



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ**

# **ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΑΕΡΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΡΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Γιαννόπουλος Ευάγγελος

Επιβλέπων Καθηγητής : Ριζιώτης Βασίλειος

Αθήνα, Ιούλιος 2012

## Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Κύριο Ριζιώτη Βασίλειο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ο χρόνος που διέθεσε για εμένα, όποτε το είχα ανάγκη, αλλά και η διάθεσή του απέναντί μου, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στο να μπορέσω να διεκπεραιώσω μία ολοκληρωμένη δουλειά.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους Αναπληρωτή καθηγητή Βουτσινά Σπυρίδωνα, Διδάκτορα Προσπαθόπουλο Ιωάννη, Κύριο Παπαδάκη Γεώργιο και ιδιαιτέρως τον Κύριο Μανωλά Δημήτριο, για την έμπρακτη υποστήριξή τους, σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα.

Αισθάνομαι, επίσης, την ανάγκη να σημειώσω πως το ευχάριστο κλίμα που έχει δημιουργηθεί μεταξύ προπτυχιακών και διαδακτορικών φοιτητών στον τομέα των Ρευστών, μόνο θετικό θα μπορούσε να αποβεί για εμένα. Ξεχωριστά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Αλέξανδρο Ηλιόπουλο.

Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» χρωστάω στην οικογένεια και τους φίλους μου για την υπομονή και τη στήριξή τους.

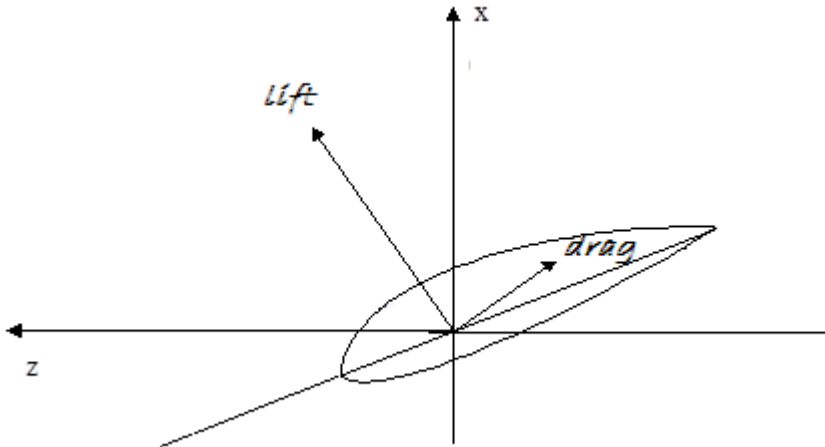
# Περιεχόμενα

Εισαγωγή .....	5
Αντικείμενο εργασίας .....	6
1 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν .....	11
1.1 Μέθοδος στοιχείων περύγωσης (GAST).....	11
1.2 Μέθοδος στοιχείων στροβιλότητας (GENUVP).....	15
Διατύπωση του προβλήματος .....	15
2 Η μηχανη αναφοράς – γεωμετρίες πτερυγιων .....	26
2.1 Η ανεμογεννήτρια αναφοράς .....	26
2.2 Γεωμετρίες preswept blades spline type .....	27
3 Αποτελέσματα Αεροδυναμικής Ανάλυσης.....	30
3.1 Αεροδυναμική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε σταθερό αέρα... 30	
3.2 Βασικά σημεία ελέγχου.....	30
3.3 Συγκρίσεις GENUVP 2nd order.....	31
3.4 Συγκρίσεις GAST 2nd order .....	36
3.5 Σύγκριση GENUVP – GAST.....	41
3.6 Παράρτημα 1 (συγκρίσεις GENUVP) .....	43
3.7 Παράρτημα 2 (συγκρίσεις GAST) .....	56
3.8 Παράρτημα 3 (συγκρίσεις GENUVP-GAST).....	60
4 Αποτελέσματα Αεροελαστικής Ανάλυσης για Σταθερό άνεμο .....	68
4.1 Αεροελαστική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε σταθερό αέρα. .. 68	
4.2 Βασικά σημεία ελέγχου.....	68
4.3 Συγκρίσεις GENUVP 2nd order.....	68
4.4 Συγκρίσεις GAST 2nd order .....	71
4.5 Σύγκριση GENUVP – GAST.....	73
4.6 Συγκρίσεις GAST multibody .....	78
4.7 Σύγκριση GAST 2nd order – GAST multibody.....	82
5 Αποτελέσματα Αεροελαστικής Ανάλυσης με στοχαστικό άνεμο .....	92
5.1 Αεροελαστική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε στοχαστικό αέρα. 92	
5.2 Βασικά σημεία ελέγχου.....	92
5.3 Συγκρίσεις GAST 2 <sup>nd</sup> order.....	93

6	Τελικό συμπέρασμα - αναφορές.....	114
6.1	Τελικό συμπέρασμα .....	114
6.2	Αναφορές .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.3	Βιβλιογραφία.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# Εισαγωγή

Οι Ανεμογεννήτριες αποτελούν την εξέλιξη των ανεμόμυλων. Ενώ οι τελευταίοι βασίζουν την κίνησή τους στη δύναμη της αντίστασης (drag) του αέρα, για τις Α/Γ βασικός κινητήριος «μοχλός» είναι η δύναμη της άνωσης (lift). Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η επίδραση των δύο αυτών δυνάμεων.



Ανεμογεννήτριες τοποθετούνται μεμονωμένα ή σε συστάδες υπό τη μορφή αιολικών πάρκων, κυρίως όταν στόχος είναι η μαζική ηλεκτροπαραγωγή. Το αιολικό δυναμικό κάθε περιοχής είναι αυτό που υποδυναμίζει το αν και που θα ήταν συμφέρον να εγκατασταθούν Α/Γ. Από εκεί και πέρα, συνυπολογίζονται και άλλοι παράγοντες όπως αν η τοποθεσία είναι ευκόλως προσβάσιμη ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά των εξαρτημάτων ή αν είναι συμφέρουσα η σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο μίας χώρας. Έτσι συναντούμε Α/Γ συνήθως σε κορυφές βουνών και στη θάλασσα (πλωτές).

Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οριζοντίου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου και κατακόρυφου άξονα, όπου ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt.

Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 500 kW είναι : Διάμετρος δρομέα, 40 μέτρα και ύψος 40-50 μέτρα, ενώ αυτής των τριών MW οι διαστάσεις είναι 80 και 80–100 μέτρα αντίστοιχα.

Στην παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με μία συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια αναφοράς, οριζοντίου άξονα, η οποία θα περιγραφεί σε επόμενη ενότητα. Ωστόσο, μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη :

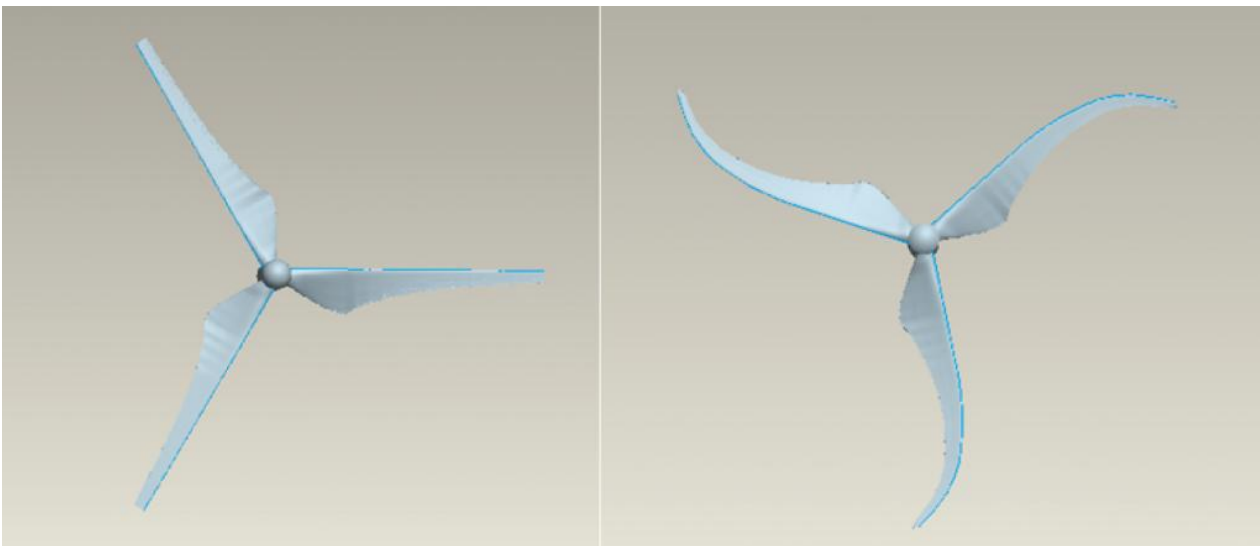
- το δρομέα, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα . Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά , είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών , το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- το σύστημα προσανατολισμού, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση . Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα
- τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου , οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου . Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί , συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας , φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

## Αντικείμενο εργασίας

Έρευνες στο εργαστήριο Sandia υπέδειξαν πως η σύζευξη κάμψης-στρέψης του πτερυγίου της Α/Γ μπορεί να αποβεί ευεργετική όσον αφορά τη μείωση των καταπονήσεων [1]. Όταν το πτερύγιο κάμπτεται προς την κατεύθυνση του ανέμου, στρέφεται ταυτόχρονα γύρω από τον άξονά του (pitch axis) με αποτέλεσμα να μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης της φαινόμενης ροής και επομένως να ελαττώνονται τα αεροδυναμικά φορτία επάνω σε αυτό. Ένας τρόπος για να προκαλέσουμε τη σύζευξη αυτή είναι να προσδώσουμε στην πτέρυγα κυρτότητα με κατεύθυνση αντίθετη της περιστροφής της, όπως φαίνεται στο δεξίο μέρος της εικόνας 1, όπου η φορά περιστροφής είναι αριστερόστροφη. Έτσι, δημιουργούμε τα λεγόμενα pre-swept πτερύγια. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπουμε στα φορτία του

αέρα να ασκήσουν μεγαλύτερη ροπή στρέψης του πτερυγίου ως προς τον άξονά του, ώστε η περιοχή του ακροπτερυγίου να στραφεί περισσότερο προς την κατεύθυνση του ανέμου, μειώνοντας έτσι τα αεροδυναμικά φορτία επάνω στο πτερύγιο, όπως ήδη αναφέρθηκε. Ωστόσο, η μείωση των φορτίων επιτυγχάνεται εις βάρος της συνολικά αποδιδόμενης ισχύος της μηχανής. Από την άλλη πλευρά, η προαναφερθείσα μείωση μας επιτρέπει να αυξήσουμε την διάμετρο του ρότορα (πτέρυγα), στοιχείο βασικό για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να ελεγχθεί κατά πόσο μειώνονται οι καταπονήσεις, λόγω του ανέμου, επάνω στη Α/Γ και ειδικότερα στα πτερύγια αυτής αλλάζοντας τη γεωμετρία των τελευταίων. Ελέγχουμε, επιπλέον, τι κόστος έχει η πιθανή αυτή μείωση στη συνολική αποδιδόμενη ισχύ της μηχανής. Παρακάτω εξηγούνται αναλυτικότερα οι προαναφερθείσες αλλαγές στη γεωμετρία και παρουσιάζονται σχηματικά οι αντιστοιχίσεις αυτών με τις διάφορες καταπονήσεις, όπως επίσης και με την αποδιδόμενη ισχύ.



**Εικόνα 1**

Στη συγκεκριμένη μελέτη, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η αεροδυναμική και αεροελαστική συμπεριφορά της Α/Γ ανάλογα με τη γεωμετρία που δίνουμε στα πτερύγια της. Επικεντρωνόμαστε κυρίως στο πως αλλάζουν τα αξονικά και περιφεριακά φορτία επάνω στην πτερύγωση, η τοπική γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος αυτής, η δύναμη ώσης (thrust) που ασκεί ο αέρας στην Α/Γ ως αντίδραση της δύναμης της τελευταίας επάνω του και η μεταβολή αποδιδόμενης ισχύος εξαιτίας των παραπάνω. Πέραν τούτων, συγκρίνουμε την αεροελαστική μετακίνηση διαφόρων ακτινικών σημείων του πτερυγίου για της διάφορες γεωμετρίες που αποδίδονται σε αυτό. Οι παραπάνω, ακολουθούν τη μορφή καμπυλών spline όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

## Βιβλιογραφική επισκόπηση

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει και οι οποίες εξετάζουν, κυρίως, το κόστος ενέργειας που συνεπάγεται η μείωση φορτίων στην ανεμογεννήτρια μέσω κύρτωσης των πτερυγίων της. Οι περισσότερες επικεντρώνονται σε μηχανές ορισμένων MW για τις οποίες τα αεροδυναμικά φορτία και τα φορτία βαρύτητας παίζουν σημαντικό ρόλο. Κάποιες από τις πιο πρόσφατες και πιο κοντινές στη συγκεκριμένη εργασία μελέτες αναφέρονται παρακάτω.

- Load Consequences when Sweeping Blades - A Case Study of a 5 MW Pitch Controlled Wind Turbine, Riso. Η εργασία ασχολείται με την κύρτωση των πτερυγίων κατά τη φορά περιστροφής τους και αντίθετα από αυτήν και με το πως η κύρτωση αυτή επιδρά στις καταπονήσεις της Α/Γ. Συντάκτες : David R.S. Verelst, Torben J. Larsen.
- Load Mitigation with Bending/Twist-coupled Blades on Rotors Using Modern Control Strategies, J. Wind Energy, 2003, 6, 105–117.  
Συντάκτες : Lobitz, D.W and Veers, P.S.
- Aswill T.D., Kanaby, G., Jackson, K., Zuteck, M., “Development of the swept twist adaptive rotor (STAR) blade,” paper AIAA 2010-1582, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the new horizons forum and aerospace exposition, 4-7 January 2010, Orlando, Florida
- “Integrated Wind Turbine Design” - Importance of shape induced non-linear effects on the 5 MW RWT. Η εργασία αυτή αναφέρεται στη διαδικασία σχεδίασης του πτερυγίου, στις αεροδυναμικές λεπτομέρειες αυτής και στη σχεδίαση του controller.  
Συντάκτες : Evangelos Politis, Vasilis Riziotis.
- Free-wake Aeroelastic Modeling of Swept Rotor Blades. European Wind Energy Conference and Exhibition 2011, Brussels. Η εργασία αυτή πραγματεύεται τη σχέση κύρτωσης των πτερυγίων και μείωσης των φορτίων επάνω σε αυτά, καθώς και την επίδραση της κύρτωσης στην αποδιδόμενη ισχύ.  
Συντάκτες : Vasilis Riziotis, Dimitrios Manolas, Spyridon Voutsinas.
- Evaluation of Aeroelastically Tailored Small Wind Turbine Blades, Final Project Report. September 29, 2005. Prepared for: United States Department of Energy, Golden Field Office. Η εργασία εξετάζει αεροελαστικά πτερυγώσεις μικρών ανεμογεννητριών.  
Συντάκτες : Beth Dwyer, Keith Bennett.
- Numerical Study on Performance of Curved Wind Turbine Blade for Loads Reduction. 13th International Conference Wind Engineering (ICWE13), 10-15 July 2011, Amsterdam, the Netherlands.  
Αντικείμενο της εργασίας είναι η μείωση των φορτίων της Α/Γ μέσω της κύρτωσης των πτερυγίων, ώστε να είναι δυνατόν να αυξηθεί η διάμετρος της πτερυγώσης.



## Διάρθρωση εργασίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάρθρωση της εργασίας και το περιεχόμενο των κεφαλαίων.

### Κεφάλαιο 1

Στο πρώτο κεφάλαιο μελετώνται, συντόμως, τα εργαλεία-κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας. Ακόμη, γίνεται μία περιληπτική εξήγηση των μεθόδων που ακολουθήθηκαν στις προσομοιώσεις.

### Κεφάλαιο 2

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας αναφοράς (RWT), καθώς επίσης οι διάφορες γεωμετρίες πτερυγίων για τις οποίες έγιναν προσομοιώσεις.

### Κεφάλαιο 3

Σε αυτό το μέρος, όπου εξετάζουμε τα πτερύγια καθαρά ως προς την αεροδυναμική τους συμπεριφορά, παρουσιάζονται τα αεροδυναμικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Μας ενδιαφέρει, κυρίως, να δούμε τις αντιδράσεις της πτερύγωσης όσον αφορά τα αξονικά και περιφερειακά φορτία, την αλλαγή στην τοπική γωνία πρόσπτωσης και τη συνολικά αποδιδόμενη ισχύ. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει αεροδυναμικές συγκρίσεις μεταξύ αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων GENUVP 2<sup>nd</sup> order, GAST 2<sup>nd</sup> order όπως επίσης και σύγκριση των δύο προγραμμάτων στη βάση ιδίων περιπτώσεων.

### Κεφάλαιο 4

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αεροελαστικής ανάλυσης των πτερυγίων σε σταθερό άνεμο. Ενδιαφερόμαστε, κυρίως, για τις καμπτικές παραμορφώσεις των πτερυγίων στην κατεύθυνση πνοής του ανέμου, αλλά και στην κατεύθυνση περιστροφής της πτερύγισης. Ακόμη, εξετάζουμε την απόδοση της μηχανής σε ισχύ. Στο παρών κεφάλαιο παρατήθενται αεροελαστικές συγκρίσεις GENUVP 2<sup>nd</sup> order, GAST 2<sup>nd</sup> order, σύγκριση ανάμεσα στα δύο προηγούμενα αλλά και συγκρίσεις GAST multibody και αντιπαραβολή δοκιμών GAST multibody - GAST 2<sup>nd</sup> order.

### Κεφάλαιο 5

Η ανάλυση είναι η ίδια με αυτή του κεφαλαίου 4, με τη διαφορά ότι γίνεται με δεδομένο στοχαστικό άνεμο. Έχουμε χρησιμοποιήσει μόνο τον κώδικα GAST 2<sup>nd</sup> order προκειμένου να εξετάσουμε και πάλι αεροελαστικά διάφορες περιπτώσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όμως, η Α/Γ τίθεται σε άνεμο ο οποίος παρουσιάζει διακυμάνσεις στην έντασή του.

## **Κεφάλαιο 6**

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο επάγονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας, τα οποία αφορούν τη μείωση των καταπονήσεων λόγω κύρτωσης των πτερυγίων, την αποδιδόμενη ισχύ και τη σύγκριση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν.

\*\* Να σημειωθεί πως οι προσομοιώσεις των κεφαλαίων 3 και 4 έγιναν με δεδομένη σταθερή ταχύτητα ανέμου 8m/s (όπου δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό) ή 11m/s (όπου διευκρινίζεται κάτι τέτοιο).

# 1 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

---

Κατά την εκπόνηση της εργασίας χρειάστηκε να χειριστούμε δύο διαφορετικά υπολογιστικά πρότυπα- κώδικες προσομοίωσης, τα οποία ανταποκρίνονται σε δύο διαφορετικές μεθόδους μελέτης αντίστοιχα, τη μέθοδο στοιχείων στροβιλότητας και τη μέθοδο στοιχείων πτερύγωσης [2]. Ο πρώτος κώδικας (GENUVP, αναφέρεται και ως free wake modelling) λαμβάνει υπ' όψην του τον τρισδιάστατο χαρακτήρα της γεωμετρίας των πτερυγίων της Α/Γ και για την προσομοίωση του ομόρρου χρησιμοποιεί τη μέθοδο στοιχείων στροβιλότητας. Ο δεύτερος (GAST, αναφέρεται και ως BEM modeling εκ του Blade Element Momentum theory) άπειρο αριθμό πτερυγίων τα οποία λειτουργούν ως ενιαίος δίσκος ορμής και χρησιμοποιεί τη μέθοδο στοιχείων πτερύγωσης για τον υπολογισμό των δυνάμεων. Ως εκ τούτου, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα μεταξύ των δύο προγραμμάτων (GENUVP και GAST) οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

## 1.1 Μέθοδος στοιχείων πτερύγωσης (GAST)

Οι μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο στοιχείων πτερύγωσης συνδυάζουν το θεώρημα διατήρησης της ορμής και το θεώρημα διατήρησης της ροπής της ορμής, εκφρασμένων κατά μήκος του άξονα ενός δρομέα, με τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης. Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται οι εξισώσεις που προσδιορίζουν την αξονική και την περιφερειακή ταχύτητα επαγωγής στο επίπεδο του δρομέα ή αλλιώς τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής  $a$  και  $a'$ , χωριστά για κάθε στοιχείο πτερύγωσης. Στις εξισώσεις αυτές εμφανίζονται ως άγνωστοι τα αεροδυναμικά φορτία που αναπτύσσονται κατά μήκος του πτερυγίου. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται κυρίως διδιάστατες μετρήσεις των συντελεστών άωσης και αντίστασης των αεροτομών που απαρτίζουν το πτερύγιο, καθώς και η φαινόμενη σε κάθε στοιχείο πτερύγωσης γωνία πρόσπτωσης και ταχύτητα. Οι εξισώσεις που προσδιορίζουν τα  $a$  και  $a'$  είναι δύο μη γραμμικές εξισώσεις που λύνονται επαναληπτικά και ανεξάρτητα για κάθε στοιχείο πτερύγωσης (Wilson et al (1976)). Στην περίπτωση που το εισερχόμενο στο επίπεδο του δρομέα πεδίο ροής είναι χωρικά ανομοιόμορφο ή μεταβάλλεται στο χρόνο οι μη γραμμικές εξισώσεις συμπληρώνονται με τους απαραίτητους αδρανειακούς όρους και λύνονται χωριστά σε κάθε γωνία αζιμουθίου  $\varphi_{az}(t)$ .

Η παραπάνω μέθοδος η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην ανάλυση δρομέων, όταν εφαρμόζεται στην περίπτωση ΑΓΟΑ επιδέχεται ορισμένων βελτιώσεων που σχετίζονται με το μη μόνιμο χαρακτήρα της επερχόμενης ροής (dynamic inflow effects), κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα του ανέμου, και διορθώσεων που αφορούν στην προσομοίωση της επίδρασης του ομόρρου όταν αυτός βρίσκεται σε απόκλιση σε σχέση με τον άξονα του δρομέα (yaw misalignment effects).

Για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις από το μη μόνιμο χαρακτήρα της εισερχόμενης ροής χρησιμοποιείται η διαδικασία που έχει προταθεί από το ερευνητικό κέντρο ECN (Schepers και Snel

(1994)) βάσει της οποίας στην εξίσωση αξονικής επαγωγής προστίθεται ένας αδρανειακός όρος προερχόμενος από την ολοκλήρωση των μη μόνιμων όρων της εξίσωσης ορμής. Ένας αντίστοιχος όρος μπορεί να προστεθεί και στην εξίσωση ροπής της ορμής, που όμως στην πράξη δεν έχει ιδιαίτερη σημασία λόγω της ήδη μικρής τιμής της περιφερειακής επαγωγής.

Με βάση αυτή τη διόρθωση οι δύο εξισώσεις για τα  $a$  και  $a'$  γράφονται:

$$4 \frac{R \cdot \cos \varphi_c}{V} \cdot f_a \left( \frac{r}{R} \right) \cdot \dot{a} + C_T = \frac{\sigma_L C_n W^2 \cos^2 \varphi_c}{2V^2} \quad (1.1.a)$$

$$a'(1-a)F = \frac{\sigma_L \cdot C_t \cdot W^2}{8 \cdot \Omega \cdot r \cdot V \cdot \cos \varphi_c} \quad (1.1.b)$$

όπου η  $f_a$  δίνεται από τη σχέση:

$$f_a \left( \frac{r}{R} \right) = 2\pi \left[ \int_0^{2\pi} \frac{\left( 1 - \frac{r}{R} \cdot \cos \varphi_{az} \right) d\varphi_{az}}{\left( 1 + \left( \frac{r}{R} \right)^2 - 2 \cdot \frac{r}{R} \cdot \cos \varphi_{az} \right)^{3/2}} \right]^{-1} \quad (1.2)$$

Στις (1.1) και (1.2)  $r$  είναι η εκάστοτε ακτινική θέση του κάθε στοιχείου περύγωση,  $R$  η ακτίνα του δρομέα,  $\Omega$  η ταχύτητα περιστροφής του,  $\varphi_c$  η γωνία κώνου του δρομέα,  $\sigma_L = Bc/\pi$  η τοπική στερεότητα (όπου  $B$  το πλήθος των περυγίων και  $c$  η τοπική χορδή του στοιχείου περύγωσης),  $V$  η ταχύτητα του ανέμου,  $W$  η συνολική φαινόμενη ταχύτητα της εκάστοτε τομής του περυγίου,  $\varphi$  η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της τοπικής φαινόμενης ταχύτητας με το επίπεδο του δρομέα (σχήμα 1.1),  $F$  ο συντελεστής απωλειών ακροπερυγίου,  $C_T$  ο τοπικός συντελεστής ώσης του δρομέα,  $C_n$ ,  $C_t$  οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής στο επίπεδο του δρομέα τοπικής δύναμης κάθε στοιχείου περύγωσης.

Ο τοπικός συντελεστής ώσης του κάθε στοιχείου περύγωσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} C_T &= 4a \cdot (1-a) \cdot F & a < 0.33 \\ C_T &= (0.425 + 1.39 \cdot a) \cdot F & a > 0.33 \end{aligned} \quad (1.3)$$

από τις οποίες η μεν πρώτη προκύπτει άμεσα από την εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής η δε δεύτερη αποτελεί εμπειρική διόρθωση του  $C_T$  για μεγάλες τιμές του συντελεστή επαγωγής  $a$ . Η εμπειρική αυτή σχέση είναι μία ανάμεσα σε ένα πλήθος σχέσεων διόρθωσης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Van Groel et al (1991)) και η οποία βρέθηκε να δίνει την καλύτερη δυνατή συσχέτιση με ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων καμπυλών ισχύος (Κατώπης (1995)).

Επίσης οι συντελεστές  $C_n$ ,  $C_t$  σχετίζονται με τους τοπικούς συντελεστές άνωσης και αντίστασης  $C_L$  και  $C_D$  μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} C_n &= C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \\ C_t &= C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \end{aligned} \quad (1.4)$$

όπου οι  $C_L$  και  $C_D$  υπολογίζονται για την φαινόμενη γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$  (βλέπε σχήμα 1.1):

$$\alpha = \varphi - \theta_t - \beta_p \quad (1.5)$$

στην οποία με  $\theta_t$  συμβολίζουμε την τοπική γωνία συστροφής και με  $\beta_p$  την γωνία βήματος του περυγίου. Η γωνία  $\varphi$  που χρησιμοποιείται στις σχέσεις (1.1) (1.4) και (1.5) προκύπτει από το τοπικό τρίγωνο ταχυτήτων (σχήμα 1.1):

$$\tan\varphi = \frac{(1-a) \cdot \cos\varphi_c}{(1+a') \cdot x_L} \quad (1.6)$$

όπου  $x_L$  είναι ο τοπικός λόγος ταχυτήτων.

Στην περίπτωση που η επερχόμενη ροή είναι κάθετη στο επίπεδο του δρομέα τότε ο λόγος ταχυτήτων δίνεται από την σχέση:

$$x_L = \frac{\Omega r}{V} \quad (1.7)$$

Επιπλέον η συνολική φαινόμενη ταχύτητα  $W$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$W = \sqrt{(V \cdot (1-a) \cdot \cos\varphi_c)^2 + (\Omega r \cdot (1+a'))^2} \quad (1.8)$$

Αν όμως η κατεύθυνση του ανέμου βρίσκεται σε απόκλιση ως προς τον άξονα του δρομέα, (γεγονός που αποτελεί τον κανόνα όσον αφορά τη λειτουργία δρομέων Α/Γ-βλέπε σχήμα 1.2) τότε προκύπτει μια επιπλέον συνιστώσα ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα, η οποία προστίθεται ή αφαιρείται στην ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με την γωνία αζιμουθίου  $\varphi_{az}$  στην οποία βρίσκεται το πτερύγιο. Σημειώνεται ότι ως μηδενική γωνία αζιμουθίου λαμβάνεται αυτή στην οποία το πτερύγιο είναι σε οριζόντια θέση και στη φάση της ανόδου του όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2.(α). Επίσης επειδή ο ομόρρους αποκτά κλίση  $\chi$  (βλέπε σχήμα 1.2.(β)) ως προς τον άξονα περιστροφής, επάγεται μια επιπλέον ισχυρή συνιστώσα αξονικής ταχύτητας  $u_i$  στο επίπεδο του δρομέα, η οποία αναμένεται ότι θα μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με την γωνία αζιμουθίου, έτσι ώστε η συνολικά επαγόμενη ταχύτητα να αυξάνεται στις περιοχές που ο ομόρρους πλησιάζει το δρομέα λόγω της απόκλισης του κατά  $\chi$  και να μειώνεται στις περιοχές που απομακρύνεται από αυτόν. Εκτός της αξονικής, επάγεται και μια ασθενέστερη περιφερειακή συνιστώσα η οποία όμως μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να αμεληθεί. Σύμφωνα με τα παραπάνω στην περίπτωση απόκλισης της ροής ο λόγος ταχυτήτων γράφεται:

$$x_L = \frac{\Omega r - V \sin\varphi_y \sin\varphi_{az}}{V \cos\varphi_y - u_i} \quad (1.9)$$

η δε  $W$  :

$$W = \sqrt{((V \cos\varphi_y - u_i) \cdot (1-a) \cdot \cos\varphi_c)^2 + ((\Omega r - V \sin\varphi_y \sin\varphi_{az}) \cdot (1+a'))^2} \quad (1.10)$$

Η αξονική επαγόμενη ταχύτητα προσεγγίζεται από μια εμπειρική σχέση (Κατόπης (1995), Schepers και Snel (1995), Schepers (1999)) οι σταθερές της οποίας έχουν βαθμονομηθεί με βάση πειραματικά δεδομένα και υπολογισμούς που προέρχονται από πιο λεπτομερή πρότυπα ανάλυσης. Η σχέση που δίνει την  $u_i$  είναι:

$$u_i = u_{i0} (1 - f_u(r/R) \tan\frac{\chi}{2} \cos\varphi_{az} \dots + O(2\varphi_{az})) \quad (1.11)$$

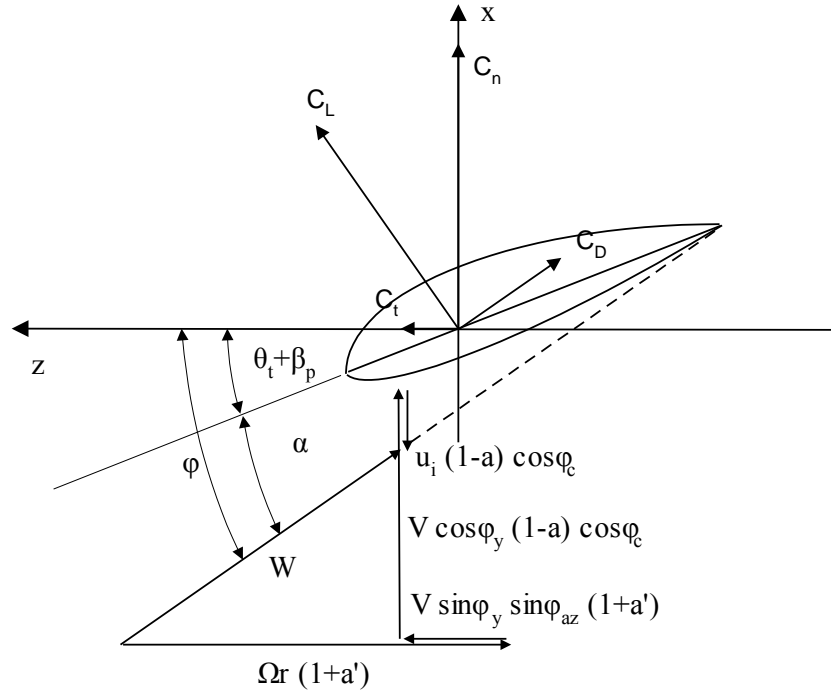
όπου,

$$f_u(r/R) = \frac{r}{R} + 0.3 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 + 0.4 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^5 \quad (1.12)$$

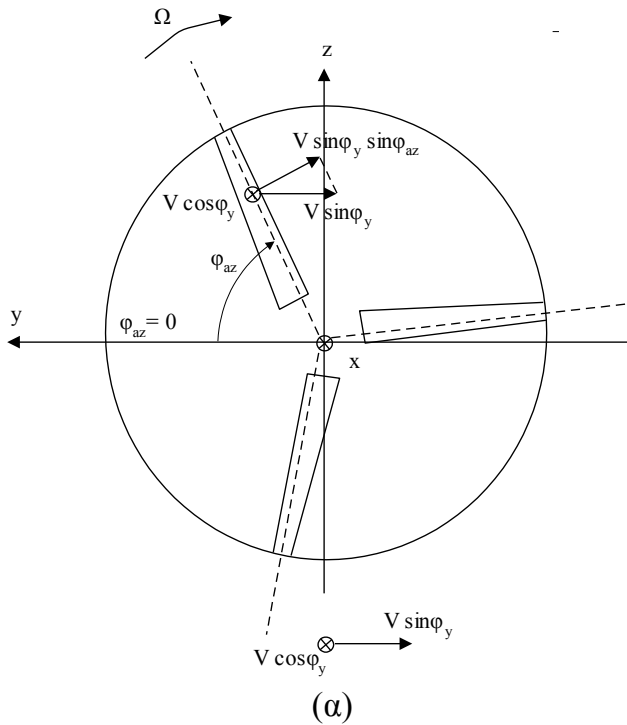
και

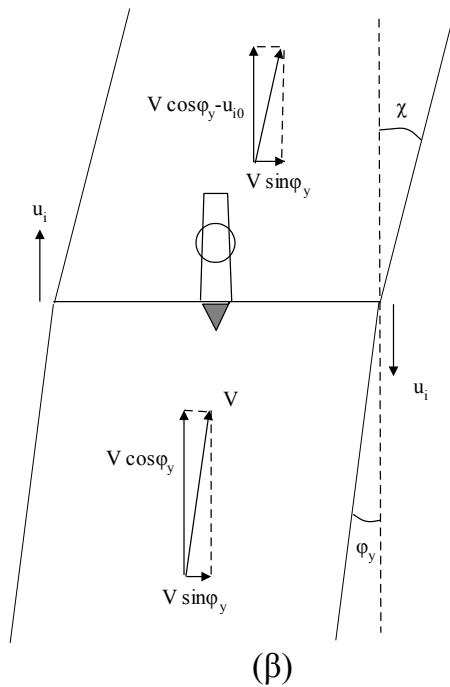
$$\tan\chi = \frac{V \sin\varphi_y}{V \cos\varphi_y - u_{i0}} \quad (1.13)$$

όπου στις παραπάνω σχέσεις η  $u_{i0}$  συμβολίζει την μέση αξονική επαγόμενη ταχύτητα πάνω στον δίσκο του δρομέα.



**Σχήμα 1.1:** Το τρίγωνο ταχυτήτων για ένα στοιχείο περύγωσης πτερυγίου ΑΓΟΑ.





**Σχήμα 1.2:** Λειτουργία του δρομέα με την επ' άπειρο ροή σε απόκλιση.

## 1.2 Μέθοδος στοιχείων στροβιλότητας (GENUVP)

Στις μεθοδολογίες ελεύθερου ομόρρου, επιλύεται το πρόβλημα της ασυμπίεστης μη συνεκτικής ροής γύρω από το δρομέα. Το πεδίο ταχύτητας μέσω του θεωρήματος του Helmholtz διαχωρίζεται σε ένα τμήμα προερχόμενο από δυναμικό, το οποίο αναπαρίσταται, μέσω της δεύτερης ταυτότητας του Green, από διανομές ιδιομόρφων σημείων πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων, και σε ένα στροβιλό τμήμα το οποίο εκφράζει την ταχύτητα που επάγει ο ομόρρος. Η στροβιλότητα του ομόρρου προσεγγίζεται από ένα πλήθος ελεύθερα κινουμένων στοιχείων στροβιλότητας, η ένταση και η θέση των οποίων προσδιορίζεται από την επίλυση των δυναμικών και κινηματικών εξισώσεων για την ελεύθερη στροβιλότητα. Τα πτερύγια στον υπολογισμό εισάγονται είτε ως λεπτές ανωστικές επιφάνειες, είτε ως πτέρυγες με πάχος.

### Διατύπωση του προβλήματος

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται μια μεθοδολογία ελεύθερου ομόρρου στην οποία θεωρούμε ότι τα πτερύγια αποτελούν λεπτές ανωστικές επιφάνειες.

Έστω λοιπόν μη μόνιμη, ασυμπίεστη και μη συνεκτική ροή γύρω από  $N_B$  το πλήθος τρισδιάστατα σώματα  $B_k$  με σύνορα  $S_k$ ,  $k=1, N_B$ , τα οποία διαμορφώνουν την διάταξη του δρομέα μιας  $A/\Gamma$ . Έστω επίσης  $D \subset \mathbb{R}^3$  το πεδίο ροής γύρω από το δρομέα,  $S$  το σύνορο του και  $\bar{n}$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο  $S$  (σχήμα 1.3). Η παρουσία των ανωστικών σωμάτων  $B_k$  στο πεδίο ροής  $D$  έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ομόρρου ο οποίος εκφεύγει από τα σώματα αυτά. Η επιφάνεια του ομόρρου λαμβάνεται ως ενεργή στην ανάλυση την οποία πραγματοποιούμε οπότε αν  $S_{wk}$ ,  $k=1, N_B$  οι επιφάνειες των φύλλων στροβιλότητας που αποβάλλονται από τα  $N_B$  σώματα (σχήμα 1.3) και  $\bar{n}_{wk}$  τα μοναδιαία κάθετα σε αυτές διανύσματα είναι φανερό ότι:

$$\partial D \equiv S = \bigcup_{k=1}^{N_B} S_k + \bigcup_{k=1}^{N_B} S_{wk} \quad (1.21)$$

Επιπλέον αν υποθέσουμε ότι  $\bar{u}(\bar{x};t) \quad \bar{x} \in D, \quad t \geq 0$  είναι το διάνυσμα του πεδίου ταχύτητας, σύμφωνα με το θεώρημα διαχωρισμού του Helmholtz (Βουτσινάς (1990)) αυτό γράφεται:

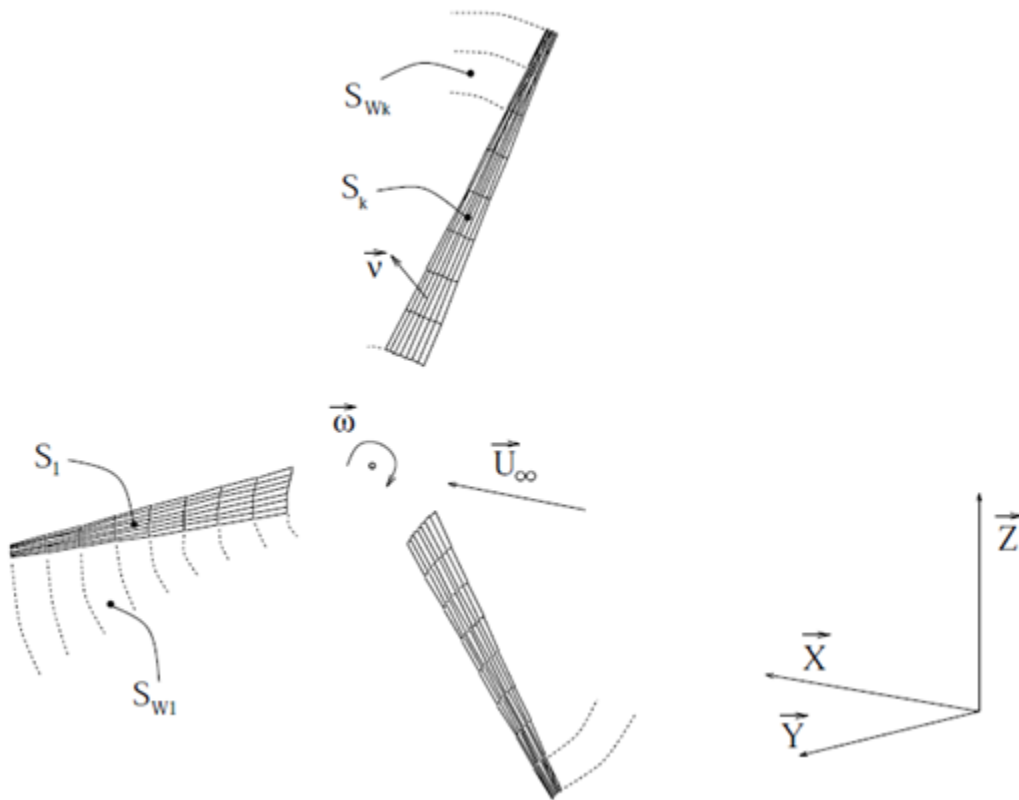
$$\bar{u}(\bar{x};t) = \bar{U}_\infty(\bar{x};t) + \nabla\varphi(\bar{x};t) + \bar{U}_w(\bar{x};t), \quad \bar{x} \in D, \quad t \geq 0 \quad (1.22)$$

όπου στην (1.22)  $\varphi(\cdot;t)$  είναι ένα δυναμικό διαταραχής,  $\bar{U}_\infty(\cdot;t)$  η ταχύτητα του πεδίου ροής στο άπειρο,  $\bar{U}_w(\cdot;t)$  μια επιπλέον επαγόμενη ταχύτητα που αναπαριστά τη συνεισφορά του στροβιλού τμήματος της ροής.

Στο πλαίσιο μιας δυναμικής-μη συνεκτικής θεώρησης της ροής το δυναμικό της ταχύτητας είναι δυνατό να αναπαρασταθεί από μια επιφανειακή διανομή ιδιομορφιών. Στην περίπτωση λεπτών περυγών λαμβάνεται μια διανομή διπόλων τόσο στην επιφάνεια των σωμάτων όσο και στον ομόρρου τους. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται ένα “πήδημα” δυναμικού μεταξύ πάνω και κάτω πλευράς των ενεργών επιφανειών το οποίο επιβάλλεται από την διπολική διανομή. Υπενθυμίζεται ότι μια διανομή διπόλων  $\mu(\bar{x}), \quad \bar{x} \in \Sigma$  που λαμβάνεται πάνω σε μια επιφάνεια  $\Sigma$  οδηγεί σε ασυνέχεια δυναμικού:

$$\mu(\bar{x}) = -[\varphi](\bar{x}), \quad \bar{x} \in \Sigma \quad (1.23)$$

όπου με  $[\varphi]$  συμβολίζεται το πήδημα του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας  $\Sigma$  (σχήμα 2.7).



Σχήμα 1.3, Οι βασικοί συμβολισμοί.



Η τιμή του δυναμικού σε κάποιο σημείο  $\bar{x}_0$  του πεδίου D δίνεται, βάσει του θεωρήματος αναπαράστασης του Green, από τη σχέση:

$$\varphi(\bar{x}_0; t) = - \int_{\Sigma} \frac{\mu(\bar{x}; t) \cdot \bar{v}(\bar{x}) \cdot (\bar{x}_0 - \bar{x})}{4\pi|\bar{x}_0 - \bar{x}|^3} d\Sigma(\bar{x}) \quad (1.24)$$

Από την (1.22) το αντίστοιχο πεδίο ταχύτητας σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής D προκύπτει απ'ευθείας με παραγωγή της (1.24) και με χρήση του θεωρήματος Stokes (Βουτσινάς (1990)) γράφεται:

$$\bar{u}_{\mu}(\bar{x}_0; t) = \nabla_0 \varphi(\bar{x}_0; t) = \int_{\Sigma} \frac{\nabla_{\Sigma} \mu(\bar{x}; t) \times \bar{v}(\bar{x}) \times (\bar{x}_0 - \bar{x})}{4\pi|\bar{x}_0 - \bar{x}|^3} d\Sigma(\bar{x}) + \oint_{\partial \Sigma} \mu(\bar{x}; t) \frac{d\bar{l}(\bar{x}) \times (\bar{x}_0 - \bar{x})}{4\pi|\bar{x}_0 - \bar{x}|^3} \quad (1.25)$$

όπου το  $\nabla_0(\cdot)$  συμβολίζει παραγωγή ως προς το  $\bar{x}_0$ ,  $\partial \Sigma$  είναι το σύνορο της επιφάνειας  $\Sigma$  και  $d\bar{l}$  στοιχειώδες διάνυσμα εφαπτομενικό ως προς το  $\partial \Sigma$  (βλέπε σχήμα 1.4).

Καθώς το  $\bar{x}_0$  πλησιάζει την  $\Sigma$  η ταχύτητα γίνεται ασυνεχής. Ειδικότερα αν το  $[\bar{u}_{\mu}]$  συμβολίζει το πήδημα της ταχύτητας πάνω στην επιφάνεια  $\Sigma$  τότε έχουμε (σχήμα 1.4):

$$\begin{cases} [\bar{u}_{\mu}] \cdot \bar{v}(\bar{x}_0) = 0, & \bar{x}_0 \in \Sigma \\ \bar{v}(\bar{x}_0) \times [\bar{u}_{\mu}] = \nabla_{\Sigma} \mu(\bar{x}_0; t) \times \bar{v}(\bar{x}_0) = \bar{\gamma}(\bar{x}_0; t), & \bar{x}_0 \in \Sigma \end{cases} \quad (1.26)$$

όπου το  $\bar{\gamma}(\cdot; t)$  συμβολίζει την ένταση της επιφανειακής στροβιλότητας και  $\nabla_{\Sigma}(\cdot) = (\nabla(\cdot) \cdot \bar{\tau}_{\Sigma}) \cdot \bar{\tau}_{\Sigma}$  τον επιφανειακό διαφορικό τελεστή. Έτσι από τις (1.25) και (1.26) προκύπτει ότι η διπολική επιφάνεια στην πραγματικότητα αντιστοιχεί με ένα φύλλο στροβιλότητας, δηλαδή μια επιφάνεια ασυνέχειας της εφαπτομενικής ταχύτητας.

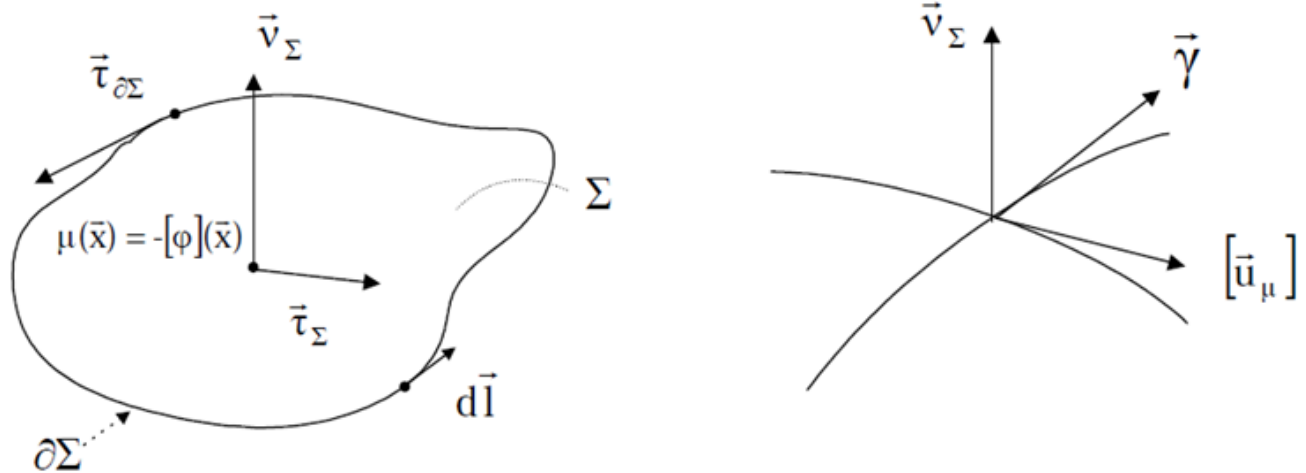
Εφαρμόζοντας τώρα την αναπαράσταση (1.24) για το χωρίο D που αποτελεί το πεδίο ροής των  $N_B$  σωμάτων παίρνουμε την ακόλουθη σχέση για το δυναμικό διαταραχής  $\varphi(\bar{x}_0; t)$ ,  $\bar{x}_0 \in D$ :

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{x}_0; t) &= - \sum_{k=1}^{N_B} \int_{S_k} \mu_k(\bar{x}; t) \frac{\bar{v}(\bar{x}) \cdot (\bar{x}_0 - \bar{x})}{4\pi|\bar{x}_0 - \bar{x}|^3} dS(\bar{x}) \quad (I) \\ & \quad (1.27) \\ & - \sum_{k=1}^{N_B} \int_{S_{wk}} \mu_{wk}(\bar{x}; t) \frac{\bar{v}_w(\bar{x}) \cdot (\bar{x}_0 - \bar{x})}{4\pi|\bar{x}_0 - \bar{x}|^3} dS_w(\bar{x}) \quad (II) \end{aligned}$$

στην οποία

$\mu_k(\cdot; t)$  είναι η διανομή διπόλων πάνω στο k λεπτό ανώστικο σώμα

$\mu_{wk}(\cdot; t)$  είναι η διανομή διπόλων στον ομόρρο του k σώματος.



