 = 9.397$  m/s

Κατά τη διεύθυνση y:  $V_{20} = V_0 \sin 20 = 3.420$  m/s

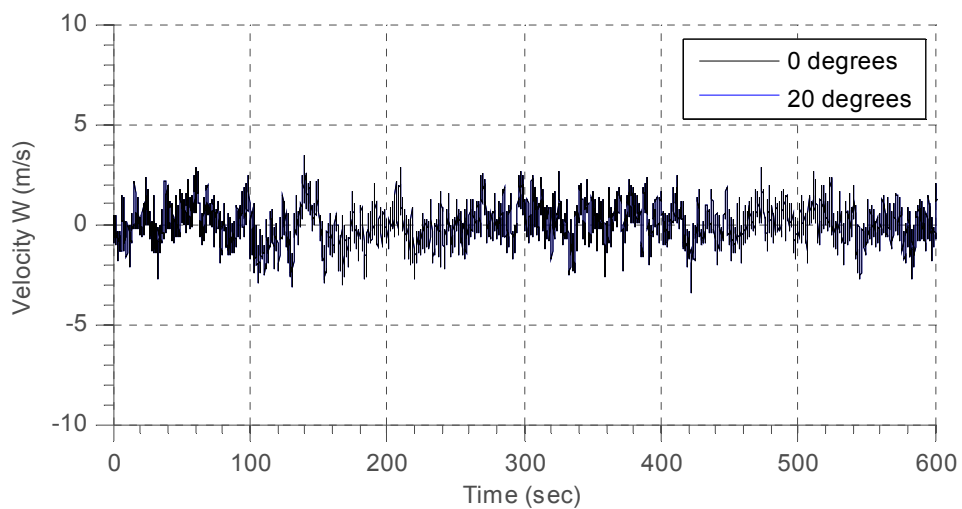
Τέλος παρατηρούμε ότι στην κατακόρυφη διεύθυνση οι δυο χρονοσειρές δεν παρουσιάζουν διαφορές. Στα Διαγράμματα 2-20, 2-21 και 2-22 απεικονίζονται δύο διαφορετικές χρονοιστορίες ανέμου στις 3 διευθύνσεις με την ίδια μέση τιμή 10 m/s και ίδια τυπική απόκλιση. Οι χρονοιστορίες αναφέρονται στο ύψος της πλήμνης και για κατηγορία τύρβης Β.



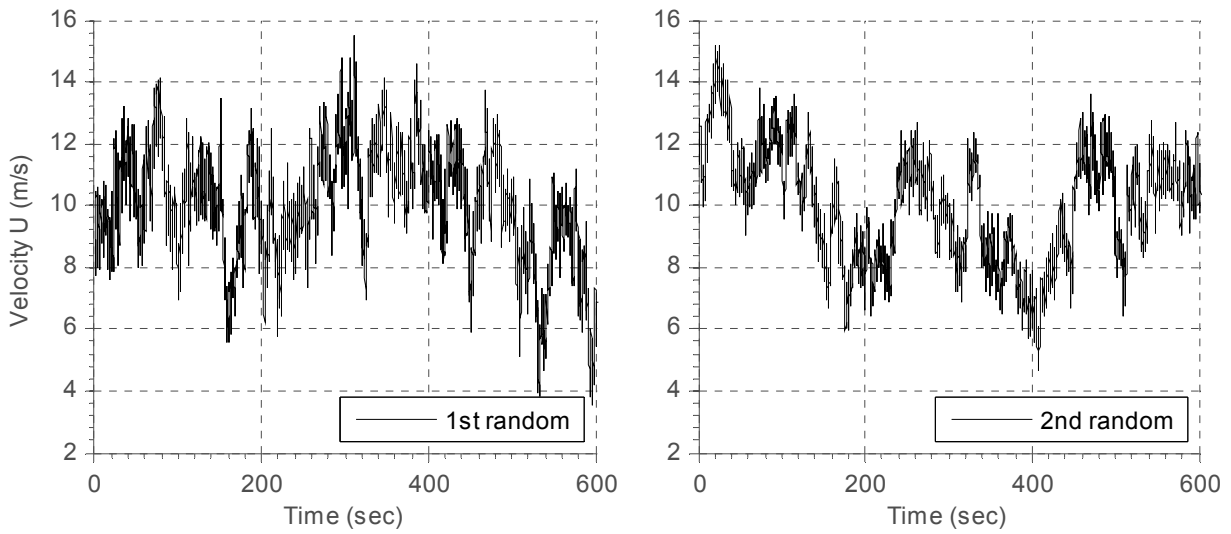
Διάγραμμα 2-17: Ταχύτητα στη διαμήκη διεύθ.  $x$ :  $V_0=10$  m/s,  $\sigma_0=1.8341$ ,  $V_{20}=9.396$  m/s,  $\sigma_{20}=1.6724$



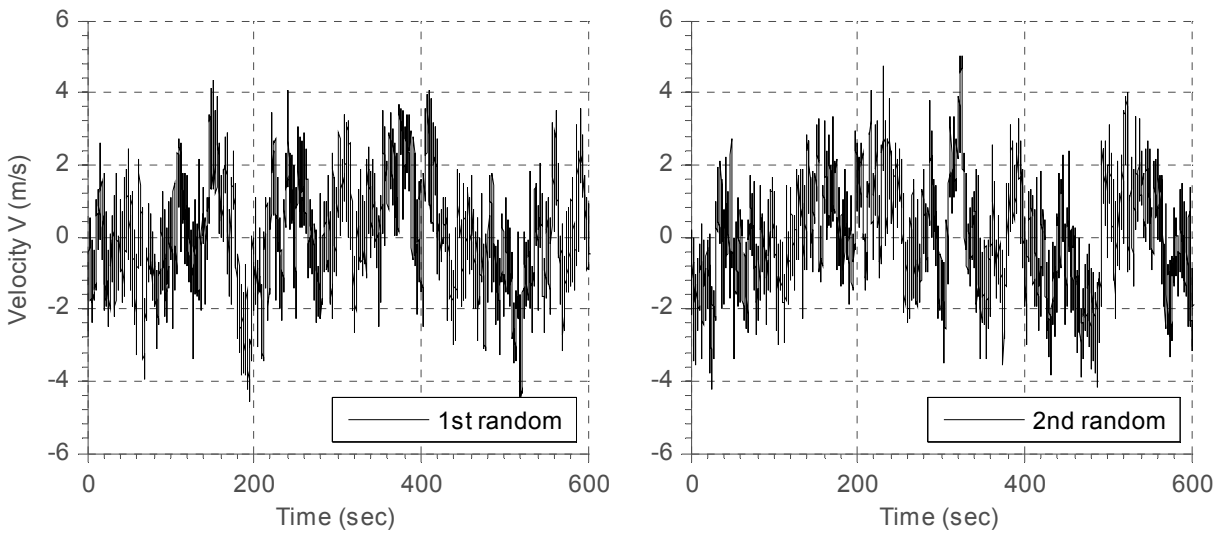
Διάγραμμα 2-18: Ταχύτητα στην εγκάρσια διεύθ.  $y$ :  $V_0=0$  m/s,  $\sigma_0=1.4673$ ,  $V_{20}=3.4202$  m/s,  $\sigma_{20}=1.6492$



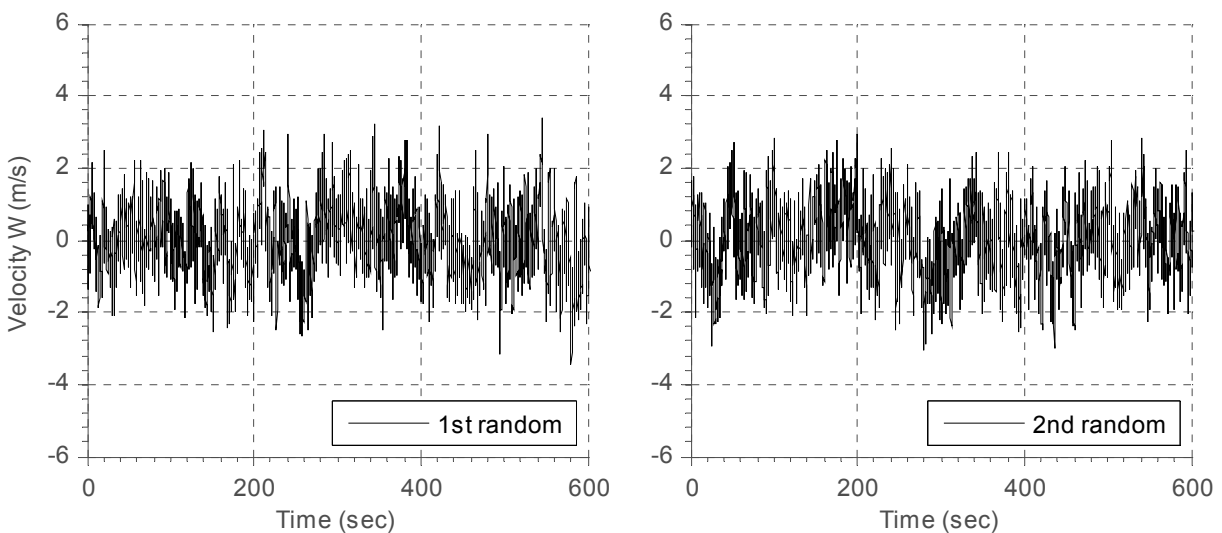
Διάγραμμα 2-19: Ταχύτητα στην κατακόρυφη διεύθ.  $z$ :  $V_0=0$  m/s,  $\sigma_0=0.9170$ ,  $V_{20}=0$  m/s,  $\sigma_{20}=0.9170$



Διαγράμματα 2-20: Ταχύτητα ανέμου στη διαμήκη διεύθυνση  $x$ :  $V_1=10$  m/s,  $\sigma_1=1.8341$ ,  $V_2=10$  m/s,  $\sigma_2=1.8341$



Διαγράμματα 2-21: Ταχύτητα ανέμου στην εγκάρσια διεύθυνση  $y$ :  $V_1=0$  m/s,  $\sigma_1=1.4673$ ,  $V_2=0$  m/s,  $\sigma_2=1.4673$



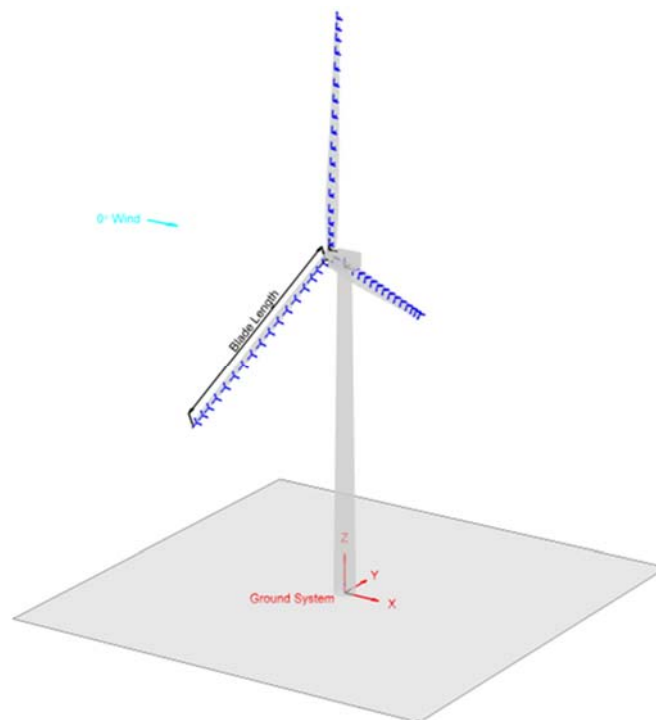
Διαγράμματα 2-22: Ταχύτητα ανέμου στην κατακόρυφη διεύθ.  $z$ :  $V_1=0$  m/s,  $\sigma_1=0.9170$ ,  $V_2=0$  m/s,  $\sigma_2=0.9170$

## 2.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Οι χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμου που παρήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόκρισης της ανεμογεννήτριας, μέσω των λογισμικών Fast v.7.02.00 [15] και Aerodyn v.12.50 [14] του National Renewable Energy Laboratory. Προκειμένου να διαπιστωθεί πως συγκεκριμένες παράμετροι του ανέμου και της ανεμογεννήτριας επιδρούν στο εντατικό πεδίο του πυλώνα, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις, μεταβάλλοντας κάθε φορά χαρακτηριστικά του δρώντος ανέμου αλλά και των συστημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Συνολικά οι συγκριτικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Σύγκριση απόκρισης για άνεμο κατηγορίας τύρβης A - C, με μέση ταχύτητα 10 m/s, σε ανεμογεννήτρια με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).
- Σύγκριση απόκρισης για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s - 15 m/s, με τύρβη κατηγορίας B, σε ανεμογεννήτρια με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).
- Σύγκριση απόκρισης για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s - 15 m/s, με τύρβη κατηγορίας B, σε ανεμογεννήτρια χωρίς σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).
- Σύγκριση απόκρισης σε ανεμογεννήτρια με/χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control), με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control), σε άνεμο μέσης ταχύτητας 10 m/s, τύρβη κατηγορίας B.
- Σύγκριση απόκρισης σε ανεμογεννήτρια με/χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control), με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control), σε άνεμο μέσης ταχύτητας 10 m/s, 20° οριζόντια γωνία ανέμου, τύρβη κατηγορίας B.

Το σύστημα αξόνων που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-23.

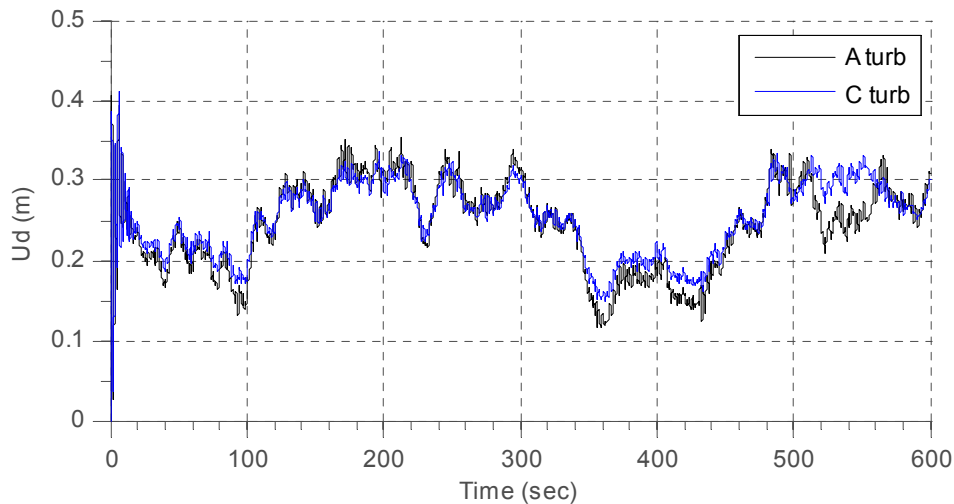


Σχήμα 2-23: Το σύστημα αξόνων της ανεμογεννήτριας

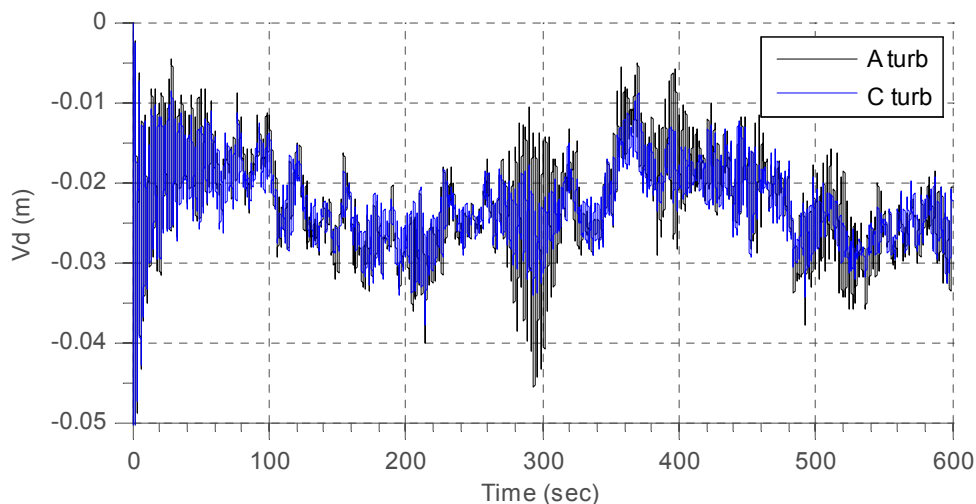


- Σύγκριση απόκρισης για άνεμο κατηγορίας τύρβης A - C, με μέση ταχύτητα 10 m/s, σε ανεμογεννήτρια με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).

Στα Διαγράμματα 2-24 και 2-25 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά x και y στην κορυφή του πυλώνα για άνεμο κατηγορίας τύρβης A και C.



Διάγραμμα 2-24: Μετακίνηση κατά x στην κορυφή του πυλώνα

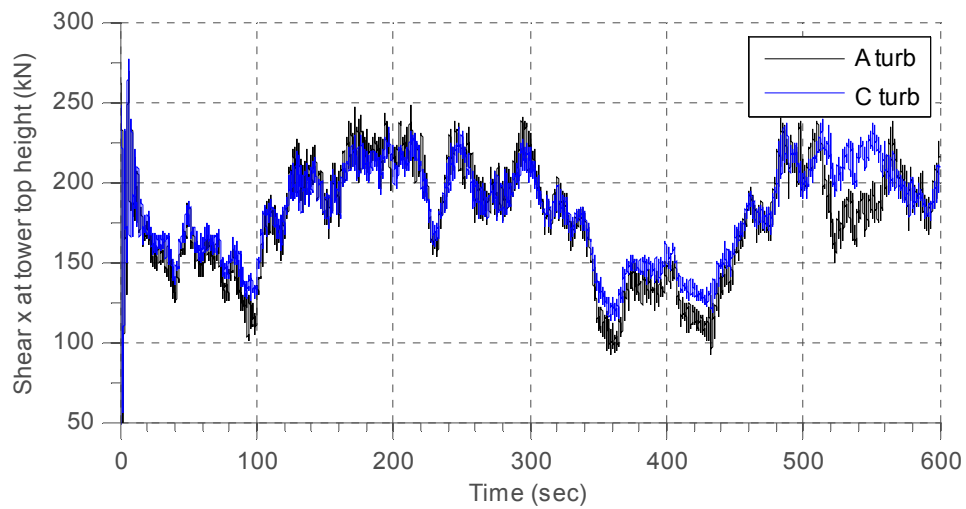


Διάγραμμα 2-25: Μετακίνηση κατά y στην κορυφή του πυλώνα

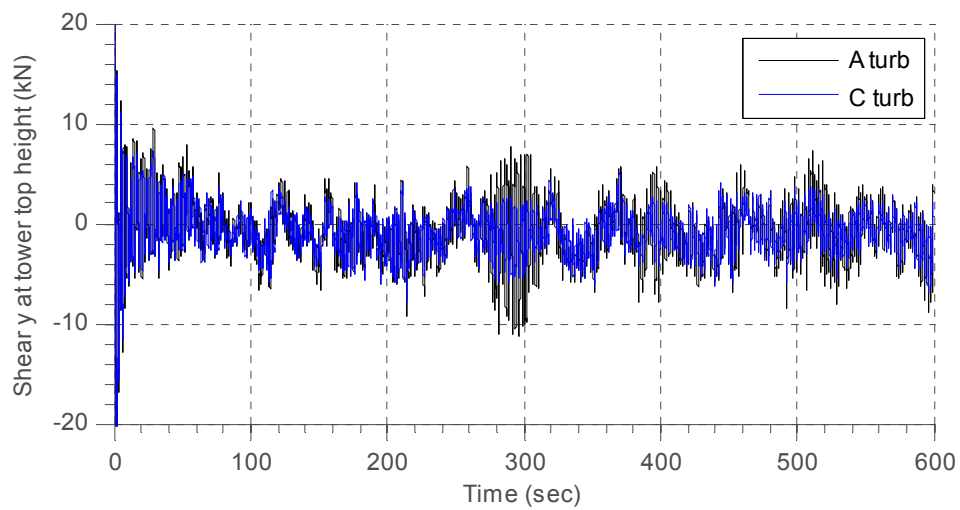
Παρατηρούμε ότι οι μετακινήσεις για άνεμο κατηγορίας τύρβης A παρουσιάζουν μεγαλύτερη τυπική απόκλιση απ' ό,τι για την κατηγορία C, ενώ οι μέσες τιμές  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$  στη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση αντίστοιχα είναι παραπλήσιες για τις δύο κατηγορίες τύρβης:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= 0.2452\text{m}, \bar{U}_C = 0.2535\text{m}, \sigma_A = 0.0555\text{m}, \sigma_C = 0.0463\text{m} \\ \bar{V}_A &= -0.0227\text{m}, \bar{V}_C = -0.0229\text{m}, \sigma_A = 0.0065\text{m}, \sigma_C = 0.0050\text{m}\end{aligned}\quad (2-13)$$

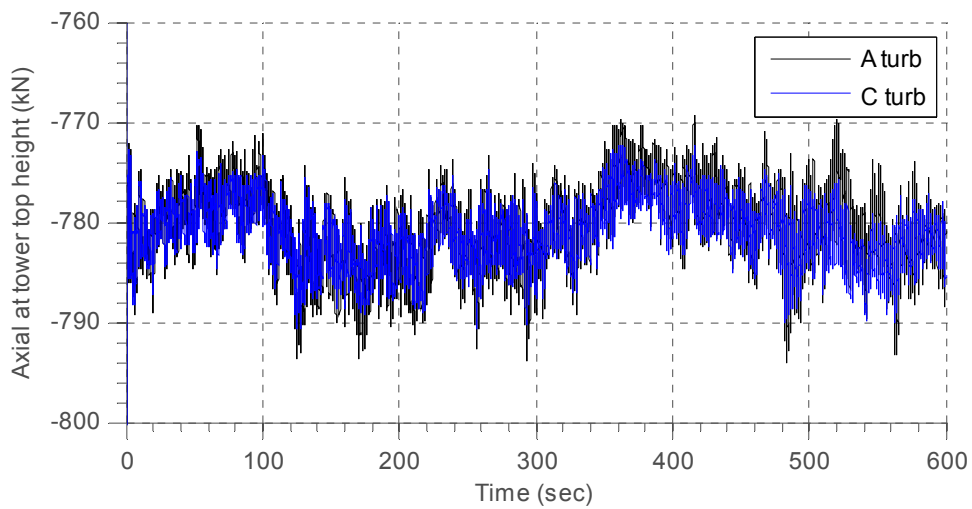
Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή και τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



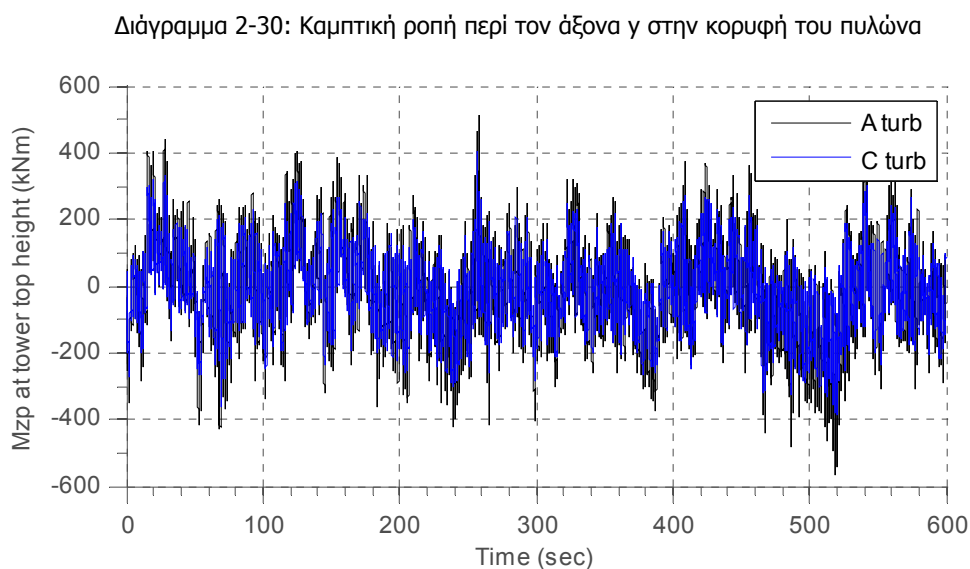
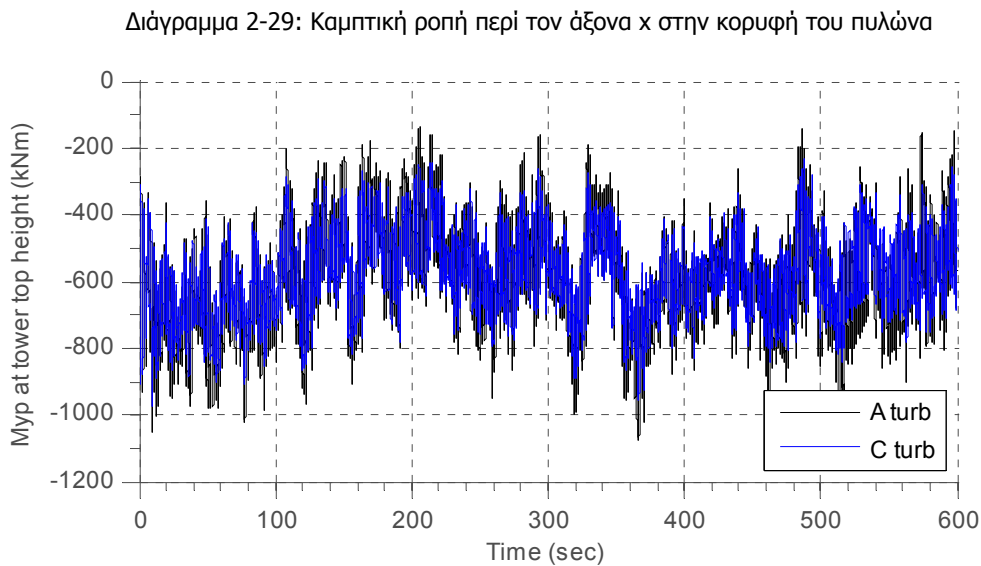
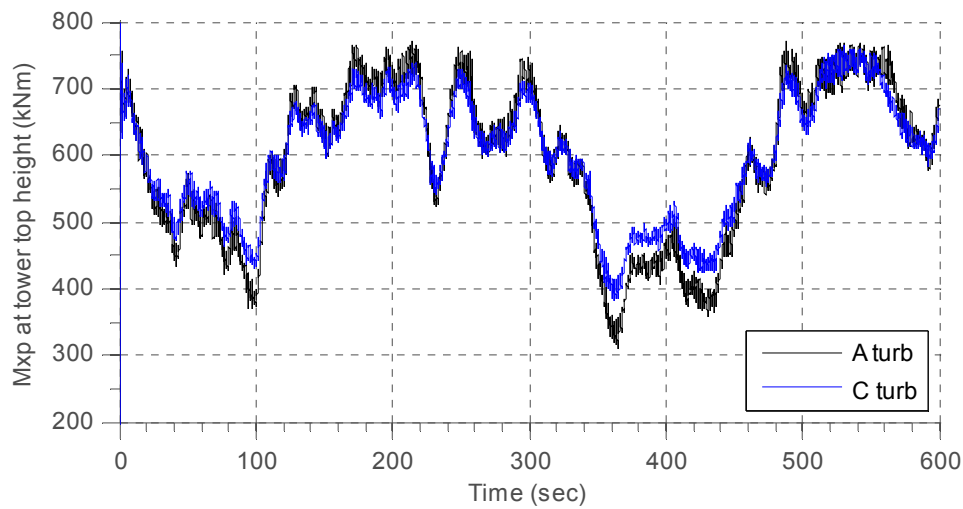
Διάγραμμα 2-26: Τέμνουσα κατά x στην κορυφή του πυλώνα

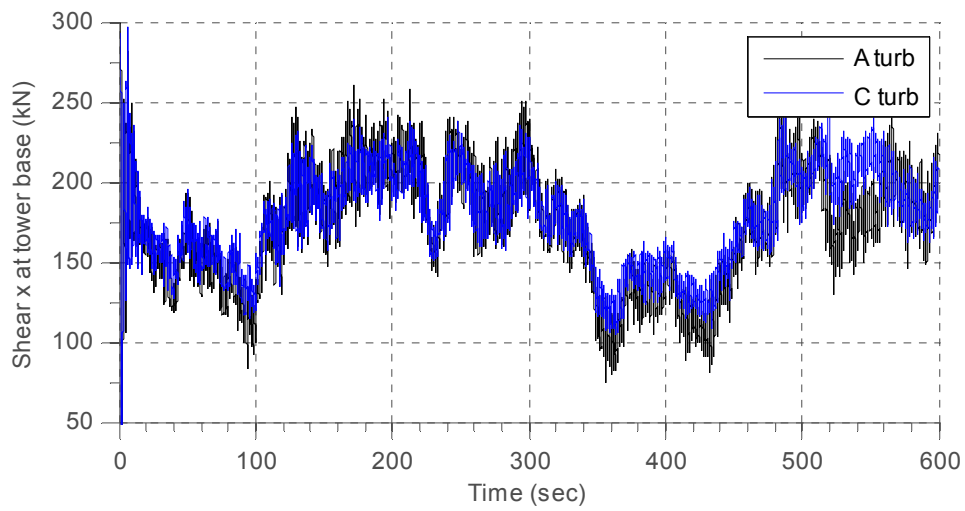


Διάγραμμα 2-27: Τέμνουσα κατά y στην κορυφή του πυλώνα

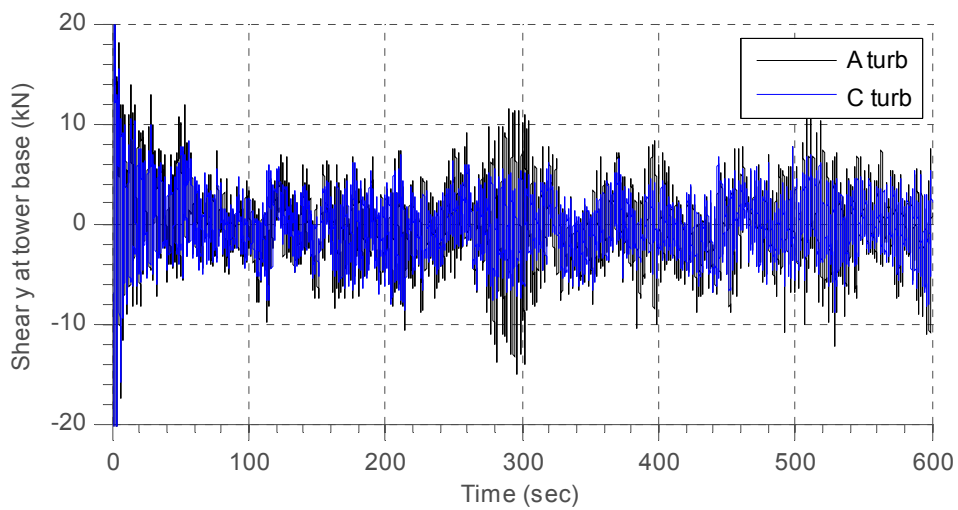


Διάγραμμα 2-28: Αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα

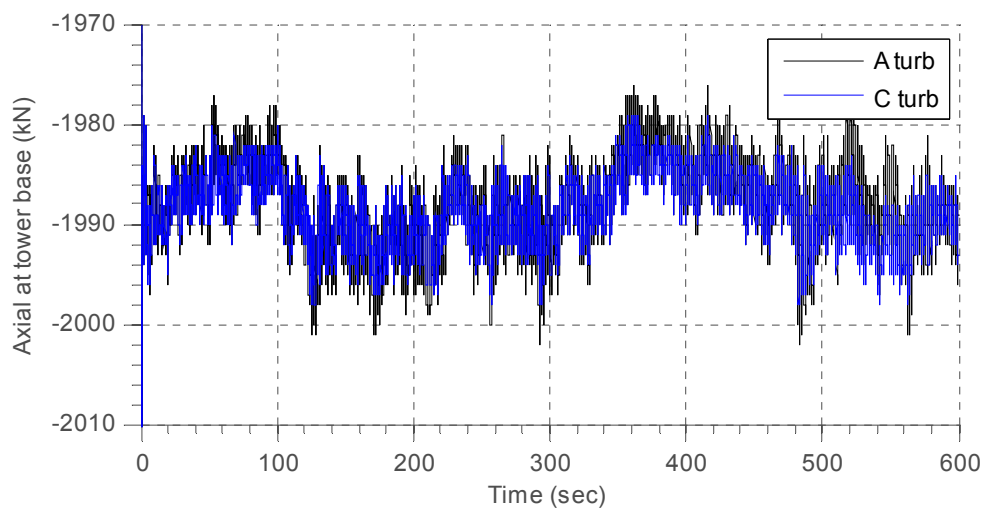




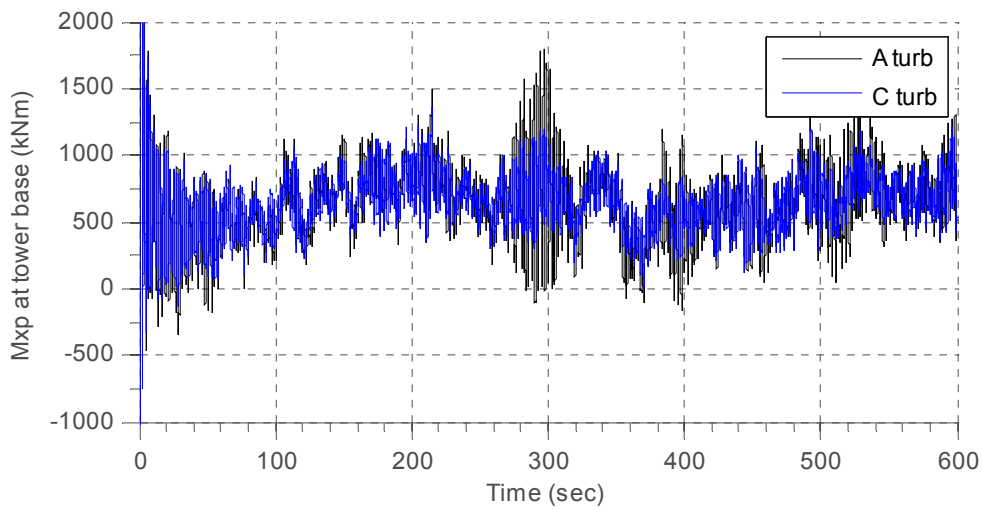
Διάγραμμα 2-32: Τέμνουσα κατά x στη βάση του πυλώνα



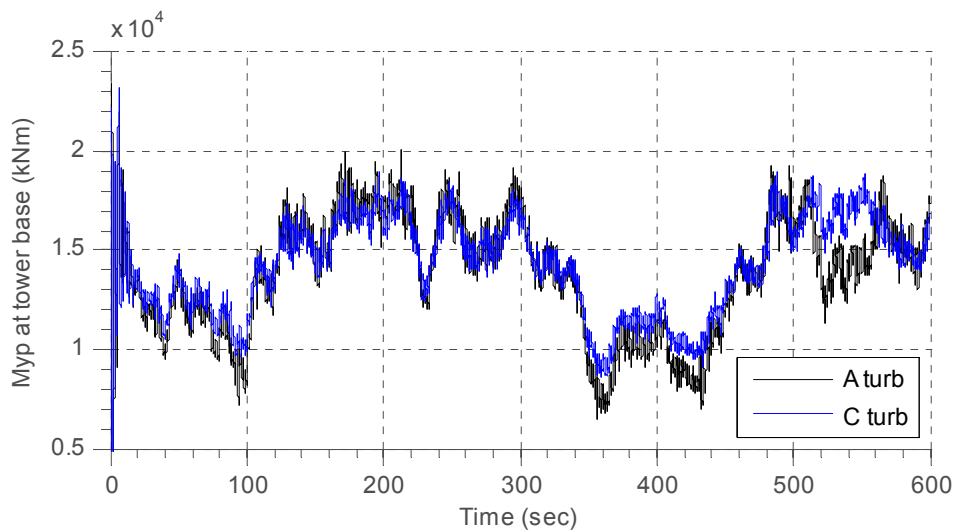
Διάγραμμα 2-33: Τέμνουσα κατά y στη βάση του πυλώνα



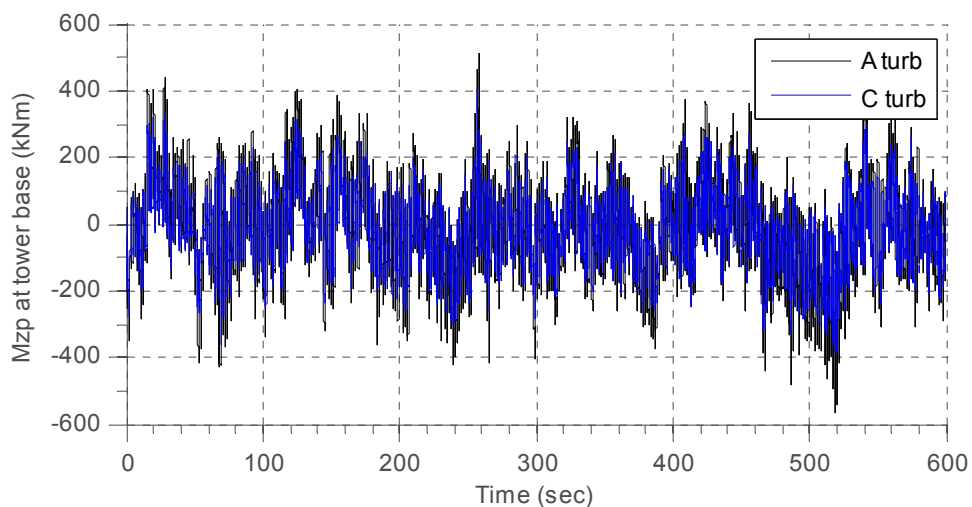
Διάγραμμα 2-34: Αξονική δύναμη στη βάση του πυλώνα



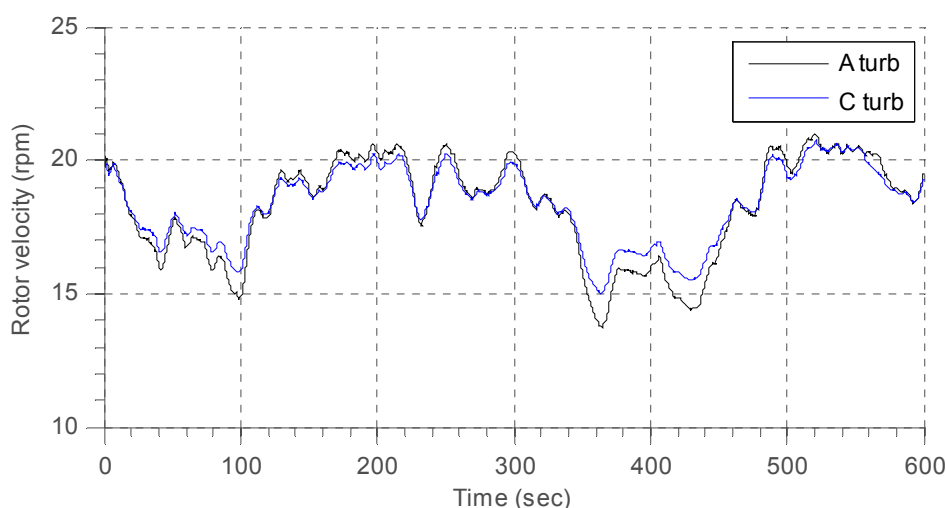
Διάγραμμα 2-35: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-36: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-37: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-38: Κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

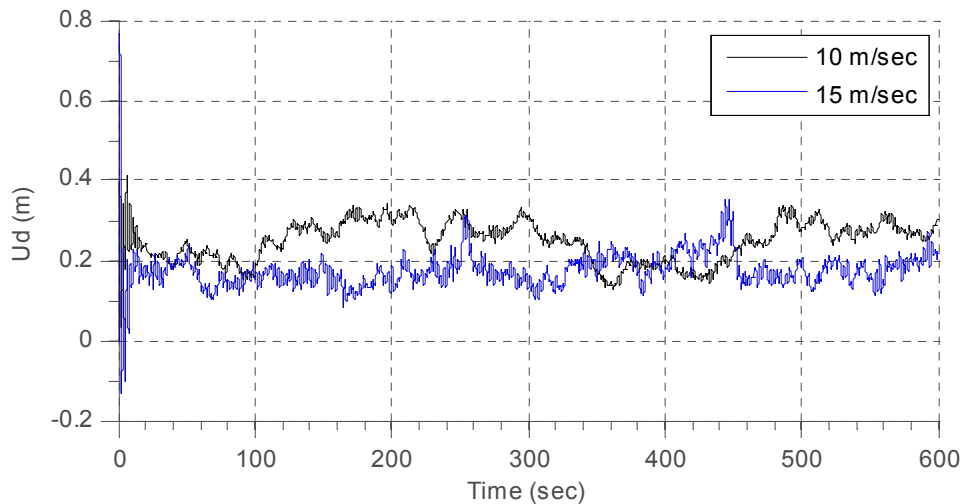
Υπάρχει έντονη συσχέτιση της ιστορίας ταχύτητας περιστροφής του δρομέα (Διάγραμμα 2-38) με τις ιστορίες της μετακίνησης κορυφής κατά  $x$  (Διάγραμμα 2-24), της τέμνουσας κατά  $x$  στην κορυφή (Διάγραμμα 2-26) και της καμπτικής ροπής περί τον άξονα  $x$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-29). Αυτό συμβαίνει γιατί αυτά τα μεγέθη έχουν κοινή προέλευση. Η τέμνουσα κατά  $x$  προέρχεται από τη δύναμη αντίστασης (drag force) των πτερυγίων και συνοδεύεται με ανάλογη δύναμη άνωσης (lift force) στα πτερύγια αφού η ανεμογεννήτρια διαθέτει σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control), επομένως και ανάλογη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον η καμπτική ροπή περί τον άξονα  $x$  οφείλεται στις τριβές που αναπτύσσονται στη μηχανή κατά την περιστροφή, επομένως από την ταχύτητα του δρομέα, ο οποίος περιστρέφεται σύμφωνα με τη φορά του ρολογιού.

Επιπρόσθετα παρατηρούμε μια μικρή μετακίνηση κατά  $y$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-25), η οποία οφείλεται στην καμπτική ταλάντωση σε αυτή τη διεύθυνση λόγω της ροπής περί τον άξονα  $x$  που αναφέρθηκε παραπάνω. Η τέμνουσα κατά τον άξονα  $y$  (Διάγραμμα 2-27) έχει μηδενική μέση τιμή και λαμβάνει μικρές τιμές λόγω της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου στην ίδια διεύθυνση.

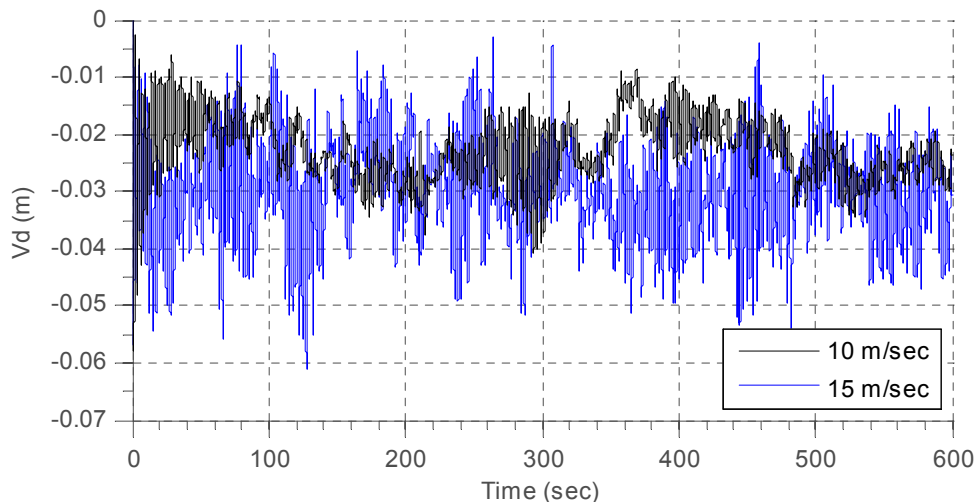
Τέλος η καμπτική ροπή περί τον άξονα  $y$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-30) είναι αρνητική και οφείλεται στο έκκεντρο ίδιο βάρος του δρομέα σε σχέση με το κέντρο βάρους της διατομής του πυλώνα. Η αξονική δύναμη στην κορυφή (Διάγραμμα 2-28) οφείλεται στο ίδιο βάρος της ατράκτου και του δρομέα που όπως αναφέρθηκε παραπάνω στα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι 78055.77 kg.

- Σύγκριση απόκρισης για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s - 15 m/s, με τύρβη κατηγορίας B, σε ανεμογεννήτρια με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).

Στα Διαγράμματα 2-39 και 2-40 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά x και y στην κορυφή του πυλώνα για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s και 15 m/s



Διάγραμμα 2-39: Μετακίνηση κατά x στην κορυφή του πυλώνα

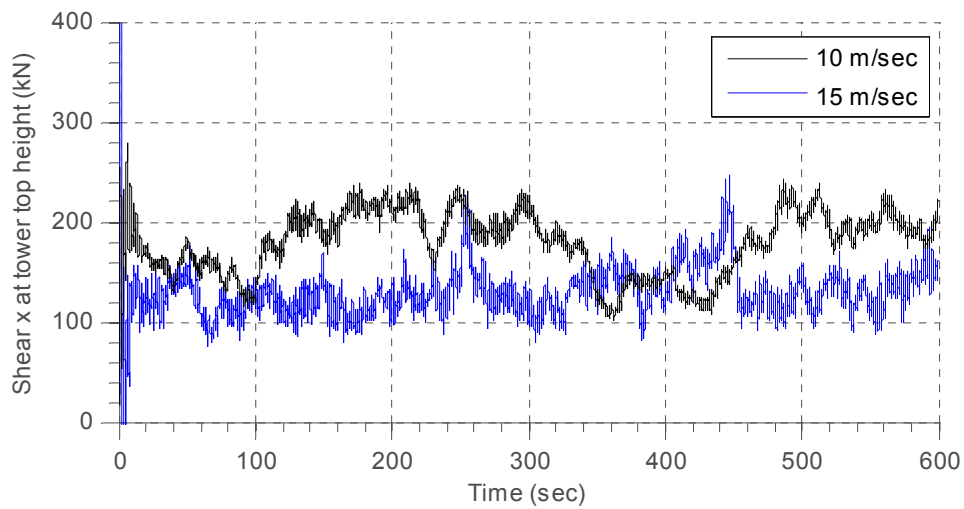


Διάγραμμα 2-40: Μετακίνηση κατά y στην κορυφή του πυλώνα

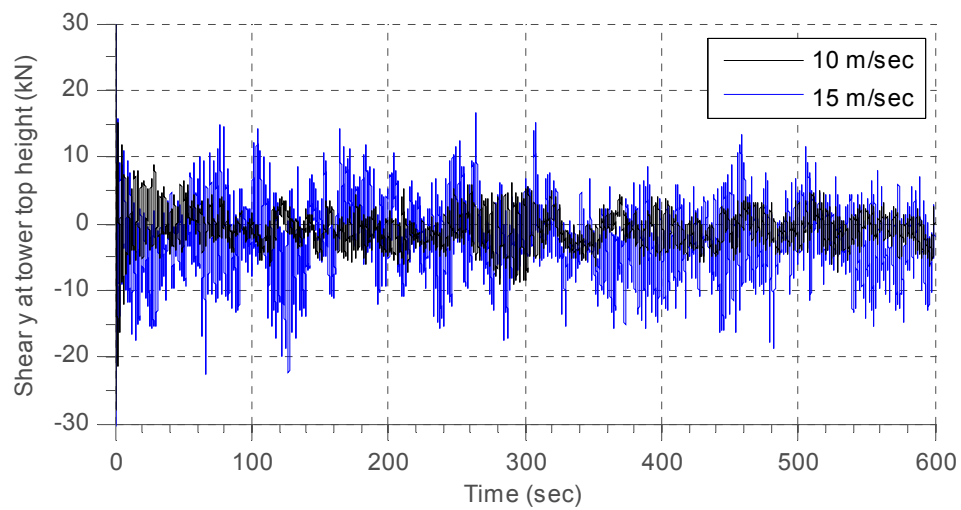
Παρατηρούμε ότι κατά τη διεύθυνση x, τόσο η μέση τιμή της μετακίνησης όσο και η τυπική απόκλιση για μέση ταχύτητα 15 m/s είναι μικρότερες από ότι για μέση ταχύτητα 10 m/s ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τη διεύθυνση y. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του συστήματος κλίσης πτερυγίων (pitch control) που ρυθμίζεται σύμφωνα με το διαμήκη άνεμο.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{10} &= 0.2452\text{m}, \bar{U}_{15} = 0.1757\text{m}, \sigma_{10} = 0.0508\text{m}, \sigma_{15} = 0.0453\text{m} \\ \bar{V}_{10} &= -0.0228\text{m}, \bar{V}_{15} = -0.0299\text{m}, \sigma_{10} = 0.0058\text{m}, \sigma_{15} = 0.0090\text{m} \end{aligned} \quad (2-14)$$

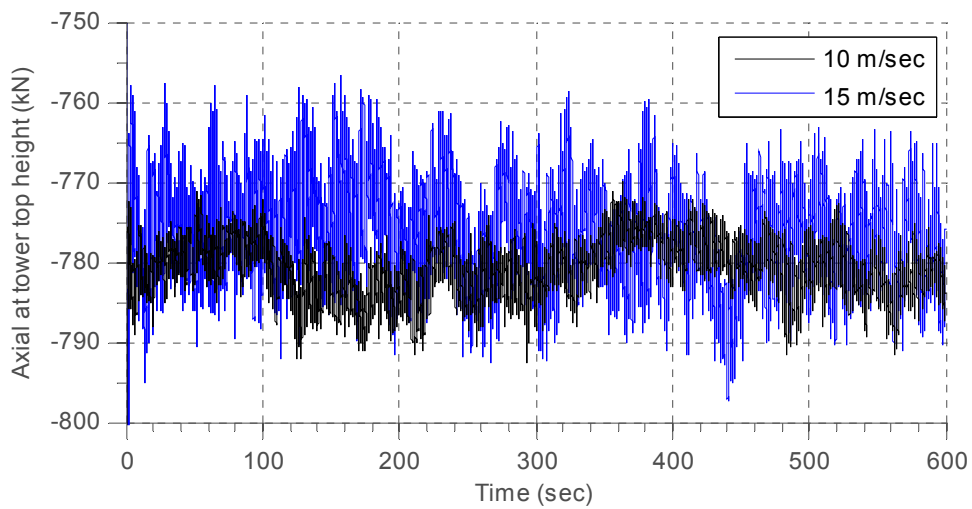
Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή και τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 2-41: Τέμνουσα κατά x στην κορυφή του πυλώνα

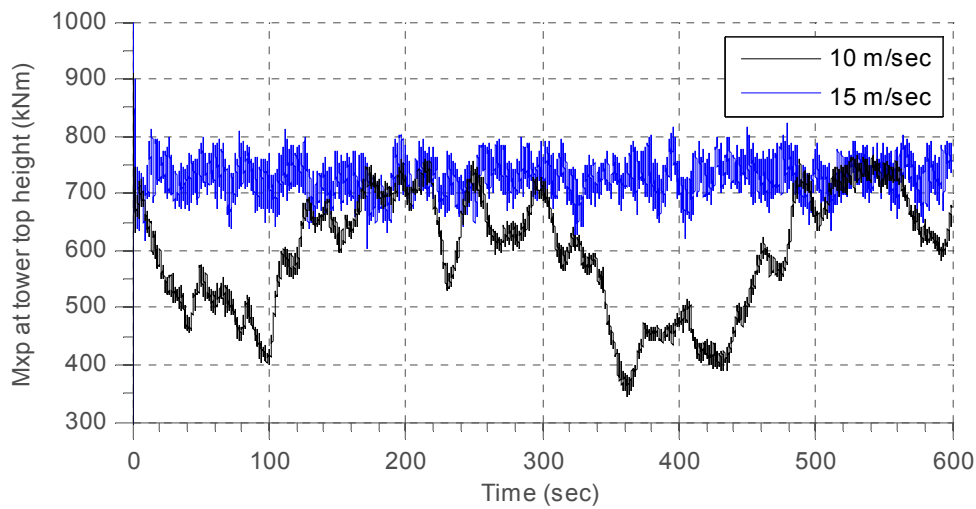


Διάγραμμα 2-42: Τέμνουσα κατά y στην κορυφή του πυλώνα

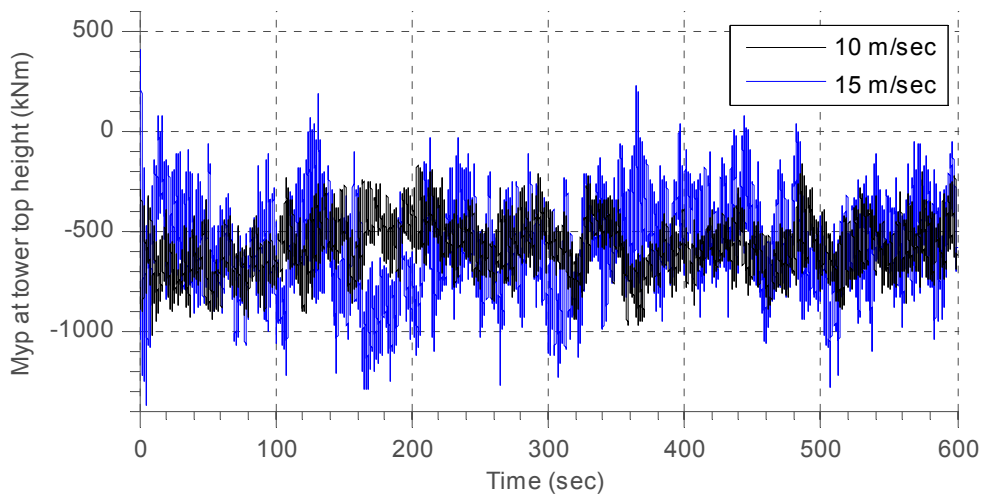


Διάγραμμα 2-43: Αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα

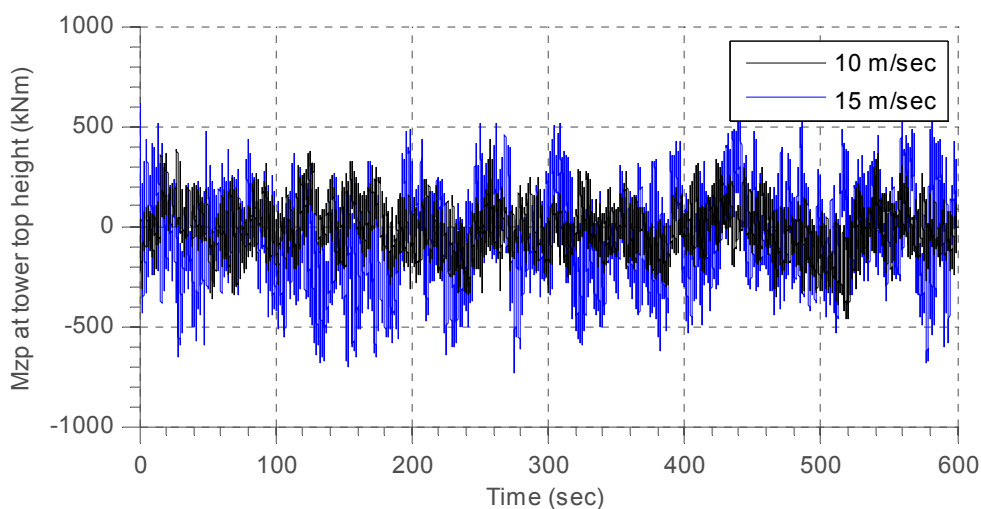




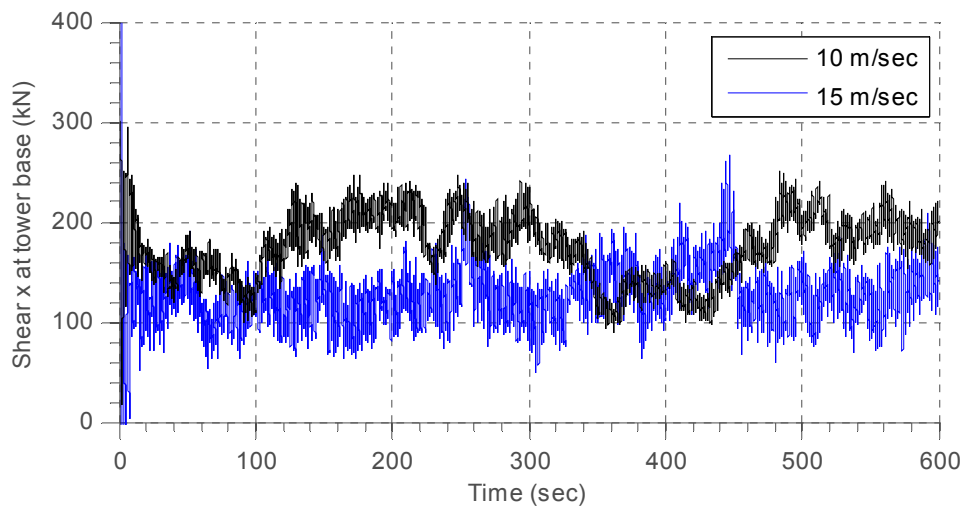
Διάγραμμα 2-44: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στην κορυφή του πυλώνα



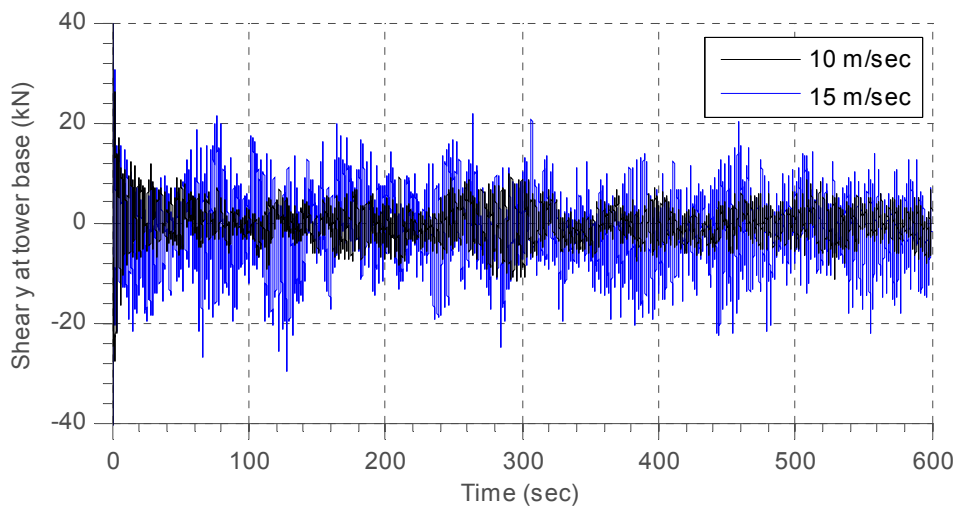
Διάγραμμα 2-45: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στην κορυφή του πυλώνα



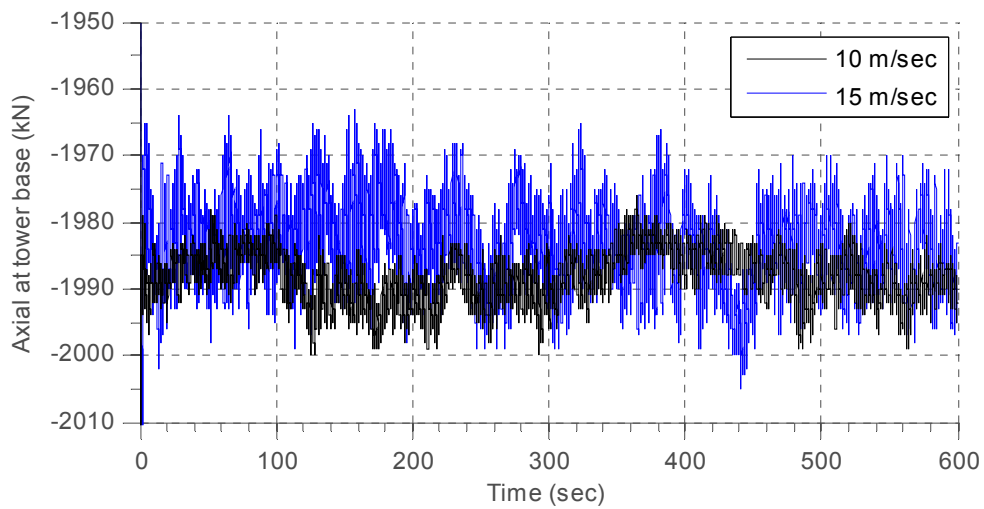
Διάγραμμα 2-46: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στην κορυφή του πυλώνα



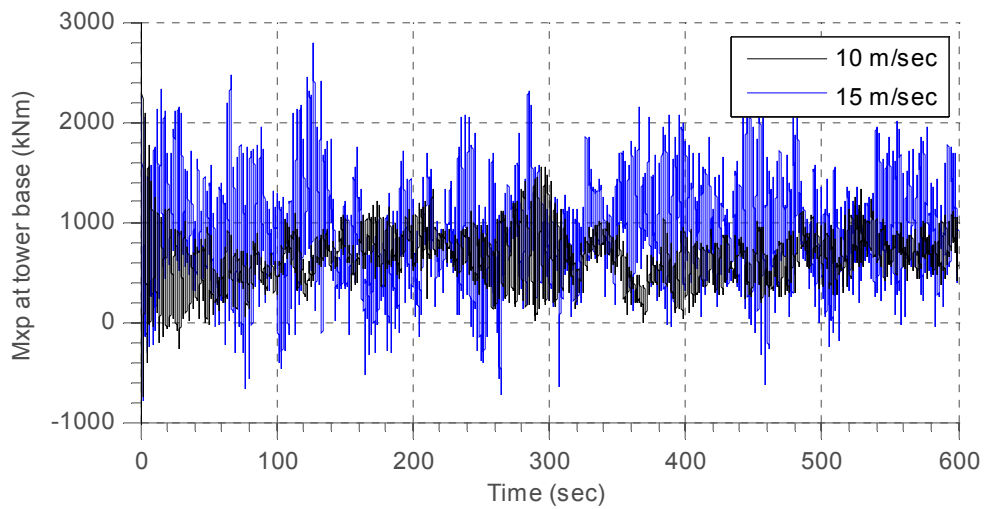
Διάγραμμα 2-47: Τέμνουσα κατά x στη βάση του πυλώνα



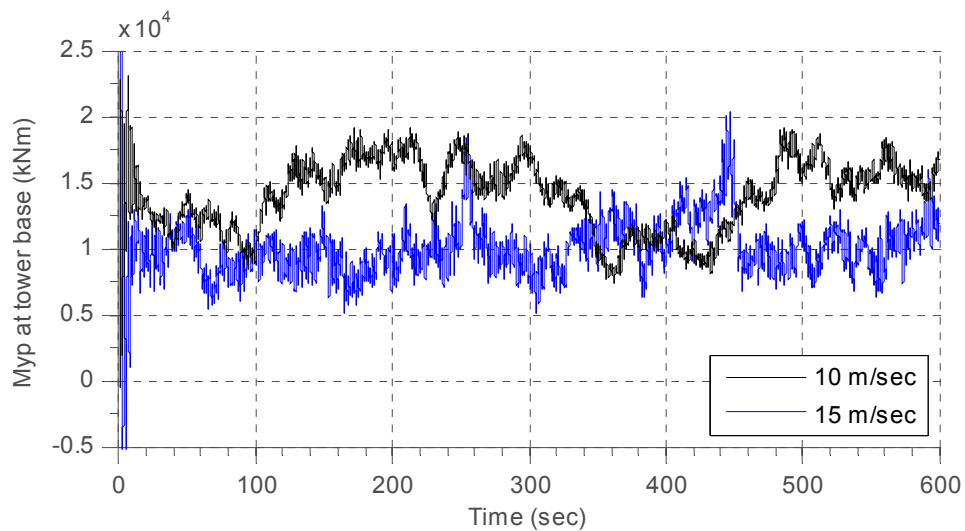
Διάγραμμα 2-48: Τέμνουσα κατά y στη βάση του πυλώνα



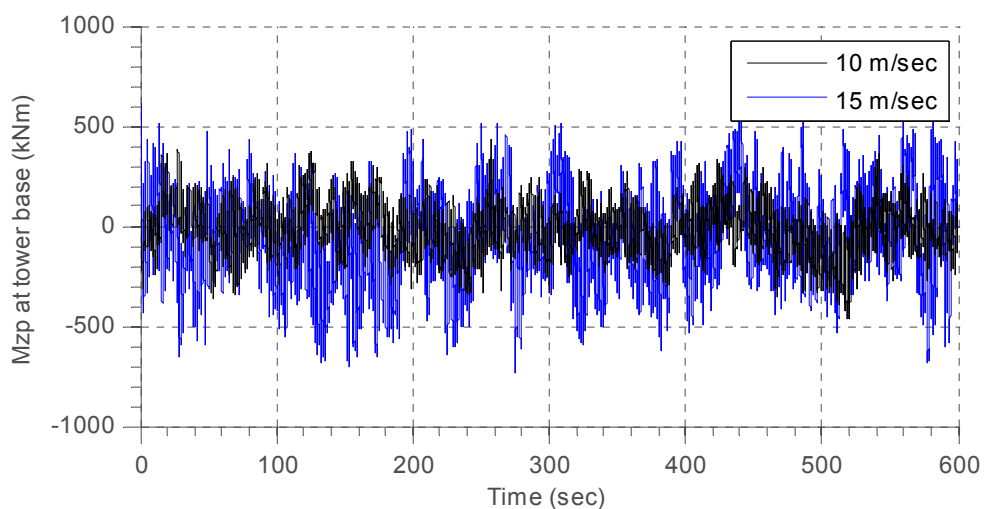
Διάγραμμα 2-49: Αξονική δύναμη στη βάση του πυλώνα



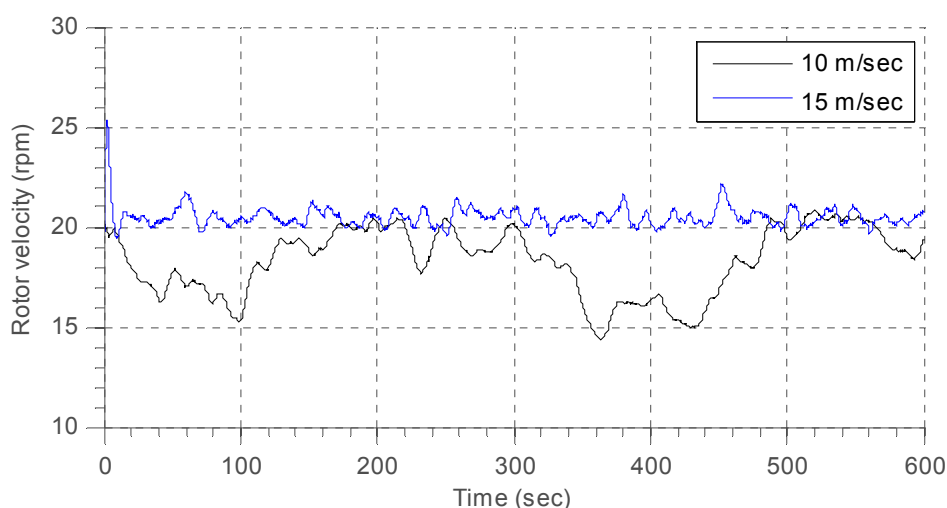
Διάγραμμα 2-50: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-51: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-52: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στη βάση του πυλώνα

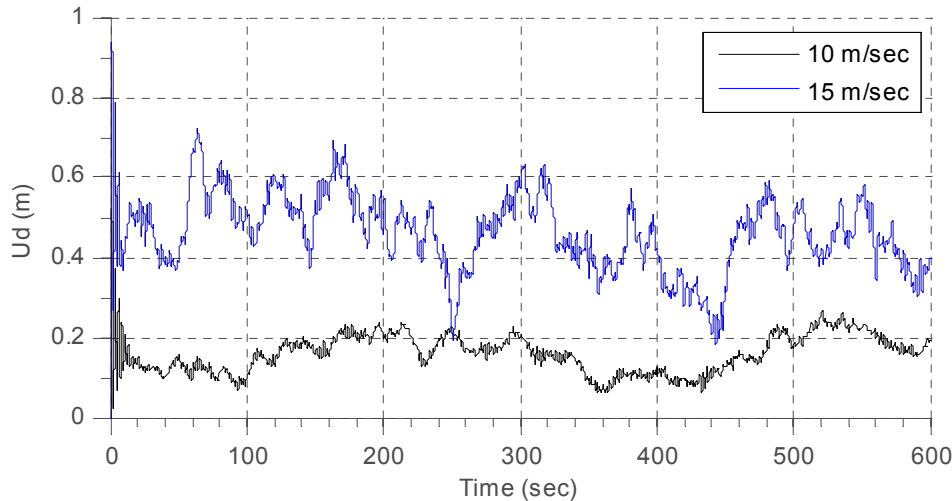


Διάγραμμα 2-53: Κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

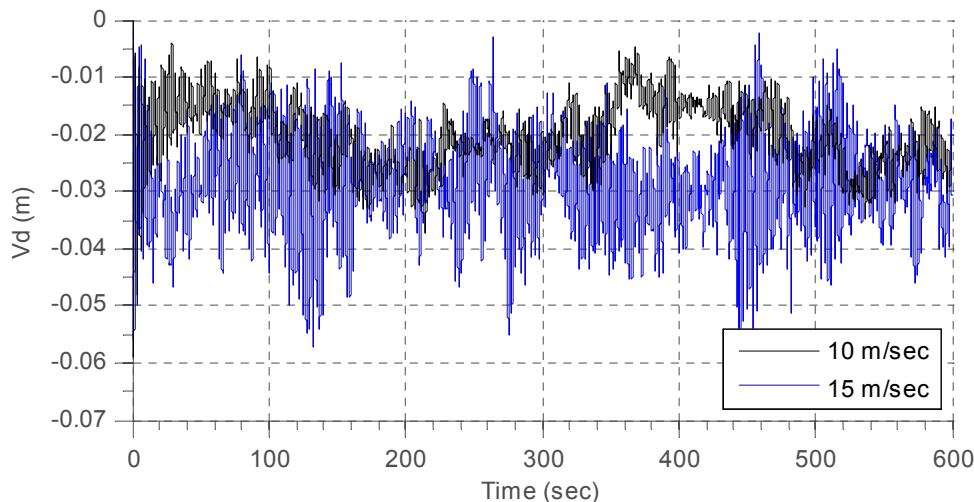
Η τέμνουσα κατά  $x$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-41) που οφείλεται στη δύναμη αντίστασης των πτερυγίων (*drag force*) και κατ' επέκταση και η μετακίνηση στην ίδια διεύθυνση (Διάγραμμα 2-39) είναι μικρότερες για μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας ανέμου. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του συστήματος κλίσης πτερυγίων (*pitch control*) που ενεργοποιείται για ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μεγαλύτερης της ονομαστικής (20.463 rpm), και ρυθμίζεται με τρόπο ώστε να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ίση με την ονομαστική, ούτως ώστε να αποφεύγεται η περιστροφή με πολύ υψηλές ταχύτητες.

- Σύγκριση απόκρισης για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s - 15 m/s, με τύρβη κατηγορίας Β, σε ανεμογεννήτρια χωρίς σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control) και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control).

Στα Διαγράμματα 2-54 και 2-55 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά x και y στην κορυφή του πυλώνα για ανέμους μέσων ταχυτήτων 10 m/s και 15 m/s.



Διάγραμμα 2-54: Μετακίνηση κατά x στην κορυφή του πυλώνα

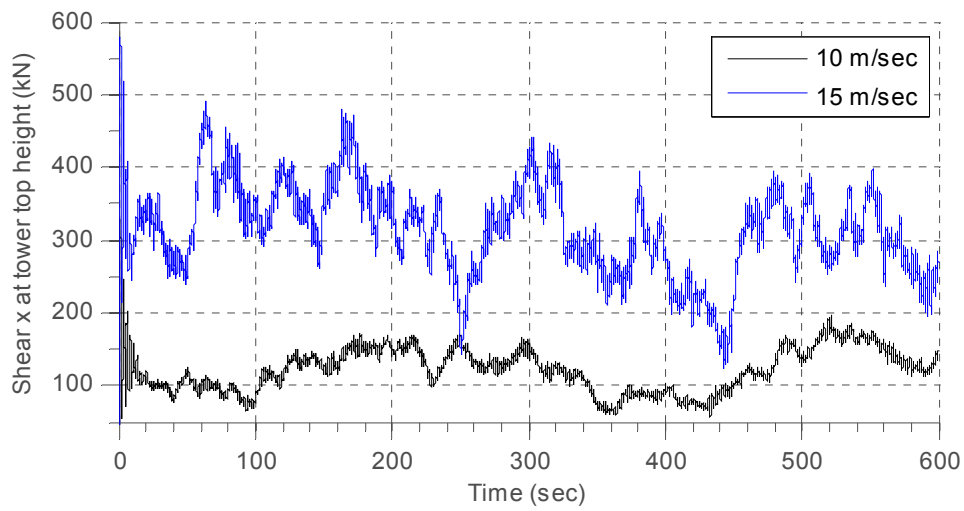


Διάγραμμα 2-55: Μετακίνηση κατά y στην κορυφή του πυλώνα

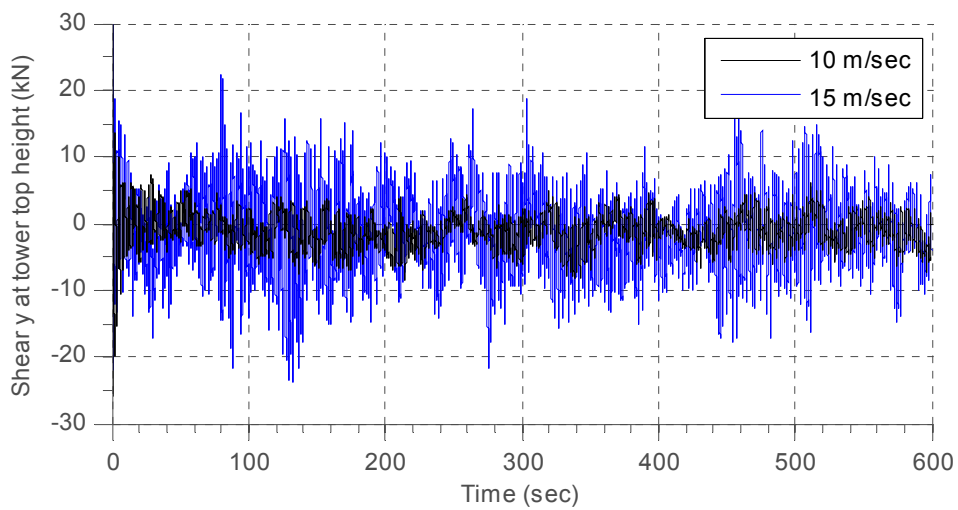
Παρατηρούμε ότι τόσο οι μέσες τιμές των μετακινήσεων όσο και οι τυπικές αποκλίσεις τους στις δύο διευθύνσεις για μέση ταχύτητα 15 m/s είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι για ταχύτητα 10 m/s αφού η ανεμογεννήτρια σε αυτή την ανάλυση δεν διαθέτει σύστημα κλίσης πτερυγίων.

$$\begin{aligned} \bar{U}_{10} &= 0.1603\text{m}, \bar{U}_{15} = 0.4626\text{m}, \sigma_{10} = 0.0484\text{m}, \sigma_{15} = 0.0959\text{m} \\ \bar{V}_{10} &= -0.0202\text{m}, \bar{V}_{15} = -0.0287\text{m}, \sigma_{10} = 0.0061\text{m}, \sigma_{15} = 0.0087\text{m} \end{aligned} \quad (2-15)$$

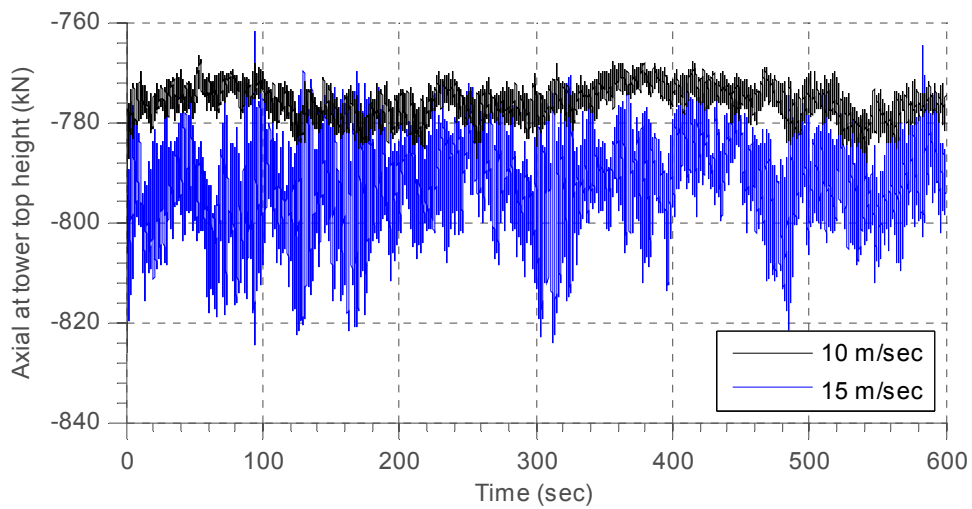
Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή και τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



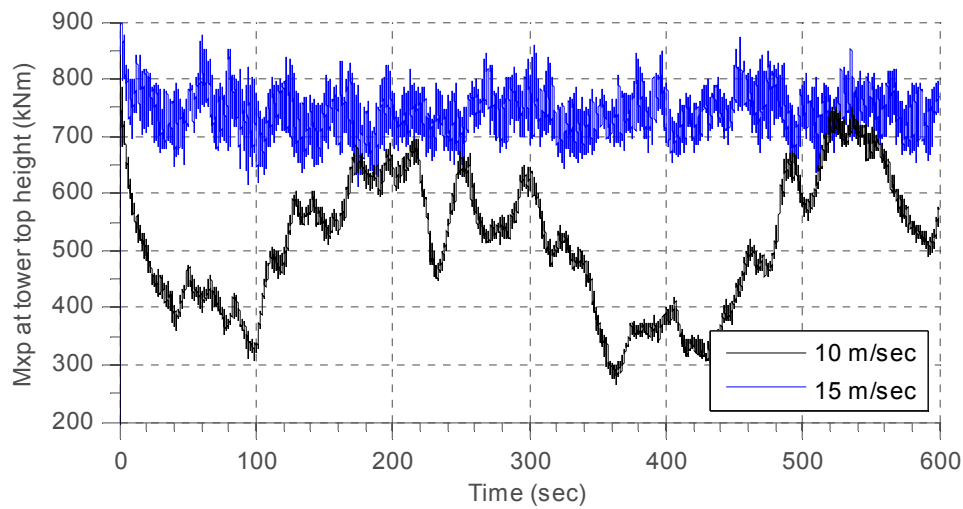
Διάγραμμα 2-56: Τέμνουσα κατά x στην κορυφή του πυλώνα



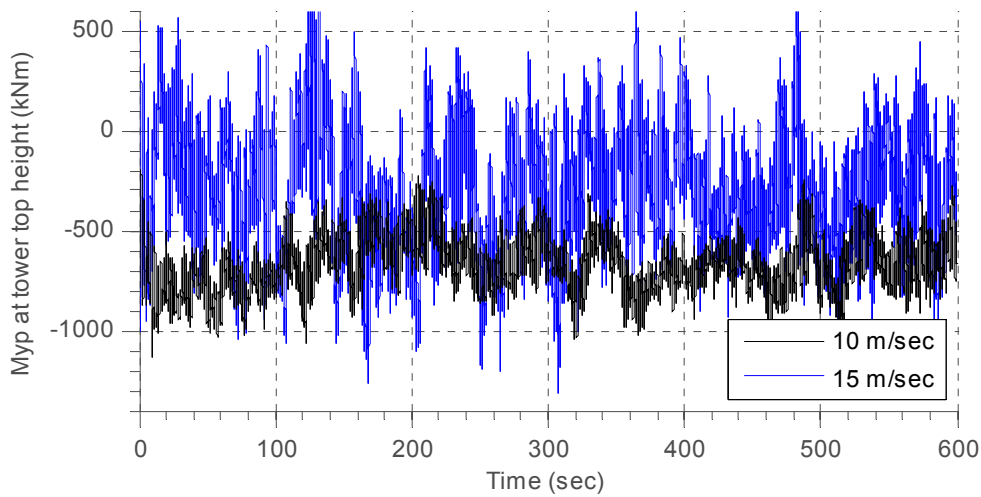
Διάγραμμα 2-57: Τέμνουσα κατά y στην κορυφή του πυλώνα



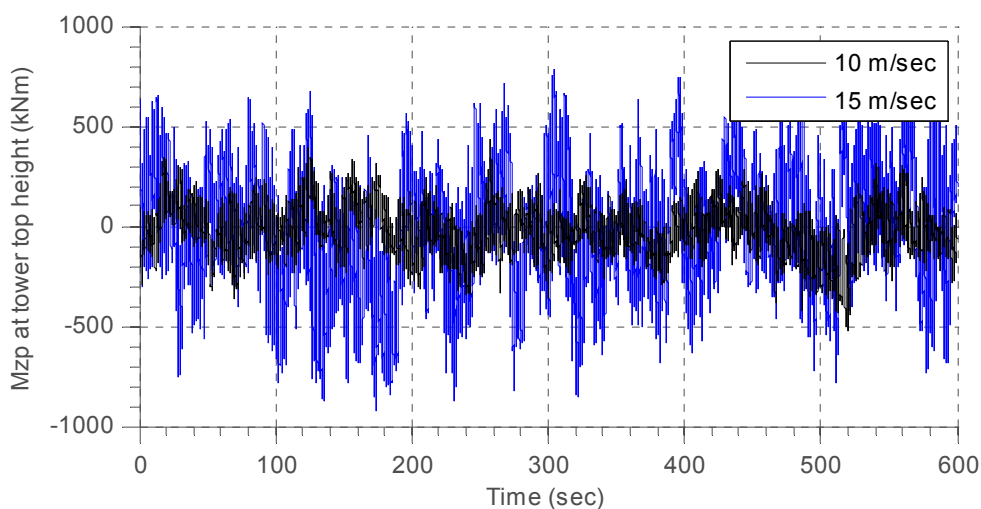
Διάγραμμα 2-58: Αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα



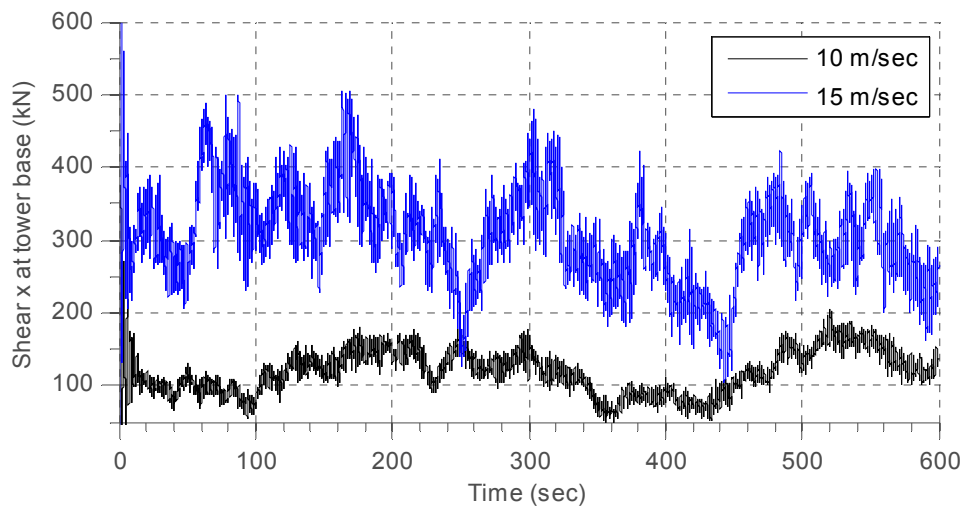
Διάγραμμα 2-59: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στην κορυφή του πυλώνα



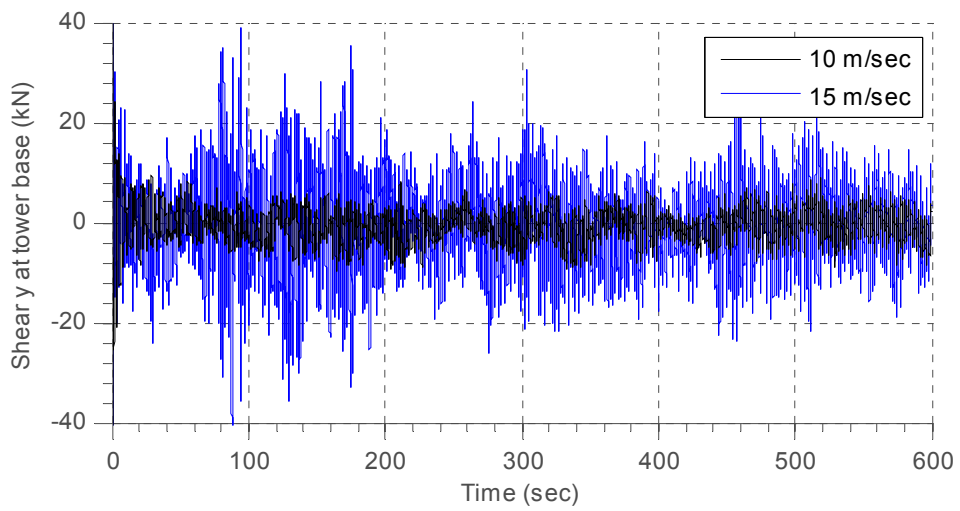
Διάγραμμα 2-60: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στην κορυφή του πυλώνα



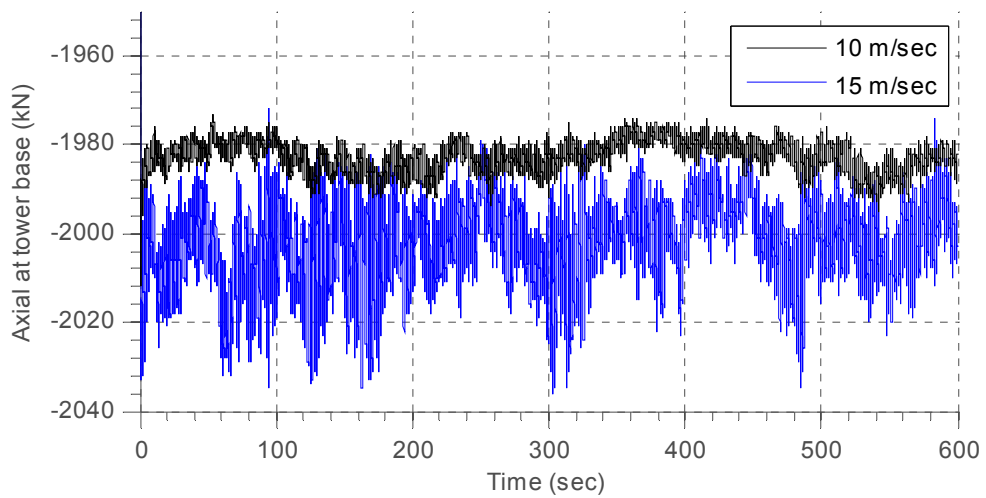
Διάγραμμα 2-61: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στην κορυφή του πυλώνα