Σχήμα 1.4, Συμβολισμοί για μία επιφάνεια ασυνέχειας της ταχύτητας.

Για τον προσδιορισμό λοιπόν του δυναμικού και επομένως και της ταχύτητας σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου  $D$  απαιτείται να γνωρίζουμε τις άγνωστες διανομές  $\mu_k(\cdot; t)$  και  $\mu_{wk}(\cdot; t)$  καθώς και τη γεωμετρία των ελεύθερα εξελισσόμενων ομόρρων  $S_{wk}$ . Για τον προσδιορισμό των παραπάνω αγνώστων χρησιμοποιούμε δύο ειδών συνθήκες:

- (α) κινηματικές συνθήκες, όπως τη συνθήκη μη εισχώρησης του ρευστού σε όλες τις στερεές επιφάνειες και τη συνθήκη υλικής κίνησης όλων των ελεύθερων φύλλων στροβιλότητας.
- (β) δυναμικές συνθήκες, όπως τη συνθήκη μηδενικής ασυνέχειας της πίεσης κατά μήκος των ελεύθερων φύλλων στροβιλότητας.

Αν τώρα υποθέσουμε ότι  $\bar{U}_{Bk}(\cdot; t)$  είναι το διάνυσμα της ταχύτητας κίνησης του κάθε σώματος  $k$  τότε η συνθήκη μη εισχώρησης για το σώμα αυτό γράφεται στη μορφή:

$$\bar{v}(\bar{x}_0; t) \cdot \nabla \varphi(\bar{x}_0; t) = \frac{\partial \varphi}{\partial v}(\bar{x}_0; t) = \bar{v}(\bar{x}_0; t) \cdot (\bar{U}_{Bk} - \bar{U}_\infty - \bar{U}_w), \quad \bar{x}_0 \in S_k, \quad k = 1, N_B \quad (1.28)$$

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του πεδίου διαταραχής χρησιμοποιείται η σχέση (1.25) η οποία καταλήγει σε μια πολύ εύχρηστη μορφή αν υποθέσουμε τμηματικά σταθερή διανομή διπόλων πάνω στην επιφάνεια των στερεών σωμάτων και των ομόρρων τους. Σε αυτήν την περίπτωση ο πρώτος όρος στο δεύτερο μέλος της (1.25) απαλείφεται και ο δεύτερος όρος που απομένει αντιστοιχεί στην συνεισφορά από έναν κλειστό δινοσωλήνα (δινοπέταλο) που ορίζεται κατά μήκος του  $\partial \Sigma$  (συνόρου του  $\Sigma$ ).

Έστω τώρα ότι η,

$$\bar{x}_w \in S_w : \quad \bar{x}_w = \bar{x}_w(\xi^1, \xi^2; t), \quad \xi^1 \in [-1, 1], \quad \xi^2 \geq 0, \quad t \geq 0 \quad (1.29)$$

εκφράζει μια παραμετρική αναπαράσταση του κάθε φύλλου στροβιλότητας  $S_w$ . Η  $S_w$  μπορεί να θεωρηθεί ως μία επιφάνεια η οποία σχηματίζεται από μία ακολουθία υλικών γραμμών που εκφεύγουν από την γραμμή εκφυγής. Θέλοντας να ακολουθήσουμε την ιστορία αποβολής της στροβιλότητας από την ακμή εκφυγής, υποθέτουμε ότι κάθε σημείο  $\bar{x}_w(\xi^1, \xi^2; t)$  πάνω στην  $S_w$  λαμβάνεται ως η θέση ενός υλικού στοιχείου στο χρόνο  $t$  το οποίο έχει ως χαρακτηριστικό ότι απελευθερώθηκε από την ακμή εκφυγής τη χρονική στιγμή  $\xi^2$  και από ένα σημείο κατά μήκος αυτής που ορίζεται από την παράμετρο

$\xi^1$ . Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι το διάνυσμα  $\bar{x}_w(\xi^1, t; t)$  παριστάνει την θέση της γραμμής αποβολής τη χρονική στιγμή  $t$ . Επιπλέον οι γραμμές σταθερού  $\xi^1$  σχηματίζονται από τα υλικά εκείνα στοιχεία τα οποία απελευθερώθηκαν στον ομόρρου από την ίδια θέση της ακμής εκφυγής.

Η εξέλιξη του ομόρρου  $S_w(t)$  στο χρόνο καθορίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις κίνησης:

$$\frac{d\bar{x}_w(\xi; t)}{dt} = \bar{U}_m(\bar{x}_w; t), \quad \xi = (\xi^1, \xi^2) \quad (1.30.α)$$

καθώς και από τη συνθήκη μηδενικού πηδήματος της πίεσης κατά μήκος αυτού.

Αν εφαρμόσουμε την εξίσωση Bernoulli μεταξύ της πάνω και της κάτω πλευράς του  $S_w(t)$  για ένα σημείο  $\bar{x}_w$ , υποθέτοντας ότι  $[p](\bar{x}_w; t) = 0$  παίρνουμε.

$$\frac{\partial[\varphi]}{\partial t}(\bar{x}_w; t) + \bar{U}_m(\bar{x}_w; t) \cdot [\bar{u}_\mu](\bar{x}_w; t) = 0 \quad (1.30.β)$$

όπου  $\bar{U}_m(\cdot; t)$  και  $[\bar{u}_\mu](\cdot; t)$  είναι η μέση ταχύτητα και το πήδημα της ταχύτητας κατά μήκος της  $S_w(t)$ .

Με βάση τα όσα έχουμε πει, η (2.30.α) γράφεται:

$$\frac{d\bar{x}_w(\xi; t)}{dt} = \bar{U}_m(\bar{x}_w; t) = \bar{U}_\infty(\bar{x}_w; t) + \nabla\varphi(\bar{x}_w; t) + \bar{U}_w(\bar{x}_w; t) \quad (1.31)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις (2.23) και (2.26) έχουμε:

$$\mu_w(\xi; t) = -[\varphi](\xi; t) \quad , \quad [\bar{u}_\mu](\xi; t) = \nabla_{S_w} \mu_w(\xi; t) \quad (1.32)$$

επίσης θεωρώντας ότι,

$$\frac{D}{Dt}(\cdot) = \frac{\partial}{\partial t}(\cdot) + (\bar{U}_m \cdot \nabla_{S_w})(\cdot) \quad (1.33)$$

όπου  $D/Dt(\cdot)$  η υλική παράγωγος, οπότε η (1.30.β) γίνεται:

$$\frac{D\mu_w}{Dt} = 0 \quad (1.34)$$

Από την (1.34) προκύπτει άμεσα ότι η διανομή διπόλων που ορίζεται στο ελεύθερο φύλλο στροβιλότητας του ομόρρου διατηρείται υλικά. Καταλήγουμε δηλαδή στο συμπέρασμα ότι η συνθήκη (1.34) εκφράζει το θεώρημα του Kelvin.

Η συνθήκη (1.34) χρησιμοποιείται με δύο τρόπους. Πρώτα σε συμφωνία με τη χρονική ακολουθία εξέλιξης του φύλλου στροβιλότητας όπως αυτή ορίζεται μέσω της (1.29) οπότε και παίρνουμε ότι:

$$\mu_w(\bar{x}_w(\xi^1, \xi^2; t); t) = \mu_w(\bar{x}_w(\xi^1, \xi^2; \xi^2); \xi^2) \quad (1.35)$$

η οποία απλά υποδηλώνει ότι η ένταση της διανομής διπόλων που μεταφέρεται από ένα υλικό στοιχείο  $\xi = (\xi^1, \xi^2)$  είναι ίδια με αυτή που το στοιχείο είχε τη στιγμή που απελευθερώθηκε από την ακμή εκφυγής. Επίσης η (1.34) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της έντασης της αποβαλλόμενης από την ακμή εκφυγής στροβιλότητας. Η συνθήκη (1.34) επιβάλλει ίσες εντάσεις διπόλων  $\mu_k(\cdot; t)$  και  $\mu_{wk}(\cdot; t)$  για δύο σημεία, πάνω στο  $k$  πτερύγιο και τον ομόρρου του αντίστοιχα, και εκατέρωθεν της γραμμής εκφυγής.

Θεωρητικές μελέτες οι οποίες επιβεβαιώνονται και από πειράματα υποστηρίζουν ότι ένα ελεύθερο φύλλο στροβιλότητας καθώς εξελίσσεται στο χρόνο χάνει τη λεία γεωμετρικά μορφή του εξαιτίας του ιδιόμορφου χαρακτήρα των ολοκληρωμάτων που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του  $\nabla\varphi(\bar{x}; t)$ . Για να υπερβούμε αυτή τη δυσκολία εισάγεται μια γενίκευση του πεδίου στροβιλότητας. Βασιζόμενοι στις

(1.25) και (1.26) το γενικευμένο πεδίο στροβιλότητας που σχετίζεται με το φύλλο στροβιλότητας  $S_w(t)$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{\omega}_{S_w}(\vec{x}; t) = \nabla \times \vec{u}_\mu(\vec{x}; t) = \underbrace{\delta_{S_w}(\vec{x} - \vec{x}_{S_w}) \cdot [\nabla \mu_w(\vec{x}_{S_w}; t) \times \vec{v}(\vec{x}_{S_w}; t)]}_{\text{επιφανειακή διανομή στροβιλότητας}} + \underbrace{\delta_{\partial S_w}(\vec{x} - \vec{x}_{\partial S_w}) \cdot \vec{\tau}(\vec{x}_{\partial S_w}; t) \cdot \mu_w(\vec{x}_{S_w}; t)}_{\text{γραμμική διανομή στροβιλότητας}} \quad (1.36)$$

όπου με  $\delta_{S_w}$  και  $\delta_{\partial S_w}$  συμβολίζουμε την επιφανειακή και γραμμική συνάρτηση Dirac οι οποίες ορίζονται στο εσωτερικό και στο σύνορο της  $S_w(t)$  αντίστοιχα και  $\vec{\tau}(\cdot; t)$  το μοναδιαίο εφαπτομενικό διάνυσμα στο σύνορο  $\partial S_w(t)$  της  $S_w(t)$ . Σημειώνεται ότι αν η ένταση των διπόλων στον ομόρρου ληφθεί τμηματικά σταθερή τότε ο επιφανειακός όρος της (1.36) απαλείφεται. Η παραπάνω γενίκευση επιτρέπει την εφαρμογή στον ομόρρου μιας στοιχειακής προσέγγισης με σημειακά στοιχεία στροβιλότητας.

## Σύνοψη – Σύγκριση

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου.

### Μέθοδος Στοιχείων Πτερύγωσης

- Απαιτείται να γνωρίζουμε τους αεροδυναμικούς συντελεστές άνωσης και αντίστασης σε διάφορες ακτινικές θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου. Επιπλέον, στην αρχική του μορφή η μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα υστέρησης λόγω δυναμικής αποκόλλησης της ροής πάνω από το πτερύγιο.
- Λαμβάνει υπ' όψιν τα μη μόνιμα φαινόμενα λόγω στοχαστικότητας του ανέμου και απόκλισης της επερχόμενης ροής σε σχέση με τον άξονα του δρομέα με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων.
- Βασίζεται σε μία διδιάστατη λογική επίλυσης στην οποία τα επιμέρους στοιχεία πτερύγωσης δεν αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους. Επομένως ο τρισδιάστατος χαρακτήρας της ροής δεν μπορεί να συμπεριληφθεί παρά μόνο εμμέσως με τη χρήση διορθωμένων αεροδυναμικών χαρακτηριστικών που να ανταποκρίνονται στις τρισδιάστατες συνθήκες ροής.
- Παρουσιάζει πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική σε εφαρμογές μηχανικού.

### Μέθοδος Στοιχείων Στροβιλότητας

- Είναι τρισδιάστατη και επομένως εγγενώς συμπεριλαμβάνει τον τρισδιάστατο χαρακτήρα της ροής εκτός από αυτόν που σχετίζεται άμεσα με τα συνεκτικά φαινόμενα (ακτινική ροή λόγω της κλίσης πίεσης κατά μήκος του πτερυγίου).
- Είναι μη μόνιμη και επομένως μπορεί και προλέγει με ακρίβεια ροές γύρω από δρομείς όταν το εισερχόμενο πεδίο ανέμου είναι χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενο ή παρουσιάζει ασυμμετρία σε σχέση με τον άξονα του δρομέα.
- Το υπολογιστικό της κόστος δεν είναι απαγορευτικά υψηλό γεγονός που επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί σε αεροελαστικούς υπολογισμούς με στοχαστικό άνεμο.
- Είναι μέθοδος μη συνεκτική.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μέθοδος των στοιχείων στροβιλότητας, υπερέχει της μεθόδου στοιχείων περύγωσης. Ωστόσο, το γεγονός ότι η μέθοδος είναι μη συνεκτική καθιστά την χρήση της, τουλάχιστον στη μορφή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, άνευ νοήματος σε περιπτώσεις όπου τα συνεκτικά φαινόμενα είναι ισχυρά. Αυτό κυρίως συμβαίνει όταν η ροή γύρω από το περύγιο αποκολλάται, γεγονός που στην περίπτωση δρομέων σταθερής γωνίας βήματος αποτελεί τον κανόνα και όχι την εξαίρεση. Για το λόγο αυτό απαιτείται η συμπλήρωση της μεθόδου με ένα πρότυπο προσομοίωσης της δυναμικής απώλειας στήριξης.[2]

Ακόμη, με τον αεροελαστικό κώδικα GAST πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με δύο διαφορετικούς τρόπους προσέγγισης ιδίων περιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, κατά την πρώτη μέθοδο (2<sup>nd</sup> order), οι εξισώσεις που αναφέρονται στην πτέρυγα ως ελαστική δοκό διατυπώνονται στη βάση της παραμορφωμένης κατάστασης της πτέρυγας και διατηρούνται οι όροι μέχρι και δευτέρας τάξεως. Κατά τη δεύτερη (multibody), το κύριο σώμα (δηλαδή η πτέρυγα) αντιμετωπίζεται ως σύνολο αλληλοσυνδεόμενων υποσωμάτων (sub-bodies) που το κάθε ένα λειτουργεί ως γραμμική δοκός (Timoshenko). Οι ελαστικές μετακινήσεις από τον άξονα του περύγιου κατά την κατεύθυνση του ανέμου (deflections) και οι περιστροφές υπολογίζονται θέτοντας σε κάθε υπόσωμα τις αποκλίσεις και τις περιστροφές του προηγούμενου υποσώματος ως απολύτως στερεές κινήσεις. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου multibody είναι πως η ακρίβειά της εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό υποσωμάτων στον οποίο χωρίζουμε το κύριο σώμα (πτέρυγα). Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο multibody κυρίως για να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που μας παρέχει η μέθοδος 2<sup>nd</sup> order, η οποία είναι αρκετά πιο γρήγορη ώστε να εφαρμοστεί από τον υπολογιστή.

### 1.2.1.1 Η μέθοδος 2nd order

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο μοντέλο του Hodges [3], με τη διαφορά ότι η προκατασκευασμένη κυρτότητα της πτέρυγας λαμβάνεται υπ' όψιν.

Ας θέσουμε ως Oxyz το γειοδετό σύστημα αξόνων της ράβδου (ως τέτοια αντιμετωπίζεται η πτέρυγα), όπως στο Σχήμα 1.5. Το O'ξ<sub>0</sub>η<sub>0</sub>ζ<sub>0</sub> είναι το τοπικό σύστημα αξόνων της μη παραμορφωμένης διατομής. Ο άξονας η<sub>0</sub> εφάπτεται στον καμπυλόγραμμο άξονα s κατά μήκος της κυρτής ράβδου ενώ οι άξονες ξ<sub>0</sub> και ζ<sub>0</sub> είναι στραμμένοι ώστε να παραλληλίζονται στους γειοδετούς άξονες x και z αντίστοιχα. Ακόμη, οι άξονες O<sub>1</sub>ξ<sub>1</sub>ζ<sub>1</sub> αποτελούν το τοπικό σύστημα αξόνων της παραμορφωμένης διατομής. Ο δείκτης θέσης **r** κάθε τυχαίου σημείου της παραμορφωμένης ράβδου δίνεται από την παρακάτω σχέση, όπου **r**<sub>0</sub> η ακτινική θέση του σημείου.

$$\mathbf{r} = \begin{Bmatrix} 0 \\ y(s) \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u(s) \\ v(s) \\ w(s) + z_e(s) \end{Bmatrix} + \mathbf{E} \cdot \begin{Bmatrix} \xi \\ 0 \\ \zeta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

u και v είναι οι μετακινήσεις λόγω κάμψης στους άξονες x και z αντίστοιχα, ενώ v είναι η αξονική μετακίνηση της διατομής η οποία βρίσκεται, αρχικά, στη θέση  $y(s)$ . Ακόμη,  $z_e$  είναι προϋπάρχουσα κάμψη στον άξονα z. E είναι το μητρώο παραμορφώσεων από το τοπικό σύστημα αξόνων της παραμορφωμένης διατομής ( $\xi, \eta, \zeta$ ) στο γειοδετό σύστημα αξόνων της ράβδου ( $x, y, z$ ).

Προκειμένου να πετύχουμε απλούστερη παραγωγή, θεωρούμε πως προϋπάρχουσα κυρτότητα εμφανίζεται μόνο κατά τον z άξονα. Η ίδια παραγωγή θα ίσχυε και για τον άξονα x.

Εκφράζοντας το μητρώο περιστροφής E με όρους u και w μέχρι δευτέρας τάξεως, έχουμε :

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_t + \hat{\theta} - u' \cdot (w' + z'_e)) \cdot \left(1 - \frac{u'^2}{2}\right) & u' & \sin(\theta_t + \hat{\theta} - u' \cdot (w' + z'_e)) \cdot \left(1 - \frac{u'^2}{2}\right) \\ -u' \cos(\theta_t + \hat{\theta}) + (w' + z'_e) \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) & 1 - \frac{u'^2}{2} - \frac{(w' + z'_e)^2}{2} & -u' \sin(\theta_t + \hat{\theta}) - (w' + z'_e) \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) \\ -\sin(\theta_t + \hat{\theta}) \cdot \left(1 - \frac{(w' + z'_e)^2}{2}\right) & w' + z'_e & \cos(\theta_t + \hat{\theta}) \cdot \left(1 - \frac{(w' + z'_e)^2}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Το σύμβολο ( )' υποδηλώνει χωρική παράγωγο ως προς την καμπυλόγραμμη συντεταγμένη s της ράβδου. Ακόμη,  $\theta_t(s)$  είναι η τοπική προϋπάρχουσα παραμόρφωση στρέψης του περυγίου,  $\theta(s)$  είναι η στρεπτική παραμόρφωση σε σχέση με τη γειοδετή συντεταγμένη y της ράβδου και

$\hat{\theta}(s) = \theta(s) + \int_0^y u''(s) \cdot (w'(s) + z'_e(s)) dy$  είναι η τοπική συστροφή σε σχέση με τον τοπικό άξονα η της παραμορφωμένης ράβδου.

Ο τανυστής τάσης του Green [4]  $\boldsymbol{\varepsilon}$  καθορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$d\mathbf{r}^T \cdot d\mathbf{r} - d\mathbf{r}_0^T \cdot d\mathbf{r}_0 = 2 \cdot \{d\xi \quad d\eta \quad d\zeta\} \cdot [\boldsymbol{\varepsilon}] \cdot \begin{Bmatrix} d\xi \\ d\eta \\ d\zeta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

οδηγώντας στις ακόλουθες εκφράσεις για τις παραμορφώσεις τάσεως :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\eta\eta} &= v' + \frac{u'^2}{2} + \frac{w'^2}{2} + \underline{z'_e \cdot w'} + \\ &+ (\xi^2 + \zeta^2) \cdot \left( \theta'_t \theta' + \frac{\theta'^2}{2} \right) \\ &- \left( \xi \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) + \zeta \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) \right) \cdot u'' \\ &+ \left( \xi \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) - \zeta \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) \right) \cdot (w'' + \underline{z''_e}) \\ &- \underline{(\xi \cdot \sin \theta_t - \zeta \cdot \cos \theta_t) \cdot z''_e} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\eta\xi} = \frac{1}{2}\zeta \cdot \theta' \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\eta\zeta} = -\frac{1}{2}\xi \cdot \theta' \quad (6)$$

Παραγωγίζοντας τις εξισώσεις (4) – (6) προκύπτει το συμπέρασμα ότι  $y' = \frac{dy}{ds} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{dz_e}{dy}\right)^2}} \rightarrow 1$

Οι υπογραμμισμένοι όροι στην εξίσωση (4) ανταποκρίνονται στη συνεισφορά της κυρτότητας του περυγίου στις αξονικές τάσεις. Χρησιμοποιώντας το νόμο του Hooke για ομογενή ισότροπα υλικά προκύπτουν οι ζητούμενες τάσεις σε μια περιοχή και ολοκληρώνονται τις στην επιφάνεια διατομής προκύπτουν με τη σειρά τους τα εσωτερικά φορτία της περιοχής αυτής. Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά αντιπροσωπεύονται από τη δεύτερη παράγωγο ως προς το χρόνο στην εξίσωση (1).

Η πλήρης παρουσίαση των εξισώσεων της δοκού είναι αρκετά μακροσκελής. Ως εκ τούτου, μόνο οι πιο σημαντικοί όροι που προκύπτουν λόγω της κυρτότητάς της θα μελετηθούν.

Η αξονική εσωτερική δύναμη δίνεται από τη σχέση

$$\begin{aligned} F_{\eta} &= \int_A E \cdot \varepsilon_{\eta\eta} dA = \\ &= EA \left( v' + \frac{u'^2}{2} + \frac{w'^2}{2} + \underline{z'_e w'} \right) + EI_t \cdot \left( \theta'_t \theta' + \frac{\theta'^2}{2} \right) - \\ &- \left( EA_{\zeta} \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) + EA_{\xi} \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) \right) \cdot u'' \\ &+ \left( EA_{\zeta} \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) - EA_{\xi} \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) \right) \cdot \left( w'' + \underline{z''_e} \right) \\ &- \underline{\left( EA_{\zeta} \cdot \sin \theta_t - EA_{\xi} \cdot \cos \theta_t \right) \cdot z''_e} \end{aligned}$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας του Young, EA η αξονική δυσκαμψία,  $EA_{\xi}$ ,  $EA_{\zeta}$  πρώτες ροπές σταθμισμένες ως προς το μέτρο ελαστικότητας και  $EI_t$  δυσκαμψία σύζευξης εφελκυσμού. Ακόμη, οι

$$\text{δύο καμπτικές ροπές της διατομής } M_{\xi} = -\int_A \zeta \cdot E \cdot \varepsilon_{\eta\eta} dA \text{ και } M_{\zeta} = \int_A \xi \cdot E \cdot \varepsilon_{\eta\eta} dA$$

Ωστόσο, το κυριότερο αποτέλεσμα προκύπτει από την εξίσωση της συστροφής.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (EI_{\xi\xi} - EI_{\zeta\zeta}) \cdot \sin(2 \cdot (\theta_t + \hat{\theta})) \cdot z_e''^2 \\ & - (EI_{\xi\xi} \cdot \cos \theta_t \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) - EI_{\zeta\zeta} \cdot \sin \theta_t \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta})) \cdot z_e''^2 \\ & - (EI_{\xi\xi} - EI_{\zeta\zeta}) \cdot \cos(2 \cdot (\theta_t + \hat{\theta})) \cdot u'' \cdot z_e'' \\ & + (EI_{\xi\xi} \cdot \cos \theta_t \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta}) - EI_{\zeta\zeta} \cdot \sin \theta_t \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta})) \cdot u'' \cdot z_e'' \\ & + (EI_{\xi\xi} - EI_{\zeta\zeta}) \cdot \sin(2 \cdot (\theta_t + \hat{\theta})) \cdot w'' \cdot z_e'' \\ & - (EI_{\xi\xi} \cdot \cos \theta_t \cdot \sin(\theta_t + \hat{\theta}) - EI_{\zeta\zeta} \cdot \sin \theta_t \cdot \cos(\theta_t + \hat{\theta})) \cdot w'' \cdot z_e'' \end{aligned}$$

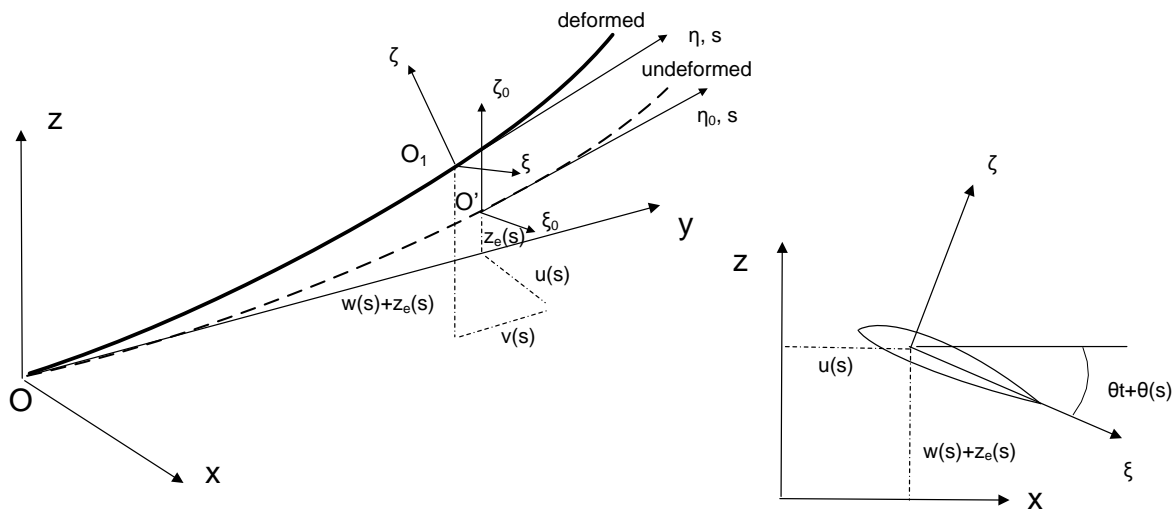
( $EI_{\xi\xi}, EI_{\zeta\zeta}$  καμπτικές δυσκαμψίες).

Οι παραπάνω όροι είναι αυτοί που προκαλούν τη σύζευξη κάμψης-στρέψης εξ' αιτίας της προϋπάρχουσας κυρτότητας του περυγίου. Επιπλέον, δεύτερης τάξης όροι που αφορούν τη σύζευξη

κάμψης - στρέψης προκύπτουν στην εξίσωση ροπής :

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} (EI_{\xi\xi} - EI_{\zeta\zeta}) \cdot \sin(2 \cdot (\theta_t + \hat{\theta})) \cdot (u''^2 - w''^2) \\ & - (EI_{\xi\xi} - EI_{\zeta\zeta}) \cdot \cos(2 \cdot (\theta_t + \hat{\theta})) \cdot u'' \cdot w'' \end{aligned}$$

Ωστόσο, οι όροι αυτοί αποκτούν σημασία όταν το περύγιο δέχεται μεγάλες καμπτικές παραμορφώσεις. [5]

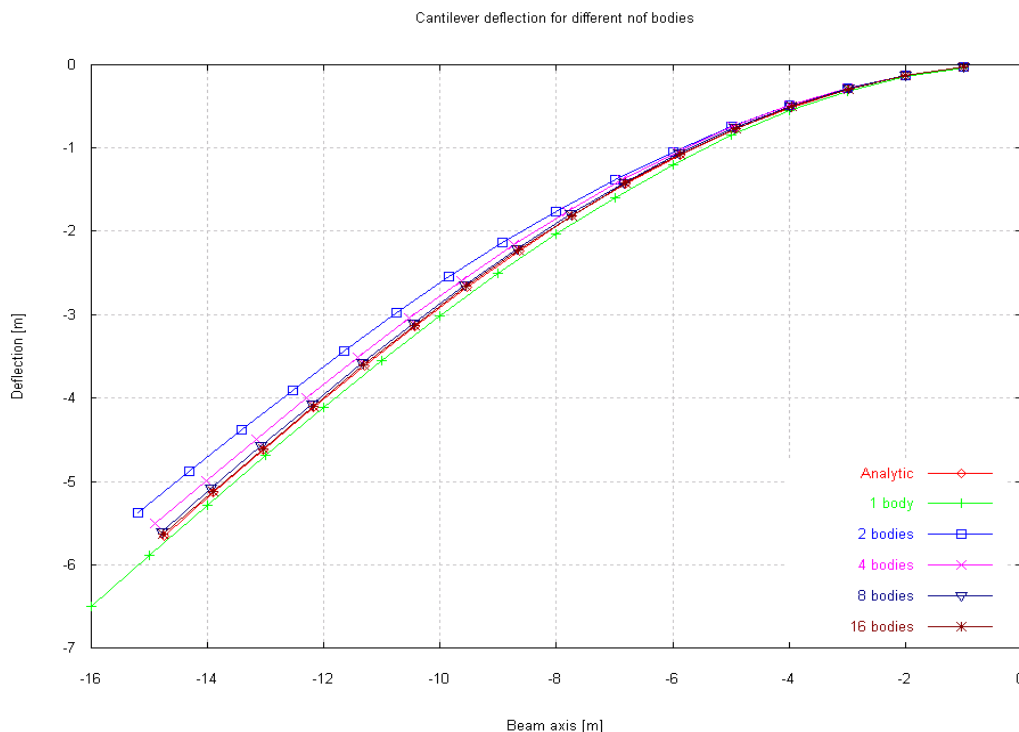


Σχήμα 1.5



### 1.2.1.2 Η μέθοδος multibody

Κατά τη μέθοδο αυτή, το κύριο σώμα της πτέρυγας υποδιαιρείται σε ένα σύνολο υποσωμάτων κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται σε περειαίρω στοιχεία, δοκού Timoshenko. Κάθε υπόσωμα περιλαμβάνει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, ενώ υπολογίζονται τα εσωτερικά φορτία αδράνειας καθώς το σύστημα αυτό κινείται στο χώρο. Το εσωτερικό κάθε υποσώματος αποτελείται από γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία για τα οποία θεωρούμε μικρές καμπτικές και στρεπτικές παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει ότι ένα πτερύγιο το οποίο προσομοιώνεται σαν ένα και μόνο σώμα δεν περιλαμβάνει τις ίδιες μη γραμμικές γεωμετρικές επιδράσεις, που σχετίζονται με μεγάλες παραμορφώσεις, με ένα πτερύγιο χωρισμένο σε αρκετά υποσώματα. Οι επιδράσεις αυτές εξηγούνται πιο καθαρά με το παρακάτω σχήμα, το οποίο απεικονίζει τη στατική παραμόρφωση μιας δοκού η οποία υπόκειται σε μία δύναμη στην μία άκρη της με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του καθέτου άξονα. Τα διαφορετικά γραφήματα δείχνουν την παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού και αντιστοιχούν σε διαφορετικές υποδιαιρέσεις του κυρίου σώματος (δοκός) σε υποσώματα. Τα παραπάνω γραφήματα συγκρίνονται επίσης με τη καλύτερη δυνατή αναλυτική λύση. Έντονη διαφοροποίηση στο αποτέλεσμα παρατηρείται μεταξύ της μοντελοποίησης που χρησιμοποιεί ένα ενιαίο σώμα και μεταξύ αυτών που υποδιαιρούν το σώμα σε υποσώματα. Στην περίπτωση του ενιαίου σώματος, η άκρη της δοκού δεν κινείται κατά τον οριζόντιο άξονα με αποτέλεσμα να μη διατηρεί το αρχικό της μήκος, όπως θα έπρεπε, παρά να γίνεται αιθητά μακρύτερη. Ήδη με την διαίρεση του σώματος σε δύο υποσώματα, η παραμόρφωση της δοκού πλησιάζει αρκετά την αναλυτική λύση και όσο ο αριθμός των υποσωμάτων αυξάνεται, τόσο οδεύουμε προς την τελευταία.



Σχήμα 1.6

# 2Η ΜΗΧΑΝΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ – ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

## 2.1 Η ανεμογεννήτρια αναφοράς

Η εργασία αυτή έγινε με βάση μία ανεμογεννήτρια αναφοράς οριζοντίου άξονα, ονομαστικής ισχύος 5MW, με διάμετρο πτερύγωσης 126 m (συμπεριλαμβανομένης και της πλήμνης). Ως Α/Γ αναφοράς (Reference Wind Turbine ή αλλιώς RWT) ορίζουμε μία μηχανή ισχύος 5MW η οποία αναπτύχθηκε από το εργαστήριο NREL [2, 6]. Ο πίνακας 1 παραθέτει τις ιδιοσυχνότητες της RWT όταν η μηχανή είναι ακινητοποιημένη. Οι πρώτες καμπτικές ιδιοσυχνότητες του πύργου στην κατεύθυνση της ροής και κάθετα σε αυτήν εμφανίζονται στην περιοχή των 1.5P, όπως και στις περισσότερες Α/Γ του εμπορίου. Επίσης, οι πρώτες ιδιοσυχνότητες του δρομέα στην κατεύθυνση πτερύγισης και περιστροφής βρίσκονται εντός της περιοχής συχνοτήτων που συνάδει με την κοινή πρακτική σχεδιασμού, που σημαίνει 3-4 P για ασύμμετρη πτερύγιση, 3.5 P για συμμετρική πτερύγιση και 5.5 P για ασύμμετρη στην κατεύθυνση περιστροφής.

Το βάρος των πτερυγίων της RWT είναι εξαιρετικά μικρό, με αποτέλεσμα η δυσκαμψία τους να κινείται και αυτή σε χαμηλά επίπεδα. Υπολογίζεται ότι οι παραμορφώσεις του ακροπτερυγίου στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου, σε ονομαστικές συνθήκες, κυμαίνονται κοντά στο 10% της ακτίνας της πτέρυγας. Επίσης, σε συνθήκες πλήρους φορτίου, συναντώνται γωνίες στρέψης της τάξεως των 3-4 μοιρών. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω παραμορφώσεις και στρέψεις είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με αυτές που παρατηρούνται σε μικρότερες πτέρυγες ανεμογεννητριών του εμπορίου.

Mode Description	Natural frequency	
	[Hz]	[P]
1 <sup>st</sup> tower lateral	0.276	1.37
1 <sup>st</sup> tower longitudinal	0.282	1.40
1 <sup>st</sup> shaft	0.598	2.97
1 <sup>st</sup> rotor asymmetric flap (yaw)	0.614	3.05
1 <sup>st</sup> rotor asymmetric flap (tilt)	0.654	3.24
1 <sup>st</sup> rotor collective flap	0.699	3.46
1 <sup>st</sup> rotor asymmetric edge	1.089	5.40
1 <sup>st</sup> rotor asymmetric edge	1.105	5.48
2 <sup>nd</sup> rotor asymmetric flap (yaw)	1.630	8.08
2 <sup>nd</sup> rotor asymmetric flap (tilt)	1.784	8.85
2 <sup>nd</sup> rotor collective flap	1.974	9.79

Πίνακας 1

## 2.2 Γεωμετρίες *preswept blades spline type*

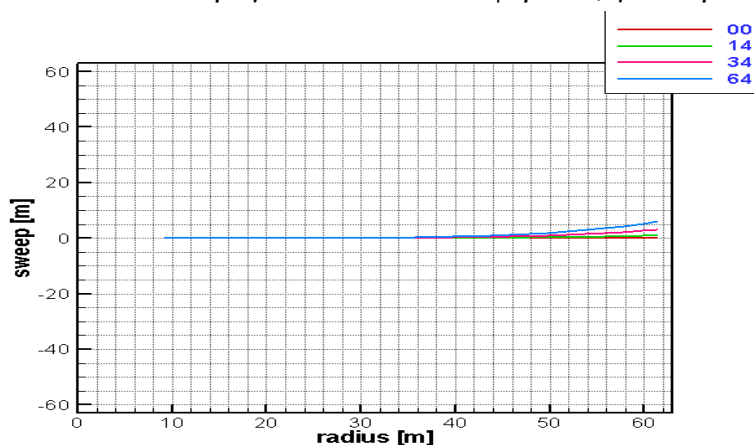
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, στα πτερύγια που μελετάμε έχουν δοθεί γεωμετρίες που προσεγγίζονται από καμπύλες spline. Το μήκος της ακτίνας έχει μείνει σταθερό και με βάση αυτό αποδόθηκαν τα αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων. Αυτό σημαίνει αφ' ενός ότι η ακτίνα του δίσκου ενέργειας παραμένει σταθερή κι επιπλέον ότι το ήδη κυρτό πτερύγιο (*preswept*) χρειάζεται περισσότερο υλικό για την κατασκευή του σε σχέση με το ευθύ (*straight*).

Τα πτερύγια που μελετάμε έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά. Την απόκλιση τους από την ευθεία της ακτίνας (*sweep*) και την καμπυλότητα με την οποία «οδηγούνται» μέχρι την απόκλιση αυτή. Η καμπυλότητα μας δείχνει πόσο προοδευτικά τείνει το πτερύγιο να πλησιάσει τη ζητούμενη απόκλιση. Μεγάλος δείκτης καμπυλότητας συνεπάγεται απότομη αλλαγή. Με τα λατινικά *a* και *b* χαρακτηρίζουμε την απόκλιση και την καμπυλότητα αντίστοιχα. Έτσι έγιναν προσομιώσεις με πτερύγια { (*a*=1,*b*=2) , (*a*=1,*b*=4) , (*a*=3,*b*=2) , (*a*=3,*b*=4) , (*a*=6,*b*=2) , (*a*=6,*b*=4) , (*a*=6,*b*=10) , (*a*=6,*b*=18) }. Παραδείγματα παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

Ακόμη, εξετάσαμε γεωμετρίες όπου η απόκλιση αλλάζει κατευθύνσεις κατά μήκος της ακτίνας. Επιλέξαμε οι καμπύλες αυτές να ξεκινούν με μηδενική κλίση, έπειτα να παρουσιάζουν τοπικό ακρότατο (θα αποτελεί τον πρώτο δείκτη) –δηλαδή μέγιστη τοπική απόκλιση- 0.5m , 1m και 2m ανά περίπτωση σε συγκεκριμένες θέσεις (θα αποτελούν το δεύτερο δείκτη) 20m , 30m και 40m από την πλύμη και τελικά να καταλήγουν σε *sweep* 6m με κλίση 0.5 (~ 24-26 μοίρες συνολική γωνία σε σχέση με την ευθεία της ακτίνας). Για τις παραπάνω θέσεις και *sweep* εξετάστηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί. Παραδείγματα φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.

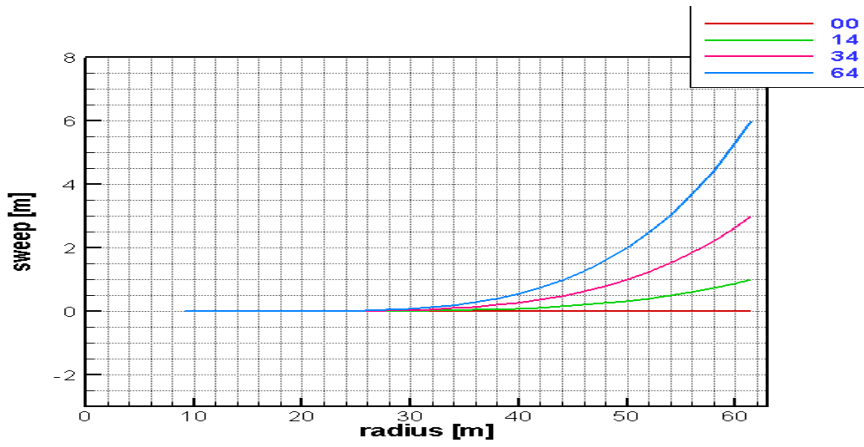
\*Στη συνέχεια, θα ονομάζουμε spline μόνο τη δεύτερη κατηγορία πτερυγίων που περιγράψαμε.

\*\*Τα προσδιοριστικά των πτερυγίων θα χρησιμοποιούνται και ως προσδιοριστικά των A/Γ η οποίες διαθέτουν τα πτερύγια αυτά. Θα αναφέρεται, για παράδειγμα, «η spline A/Γ» ή «η A/Γ (*a*=6,*b*=4)».



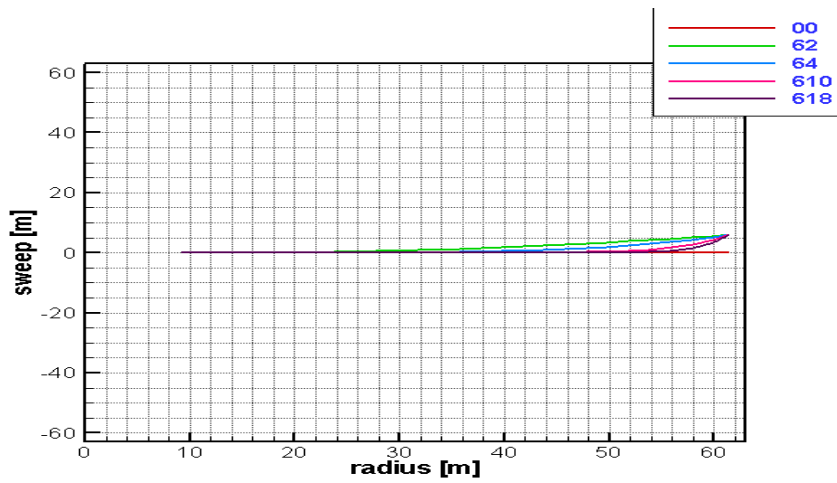
Σχήμα 2.1

Στο Σχήμα 2.1 έχουμε περιπτώσεις πτερυγίων με *sweep* 0,1,3,6 και καμπυλότητα 0,4,4,4 αντίστοιχα. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει το ίδιο με ευκρινέστερη κλίμακα.

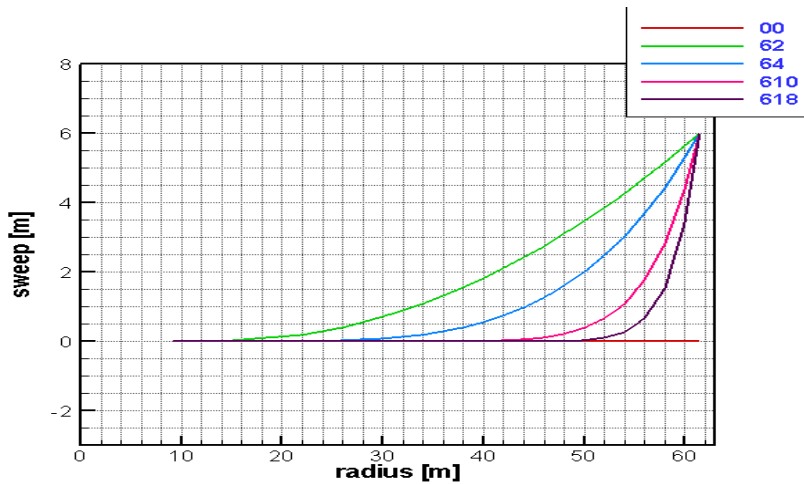


Σχήμα 2.2

Στα επόμενα σχήματα, παρουσιάζεται η διαφορά στην καμπυλότητα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

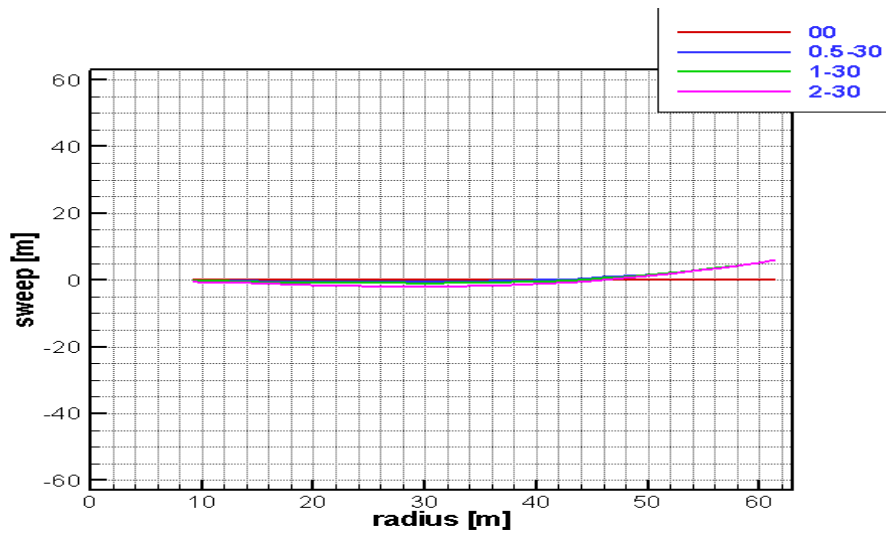


Σχήμα 2.3

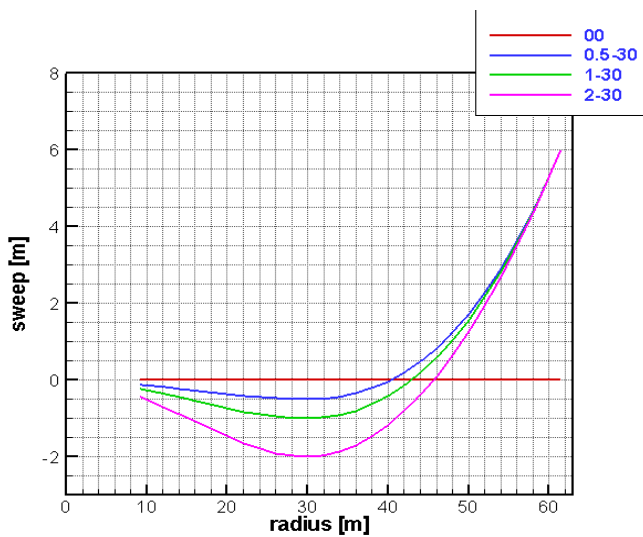


Σχήμα 2.4

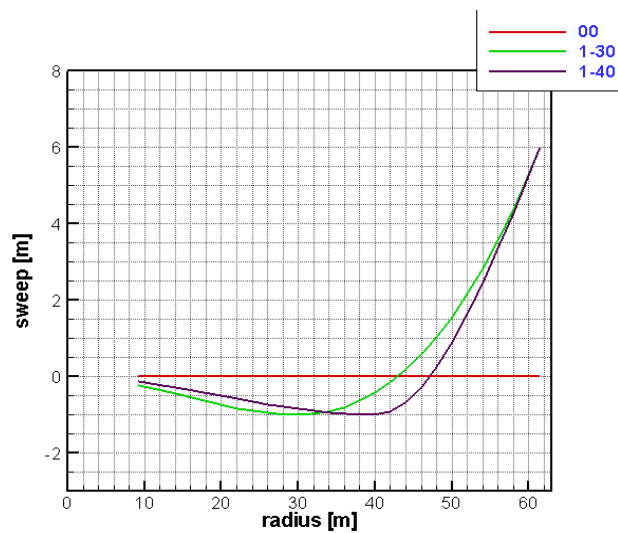
Στα σχήματα από 2.5 έως 2.7, φαίνονται διάφορες γεωμετρίες spline.



Σχήμα 2.5

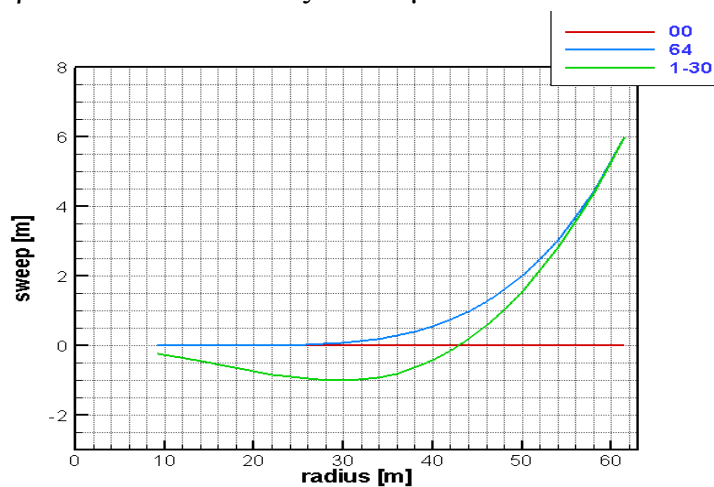


Σχήμα 2.6



Σχήμα 2.7

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη σύγκριση 6-4 και spline-1-30, καθώς τα δύο αυτά πτερύγια πλησιάζουν το τελικό sweep με κλίσεις που δεν διαφέρουν κατά πολύ, από ένα σημείο και μετά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Στη συνέχεια, θα τα δύο αυτά πτερύγια θα αποτελέσουν δύο εκ των βασικών περιπτώσεων που θα εξετάσουμε.



Σχήμα 2.7

# 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

---

## 3.1 Αεροδυναμική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε σταθερό αέρα

Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας, εξετάζουμε τη διάταξή μας καθαρά αεροδυναμικά. Για να το πετύχουμε αυτό, αποκλείσαμε τις όποιες ελαστικές κινήσεις μπορεί να έχει κάθε μέρος της Α/Γ. Έτσι, για παράδειγμα, τα πτερύγια κινούνται μόνο περιστροφικά του άξονα. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να ελέγξουμε κατά πόσο επηρεάζεται η αεροδυναμική των πτερυγίων και της Α/Γ συνολικά ανάλογα με τις αλλαγές που κάνουμε στη γεωμετρία αυτών και πώς οι όποιες αλλαγές επηρεάζουν τη συμπεριφορά της τελευταίας (πχ. ισχύς). Η παραπάνω διαδικασία γίνεται με δεδομένο σταθερό αέρα 8 m/s.