Διάγραμμα 2-62: Τέμνουσα κατά x στη βάση του πυλώνα

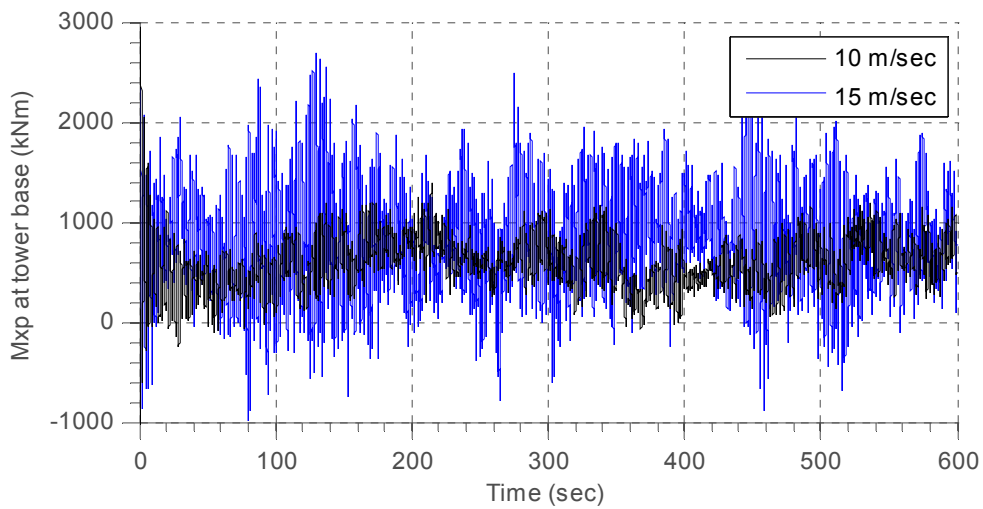


Διάγραμμα 2-63: Τέμνουσα κατά y στη βάση του πυλώνα

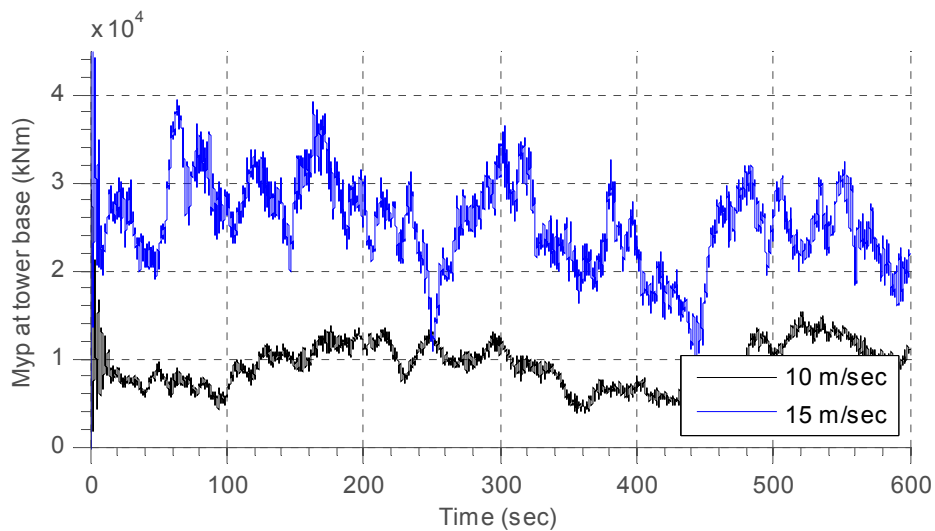


Διάγραμμα 2-64: Αξονική δύναμη στη βάση του πυλώνα

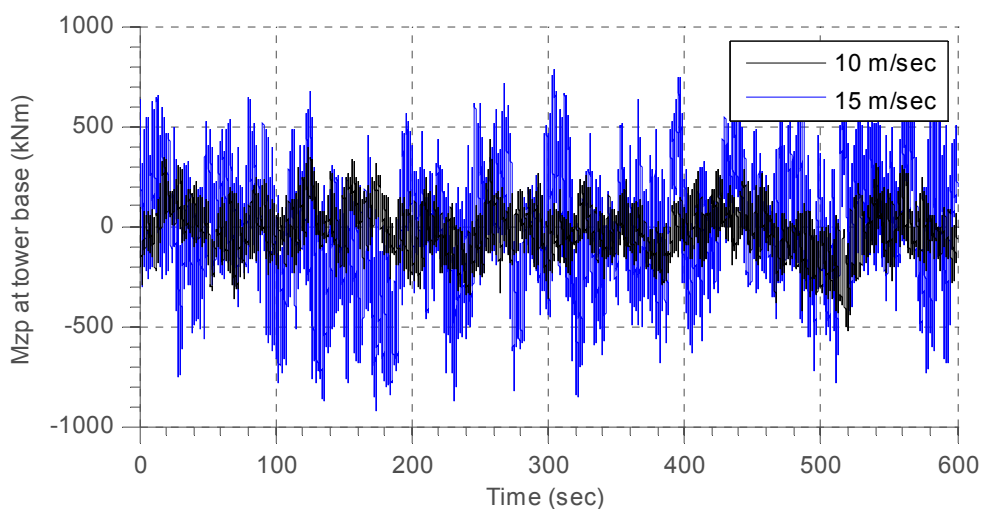




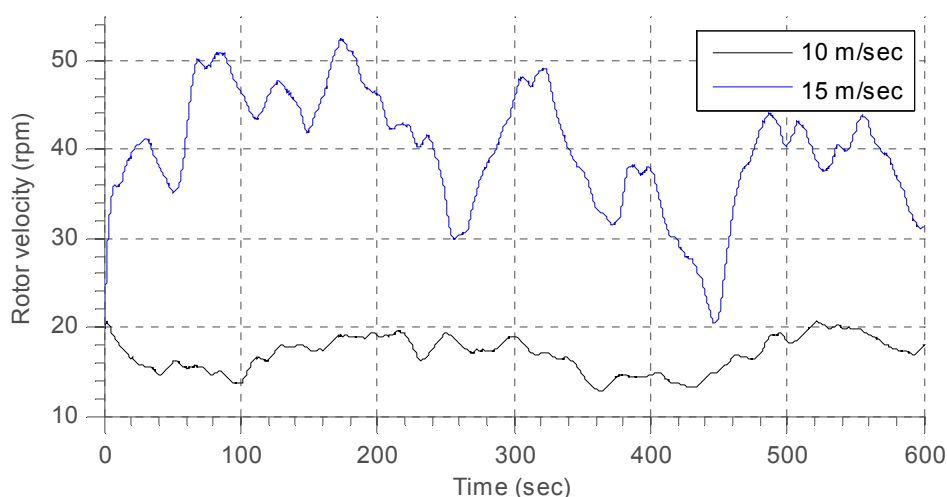
Διάγραμμα 2-65: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-66: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-67: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στη βάση του πυλώνα

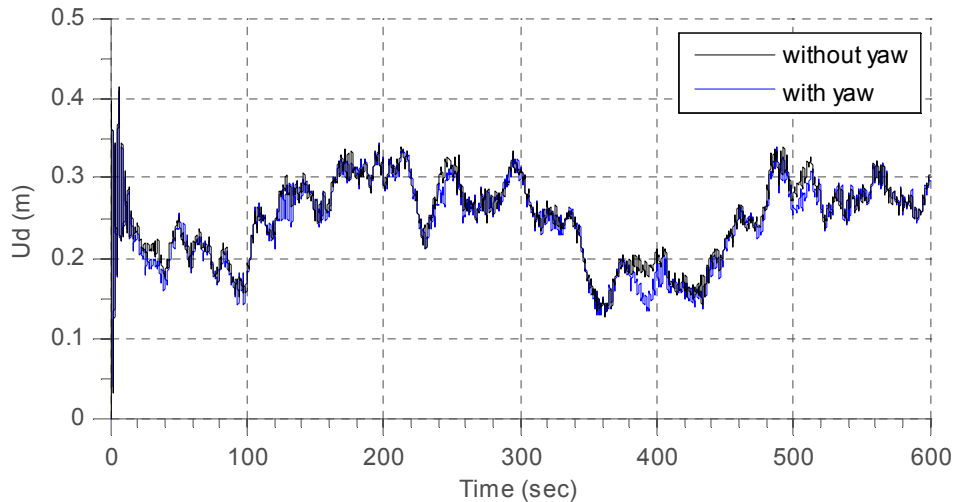


Διάγραμμα 2-68: Κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

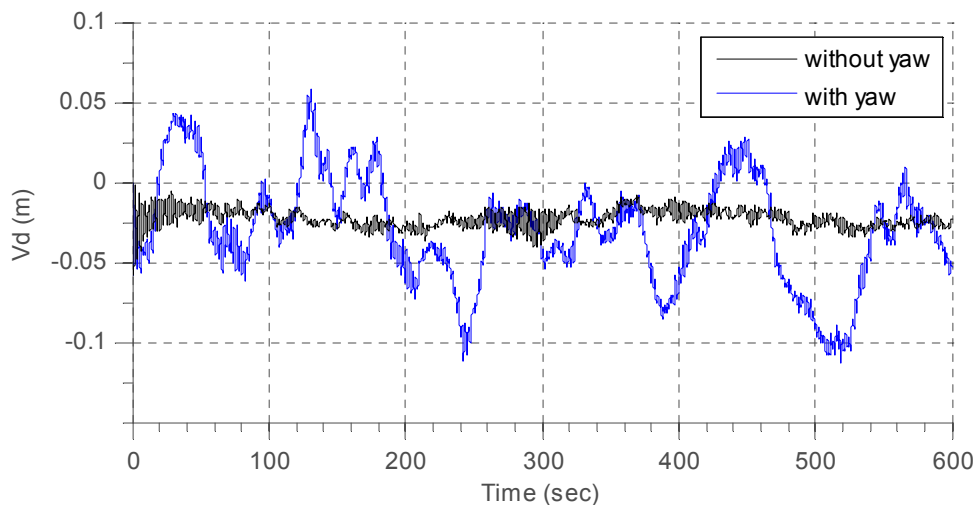
Για άνεμο μέσης ταχύτητας 10 m/s και σε ανεμογεννήτρια χωρίς το σύστημα κλίσης πτερυγίων, οι δυνάμεις, οι μετακινήσεις και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για ανεμογεννήτρια με σύστημα κλίσης πτερυγίων. Αυτό συμβαίνει διότι για ταχύτητα περιστροφής μικρότερη από την ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας (rated speed) το pitch control επιτρέπει τη διόρθωση στη γωνία πρόσπτωσης, προσδίδοντας συστροφή στο πτερύγιο ώστε να έχει πιο αεροδυναμική θέση ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Το αντίθετο συμβαίνει για άνεμο μέσης ταχύτητας 15 m/s. Για ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερη από την ονομαστική, το pitch control προσδίδει συστροφή στο πτερύγιο αλλά με τρόπο ώστε η ανεμογεννήτρια να συνεχίζει να λειτουργεί με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και να παράγει την ονομαστική ισχύ.

- Σύγκριση απόκρισης σε ανεμογεννήτρια με/χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control), με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control), για άνεμο μέσης ταχύτητας 10 m/s και τύρβη κατηγορίας B.

Στα Διαγράμματα 2-69 και 2-70 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά x και y στην κορυφή του πυλώνα σε ανεμογεννήτρια με και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου.



Διάγραμμα 2-69: Μετακίνηση κατά x στην κορυφή του πυλώνα

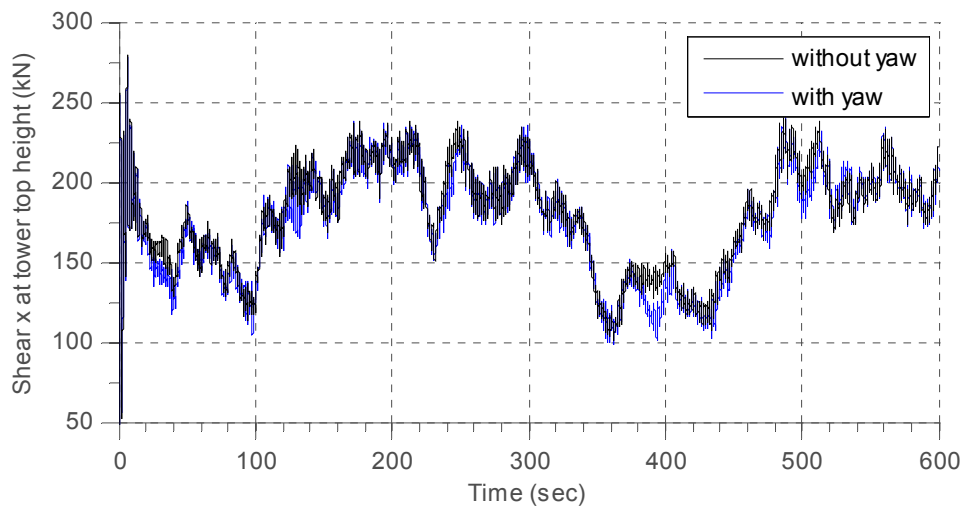


Διάγραμμα 2-70: Μετακίνηση κατά y στην κορυφή του πυλώνα

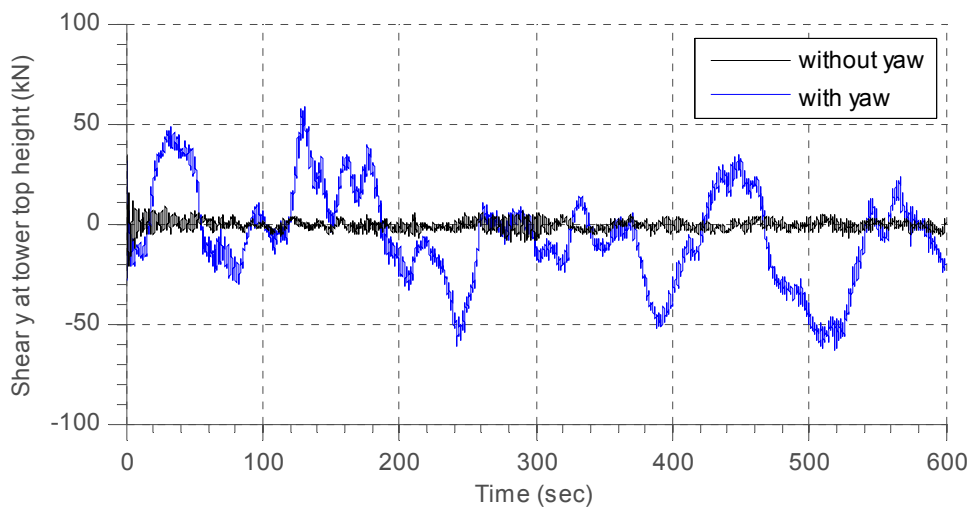
Παρατηρούμε ότι η ανεμογεννήτρια με σύστημα περιστροφής της ατράκτου επηρεάζεται αισθητά από την τυρβώδη συνιστώσα του ανέμου στη διεύθυνση y αφού περιστρέφεται και παραλαμβάνει στο επίπεδο της και τον άνεμο κατά y. Έτσι ενώ οι μέσες τιμές της μετακίνησης είναι παρόμοιες στις δύο περιπτώσεις, η τυπική απόκλιση της μετακίνησης κατά y σε ανεμογεννήτρια με σύστημα περιστροφής είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με την ανεμογεννήτρια χωρίς σύστημα περιστροφής.

$$\begin{aligned} \bar{U} &= 0.2494\text{m}, \bar{U}_{yaw} = 0.2442\text{m}, \sigma = 0.0508\text{m}, \sigma_{yaw} = 0.0525\text{m} \\ \bar{V} &= -0.0228\text{m}, \bar{V}_{yaw} = -0.0297\text{m}, \sigma = 0.0058\text{m}, \sigma_{yaw} = 0.0337\text{m} \end{aligned} \quad (2-16)$$

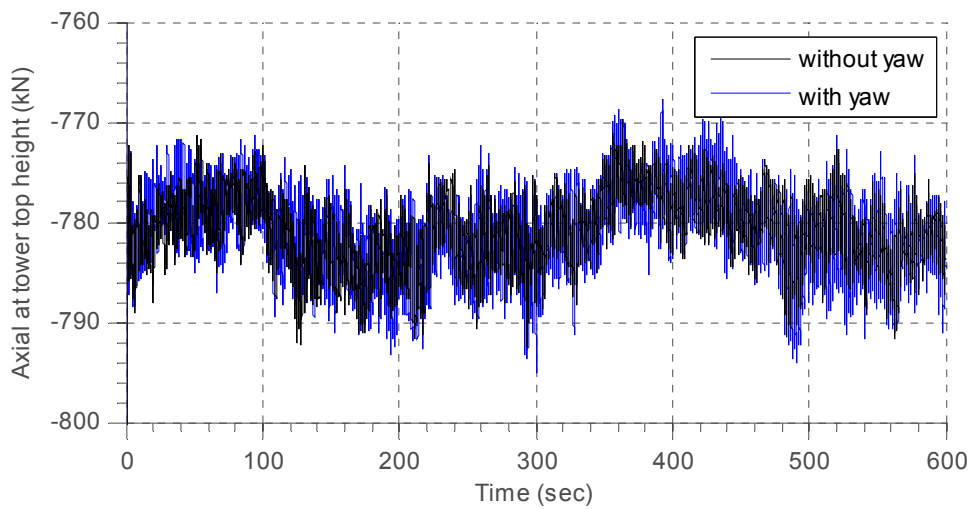
Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή και τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



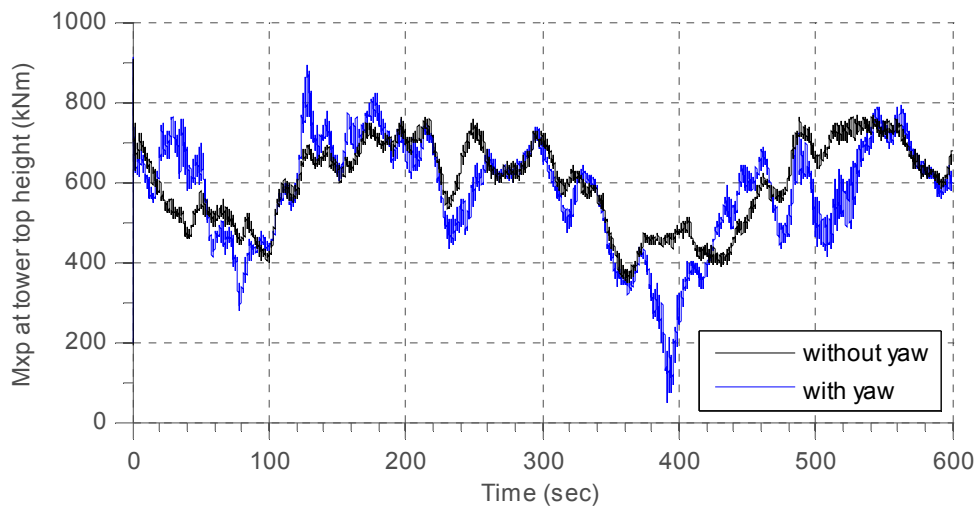
Διάγραμμα 2-71: Τέμνουσα κατά x στην κορυφή του πυλώνα



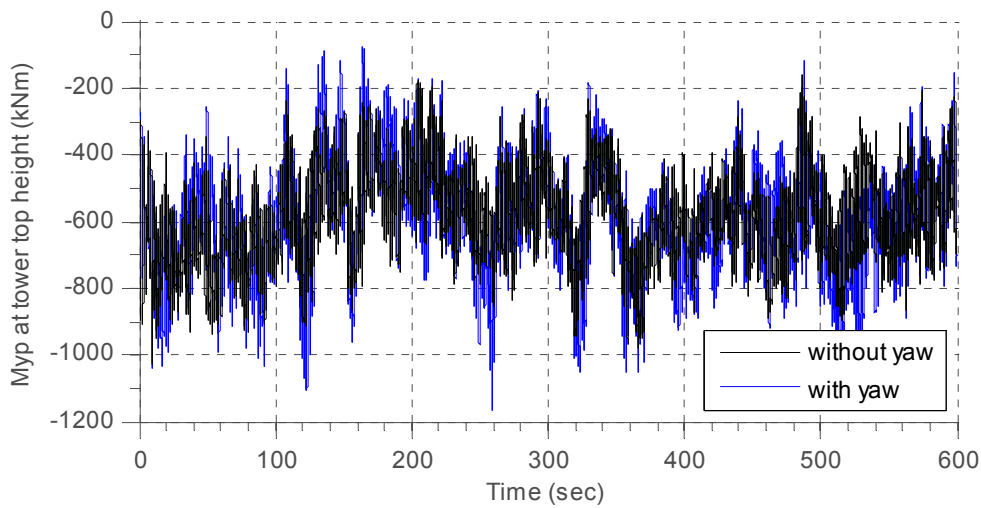
Διάγραμμα 2-72: Τέμνουσα κατά y στην κορυφή του πυλώνα



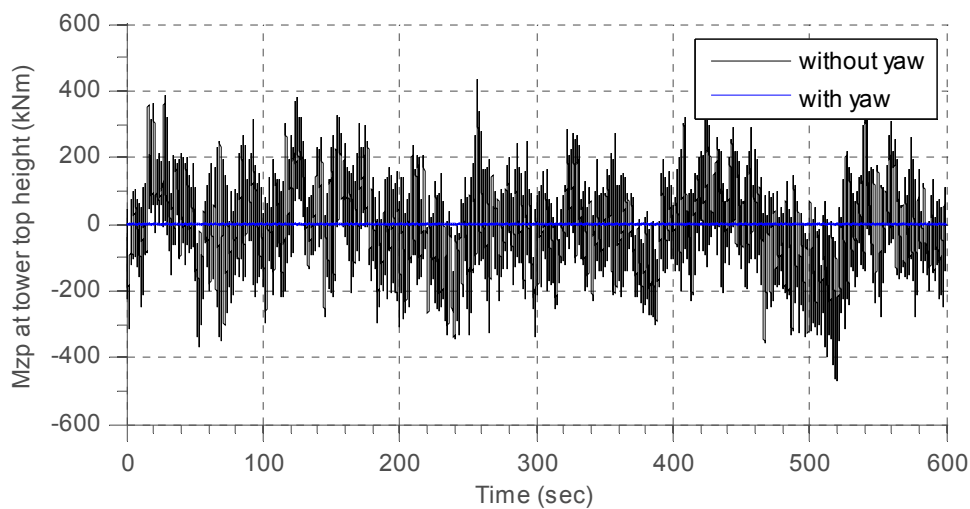
Διάγραμμα 2-73: Αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα



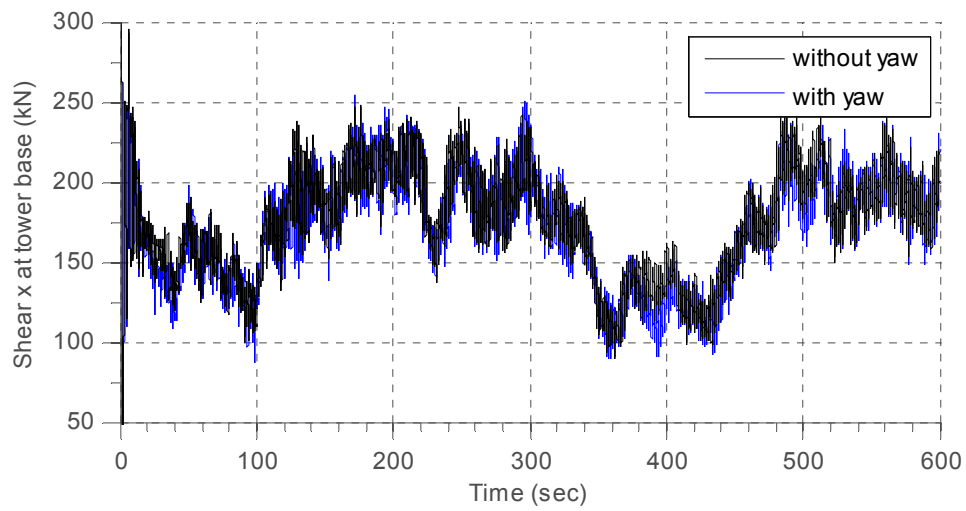
Διάγραμμα 2-74: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στην κορυφή του πυλώνα



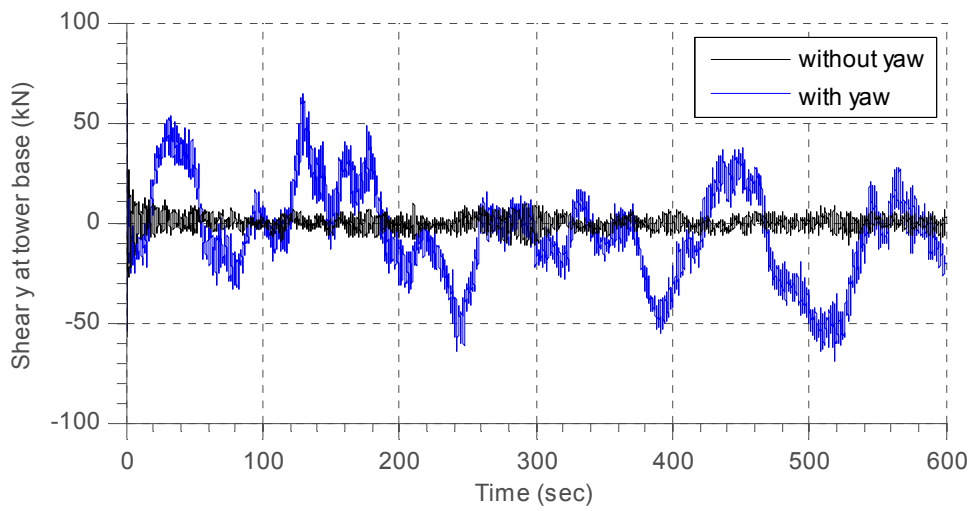
Διάγραμμα 2-75: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στην κορυφή του πυλώνα



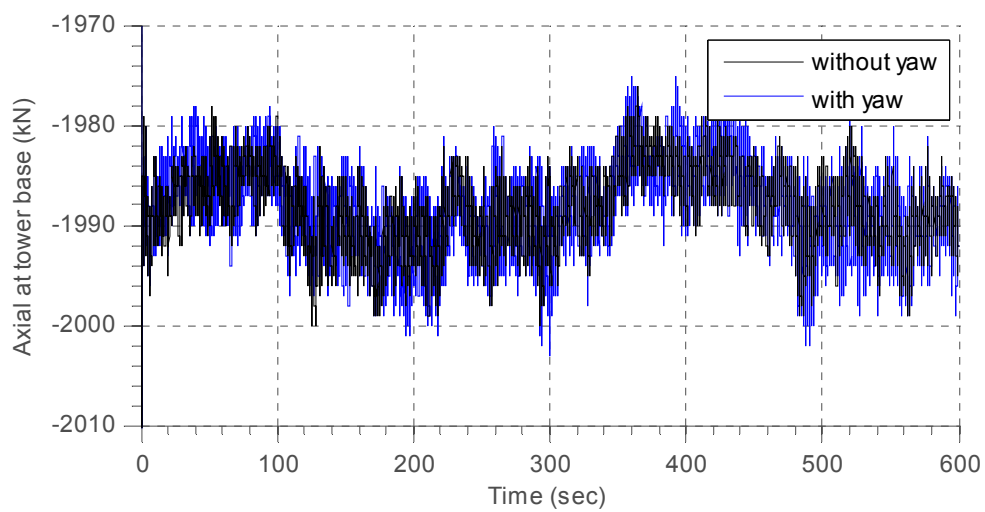
Διάγραμμα 2-76: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στην κορυφή του πυλώνα



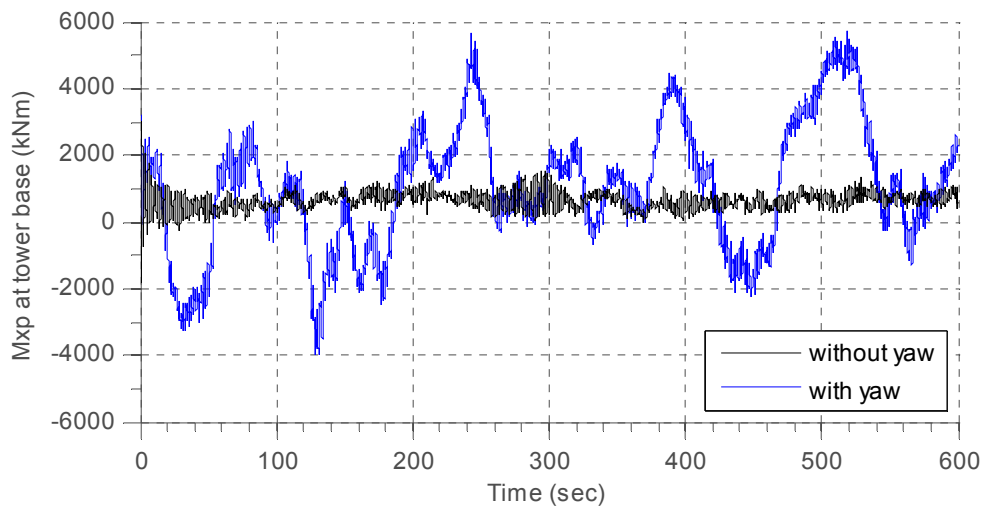
Διάγραμμα 2-77: Τέμνουσα κατά x στη βάση του πυλώνα



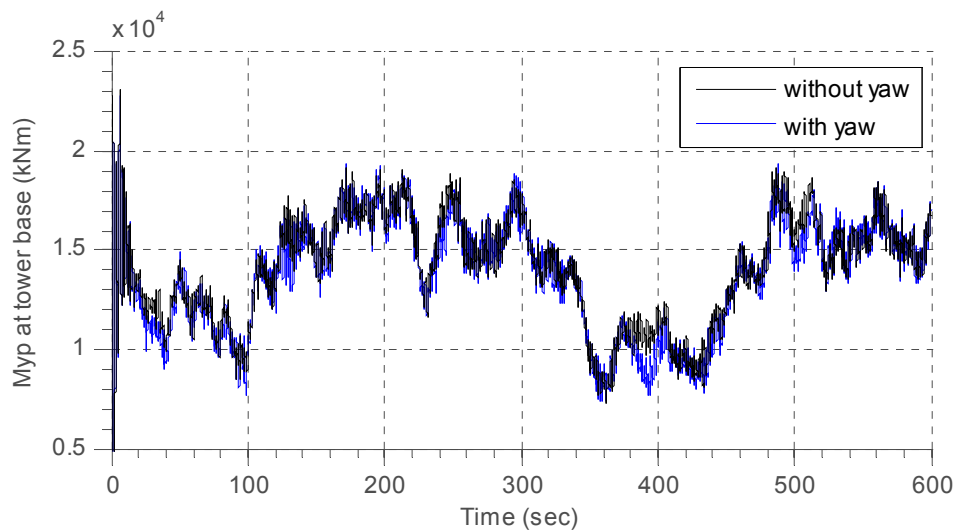
Διάγραμμα 2-78: Τέμνουσα κατά y στη βάση του πυλώνα



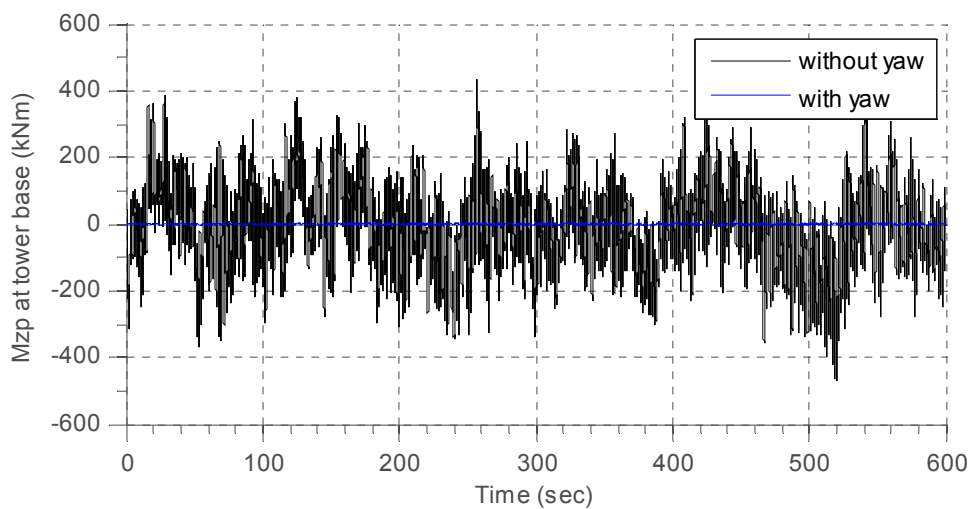
Διάγραμμα 2-79: Αξονική δύναμη στη βάση του πυλώνα



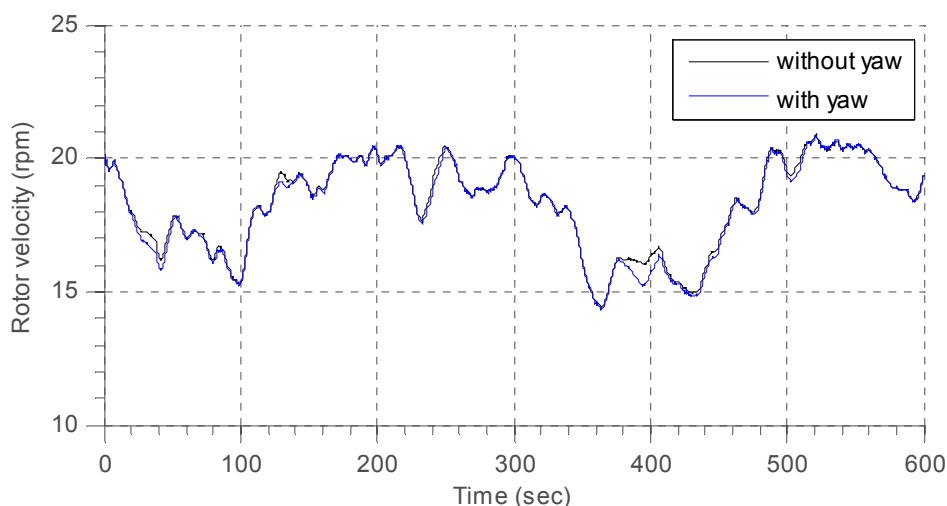
Διάγραμμα 2-80: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στη βάση του πυλώνα



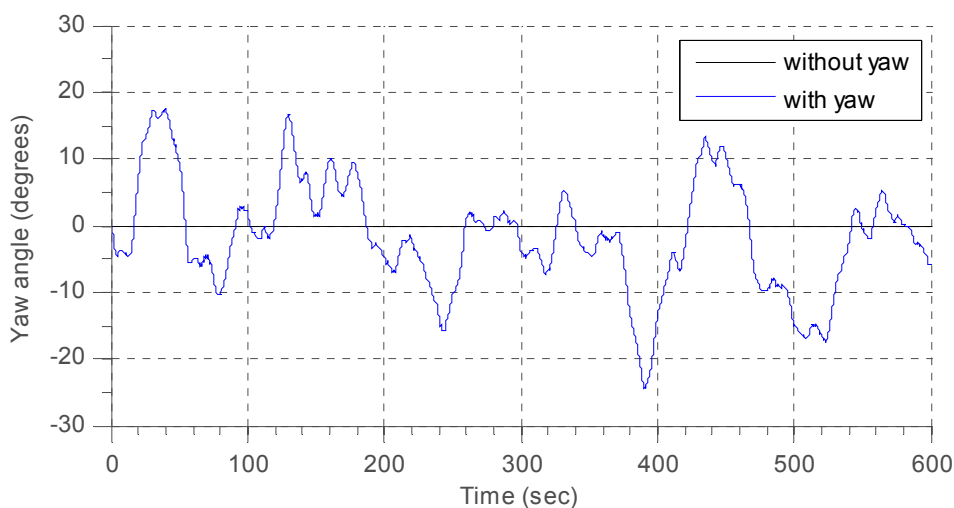
Διάγραμμα 2-81: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-82: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-83: Κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα



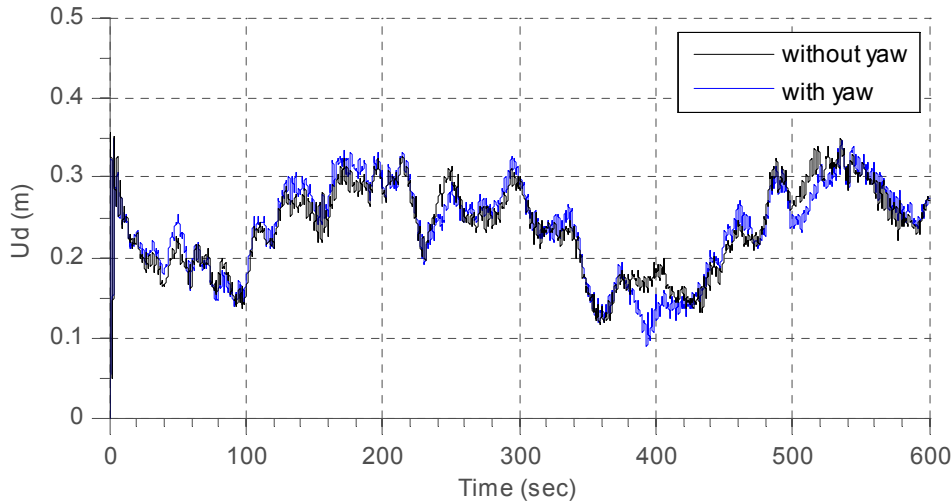
Διάγραμμα 2-84: Οριζόντια γωνία στροφής της ατράκτου

Η τέμνουσα κατά  $\gamma$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-72) λαμβάνει αξιοσημείωτες τιμές πλέον για την ανεμογεννήτρια με σύστημα περιστροφής της ατράκτου και ως αποτέλεσμα και η ροπή  $M_{xx}$  στη βάση (Διάγραμμα 2-80). Επιπλέον, η ροπή  $M_{xx}$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-74) αυξάνεται αφού η τέμνουσα κατά  $\gamma$  (Διάγραμμα 2-72) λόγω της αντίστασης του ανέμου ασκείται στον άξονα του δρομέα, απέχει κατακόρυφα 1.61 m από την κορυφή του πυλώνα, και επομένως υπάρχει επιπρόσθετη ροπή. Τέλος ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της ανεμογεννήτριας με σύστημα προσανατολισμού είναι ότι η στρεπτική ροπή στη βάση (Διάγραμμα 2-82) και την κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-76) είναι μηδενική αφού η άτρακτος στρέφεται διαρκώς κατά τη φορά του ανέμου.

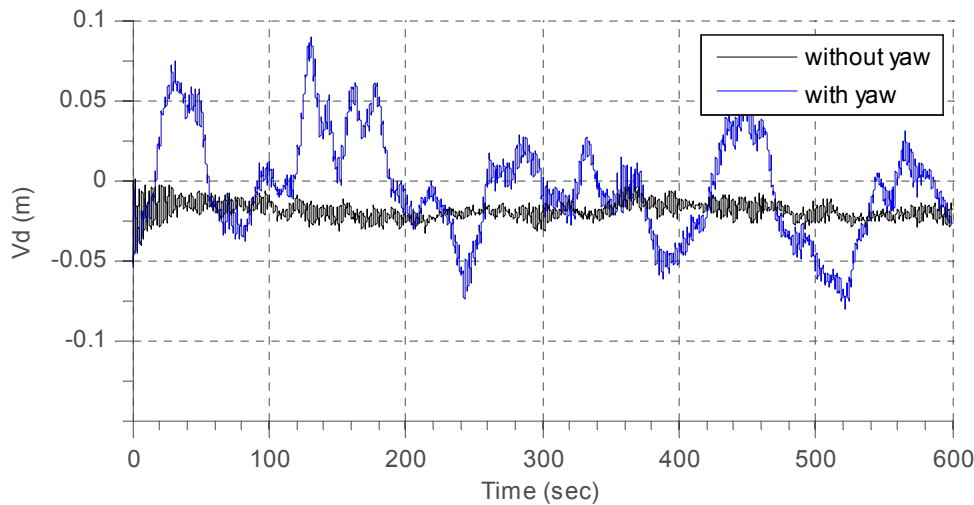


- Σύγκριση απόκρισης σε ανεμογεννήτρια με/χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου (yaw control), με σύστημα κλίσης πτερυγίων (pitch control), σε άνεμο μέσης ταχύτητας 10 m/s, με 20° οριζόντια γωνία ανέμου και τύρβη κατηγορίας B.

Στα Διαγράμματα 2-85 και 2-86 παρουσιάζονται οι μετακινήσεις κατά x και y στην κορυφή του πυλώνα σε ανεμογεννήτρια με και χωρίς σύστημα περιστροφής της ατράκτου.



Διάγραμμα 2-85: Μετακίνηση κατά x στην κορυφή του πυλώνα

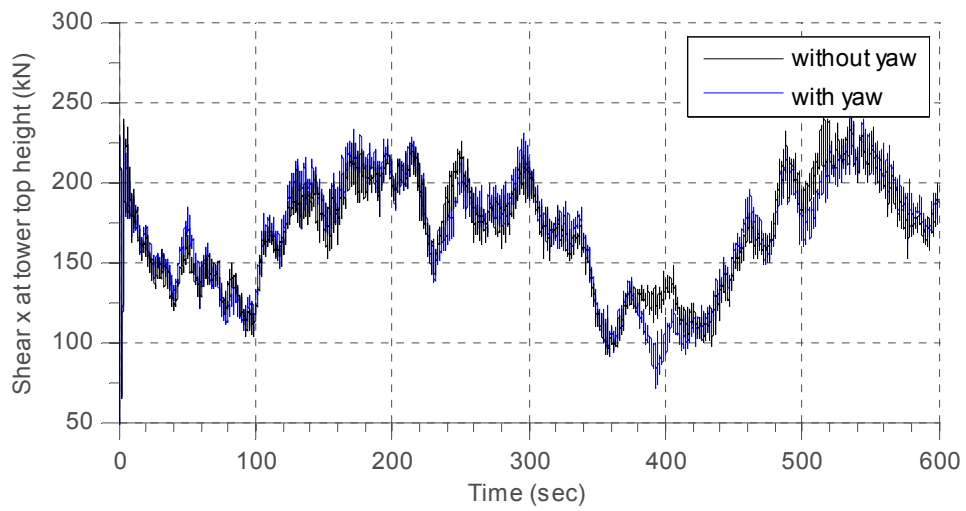


Διάγραμμα 2-86: Μετακίνηση κατά y στην κορυφή του πυλώνα

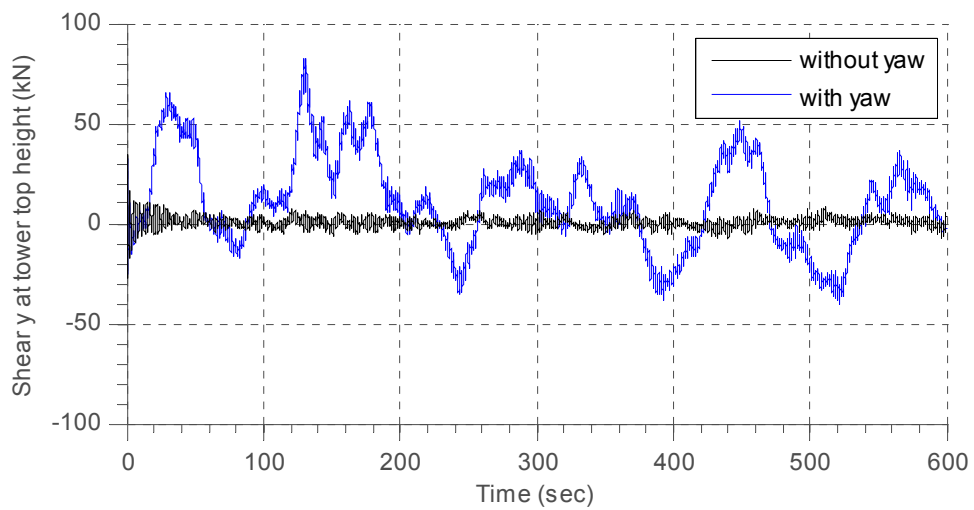
Παρατηρούμε ότι μετακινήσεις στη διεύθυνση y είναι αυξημένες για την ανεμογεννήτρια με σύστημα περιστροφής της ατράκτου αφού περιστρέφεται και παραλαμβάνει στο επίπεδο της τον άνεμο 20° μοιρών.

$$\begin{aligned} \bar{U} &= 0.2363\text{m}, \bar{U}_{yaw} = 0.2383\text{m}, \sigma = 0.0540\text{m}, \sigma_{yaw} = 0.0574\text{m} \\ \bar{V} &= -0.0192\text{m}, \bar{V}_{yaw} = -0.0044\text{m}, \sigma = 0.0054\text{m}, \sigma_{yaw} = 0.0316\text{m} \end{aligned} \quad (2-17)$$

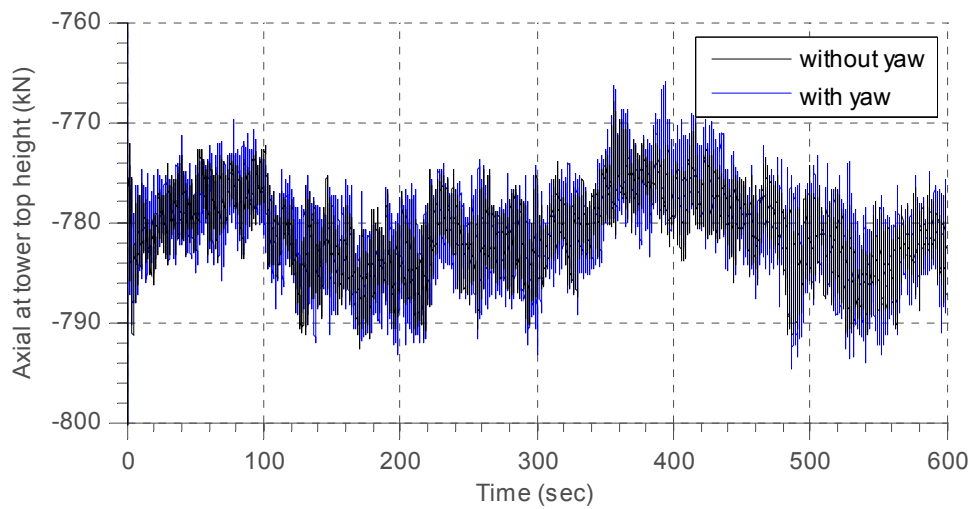
Ακολουθούν οι χρονοϊστορίες των εντατικών μεγεθών στην κορυφή και τη βάση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



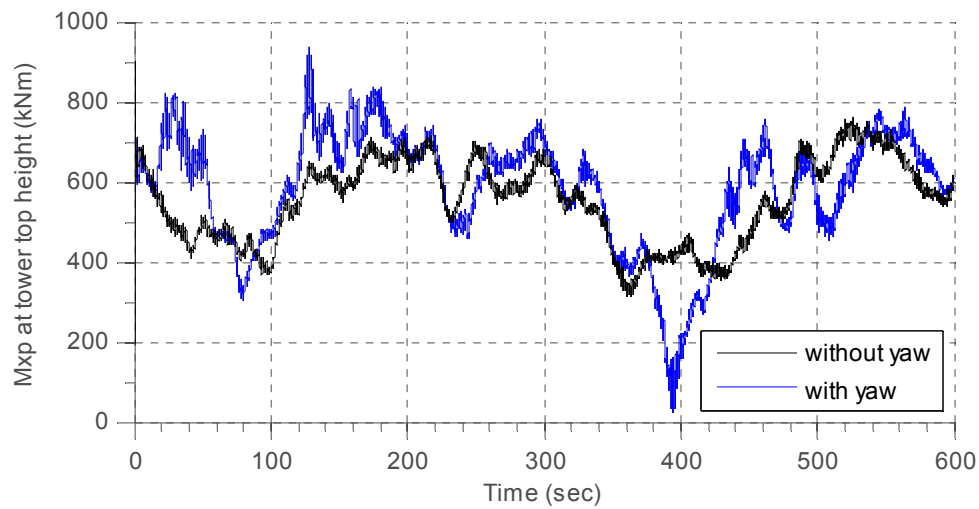
Διάγραμμα 2-87: Τέμνουσα κατά x στην κορυφή του πυλώνα



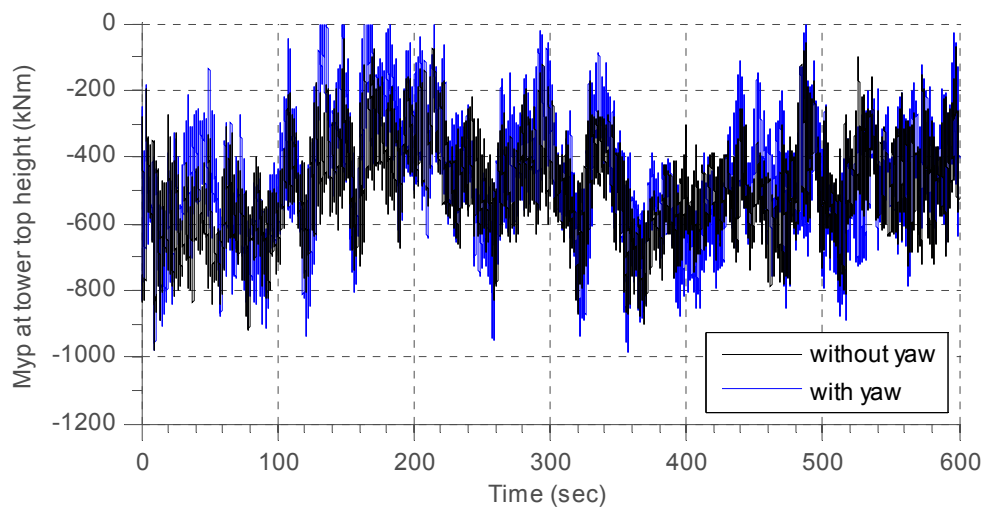
Διάγραμμα 2-88: Τέμνουσα κατά y στην κορυφή του πυλώνα



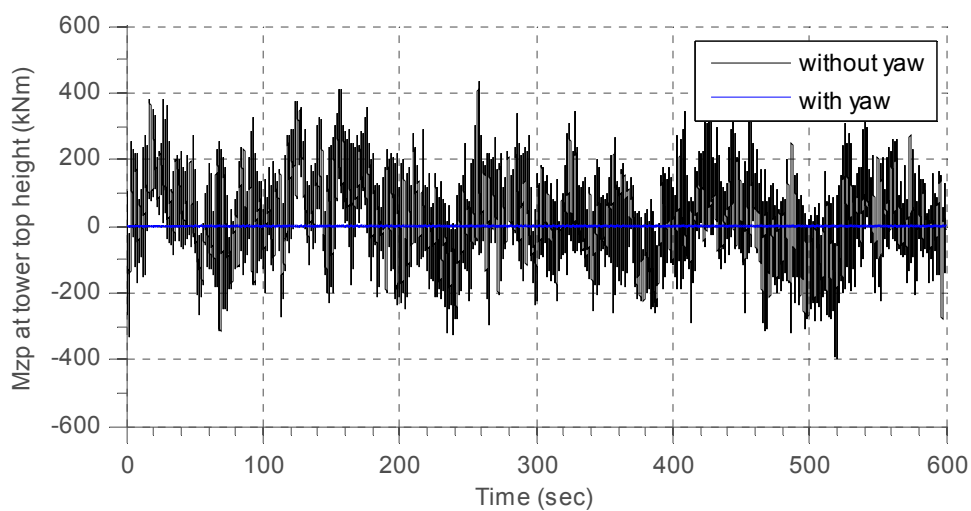
Διάγραμμα 2-89: Αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα



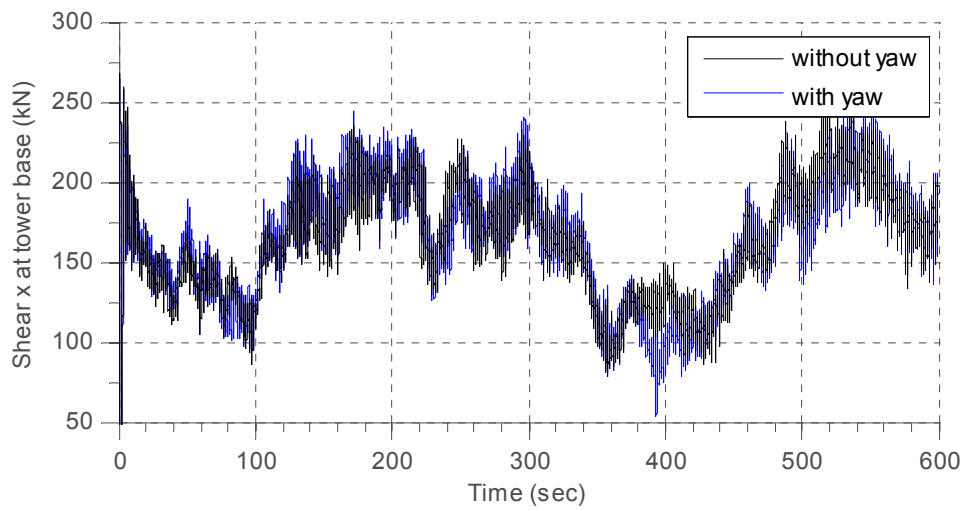
Διάγραμμα 2-90: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στην κορυφή του πυλώνα



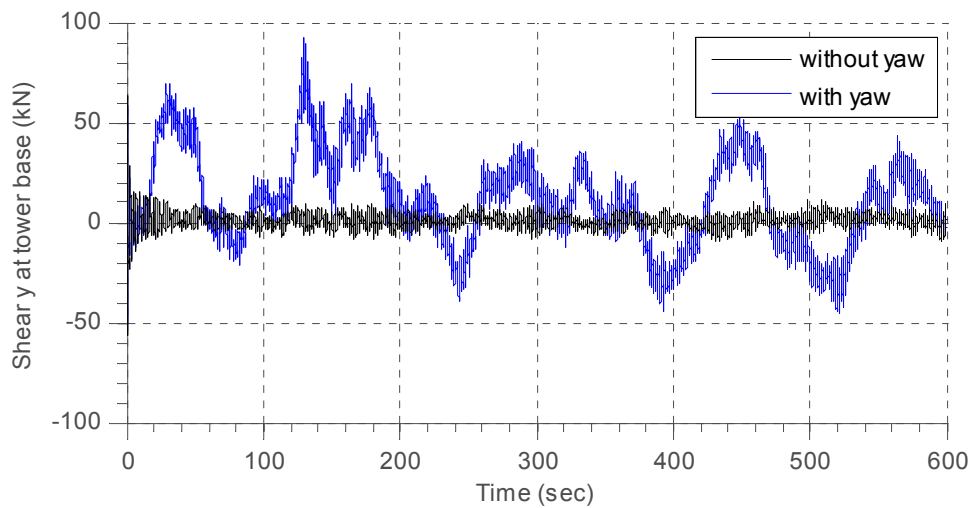
Διάγραμμα 2-91: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στην κορυφή του πυλώνα



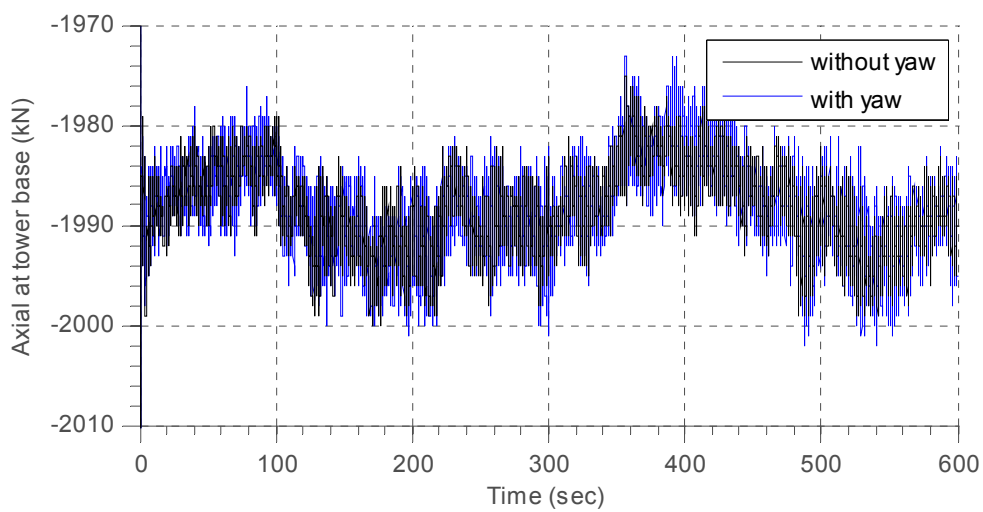
Διάγραμμα 2-92: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στην κορυφή του πυλώνα



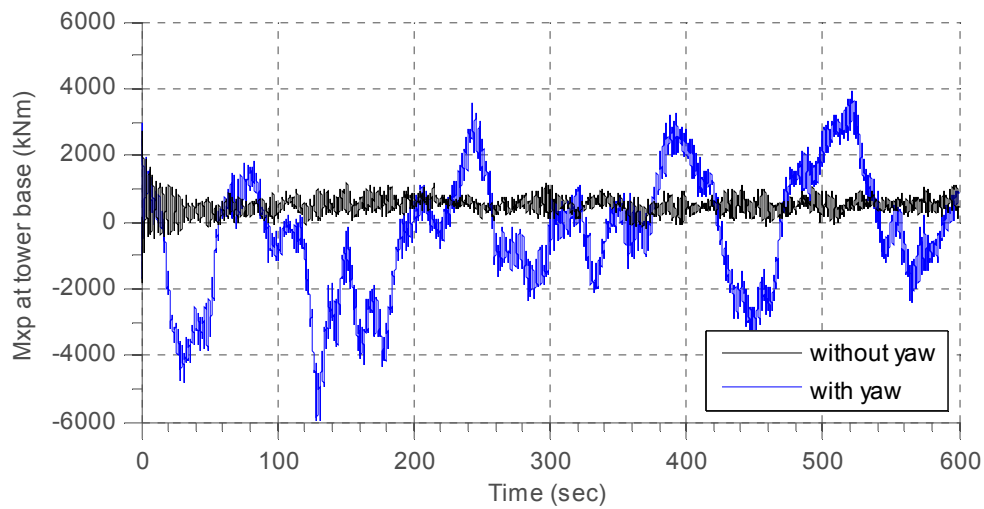
Διάγραμμα 2-93: Τέμνουσα κατά x στη βάση του πυλώνα



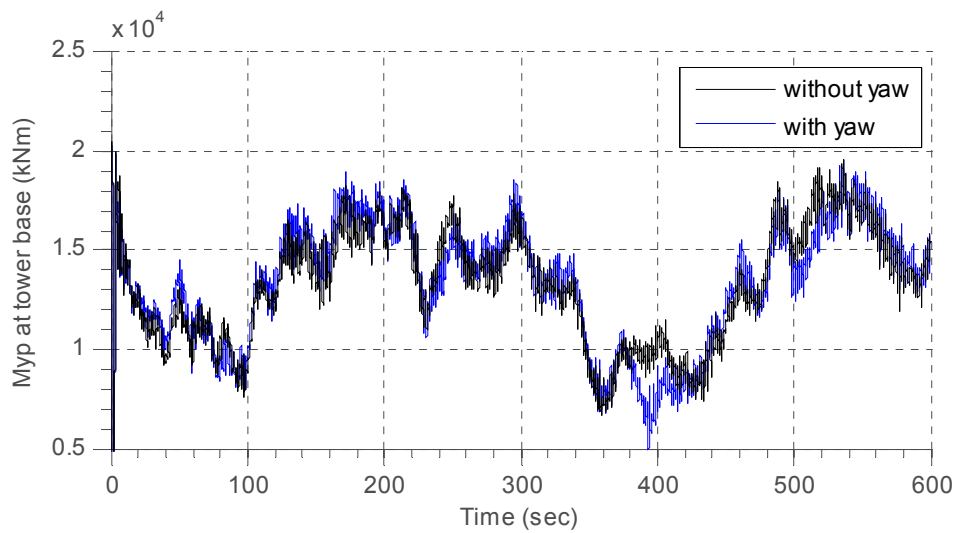
Διάγραμμα 2-94: Τέμνουσα κατά γ στη βάση του πυλώνα



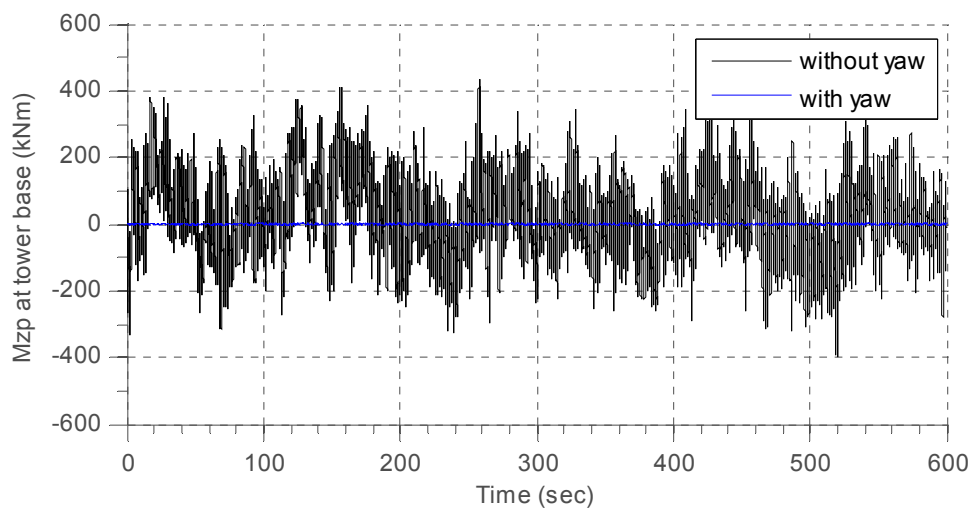
Διάγραμμα 2-95: Αξονική δύναμη στη βάση του πυλώνα



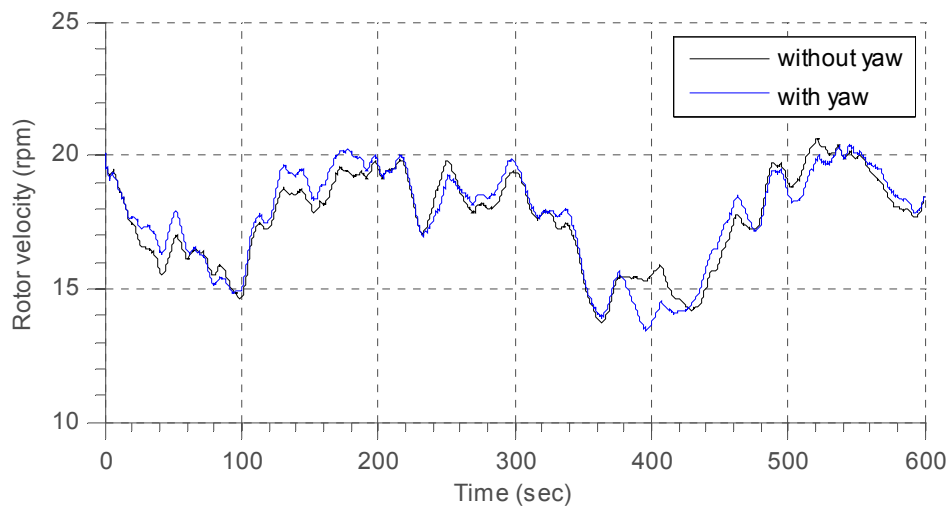
Διάγραμμα 2-96: Καμπτική ροπή περί τον άξονα x στη βάση του πυλώνα



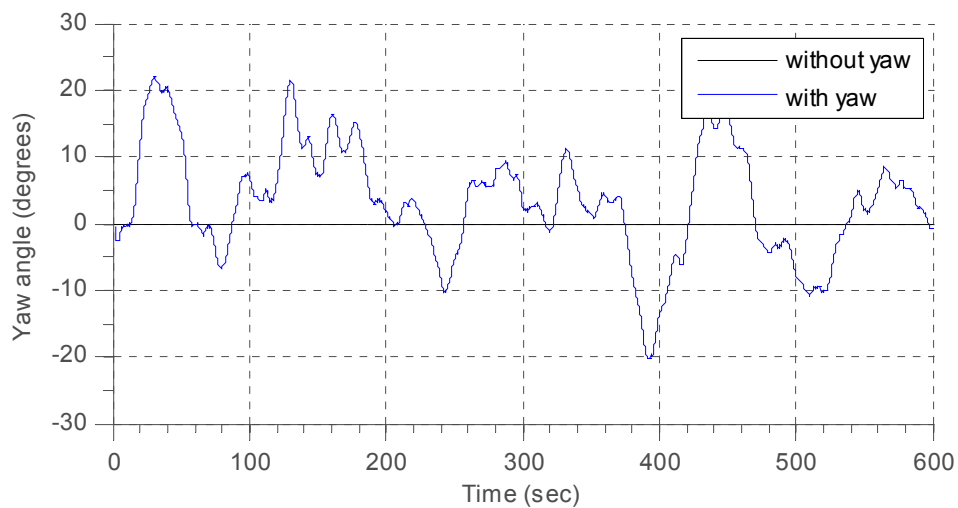
Διάγραμμα 2-97: Καμπτική ροπή περί τον άξονα y στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-98: Στρεπτική ροπή περί τον άξονα z στη βάση του πυλώνα



Διάγραμμα 2-99: Κυκλική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα



Διάγραμμα 2-100: Οριζόντια γωνία στροφής της ατράκτου

Η τέμνουσα κατά  $y$  στην κορυφή του πυλώνα (Διάγραμμα 2-88) και συνακόλουθα και η ροπή  $M_{xx}$  στη βάση του πυλώνα (Διάγραμμα 2-96) είναι αυξημένες για άνεμο  $20^\circ$  μοιρών σε σχέση με τον άνεμο  $0^\circ$  μοιρών για την ανεμογεννήτρια με σύστημα περιστροφής όπως είναι αναμενόμενο. Κατά τα λοιπά τα συμπεράσματα είναι ίδια με της προηγούμενης ανάλυσης με τον άνεμο  $0^\circ$  μοιρών με/χωρίς σύστημα περιστροφής.



## 3 ΠΥΛΩΝΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

### 3.1 Ο ΠΥΛΩΝΑΣ

Σήμερα ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα είναι ο κατεξοχήν χρησιμοποιούμενος τύπος πυλώνα για τις εγκαταστάσεις εμπορικών ανεμογεννητριών, κυρίως λόγω του μικρού χρόνου που απαιτείται για την ανέγερση του. Πυλώνες μικρού ύψους μπορούν να κατασκευαστούν από τις βιομηχανίες και να κοχλιωθούν στη θεμελίωση στο χώρο ανέγερσης. Οι υψηλότεροι πυλώνες (π.χ. με ύψος 100 m) κατασκευάζονται από έναν αριθμό από προκατασκευασμένα τμήματα που συνδέονται κοχλιωτά επί τόπου αποφεύγοντας τις συγκολλήσεις στο χώρο της ανέγερσης (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1: Ανέγερση πυλώνα με γερανό



Οι σωληνωτοί πυλώνες των μεγάλων ανεμογεννητριών έχουν συνήθως κυλινδρικό ή κολουροκωνικό σχήμα. Αποτελούνται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων μήκους που μπορεί να φτάσει και τα 20 m ανάλογα με τις δυνατότητες μεταφοράς και ανέγερσης. Κάθε προκατασκευασμένο τμήμα αποτελείται από έναν αριθμό ελασμάτων, συνήθως πλάτους 2 m, πάχους μεταξύ 10 έως 50 mm, τα οποία καμπυλώνονται στην τελική κυλινδρική μορφή τους σε ειδικά μηχανήματα. Ακολουθώς, τα δυο άκρα των καμπυλωμένων ελασμάτων συγκολλούνται μεταξύ τους με μια διαμήκη ραφή ενώ τα επιμέρους καμπυλωμένα ελάσματα συγκολλούνται μεταξύ τους με περιφερειακές ραφές, ενώ πραγματοποιούνται και ενδελεχείς ποιοτικοί έλεγχοι των συγκολλήσεων με μη καταστροφικούς ελέγχους (υπέρηχοι, ακτίνες Χ και οπτικοί έλεγχοι). Στα δύο άκρα του κάθε προκατασκευασμένου τμήματος, συγκολλάται ένας εσωτερικός δακτύλιος. Ειδικότερα, στο κατώτερο τμήμα του πυλώνα, ο δακτύλιος συνδέεται κοχλιωτά σε μια ειδική κατασκευή (foundation section), η οποία ενσωματώνεται στη βάση όταν διαστρώνεται το σκυρόδεμα του θεμελίου (Σχήμα 3-2). Στην κορυφή, το κουβούκλιο της ανεμογεννήτριας συνδέεται με τον πυλώνα μέσω του αζιμούθιου δακτύλιου (azimuth flange). Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής των προκατασκευασμένων τμημάτων είναι η επιφανειακή προστασία της εξωτερικής τους επιφάνειας, έναντι διάβρωσης μέσω αμμοβολής, γαλβανισμού (thermally applied zinc coating), και επίστρωσης με δυο έως τρεις στρώσεις βαφής.



Σχήμα 3-2: Θεμελίωση πυλώνα

Η διαμόρφωση τμημάτων διαμέτρου μέχρι 4 m δεν απαιτεί εξειδικευμένα μηχανήματα πέρα από εκείνα που διαθέτουν οι κατασκευαστές. Για πυλώνες ύψους μεγαλύτερου των 90 m, η διάμετρος του πυλώνα στη βάση του θα πρέπει να ξεπεράσει τα 4.5 m, ενώ το πάχος του ελάσματος θα πρέπει να υπερβαίνει τα 40 mm. Τέτοια πάχη απαιτούν πιο ισχυρά μηχανήματα. Επιπλέον, εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου τους, τα κατώτερα τμήματα του πυλώνα δεν θα μπορούν να μεταφερθούν οδικώς στο χώρο ανέγερσης (Σχήμα 3-3). Τα διάφορα τμήματα που κατασκευάζονται στα εργοστάσια, μεταφέρονται και ανεγείρονται στην επιλεγόμενη θέση με τη βοήθεια γερανού ενώνοντας τους αντίστοιχους δακτυλίους με προεντεταμένους κοχλίες. Μια πιθανή λύση για ύψη μεγαλύτερα των 90-100m είναι η κατασκευή δικτυωτών πυλώνων ή ενδεχομένως και από οπλισμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 3-3: Μεταφορά τμημάτων οδικώς στο χώρο ανέγερσης

### 3.2 Η ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

Ο χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων στοιχείων τα οποία μεταφέρονται στο εργοστάσιο και συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες μέσω κυκλικών δακτυλίων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4. Η χρήση προεντεταμένων κοχλίων είναι αναγκαία ώστε να αυξηθεί η αντοχή τους έναντι του φαινομένου της κόπωσης που προκύπτει από τη δυναμική φύση των ανεμοπιέσεων και την συνεπαγόμενη κυκλική φόρτιση που οι κοχλίες υφίστανται.



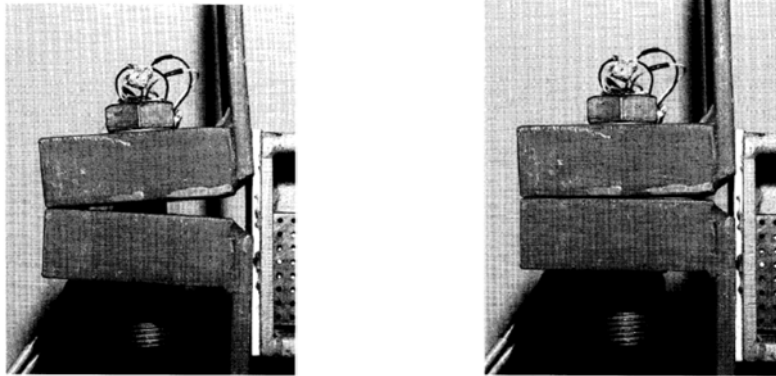
Σχήμα 3-4: Δακτυλιοειδή πέλματα σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας πυλώνα ανεμογεννήτριας

### 3.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΟΧΛΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

#### 3.3.1 Ποιοτική διερεύνηση

Η κύρια ένταση που καταπονεί τη σύνδεση του πυλώνα είναι η καμπτική ροπή περι την εγκάρσια διεύθυνση της φοράς του ανέμου. Έτσι αναμένουμε τη δημιουργία ενός ουδέτερου άξονα στη σύνδεση που διαχωρίζει τους κοχλίες σε εφελκόμενους και σε αυτούς που θα παραμείνουν αδρανείς αφού βρίσκονται

στη θλιβόμενη ζώνη, όπου η θλιπτική ένταση παραλαμβάνεται μέσω της επαφής των ελασμάτων. Ο ουδέτερος άξονας αναμένεται να είναι προς την πιο δύσκαμπτη μεριά της σύνδεσης, δηλαδή προς τη θλιβόμενη ζώνη. Με την ύπαρξη της προέντασης, η οποία είναι απαραίτητη, ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς τον άξονα συμμετρίας της διατομής. Οι κοχλίες διαχωρίζονται από τον ουδέτερο άξονα σε εφελκόμενους με αξονική δύναμη μεγαλύτερη ή ίση από τη δύναμη προέντασης τους λόγω ανακατανομής της έντασης στο έλασμα όπως θα δούμε παρακάτω, και στους αδρανείς με αξονική δύναμη ίση με τη δύναμη προέντασης. Οι δύο περιπτώσεις κοχλίων παρουσιάζονται εποπτικά στο Σχήμα 3-5.

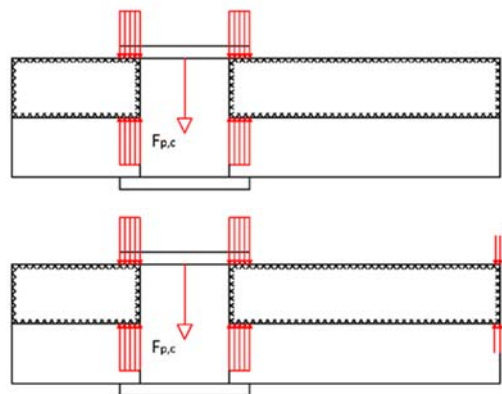


Σχήμα 3-5: Εφελκόμενη και θλιβόμενη ζώνη σύνδεσης αντίστοιχα κατά Petersen [9]

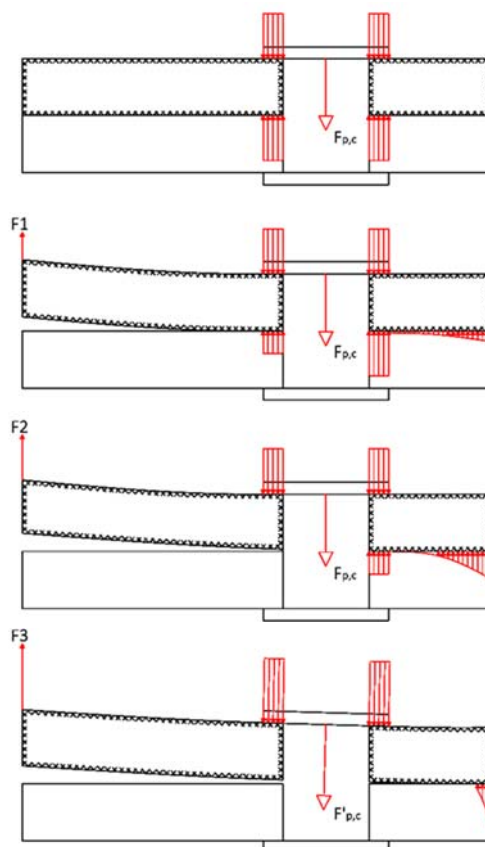
Στη θλιβόμενη παρειά του πυλώνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6, οι κοχλίες δεν θα αναλάβουν αξονική δύναμη μεγαλύτερη από τη δύναμη της προέντασης τους, αντίθετα με τους κοχλίες της εφελκόμενης παρειάς.

Το έλασμα στην εφελκόμενη παρειά του πυλώνα (Σχήμα 3-7) αρχικά θα παραλάβει την αυξανόμενη ροπή που αναπτύσσεται με ανακατανομή των δυνάμεων στην επιφάνεια του, χωρίς την ανάπτυξη μεγαλύτερης δύναμης εφελκυσμού στους κοχλίες. Αυτό είναι δυνατό λόγω της υπάρχουσας προέντασης. Η αξονική δύναμη των κοχλίων παραμένει σταθερή μέχρι ένα βήμα φόρτισης, και ύστερα αύξάνεται.

Για μη προεντεταμένη κοχλίωση, το εφελκόμενο τμήμα με αύξηση της ροπής θα μετέβαινε κατευθείαν στο βήμα 4 του σχήματος 3-7. Έτσι, σε εναλλασσόμενη φόρτιση όπως είναι αυτή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, ο κοχλίας θα λειτουργούσε σε μεγάλο εύρος αξονικών δυνάμεων με αποτέλεσμα την αστοχία του από κόπωση.



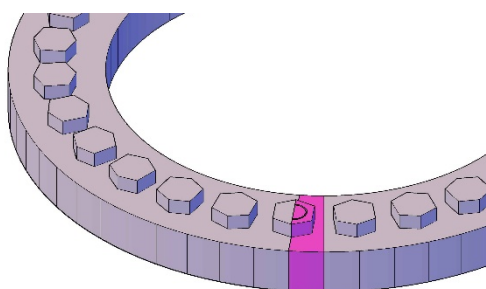
Σχήμα 3-6: Κοχλίας και έλασμα στη θλιβόμενη ζώνη



Σχήμα 3-7: Κοχλίας και έλασμα στην εφελκούμενη ζώνη για 4 βήματα αύξησης της δύναμης

### 3.3.2 Αριθμητική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

Για τον ακριβή υπολογισμό των δυνάμεων επαφής στην υπό μελέτη σύνδεση, ένα τμήμα του κυκλικού δακτύλιου του ελάσματος και του κοχλίας όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-8, προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3d-solid.

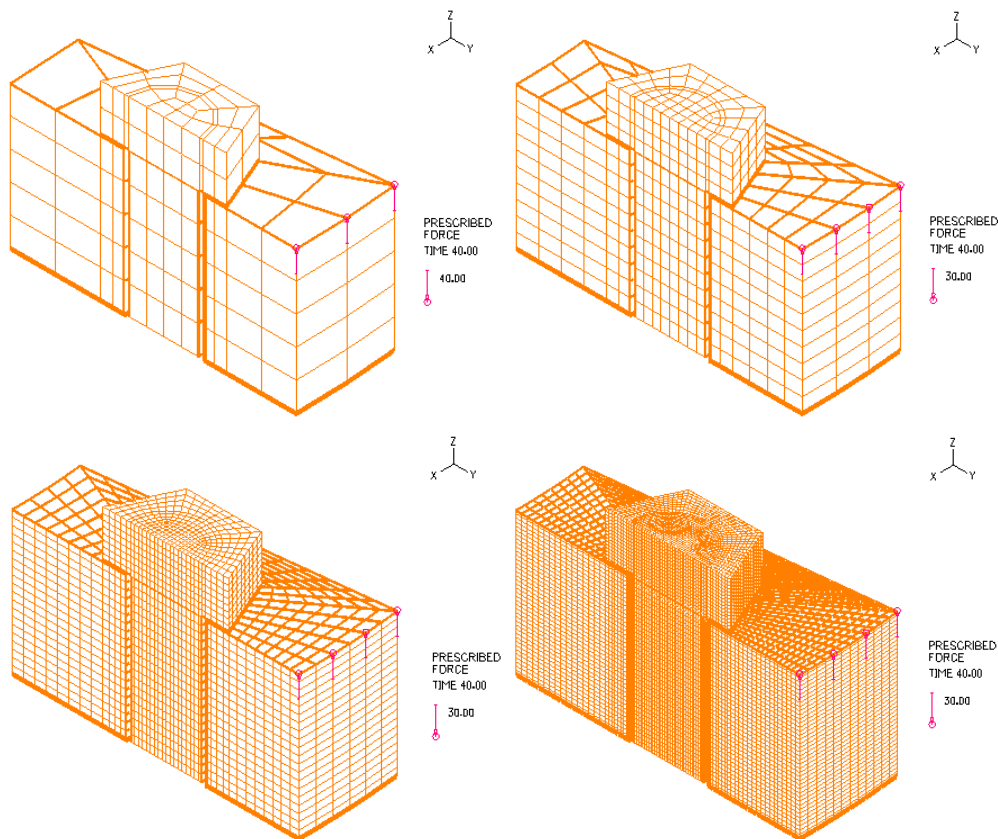


Σχήμα 3-8: Τμήμα της σύνδεσης που προσομοιώθηκε

Παράλληλα διερευνήθηκε η πυκνότητα του πλέγματος που απαιτείται ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα, και στη συνέχεια να μορφωθεί ολόκληρη η σύνδεση.

Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν στο Femap v.11 [20] τέσσερα διαφορετικά πλέγματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-9, διπλασιάζοντας διαδοχικά την πυκνότητα τους. Προσομοιώθηκε το  $\frac{1}{4}$  του προβλήματος, δηλαδή το άνω μισό έλασμα και ο μισός κοχλίας λόγω συνθηκών συμμετρίας. Επιπλέον προσομοιώθηκαν οι 3 επιφάνειες επαφής με κατάλληλα στοιχεία επαφής: η επαφή κεφαλής κοχλίας με

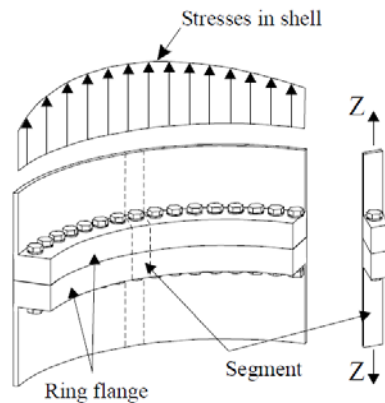
το έλασμα, η ενδιάμεση διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων, και η επαφή του κορμού του κοχλία με την άντυγα του ελάσματος. Οι επιλύσεις έγιναν με το πρόγραμμα Adina v.9 [19].



Σχήμα 3-9: Τέσσερα προσομοιώματα κοχλία-ελάσματος με στοιχεία 3d-solid

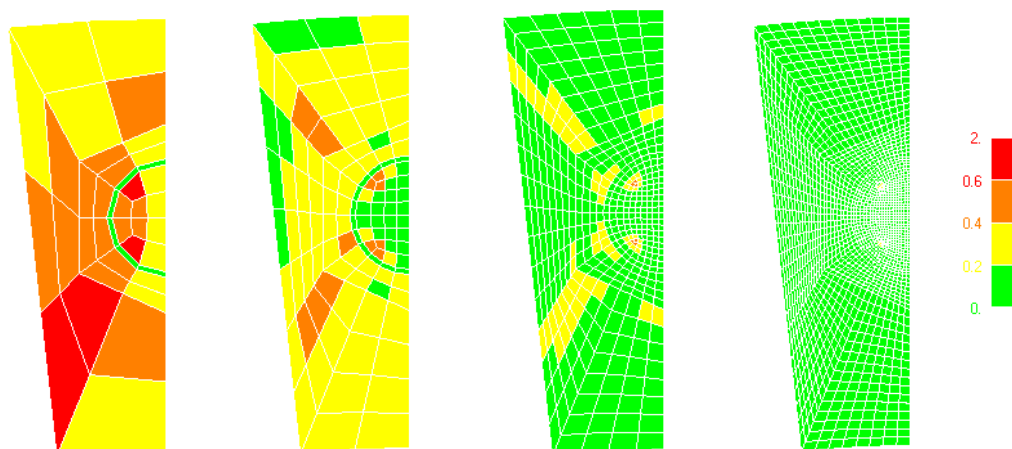
Ο κυκλικός δακτύλιος έχει εξωτερική ακτίνα 260mm, εσωτερική ακτίνα 180mm και πάχος 40mm και προσομοιώνει κομμάτι του κυκλικού δακτύλιου της σύνδεσης του πυλώνα υπο κλίμακα ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Ο κοχλίας είναι διατομής M20, ποιότητας 10.9 και σε πρώτη φάση προεντνείται. Στη συνέχεια ασκείται σταδιακά στην ακραία παρειά του ελάσματος εγκάρσια δύναμη 120 kN προσομοιώνοντας έτσι τη ροπή από το κέλυφος του πυλώνα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-10.



Σχήμα 3-10: Τριδιάστατη απεικόνιση της σύνδεσης και των ορθών τάσεων στον πυλώνα

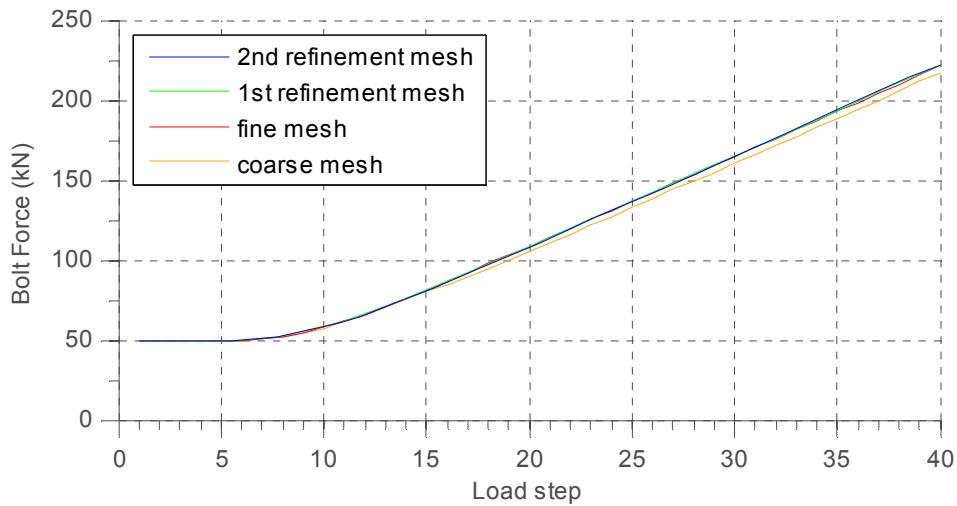
Η ποιότητα της διακριτοποίησης των τεσσάρων προσομοιωμάτων με τη μέθοδο της ιακωβιανής ορίζουσας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-11.



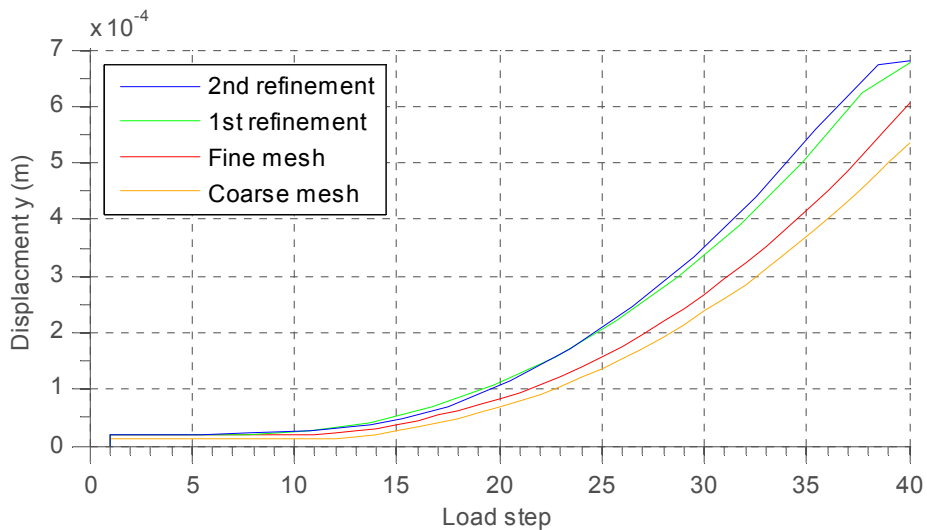
Σχήμα 3-11: Ποιότητα διακριτοποίησης των τεσσάρων πλεγμάτων

Η ανάλυση πραγματοποιείται σε 40 βήματα. Στο βήμα 1 ο κοχλίας προεντνείνεται με δύναμη 50 kN και από το βήμα 2 έως το βήμα 40 αυξάνεται σταθερά η επιβαλλόμενη δύναμη στο άκρο του ελάσματος ως 120 kN. Η αξονική δύναμη του κοχλίου παραμένει σταθερή μέχρι το βήμα 7, που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη δύναμη περίπου 21 kN (Διάγραμμα 3-12). Στο Σχήμα 3-15 απεικονίζονται οι κάθετες προς την επιφάνεια επαφής δυνάμεις μεταξύ των δύο ελασμάτων, και η ανακατανομή που λαμβάνει χώρα καθώς αυξάνεται η επιβαλλόμενη δύναμη. Από το βήμα 12 μέχρι το τέλος της φόρτισης η συμπεριφορά είναι γραμμική καθώς οι επιφάνειες επαφής δεν μεταβάλλονται πλέον αισθητά. Η παραλαβή της επιβαλλόμενης δύναμης γίνεται μέσω του ζεύγους δυνάμεων εφελκυσμού του κοχλίου και συμπίεσης στην άκρη των ελασμάτων. Η συμπεριφορά που αναδεικνύεται από την αριθμητική ανάλυση είναι συμβατή με παρατηρήσεις από πειραματικές δοκιμές που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία [9].