## 3.2 Βασικά σημεία ελέγχου

Τα σημεία που, κυρίως, μας ενδιαφέρει πώς επηρεάζονται είναι :

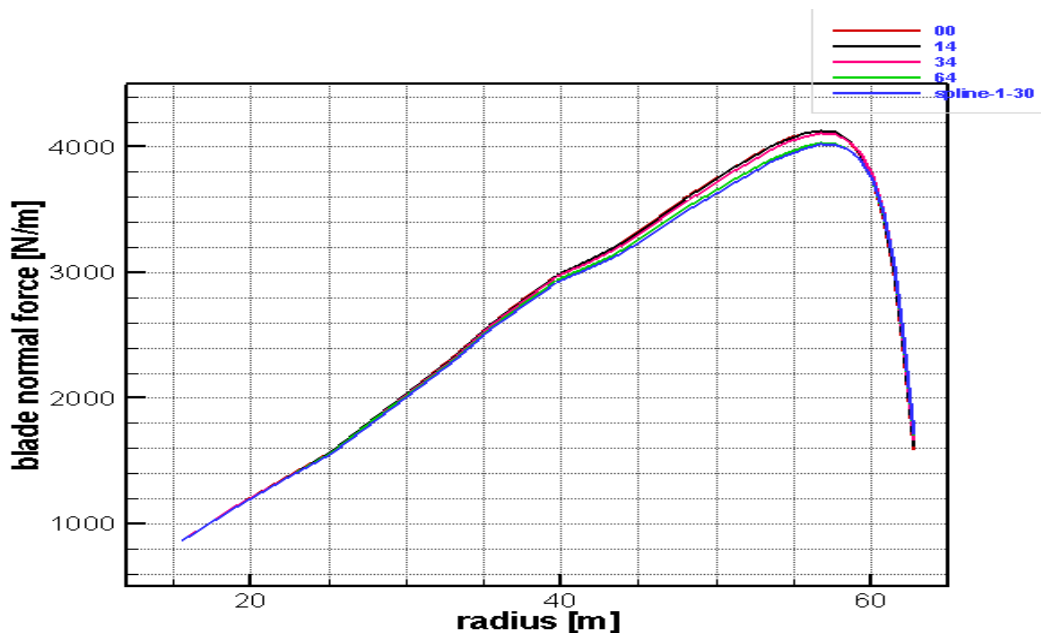
- Οι αξονικές δυνάμεις κατά μήκος των πτερυγίων, στοιχείο που σχετίζεται άμεσα με την αντοχή τους.
- Οι περιφεριακές δυνάμεις κατά μήκος των πτερυγίων, καθώς η συνιστώσα της περιφερειακής δύναμης σε ένα σημείο του πτερυγίου είναι και η σημαντικότερη συνιστώσα της άνωσης (lift), η οποία αποτελεί τη βασική κινητήρια δύναμη για το πτερύγιο.
- Η γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος των πτερυγίων. Αλλαγή στη γωνία πρόσπτωσης συνεπάγεται αλλαγή στην αξονική και περιφεριακή δύναμη. Στο σημείο αυτό, έμεσα βλέπουμε πόσο στραμένο είναι το pre-swept πτερύγιο σε σχέση με το ευθύ (straight).
- Η δύναμη thrust. Πρόκειται για τη συνολική δύναμη αντίδρασης του αέρα στην Α/Γ. \*\*
- Η συνολική ισχύς που αποδίδει η Α/Γ.

\*\* Η πτερύγωση δρα απέναντι στον αέρα ως ενιαίος δίσκος ενέργειας. Ουσιαστικά αφαιρεί μέρος της κινητικής ενέργειας του αέρα προκειμένου να κινηθεί η ίδια. Για να γίνει αυτό, η πτερύγωση ασκεί στον αέρα κάποια συνολική (αν εξετάσουμε το πρόβλημα μακροσκοπικά) δύναμη με κατεύθυνση αντίθετη της κίνησής του και σύμφωνα με το νόμο δράσης – αντίδρασης ο αέρας ασκεί αντίθετη δύναμη στην πτερύγωση, τη δύναμη thrust.

### 3.3 Συγκρίσεις GENUVP 2nd order

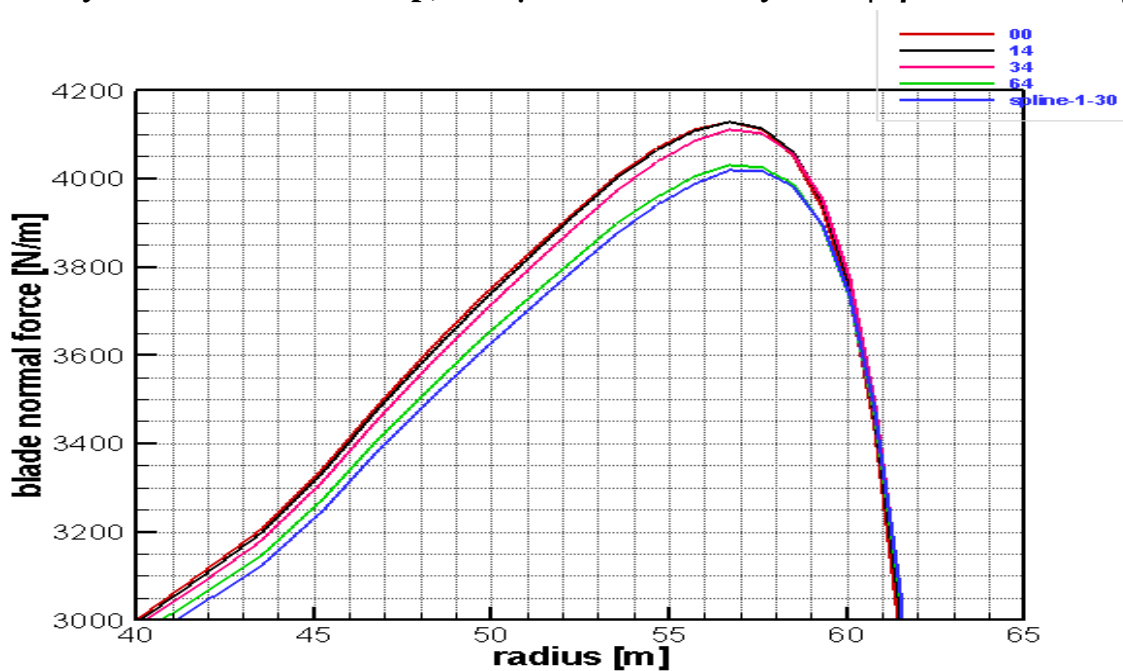
Στα παρακάτω ενδεικτικά διαγράμματα απεικονίζονται τα βασικά σημεία με τη βοήθεια καμπύλων.

\*Στο τέλος του κεφαλαίου, στο Παράρτημα 1, παρατήθενται αεροδυναμικές συγκρίσεις ανάμεσα σε διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, για καλύτερη κατανόηση.

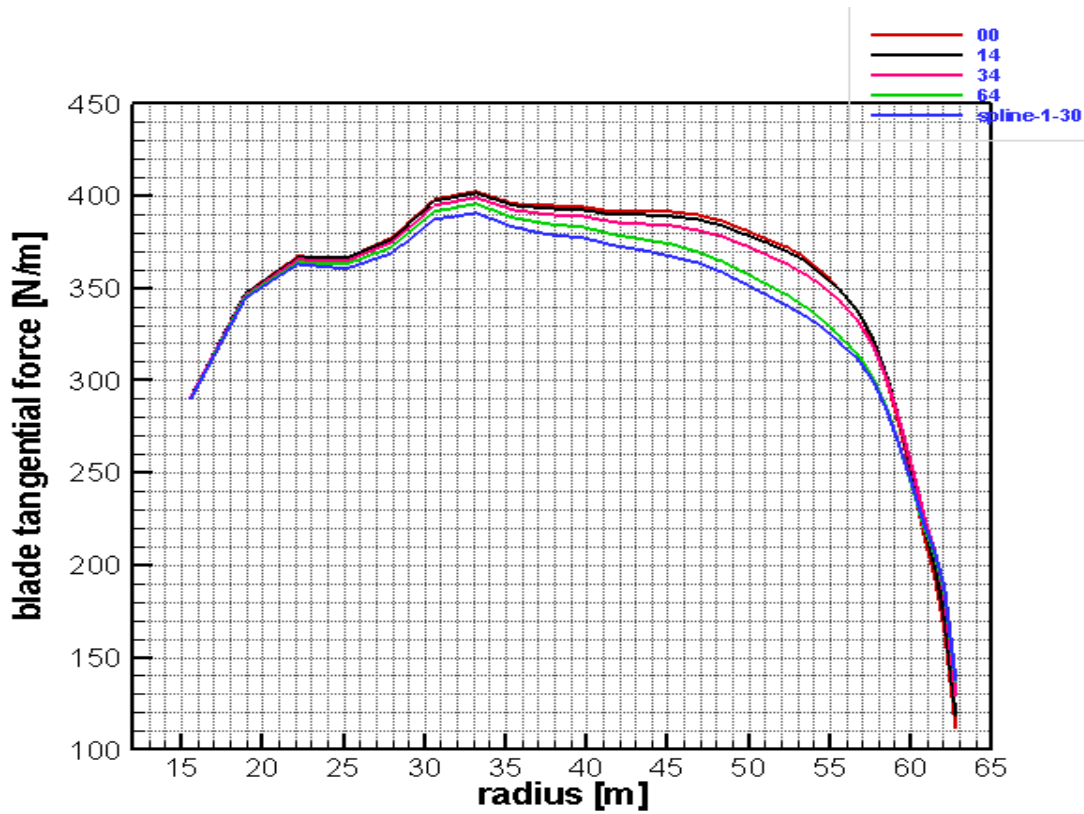


Σχήμα 3.1

Όσο αυξάνεται το τελικό sweep, τόσο μειώνονται τα αξονικά φορτία επάνω στην πτέρυγα.

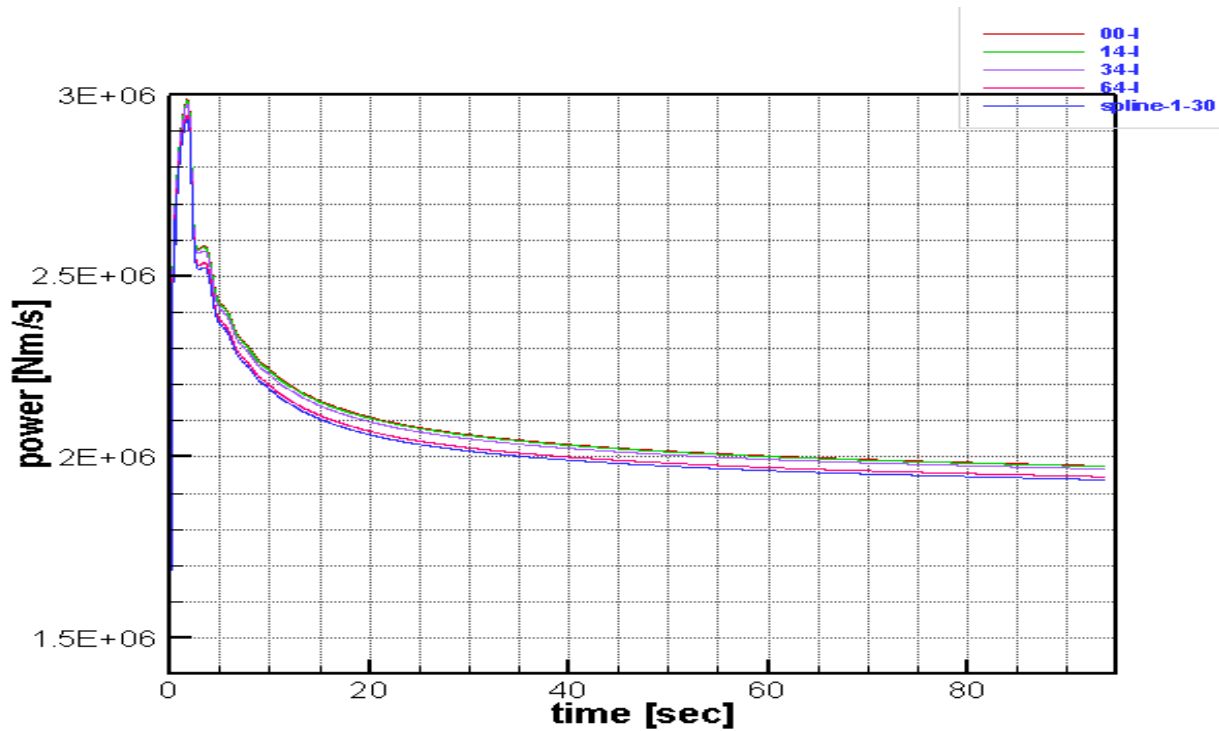


Σχήμα 3.2



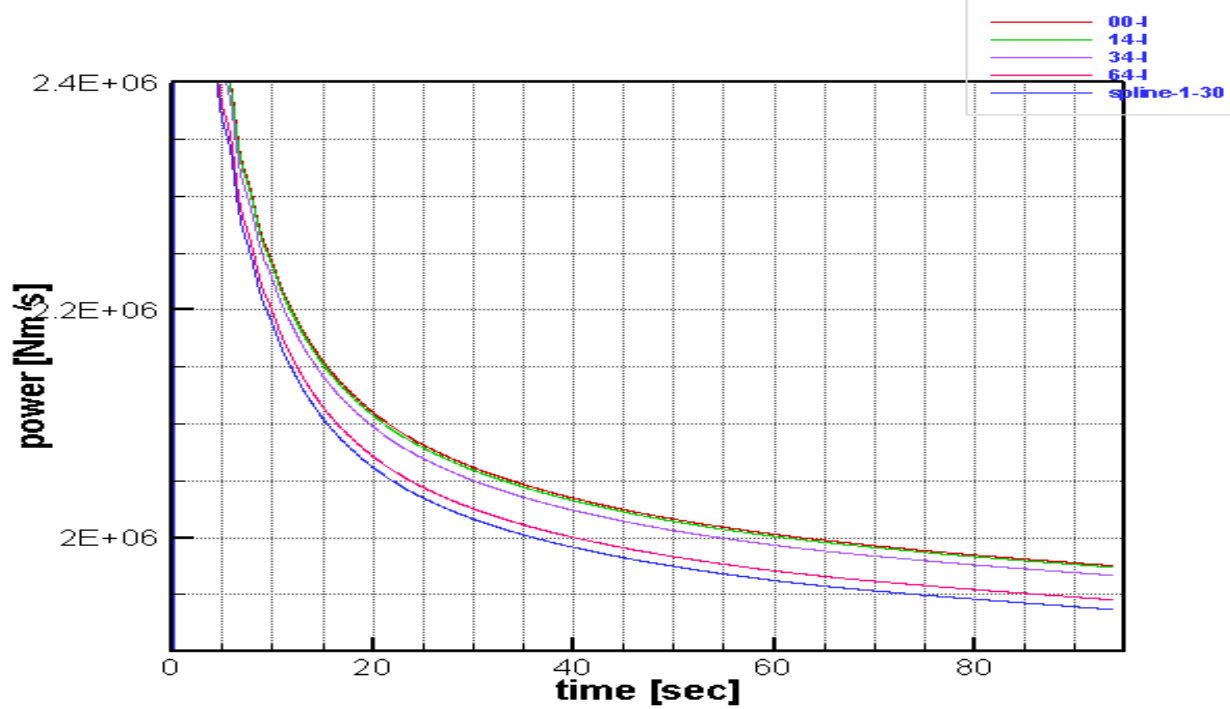
Σχήμα 3.3

Αυξανόμενου του τελικού sweep, μειώνονται τα περιφερειακά φορτία.



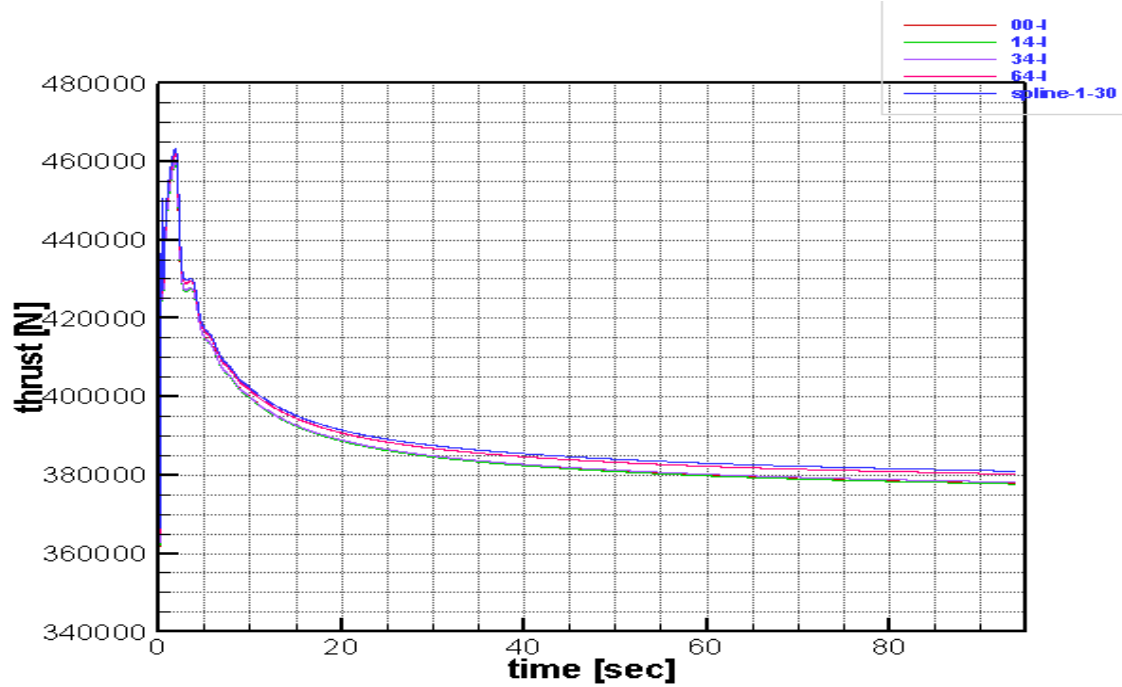
Σχήμα 3.4



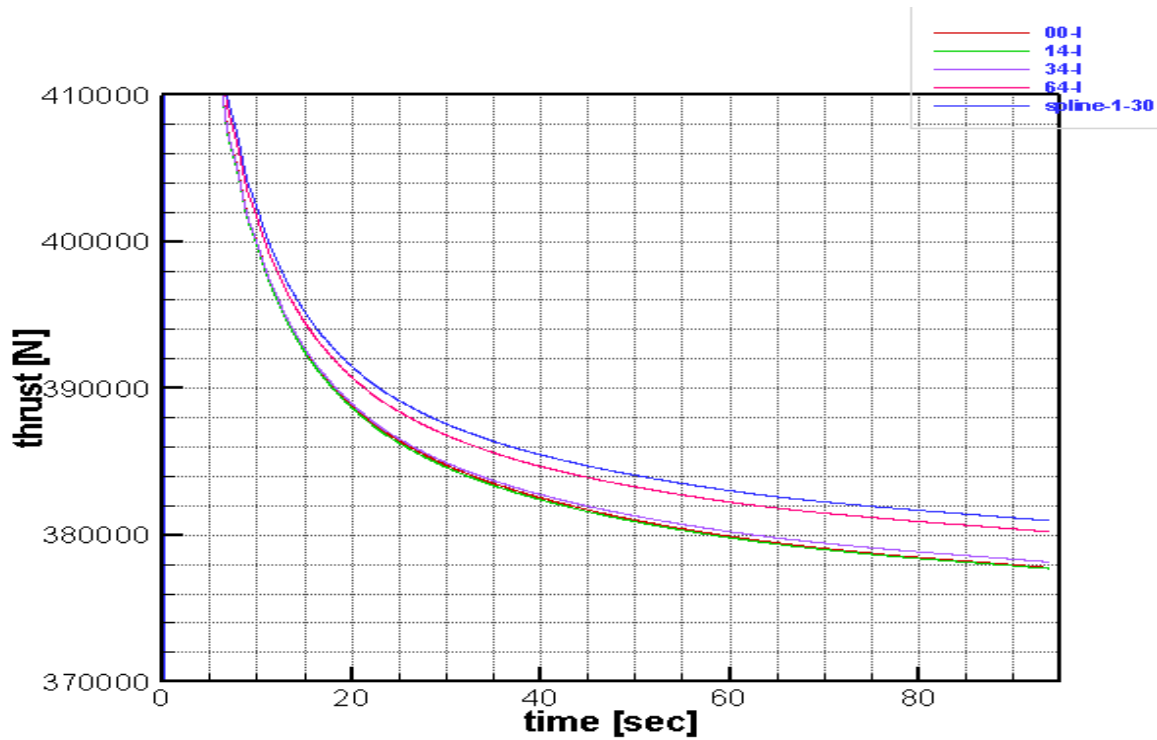


Σχήμα 3.5

Αύξηση του τελικού sweep συνεπάγεται μείωση στην αποδιδόμενη ισχύ.

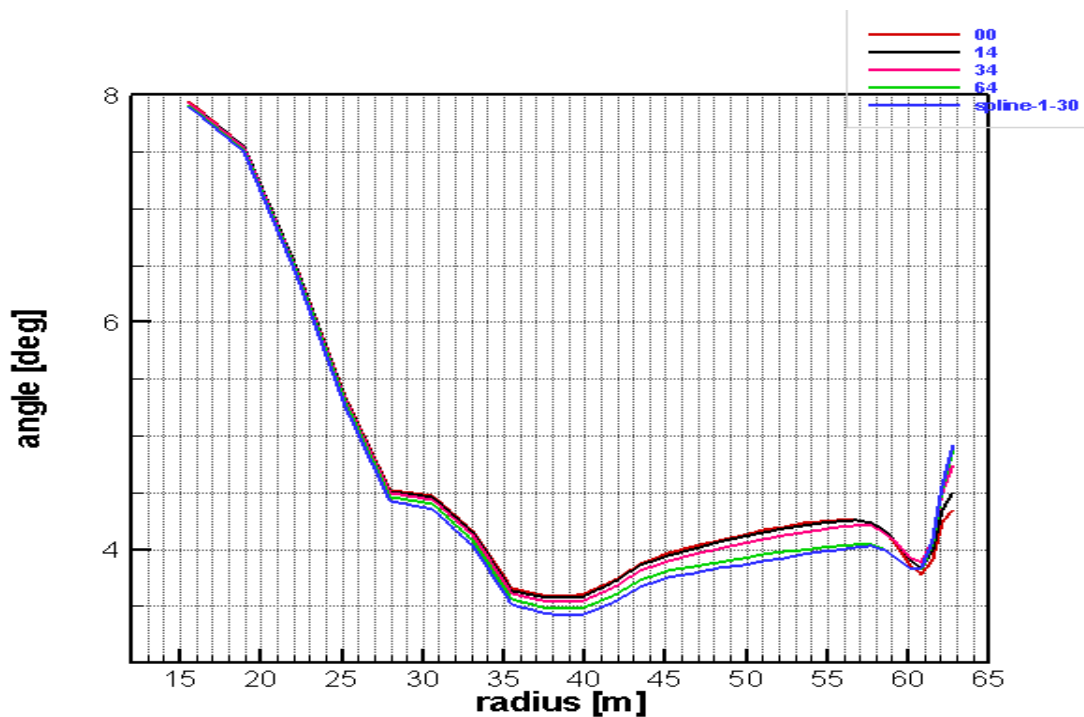


Σχήμα 3.6



Σχήμα 3.7

Αντίστροφα, η δύναμη thrust αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το τελικό sweep.



Σχήμα 3.8

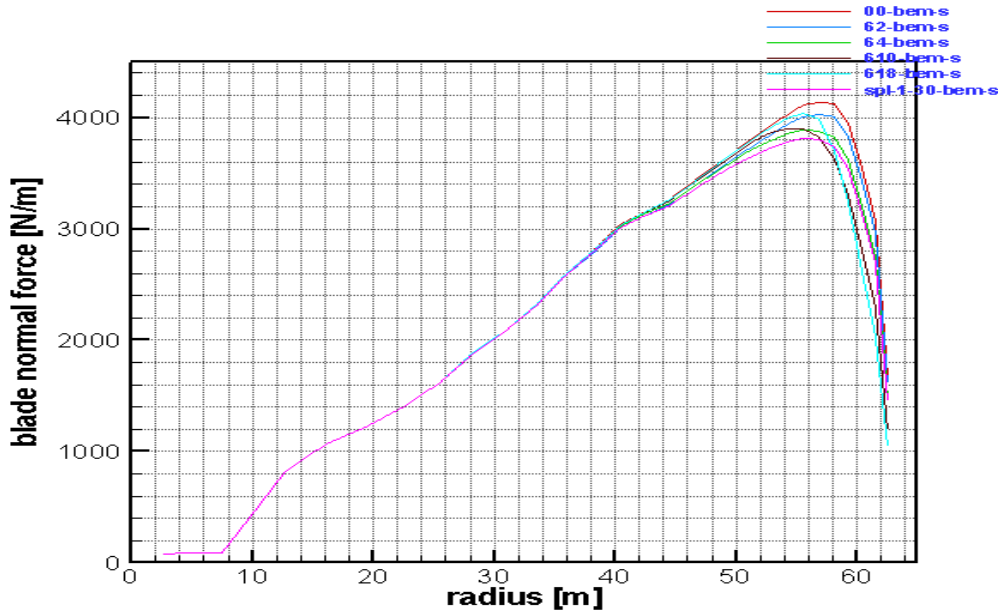
Η τοπική γωνία πρόσπτωσης του αέρα μικραίνει όσο αυξάνεται το τελικό sweep.

Από τα αποτελέσματα που παίρνουμε συμπεραίνουμε τα εξής :

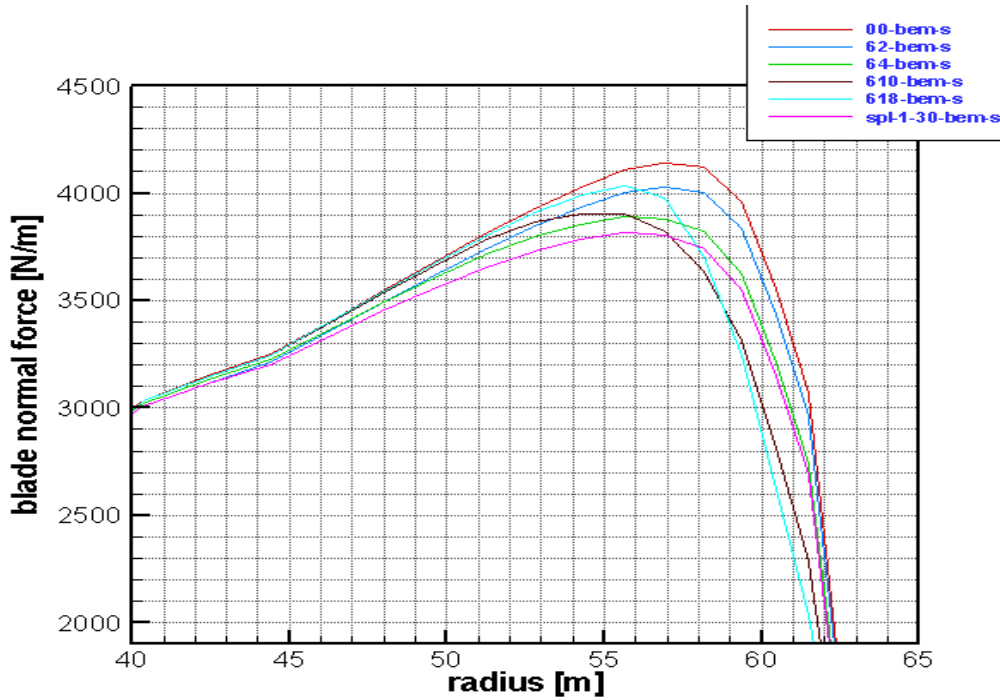
- Το ευθύ πτερύγιο καταπονείται, αξονικά, αισθητά περισσότερο σε σχέση με τα pre-swept πτερύγια. Όσο, δε, αυξάνουμε το τελικό sweep τόσο μειώνονται τα αξονικά φορτία κατά μήκους του πτερυγίου. Το ίδιο συμβαίνει, μέχρι ενός σημείου, με την αύξηση του δείκτη καμπυλότητας. Ωστόσο, όταν ο τελευταίος παίρνει αρκετά μεγάλη τιμή, ώστε το πτερύγιο στο μεγαλύτερο μέρος του να είναι ίδιο με το ευθύ, τότε η αξονική φόρτιση αυξάνεται. Τα spline πτερύγια δέχονται τη μικρότερη φόρτιση ανάμεσα στα pre-swept. Όσον αφορά τα spline, όσο αυξάνουμε τον πρώτο δείκτη (τοπικό ακρότατο) τόσο μειώνονται τα φορτία. Το ίδιο παρατηρούμε και όταν αυξάνουμε τον δεύτερο δείκτη (θέση τοπικού ακροτάτου). Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι διαφορές είναι πολύ μικρές και έχουν μικρή σημασία ως προς την αξιολόγηση ανάμεσα στα spline blades.
- Τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν και για τις περιφερειακές δυνάμεις με τη διαφορά ότι οι μεταξύ τους αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες και όσον αφορά τις περιπτώσεις των spline, μεγάλη αύξηση της απόστασης του τοπικού ακροτάτου από την πλήμνη συνεπάγεται μεγάλη μείωση στην περιφερειακή δύναμη.
- Η τοπική γωνία πρόσπτωσης του ανέμου επάνω στο πτερύγιο κατά μήκους της ακτίνας μεγαλώνει όσο αυξάνεται το τελικό sweep. Αυτό οφείλεται στο ότι ο άνεμος ασκεί στα preswept πτερύγια μεγαλύτερη ροπή, γύρω από την ευθεία της ακτίνας, λόγω μεγαλύτερου μοχλοβραχίονα που αυτά παρουσιάζουν ως προς την τελευταία. Πιο συγκεκριμένα, ο άνεμος έχει τη δυνατότητα να «στρίψει» πιο εύκολα τα πτερύγια με μεγαλύτερο sweep. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και όσο πιο απότομα αλλάζει η καμπυλότητα. Σε ότι αφορά τις spline γεωμετρίες, μεγάλο τοπικό ακρότατο (2m) επηρεάζει αισθητά την τοπική γωνία πρόσπτωσης, η οποία μικραίνει, διαφορά που είναι σαφώς μικρότερη ανάμεσα στα πτερύγια με τοπικό ακρότατο 0.5m και 1m. Το ίδιο συμβαίνει και με τη θέση τοπικού ακροτάτου. Όταν αυτή είναι στα 20m ή στα 30m δεν έχουμε σημαντικές διαφορές, ενώ όταν φτάνουμε στα 40m η γωνία μικραίνει αρκετά. Να σημειώσουμε, βέβαια, πως όλες οι περιπτώσεις spline πτερυγίων έχουν πολύ μικρότερες τοπικές γωνίες πρόσπτωσης σε σχέση με το ευθύ.
- Η αποδιδόμενη ισχύς μειώνεται όσο μεγαλύτερο είναι το τελικό sweep του πτερυγίου, αλλά και όσο πιο απότομη είναι η καμπυλότητα αυτού. Σε ότι έχει να κάνει με τα spline, οι μεταξύ τους διαφορές είναι αρκετά μικρές, με τις περιπτώσεις πρώτου δείκτη στα 2m ή δεύτερου δείκτη στα 40m να υστερούν σε σχέση με τα 0.5m ,1m και 20m ,30m αντίστοιχα. Βεβαίως και ως προς την ισχύ, όλες οι περιπτώσεις spline, υστερούν ξεκάθαρα έναντι του ευθύου.
- Την αντίστροφη συμπεριφορά σε σχέση με την ισχύ επιδεικνύει η δύναμη thrust.

### 3.4 Συγκρίσεις GAST 2nd order

Όπως και για τον κώδικα GENUVP, τα βασικά σημεία ελέγχου είναι και εδώ τα ίδια. Έτσι, από τις προσομοιώσεις του GAST και τα αποτελέσματά τους, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα αποτελεσμάτων.

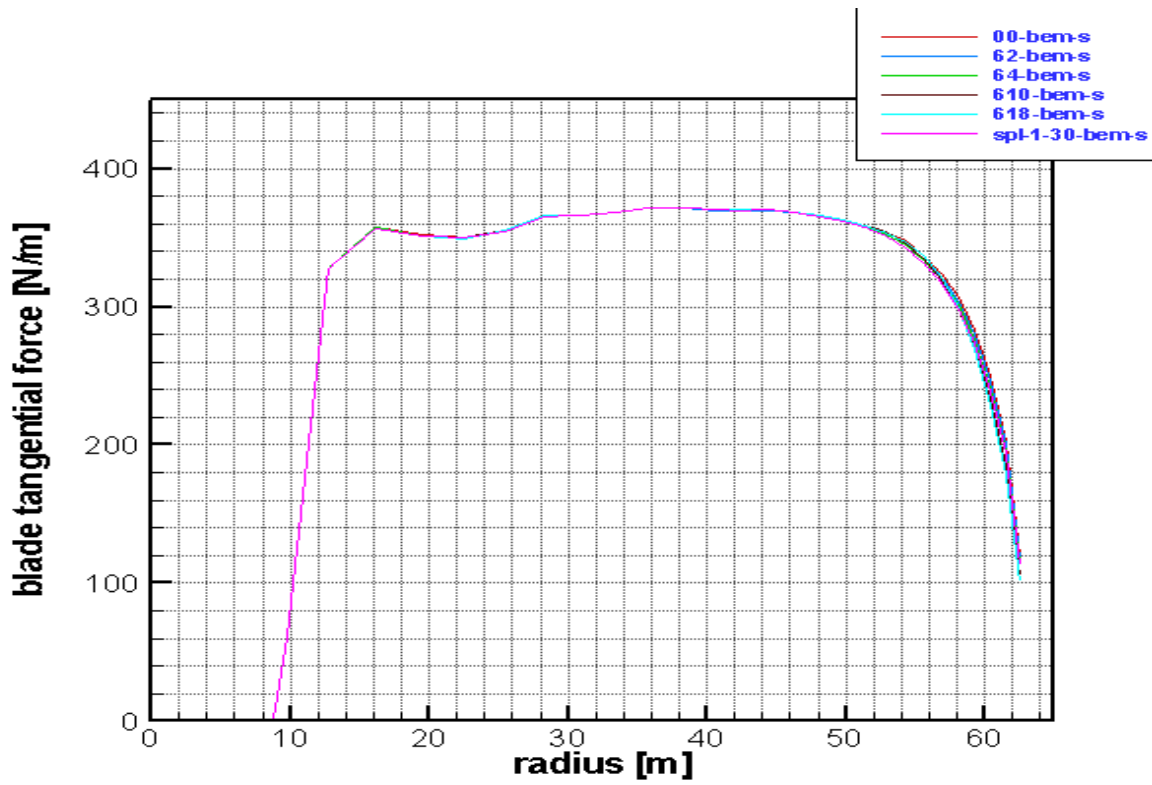


Σχήμα 3.9 Αξονική καταπόνηση κατά μήκος του πτερυγίου.

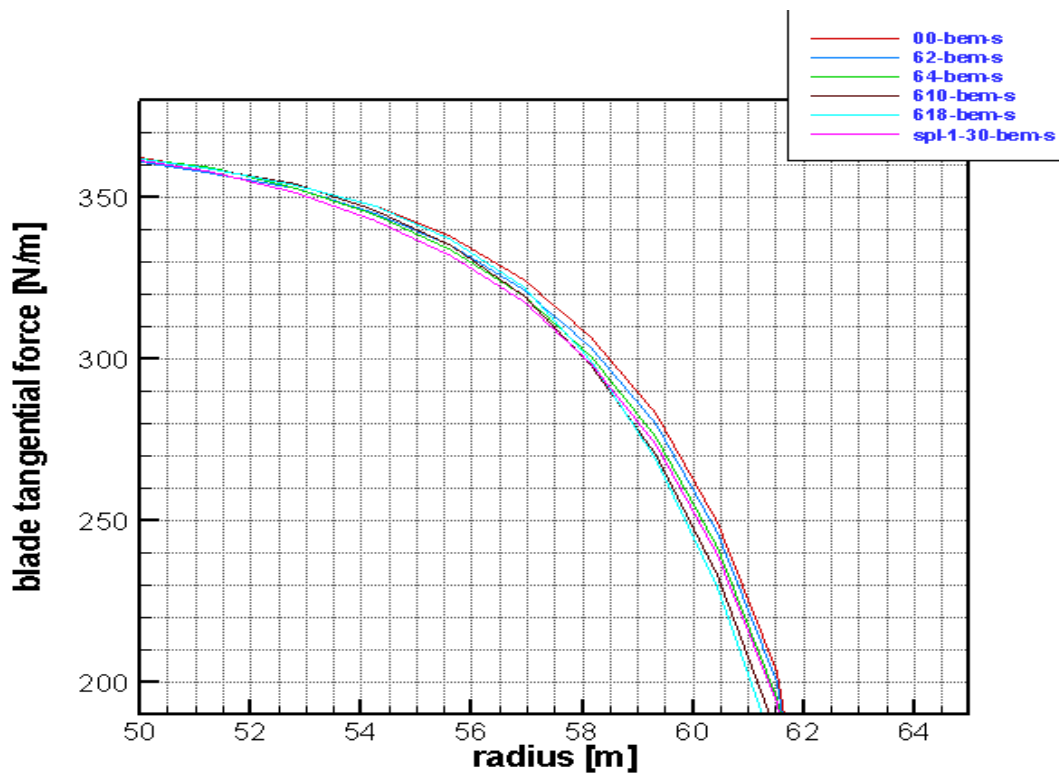


Σχήμα 3.10

Αύξηση του δείκτη καμπυλότητας, μέχρι ενός σημείου, συνεπάγεται μείωση των αξονικών φορτίων.

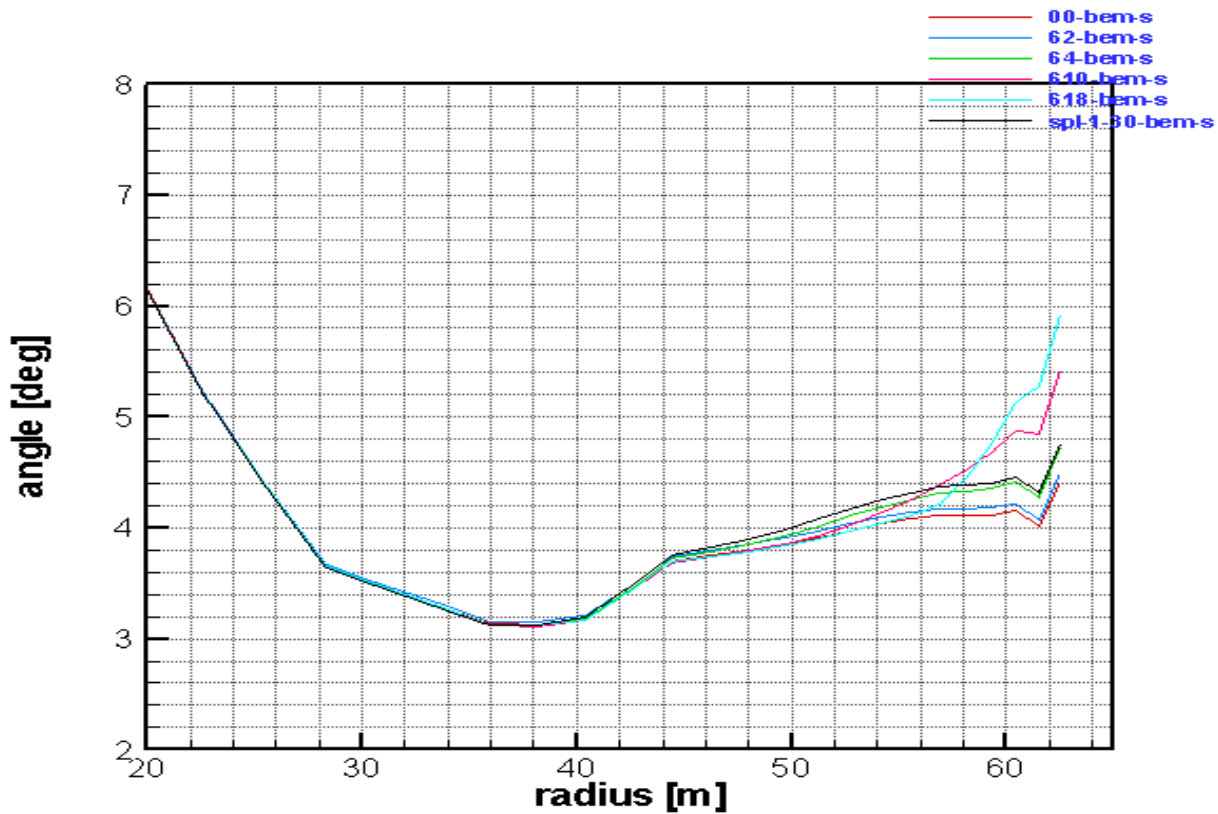


Σχήμα 3.11 Περιφερειακή καταπόνηση κατά μήκος του πτερυγίου.

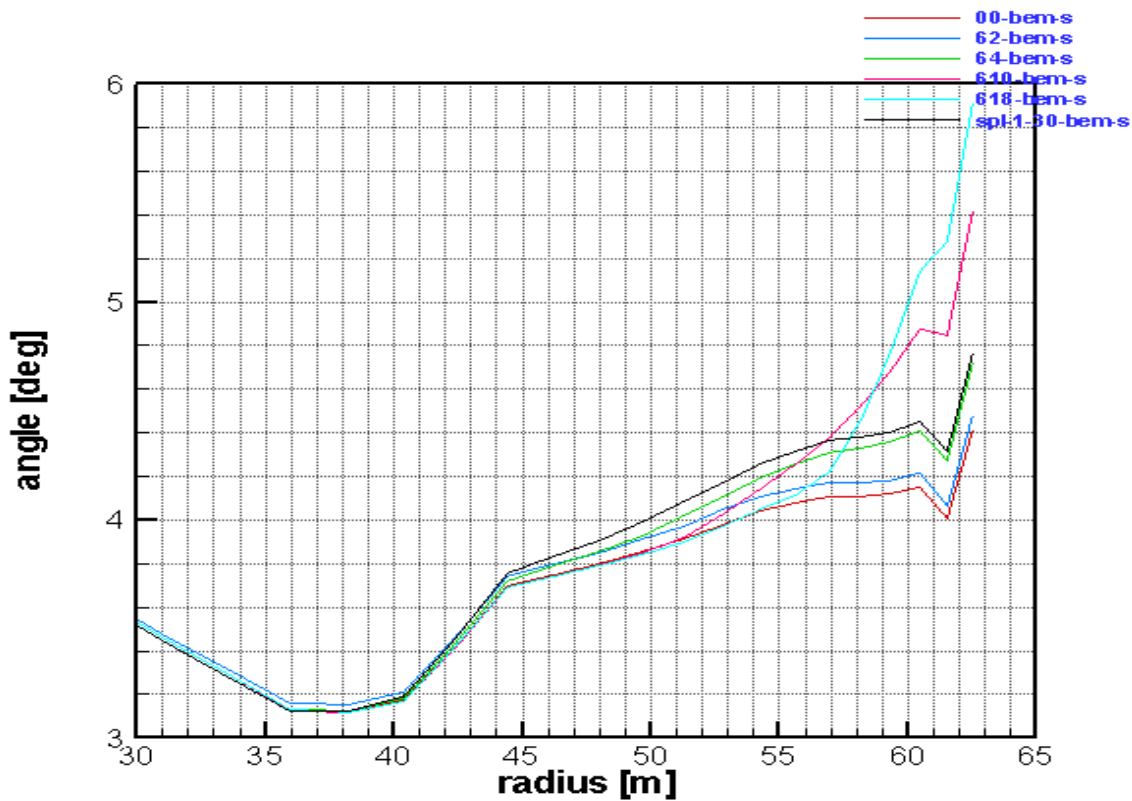


Σχήμα 3.12

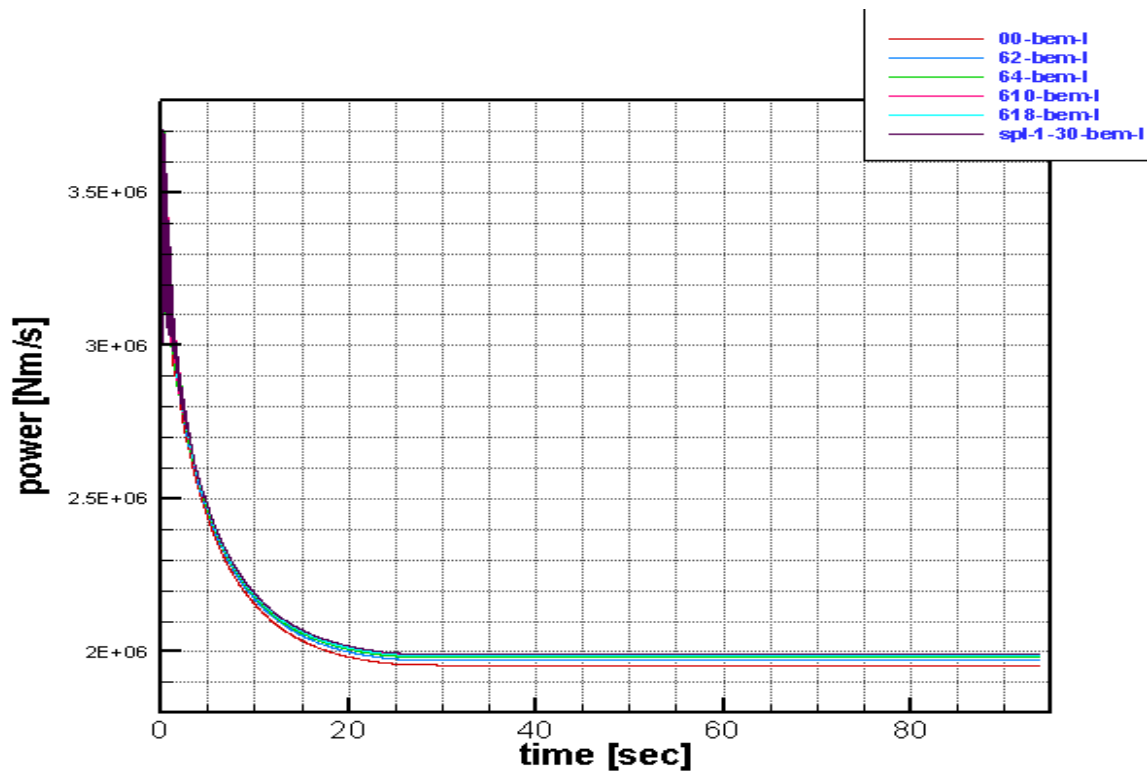
Αύξηση του δείκτη καμπυλότητας, μέχρι ενός σημείου, συνεπάγεται μείωση των περιφερειακών φορτίων.