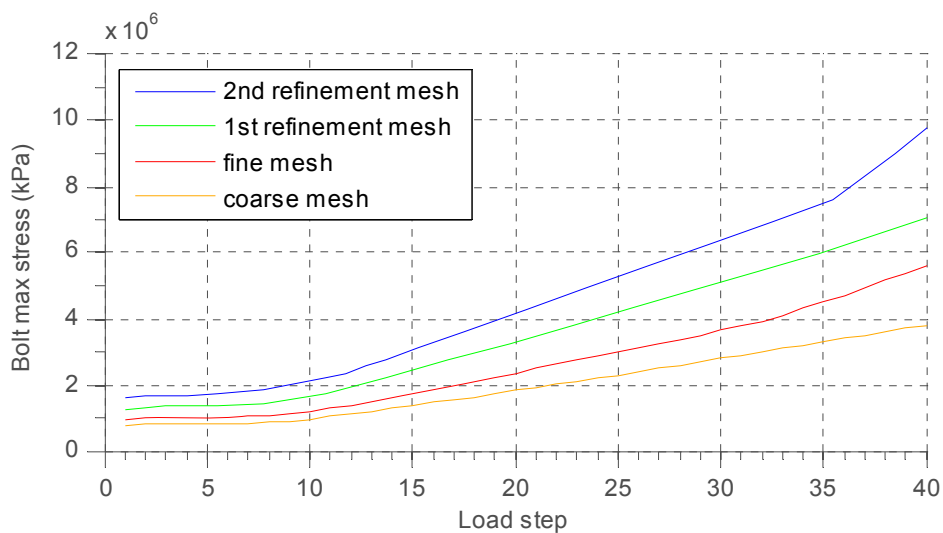
Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων όσον αφορά την αξονική δύναμη στον κοχλία (Διάγραμμα 3-12), επιτυγχάνεται ακόμα και για το πιο αραιό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (1<sup>ο</sup> πλέγμα). Όσον αφορά τις μετακινήσεις, όπως για παράδειγμα η οριζόντια μετακίνηση του ελάσματος κατά  $y$  (Διάγραμμα 3-13), ικανοποιητική σύγκλιση επιτυγχάνεται για το 3<sup>ο</sup> πιο πυκνό πλέγμα, ενώ για τη μέγιστη ισοδύναμη τάση στον κοχλία που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3-14, τόσο η θέση εμφάνισης τοπικά όσο και η τιμή της παρουσιάζουν αποκλίσεις, γεγονός που οφείλεται στη φύση του προβλήματος που είναι πρόβλημα επαφής, και καθώς μικραίνει το μέγεθος των στοιχείων μικραίνει η επιφάνεια επαφής και οι τάσεις αυξάνονται.



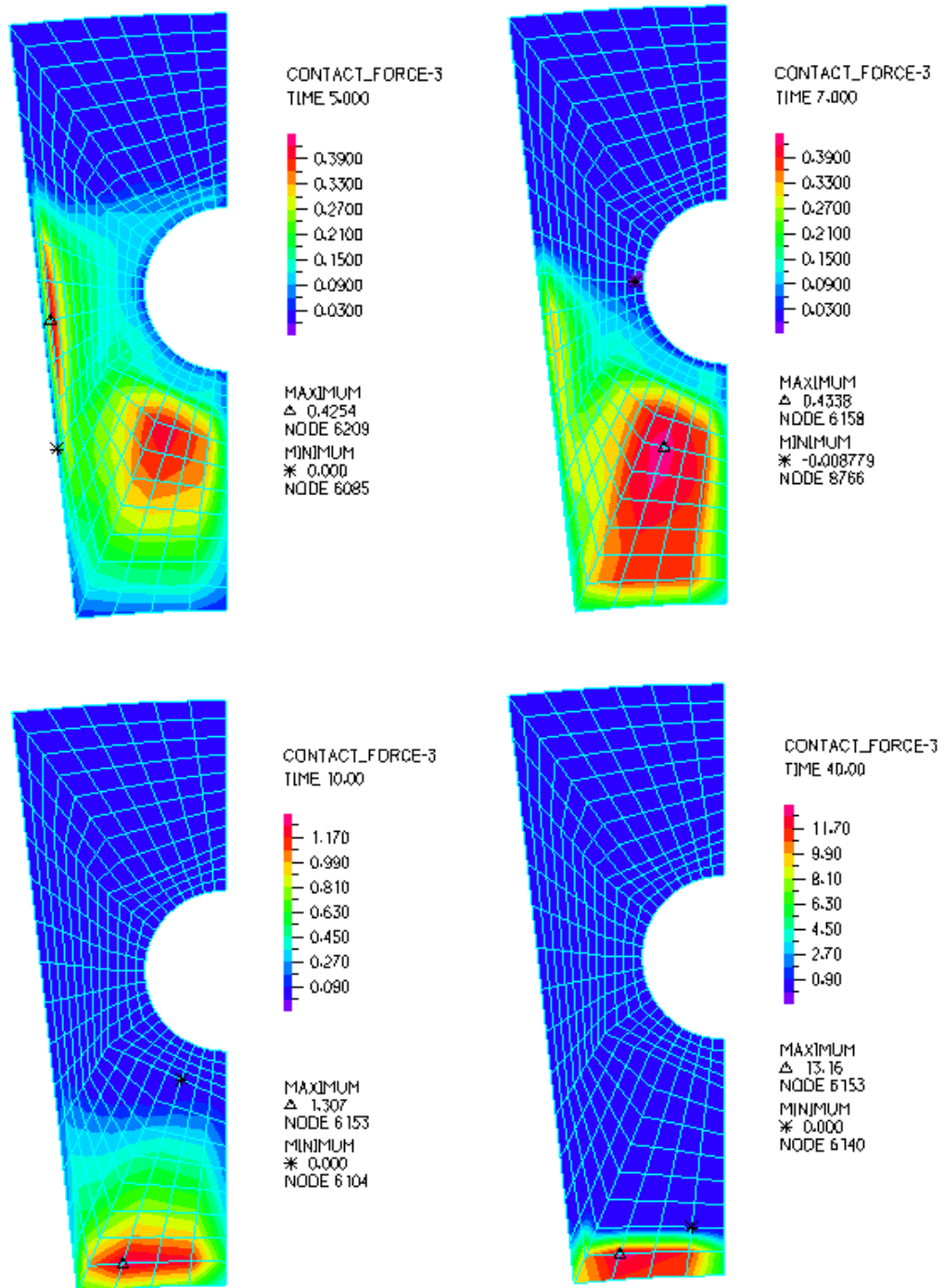
Διάγραμμα 3-12: Δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης κοχλία



Διάγραμμα 3-13: Δρόμος ισορροπίας μετακίνησης y στο έλασμα



Διάγραμμα 3-14: Δρόμος ισορροπίας μέγιστης ισοδύναμης τάσης στον κοχλία

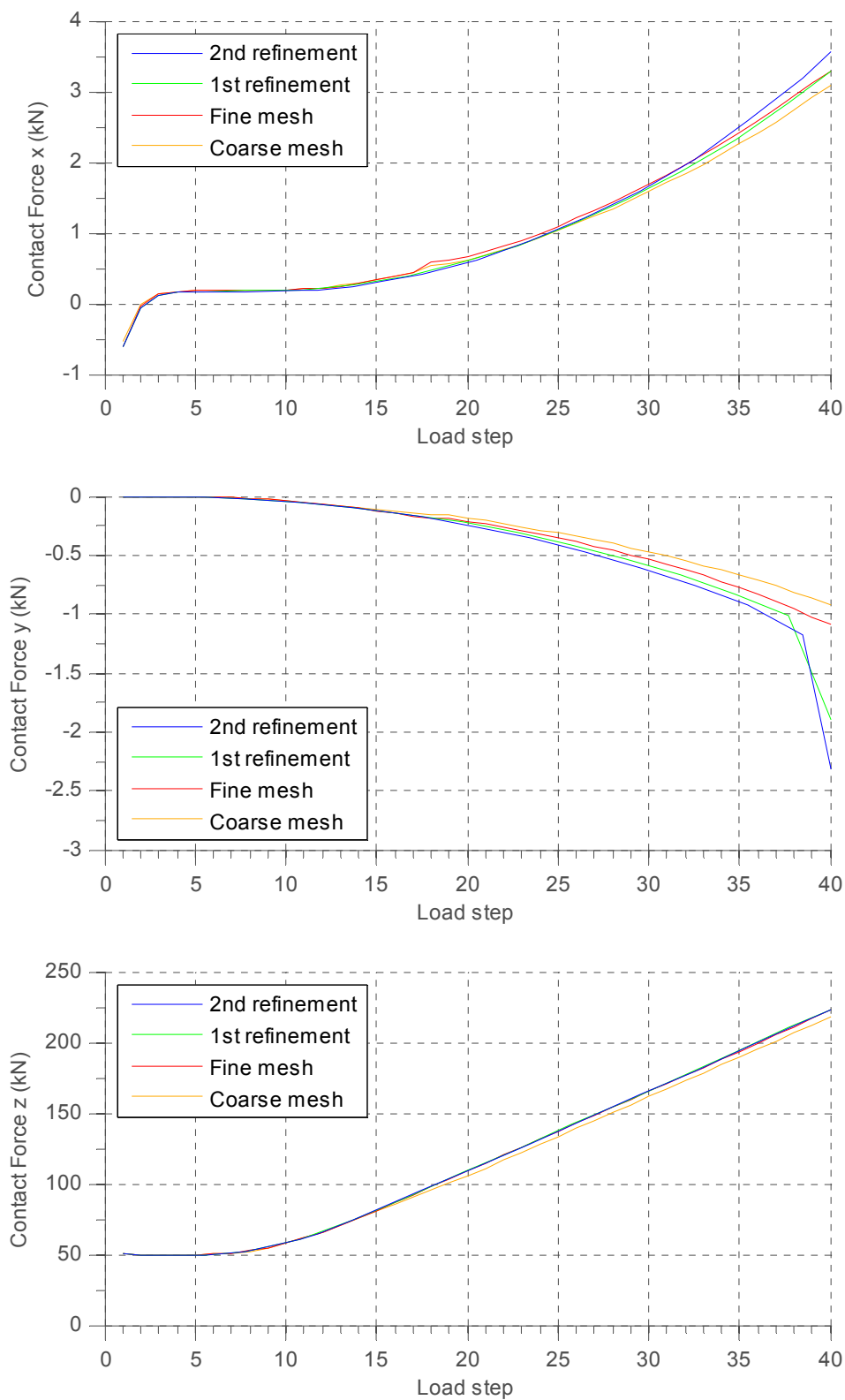


Σχήμα 3-15: Ανακατανομή της εγκάρσιας αντίδρασης μεταξύ των ελασμάτων επαφής στα βήματα 5, 7, 10 και 40

Στα Διαγράμματα 3-16, 3-17 και 3-18 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δυνάμεις τριβής σε κάθε διεύθυνση για την επιφάνεια επαφής στην κεφαλή του κοχλία, την επιφάνεια επαφής μεταξύ των ελασμάτων και την επιφάνεια επαφής στην άντυγα του ελάσματος.

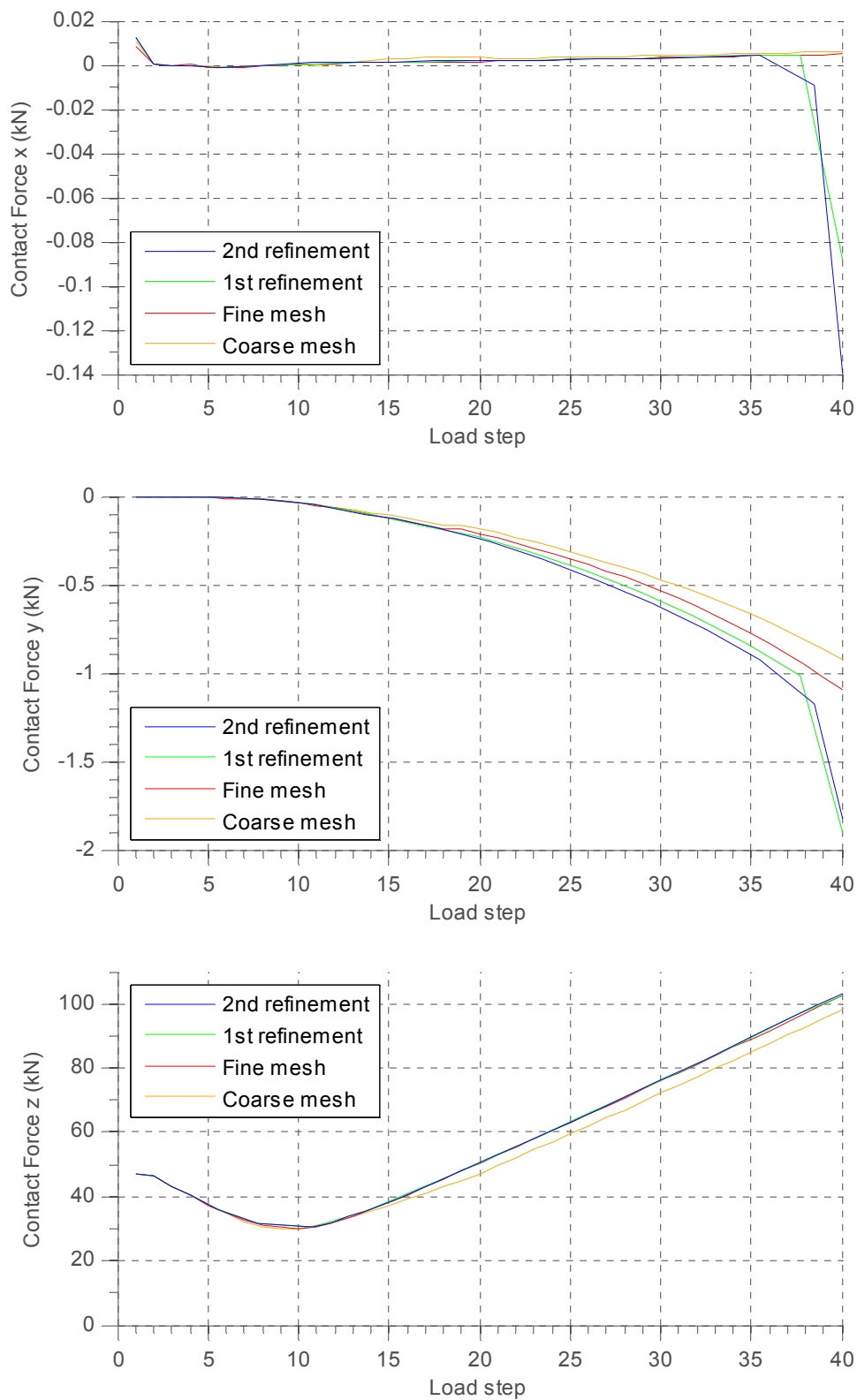


Δυνάμεις επαφής στην κεφαλή του κοχλία στις 3 διευθύνσεις:



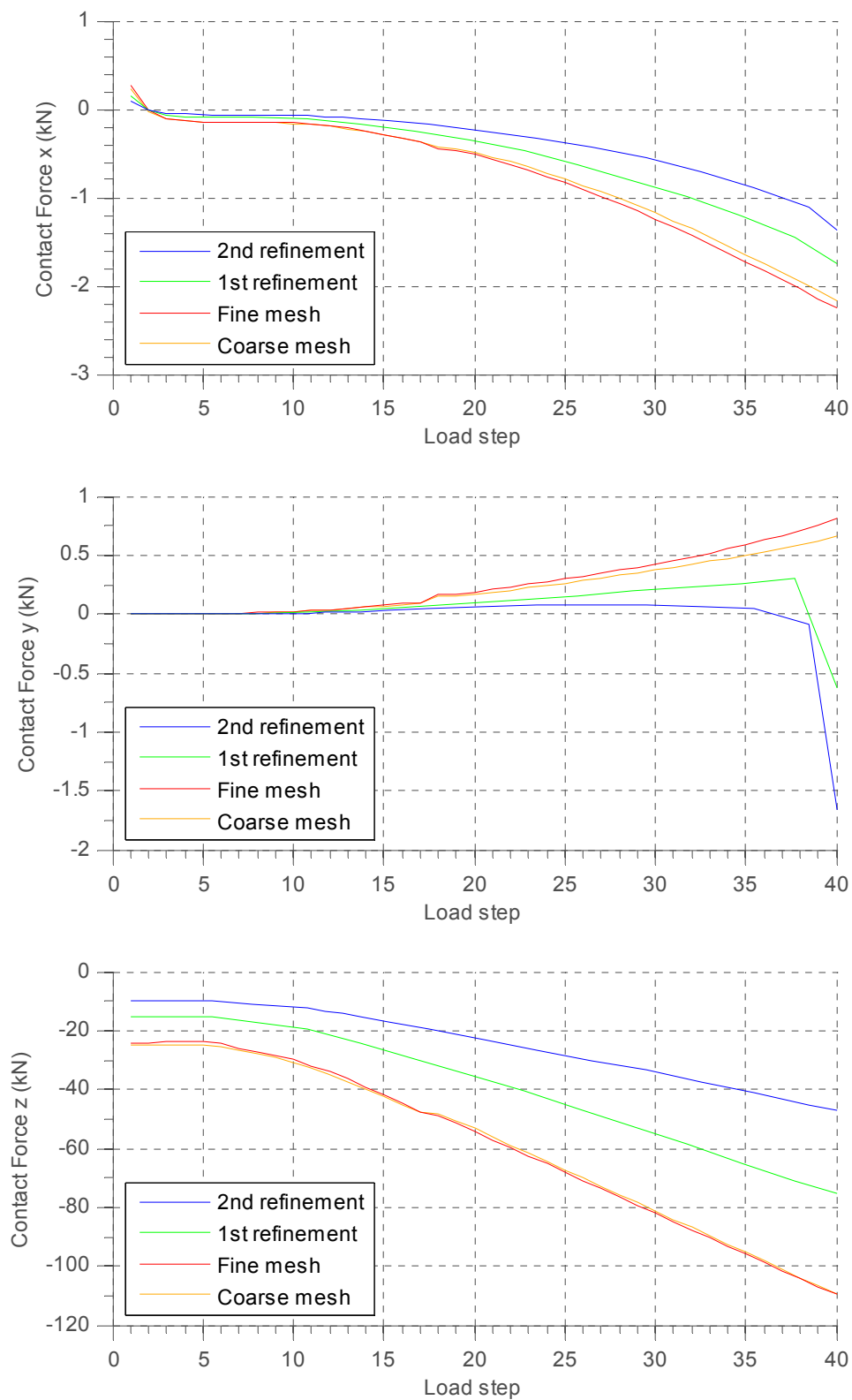
Διαγράμματα 3-16: Δρόμοι ισορροπίας δυνάμεων στην επιφάνεια επαφής κεφαλής κοχλία

Δυνάμεις επαφής στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων στις 3 διευθύνσεις:



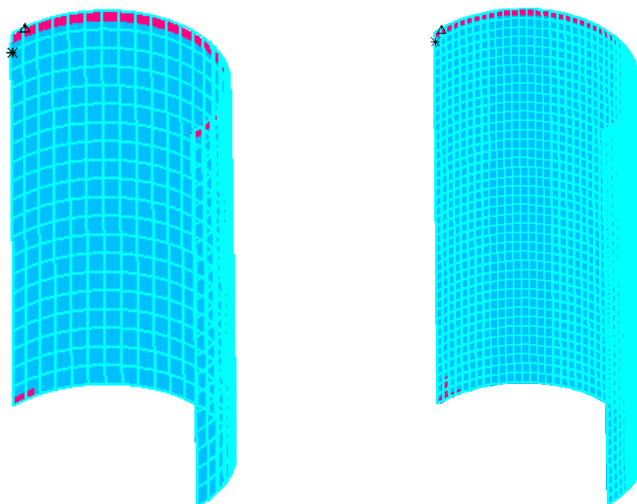
Διαγράμματα 3-17: Δρόμοι ισορροπίας δυνάμεων επαφής στη διεπιφάνεια των ελασμάτων

Δυνάμεις επαφής στην άντυγα του ελάσματος στις 3 διευθύνσεις:



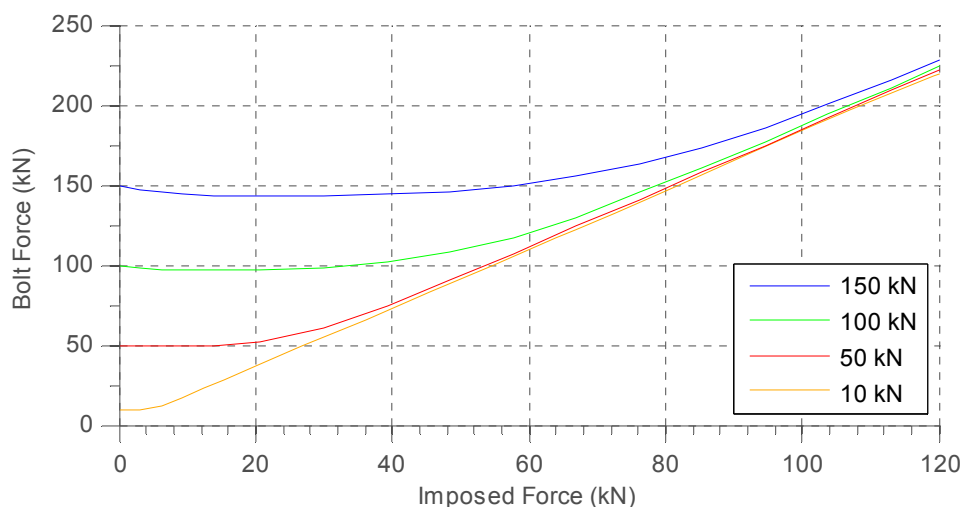
Διαγράμματα 3-18: Δρόμοι ισορροπίας δυνάμεων στην επιφάνεια άντυγας του ελάσματος

Παρατηρούμε ότι για το 3<sup>ο</sup> πιο πυκνό πλέγμα υπάρχει σύγκλιση στους δρόμους ισορροπίας εκτός από αυτούς που αναφέρονται στις δυνάμεις επαφής στην άντυγα του ελάσματος. Αυτό πιθανόν συμβαίνει διότι η συγκεκριμένη επαφή γίνεται σε μόνο μια πολύ λεπτή ζώνη στοιχείων στο άνω μέρος του ελάσματος (Σχήμα 3-19), οπότε αν μας ενδιαφέρουν τα μεγέθη στη συγκεκριμένη περιοχή θα πρέπει να πυκνώσουμε τοπικά το πλέγμα.

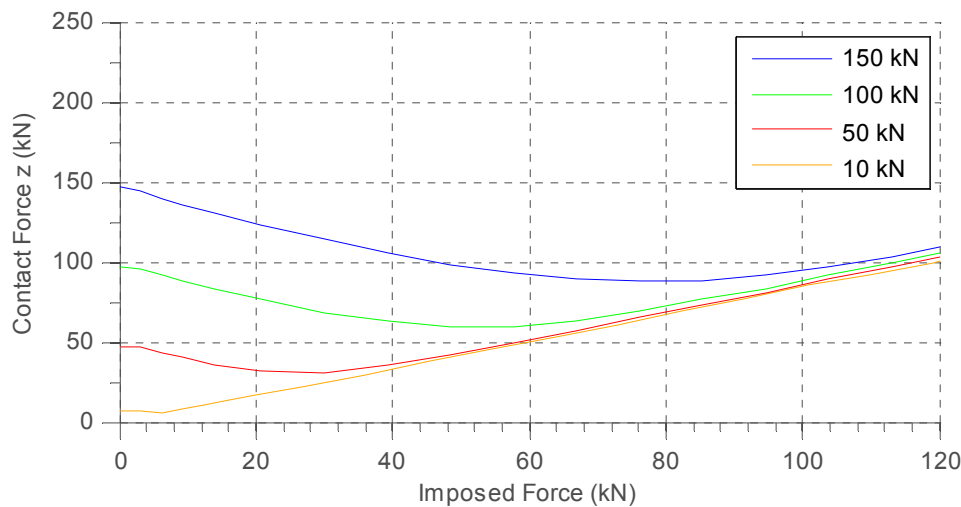


Σχήμα 3-19: Επιφάνειες επαφής (με ροζ χρώμα) στην άντυγα του ελάσματος στα δύο πυκνότερα πλέγματα

Για τέσσερις διαφορετικές δυνάμεις προέντασης κοχλίας 10, 50, 100 και 150 kN, διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση κοχλίας ελάσματος στο 3<sup>ο</sup> πιο πυκνό πλέγμα στοιχείων. Για μεγάλη επιβαλλόμενη δύναμη ή για μικρή δύναμη προέντασης παρατηρούμε ότι τόσο η αξονική δύναμη του κοχλίας όσο και η εγκάρσια αντίδραση από το κάτω έλασμα είναι ανεξάρτητες από τη δύναμη αρχικής προέντασης. Στο Διάγραμμα 3-20 παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής δύναμης του κοχλίας με την αύξηση της δύναμης και στο Διάγραμμα 3-21 η εγκάρσια αντίδραση μεταξύ των ελασμάτων. Λόγω ισορροπίας του συστήματος η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη κάθε στιγμή προκύπτει ως η διαφορά της αξονικής δύναμης κοχλίας (Διάγραμμα 3-20) από την εγκάρσια αντίδραση μεταξύ των ελασμάτων (Διάγραμμα 3-21).

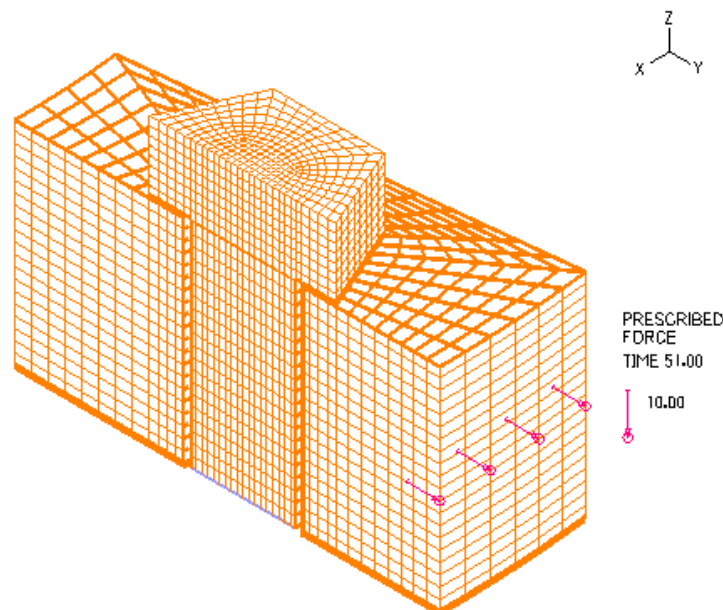


Διάγραμμα 3-20: Αξονική δύναμη κοχλίας λόγω της επιβαλλόμενης δύναμης για διάφορα επίπεδα προέντασης



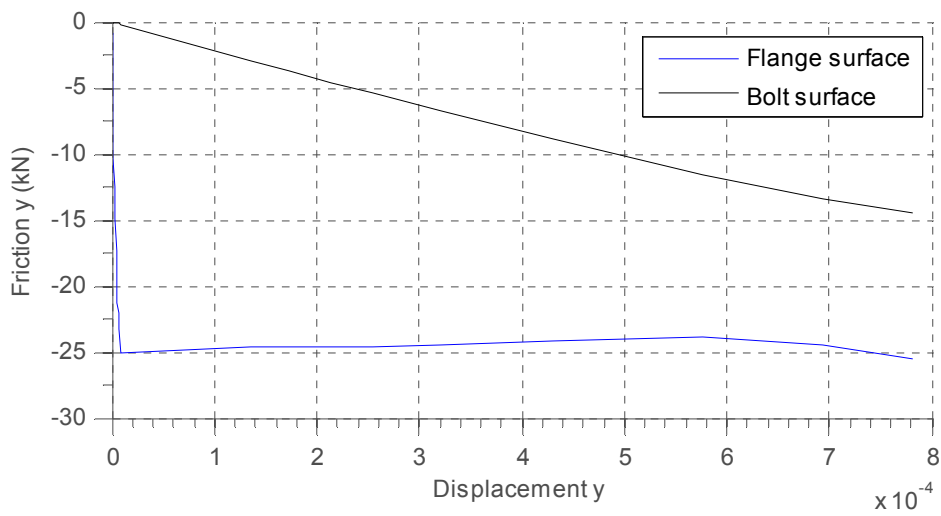
Διάγραμμα 3-21: Εγκάρσια αντίδραση μεταξύ των ελασμάτων

Για την προσομοίωση της σύνδεσης σε διάτμηση χρησιμοποιήθηκε το 3<sup>ο</sup> πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-22. Ο συντελεστής τριβής στις επιφάνειες λήφθηκε 0.5, η δύναμη προέντασης 50 kN και η τέμνουσα δύναμη που ασκήθηκε στο έλασμα αυξήθηκε σταδιακά ως την τιμή των 40 kN.

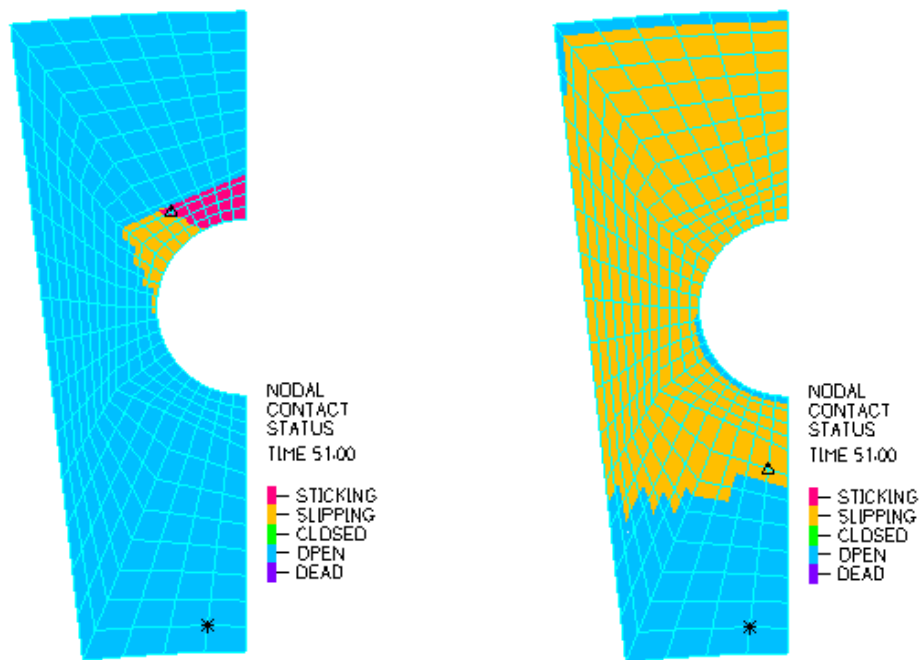


Σχήμα 3-22: Προσομοίωση κοχλία-ελάσματος σε διάτμηση

Η τέμνουσα μέχρι τα 25 kN παραλαμβάνεται μέσω της τριβής στην κάτω δεπιφάνεια σε σχεδόν μηδενική μετακίνηση όπως αναμενεται και στη συνέχεια το έλασμα ολισθαίνει (Διάγραμμα 3-23). Αντίθετα η επιφάνεια κάτω από την κεφαλή του κοχλία και πάνω από το έλασμα δεν έχει ολισθήσει (Σχήματα 3-24), και μπορεί να παραλάβει όση τέμνουσα περισσεύει αλλά σε μεγαλύτερες μετακινήσεις αφού παράλληλα ο κοχλίας παραμορφώνεται. Όπως παρατηρούμε η τελική μετακίνηση του ελάσματος είναι περίπου 0.8 mm και άρα δεν ενεργοποιήθηκε η δύναμη της άντυνας αφού η ανοχή είναι 1 mm.



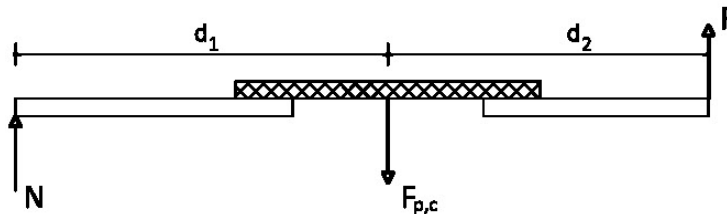
Διάγραμμα 3-23: Τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τον κοχλία και την επιφάνεια επαφής των ελασμάτων



Σχήματα 3-24: Άνω και κάτω επιφάνεια επαφής του ελάσματος στο τέλος της ανάλυσης

### 3.3.3 Προσεγγιστικός αναλυτικός υπολογισμός αξονικής δύναμης κοχλία

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούν την αξονική δύναμη κοχλία ελέγχθηκαν προσεγγιστικά μέσω της ισορροπίας του συστήματος ελάσματος-κοχλία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-25. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα είναι η δύναμη προέντασης  $F_{p,c}$  που εφαρμόζεται στον άξονα του κοχλία, η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη  $F$  στο άκρο του ελάσματος και η εγκάρσια αντίδραση  $N$  μεταξύ των ελασμάτων.



Σχήμα 3-25: Ισορροπία συστήματος ελάσματος-κοχλία

Η ακριβής θέση του μοχλοβραχίονα της αντίδρασης  $N$  είναι άγνωστη. Για μεγάλη εξωτερική δύναμη  $F$  ή για μικρή δύναμη προέντασης, βρίσκεται στο άκρο του ελάσματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-25. Από την ισορροπία του ελάσματος προκύπτει:

$$F_{p,c} \cdot d_1 = F \cdot (d_1 + d_2) \quad (3-1)$$

Με αντικατάσταση των τιμών στο βήμα 40 λαμβάνουμε:

$$F_{p,c} \cdot 43\text{mm} = 120\text{kN} \cdot 80\text{mm} \Rightarrow F_{p,c} = 223\text{kN} \quad (3-2)$$

Διαπιστώνεται επομένως πολύ καλή προσέγγιση σε σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Για μικρότερη επιβαλλόμενη δύναμη  $F$  ή μεγάλη δύναμη προέντασης, ο μοχλοβραχίονας της αντίδρασης πρέπει να μειωθεί για να έχουμε ακριβή αποτελέσματα.

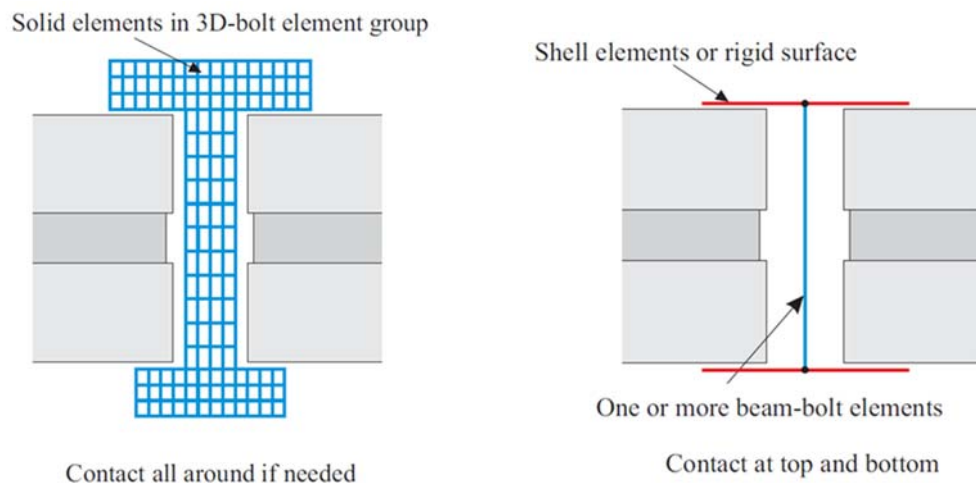
## 3.4 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Σε ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης, ολόκληρη η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας καθώς και τμήμα του πυλώνα προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά της σύνδεσης σε καμπτική και διατμητική ένταση. Ζητούμενα από τις αναλύσεις αποτελούν η θέση του ουδέτερου άξονα, οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στη θέση της συγκόλλησης του πυλώνα με το έλασμα.

Η εξωτερική διάμετρος των ελασμάτων είναι 1.680 m, η εσωτερική 1.440 m, το πάχος των ελασμάτων είναι 60 mm και το πάχος του πυλώνα στη θέση της σύνδεσης 16 mm. Τα δύο ελάσματα κοχλιώνονται με 60 προεντεταμένους κοχλίες M20 10.9, ανά 6° μοίρες. Η δύναμη προέντασης υπολογίστηκε ίση προς 171.5 kN (το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία σύμφωνα με το EN 1993-1-8 [6]).

Το έλασμα της φλάντζας καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα ύψους 5 m, περίπου τριών διαμέτρων του πυλώνα, προσομοιώθηκαν με στοιχεία κελύφους, οι κοχλίες με στοιχεία δοκού και στοιχεία κελύφους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-26 και οι στηρίξεις λήφθηκαν σύμφωνα με τις συνθήκες συμμετρίας. Οι επαφές που προσομοιώθηκαν είναι της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα και η επαφή μεταξύ των

ελασμάτων. Στην κορυφή του πυλώνα δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων του κελύφους σε έναν κεντρικό, στον οποίο επιβλήθηκαν η συγκεντρωμένη τέμνουσα και η ροπή.

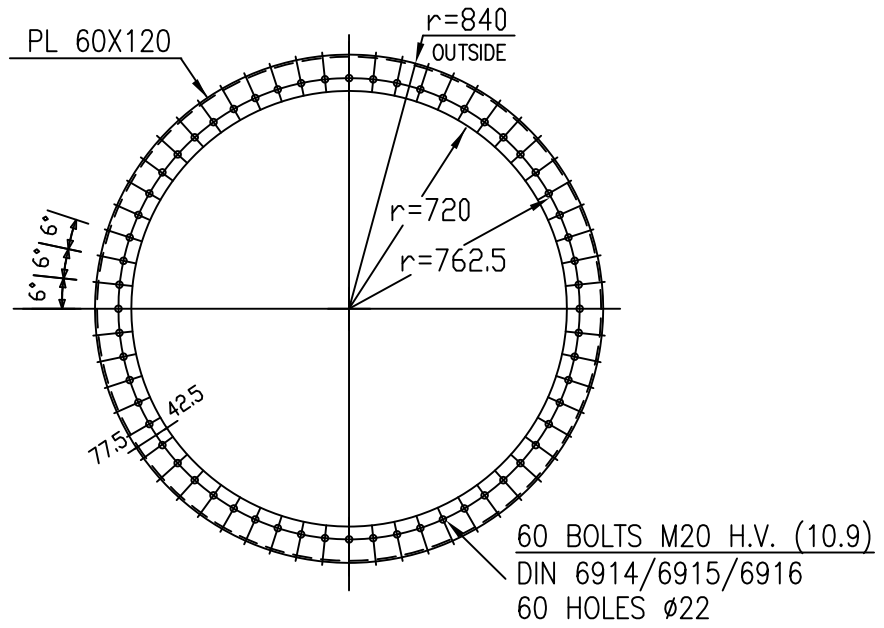


Σχήμα 3-26: Προσομοίωση κοχλία με στοιχεία 3d-solid ή με στοιχεία δοκού και κελύφους αντίστοιχα

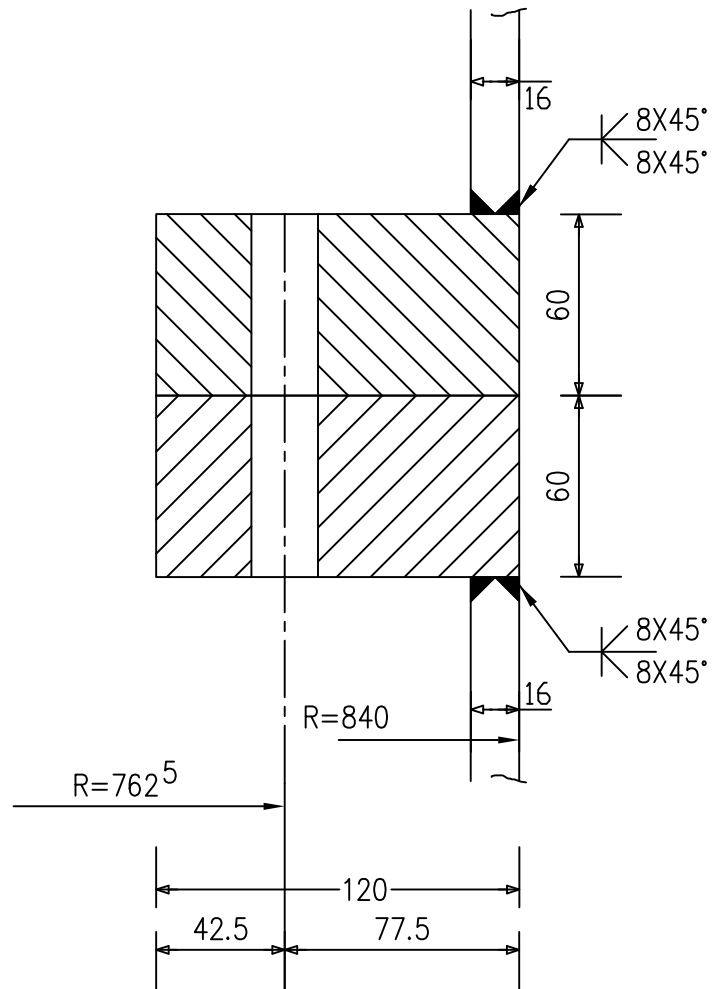
Συνολικά δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα ώστε να ελεγχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για κάμψη και διάτμηση της σύνδεσης στη διεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου, καθώς αυτές συνιστούν την πιο κρίσιμη ένταση στον πυλώνα.

Ακολουθεί η λεπτομέρεια της σύνδεσης σε κάτοψη και τομή.





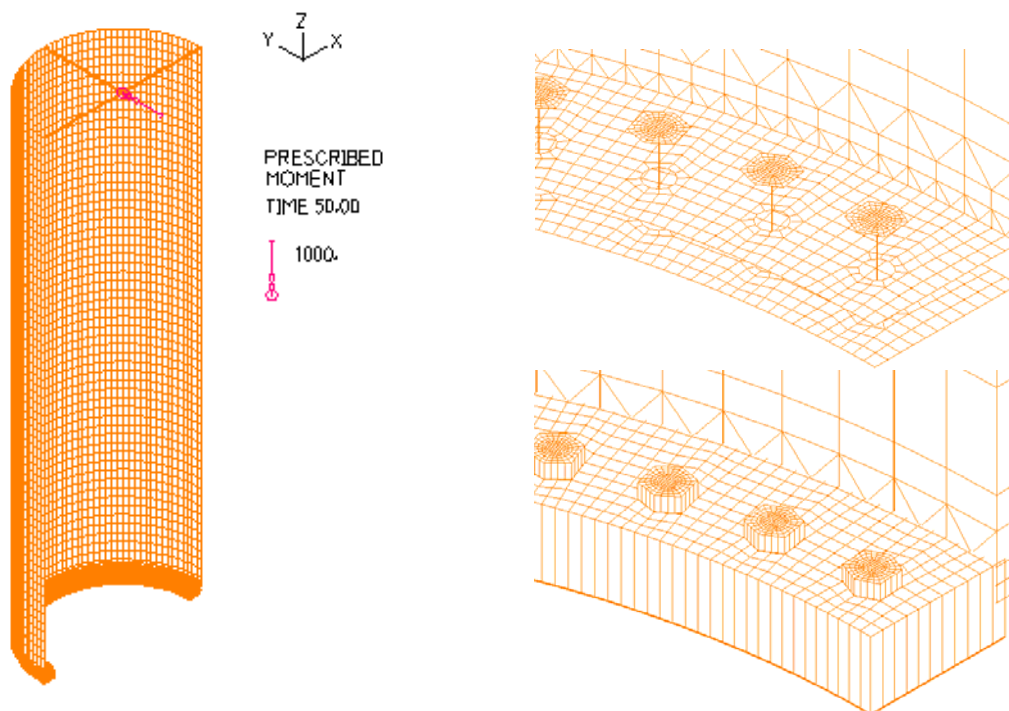
TOP VIEW OF FLANGE  
 1/25



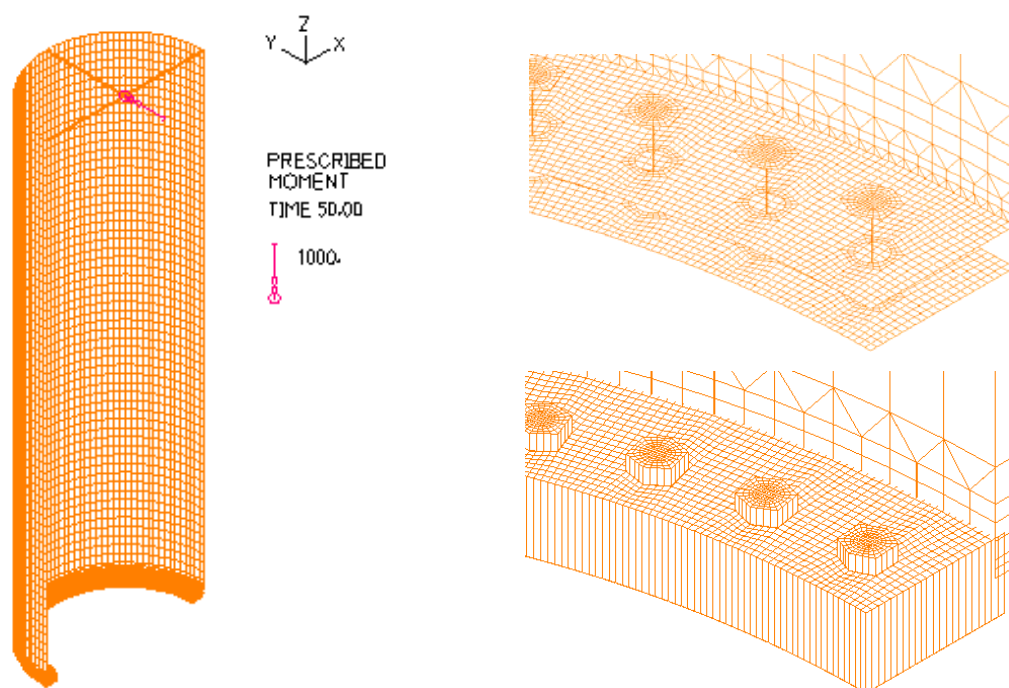
FLANGE SECTION  
 1/2.5

### 3.4.1 Κάμψη σύνδεσης

Στην πρώτη σειρά αναλύσεων της σύνδεσης σε κάμψη, αρχικά οι κοχλίες προεντείνονται και στη συνέχεια επιβάλλεται ροπή στην κορυφή του πυλώνα περί τον άξονα  $y$ , σταδιακά έως 1000 kNm. Στα Σχήματα 3-27 και 3-28 παρουσιάζονται τα δύο προσομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν, το πρώτο με αραιό πλέγμα και το δεύτερο με πιο πυκνό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.



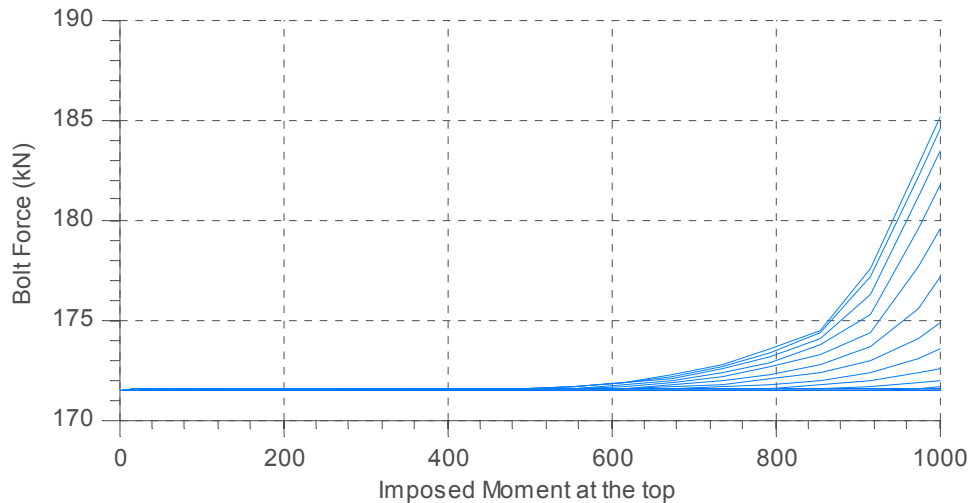
Σχήμα 3-27: 1<sup>η</sup> προσομοίωση σύνδεσης με αραιό πλέγμα



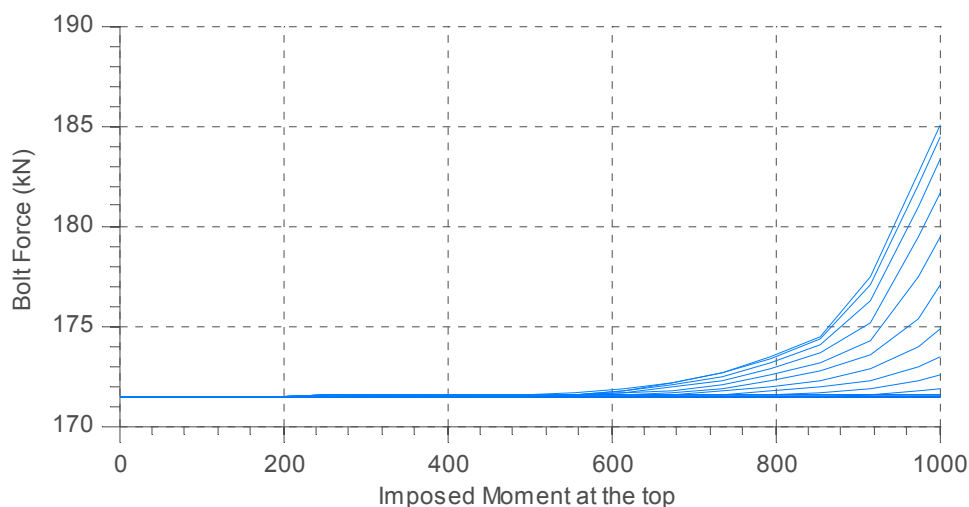
Σχήμα 3-28: 2<sup>η</sup> προσομοίωση σύνδεσης με πυκνό πλέγμα

### Αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες

Οι τιμές αξονικής δύναμης στους κοχλίες σχεδόν ταυτίζονται για τα δύο προσομοιώματα. Στα Διαγράμματα 3-29 και 3-30 απεικονίζονται οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής στην κορυφή του πυλώνα στις δύο περιπτώσεις. Η μέγιστη αξονική δύναμη στον ακραίο κοχλία από το 1<sup>ο</sup> πλέγμα είναι 185.19 kN και από το 2<sup>ο</sup> πλέγμα είναι 185.10 kN.



Διάγραμμα 3-29: Δρόμος ισορροπίας αξονικών στους κοχλίες για το 1<sup>ο</sup> πλέγμα



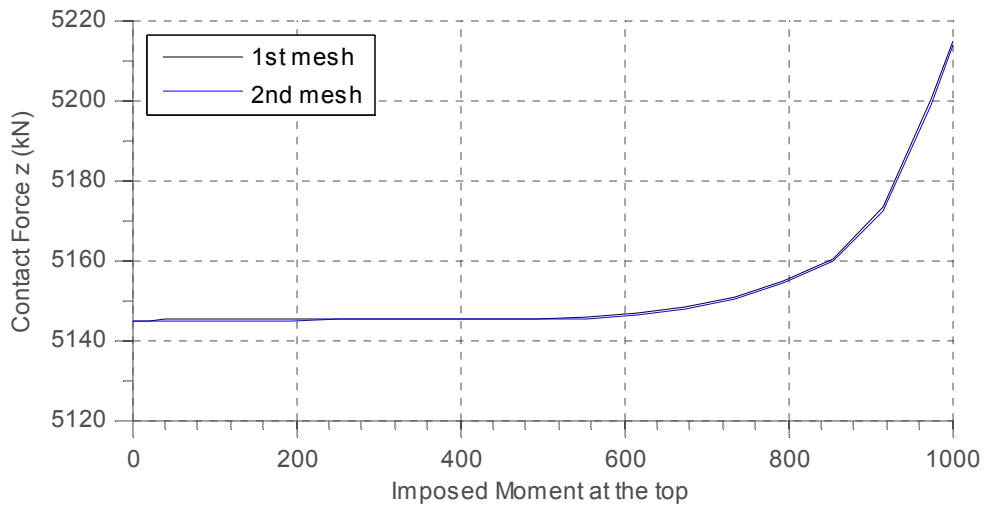
Διάγραμμα 3-30: Δρόμος ισορροπίας αξονικών στους κοχλίες για το 2<sup>ο</sup> πλέγμα

Ακολουθεί ο Πίνακας 3-31 με τις αξονικές δυνάμεις συγκεντρωτικά για όλους τους κοχλίες όπως προέκυψαν από το πυκνότερο πλέγμα.

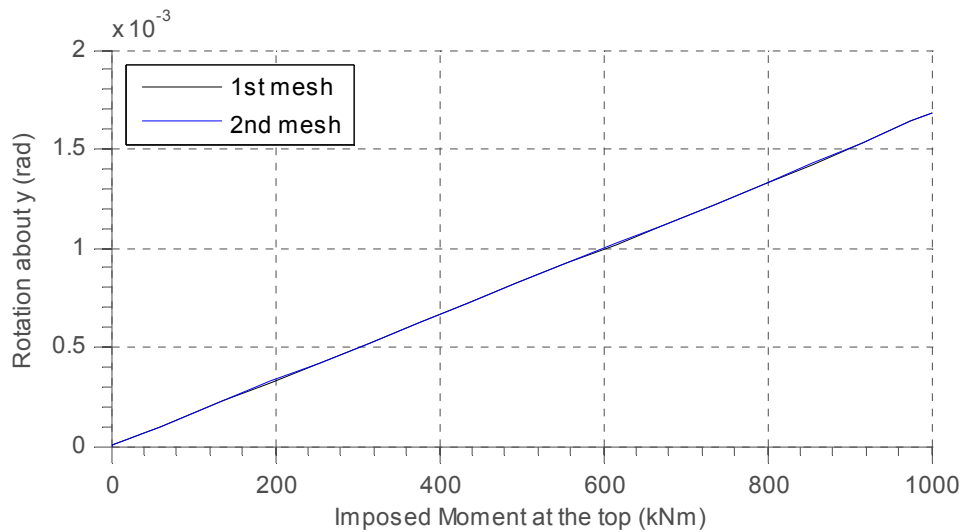
A/A κοχλία	Αρχική Δύναμη (kN)	Τελική Δύναμη (kN)
1	171,50	171,50
2	171,50	171,50
3	171,50	171,50
4	171,50	171,50
5	171,50	171,50
6	171,50	171,50
7	171,50	171,50
8	171,50	171,50
9	171,50	171,50
10	171,50	171,50
11	171,50	171,50
12	171,50	171,50
13	171,50	171,50
14	171,50	171,50
15	171,50	171,50
16	171,50	171,50
17	171,50	171,50
18	171,50	171,50
19	171,50	171,50
20	171,50	171,57
21	171,50	171,90
22	171,50	172,52
23	171,50	173,45
24	171,50	174,80
25	171,50	177,08
26	171,50	179,48
27	171,50	181,61
28	171,50	183,31
29	171,50	184,49
30	171,50	185,10

Πίνακας 3-31: Αξονικές δυνάμεις κοχλιών στο 2<sup>ο</sup> πλέγμα

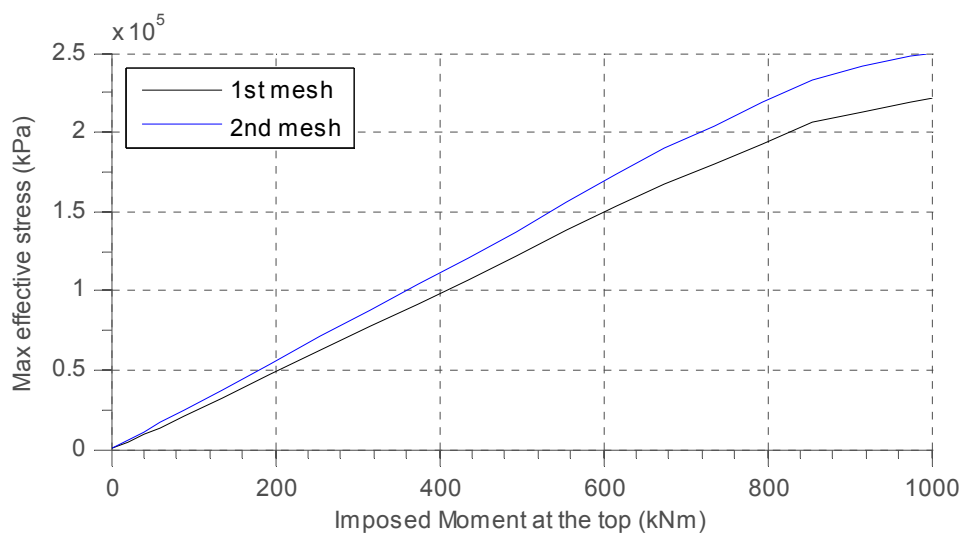
Επιπλέον, για τον έλεγχο της σύγκλισης των αποτελεσμάτων από τα δύο προσομοιώματα εξετάστηκαν η εγκάρσια δύναμη επαφής μεταξύ των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων στο Διάγραμμα 3-32, η στροφή στην κορυφή του πυλώνα κατά τη φορά της επιβαλλόμενης ροπής στο Διάγραμμα 3-33 και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στο άνω έλασμα όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3-34. Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση των δυο αναλύσεων είναι παραπλήσια, που σημαίνει ότι και τα δυο προσομοιώματα δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Αξίζει να παρατηρήσουμε στο Διάγραμμα 3-33 τη γραμμική απόκριση στην κορυφή του πυλώνα όπως παρουσιάζεται μακροσκοπικά.



Διάγραμμα 3-32: Δρόμος ισορροπίας εγκάρσιας δύναμης επαφής ελασμάτων

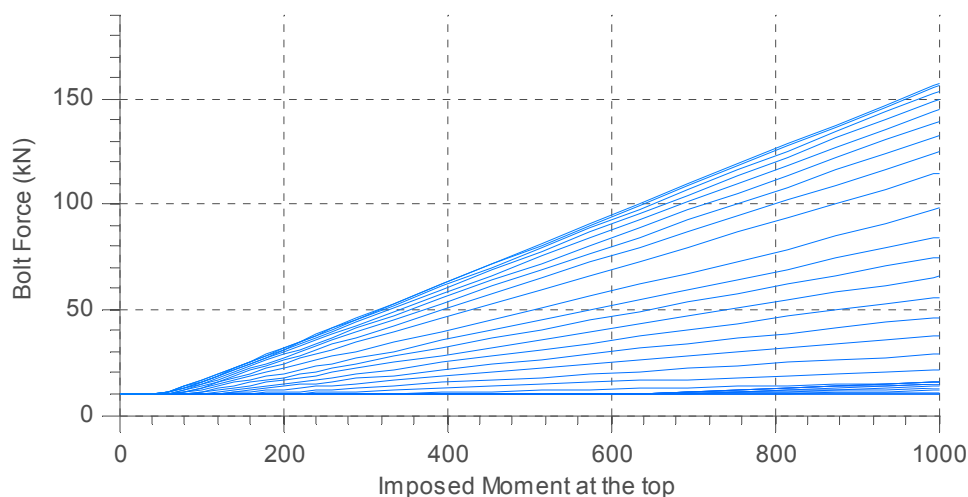


Διάγραμμα 3-33: Δρόμος ισορροπίας γωνίας στροφής στην κορυφή του πυλώνα



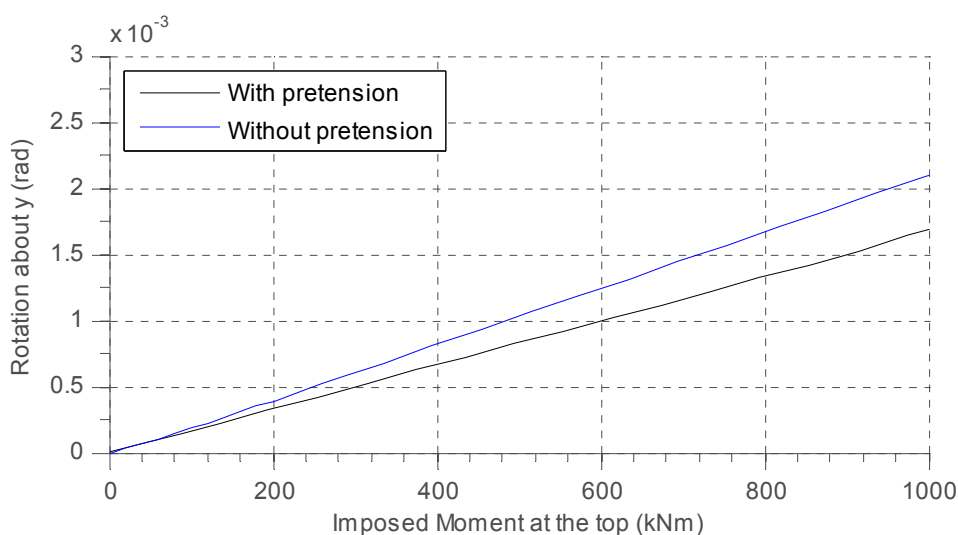
Διάγραμμα 3-34: Δρόμος ισορροπίας μέγιστης ισοδύναμης τάσης στο έλασμα

Για τη διερεύνηση της επιρροής της προέντασης στην απόκριση της σύνδεσης αναλύθηκε το ίδιο πρόβλημα χωρίς προεντεταμένους κοχλίες. Στο προσομοίωμα χωρίς προένταση επιβλήθηκε για λόγους αριθμητικής ευστάθειας πολύ μικρή προένταση 10 kN σε κάθε κοχλία. Οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3-35. Παρατηρείται ότι το εύρος λειτουργίας των αξονικών δυνάμεων των απλών κοχλιών είναι αρκετά πιο μεγάλο από αυτό των προεντεταμένων κοχλιών, όπως έγινε φανερό και από την αριθμητική ανάλυση του ενός κοχλίου.



Διάγραμμα 3-35: Αξονικές δυνάμεις κοχλιών χωρίς προένταση λόγω επιβαλλόμενης ροπής στον πυλώνα

Η στροφή στην κορυφή του πυλώνα για τις περιπτώσεις με και χωρίς προένταση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3-36. Η στροφή στην κορυφή είναι μικρότερη για σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες όπως είναι αναμενόμενο, ενώ η συνολική απόκριση στην κορυφή είναι σχεδόν γραμμική και στις δύο περιπτώσεις.

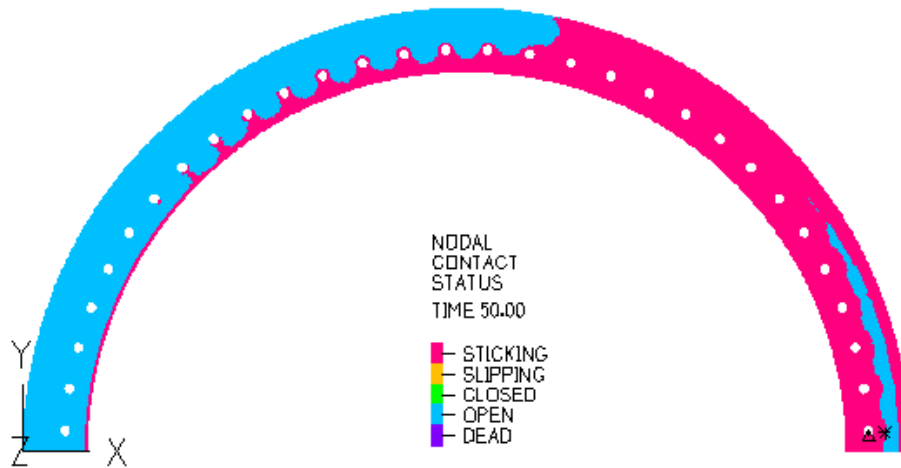


Διάγραμμα 3-36: Στροφή στην κορυφή του πυλώνα με και χωρίς προεντεταμένους κοχλίες

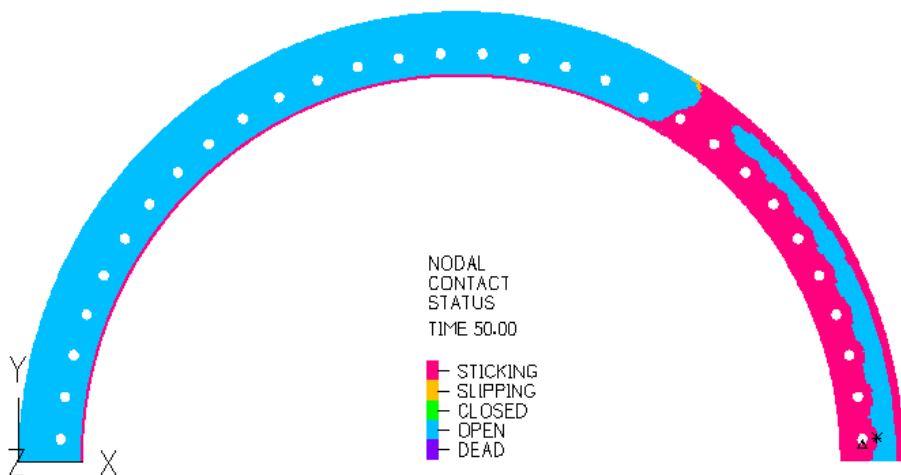
### Θέση ουδέτερου άξονα και ορθές τάσεις $\sigma_{zz}$ στη συγκόληση

Η διατομή στη θέση αποκατάστασης του πυλώνα δεν πληροί την παραδοχή της επιπεδότητας αφού οι δυνάμεις στη σύνδεση μεταφέρονται μέσω επαφής οι οποίες μεταβάλλονται με το επίπεδο της φόρτισης. Η θέση του ουδέτερου άξονα εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ελασμάτων και το μέγεθος της προέντασης των κοχλίων.

Στα Σχήματα 3-37 και 3-38 συγκρίνονται οι επιφάνειες επαφής των ελασμάτων και η θέση του ουδέτερου άξονα όταν η επιβαλλόμενη ροπή στην κορυφή είναι 1000 kNm. Η θέση του ουδέτερου άξονα βρίσκεται στο σημείο έναρξης της επαφής στην περιφέρεια του ελάσματος (με ροζ χρώμα).

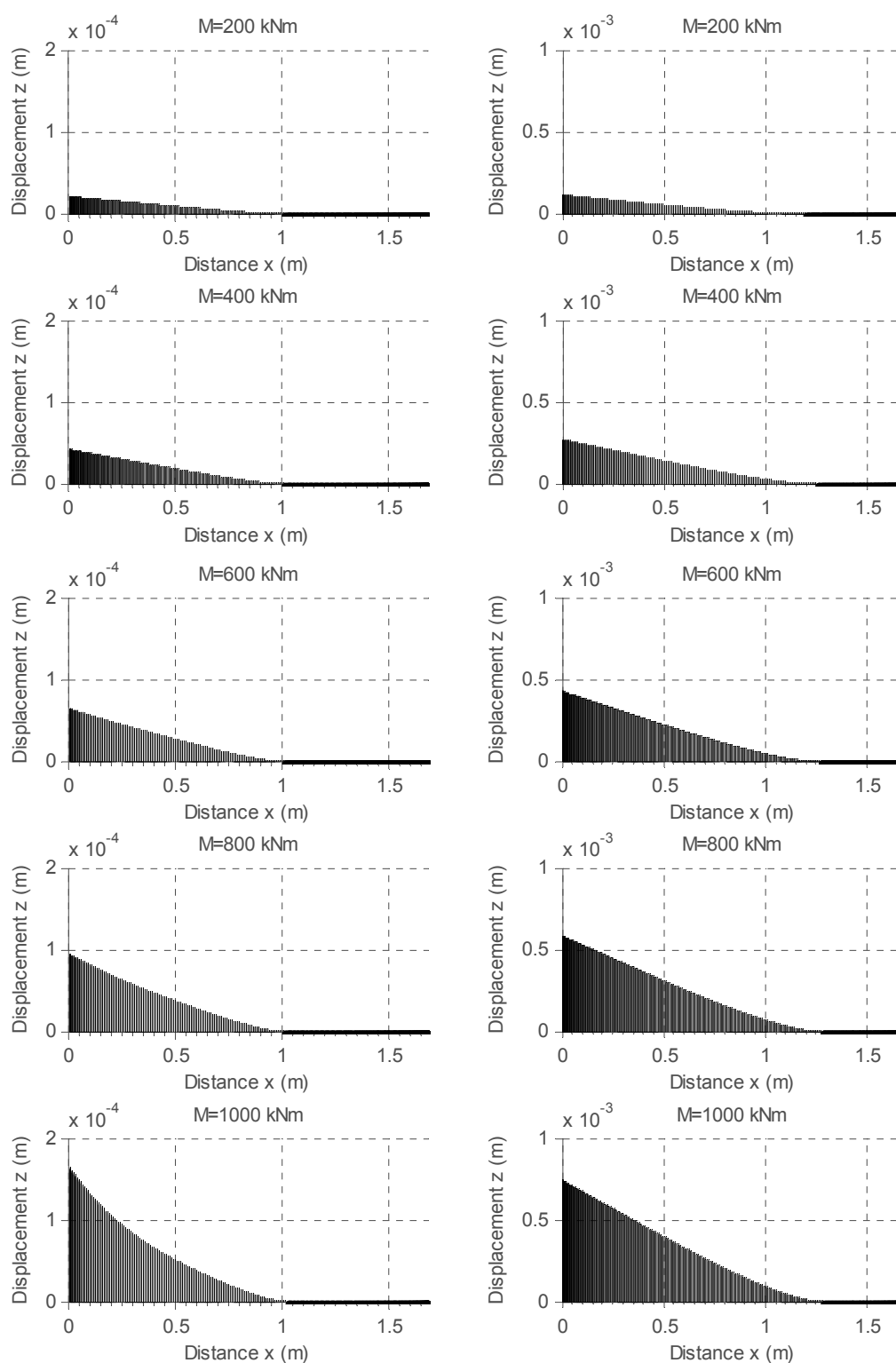


Σχήμα 3-37: Κάτοψη σύνδεσης με τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή για προεντεταμένους κοχλίες



Σχήμα 3-38: Κάτοψη σύνδεσης με τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή για απλούς κοχλίες

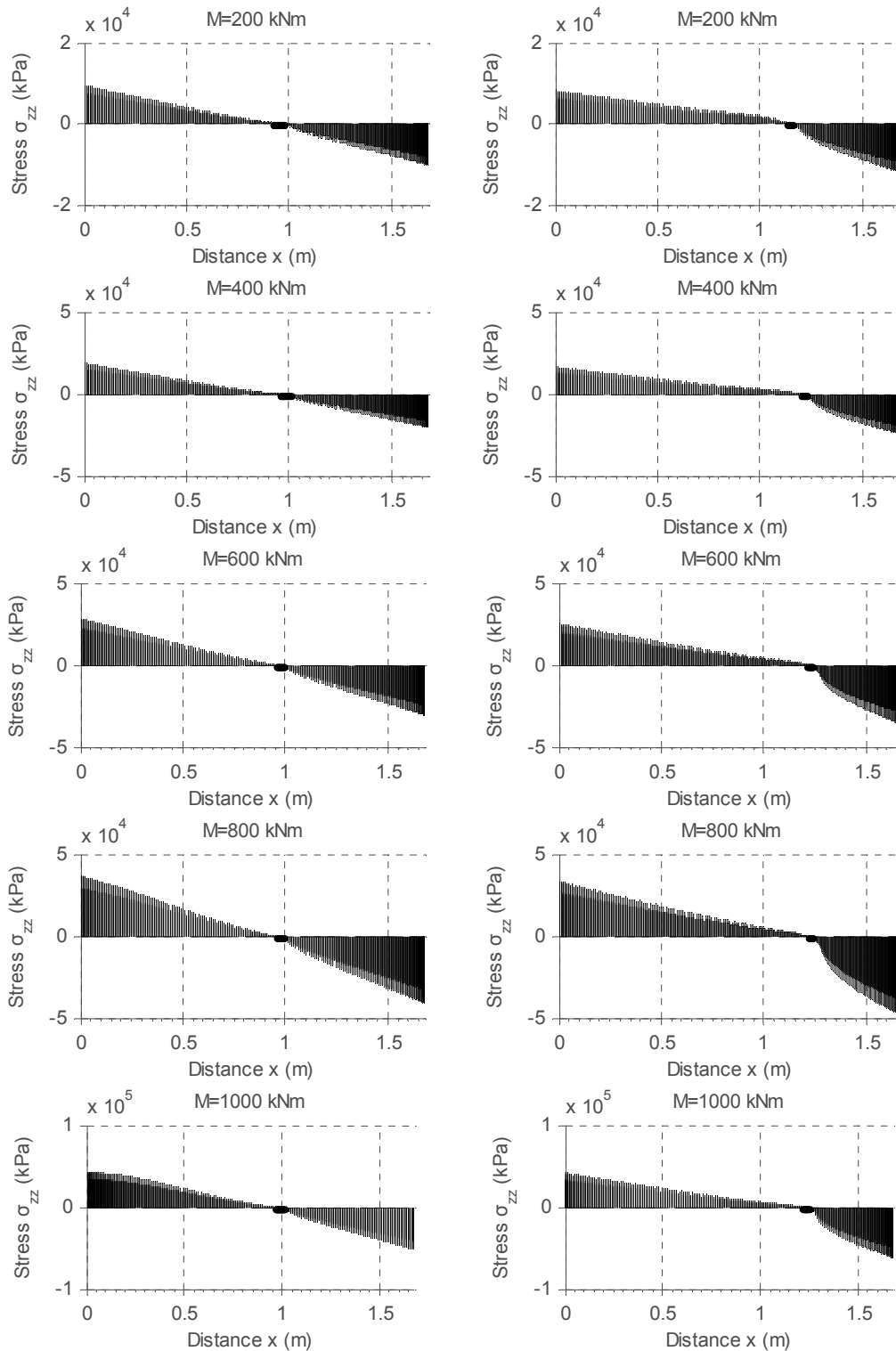
Στα Διαγράμματα 3-39 και 3-40 παρουσιάζονται η κατανομή των κατακόρυφων μετακινήσεων και των ορθών τάσεων στη διατομή του πυλώνα στη θέση της σύνδεσης, με προεντεταμένους (αριστερά) και χωρίς προεντεταμένους (δεξιά) κοχλίες για τιμές επιβαλλόμενης ροπής 200, 400, 600, 800 και 1000 kNm.



Διαγράμματα 3-39: Κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στη διατομή του πυλώνα με προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα

Στη σύνδεση με προεντεταμένους κοχλίες, η θέση του ουδέτερου άξονα βρίσκεται σε απόσταση 0.9 m περίπου από την αρχή των αξόνων, πιο κοντά στον άξονα συμμετρίας της διατομής απ' ότι στη σύνδεση με απλούς κοχλίες που βρίσκεται σε απόσταση 1.2 m περίπου.





Διαγράμματα 3-40: Κατανομή ορθών τάσεων  $\sigma_{zz}$  στη διατομή του πυλώνα με προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα

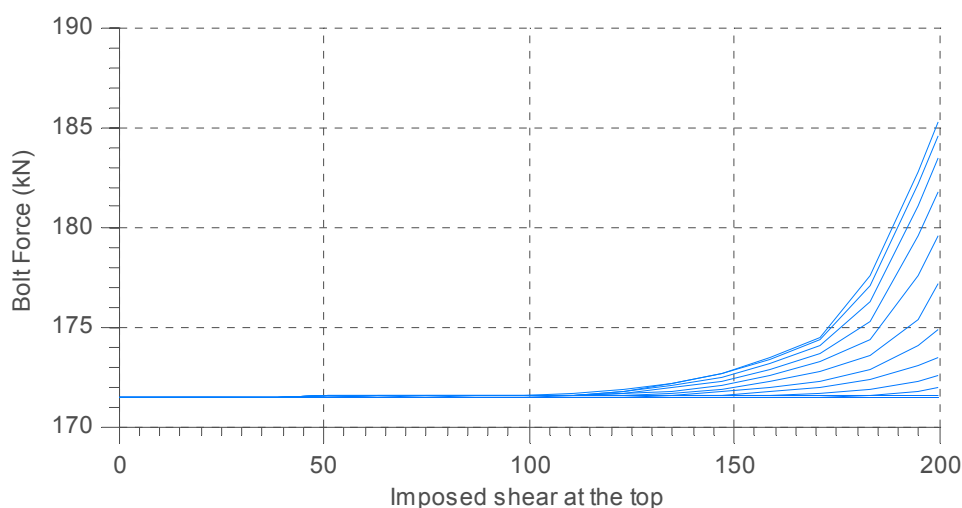
Οι ορθές τάσεις  $\sigma_{zz}$  που αναπτύσσονται στη μέση επιφάνεια της διατομής του πυλώνα λαμβάνουν παραλλήλιες τιμές στις δύο περιπτώσεις με προεντεταμένους και χωρίς προεντεταμένους κοχλίες.

### 3.4.2 Διάτμηση σύνδεσης

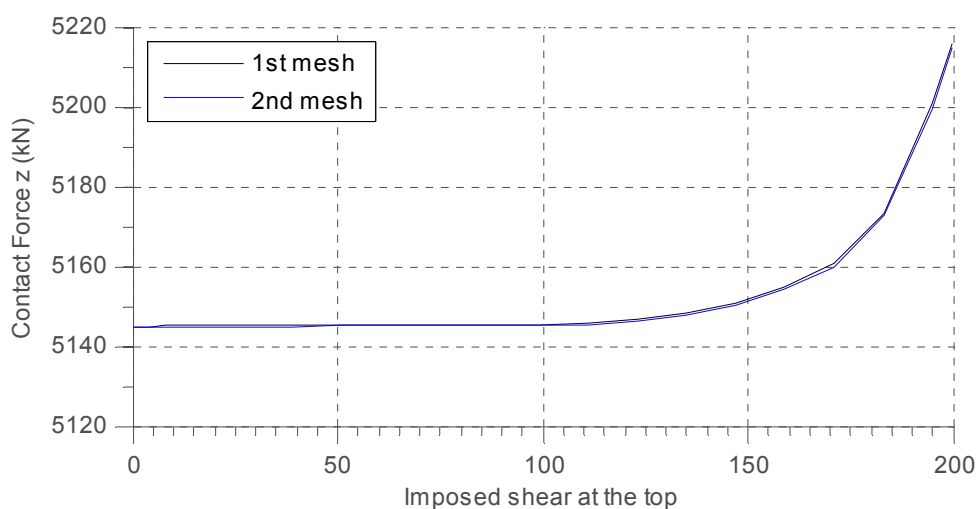
Στη δεύτερη σειρά αναλύσεων της σύνδεσης σε διάτμηση χρησιμοποιήθηκαν τα δύο προσομοιώματα των σχημάτων 3-27 και 3-28. Αρχικά οι κοχλίες προεντείνονται με δύναμη 171.50 kN και στη συνέχεια επιβάλλεται αυξανόμενη σταδιακά τέμνουσα δύναμη ως την τιμή 200 kN στην κορυφή του πυλώνα. Ο συντελεστής τριβής στις επιφάνειες επαφής λήφθηκε ίσος με 0.5. Η τριβή ολίσθησης στα δακτυλιοειδή ελάσματα κατά Coulomb αρχικά είναι:

$$T_{sl} = n \cdot F_{P,C} \cdot \mu = 30 \cdot 171.5 \cdot 0.5 = 2572.5 \text{ kN} \quad (3-3)$$

Στο Διάγραμμα 3-41 παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις των κοχλιών συναρτήσει της επιβαλλόμενης τέμνουσας και στο Διάγραμμα 3-42 παρουσιάζεται κάθετη αντίδραση στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων. Η αναπτυσσόμενη ροπή στη διατομή της σύνδεσης είναι 1000 kNm και επομένως οι αξονικές δυνάμεις στους κοχλίες, οι ορθές τάσεις στη συγκόλληση και η θέση του ουδέτερου άξονα ισχύουν όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.4.1.



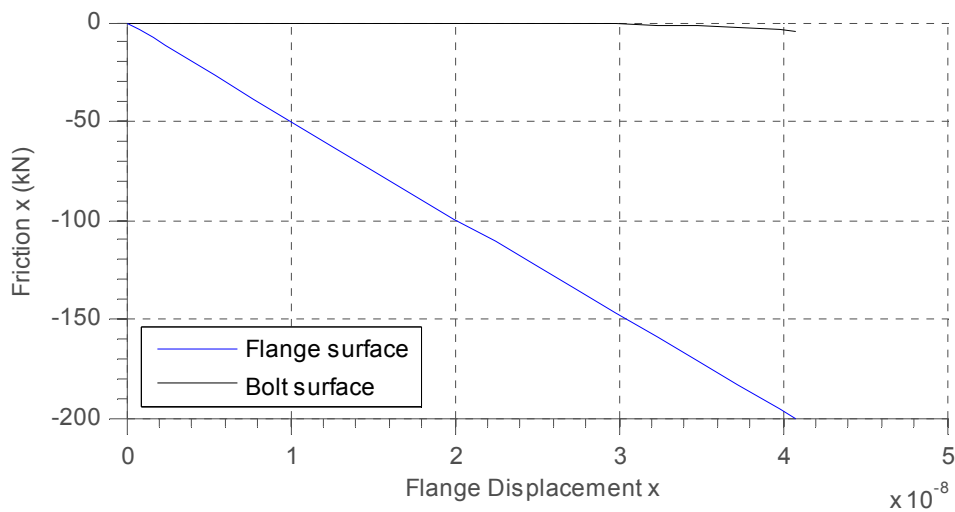
Διάγραμμα 3-41: Δρόμος ισορροπίας αξονικών στους κοχλίες



Διάγραμμα 3-42: Δρόμος ισορροπίας της αντίδρασης μεταξύ των ελασμάτων

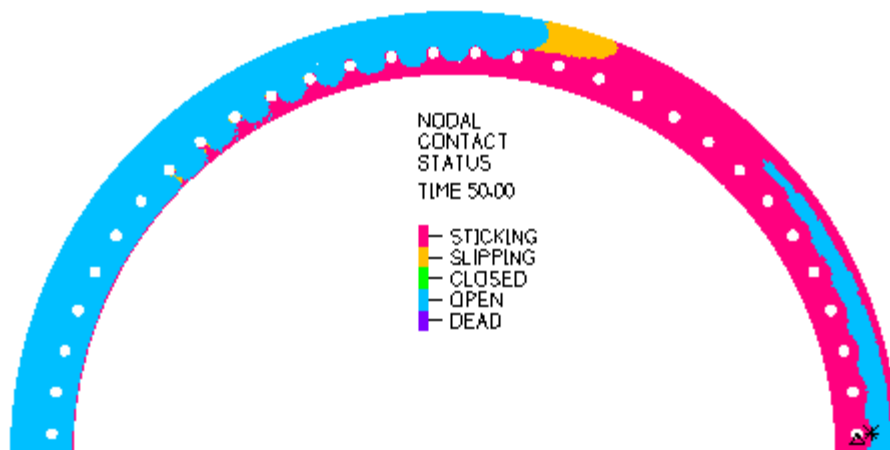
Τα αποτελέσματα από τα δύο προσομοιώματα συγκλίνουν.

Η τριβή ολίσθησης αυξάνεται περαιτέρω καθώς αυξάνεται η εγκάρσια δύναμη μεταξύ των ελασμάτων στην πορεία της φόρτισης λόγω της αύξησης της ροπής, όπως παρουσιάστηκε στο Διάγραμμα 3-42. Η αρχική τριβή ολίσθησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επιβαλλόμενη τέμνουσα και επομένως η σύνθλιψη άντυγας δεν θα λειτουργήσει αφού η ανοχή κάθε οπής είναι 2 mm. Η τέμνουσα παραλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από την τριβή στη διεπιφάνεια των ελασμάτων και όχι από την επαφή της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα, όπως προέκυψε και από την αριθμητική ανάλυση του ενός κοχλία στο Διάγραμμα 3-23. Η συνολική τέμνουσα δύναμη που παραλαμβάνεται από τους κοχλίες και το έλασμα λόγω της επιβαλλόμενης δύναμης στην κορυφή παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3-43, ενώ στο Σχήμα 3-44 απεικονίζεται η επιφάνεια επαφής των δακτυλίων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης για επιβαλλόμενη τέμνουσα 200 kN.



Διάγραμμα 3-43: Τέμνουσα που παραλαμβάνεται μέσω τριβής στους κοχλίες και στη διεπιφάνεια των ελασμάτων

Η επαφή στην επιφάνεια του δακτυλίου με επιβολή τέμνουσας 200 kN ταυτίζεται με την αντίστοιχη εικόνα με την επιβολή ροπής 1000 kNm στην κορυφή του πυλώνα.



Σχήμα 3-44: Κάτοψη σύνδεσης με τις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή για επιβαλλόμενη τέμνουσα 200 kN

## 4 ΚΟΠΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

### 4.1 Η ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Κόπωση είναι η φαινομενικά παράδοξη εκδήλωση ρηγμάτωσης και θραύσης των μετάλλων χωρίς πλαστική παραμόρφωση, όταν αυτά υποβάλλονται σ' ένα μεγάλο αριθμό κυκλικών φορτίσεων, συχνά πολύ μικρής έντασης. Περιοδικές ή κυκλικά επαναλαμβανόμενες φορτίσεις συμβαίνουν για παράδειγμα στους άξονες και τα έδρανα των κινητήρων, στα κρουστικά στελέχη των γεωτρήσεων, στα ικριώματα δονούμενων κοσκίνων, στις σιδηροδρομικές γραμμές, κλπ.

Επαναλαμβανόμενες φορτίσεις στο χρόνο με λιγότερο περιοδικό χαρακτήρα και με μικρότερη συχνότητα παρατηρούνται στα συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών, στις μεταλλικές κατασκευές που είναι εκτεθειμένες στην ενέργεια του ανέμου, στις ηλεκτρικές μηχανές και στροβίλους κατά την εκκίνηση, κλπ. Καταπονήσεις μεγάλης συχνότητας και μικρής σχετικά έντασης επικρατούν στον σκελετό και στα τοιχώματα πλοίων και αεροπλάνων από τις δονήσεις των κινητήρων, κλπ.

Έχει αποδειχθεί ότι μακροχρόνια όλες αυτές οι φορτίσεις προκαλούν θραύσεις από κόπωση. Οι θραύσεις μπορούν να συμβούν με καταπονήσεις πολύ μικρότερες του ορίου θραύσης του χάλυβα, μάλιστα χαμηλότερες και του ορίου διαρροής του. Επιπλέον, η εκδήλωση του φαινομένου δεν συνοδεύεται από πλαστική παραμόρφωση, ενώ η ρηγμάτωση είναι συχνά εσωτερική ή αόρατη. Έτσι αν και η διάδοση της ρωγμής είναι προοδευτική, η θραύση παρουσιάζεται απότομα, όταν η αρηγμάτωση διατομή του μετάλλου μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην αντέχει πια στα επιβαλλόμενα φορτία. Έχουμε τότε συνήθως ψαθυρή θραύση, γιατί το ρήγμα έχει αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος που χρειάζεται για να προκληθεί σχισμός.