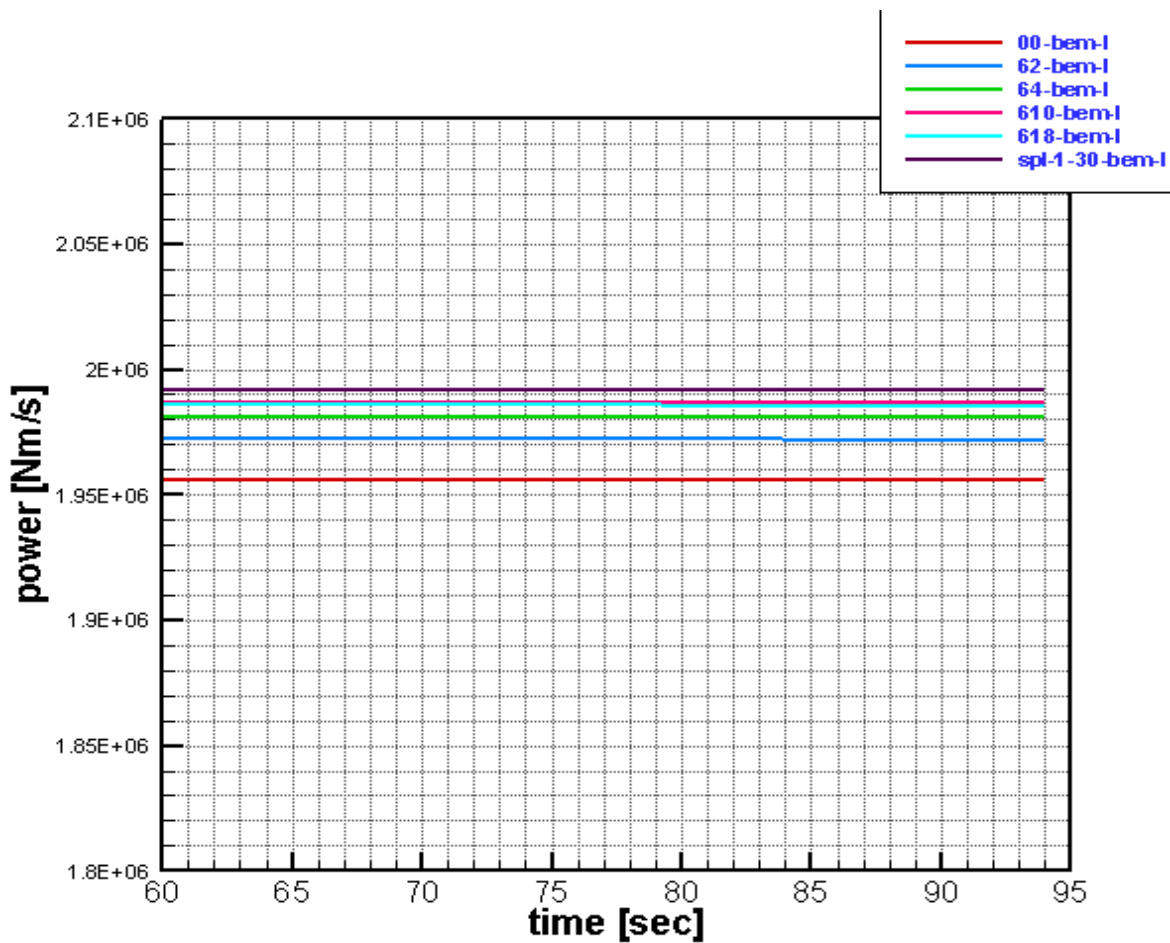
Σχήμα 3.13 Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



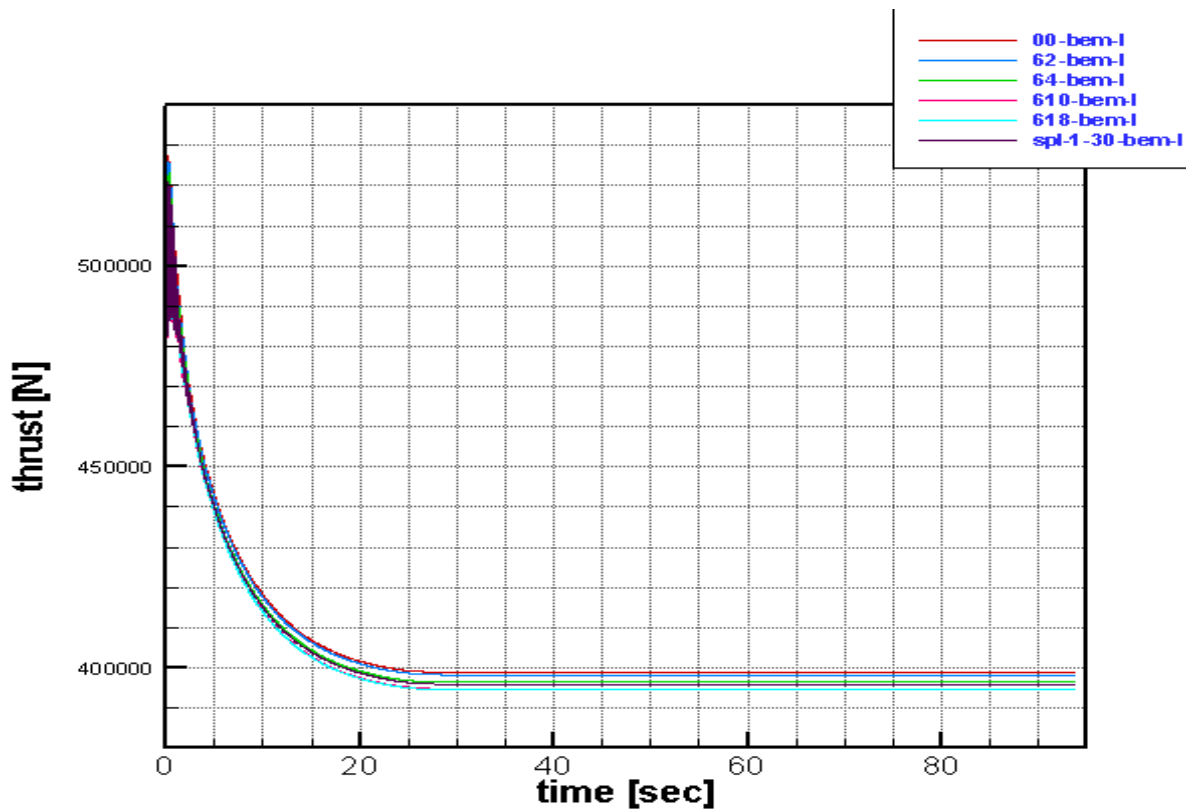
Σχήμα 3.14 Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



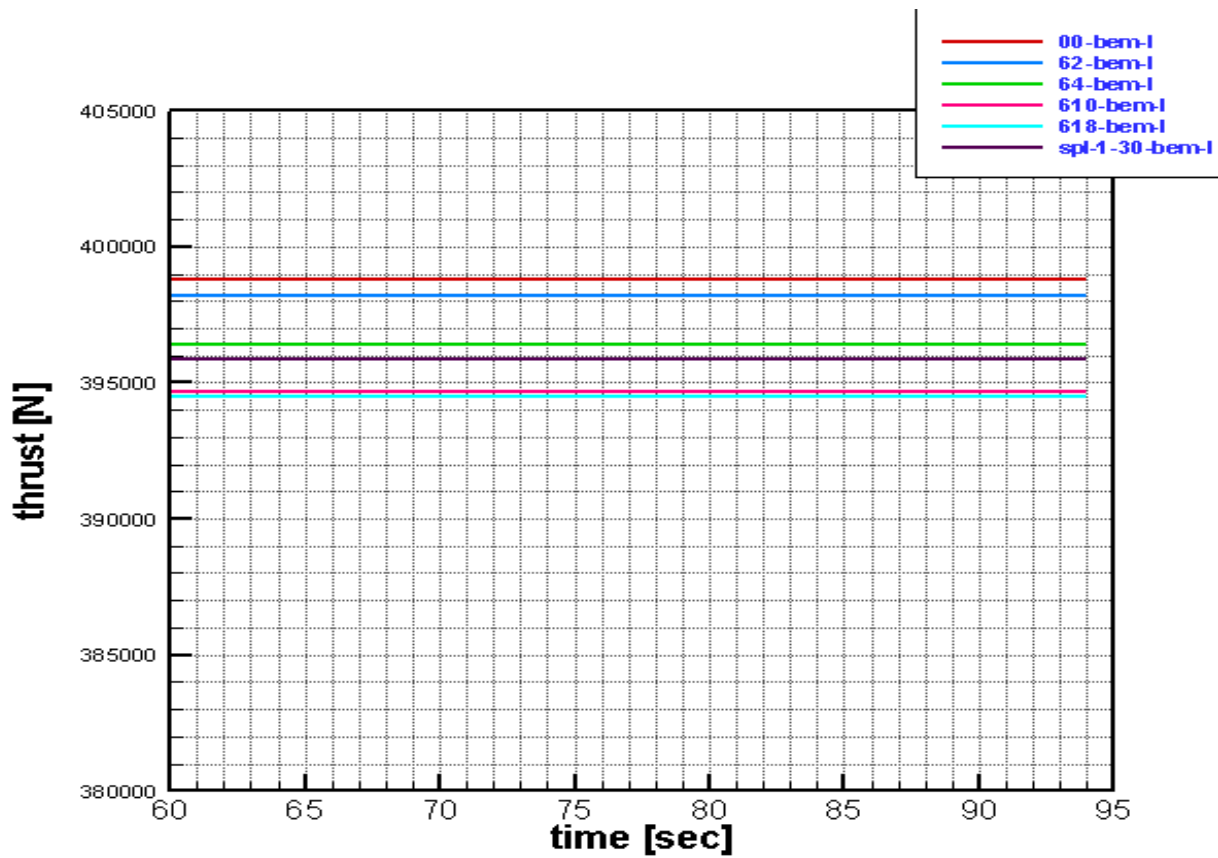
Σχήμα 3.15 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 3.16 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



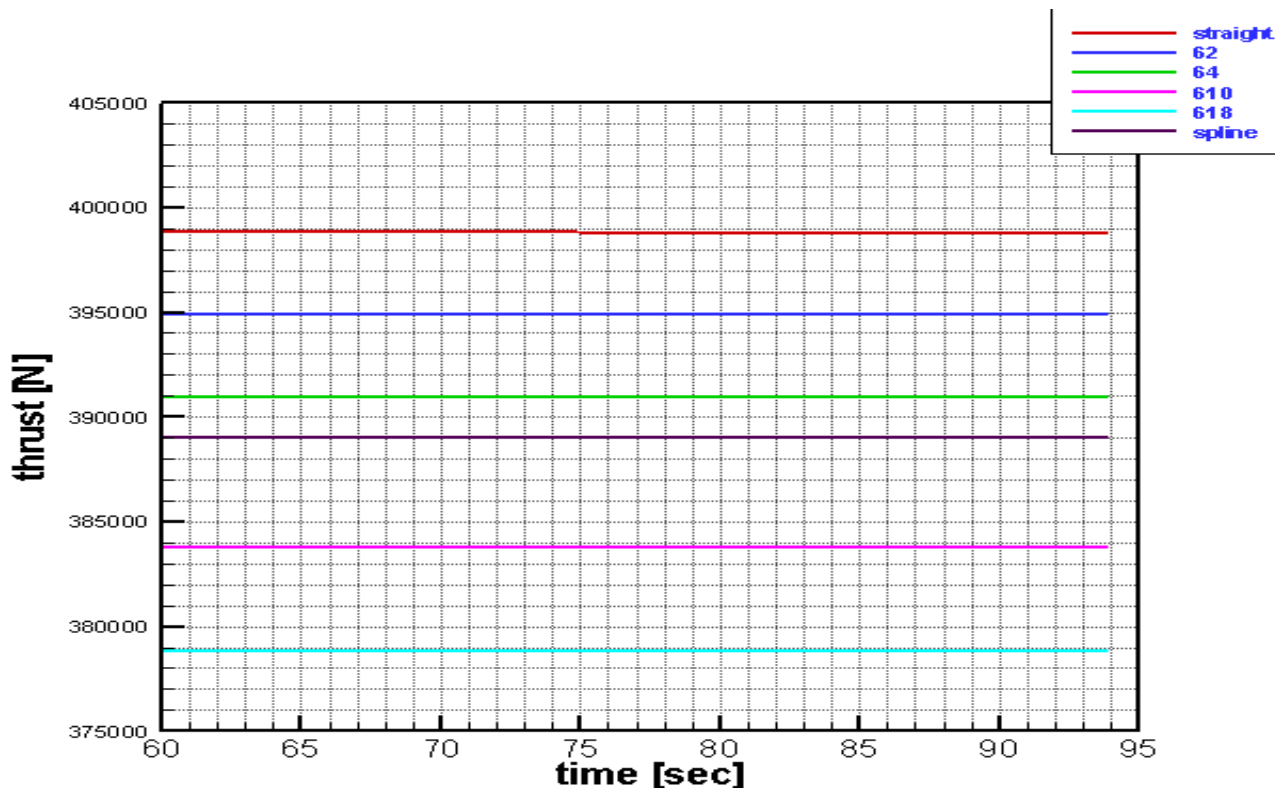
Σχήμα 3.17 Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 3.18 Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

\*\* Ωστόσο, εάν γίνει σύγκριση επί του ίδιου μήκους πτερυγίου η σύγκριση έχει ως εξής :





Σχήμα 3.19 Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

Συμπεράσματα :

Τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις του GAST είναι τα ίδια που βγαίνουν για εκείνες του GENUVP, με τις εξής διαφορές :

- Η δύναμη thrust εμφανίζεται μικρότερη όσο μεγαλώνει η καμπυλότητα ή ο δεύτερος δείκτης όσον αφορά τα spline.
- Η ισχύς ακολουθεί αντίστροφη πορεία.

### 3.5 Σύγκριση GENUVP – GAST

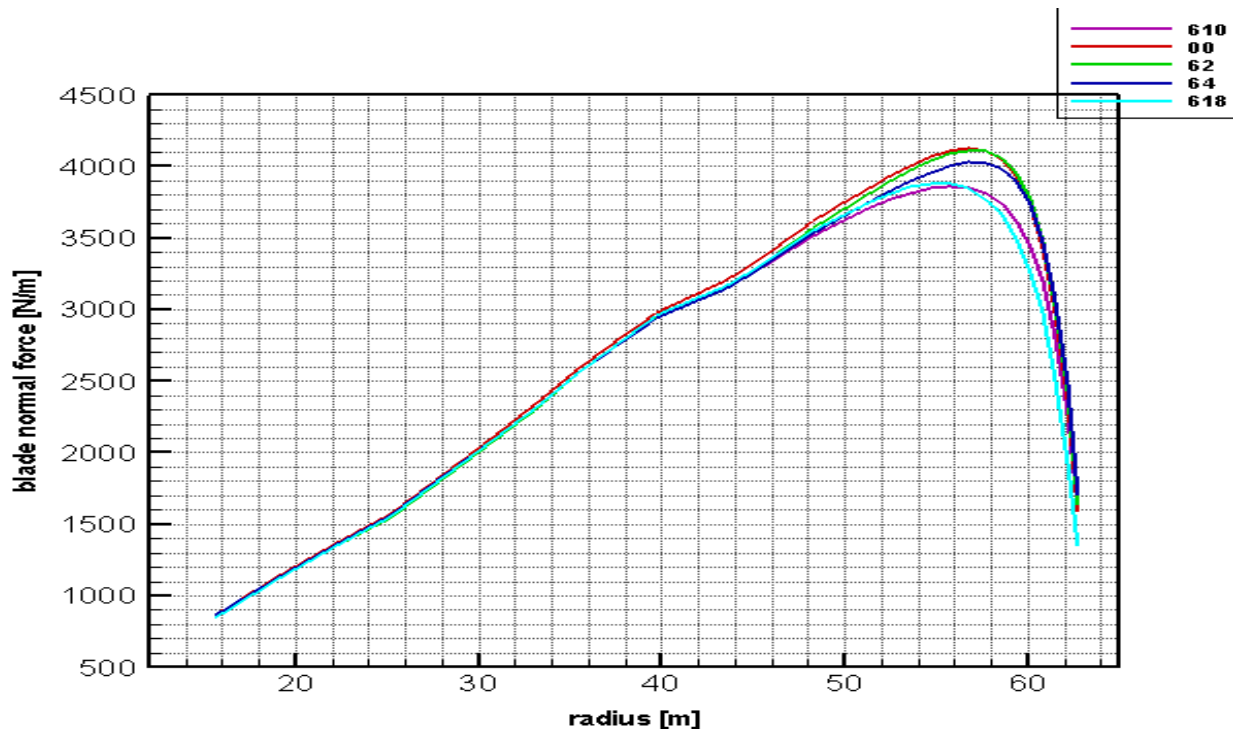
Τα παραπάνω συμπεράσματα για τους δύο κώδικες φαίνονται πιο καθαρά στα παρακάτω διαγράμματα.

Συνοψίζοντας, το GAST προβλέπει μικρότερες διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα αξονικά και περιφεριακά φορτία των διαφόρων περιπτώσεων, όπως επίσης και διαφορετικές τοπικές γωνίες πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου. Ακόμη, η ισχύς κυμαίνεται στις ίδιες τιμές για τους δύο κώδικες, με τη διαφορά ότι, για το GAST, όσο μεγαλώνει η καμπυλότητα ή οι δείκτες των spline, τόσο μεγαλώνει η αποδιδόμενη ισχύς, ενώ για το GENUVP ισχύει το αντίστροφο. Τέλος, η δύναμη ώσης, για το GAST, μικραίνει όσο μεγαλώνει η καμπυλότητα και οι δείκτες των spline. Γενικά, ένα pre-swept πτερύγιο ίδιας ακτίνας με ένα ευθύ, είναι μεγαλύτερο σε συνολικό μήκος. Επομένως,

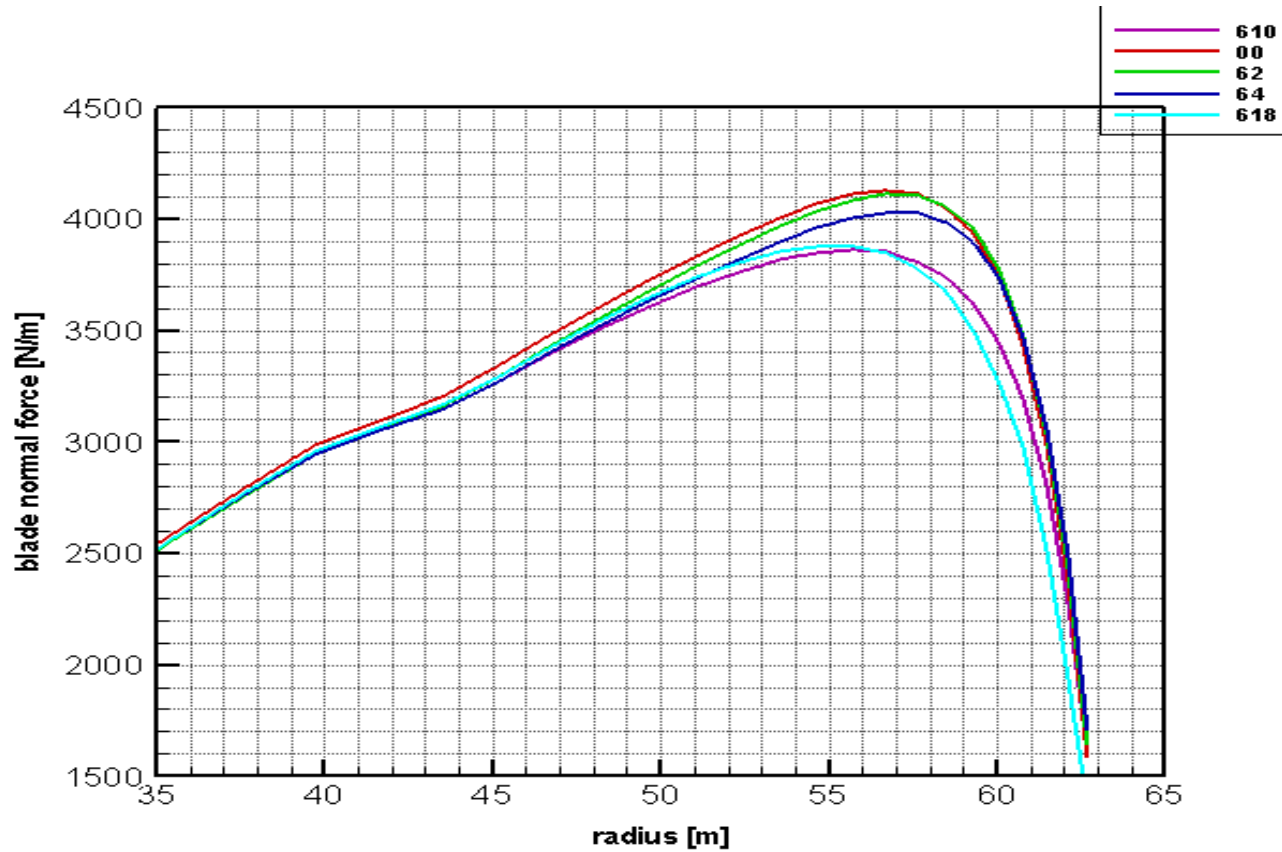
περιμένουμε από το pre-swept να μας δώσει μεγαλύτερη δύναμη thrust. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν αποδίδεται από τον κώδικα GAST.

Αναλυτική σύγκριση ανάμεσα στους δύο κώδικες στη βάση ίδιων πετρυγίων απεικονίζεται στα διαγράμματα του παραρτήματος 3.

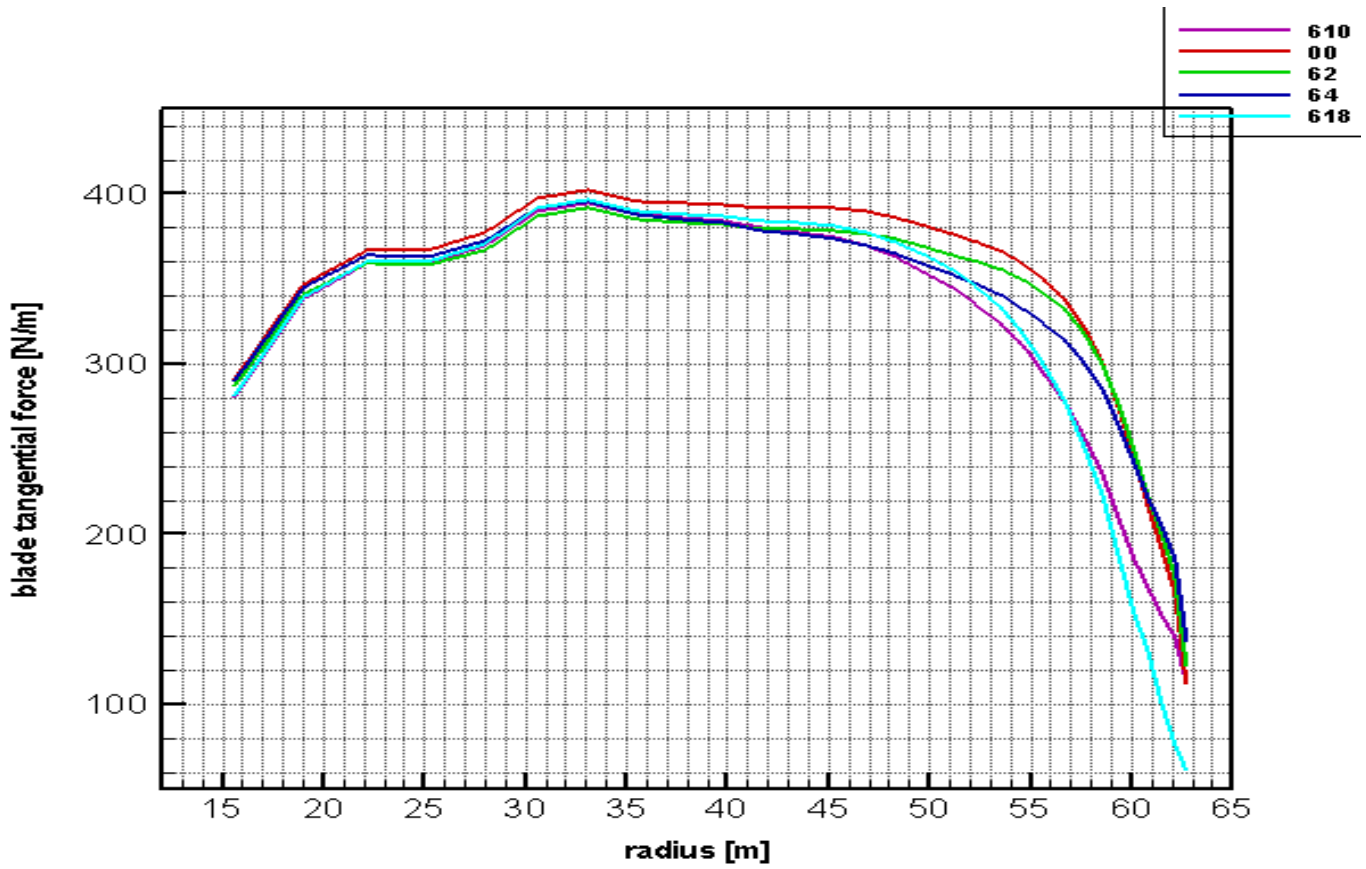
### 3.6 Παράρτημα 1 (συγκρίσεις GENUVP)



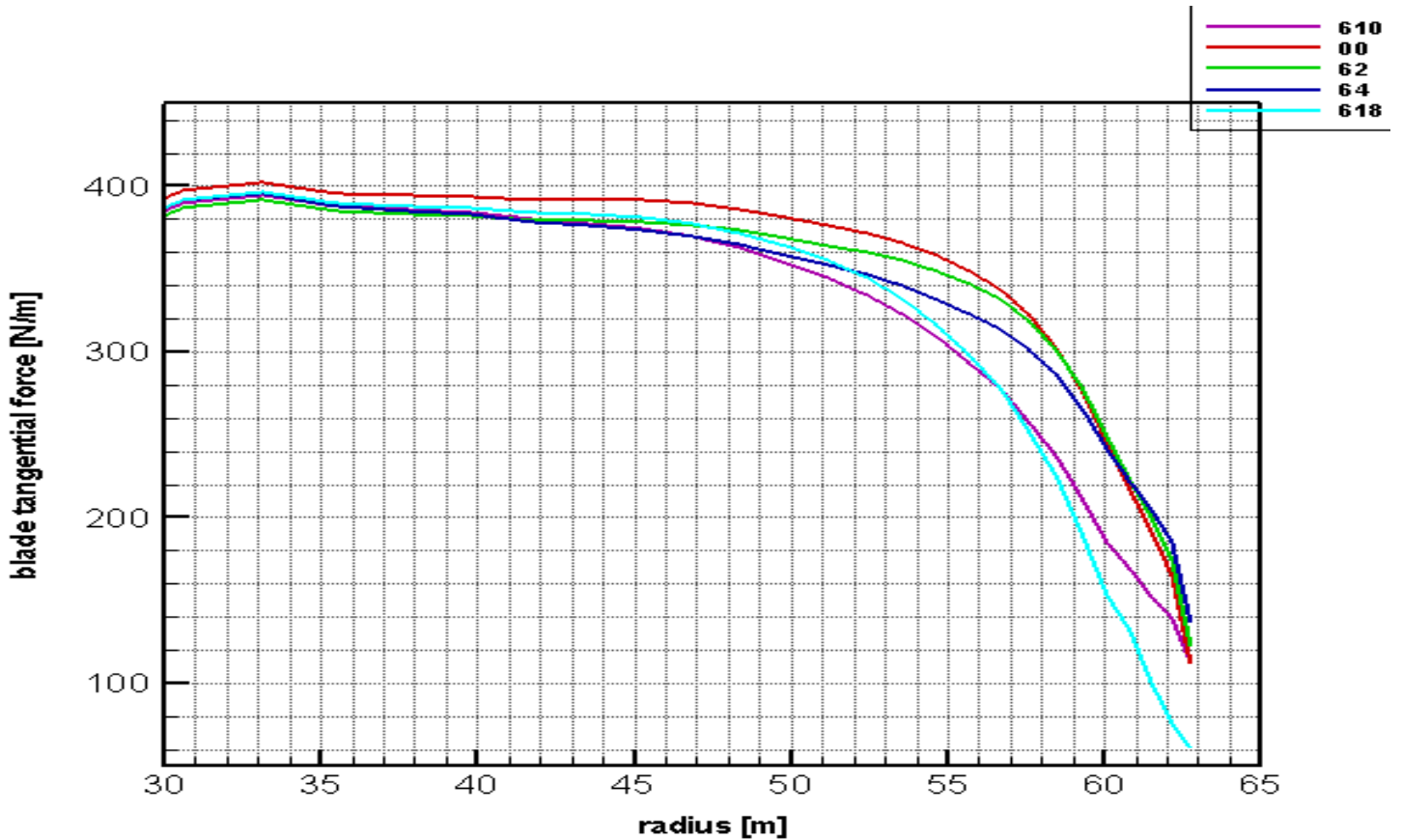
Τα αξονικά φορτία μειώνονται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας



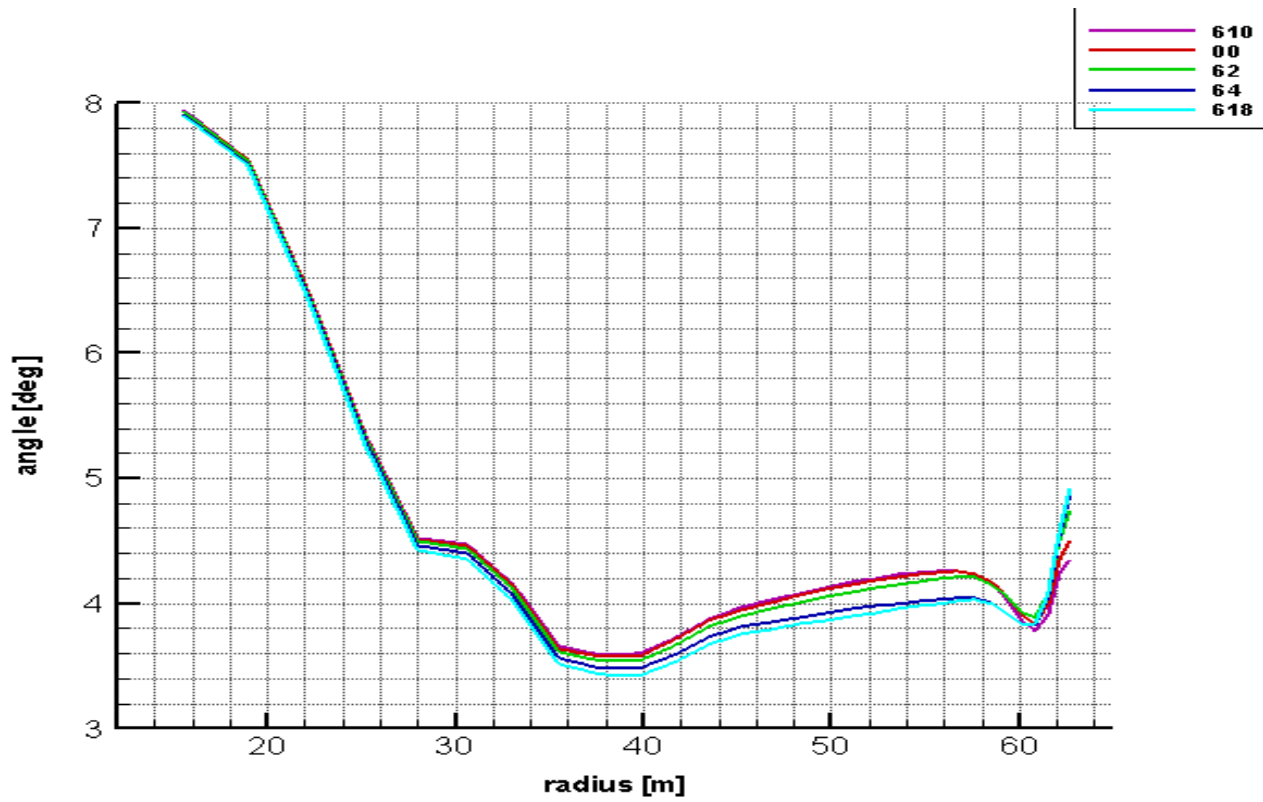
Τα αξονικά φορτία μειώνονται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας



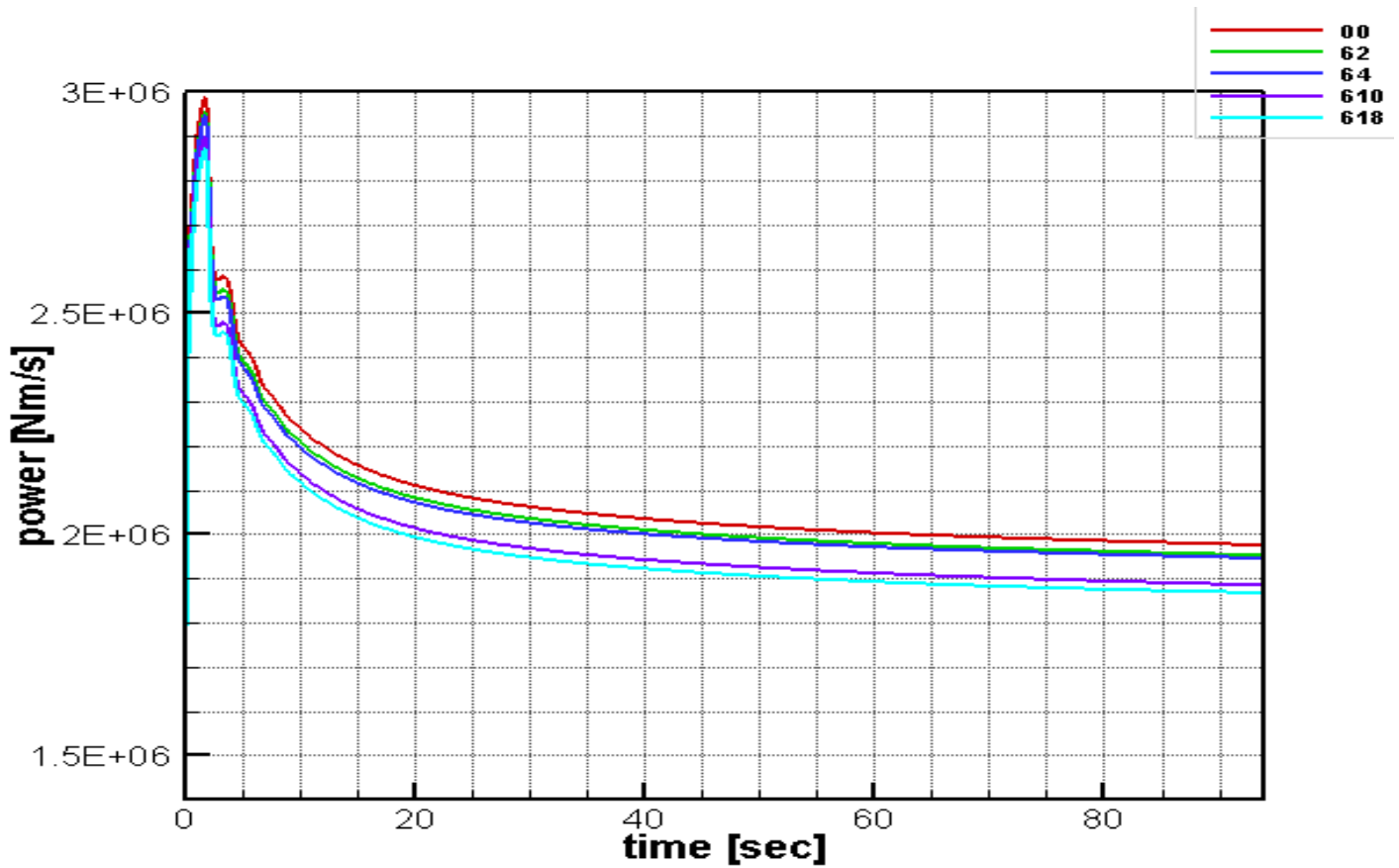
Τα περιφερειακά φορτία μειώνονται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας, μέχρι ενός σημείου.



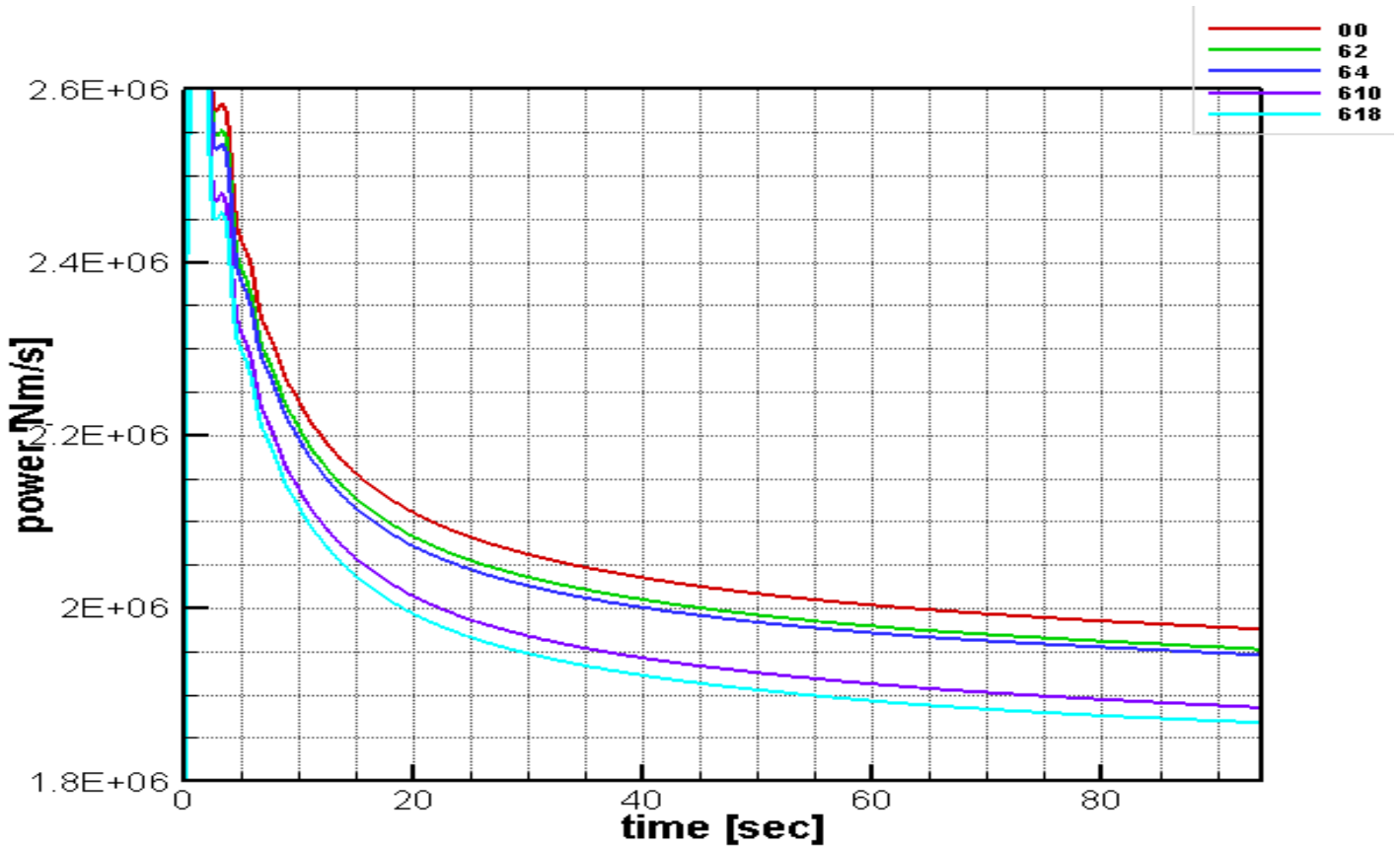
Τα περιφερειακά φορτία μειώνονται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας, μέχρι ενός σημείου.



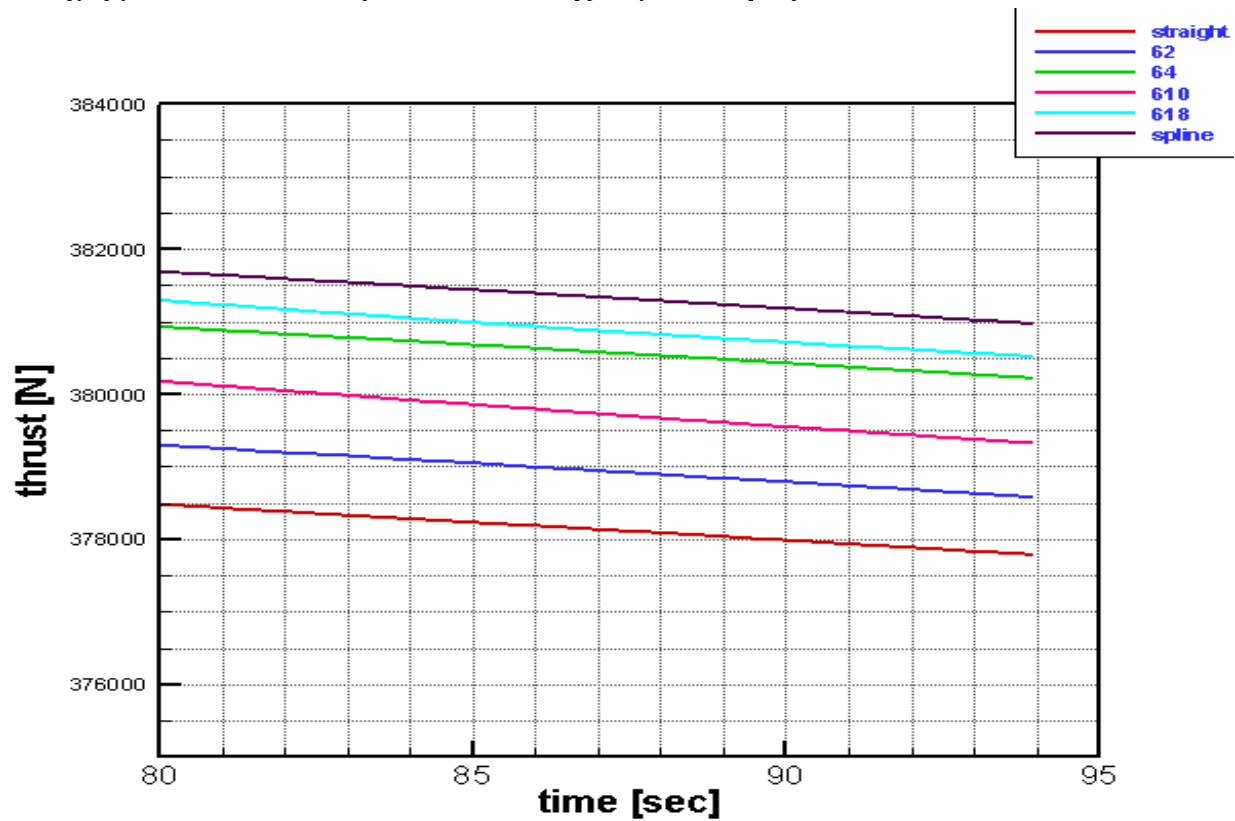
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

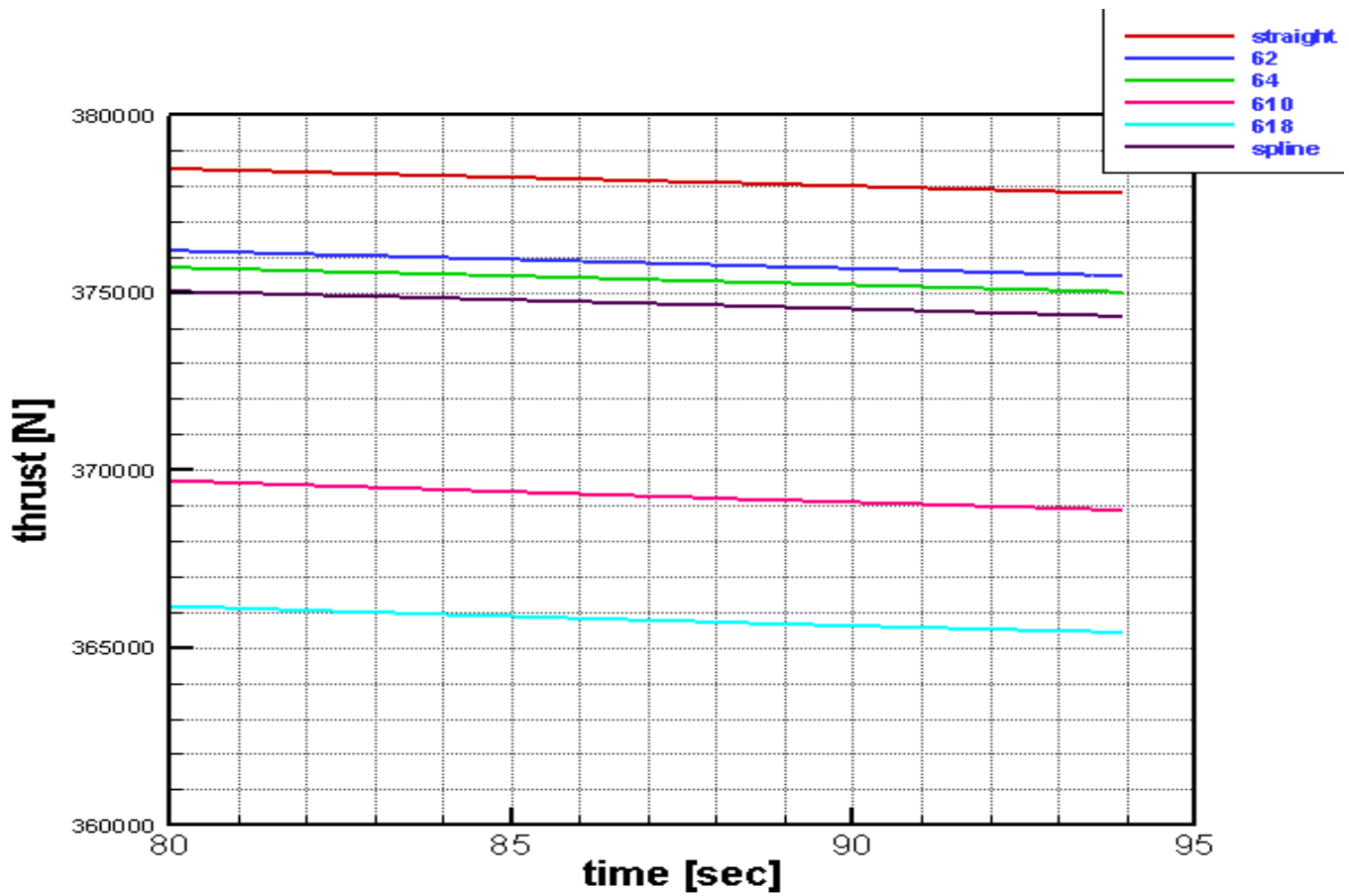


Η ισχύς μειώνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας.

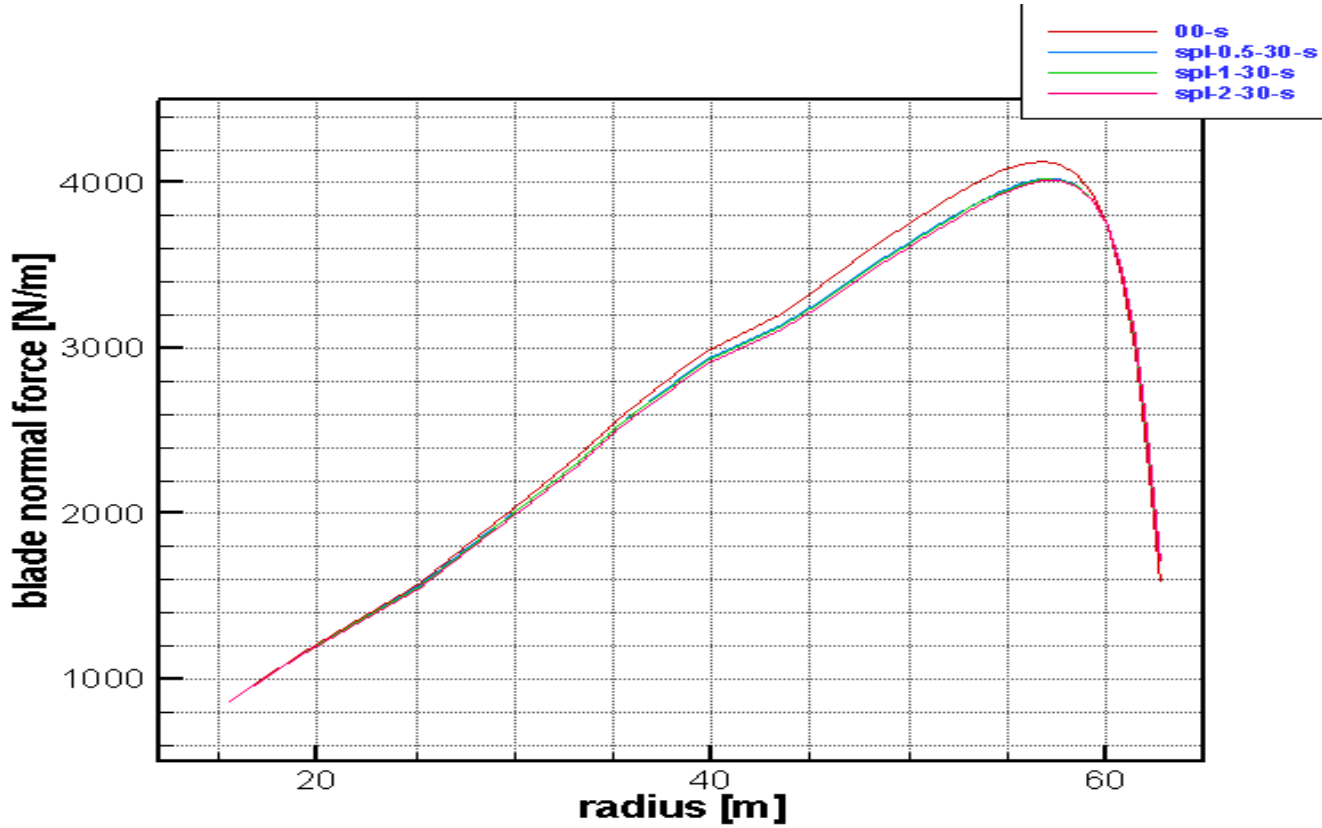


Η δύναμη ώσης αυξάνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης καμπυλότητας.