Οι συνέπειες των θραύσεων από κόπωση μπορεί να είναι πολύ καταστρεπτικές, γιατί συμβαίνουν σε ανύποπτο χρόνο και πολύ συχνά κάτω από ήπιες συνθήκες λειτουργίας. Τα ίδια εξαρτήματα, κάτω από συνθήκες στατικής καταπόνησης θα άντεχαν σε πολύ ισχυρότερα φορτία και σε περίπτωση υπερφόρτισης θα θραύονταν μόνο ύστερα από πλαστική παραμόρφωση που γίνεται έγκαιρα αντιληπτή και προειδοποιεί για τη λήψη μέτρων.

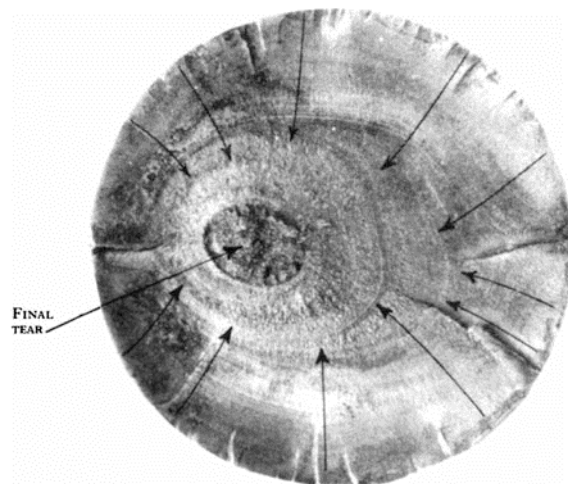
Η αρχική φάση της θραύσης από κόπωση συνδέεται με τη δημιουργία και την έναρξη της διάδοσης μιας μικρής ρωγμής, που γεννιέται πάνω σε μια ατέλεια του μετάλλου. Η ατέλεια μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του αντικειμένου. Είναι σημάδι από τη μηχανουργική κατεργασία, πόρος, έγκλεισμα σκουριάς ή σημείο που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση τάσεων και χαρακτηρίζεται ως αφορμή κόπωσης. Η αφορμή διακρίνεται συχνά δύσκολα. Μπορεί να είναι μία ή πολλές και η κάθε μια μπορεί να ενεργοποιηθεί και να γίνει αφορμή ρήγματος.

Η ενεργοποίηση μιας αφορμής οφείλεται σε τοπική συγκέντρωση τάσεων που μπορεί να φτάσει στο όριο θραύσης. Το ρήγμα που γεννιέται στην αφορμή διευρύνεται σταδιακά με κάθε νέο κύκλο φόρτισης. Η προχώρηση προκαλείται από τη μεγάλη συγκέντρωση τάσεων που δημιουργούνται περιοδικά στο μέτωπο της ρωγμής. Έτσι το ρήγμα προχωρεί σιγά-σιγά κατά βήματα. Η επιφάνεια της θραύσης από κόπωση είναι σχετικά λεία και συχνά στιλπνή (Σχήμα 4-1α). Αυτό οφείλεται στην τριβή των δύο επιφανειών της ρωγμής στη διάρκεια της κόπωσης. Αντίθετα η θραυσιγενής επιφάνεια που προκύπτει από την απότομη θραύση, όταν η διατομή έχει μειωθεί υπερβολικά έχει συνήθως τα χαρακτηριστικά της ψαθυρής θραύσης. Μπορεί επίσης σε σπανιότερες περιπτώσεις να έχει τα χαρακτηριστικά όλκιμης θραύσης όταν το μέταλλο είναι εξαιρετικά όλκιμο.

Συχνά στην επιφάνεια της κόπωσης παρατηρείται μια ακολουθία συγκεντρικών καμπυλών, γνωστών σαν "μέτωπα διακοπής" (Σχήμα 4-1β). Το κοινό τους κέντρο δείχνει της εστία από την οποία ξεκίνησε το ρήγμα, δηλαδή την αφορμή. Οι γραμμές αυτές υλοποιούν το μέτωπο του ρήγματος σε κάποια στιγμή που μεταβλήθηκαν σημαντικά οι συνθήκες φόρτισης. Οι θραυσιγενείς επιφάνειες έχουν χαρακτηριστική διεύθυνση, ανάλογα με τον τύπο της φόρτισης και κατά κανόνα είναι κάθετες στη μέγιστη από τις τρεις κύριες τάσεις.



Σχήμα 4-1α



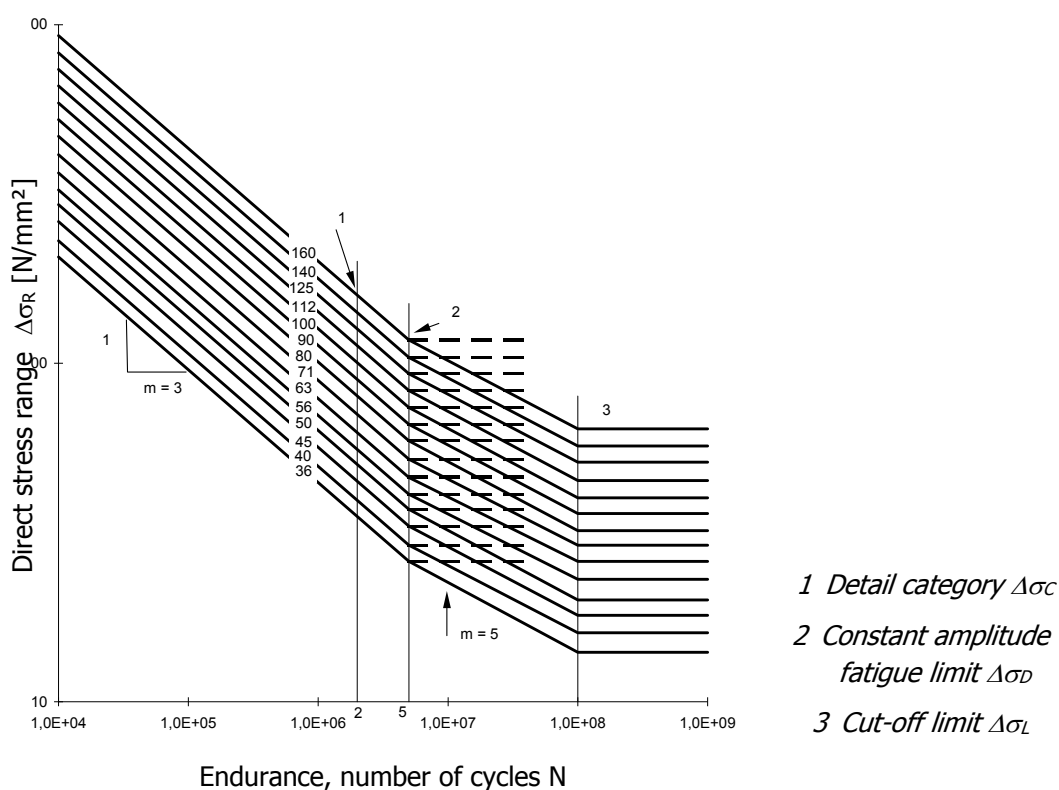
Σχήμα 4-1β

Σχήμα 4-1α: Αστοχία κόπωσης λόγω ανακυκλικής καμπτικής έντασης. Στην περιφέρεια της διατομής εμφανίζονται ορισμένες αφορμές. Η επιφάνεια αστοχίας είναι λεία ενώ διαφαίνονται και τα μέτωπα διακοπής. Στο κέντρο με σκούρο χρώμα βρίσκεται η θραυσιγενής επιφάνεια που είναι τραχιά και με ψαθυρά χαρακτηριστικά αστοχίας.

Σχήμα 4-1β: Αστοχία κόπωσης λόγω ανακυκλικής εφελκυστικής - θλιπτικής καταπόνησης. Διακρίνονται οι ομόκεντροι κύκλοι που είναι τα "μέτωπα διακοπής", και η περιοχή με σκούρο χρώμα και τραχιά χαρακτηριστικά που είναι η θραυσιγενής επιφάνεια.

## 4.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Ο προσδιορισμός της αντοχής ενός μετάλλου σε κόπωση κάτω από καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας απαιτεί πολλές δοκιμές. Συνήθως 10-12 δοκίμια υποβάλλονται διαδοχικά σε κυκλική καταπόνηση ορισμένου τύπου, αλλάζοντας κάθε φορά την ένταση της καταπόνησης. Σε κάθε δοκιμή μετριέται ο αριθμός των κύκλων  $N$  που χρειάστηκαν για να θραυσθεί το δοκίμιο. Τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων συγκεντρώνονται σε ένα τυπικό διάγραμμα που απεικονίζει το εύρος της έντασης των καταπονήσεων  $\Delta\sigma$ , σε συνάρτηση με τον αριθμό των κύκλων  $N$  μέχρι τη θραύση, σε λογαριθμική κλίμακα. Έτσι κάθε δοκίμιο που θραύστηκε αντιστοιχεί σε ένα σημείο της καμπύλης S-n (Διάγραμμα 4-2).



Διάγραμμα 4-2: Καμπύλες αντοχής σε κόπωση του EN 1993-1-9 [7]

Στις καμπύλες διακρίνονται αναφορικά ως προς την ένταση της καταπόνησης τρεις περιοχές οι οποίες ξεχωρίζουν με τα ακόλουθα όρια.

**Όριο κόπωσης σταθερού πλάτους (Constant amplitude fatigue limit):** Το οριακό εύρος ορθών ή διατμητικών τάσεων, κάτω από το οποίο δεν σημειώνονται βλάβες από κόπωση σε πειράματα με τάσεις σταθερού πλάτους. Για συνθήκες μεταβλητού πλάτους, όλα τα εύρη τάσεων πρέπει να είναι μικρότερα από αυτό το όριο για να μην σημειωθούν βλάβες λόγω κόπωσης.

**Όριο αποκοπής (cut-off limit):** Όριο κάτω από το οποίο εύρη τάσεων του φάσματος σχεδιασμού δεν συνεισφέρουν στην υπολογιζόμενη συσσώρευση βλάβης από κόπωση.

Ομοίως δημιουργούνται καμπύλες αντοχής σε κόπωση για εύρη διατμητικών τάσεων.

Η καμπύλη S-n ή καμπύλη Wohler όπως αλλιώς ονομάζεται παρουσιάζει στατιστικό χαρακτήρα αφού η διασπορά των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές δοκιμές κόπωσης είναι συχνά πολύ μεγάλη σε σχέση με άλλες μηχανικές δοκιμές. Σαν κύρια αιτία που η αντοχή σε κόπωση παρουσιάζει τυχαίο χαρακτήρα μπορεί να θεωρηθεί η ύπαρξη μικροσφαλμάτων, των οποίων το πλήθος, το μέγεθος και η κατανομή στο εσωτερικό δεν μπορούν να σταθμιστούν με ακρίβεια. Άλλοι παράγοντες είναι το σχήμα των δοκιμίων, η επιφανειακή τους κατάσταση από πλευράς μηχανουργικής κατεργασίας, η θερμοκρασία, η μορφή της καταπόνησης, κ.α. Έτσι καμπύλες S-n μπορούν να δημιουργηθούν για διάφορες πιθανότητες επιβίωσης όπως π.χ. 95%.

### 4.3 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΝ ΑΠΟ ΚΟΠΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΛΗΨΗ

Η ανίχνευση ρωγμών κόπωσης σε εξαρτήματα που λειτουργούν είναι πολύ δύσκολη. Οι ρωγμές είναι αρχικά πολύ λεπτές ώστε δεν φαίνονται με το μάτι, παρά μόνον όταν η θραύση προχωρήσει στο 80-90% της διατομής. Συχνά, όπως είπαμε οι ρωγμές είναι εσωτερικές και δεν υπάρχει καμία δυνατότητα παρατήρησης τους. Η μόνη αποτελεσματική μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση μη καταστρεπτικών δοκιμών, όπως η ραδιογραφία, οι υπέρηχοι και τα διεισδυτικά υγρά.

Για την πρόληψη της κόπωσης η βασική ιδέα είναι η αποφυγή της συγκέντρωσης τάσεων σε περιοχές που υφίστανται περιοδικές καταπονήσεις. Το σχήμα του αντικειμένου παίζει σπουδαίο ρόλο, επειδή οι μεταβολές της διατομής, οι οπές, τα σπειρώματα και οι ακμές οδηγούν σε συγκεντρώσεις τάσεων. Επιπλέον, πρέπει να προβλέπεται για τις ακμές σημαντική ακτίνα καμπυλότητας. Η αντοχή σε κόπωση είναι καλύτερη όσο η μικρογεωμετρία της επιφάνειας είναι λεπτότερη. Απαιτείται δηλαδή όσο είναι επιτρεπτό ένα καλύτερο τελείωμα (φινίρισμα) της επιφάνειας, αφού τα ίχνη της μηχανικής κατεργασίας (αυλακώσεις από το τρνίρισμα, ίχνη εργαλείων) αποτελούν εν δυνάμει αφορμές κόπωσης. Η επιφανειακή σκλήρωση με ενανθράκωση και εναζώτωση είναι ευνοϊκοί παράγοντες επειδή εισάγουν ευνοϊκές θλιπτικές προεντάσεις. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με το ότι τα ρήγματα της κόπωσης δημιουργούνται και επεκτείνονται μόνο στο εφελκυστικό και ποτέ στο θλιπτικό στάδιο ενός κύκλου. Κατ' επέκταση η εισαγωγή θλιπτικής έντασης στο πεδίο τάσεων μέσω διαφόρων μορφών μηχανικής προέντασης λειτουργεί ευμενώς έναντι αστοχίας από κόπωση.

#### 4.4 ΜΕΛΕΤΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΑ

Η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα της ανεμογεννήτριας που παρουσιάστηκε στο Κεφαλαίο 2 μελετήθηκε έναντι κόπωσης σύμφωνα με το EN 1993-1-9 [7], ώστε να υπάρχει ένα αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας ότι η λειτουργία της ανεμογεννήτριας θα είναι ικανοποιητική κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού. Το EN 1991-1-4 [5] δεν παρέχει προσομοίωμα φορτίων κόπωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών, επομένως για τον προσδιορισμό των φορτίων κόπωσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που αναγράφεται στο Παράρτημα Α του EN 1993-1-9. Συνοπτικά τα βήματα της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- A.1 Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης
- A.2 Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων της λεπτομέρειας
- A.3 Μέτρηση κύκλων
- A.4 Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού
- A.5 Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης
- A.6 Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

Ο υπολογισμός αντοχής σε κόπωση γίνεται χρησιμοποιώντας μια από τις παρακάτω μεθόδους του EN 1993-1-9:

- τη μέθοδο ανοχής βλαβών (Damage tolerant), ή
- τη μέθοδο ασφαλούς ζωής (Safe life)

Η μέθοδος ανοχής βλαβών θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή αξιοπιστία ότι η κατασκευή θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού. Μπορεί να εφαρμοσθεί υπό την προϋπόθεση ύπαρξης συγκεκριμένου πλαισίου επιθεώρησης και συντήρησης για τη διαπίστωση και την επιδιόρθωση βλαβών από κόπωση ή όταν είναι δυνατή η ανακατανομή της έντασης στα στοιχεία του φορέα στην περίπτωση εμφάνισης βλαβών από κόπωση.

Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να παρέχει αποδεκτή αξιοπιστία ότι η κατασκευή θα λειτουργεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού χωρίς την ανάγκη επιθεωρήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της για βλάβες από κόπωση. Η μέθοδος ασφαλούς ζωής θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η τοπική εμφάνιση βλαβών σε ένα στοιχείο μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αστοχία του στοιχείου αυτού ή του φορέα.

Για να επιτευχθεί ένα αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας, γίνεται χρήση επιμέρους συντελεστή ασφαλείας για αντοχή σε κόπωση  $\gamma_{mf}$  (Πίνακας 4-3), λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες τυχόν αστοχίας και τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία σχεδιασμού.

Assessment method	Consequence of failure	
	Low consequence	High consequence
Damage tolerant	1,00	1,15
Safe life	1,15	1,35

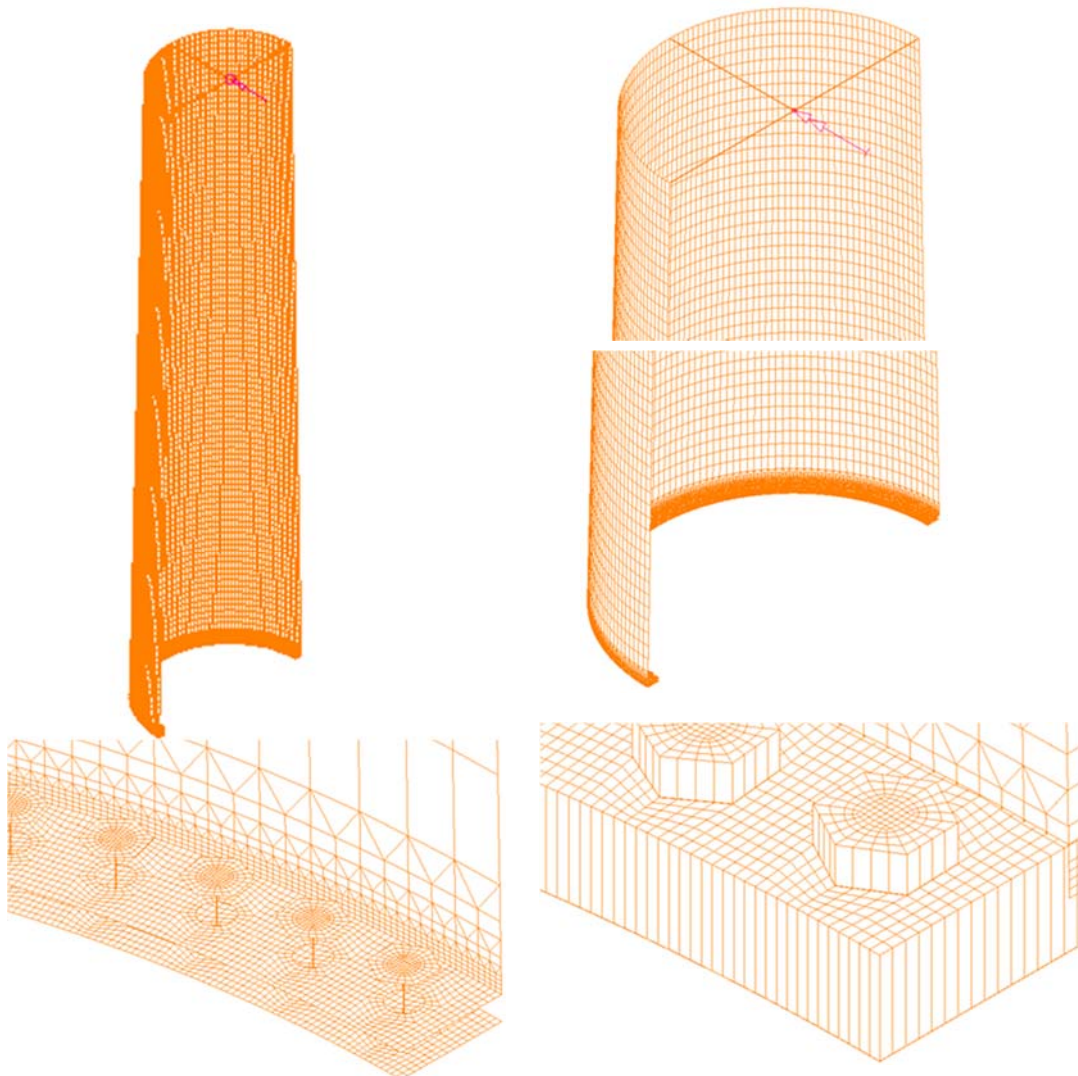
Πίνακας 4-3: Συνιστώμενες τιμές συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_{mf}$  για αντοχή σε κόπωση



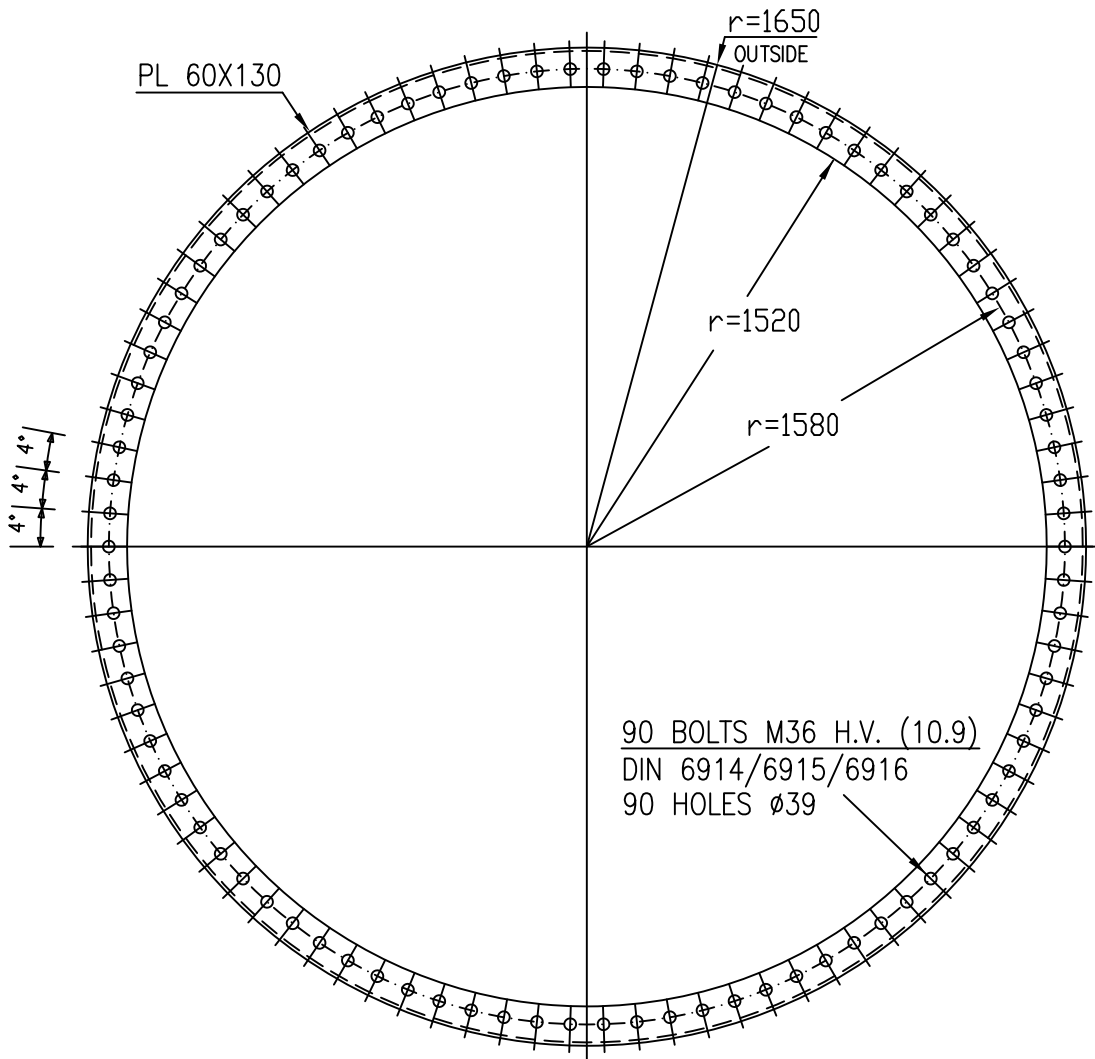
#### 4.4.1 Γεωμετρία σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας στον πυλώνα

Η υπό μελέτη σύνδεση βρίσκεται στο 0.85 του ύψους του πυλώνα και αποτελείται από δύο δακτυλίους με εξωτερική διάμετρο 3.300 m, εσωτερική διάμετρο 3.040 m και πάχος ελασμάτων 60 mm. Η σύνδεση είναι κατηγορίας E συνδέσεων εφελκυσμού και κατηγορίας B σε διάτμηση. Συνολικά χρησιμοποιούνται 90 προεντεταμένοι κοχλίες M36 ποιότητας 10.9 ανά 4° μοίρες. Οι επιφάνειες των ελασμάτων λήφθηκαν ως αμβολισμένες και οι οπές τους κανονικές με ανοχή 3 mm. Παρακάτω ακολουθούν τα σχέδια με τις λεπτομέρειες της σύνδεσης σε κάτοψη και τομή.

Η προσομοίωση έγινε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων δοκού και κελύφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-4. Το έλασμα της φλάντζας καθώς και η κολουροκωνική επιφάνεια του πυλώνα έως την κορυφή προσομοιώθηκαν με στοιχεία κελύφους, οι κοχλίες με στοιχεία δοκού και οι στηρίξεις λήφθηκαν σύμφωνα με τις συνθήκες συμμετρίας. Οι επαφές που προσομοιώθηκαν είναι της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα καθώς και η διεπαφή των δυο ελασμάτων μεταξύ τους. Τέλος δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας όλων των κόμβων της κορυφής του πυλώνα σε έναν κεντρικό στον οποίο επιβλήθηκαν οι δράσεις του ανέμου.



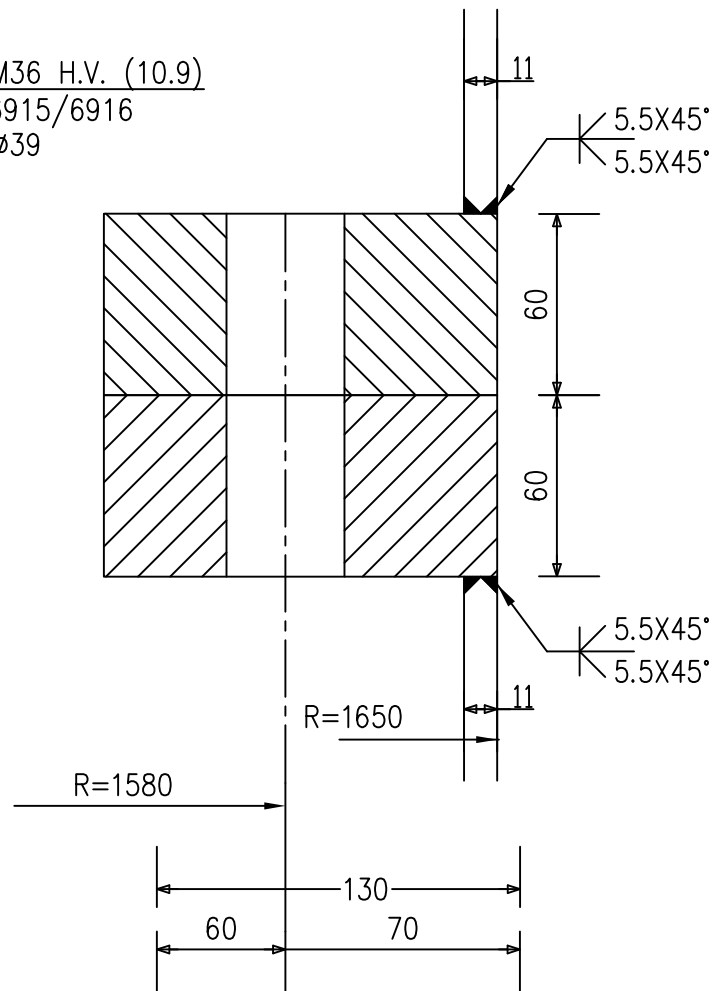
Σχήμα 4-4: Προσομοίωση πυλώνα και σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας



TOP VIEW OF FLANGE

1/25

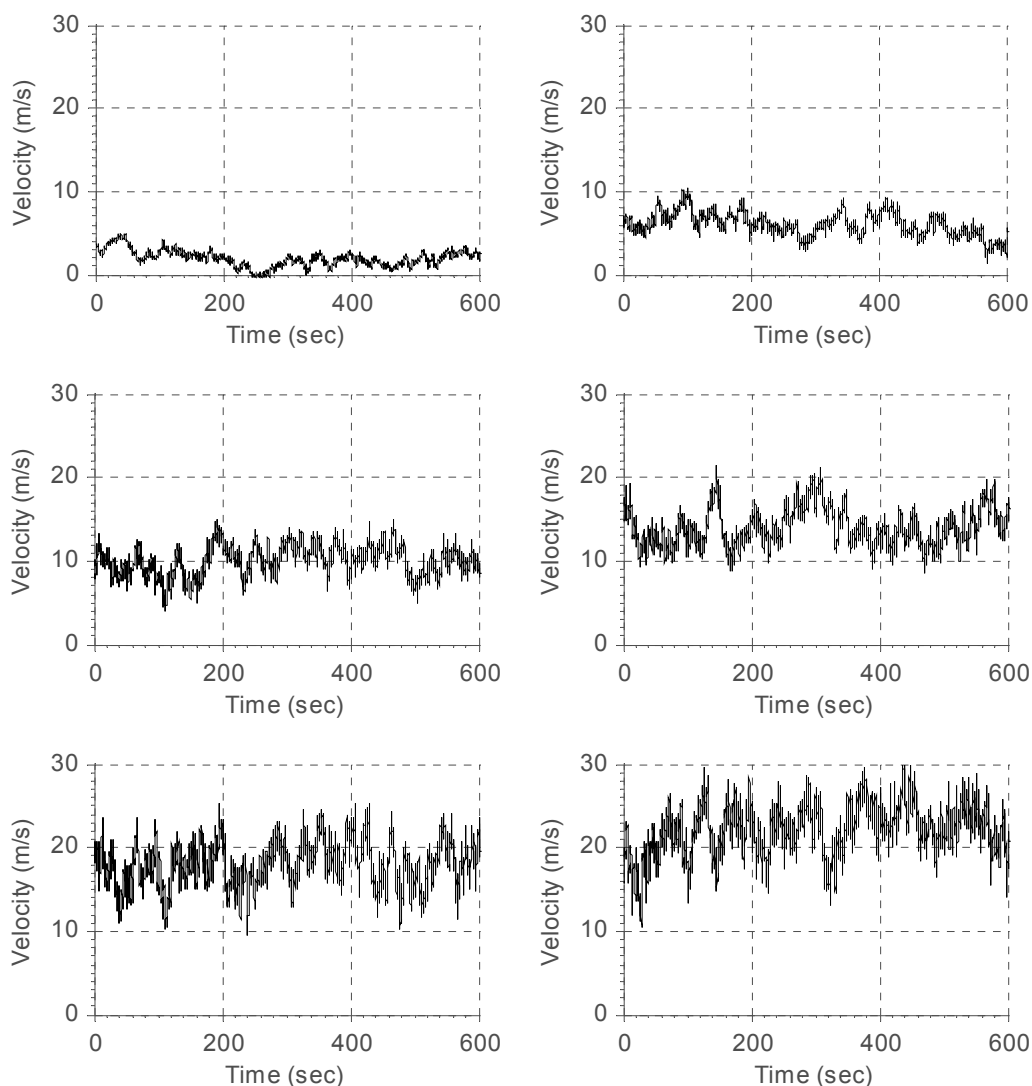
90 BOLTS M36 H.V. (10.9)  
DIN 6914/6915/6916  
90 HOLES  $\phi 39$



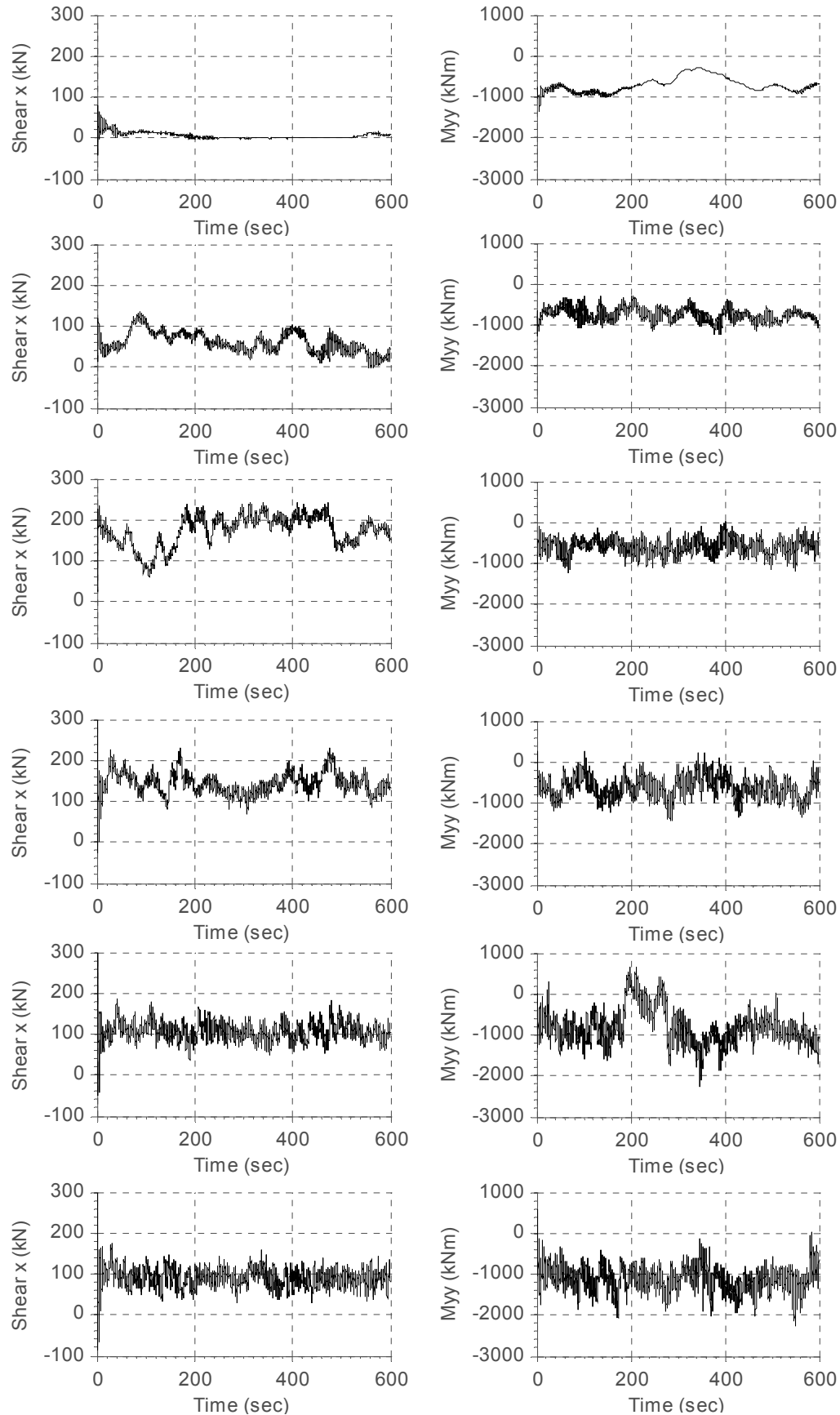
FLANGE SECTION  
1/2.5

#### 4.4.2 Προσδιορισμός γεγονότων φόρτισης

Οι χρονοϊστορίες φόρτισης της ανεμογεννήτριας δημιουργήθηκαν σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2, με χρήση των λογισμικών Turbsim, Fast και Aerodyn για άνεμο κατηγορίας τύρβης Β και σύμφωνα με το φάσμα συχνοτήτων τύπου Kaimal. Αρχικά δημιουργήθηκαν έξι χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμου στο ύψος της πλήμνης (hub height) με μέση ταχύτητα 10 λεπτών 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s, οι οποίες καλύπτουν όλο το εύρος πιθανών ταχυτήτων υπό συνήθεις εξωτερικές συνθήκες και παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4-5. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι χρονοϊστορίες τέμνουσας και ροπής στην κορυφή του πυλώνα για αυτούς τους ανέμους (Διαγράμματα 4-6) και επιβλήθηκαν στο προσομοίωμα.



Διαγράμματα 4-5: Χρονοϊστορίες ταχυτήτων ανέμου 10λέπτου με μέση τιμή 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s αντίστοιχα



Διαγράμματα 4-6: Χρονοϊστορίες τέμνουσας κατά x και ροπής περί τον άξονα yy στην κορυφή του πυλώνα για μέσες ταχύτητες ανέμου 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s αντίστοιχα

#### 4.4.3 Προσδιορισμός ιστορικού τάσεων της λεπτομέρειας

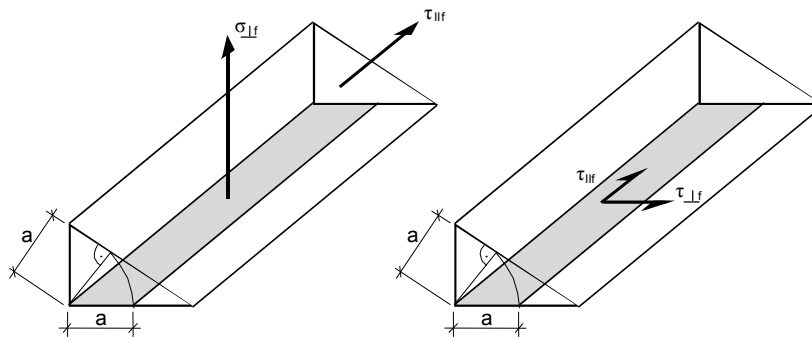
Για τον υπολογισμό του ιστορικού τάσεων που αναπτύσσεται στους κοχλίες καθώς και στη συγκόλληση της σύνδεσης επιβλήθηκαν οι παραπάνω χρονοϊστορίες στην κορυφή του πυλώνα του προσομοιώματος. Οι κοχλίες διατήρησαν σταθερή αξονική ένταση ίση με τη δύναμη προέντασης τους σε όλες τις αναλύσεις καθώς η επιβαλλόμενη ροπή παραλήφθηκε μέσω της ανακατανομής της αντίδρασης μεταξύ των ελασμάτων. Στη ραφή της συγκόλλησης αναπτύσσονται οι ακόλουθες τάσεις (Σχήμα 4-7):

- Ορθές τάσεις  $\sigma_{wf}$  κάθετες στον άξονα της ραφής:

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2} \quad (4-1)$$

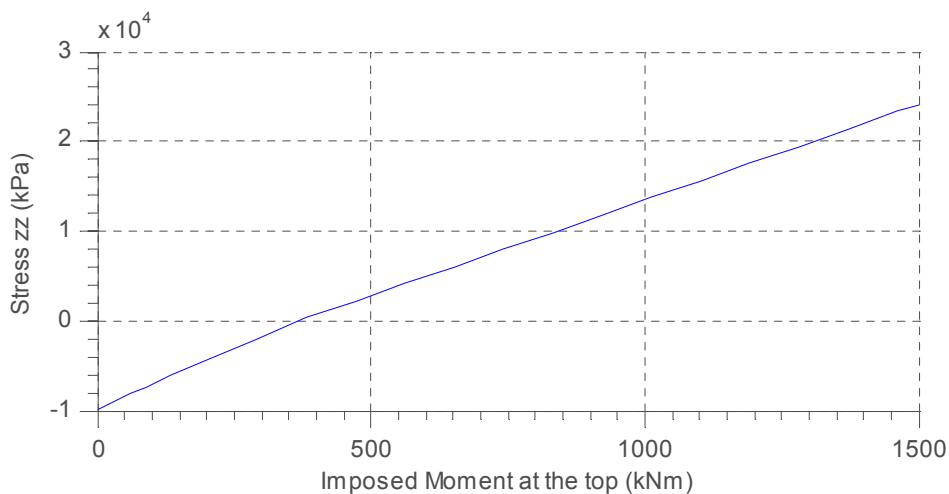
- Διατμητικές τάσεις  $\tau_{wf}$  κατά μήκος του άξονα της ραφής:

$$\tau_{wf} = \tau_{\parallel f} \quad (4-2)$$



Σχήμα 4-7: Τάσεις αναφοράς στη συγκόλληση

Η θέση ελέγχου της συγκόλλησης βρίσκεται στην εφελκόμενη παρειά του πυλώνα. Η διατμητική τάση  $\tau_{\parallel f}$  παίρνει αξιοσημείωτες τιμές στη θέση αυτή όταν ο κυρίαρχος άνεμος δεν έχει μηδενική οριζόντια γωνία, και αναπτύσσεται τέμνουσα κατά  $y$  στον πυλώνα που στην περίπτωση μας αμελείται. Η διατμητική τάση  $\tau_{\perp f}$  λαμβάνει αμελητέες τιμές καθώς ο έλεγχος γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια της συγκόλλησης όπου η  $\sigma_{\perp f}$  είναι μέγιστη. Η μεταβολή της ορθής τάσης της συγκόλλησης στην εφελκόμενη παρειά του πυλώνα απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4-8:

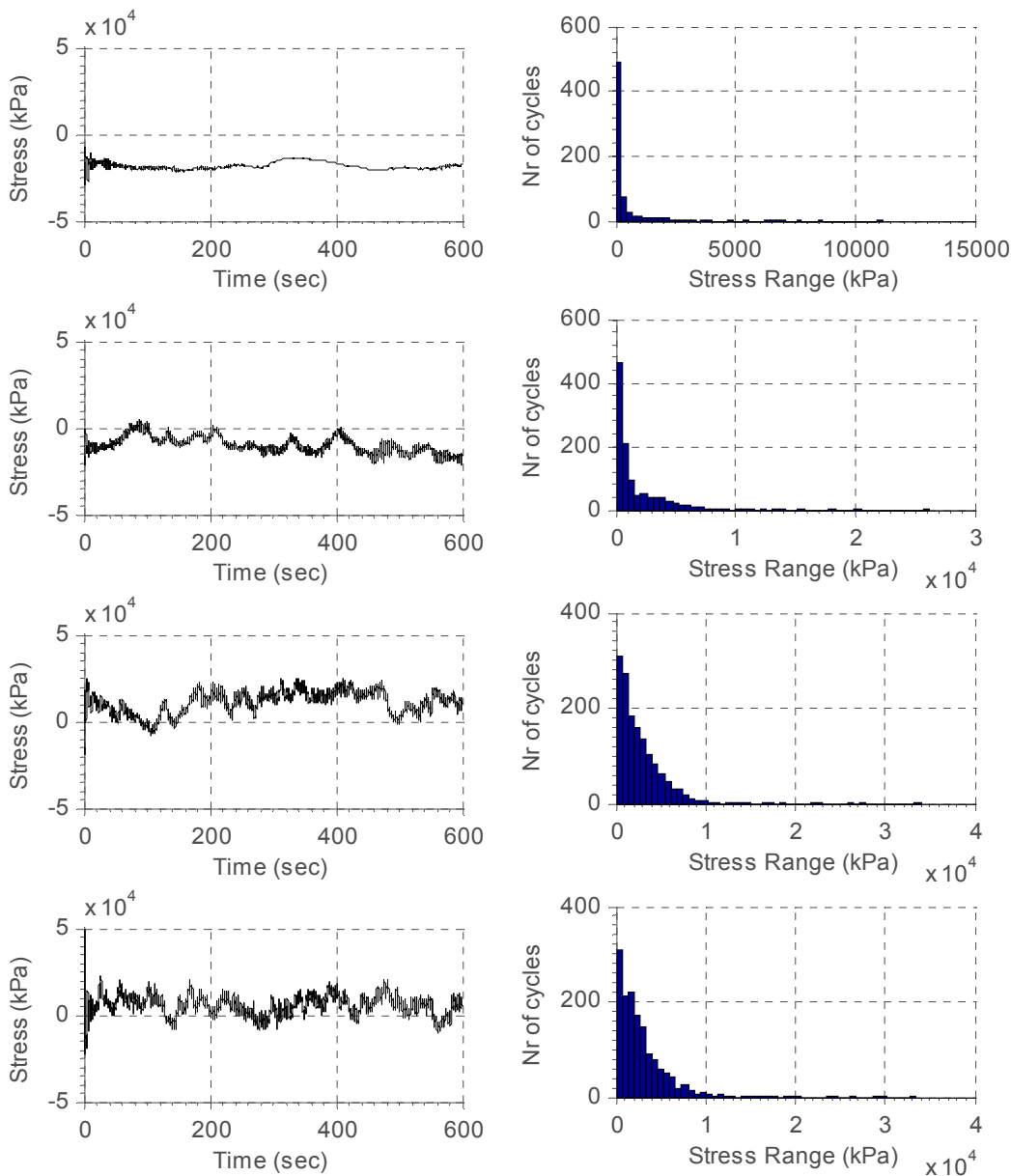


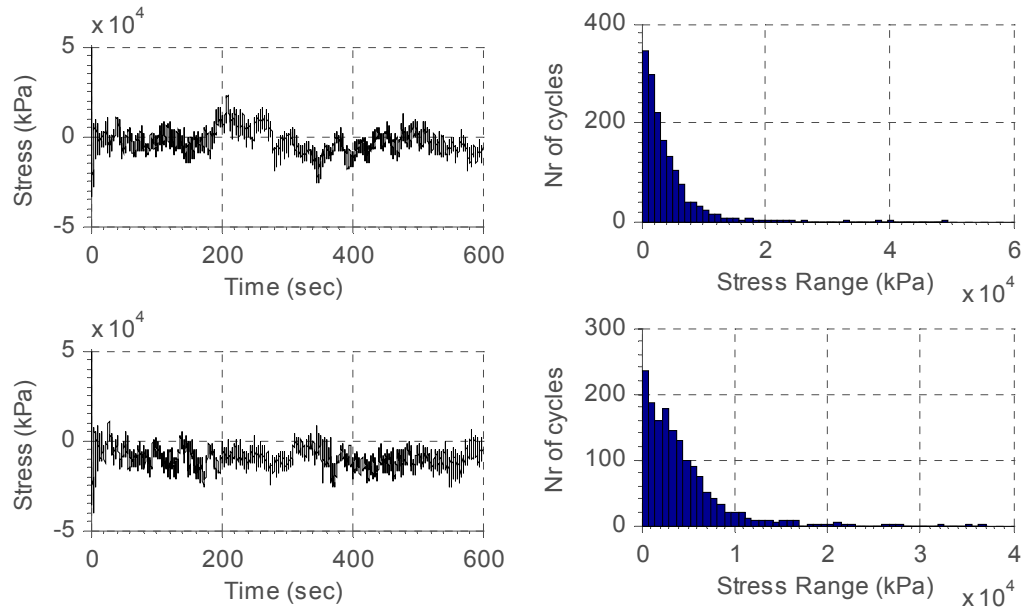
Διάγραμμα 4-8: Ορθή τάση  $\sigma_{\perp f}$  στην εφελκόμενη παρειά συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής

#### 4.4.4 Μέτρηση κύκλων

Το διάγραμμα τάσεων συναρτήσει του χρόνου σε κάθε σημείο είναι ακανόνιστο και τυχαίο με μεταβλητή συχνότητα και εύρος. Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι τι σημαίνει κύκλος και ποιο είναι σε κάθε κύκλο το αντίστοιχο εύρος τάσης. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους που έχουν κατά καιρούς προταθεί εκ των οποίων οι δύο πιο γνωστές που έχουν υιοθετηθεί ευρέως είναι η μέθοδος της "δεξαμενής (reservoir)" και η μέθοδος της "βροχής (rainflow)". Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμπίπτουν παρά μόνο αλλάζει η διαδικασία υπολογισμού.

Για τον έλεγχο της συγκόλλησης, δημιουργήθηκαν τα ιστογράμματα του εύρους τάσεων (Διαγράμματα 4-9) με τη μέθοδο "rainflow", από τα αντίστοιχα ιστορικά τάσεων στην εφελκόμενη εξωτερική παρειά της συγκόλλησης που είναι και η δυσμενέστερη, για κάθε μια από τις έξι χρονοϊστρίες φόρτισης ανέμου. Επειδή ο έλεγχος αφορά την κόπωση και γίνεται για συνθήκες συνθήκες λειτουργίας, αγνοήθηκαν τα πρώτα 10 sec του ιστορικού τάσεων, όπου παρουσιάζονται έντονες αυξομειώσεις κατά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.





Διαγράμματα 4-9: Ιστορικό ορθών τάσεων στη συγκόλληση και ιστογράμματα εύρους τάσεων για μέσες ταχύτητες ανέμου 2, 6, 10, 14, 18, 22 m/s αντίστοιχα

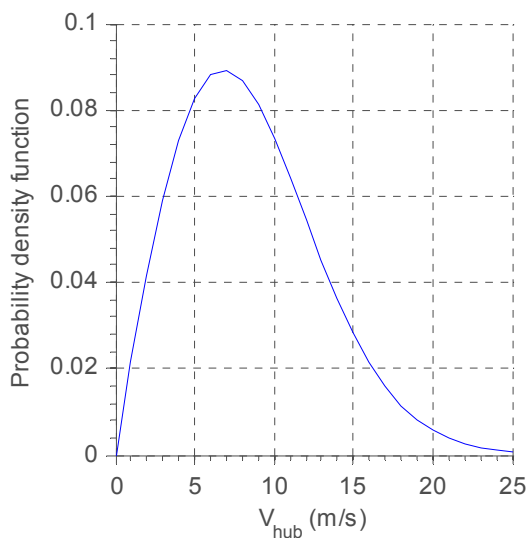
**4.4.5 Δημιουργία φάσματος σχεδιασμού**

Για να υπολογισθεί ο ετήσιος αριθμός των κύκλων σε όλα τα εύρη τάσεων από τον αριθμό των κύκλων 10λεπτου, χρειάζεται να εκτιμηθεί η κατανομή που ακολουθεί η μέση ταχύτητα ανέμου των 10 λεπτών. Αυτή σύμφωνα με το IEC 61400-1 [4] ακολουθεί την κατανομή Rayleigh (4-3), της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστική συνάρτηση κατανομής παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 4-10 και 4-11 αντίστοιχα.

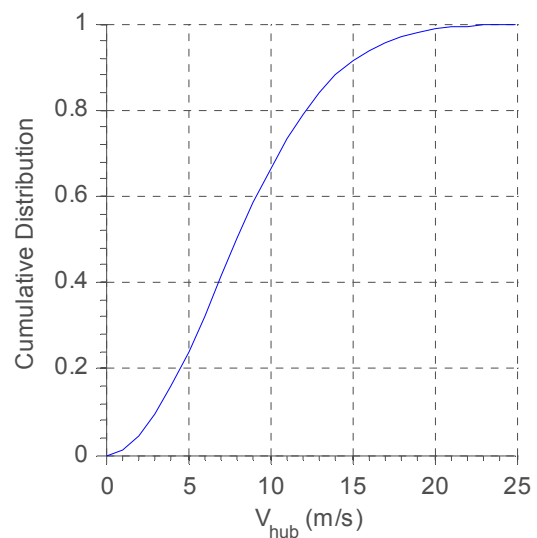
$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp[-\pi(V_{hub} / 2V_{ave})^2] \tag{4-3}$$

όπου:

$$V_{ave} = 0.2 \cdot V_{ref}, V_{ref} = 42.5 \text{ m/s.}$$



Διάγραμμα 4-10: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Rayleigh



Διάγραμμα 4-11: Συνάρτηση αθροιστικής κατανομής κατανομής Rayleigh

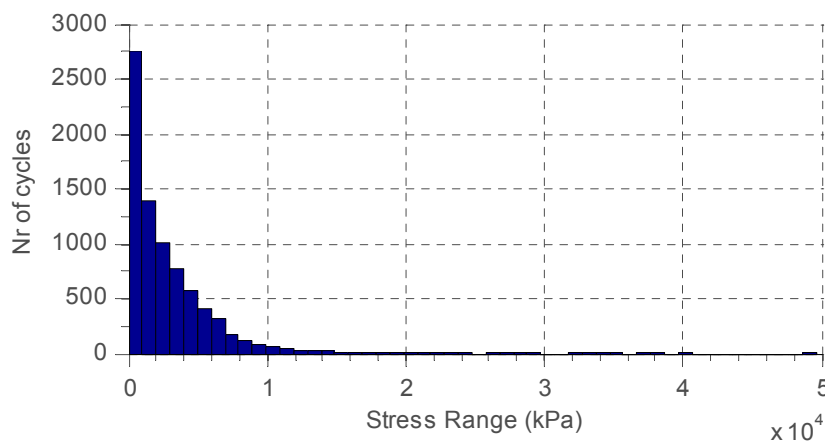


Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τις πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου 0-4, 4-8, 8-12, 12-16, 16-20, 20-24 m/s:

Wind Velocity (m/s)	Possibility
0-4	0.160
4-8	0.342
8-12	0.290
12-16	0.147
16-20	0.049
20-24	0.011

Πίνακας 4-12: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου

Ο ετήσιος αριθμός κύκλων προκύπτει από το συνολικό άθροισμα του αριθμού κύκλων των 10 λεπτών επί την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης (Πίνακας 4-12), επί το πλήθος των 10λέπτων στο έτος ίσο με  $6 \cdot 24 \cdot 365$ , και δημιουργείται το ακόλουθο φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-13.



Διάγραμμα 4-13: Φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων

#### 4.4.6 Υπολογισμός συγκέντρωσης βλάβης

Κατά τη φόρτιση μεταβλητής διακύμανσης και διαφορετικού κύκλου επαναλήψεων, προκαλείται στην υπό έλεγχο λεπτομέρεια μια συσσώρευση βλάβης (cumulative damage), για την εκτίμηση της οποίας έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες. Η απλούστερη είναι αυτή που διατυπώθηκε από τους Palmgren-Miner, γνωστή ως κανόνας Miner η οποία ορίζεται με την ακόλουθη συνθήκη:

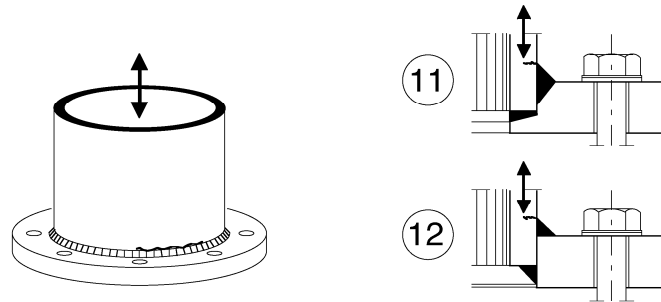
$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (4-4)$$

όπου:

$n_{Ei}$  ο αριθμός των κύκλων που αντιστοιχεί σε εύρος τάσεων  $\gamma_{ff} \Delta \sigma_i$  για τη ζώνη  $i$  στο φάσμα σχεδιασμού

$N_{Ri}$  η διάρκεια ζωής (σε κύκλους) που προκύπτει από την επαυξημένη καμπύλη  $\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_R$   
για εύρος τάσεων  $\gamma_{FF} \Delta\sigma_i$

Η σειρά γραφής των στοιχείων στο φάσμα σχεδιασμού δεν έχει σημασία αφού ο κανόνας Miner είναι γραμμικός. Η επαυξημένη καμπύλη αντοχής σε κόπωση φαίνεται στο Διάγραμμα 4-15 και εξαρτάται από την κατηγορία της λεπτομέρειας. Η λεπτομέρεια που αντιστοιχεί στη συγκόλληση κυκλικού ελάσματος στον πυλώνα φαίνεται στο Σχήμα 4-14. Τέλος ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_{Mf}$  λήφθηκε 1.35 όπως προβλέπεται για τη μέθοδο ασφαλούς ζωής.

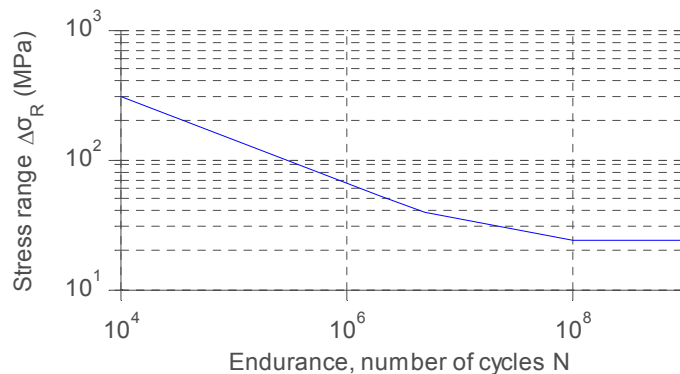


Σχήμα 4-14: Κατηγορία λεπτομέρειας σύνδεσης πυλώνα

Η κατηγορία 11 αναφέρεται σε σύνδεση πέλματος-σωλήνα με 80% της πλήρους διείσδυσης να είναι εσωραφές και έχει αντοχή σε κόπωση  $\Delta\sigma_c=71$  MPa.

Η κατηγορία 12 αναφέρεται σε σύνδεση πέλματος-σωλήνα με εξωραφές και έχει αντοχή σε κόπωση  $\Delta\sigma_c=40$  MPa.

Η  $\Delta\sigma$  υπολογίζεται στο σωλήνα και στις δύο περιπτώσεις. Η κατηγορία με την εσωραφή επιλέχθηκε στην περίπτωση της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας.



Διάγραμμα 4-15: Επαυξημένη καμπύλη  $\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}} - N_R$  για την κατηγορία 11

Το όριο σταθερού πλάτους είναι  $\Delta\sigma_D = 0,737\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf} = 38.76$  MPa

Το όριο αποκοπής είναι  $\Delta\sigma_L = 0,549\Delta\sigma_D = 21.28$  MPa

Ακολουθεί ο Πίνακας 4-16 που περιλαμβάνει τα εύρη τάσεων μεγαλύτερα από το όριο αποκοπής, τον ετήσιο αριθμό κύκλων, τη διάρκεια ζωής για κάθε εύρος και τη συσσώρευση βλάβης.

	Stress range (MPa)	Annual $n_{Ei}$	$N_R$	$n_{Ei}/N_{Ri}$
1	21.29	5.79E+02	1.84E+08	3.15E-06
2	21.94	7.61E+03	1.58E+08	4.81E-05
3	21.95	5.79E+02	1.58E+08	3.66E-06
4	22.54	2.57E+03	1.38E+08	1.86E-05
5	22.67	1.29E+03	1.35E+08	9.56E-06
6	22.71	1.52E+04	1.33E+08	1.14E-04
7	22.85	5.79E+02	1.29E+08	4.49E-06
8	22.87	1.29E+03	1.29E+08	1.00E-05
9	22.90	2.57E+03	1.28E+08	2.01E-05
10	23.21	2.57E+03	1.20E+08	2.15E-05
11	23.88	3.87E+03	1.04E+08	3.73E-05
12	24.60	7.73E+03	8.93E+07	8.66E-05
13	24.61	2.57E+03	8.92E+07	2.88E-05
14	26.08	5.79E+02	6.66E+07	8.69E-06
15	26.21	1.29E+03	6.51E+07	1.98E-05
16	26.23	8.98E+03	6.48E+07	1.39E-04
17	26.24	5.79E+02	6.47E+07	8.96E-06
18	26.27	7.61E+03	6.43E+07	1.18E-04
19	26.60	3.87E+03	6.05E+07	6.39E-05
20	27.12	5.79E+02	5.48E+07	1.06E-05
21	27.55	7.61E+03	5.07E+07	1.50E-04
22	27.75	2.90E+02	4.89E+07	5.93E-06
23	27.94	5.79E+02	4.73E+07	1.23E-05
24	28.76	7.73E+03	4.09E+07	1.89E-04
25	29.41	7.73E+03	3.66E+07	2.11E-04
26	32.60	2.90E+02	2.19E+07	1.33E-05
27	33.16	1.29E+03	2.01E+07	6.41E-05
28	33.41	3.87E+03	1.93E+07	2.00E-04
29	33.96	7.61E+03	1.78E+07	4.27E-04
30	35.33	5.79E+02	1.46E+07	3.96E-05
31	37.06	2.90E+02	1.15E+07	2.52E-05
32	38.33	1.29E+03	9.73E+06	1.32E-04
33	39.76	1.29E+03	4.63E+06	2.78E-04
34	49.57	1.29E+03	2.39E+06	5.38E-04

Πίνακας 4-16: Εύρη τάσεων και συσσώρευση βλαβών στη συγκόλληση

#### 4.4.7 Έλεγχος συσσώρευσης βλαβών

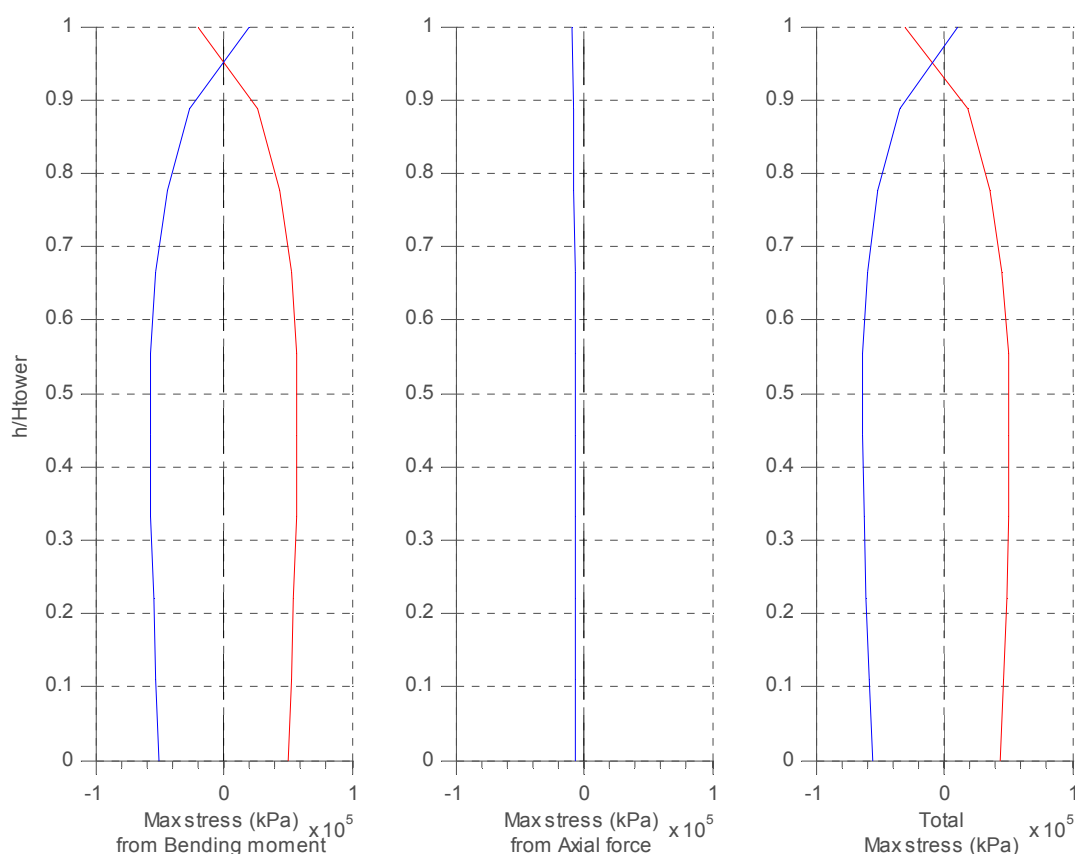
Ο έλεγχος αντοχής σε κόπωση που βασίζεται στη συσσώρευση βλαβών θα πρέπει να ικανοποιεί το ακόλουθο κριτήριο:

$$D_d \leq 1.0 \quad (4-5)$$

Η ετήσια συσσώρευση βλάβης είναι  $D_d = 0.0031$  που ισοδυναμεί με αστοχία σε 326.6 έτη.

#### 4.4.8 Γενικευμένος έλεγχος κόπωσης καθ' ύψος του πυλώνα

Όπως φάνηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η διατομή που βρίσκεται στο 0.85 του ύψους του πυλώνα δεν κινδυνεύει να αστοχήσει από κόπωση. Για να ελεγχθούν οι συνδέσεις σε άλλες πιο δυσμενείς θέσεις αποκατάστασης της συνέχειας γίνεται κλιμάκωση των εντατικών μεγεθών με κριτήριο τη μέγιστη ορθή τάση που αναπτύσσεται καθ' ύψος στην εφελκυστική παρειά του πυλώνα. Για το λόγο αυτό δημιουργούνται τα Διάγραμματα 4-17 που απεικονίζουν τη μέγιστη εφελκυστική (με κόκκινο) και τη μέγιστη θλιπτική (με μπλε) ορθή τάση καθ' ύψος του πυλώνα. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει τη μέγιστη ορθή τάση καθ' ύψος στον πυλώνα υπό φόρτιση ανέμου 10 λεπτών και μέσης ταχύτητας 10 m/s στην κορυφή, το δεύτερο απεικονίζει τη μέγιστη ορθή τάση υπό φόρτιση του ίδιου βάρους της ατράκτου και του πυλώνα και το τρίτο προκύπτει από επαλληλία των δύο πρώτων.



Διαγράμματα 4-17: Κατανομή ορθών τάσεων καθ' ύψος του πυλώνα στη θλιβόμενη και εφελκυστική παρειά λόγω καμπτικής ροπής και αξονικής δύναμης

Η διατομή του πυλώνα που καταπονείται περισσότερο σε εφελκυσμό βρίσκεται στο 0.4 του ύψους με  $\sigma_{\max} = 50860$  kPa. Επομένως αυτή είναι η δυσμενέστερη θέση αποκατάστασης της συνέχειας όσον αφορά την ορθή τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση του ελάσματος με τον πυλώνα. Θα μελετήσουμε σε κόπωση τη σύνδεση που βρίσκεται στο 0.85h με κατάλληλη κλιμάκωση των εντατικών μεγεθών της ώστε να εξασφαλιστεί η επάρκεια της σε οποιαδήποτε θέση καθ' ύψος του πυλώνα.

Οι συντελεστές κλιμάκωσης επιλέχθηκαν έτσι ώστε η μέγιστη ορθή εφελκυστική τάση στη διατομή να είναι ίση με την  $\sigma_{\max} = 50860$  kPa.

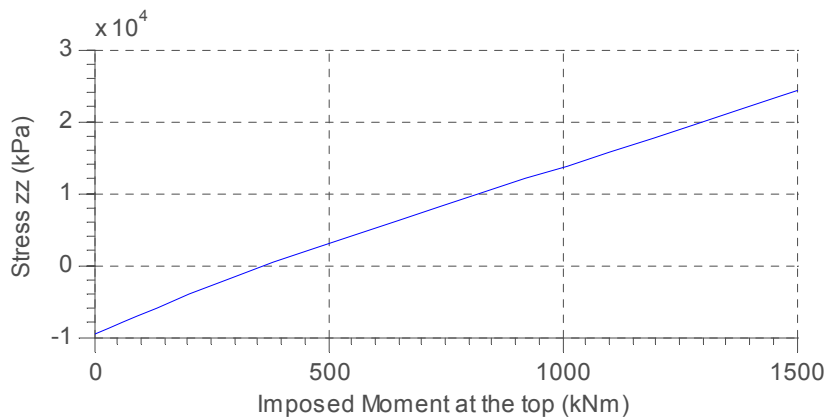
Συντελεστής κλιμάκωσης αξονικής δύναμης στη διατομή 0.85h:

$$\alpha_N = \frac{\max \text{stress} N_{0.40}}{\max \text{stress} N_{0.85}} = \frac{-6517}{-8082} = 0.81 \quad (4-6)$$

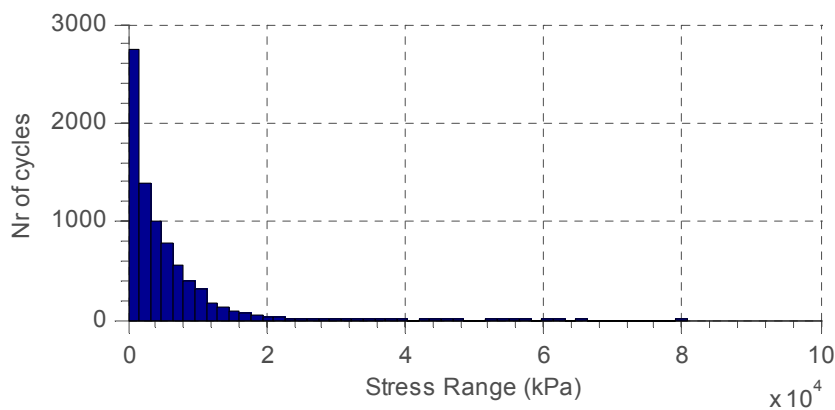
Συντελεστής κλιμάκωσης καμπτικής ροπής στη διατομή 0.85h:

$$\alpha_M = \frac{\max \text{stress} M_{0.40}}{\max \text{stress} M_{0.85}} = \frac{57374}{35130} = 1.63 \quad (4-7)$$

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι όμοια με προηγουμένως και έτσι δημιουργείται τα αντίστοιχο φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4-19.



Διάγραμμα 4-18: Ορθή τάση  $\sigma_{zf}$  στην εφελκόμενη παρειά συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής



Διάγραμμα 4-19: Φάσμα σχεδιασμού ετήσιου αριθμού κύκλων

Ακολουθεί ο Πίνακας 4-20 που περιλαμβάνει τα εύρη τάσεων μεγαλύτερα από το όριο αποκοπής, τον ετήσιο αριθμό κύκλων, τη διάρκεια ζωής για κάθε εύρος και τη συσσώρευση βλάβης.

	Stress range (MPa)	Annual $n_{Ei}$	$N_R$	$n_{Ei}/N_{Ri}$
1	21.32	5.79E+02	1.83E+08	3.17E-06
2	21.34	5.79E+02	1.82E+08	3.18E-06
3	21.48	1.80E+04	1.76E+08	1.02E-04
4	21.62	5.79E+02	1.70E+08	3.40E-06

5	21.63	5.79E+02	1.70E+08	3.40E-06
6	21.68	7.73E+03	1.68E+08	4.60E-05
7	21.69	2.57E+03	1.68E+08	1.53E-05
8	21.73	2.57E+03	1.66E+08	1.55E-05
9	21.75	5.79E+02	1.66E+08	3.50E-06
10	22.14	1.52E+04	1.51E+08	1.01E-04
11	22.17	5.79E+02	1.50E+08	3.86E-06
12	22.24	1.52E+04	1.48E+08	1.03E-04
13	22.27	2.57E+03	1.47E+08	1.75E-05
14	22.30	5.79E+02	1.46E+08	3.97E-06
15	22.34	2.57E+03	1.45E+08	1.78E-05
16	22.34	5.79E+02	1.45E+08	4.01E-06
17	22.40	5.79E+02	1.43E+08	4.06E-06
18	22.48	5.79E+02	1.40E+08	4.13E-06
19	22.53	2.57E+03	1.39E+08	1.85E-05
20	22.56	1.80E+04	1.38E+08	1.30E-04
21	22.62	5.79E+02	1.36E+08	4.27E-06
22	22.66	2.57E+03	1.35E+08	1.91E-05
23	22.72	1.52E+04	1.33E+08	1.15E-04
24	22.83	5.79E+02	1.30E+08	4.47E-06
25	22.84	5.79E+02	1.29E+08	4.48E-06
26	22.90	1.80E+04	1.28E+08	1.41E-04
27	23.07	7.73E+03	1.23E+08	6.29E-05
28	23.19	2.57E+03	1.20E+08	2.14E-05
29	23.21	5.79E+02	1.19E+08	4.85E-06
30	23.39	2.57E+03	1.15E+08	2.24E-05
31	23.59	7.73E+03	1.10E+08	7.02E-05
32	23.65	2.57E+03	1.09E+08	2.36E-05
33	23.67	7.73E+03	1.08E+08	7.15E-05
34	23.75	1.29E+03	1.07E+08	1.21E-05
35	23.78	5.79E+02	1.06E+08	5.48E-06
36	23.85	5.79E+02	1.04E+08	5.56E-06
37	24.00	7.73E+03	1.01E+08	7.65E-05
38	24.10	5.79E+02	9.90E+07	5.85E-06
39	24.20	2.57E+03	9.69E+07	2.65E-05
40	24.22	1.52E+04	9.66E+07	1.58E-04
41	24.31	2.57E+03	9.49E+07	2.71E-05
42	24.38	2.57E+03	9.34E+07	2.75E-05
43	24.44	2.57E+03	9.23E+07	2.79E-05
44	24.46	5.79E+02	9.18E+07	6.31E-06
45	24.50	5.79E+02	9.11E+07	6.36E-06
46	24.77	5.79E+02	8.64E+07	6.71E-06

47	24.79	5.79E+02	8.60E+07	6.74E-06
48	24.88	1.80E+04	8.44E+07	2.13E-04
49	24.91	2.57E+03	8.39E+07	3.06E-05
50	25.02	2.57E+03	8.21E+07	3.13E-05
51	25.04	5.79E+02	8.18E+07	7.09E-06
52	25.10	5.79E+02	8.08E+07	7.17E-06
53	25.15	7.73E+03	8.00E+07	9.67E-05
54	25.16	5.79E+02	7.98E+07	7.26E-06
55	25.22	2.57E+03	7.89E+07	3.26E-05
56	25.75	2.57E+03	7.11E+07	3.62E-05
57	25.77	5.79E+02	7.08E+07	8.18E-06
58	25.79	5.79E+02	7.06E+07	8.21E-06
59	25.87	2.57E+03	6.95E+07	3.70E-05
60	26.05	5.79E+02	6.71E+07	8.64E-06
61	26.18	5.79E+02	6.55E+07	8.84E-06
62	26.19	5.79E+02	6.53E+07	8.88E-06
63	26.28	5.79E+02	6.43E+07	9.02E-06
64	26.34	5.79E+02	6.35E+07	9.12E-06
65	26.61	1.52E+04	6.03E+07	2.53E-04
66	26.66	7.61E+03	5.97E+07	1.28E-04
67	26.87	2.57E+03	5.74E+07	4.48E-05
68	26.88	2.90E+02	5.73E+07	5.05E-06
69	26.89	5.79E+02	5.72E+07	1.01E-05
70	27.04	7.73E+03	5.57E+07	1.39E-04
71	27.20	1.29E+03	5.41E+07	2.38E-05
72	27.21	5.79E+02	5.39E+07	1.07E-05
73	27.23	5.79E+02	5.38E+07	1.08E-05
74	27.26	5.79E+02	5.34E+07	1.08E-05
75	27.63	5.79E+02	5.00E+07	1.16E-05
76	27.71	5.79E+02	4.92E+07	1.18E-05
77	27.80	2.57E+03	4.85E+07	5.31E-05
78	27.83	1.52E+04	4.82E+07	3.16E-04
79	27.86	2.57E+03	4.79E+07	5.37E-05
80	28.17	7.73E+03	4.54E+07	1.71E-04
81	28.42	2.57E+03	4.34E+07	5.92E-05
82	28.83	2.57E+03	4.04E+07	6.36E-05
83	28.98	1.29E+03	3.94E+07	3.26E-05
84	29.05	7.73E+03	3.89E+07	1.99E-04
85	29.05	5.79E+02	3.89E+07	1.49E-05
86	29.17	1.80E+04	3.81E+07	4.71E-04
87	29.34	5.79E+02	3.70E+07	1.57E-05
88	30.04	2.57E+03	3.29E+07	7.82E-05

89	30.43	1.52E+04	3.09E+07	4.93E-04
90	30.58	2.57E+03	3.01E+07	8.55E-05
91	30.92	5.79E+02	2.85E+07	2.03E-05
92	31.22	7.73E+03	2.71E+07	2.85E-04
93	31.26	2.57E+03	2.70E+07	9.54E-05
94	31.44	5.79E+02	2.62E+07	2.21E-05
95	32.29	7.73E+03	2.29E+07	3.38E-04
96	32.45	5.79E+02	2.24E+07	2.59E-05
97	32.54	5.79E+02	2.21E+07	2.62E-05
98	33.07	8.98E+03	2.03E+07	4.41E-04
99	33.27	5.79E+02	1.97E+07	2.93E-05
100	33.37	7.73E+03	1.94E+07	3.98E-04
101	33.57	5.79E+02	1.89E+07	3.07E-05
102	33.61	2.57E+03	1.88E+07	1.37E-04
103	34.20	5.79E+02	1.72E+07	3.37E-05
104	34.34	5.79E+02	1.68E+07	3.44E-05
105	34.36	2.90E+02	1.68E+07	1.72E-05
106	34.55	1.29E+03	1.64E+07	7.86E-05
107	34.70	5.79E+02	1.60E+07	3.62E-05
108	35.77	7.61E+03	1.37E+07	5.54E-04
109	35.78	5.79E+02	1.37E+07	4.22E-05
110	36.74	2.57E+03	1.20E+07	2.14E-04
111	36.95	1.29E+03	1.17E+07	1.10E-04
112	37.02	1.52E+04	1.16E+07	1.32E-03
113	37.25	5.79E+02	1.12E+07	5.16E-05
114	37.29	1.29E+03	1.12E+07	1.15E-04
115	37.32	2.57E+03	1.11E+07	2.31E-04
116	37.83	2.57E+03	1.04E+07	2.48E-04
117	38.92	3.87E+03	4.93E+06	7.84E-04
118	40.10	7.73E+03	4.51E+06	1.71E-03
119	40.11	2.57E+03	4.51E+06	5.70E-04
120	42.52	5.79E+02	3.78E+06	1.53E-04
121	42.72	1.29E+03	3.73E+06	3.45E-04
122	42.76	8.98E+03	3.72E+06	2.41E-03
123	42.78	5.79E+02	3.72E+06	1.56E-04
124	42.82	7.61E+03	3.71E+06	2.05E-03
125	43.35	3.87E+03	3.57E+06	1.08E-03
126	44.21	5.79E+02	3.37E+06	1.72E-04
127	44.91	7.61E+03	3.21E+06	2.37E-03
128	45.24	2.90E+02	3.14E+06	9.22E-05
129	45.54	5.79E+02	3.08E+06	1.88E-04
130	46.89	7.73E+03	2.82E+06	2.74E-03



131	47.94	7.73E+03	2.64E+06	2.93E-03
132	53.14	2.90E+02	1.94E+06	1.49E-04
133	54.05	1.29E+03	1.84E+06	6.98E-04
134	54.46	3.87E+03	1.80E+06	2.15E-03
135	55.36	7.61E+03	1.71E+06	4.44E-03
136	57.59	5.79E+02	1.52E+06	3.80E-04
137	60.41	2.90E+02	1.32E+06	2.19E-04
138	62.48	1.29E+03	1.19E+06	1.08E-03
139	64.82	1.29E+03	1.07E+06	1.20E-03
140	80.80	1.29E+03	5.51E+05	2.33E-03

Πίνακας 4-20: Εύρη τάσεων και συσσώρευση βλαβών στη συγκόλληση

Η ετήσια συσσώρευση βλάβης είναι  $D_d = 0.0402$ , που ισοδυναμεί με αστοχία σε 24.9 έτη.

## 5 ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση του προβλήματος της κόπωσης σε συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των χαλύβδινων πυλώνων ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε αρχικά το εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται από τη δράση του ανέμου σε μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1.5 mW και πως επιδρούν σε αυτό οι διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες ανέμου, αλλά και τα συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια μορφώθηκε η σύνδεση και ο πυλώνας με πεπερασμένα στοιχεία και διερευνήθηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ κοχλίας και ελάσματος μέσω συνθηκών επαφής. Τελικά επιβλήθηκαν στη σύνδεση τα τυπικά εντατικά μεγέθη που αναμένονται να εμφανιστούν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης κάθε μεγέθους, μετρήθηκε η συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης και εκτιμήθηκε ο συνολικός χρόνος αστοχίας της σύνδεσης.

Ο υπάρχων σχεδιασμός για κατασκευές που εκτίθενται σε πολύ συχνές διακυμάνσεις τάσεων (>10<sup>8</sup> κύκλους) βασίζεται στην μείωση του εύρους τάσεων κάτω από το όριο αποκοπής που δεν προκαλείται αστοχία λόγω κόπωσης. Αυτό, όσον αφορά τους κοχλίες, επιτυγχάνεται με την ισχυρή προένταση τους έτσι ώστε να διατηρούν σταθερή ένταση καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας ανεξάρτητα από τις εξωτερικές συνθήκες ανέμου. Όσο για τη συγκόλληση επιτυγχάνεται αυξάνοντας τη διατομή του πυλώνα ικανοποιητικά ώστε να μειωθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο επιθυμητό εύρος.

Η συμπεριφορά της σύνδεσης μελετήθηκε αριθμητικά με αναλυτικό προσομοίωμα τόσο για την ένταση του ανέμου όσο και για τα μέλη σύνδεσης έτσι ώστε να πάρουμε ακριβέστερα αποτελέσματα των κύκλων τάσεων που αναμένονται να εμφανιστούν. Τα συμπεράσματα της μελέτης που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

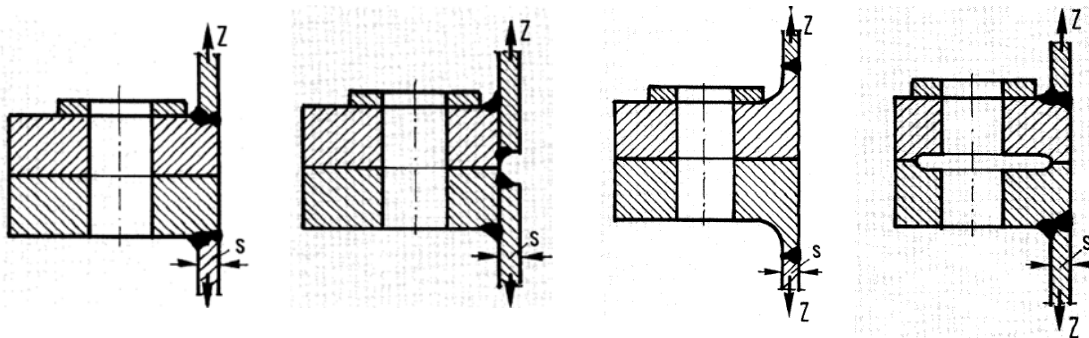
- Το σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων που διαθέτουν όλες οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες δρα ευμενώς στην μείωση της συσσώρευσης βλάβης αφού όχι μόνο μειώνει τη δύναμη αντίστασης (drag force) των πτερυγίων που είναι η κυρίαρχη αιτία κάμψης του πυλώνα αλλά επιπλέον σε υψηλές ταχύτητες ανέμου μειώνει αρκετά τη διακύμανση των εντατικών μεγεθών καθώς επιδιώκεται η ταχύτητα περιστροφής να είναι ίση με την ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.
- Η μέση ταχύτητα ανέμου της περιοχής δεν είναι μείζονος σημασίας για την ένταση του πυλώνα αλλά ούτε και για το φαινόμενο της κόπωσης. Αυτό συμβαίνει αφενός μεν γιατί με το σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η ένταση του πυλώνα δεν αυξάνεται αλλά παραμένει σταθερή με μικρή διακύμανση και αφετέρου διότι στο φαινόμενο της κόπωσης που είναι ο κρίσιμος

παράγοντας σχεδιασμού ενδιαφέρει το εύρος και όχι η μέση τιμή των μεγεθών. Έτσι κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η κατηγορία τύρβης (turbulence parameter) της περιοχής και το συχνотικό περιεχόμενο του ανέμου.

- Το σύστημα ελέγχου περιστροφής της ατράκτου ανακουφίζει τον πυλώνα από τη στρεπτική ροπή, αυξάνει την απόδοση της ανεμογεννήτριας αλλά προκαλεί αξιοσημείωτη καμπτική ένταση και κατά την εγκάρσια διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- Η χρήση προεντεταμένων κοχλιών σε όλες τις κοχλιωτές συνδέσεις της ανεμογεννήτριας κρίνεται απόλυτα επιβεβλημένη για τη μείωση του φαινομένου της κόπωσης.
- Με την προένταση των κοχλιών επιτυγχάνουμε η παραλαβή της τέμνουσας στη σύνδεση να γίνεται μέσω της τριβής των ελασμάτων και όχι μέσω της άντυγας του κοχλία σε συνθήκες συνθήκες ανέμου.
- Η αξονική δύναμη που παραλαμβάνουν οι κοχλίες, για μικρή επιβαλλόμενη δύναμη, εξαρτάται μόνο από το βαθμό προέντασης τους. Όσο αυξάνεται όμως η επιβαλλόμενη δύναμη, η αξονική δύναμη των κοχλιών είναι ανεξάρτητη από το βαθμό προέντασης και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δακτυλίου.
- Η αύξηση της διατομής του πυλώνα τόσο ώστε να μειωθούν οι ορθές τάσεις στις θέσεις των συγκολλησεων λόγω του μεγάλου αριθμού των κύκλων φόρτισης αποτελεί ορθή προσέγγιση του προβλήματος της κόπωσης όπως επιβεβαιώθηκε από τον εκτιμώμενο χρόνο ζωής της συγκόλλησης.
- Η αύξηση του εύρους τάσεων μειώνει δραστικά τον χρόνο ζωής λόγω κόπωσης εξαιτίας του μεγάλου αριθμού κύκλων που υφίσταται η ανεμογεννήτρια. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι αύξηση του εύρους τάσης στη συγκόλληση κατά 1.63 φορές μείωσε το χρόνο αστοχίας από 326.6 έτη σε 24.9 έτη.

#### Θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι:

- Η επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της σύνδεσης στο εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται στους κοχλίες ώστε να εκτιμηθεί η δύναμη που θα αναπτύξουν σε δεδομένη καμπτική καταπόνηση. π.χ. σχέσεις Petersen [9].
- Ακριβέστερη προσομοίωση της σύνδεσης όσον αφορά τη συγκόλληση και την ακτίνα καμπυλότητας με χρήση στοιχείων 3d solid ώστε να υπολογισθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι τάσεις στο ζεστό σημείο.
- Μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας για να εκτιμηθεί το συχνотικό περιεχόμενο της τύρβης του ανέμου που συμβάλει περισσότερο στην ταλάντωση της, και αναλύσεις κόπωσης για διαφορετικές κατηγορίες τύρβης.
- Ανάλυση του ίδιου προβλήματος κόπωσης για διαφορετικού τύπου συγκολλητές συνδέσεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Τύποι συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας σωληνωτών διατομών





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001). "Wind energy handbook" John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.
- [2] Di Paola M. (1998). "Digital simulation of wind field velocity" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76 (1998) 91-109.
- [3] Hansen M. (2008). "Aerodynamics of Wind Turbines, 2nd Edition" Earthscan, London, U.K.
- [4] IEC 61400-1: 2005, Wind turbines – Part 1: Design Requirements, International standard, 3<sup>rd</sup> edition, 2005
- [5] EN 1991-1-4: 2005, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions, European Committee for Standardization, 2005.
- [6] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [7] EN 1993-1-9: 2003, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, European Committee for Standardization, 2003.
- [8] DIN 6914, High Strength hexagon head bolts, Deutsche Norm, 1989
- [9] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993.
- [10] Geoffrey Kulak, High Strngth Bolts, A Primer for Structural Engineers, AISC, 2002
- [11] V.-L. Hoang, J.-P. Jaspart and J.-F. Démonceau, Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: Experimental tests, Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85, 1-11.
- [12] Y.Q. Wang, L. Zong and Y.J. Shi, Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection, Journal of Constructional Steel Research, 2013, 84, 1-16.
- [13] Alain Nussbauner, Luis Borges, Laurence Davaine, Fatigue design of steel and composite structures, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 1<sup>st</sup> Edition, 2011.
- [14] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (AeroDyn by David J. Laino, Ph.D.).  
<http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn/>, last modified 23-Feb.-2013; accessed 1-Nov.-2013.
- [15] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (FAST by Jason Jonkman, Ph.D.),  
<http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/fast/>, last modified 28-Oct.-2013; accessed 1-Nov.-2013.
- [16] NWTC Computer-Aided Engineering Tools (TurbSim by Neil Kelley, Bonnie Jonkman),  
<http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/turbsim/>, last modified 30-May-2013; accessed 1-Nov.-2013.
- [17] National Renewable Energy Laboratory, NREL, <http://www.nrel.gov/>
- [18] National Wind Technology Center, NWTC, <http://www.nrel.gov/nwtc/>
- [19] ADINA System 9.0, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2013.
- [20] FEMAP 101, Introduction to Femap with NX Nastran Student Guide, Version 10.1.1, Siemens PLM Software, 2010
- [21] Vernardos S., Aerodynamic calculation of loads and dynamic behavior of wind turbine towers, Postgraduate Thesis, NTUA, Institute of Steel Structures, Athens, 2013

- [22] Ζερβός Α., Κάραλης Γ., Σειμειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Σχολή Μηχ. Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009.
- [23] Παπαθανασίου Σ., Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Σ.Η.Μ.Μ.Υ., Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
- [24] Παπαδημητρίου Γ.Δ., Γενική Μεταλλογνωσία Ι, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., 1989.
- [25] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων. Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2005
- [26] Δημόπουλος Χ., Ενίσχυση Οπών Ανθρωποθυρίδων σε Χαλύβδινα Κελύφη Πυλώνων Ανεμογεννητριών, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Αθήνα 2012