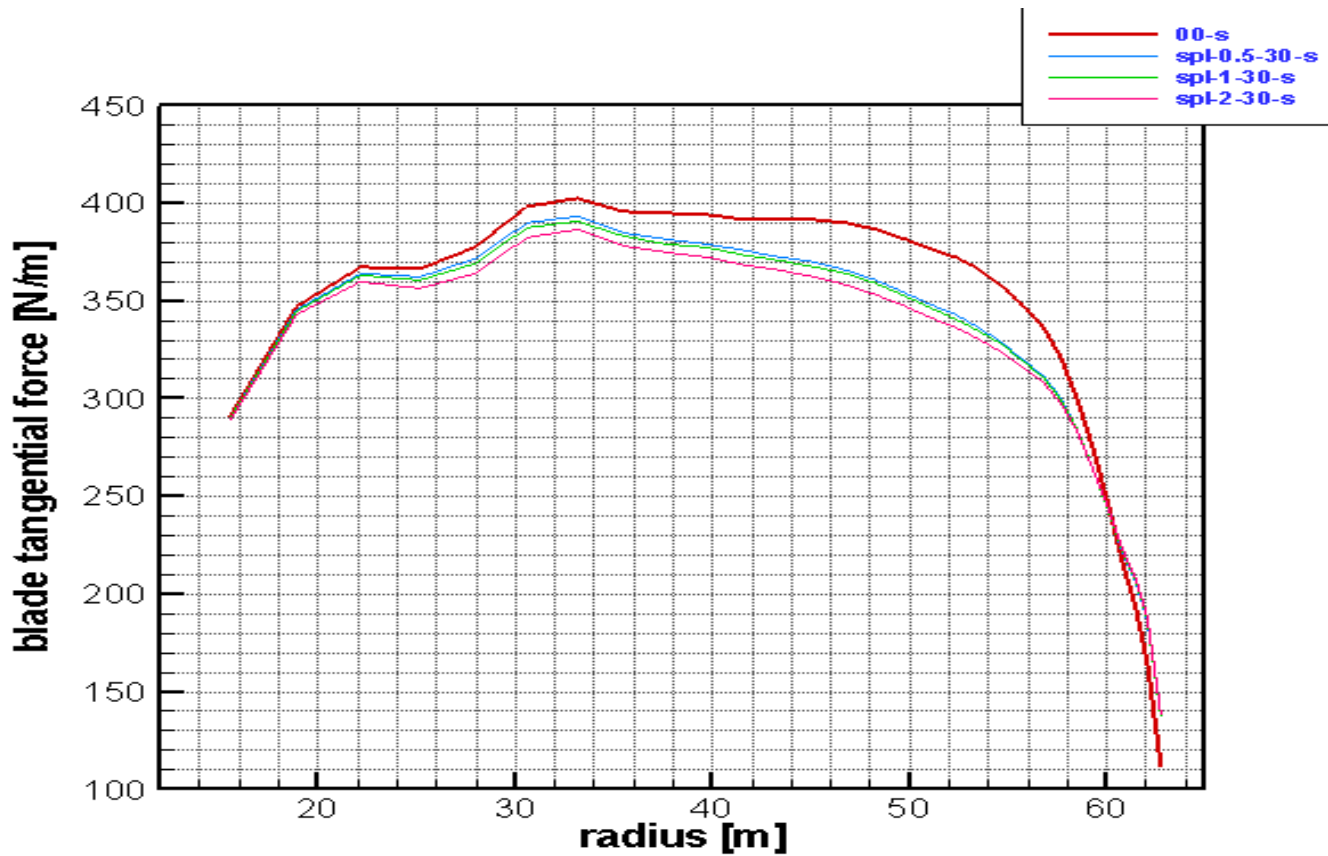
\*\* Ωστόσο, εάν γίνει σύγκριση επί του ίδιου μήκους πτερυγίου η σύγκριση έχει ως εξής :



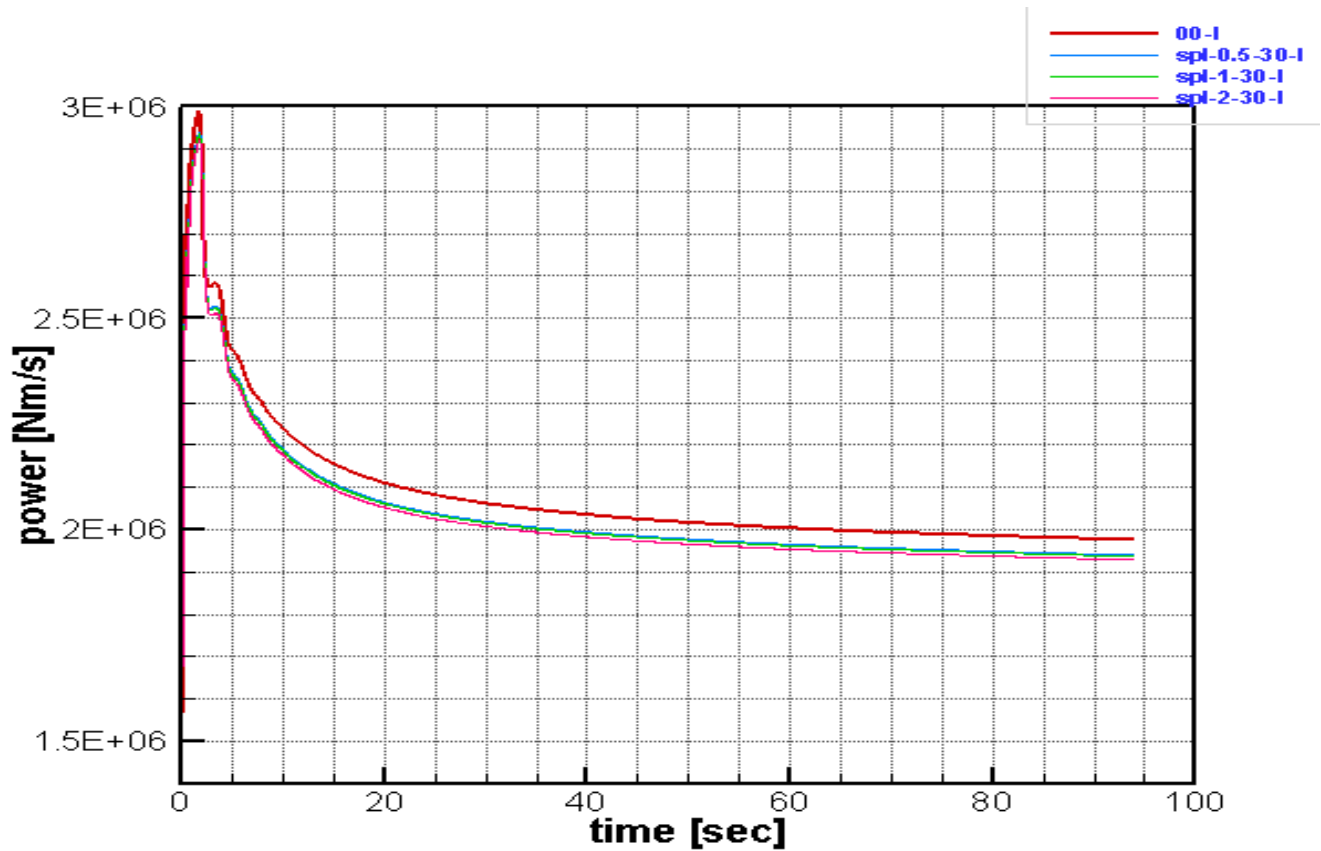
Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.

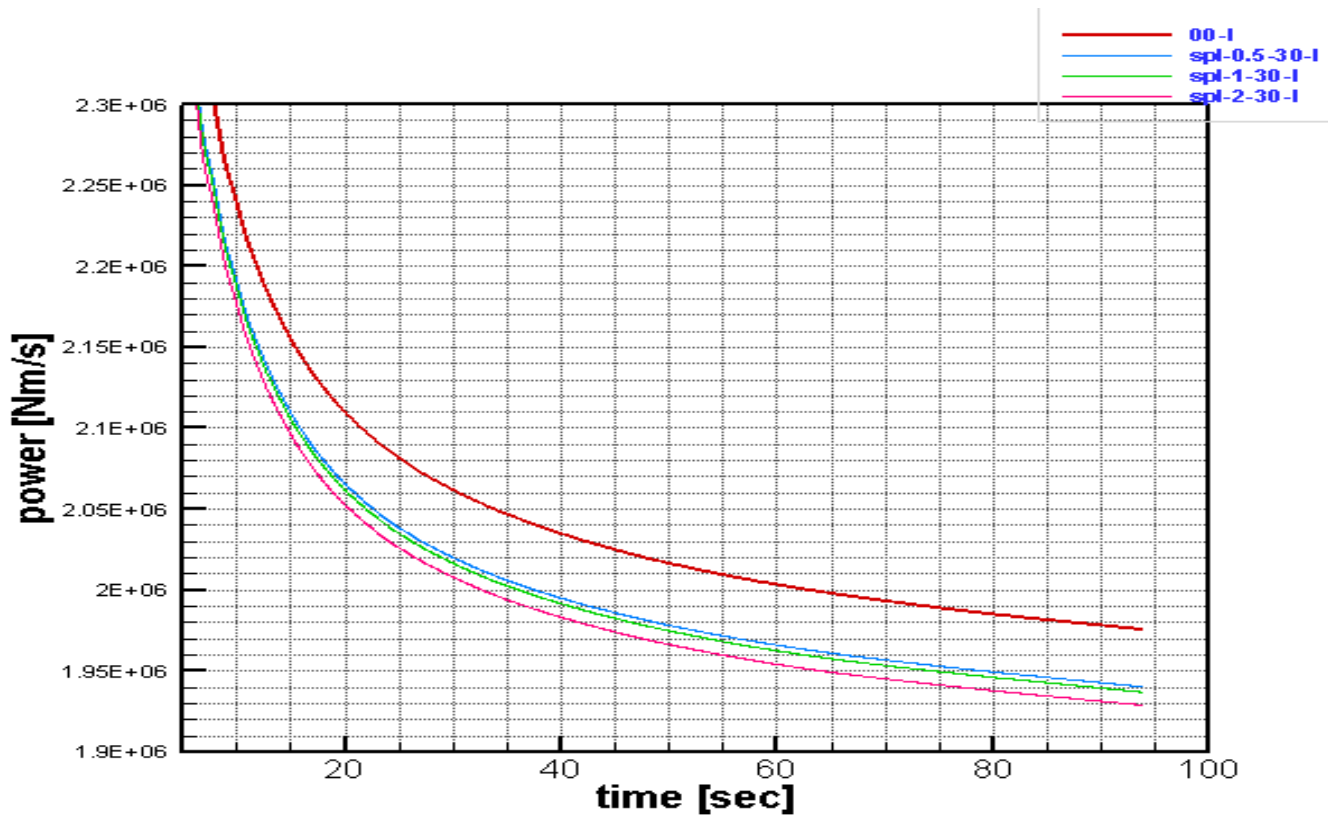


Αξονικά φορτία κατά μήκους του πτερυγίου.

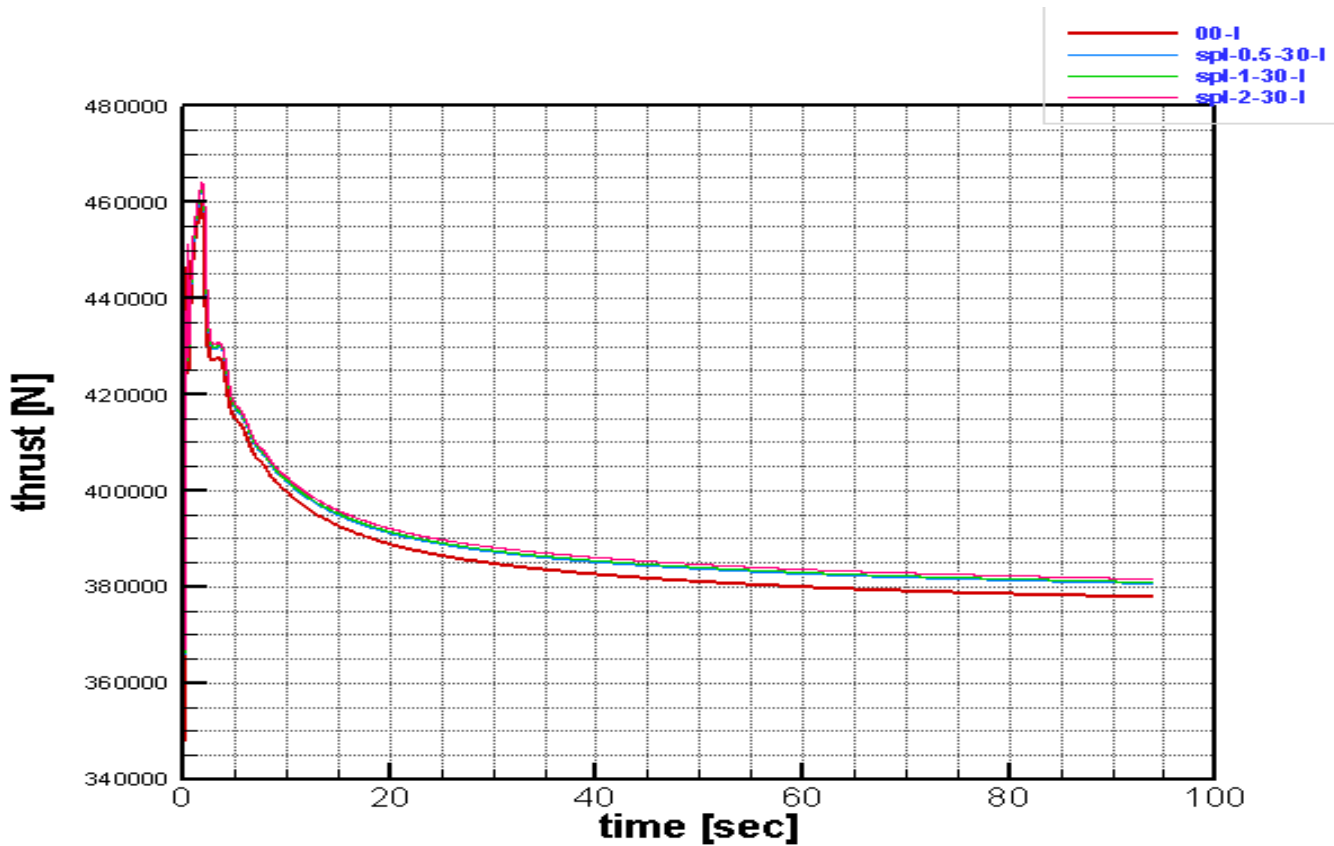


Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

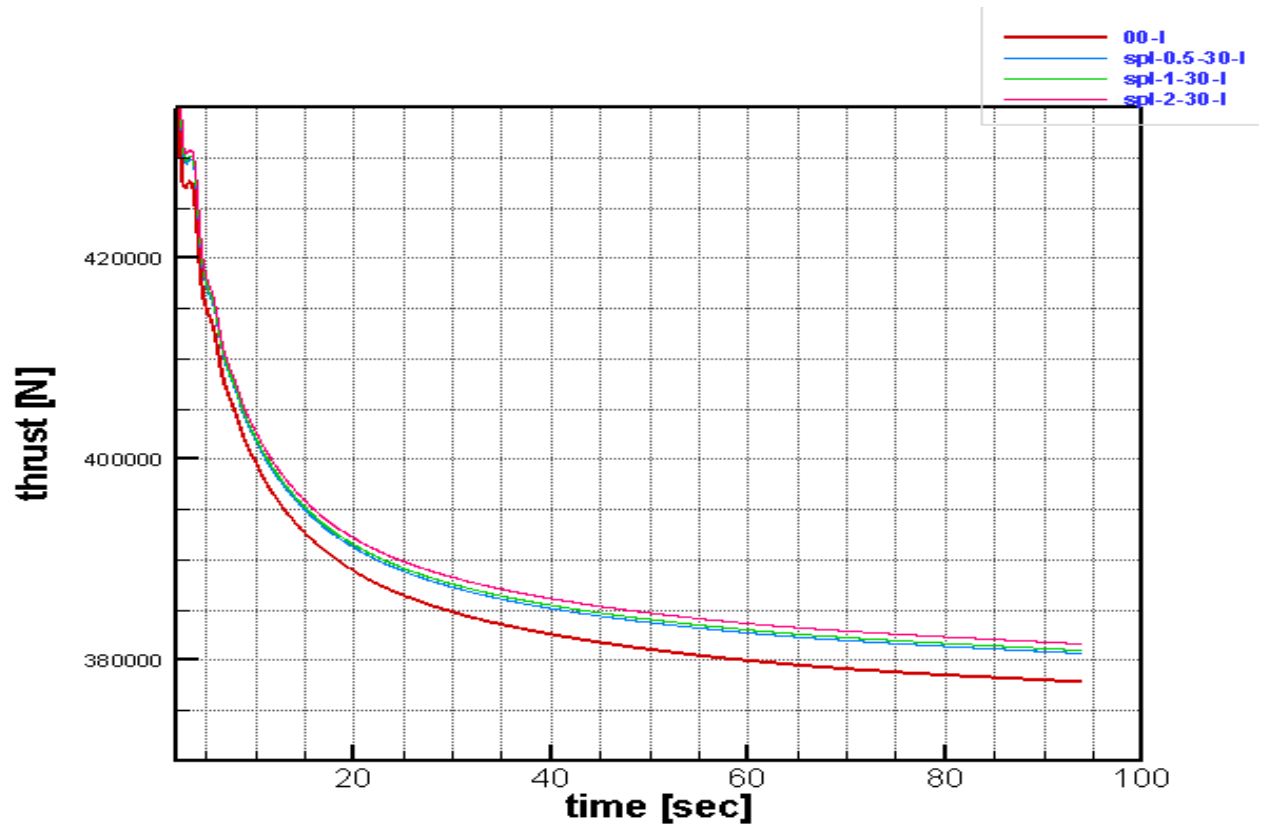




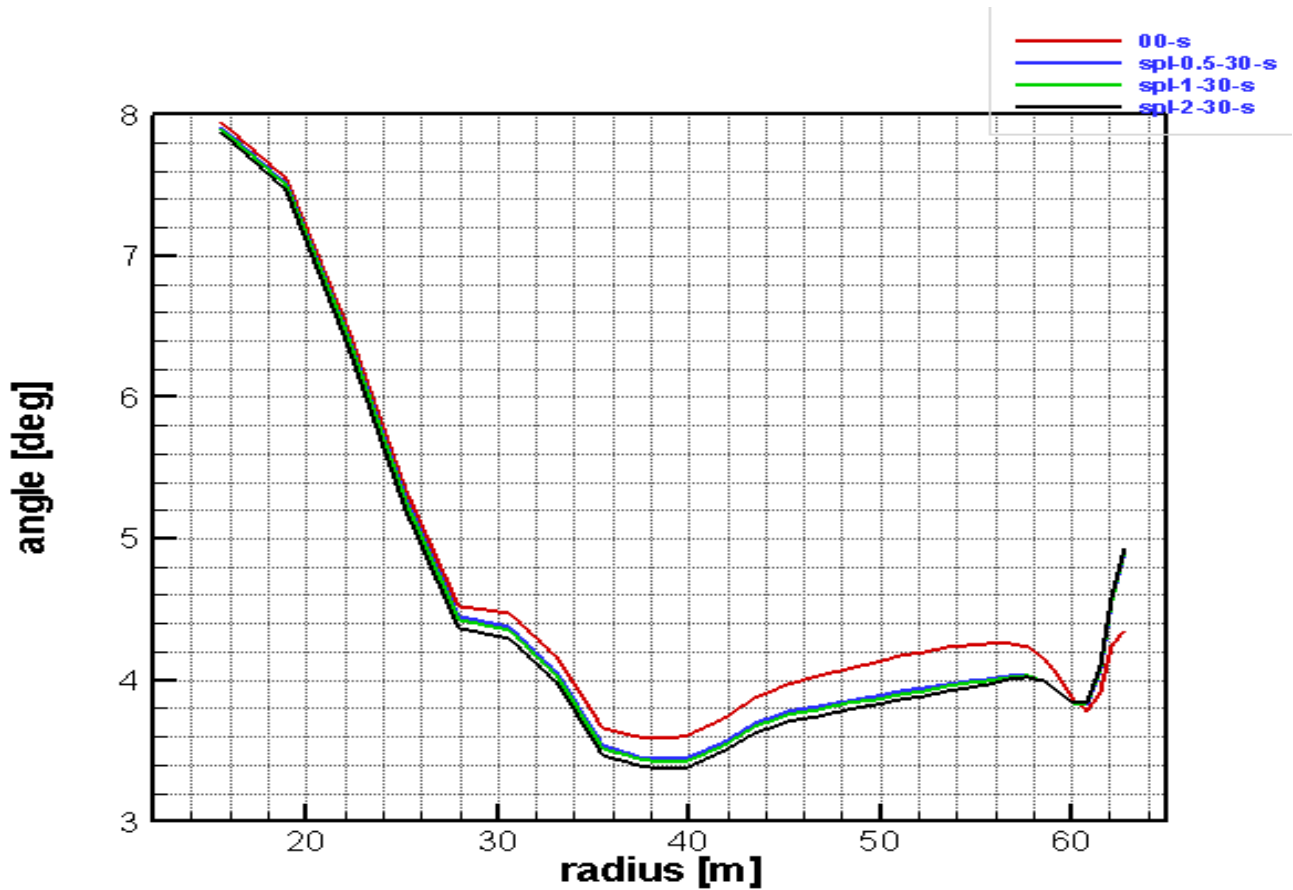
Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



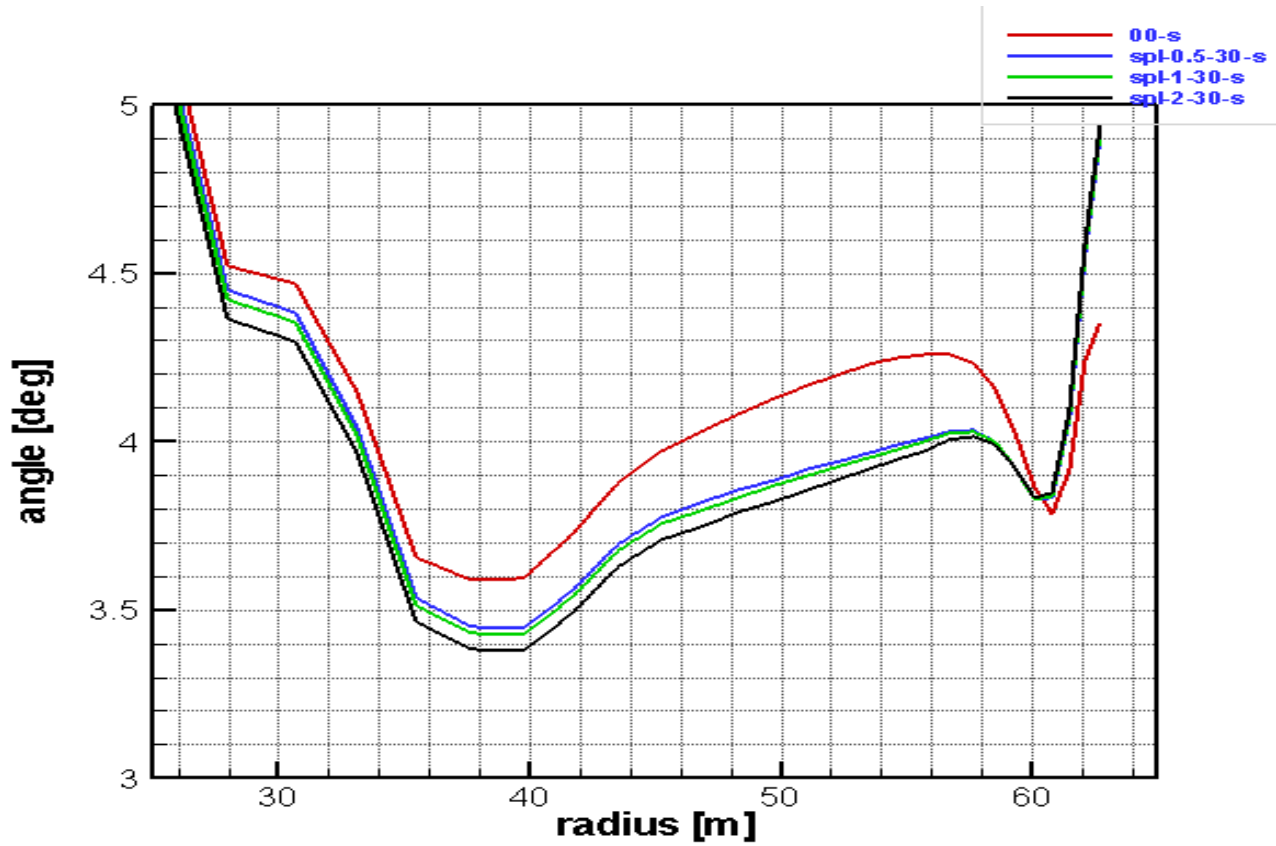
Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



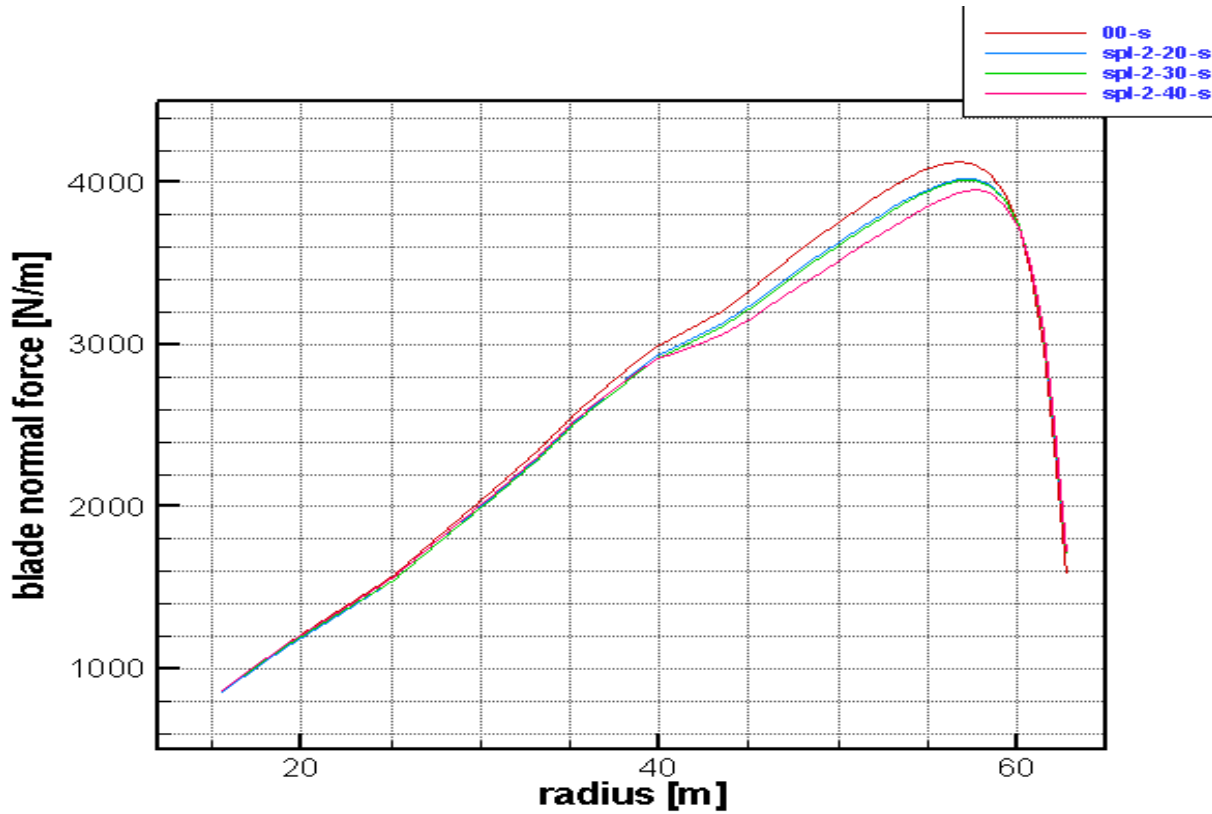
Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



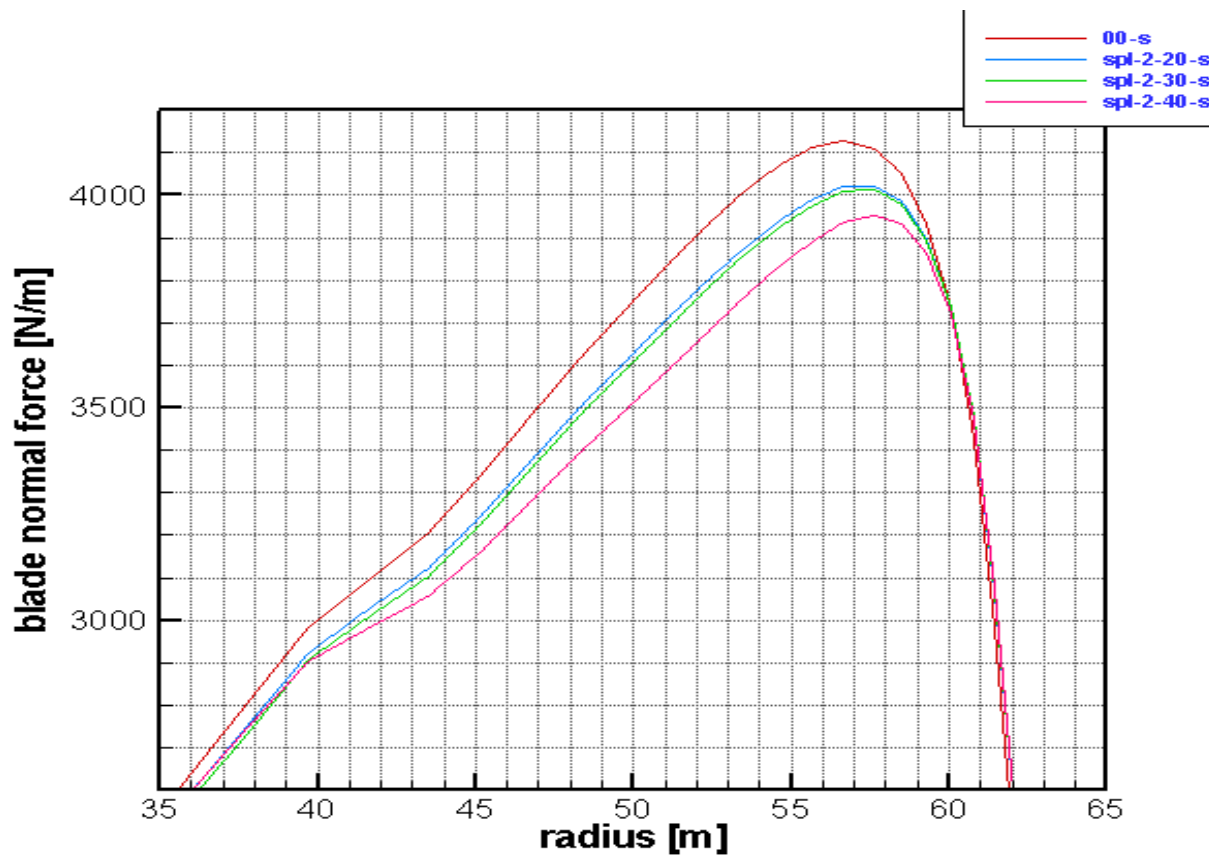
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



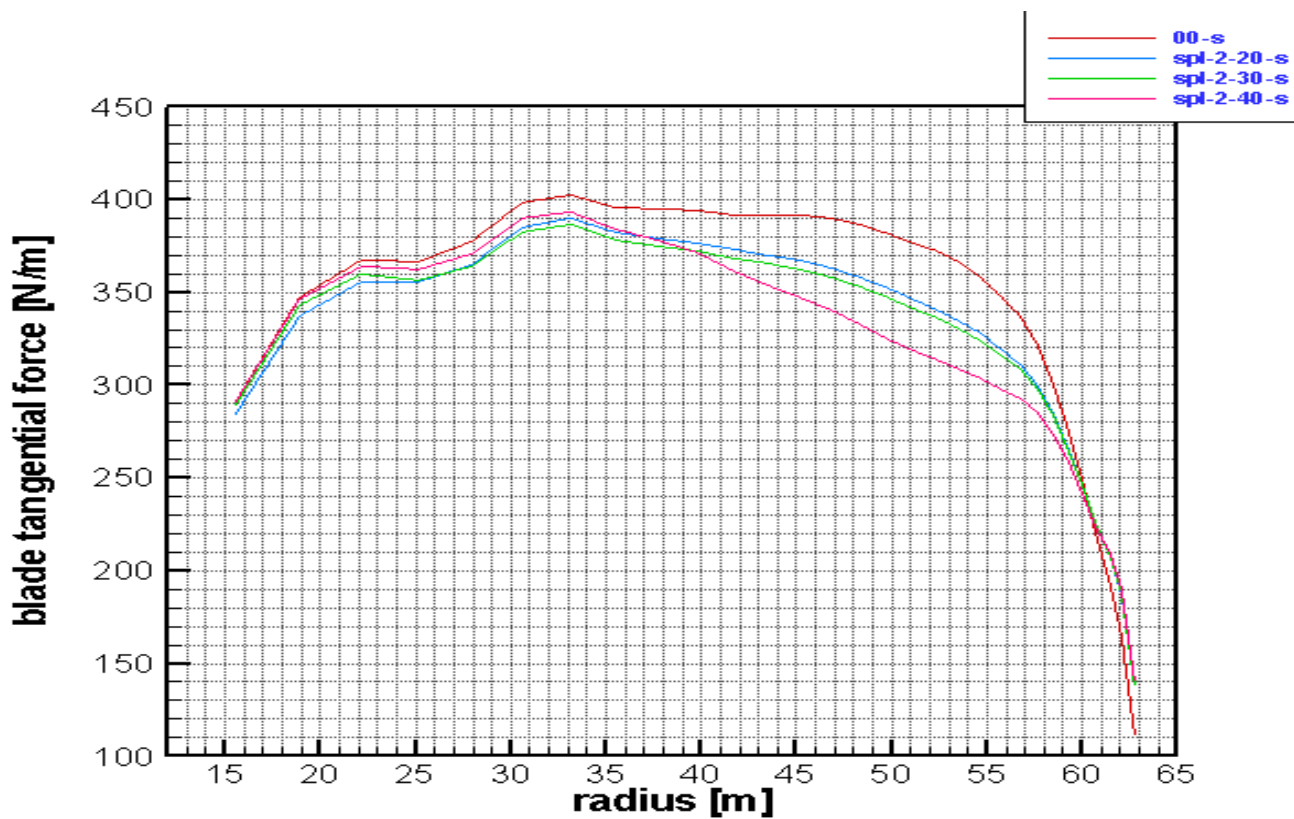
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



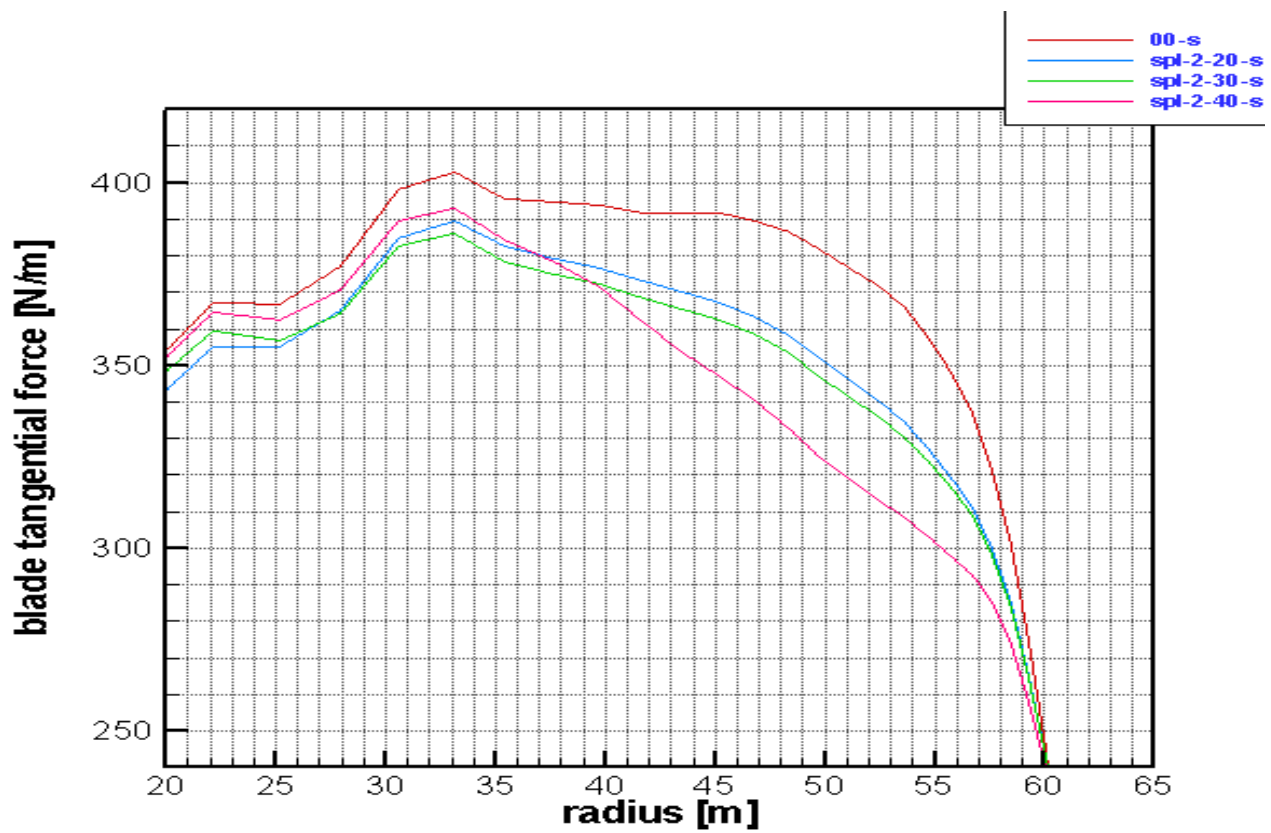
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



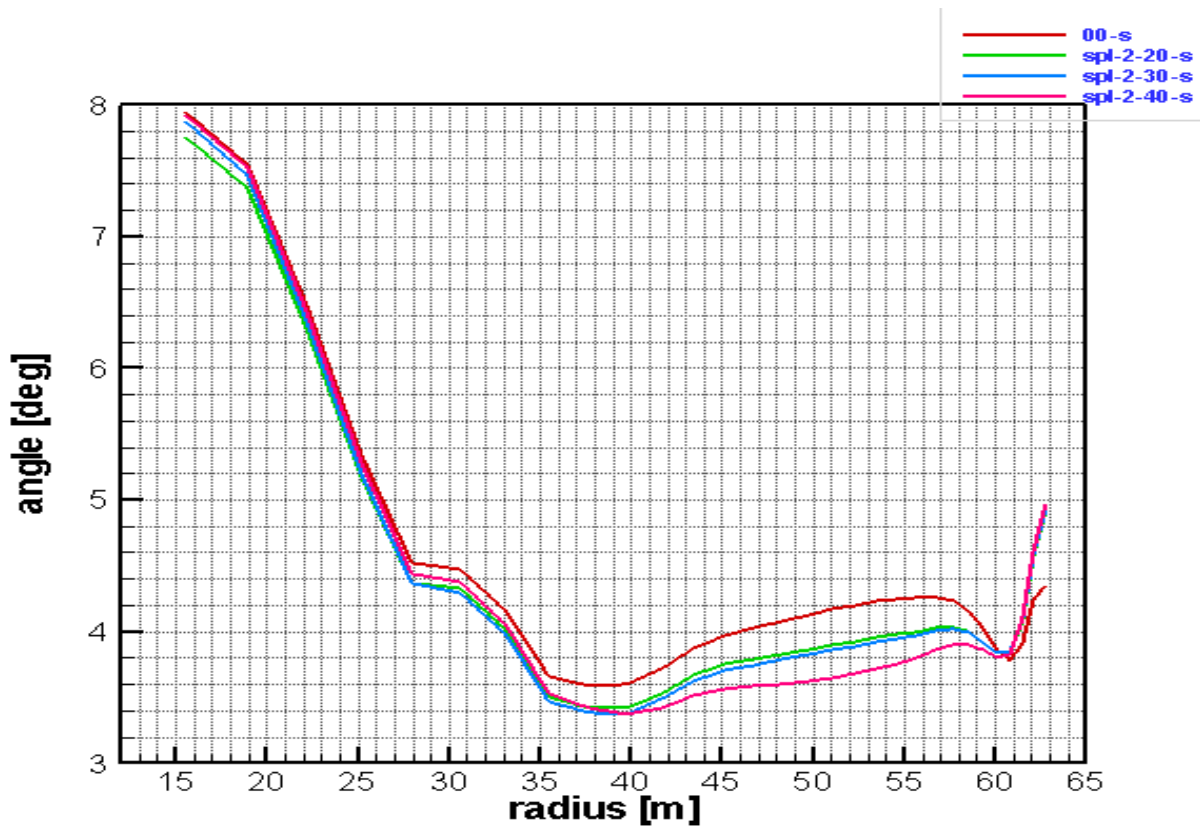
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



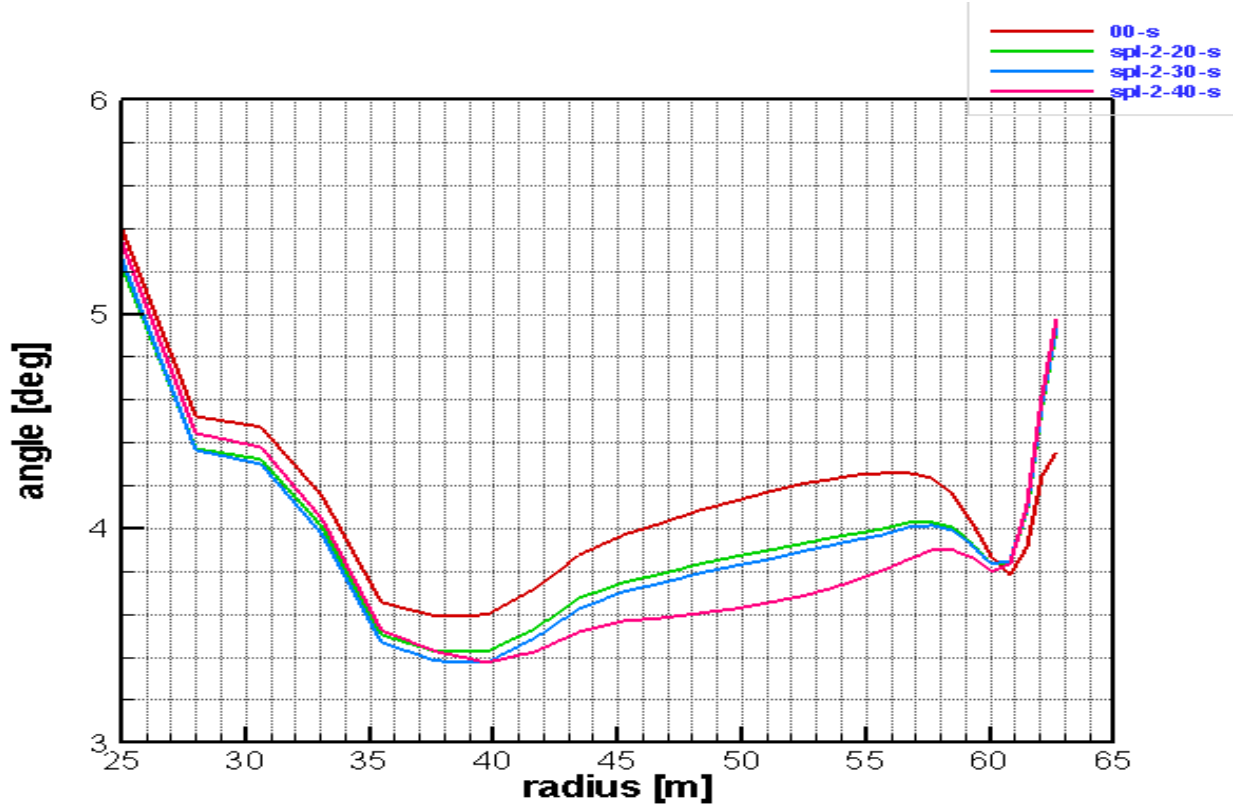
Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



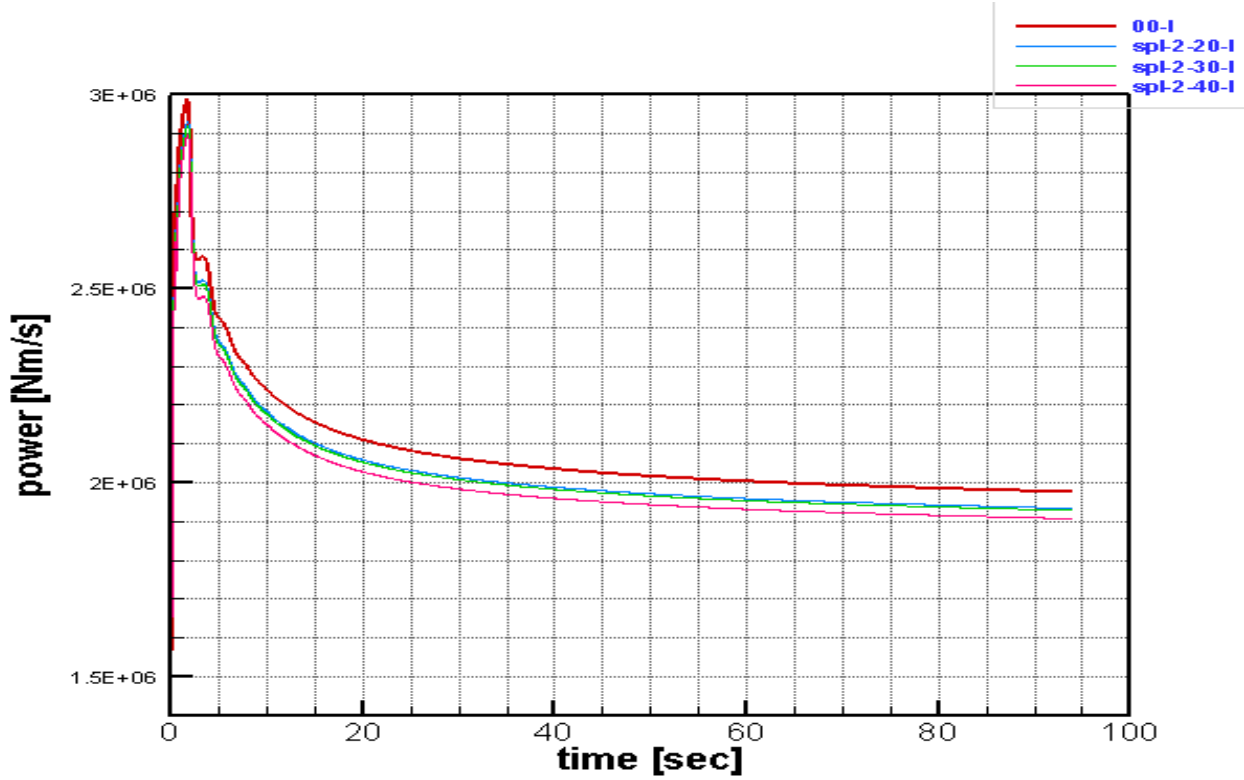
Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



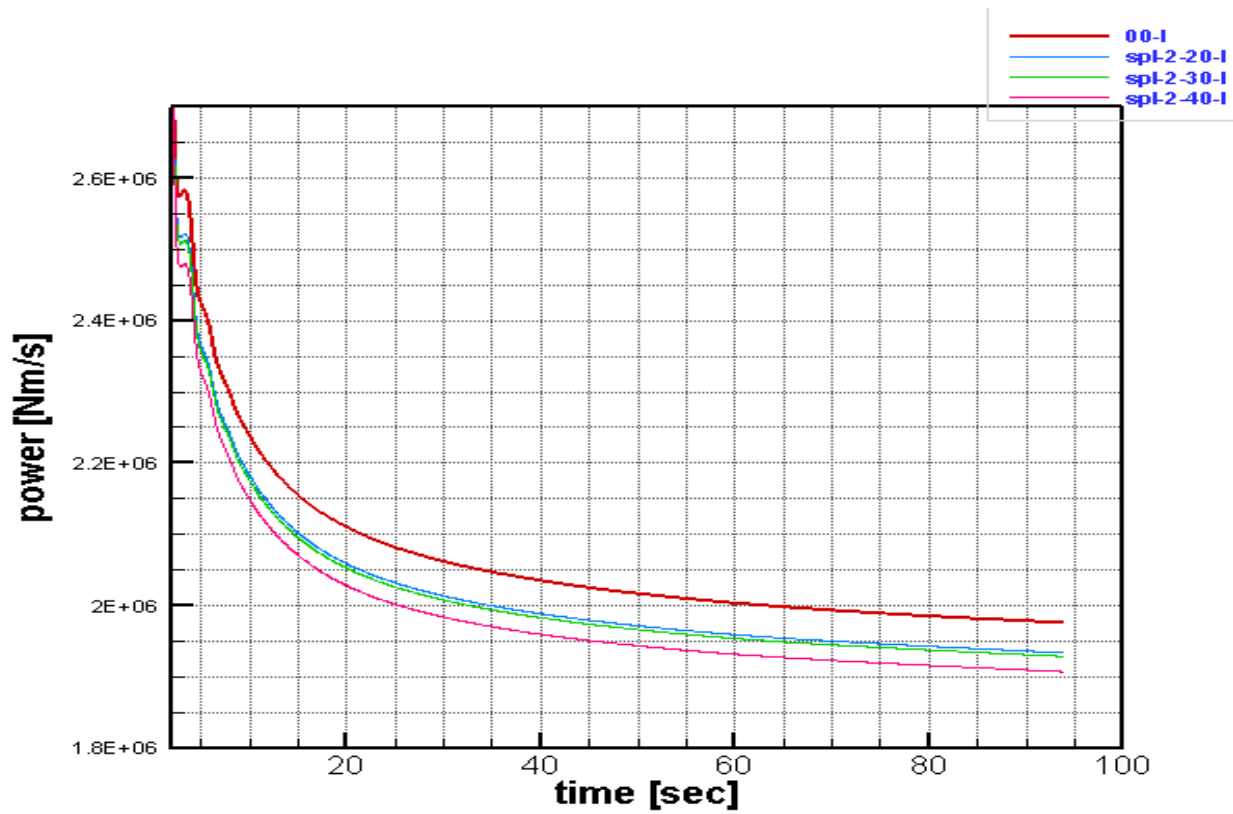
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



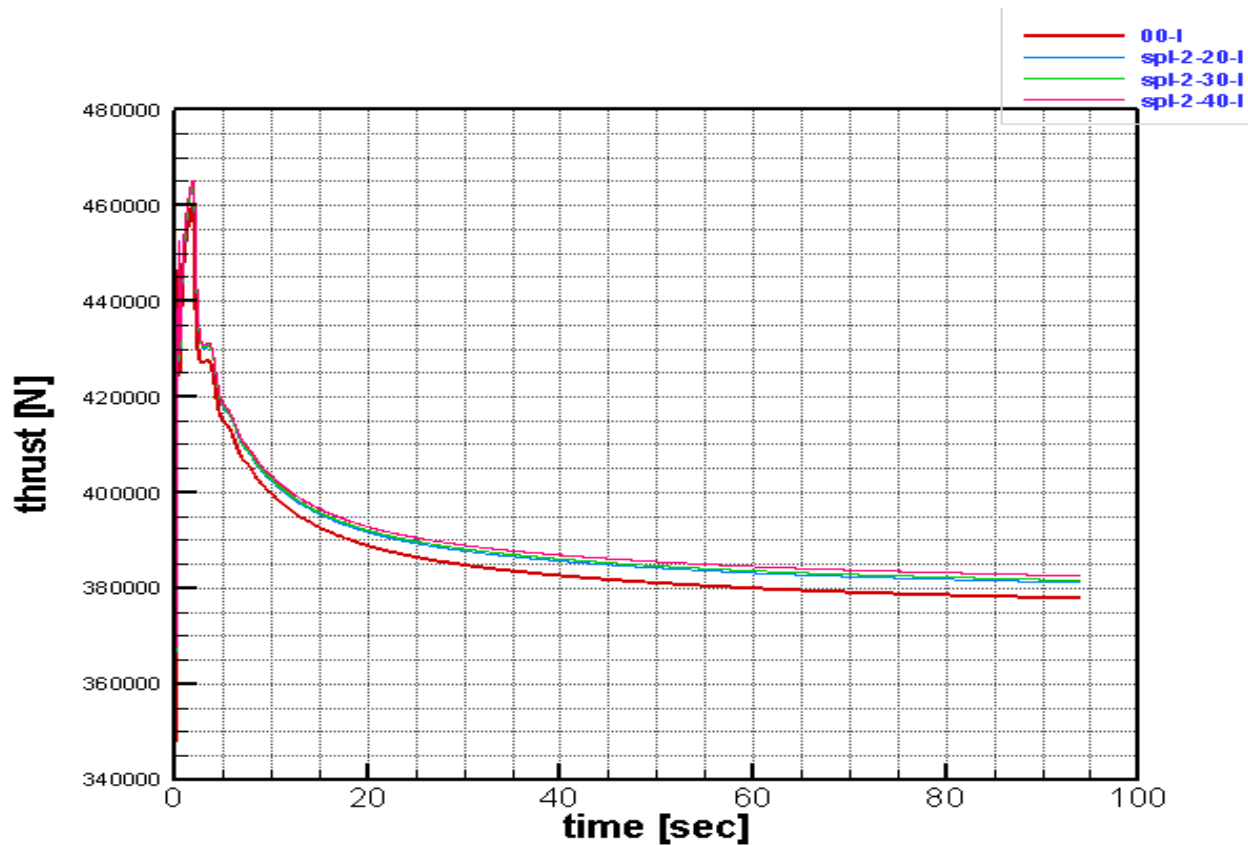
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



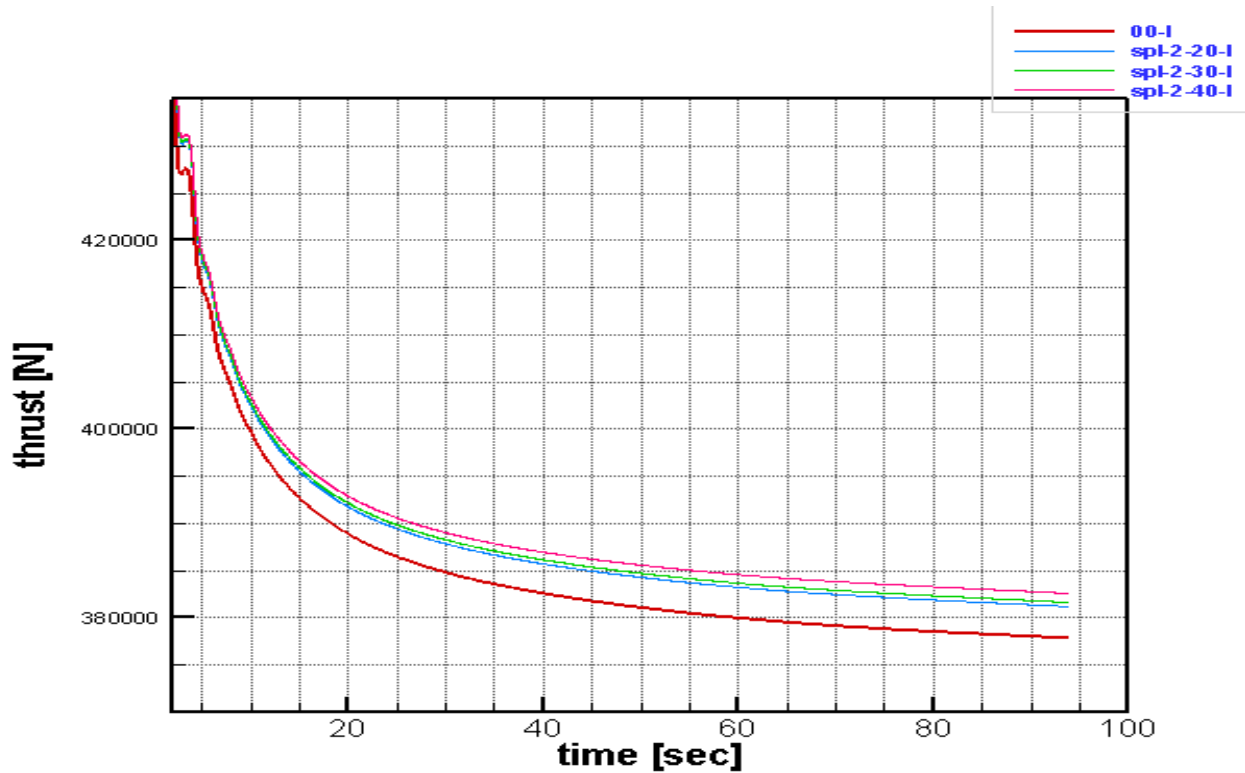
Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

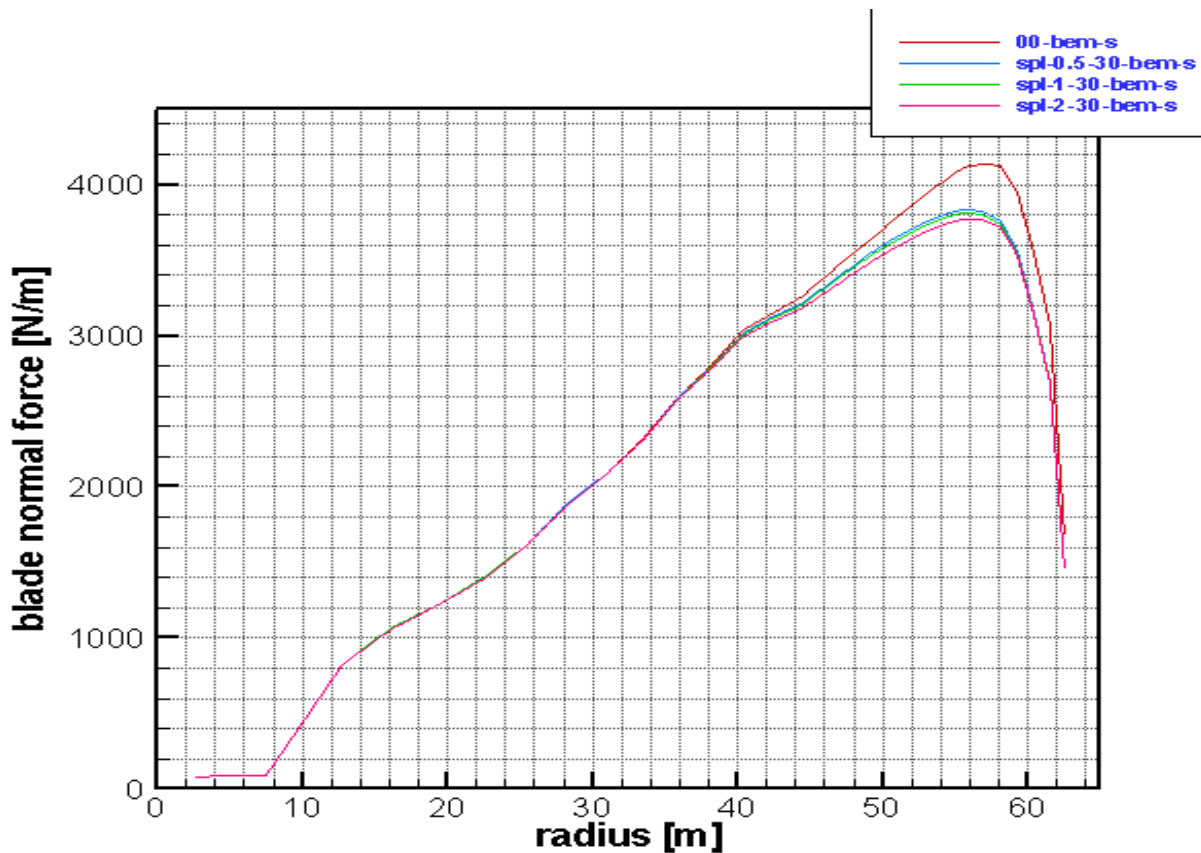


Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



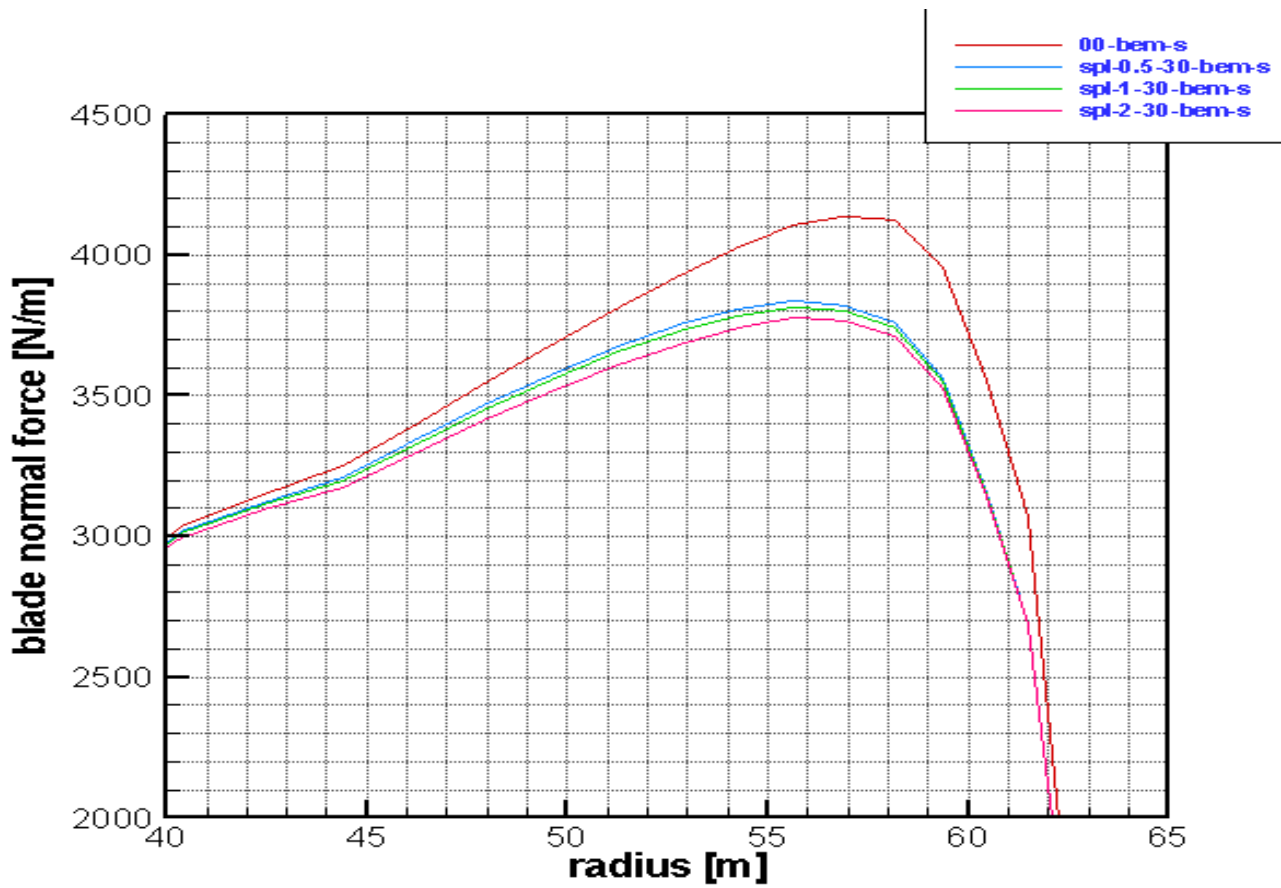
Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

### 3.7 Παράρτημα 2 (συγκρίσεις GAST)

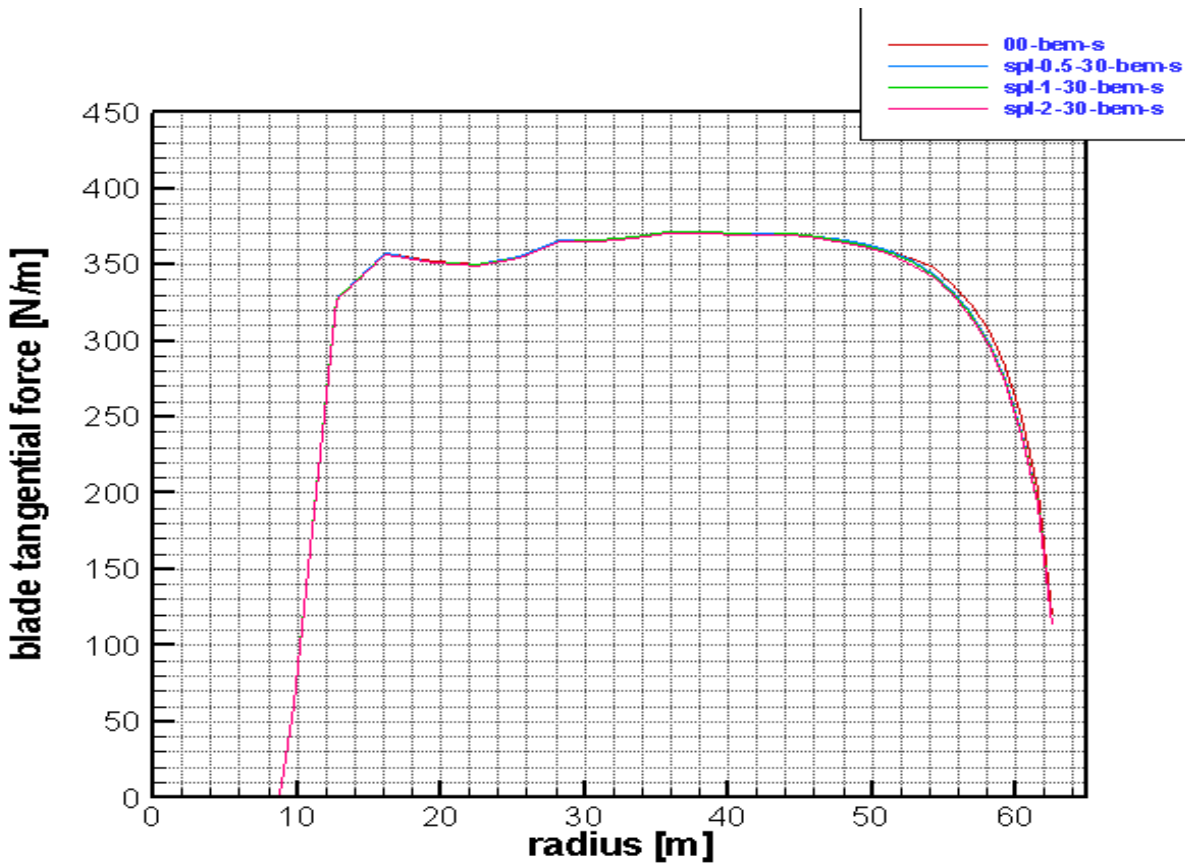


Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.

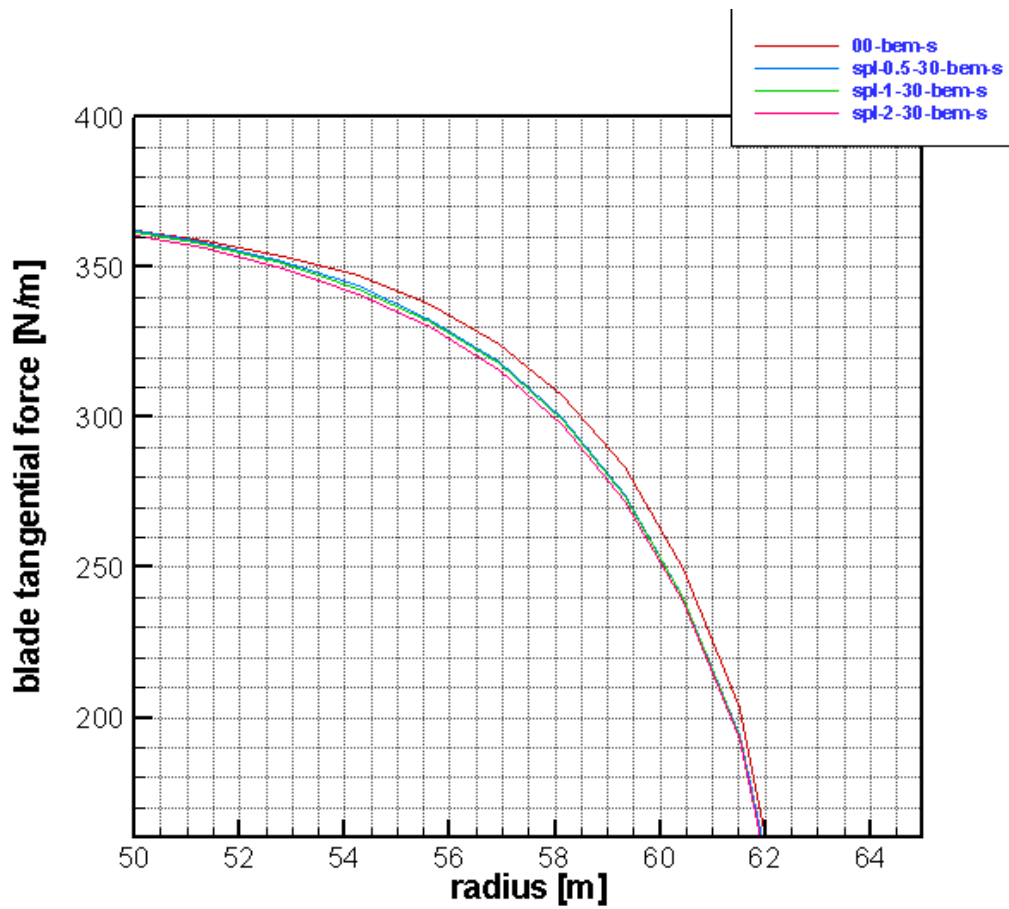




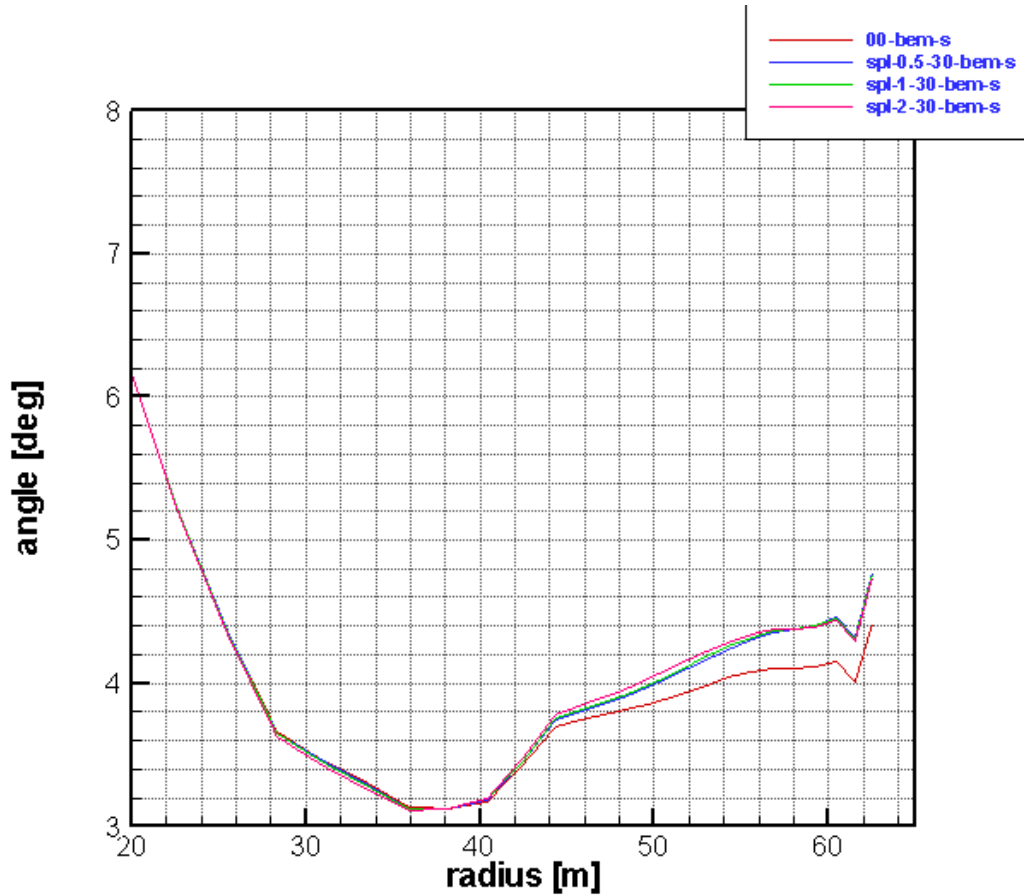
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



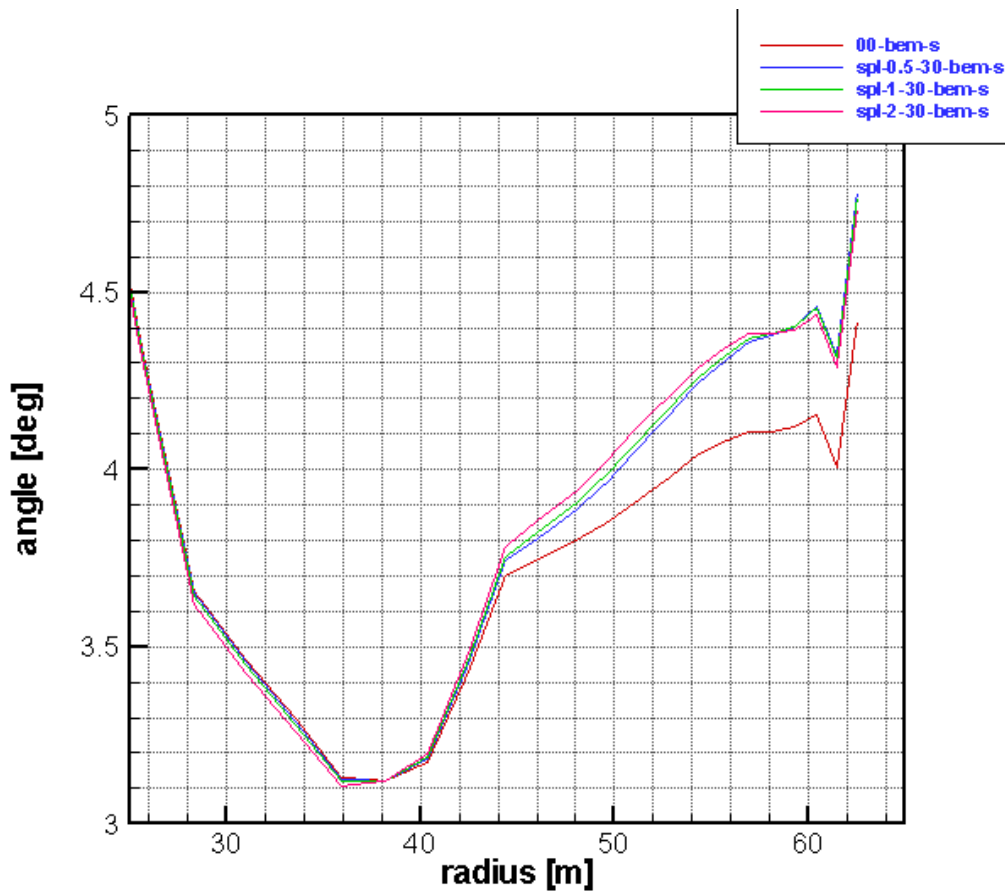
Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



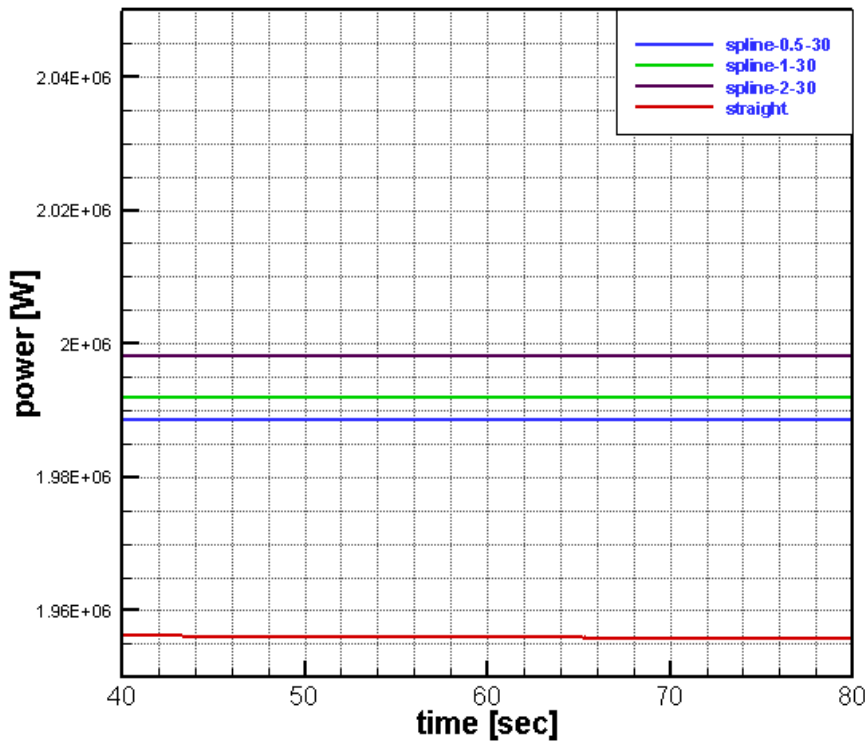
Περιφερειακά φορτία κατά μήκους του πτερυγίου.



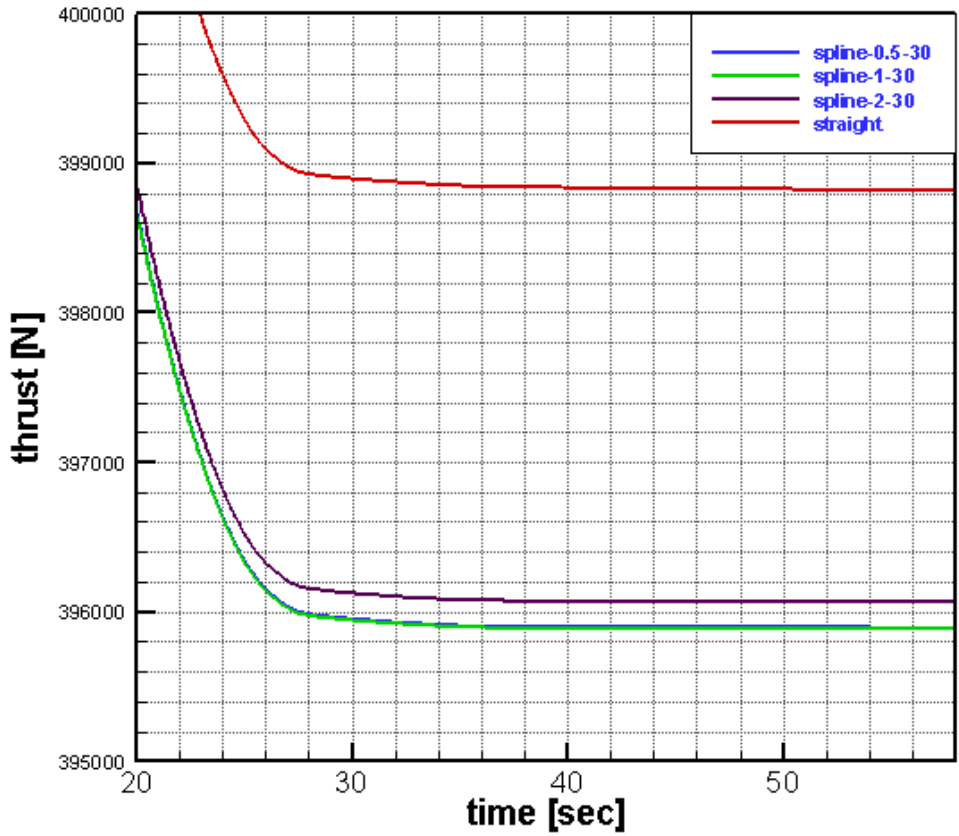
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκους του πτερυγίου.



Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.

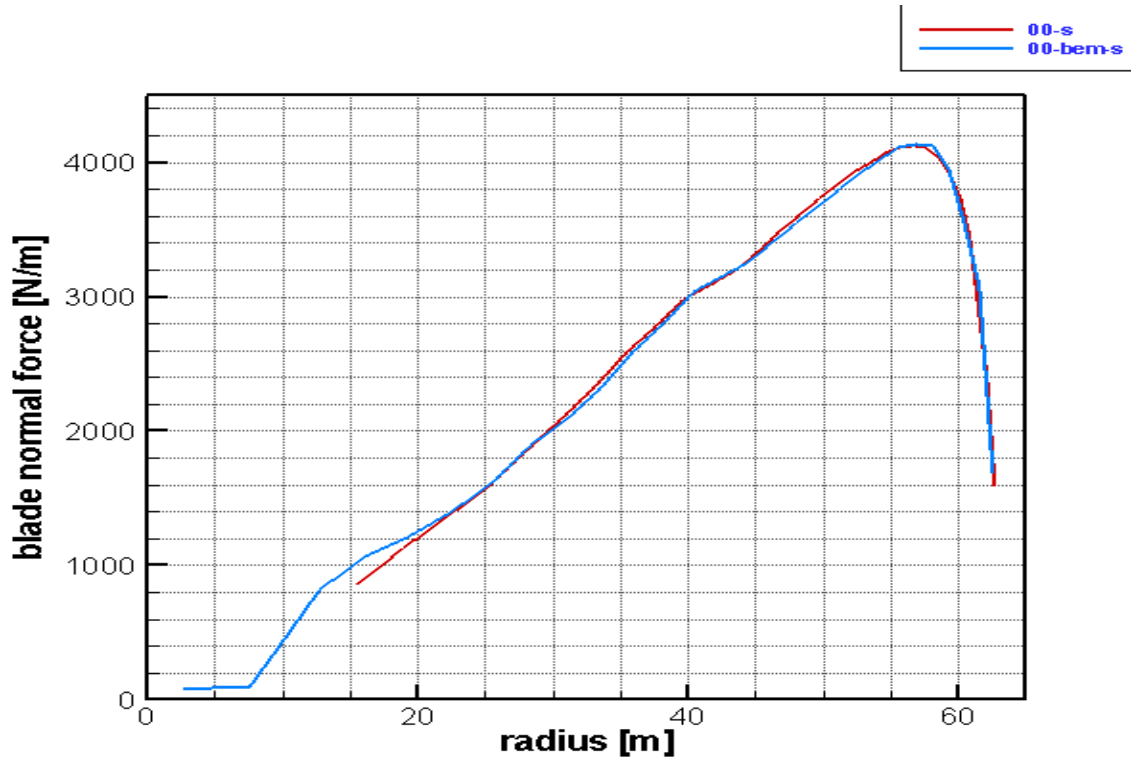


Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

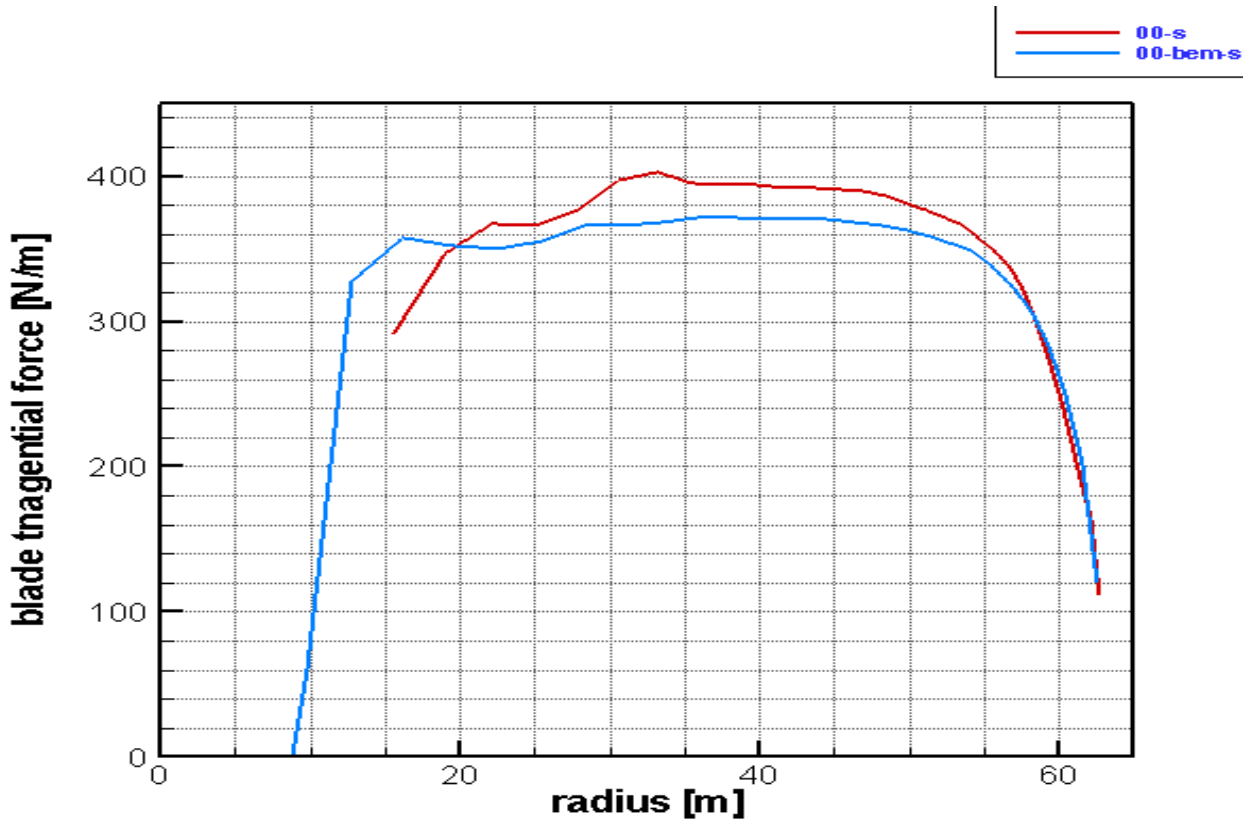


Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

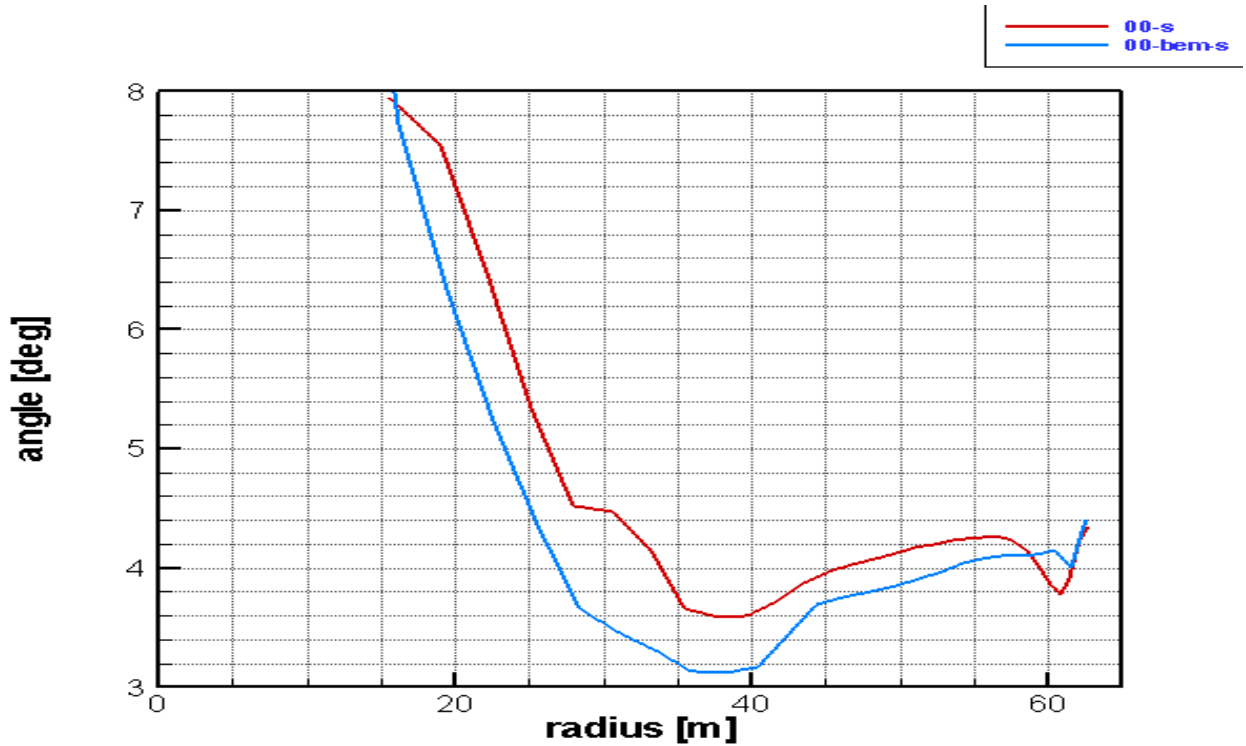
### 3.8 Παράρτημα 3 (συγκρίσεις GENUVP-GAST)



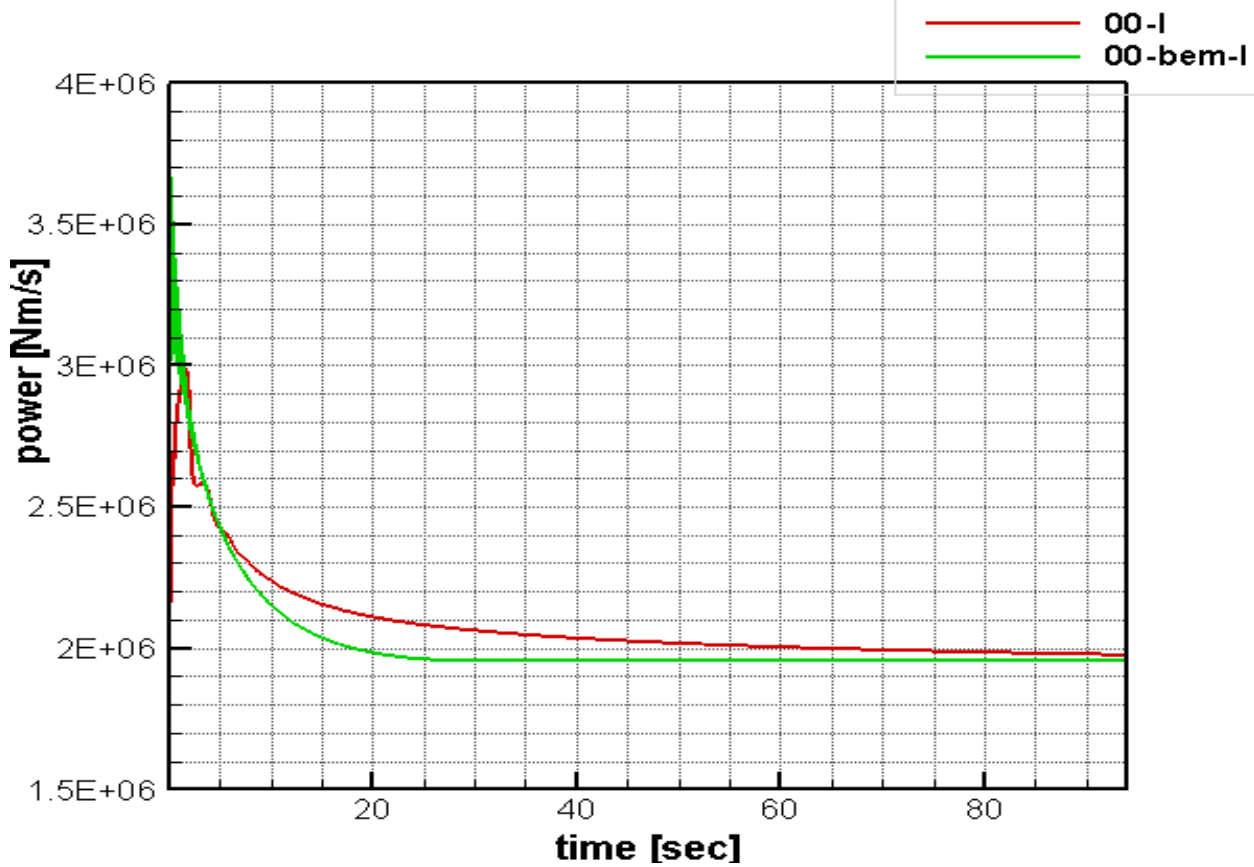
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



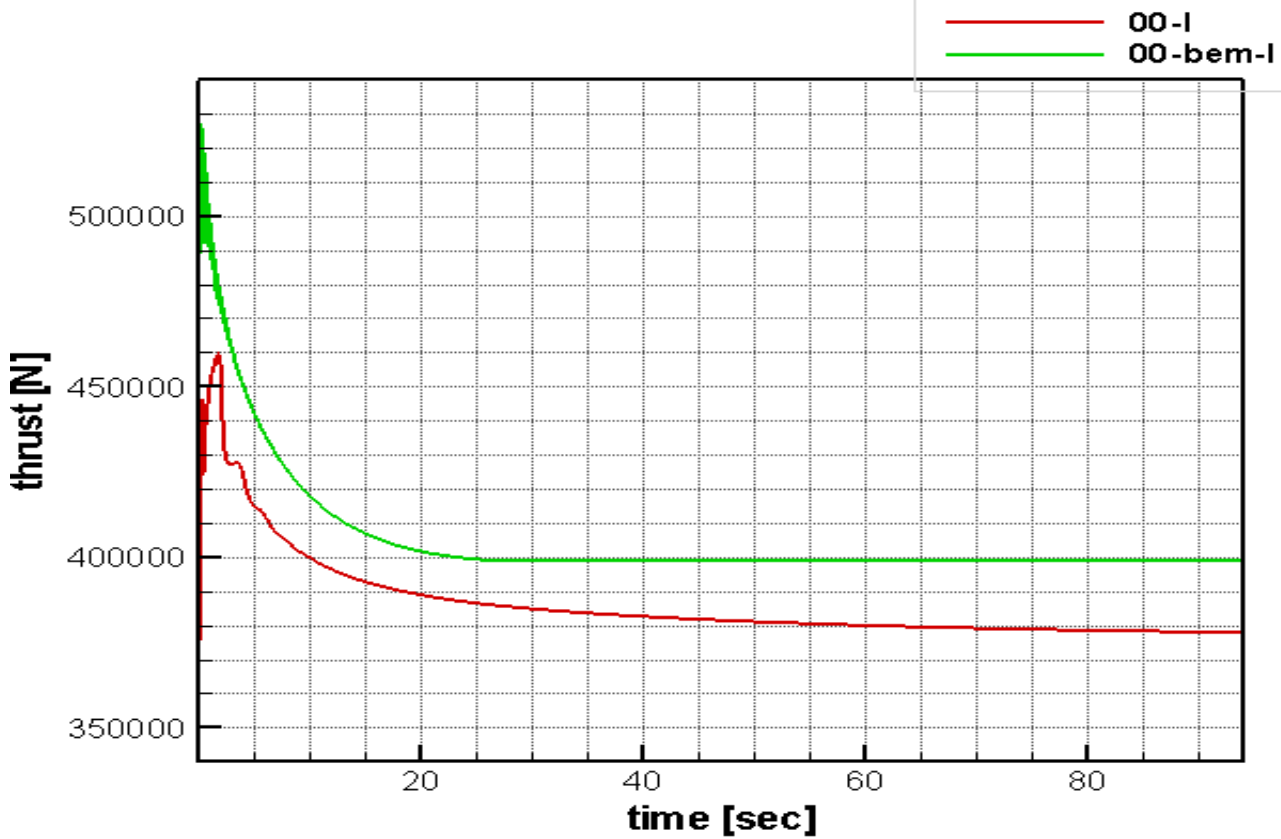
Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



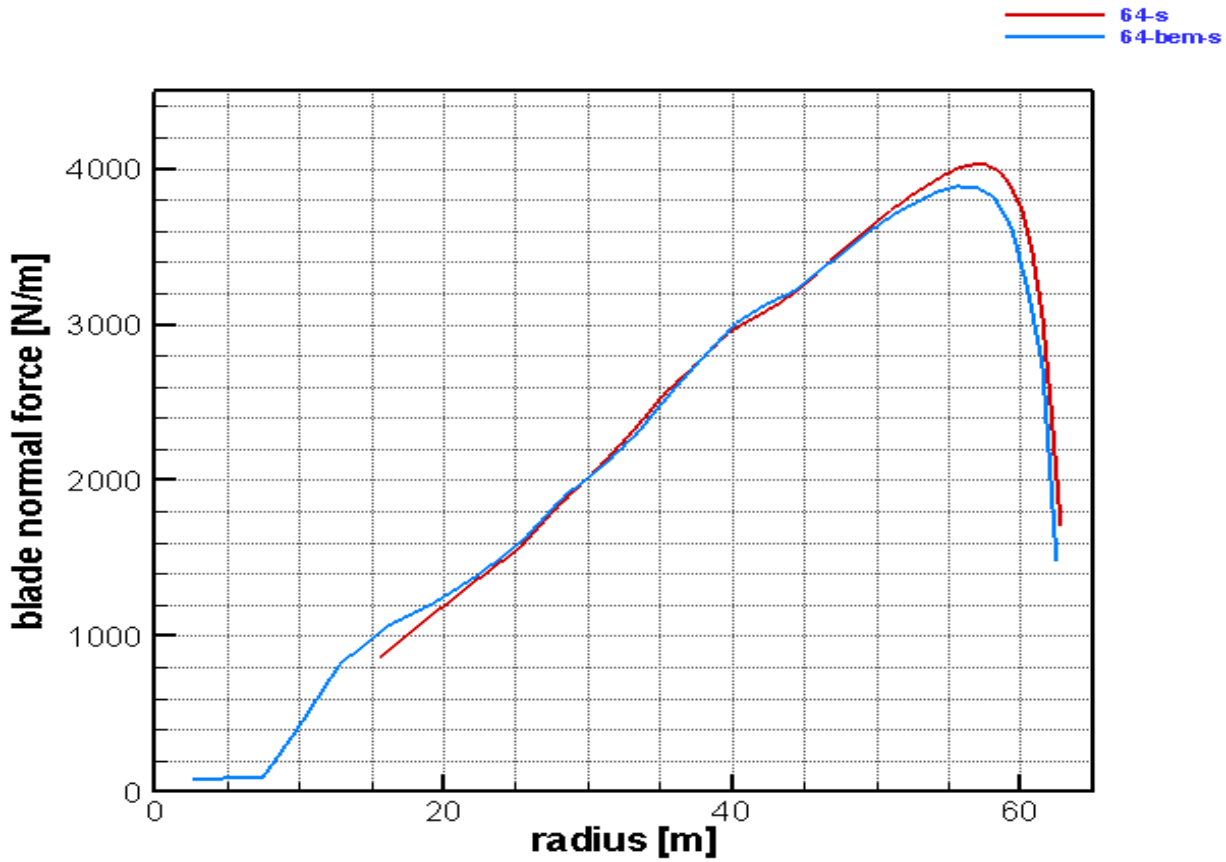
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



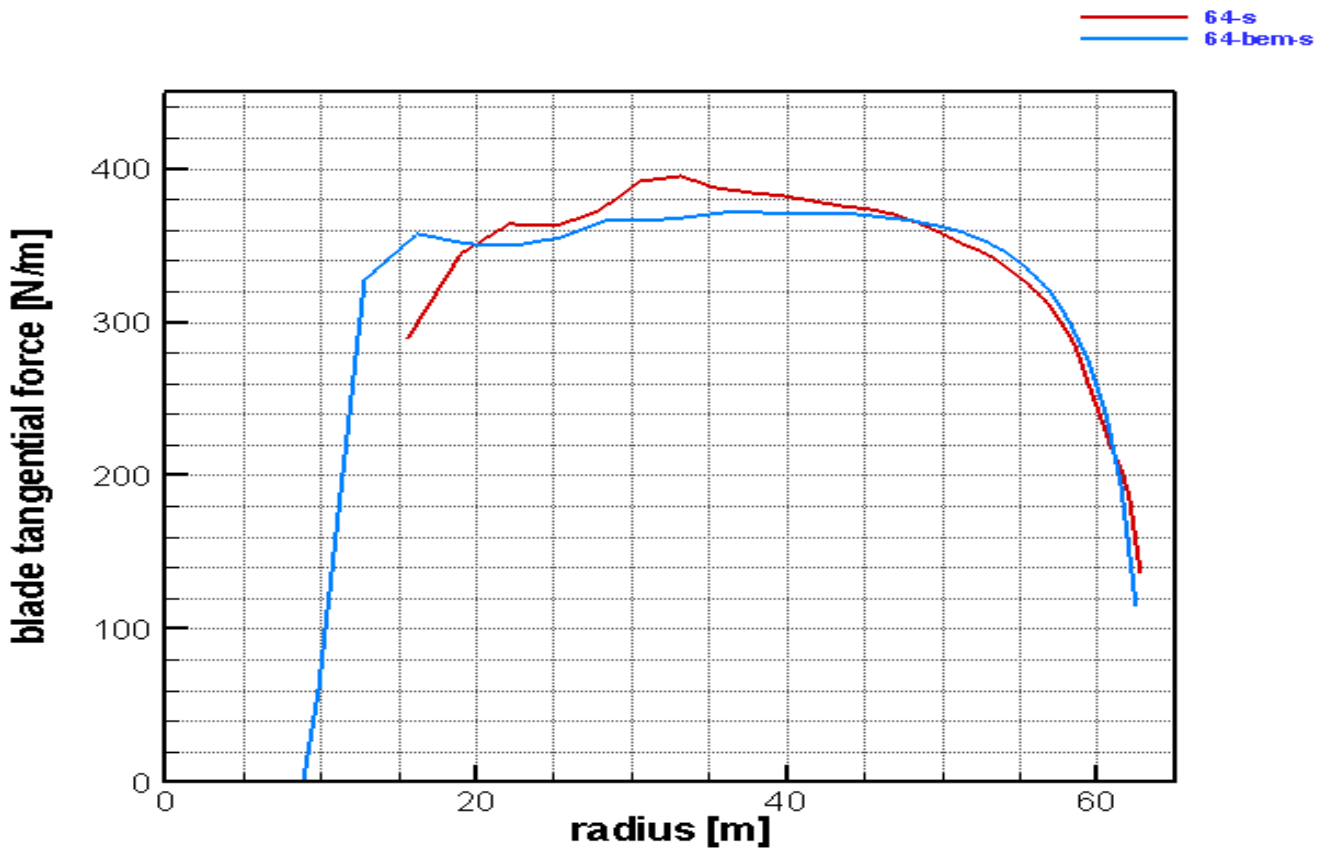
Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



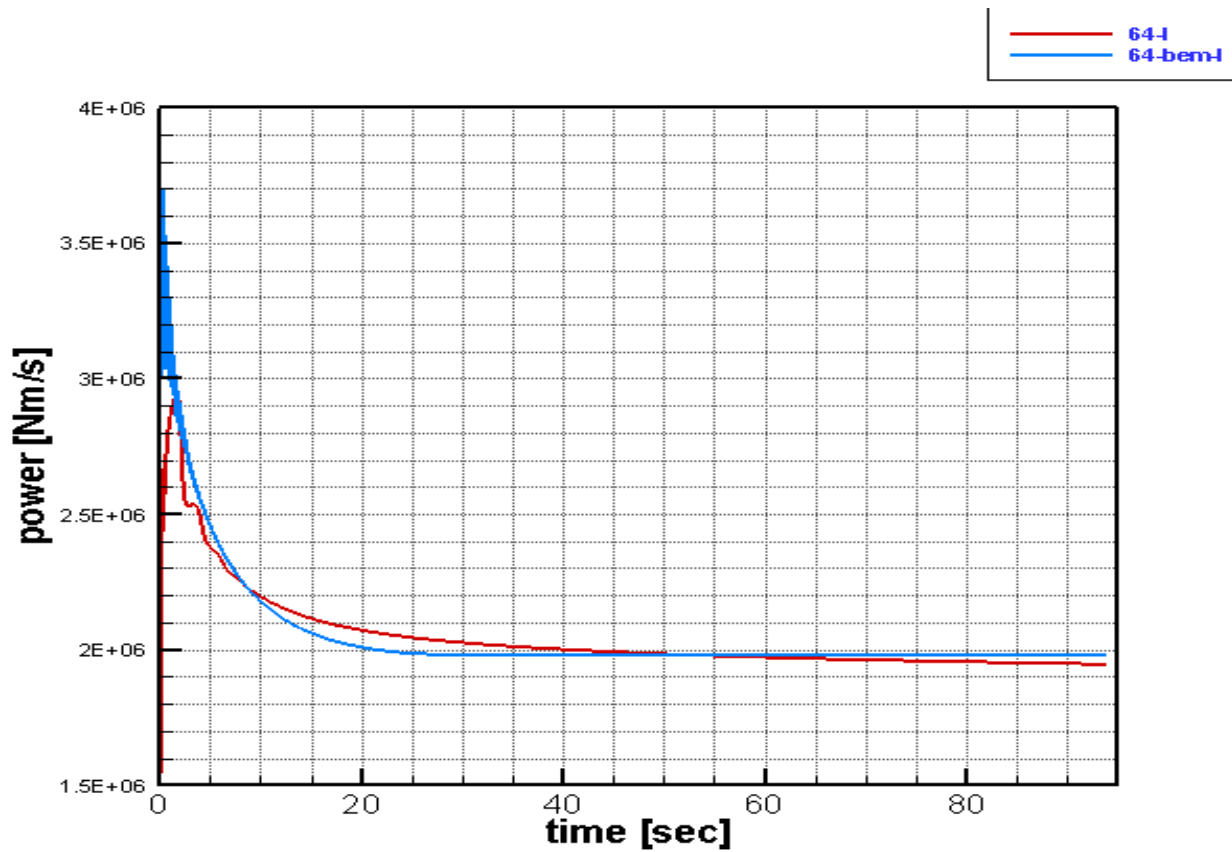
Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.



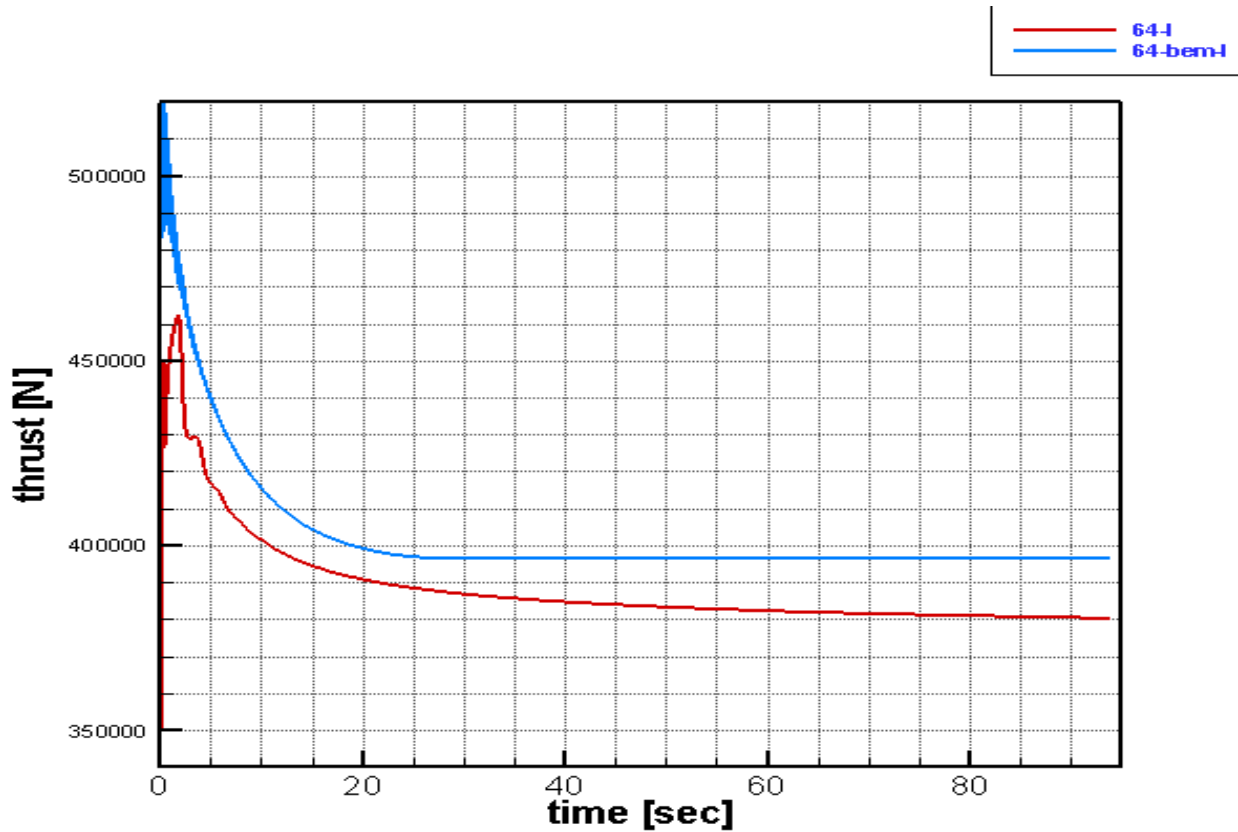
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.

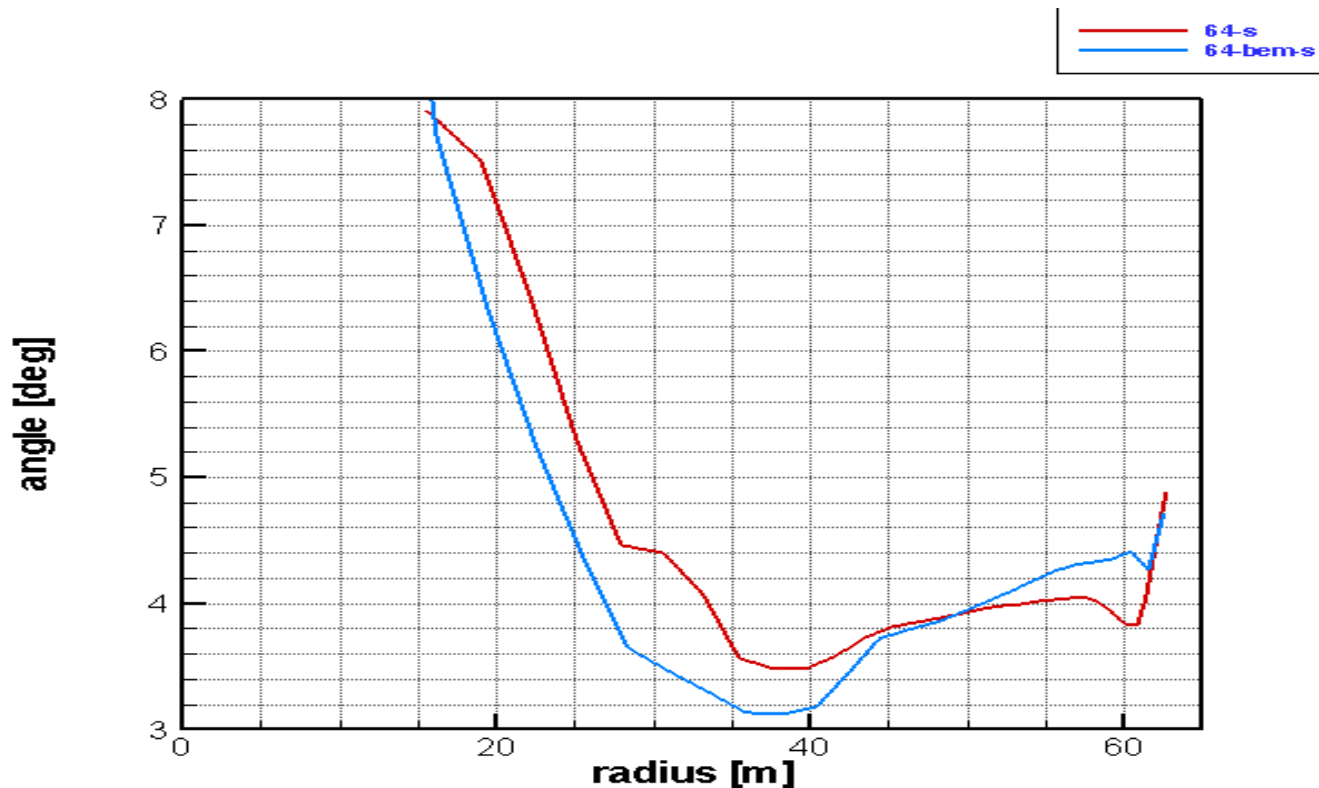


Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

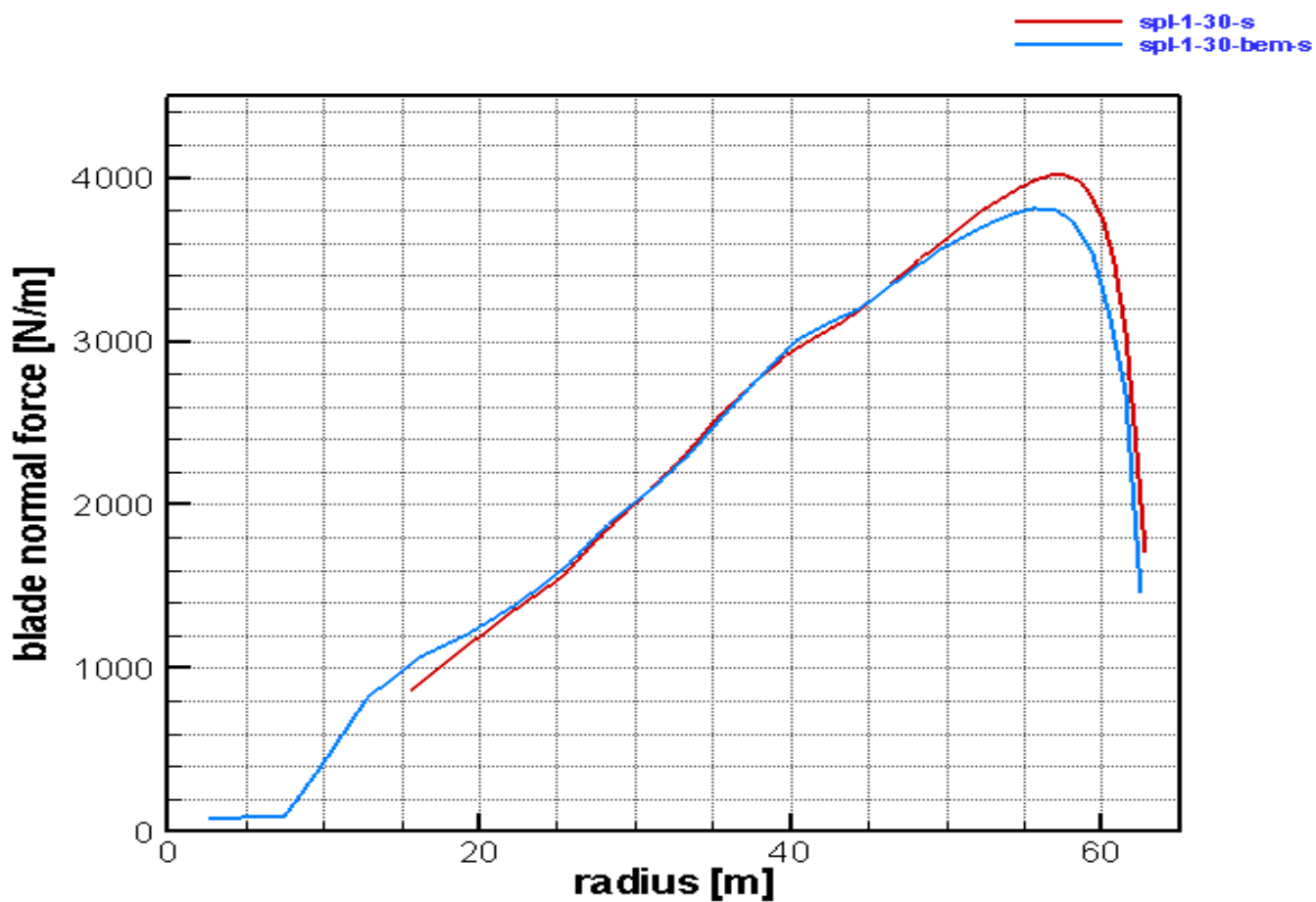


Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

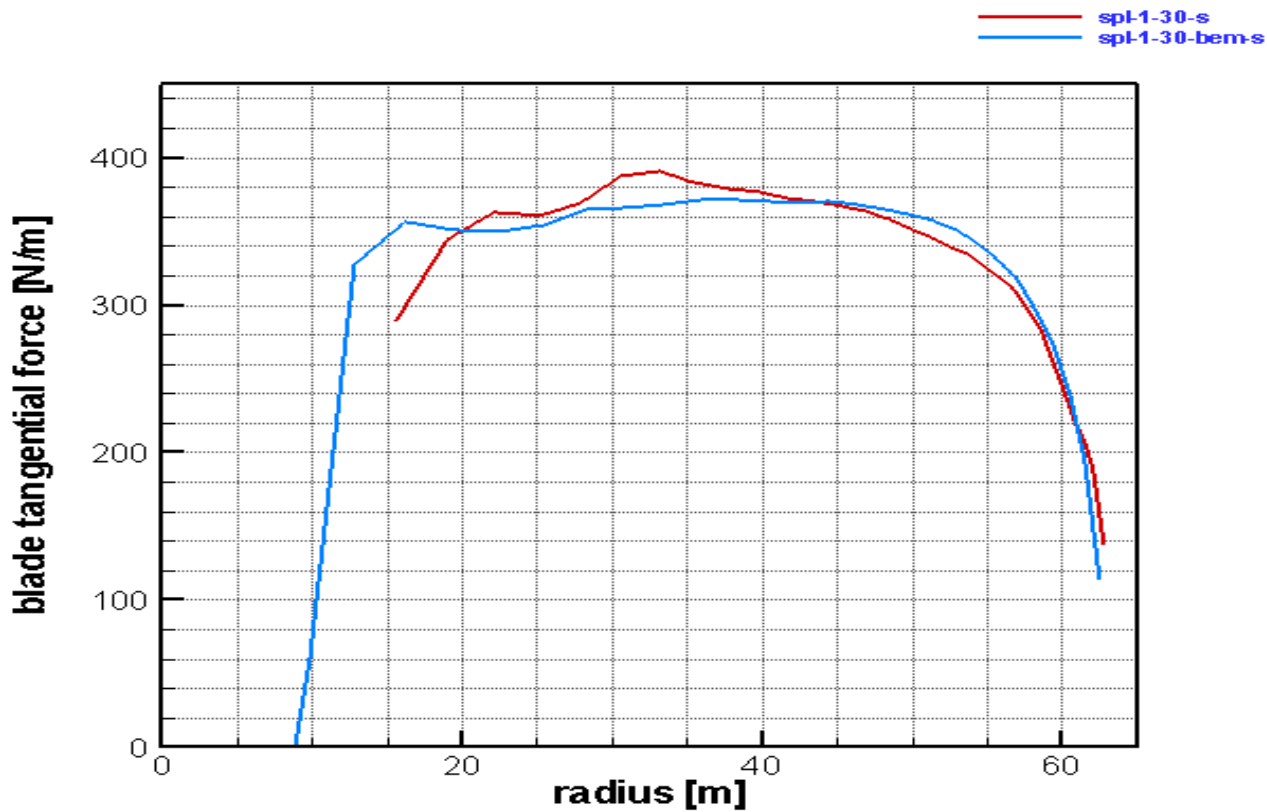




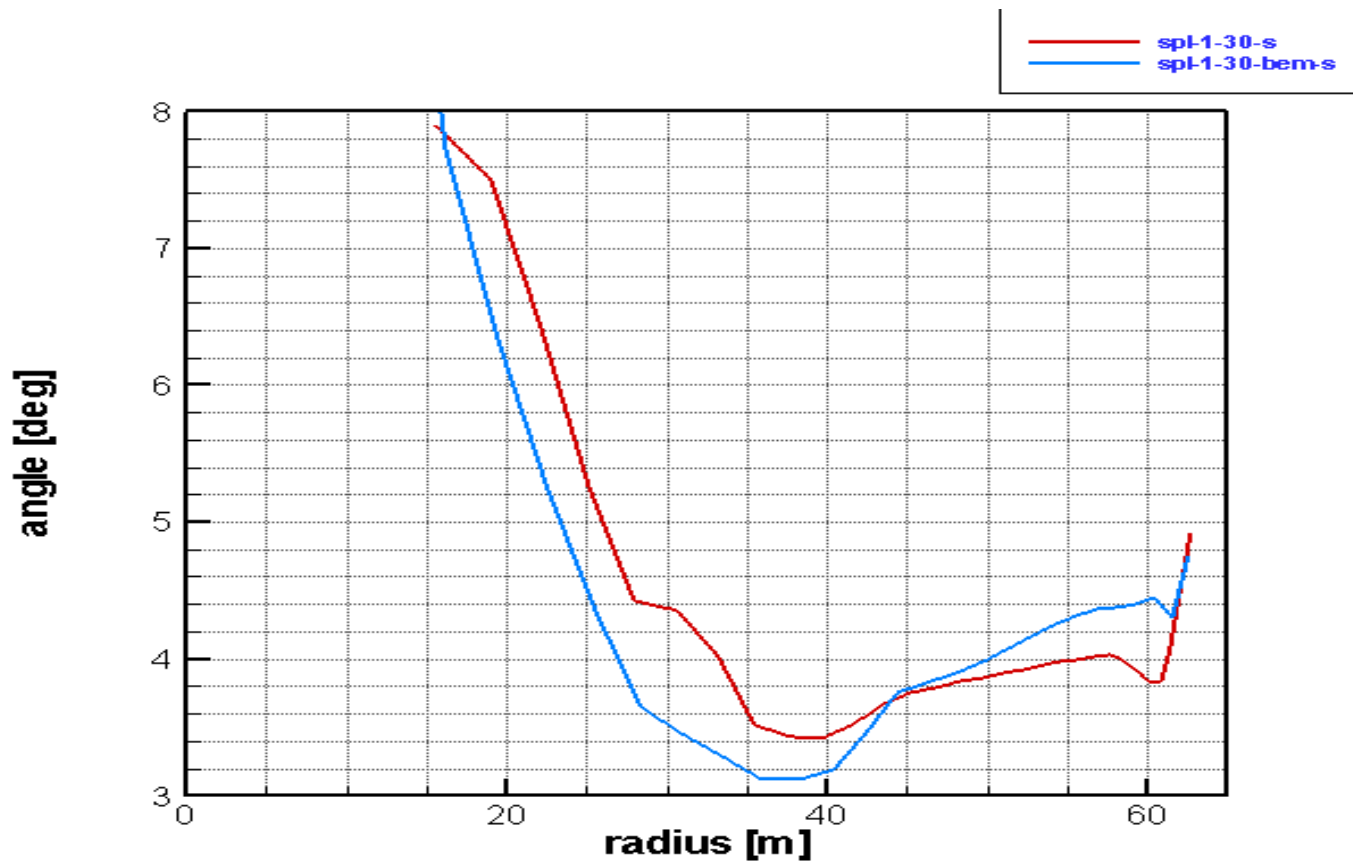
Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



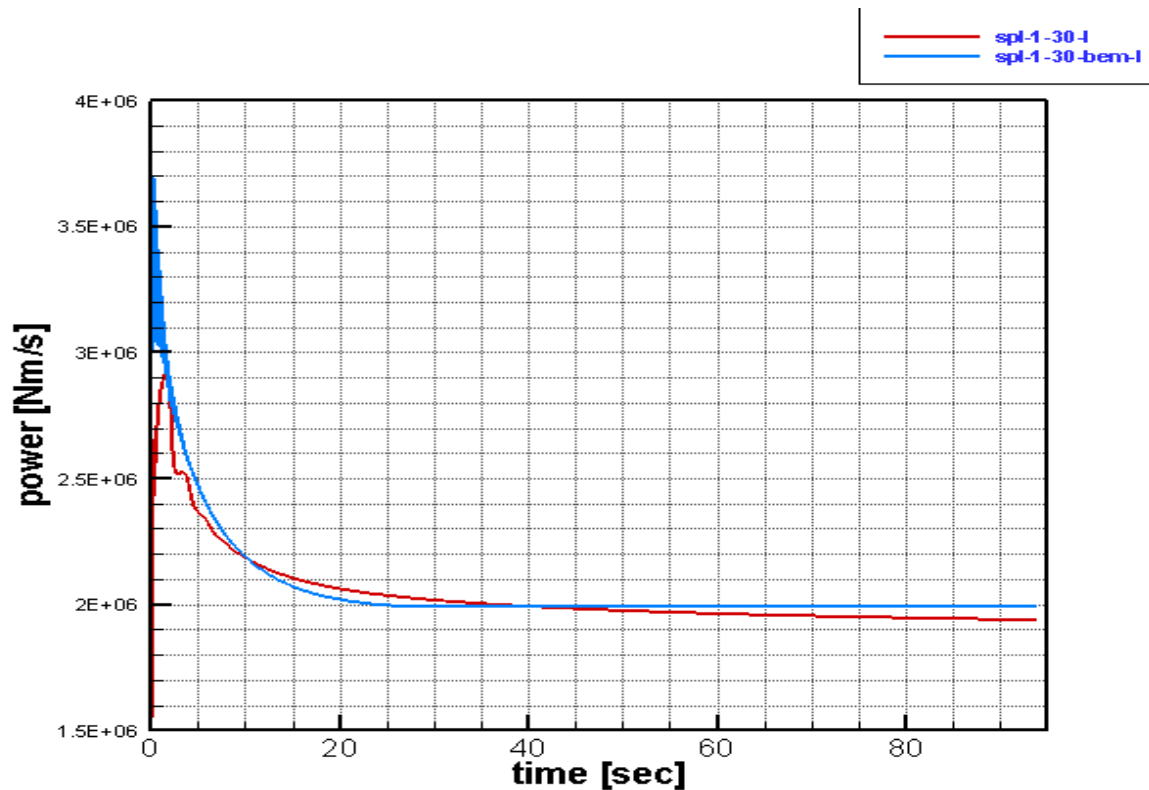
Αξονικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



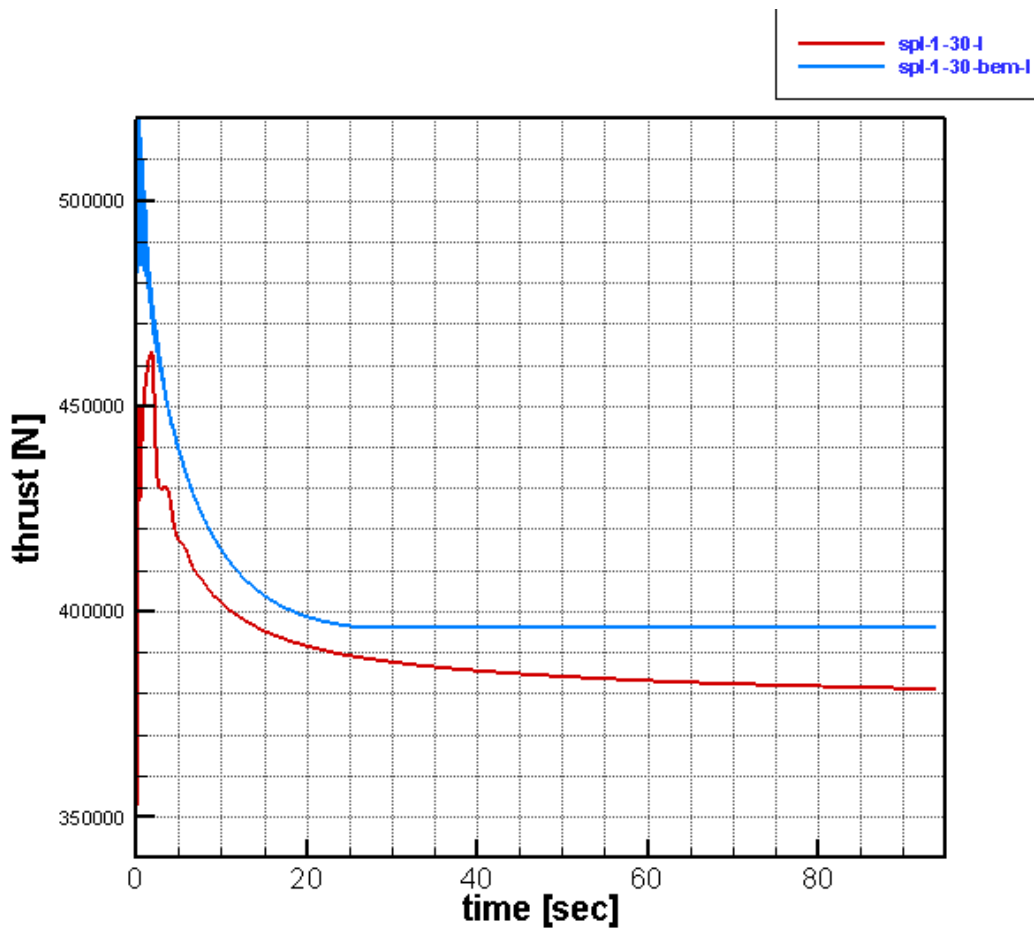
Περιφερειακά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.



Γωνία πρόσπτωσης του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου.



Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.



Δύναμη ώσης συναρτήσει του χρόνου.

# 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΕΡΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟ ΑΝΕΜΟ

---

## 4.1 Αεροελαστική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε σταθερό αέρα.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας εξετάζουμε τα πτερύγια αεροελαστικά. Ενδιαφέρον έχουν οι διαφορές, των στοιχείων (πχ. ισχύς) που ενδεχομένως προκύψουν σε σχέση με τις καθαρά αεροδυναμικές προσομοιώσεις.

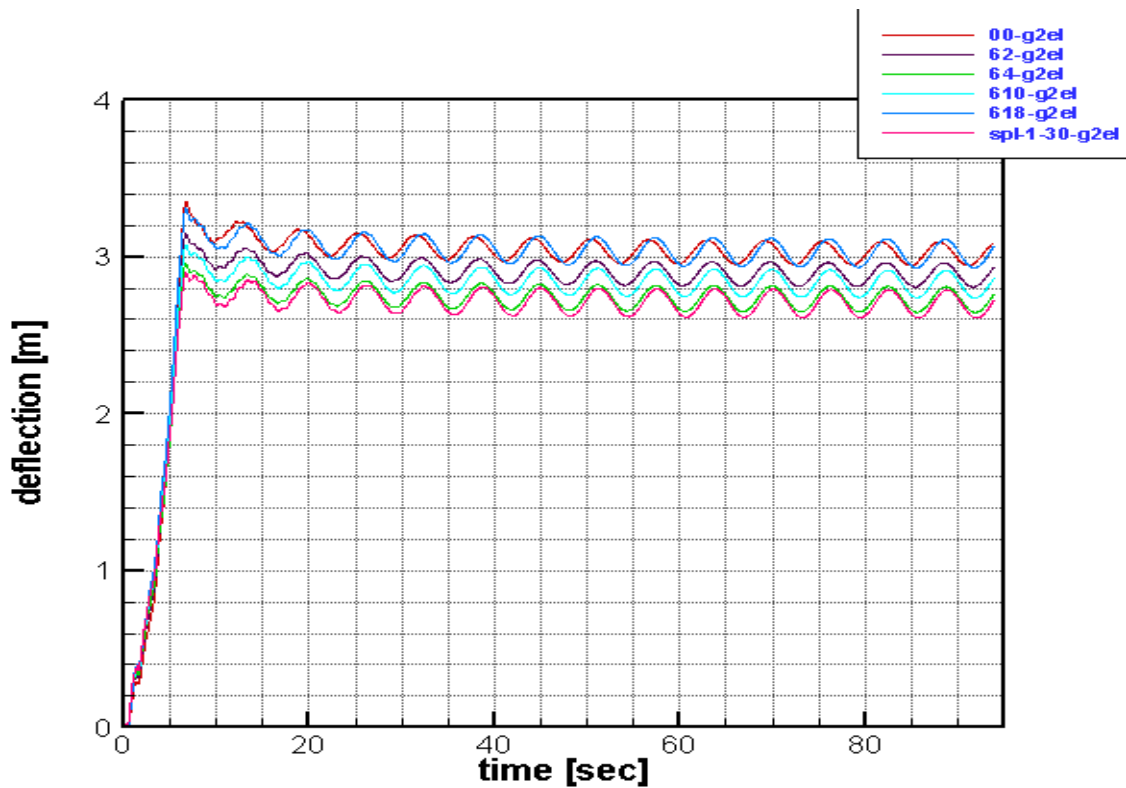
## 4.2 Βασικά σημεία ελέγχου

Τα σημεία που μας ενδιαφέρουν σε αυτό το κομμάτι είναι :

- Η παραμόρφωση του πτερυγίου (κυρίως της άκρης του), που δημιουργείται λόγω του ανέμου, στη διεύθυνση του δευτέρου (παραμόρφωση flap). Με τον όρο στιγμιαία, εννοούμε την ταλάντωση ενός σημείου της πτέρυγας με το χρόνο. Έτσι, εξετάζουμε γύρω από ποιά θέση ταλαντώνεται το σημείο και με ποιά ακρότητα.
- Η στιγμιαία στρέψη της πτέρυγας γύρω από την ευθεία της ακτίνας (torsion). Η στροφή της πτέρυγας επηρεάζει την τοπική γωνία πρόσπτωσης και κατά συνέπεια την περιφερειακή δύναμη που ασκείται.
- Η αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς.

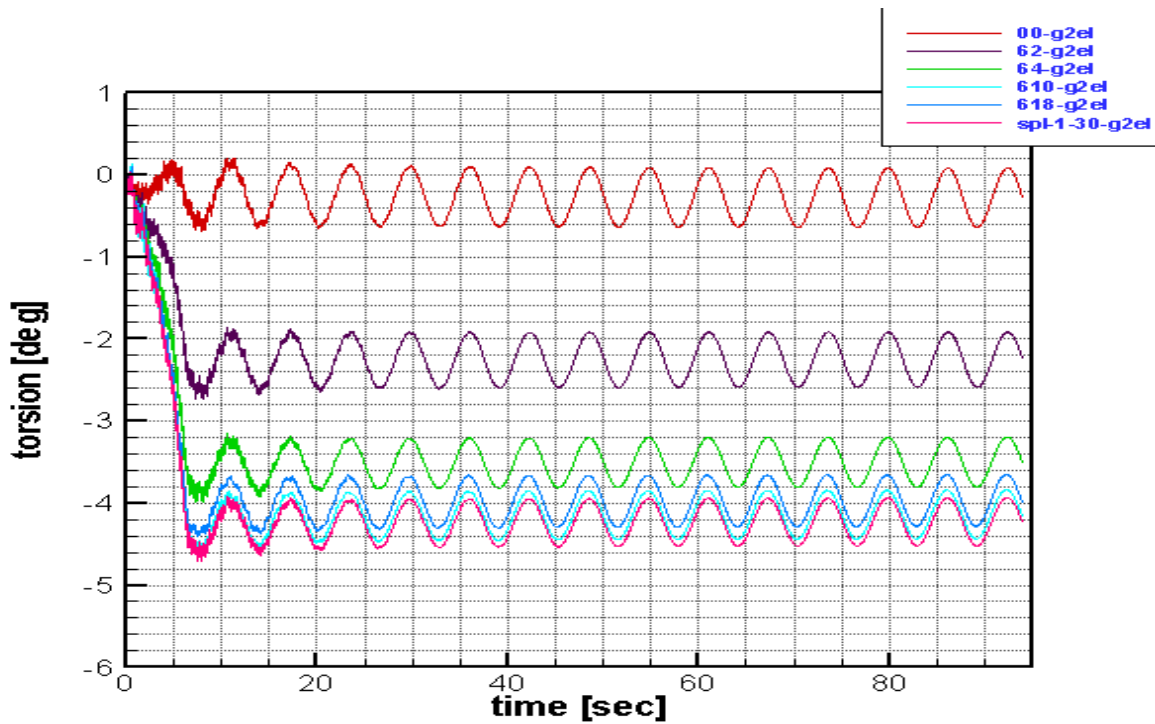
## 4.3 Συγκρίσεις *GENUVP 2nd order*

Στο σημείο αυτό παρατηρούμε μια ιδιαίτερη συμπεριφορά των πτερυγίων όσον αφορά τις παραμορφώσεις (flap deflections) στην κατεύθυνση ροής του ανέμου. Όσο μεγαλώνει η καμπυλότητα, τόσο μεγαλώνουν και οι μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης. Από ένα σημείο κι έπειτα, όμως, όταν η καμπυλότητα παίρνει μεγάλες τιμές τότε η συμπεριφορά των πτερυγίων πλησιάζει περισσότερο αυτή του ευθύγραμμου πτερυγίου. Όσον αφορά τη στρέψη και την αποδιδόμενη ισχύ, η τιμές τους μειώνονται όσο αυξάνεται η καμπυλότητα με την περίπτωση spline να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση.



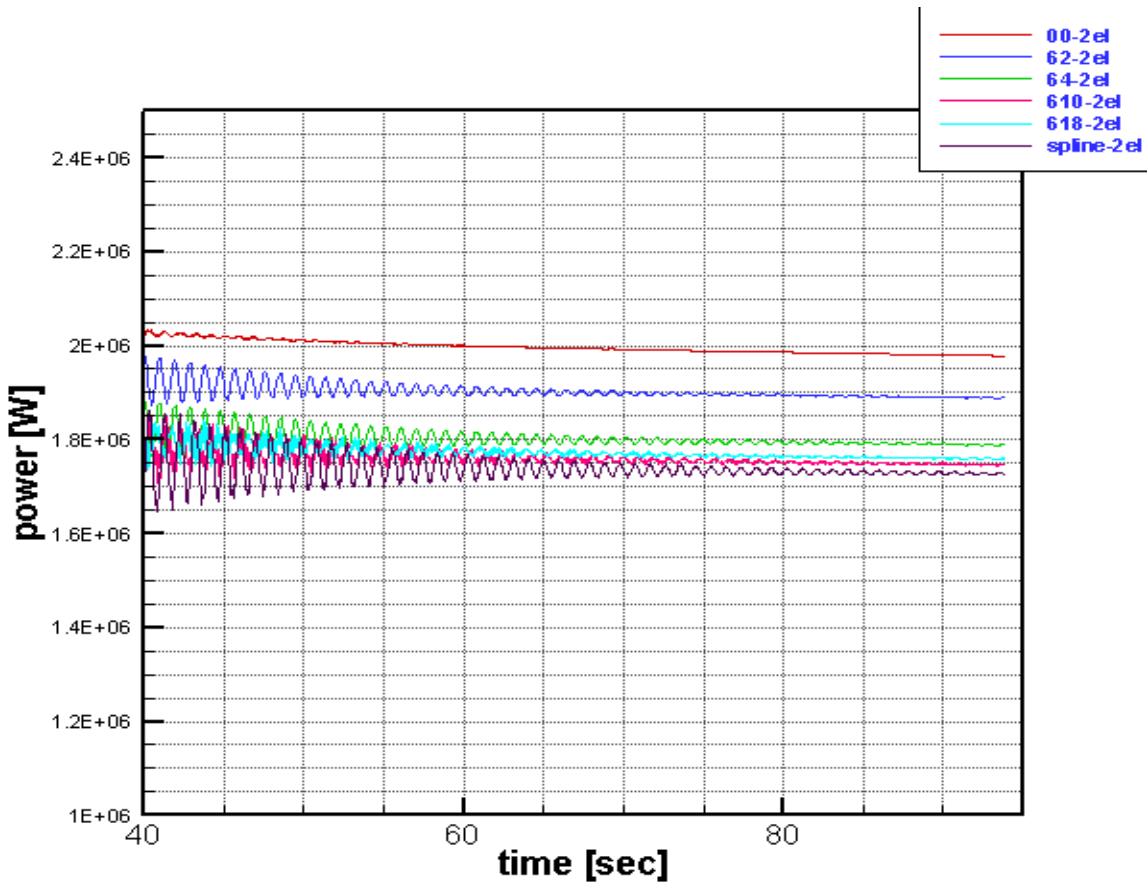
Σχήμα 4.1

Σχέση καμπλότητας – μετακινήσεων στην κατεύθυνση της περύγισης.



Σχήμα 4.2

Αντιστοιχία καμπλότητας – στρέψης.



Σχήμα 4.3

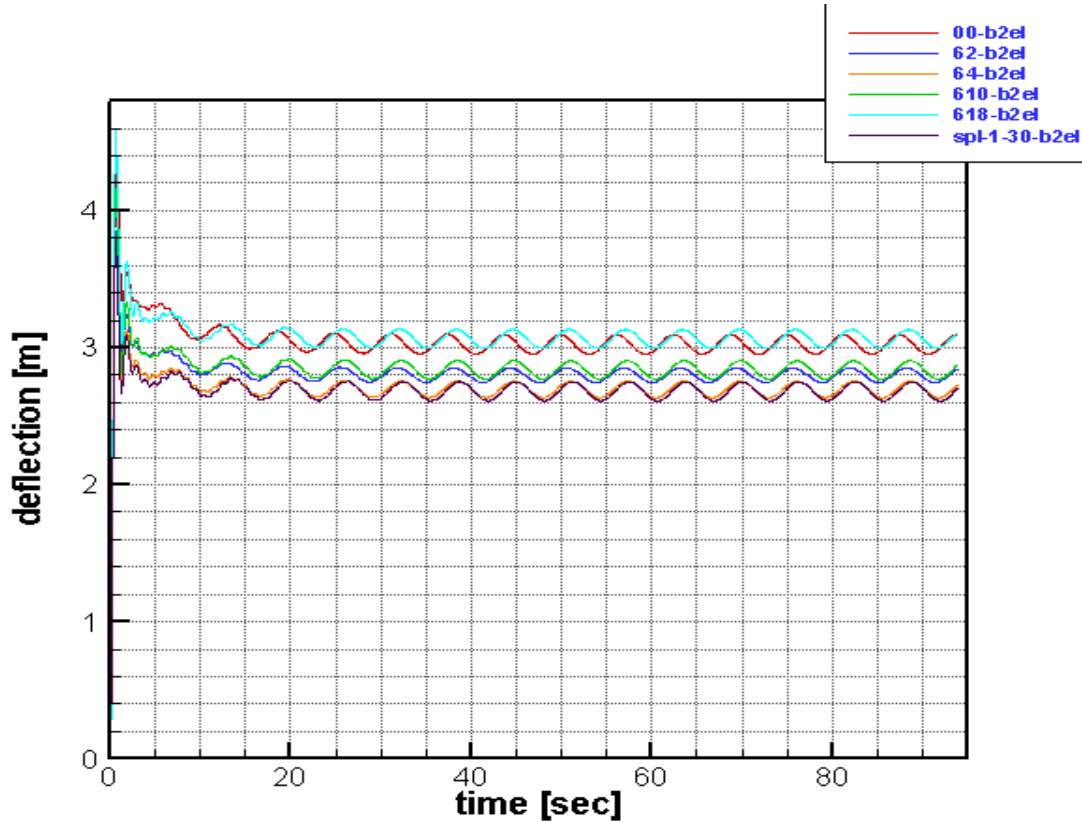
Τα preswep πτερύγια αποδίδουν λιγότερη ισχύ, η οποία εξαρτάται και από την καμπυλότητά τους.

aeroelastic genuvp 2nd order		
	Power [W]	%
straight	1980000	0
a=6, b=2	1890000	-4,54
a=6, b=4	1790000	-9,59
a=6, b=10	1750000	-11,62
a=6, b=18	1752000	-11,51
spline	1730000	-12,63

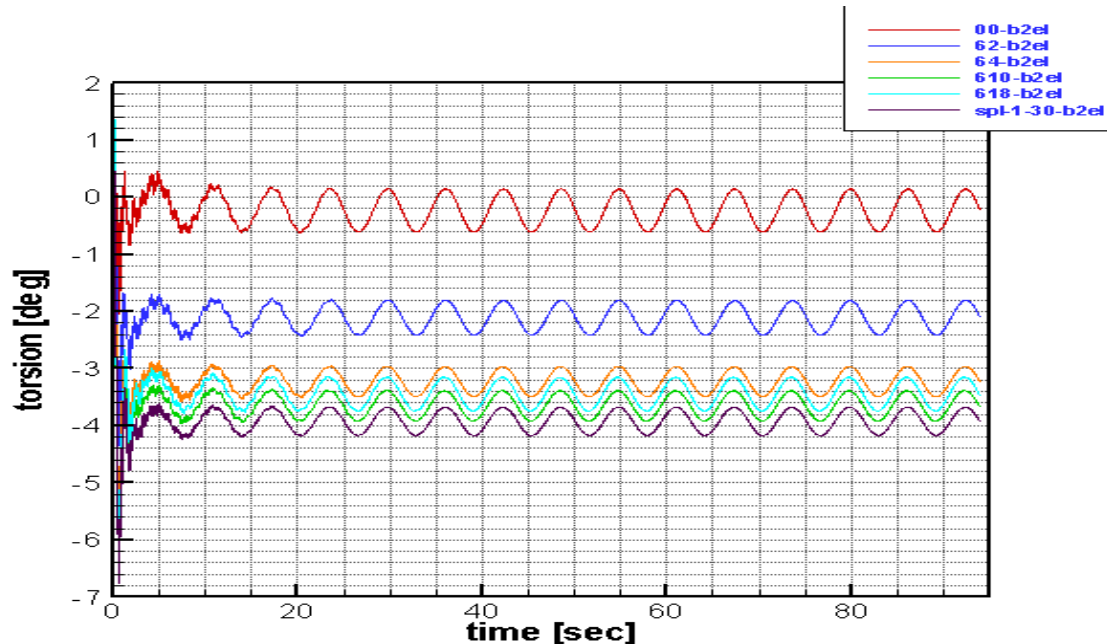
Στον πίνακα φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς κάθε πτερύγωσης, όταν η ροή έχει ομαλοποιηθεί, όπως επίσης και το ποσοστό κτά το το οποίο αυτή είναι μειωμένη σε σχέση με την ισχύ που αποδίδεται από την ευθύγραμμη πτερύγωση.

#### 4.4 Συγκρίσεις GAST 2nd order

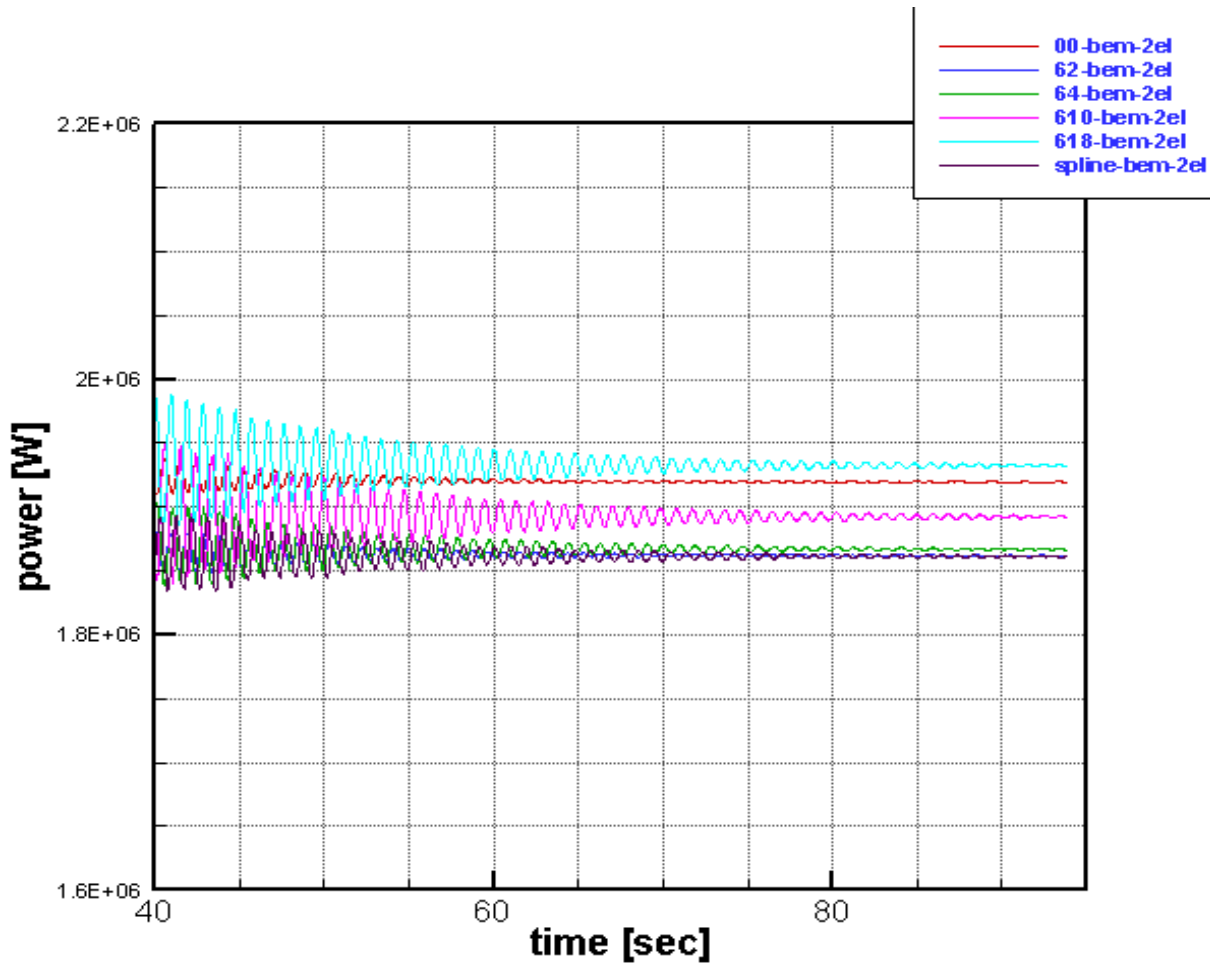
Ο κώδικας GAST μας δίνει αποτελέσματα που πλησιάζουν αρκετά αυτά του κώδικα GENUVP. Οι διαφορές που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή είναι αυτές ανάμεσα στις διαφορετικές αποδιδόμενες ισχύες. Ωστόσο, αυτό που είναι σημαντικό και θα πρέπει να κρατήσουμε ως συμπέρασμα είναι ότι λόγω σύγκλισης αποτελεσμάτων –όπως θα φανεί και στην επόμενη ενότητα- μπορούμε να χρησιμοποιούμε ασφαλώς τον κώδικα GAST, ο οποίος παράγει πολύ γρηγορότερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.4 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.5 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.6 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

aeroelastic gast 2nd order		
	Power [W]	%
straight	1925000	0
a=6, b=2	1860000	-3,38
a=6, b=4	1865000	-3,12
a=6, b=10	1890000	-1,82
a=6, b=18	1940000	0,78
spline	1860000	-3,38

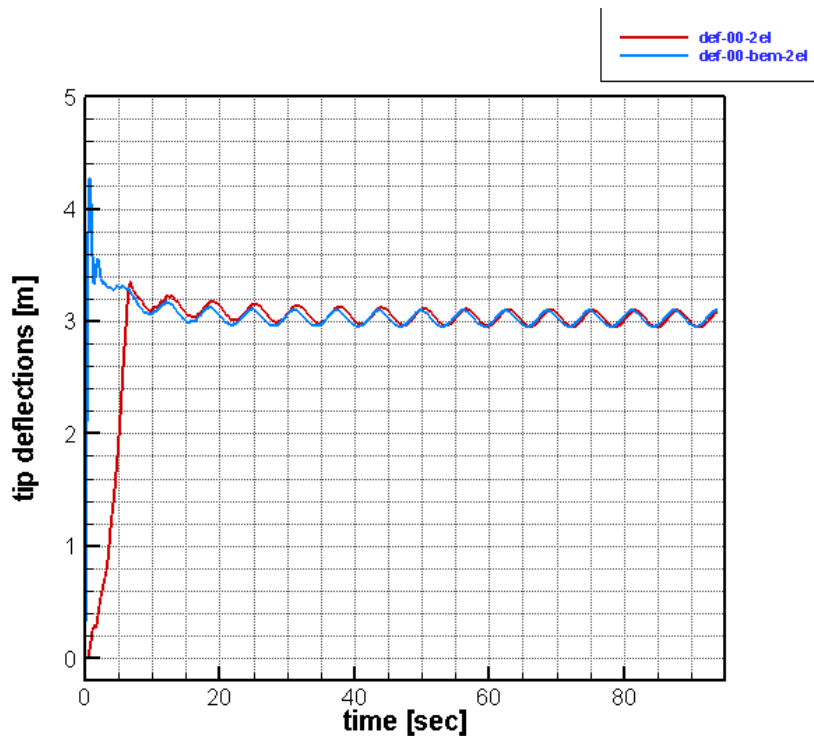
Στον πίνακα φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς κάθε πτερύγωσης, όταν η ροή έχει ομαλοποιηθεί, όπως επίσης και το ποσοστό κτά το το οποίο αυτή είναι μειωμένη σε σχέση με την ισχύ που αποδίδεται από την ευθεία πτερύγωση.



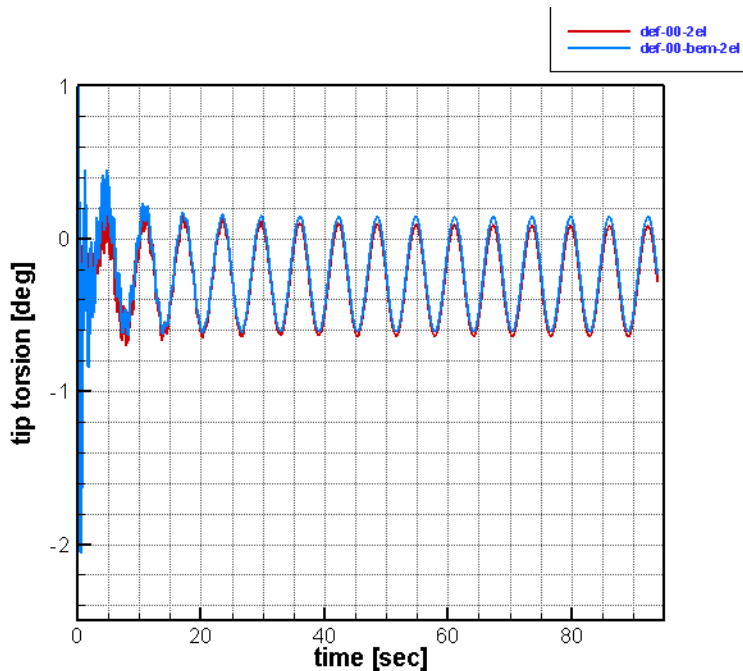
## 4.5 Σύγκριση GENUVP – GAST

Κάνοντας τη σύγκριση ανάμεσα στους δύο ελαστικούς κώδικες, διαπιστώνουμε διαφορές οι οποίες είναι μικρές όταν γίνεται σύγκριση επί του ευθύγραμμου πτερυγίου και αυξάνονται όταν η σύγκριση γίνεται επί των preswep πτερυγίων. Οι διαφορές παρατηρούνται, κυρίως στην ισχύ και λιγότερο στη στρέψη (torsion).

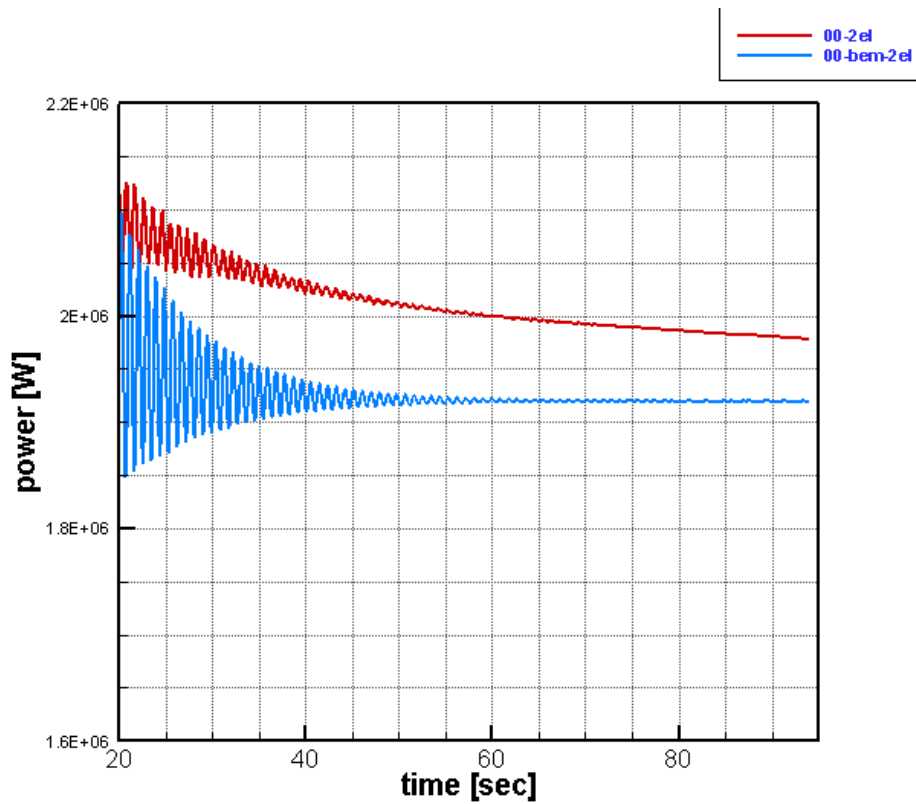
*Σύγκριση επί του ευθύς.*



Σχήμα 4.7 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.

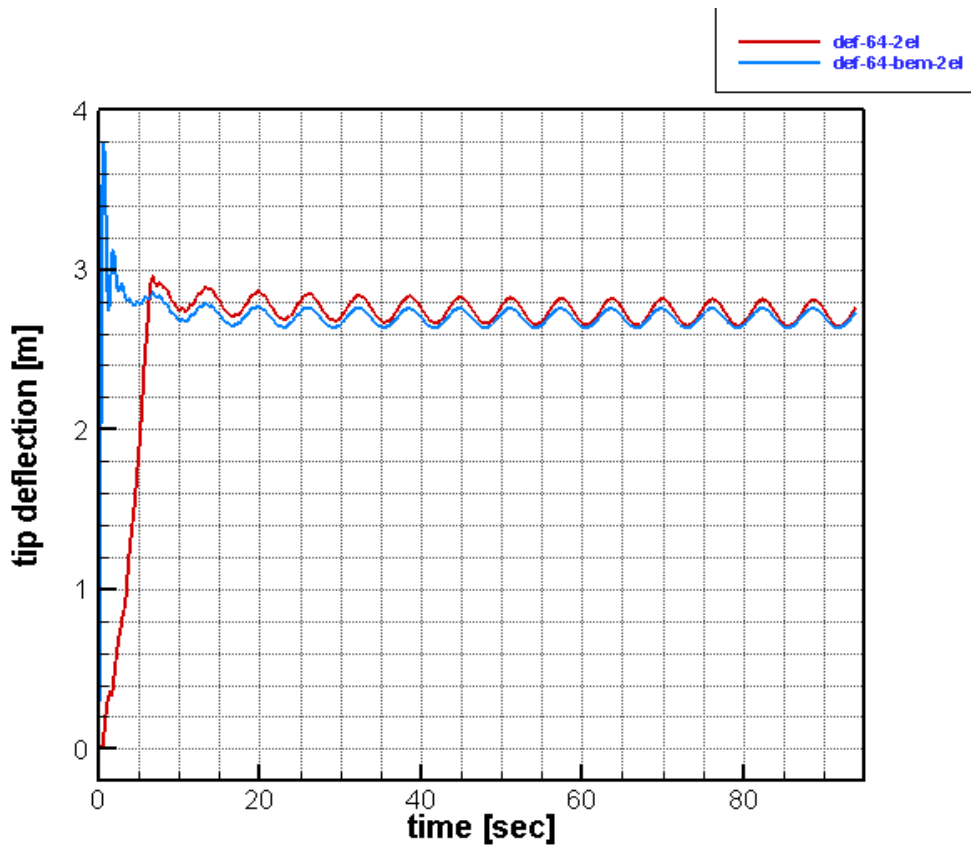


Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

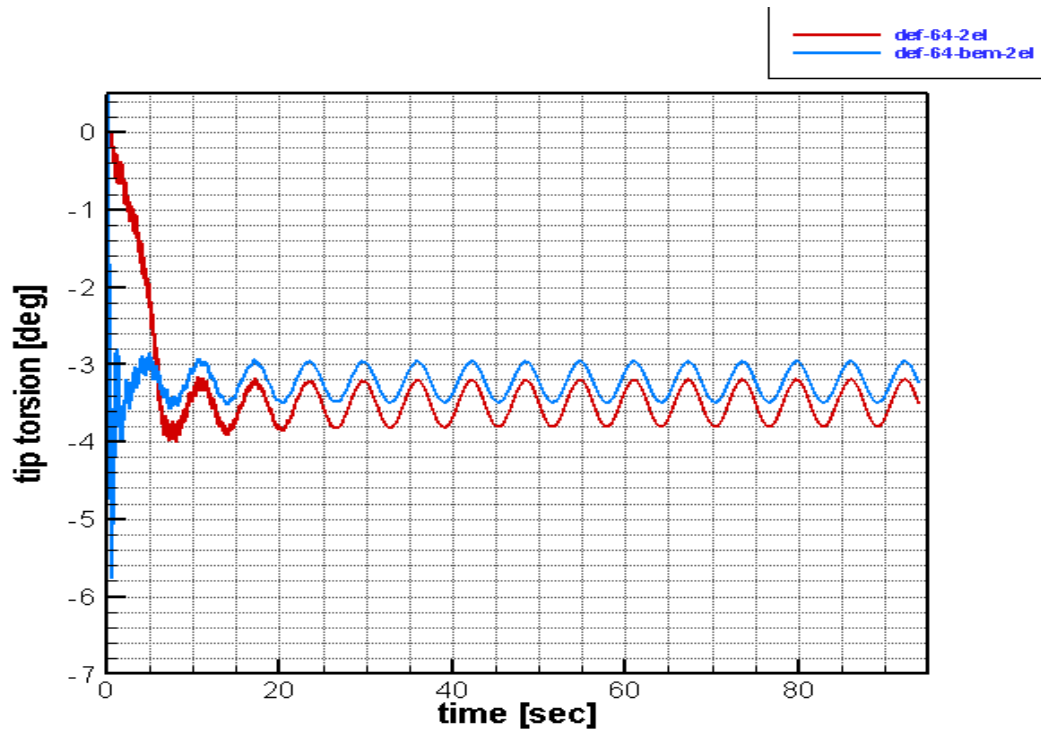


Σχήμα 4.8 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

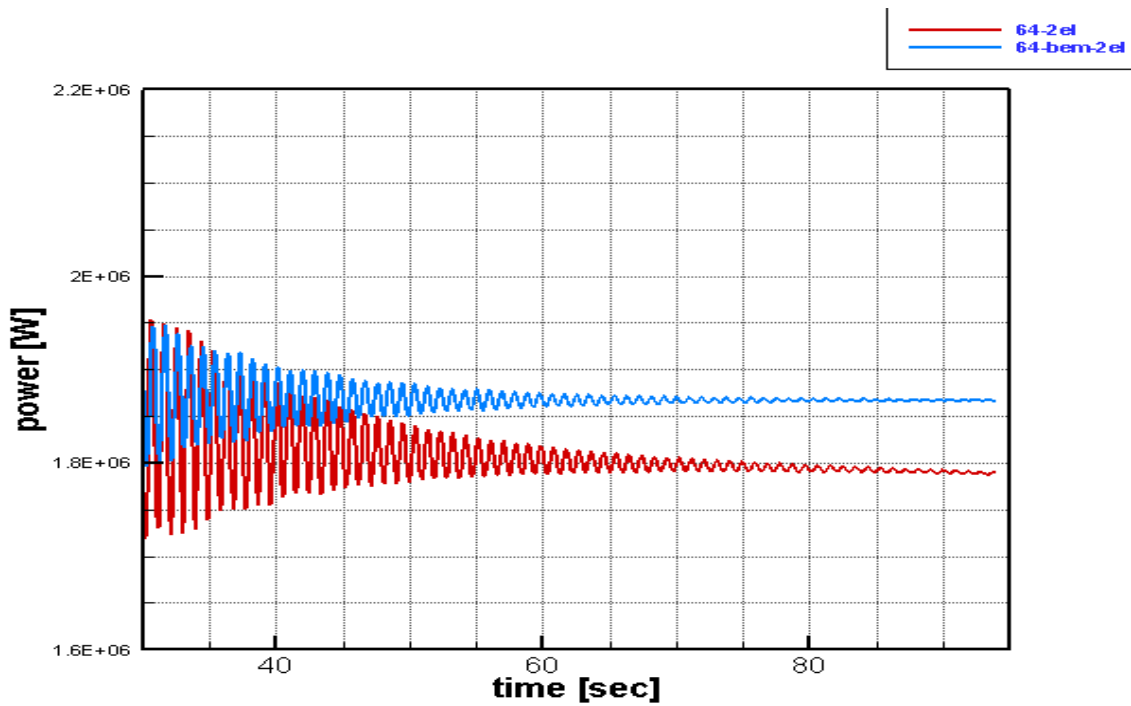
Σύγκριση επί του  $(a=6, b=4)$



Σχήμα 4.9 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.

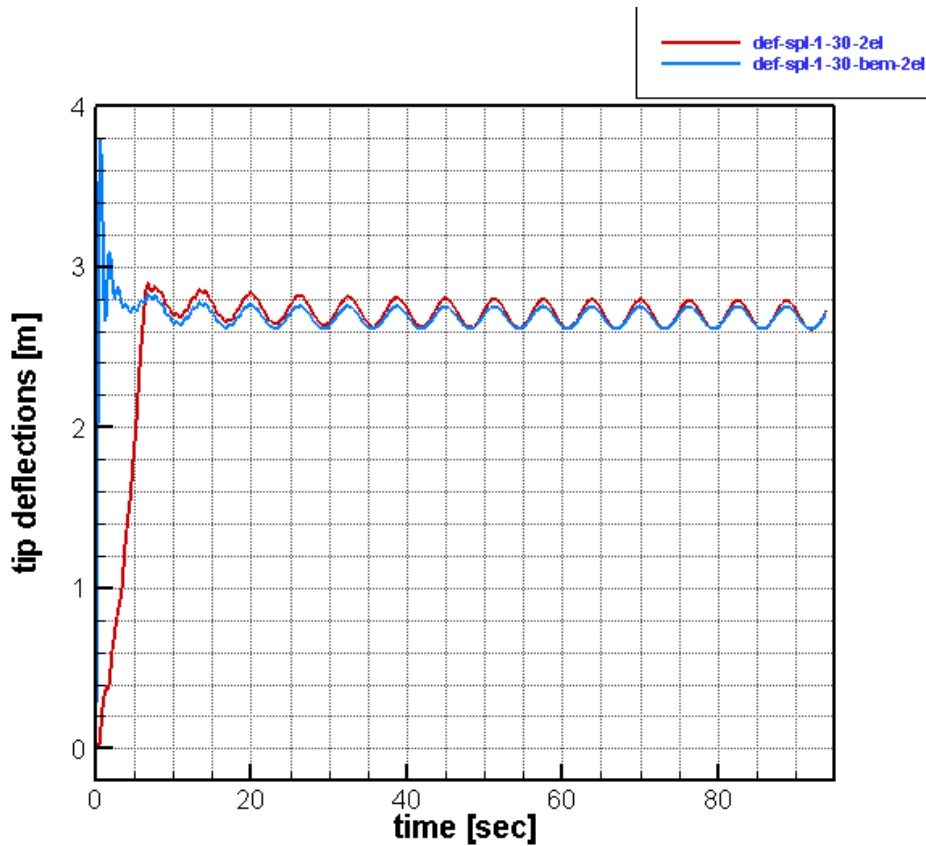


Σχήμα 4.10 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

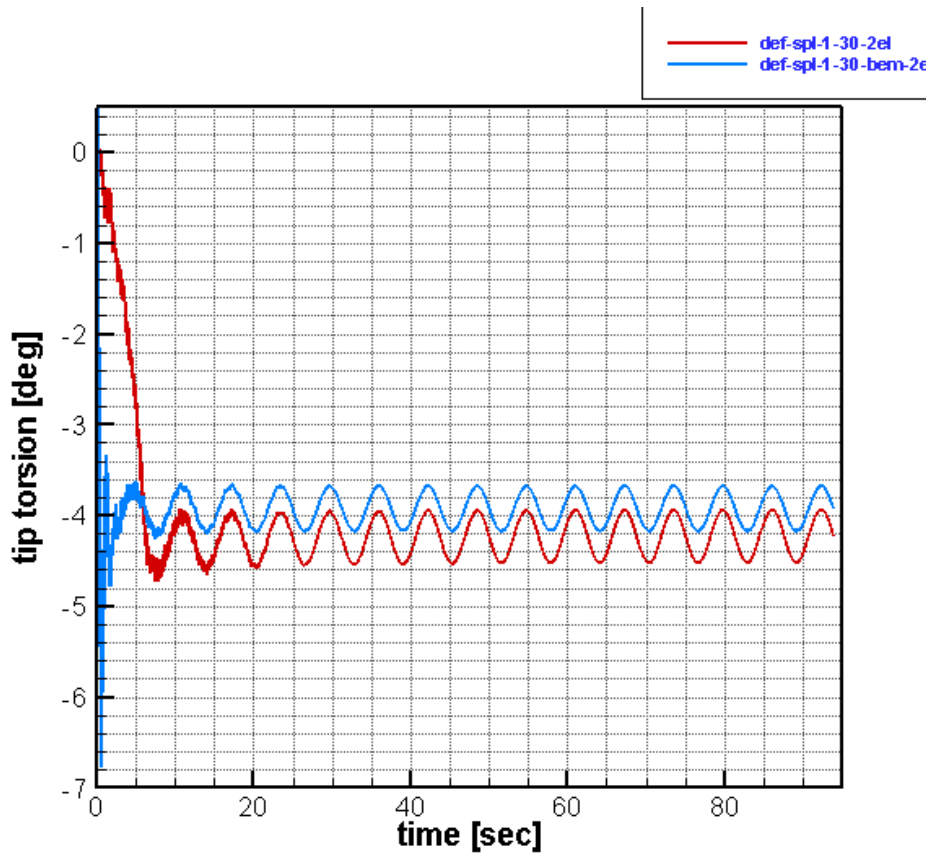


Σχήμα 4.11 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

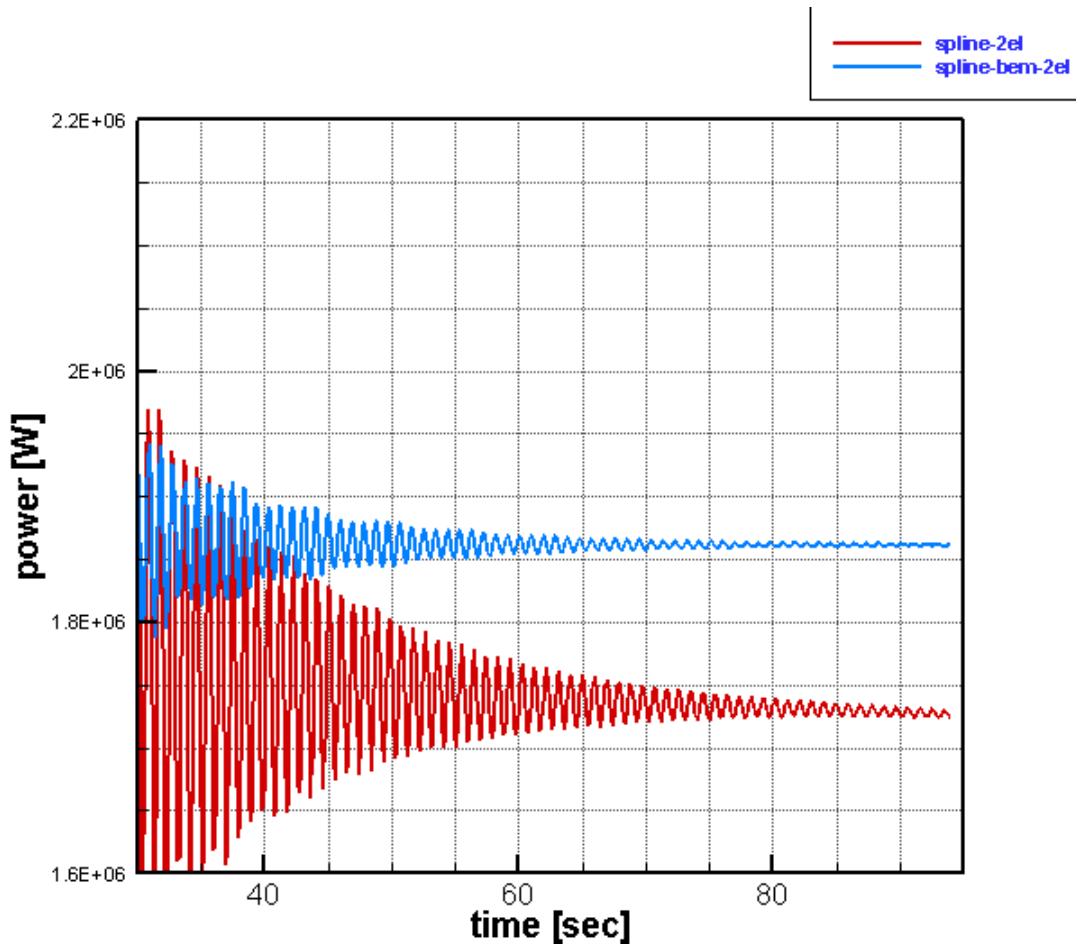
## Σύγκριση επί του spline



Σχήμα 4.12 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.13 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.14 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

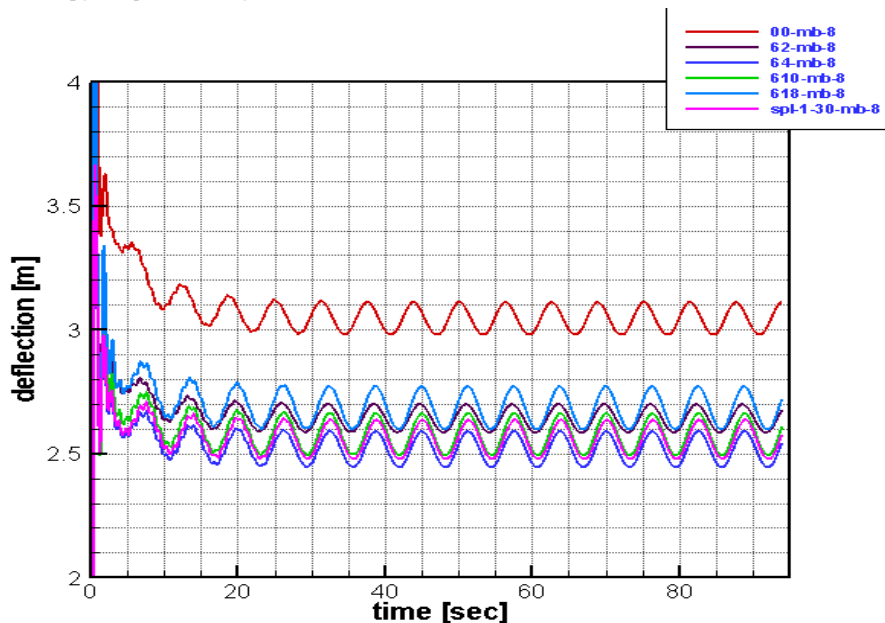
aeroelastic genuvp 2nd order - gast 2nd order		
	Power [W]	%
genuvp straight	1980000	0
gast straight	1925000	-2,78
	Power [W]	%
genuvp 64	1790000	0
gast 64	1865000	4,19
	Power [W]	%
genuvp spline	1730000	0
gast spline	1860000	7,51

Ο πίνακας παρουσιάζει την αποδιδόμενη ισχύ που υπολογίζουν οι δύο κώδικες και τις ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των τιμών που παράγουν.

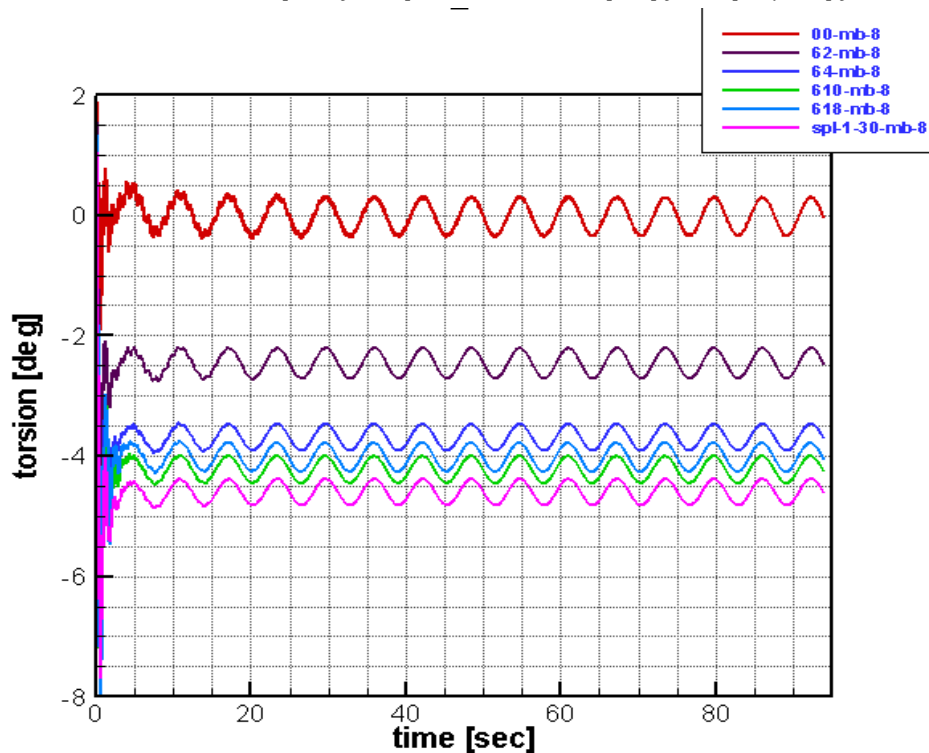
## 4.6 Συγκρίσεις GAST multibody

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δύο ταχύτητες ανέμου, 8m/s και 11m/s, με βάση τη μέθοδο multibody (Timoshenko), φαίνονται παρακάτω.

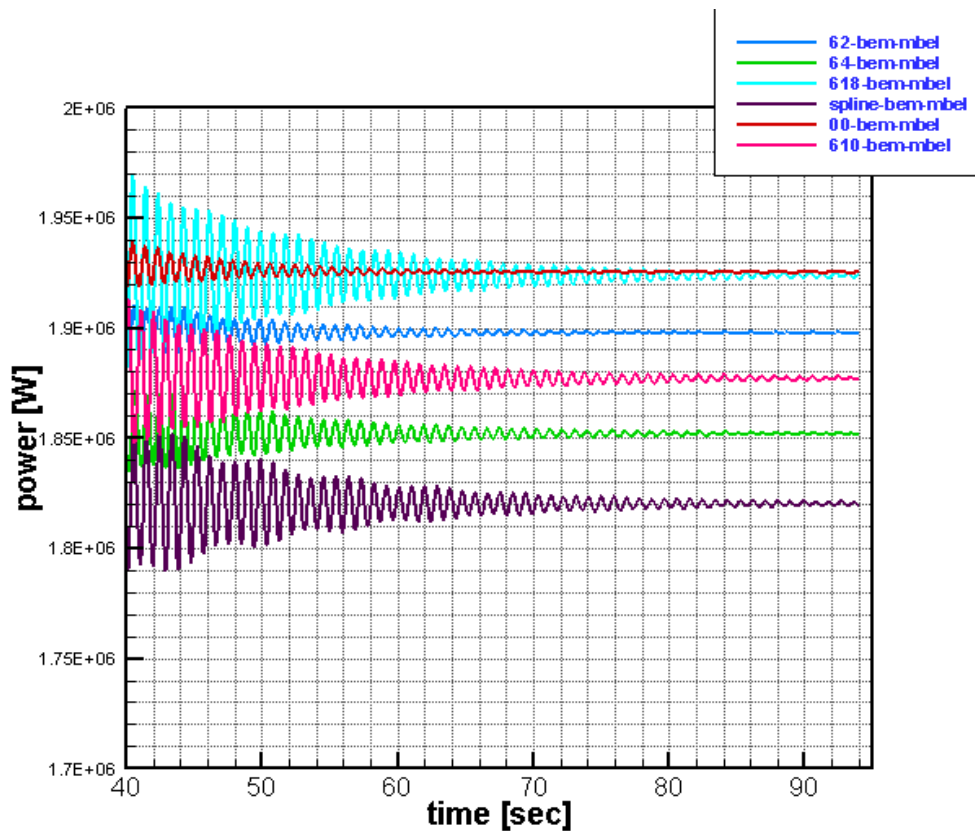
Για ταχύτητα ανέμου 8m/s.



Σχήμα 4.15 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.16 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

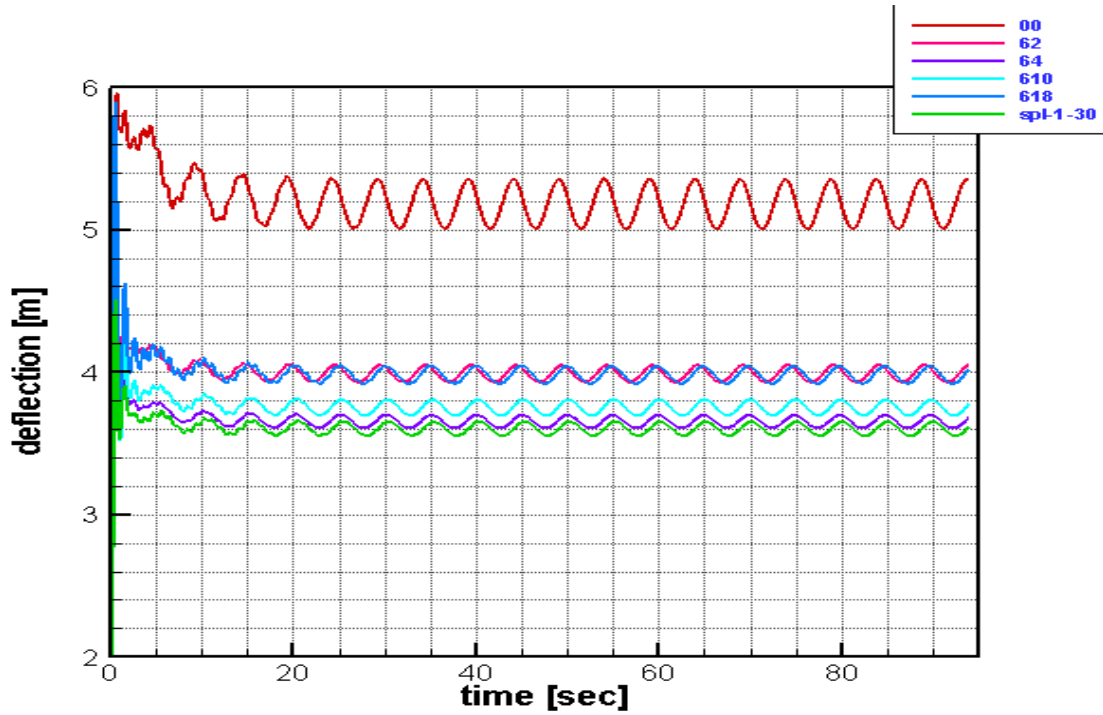


Σχήμα 4.17 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

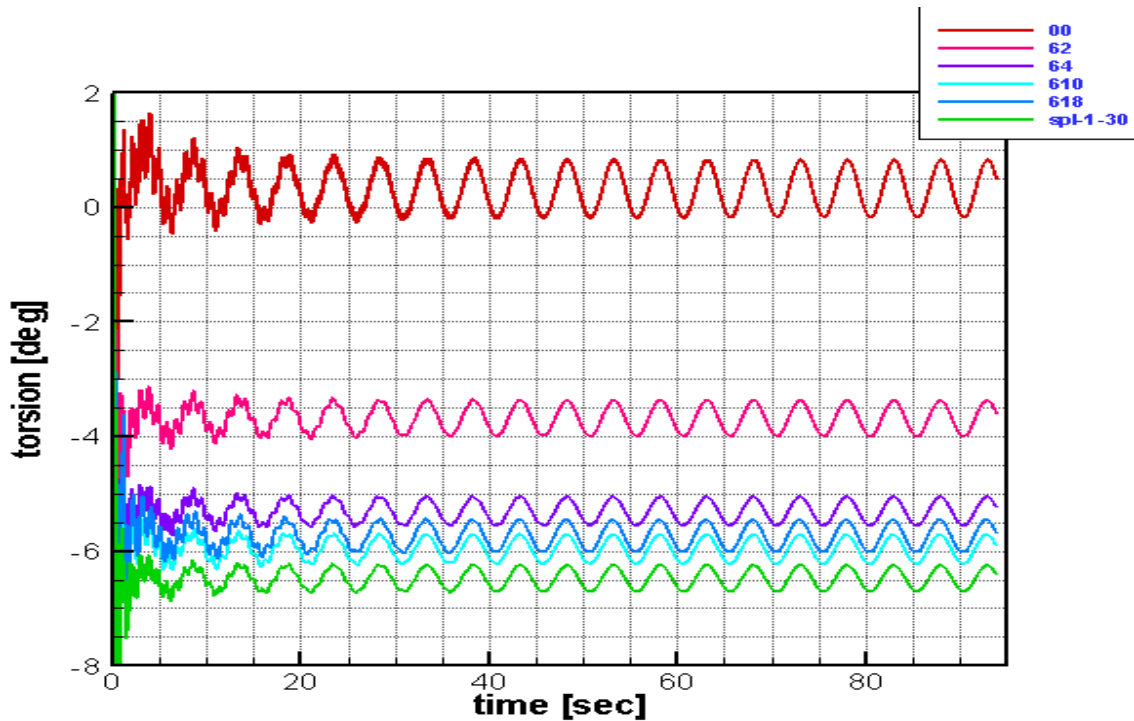
aeroelastic gast multibody		
	Power [W]	%
straight	1925000	0
a=6, b=2	1920000	-0,26
a=6, b=4	1850000	-3,90
a=6, b=10	1875000	-2,60
a=6, b=18	1925000	0
spline	1820000	-5,45

Στον πίνακα φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς κάθε πτερύγωσης, όταν η ροή έχει ομαλοποιηθεί, όπως επίσης και το ποσοστό κτά το το οποίο αυτή είναι μειωμένη σε σχέση με την ισχύ που αποδίδεται από την ευθεία πτερύγωση.

Για ταχύτητα ανέμου 11m/s.

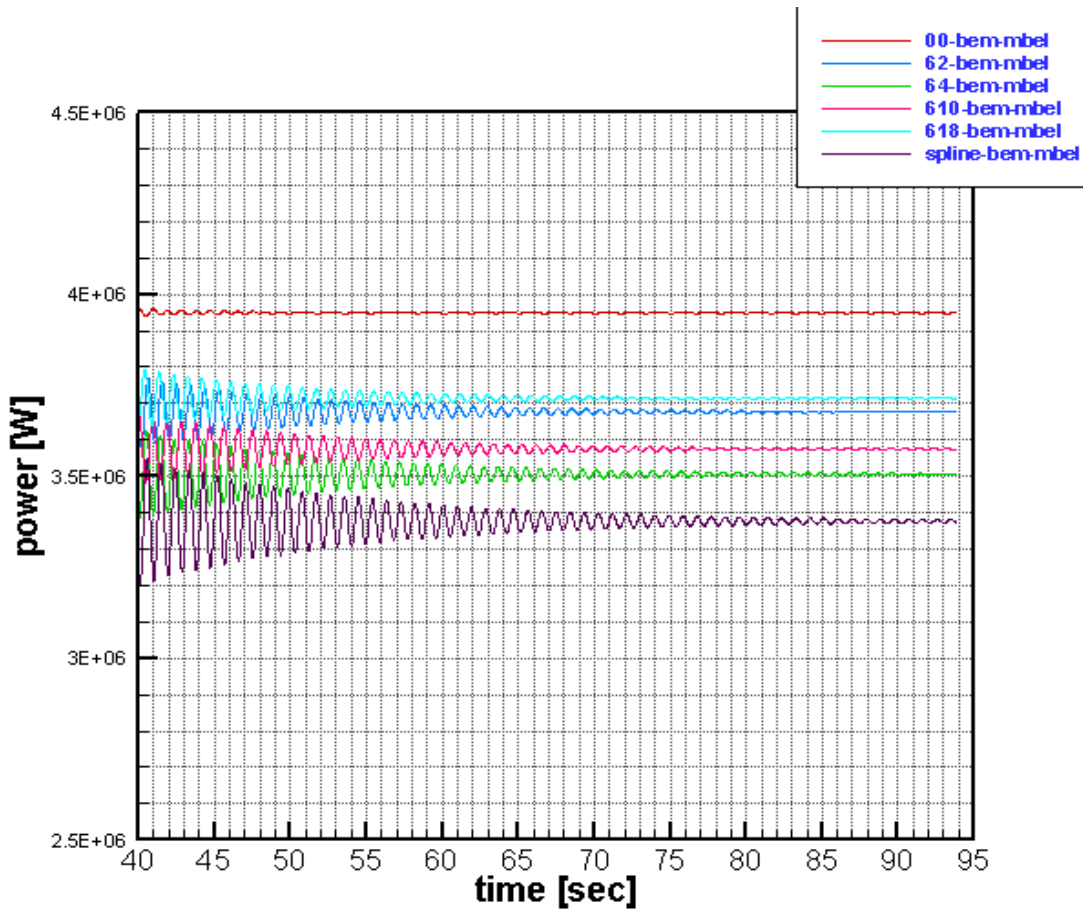


Σχήμα 4.18 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.19 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.





Σχήμα 4.20 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

aeroelastic gast multibody		
	power	%
straight	3950000	0
a=6, b=2	3680000	-6,83
a=6, b=4	3500000	-11,39
a=6, b=10	3580000	-9,367
a=6, b=18	3700000	-6,329
spline	3390000	-14,18

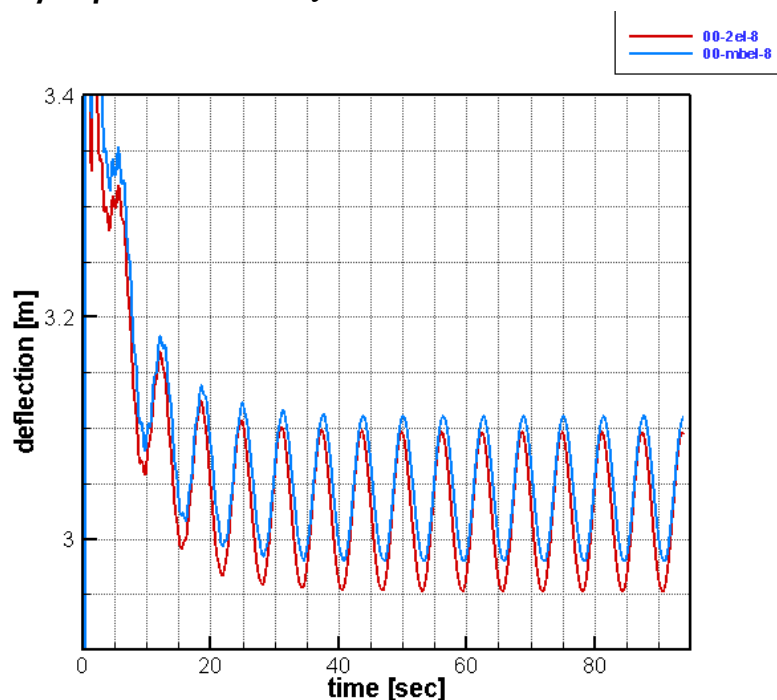
Στον πίνακα φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς κάθε πτερύγωσης, όταν η ροή έχει ομαλοποιηθεί, όπως επίσης και το ποσοστό κτά το το οποίο αυτή είναι μειωμένη σε σχέση με την ισχύ που αποδίδεται από την ευθεία πτερύγωση.

## 4.7 Σύγκριση GAST 2nd order – GAST multibody

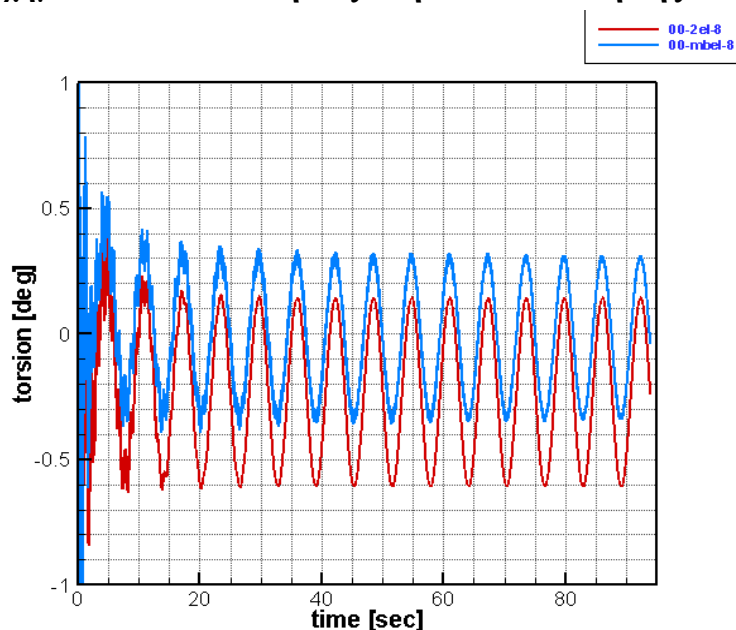
Στο κομμάτι αυτό γίνεται άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών μεθόδων επί ιδίων περιπτώσεων. Αυτό που παρατηρούμε είναι όταν εξετάζουμε pre-swerpt πτερύγια και μάλιστα όσο η καμπυλότητα αυτών αυξάνει, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων αποκλίνουν αισθητά.

*Ταχύτητα ανέμου 8m/s.*

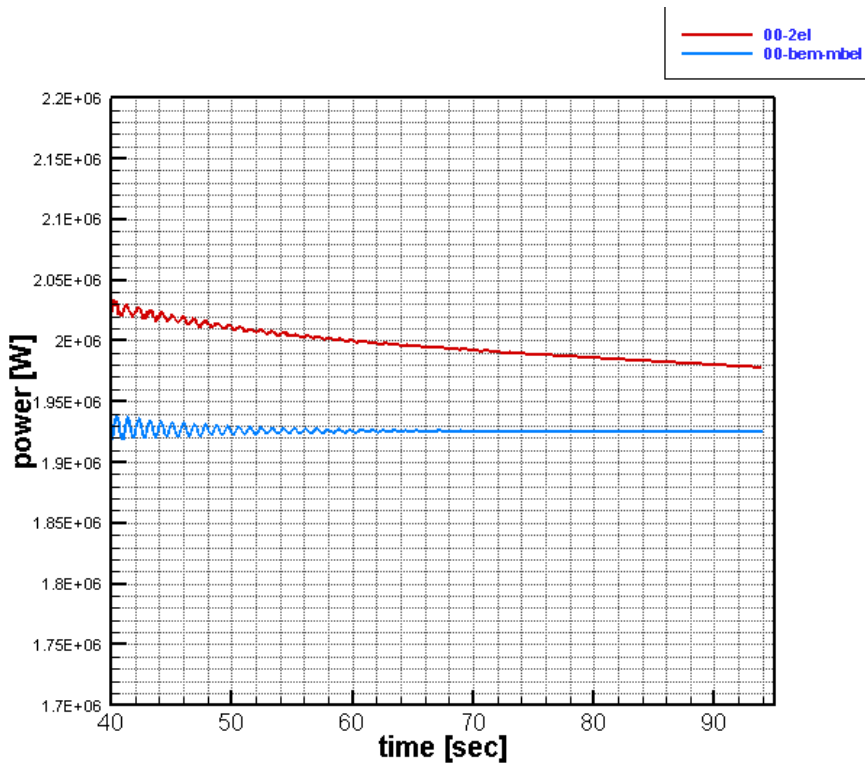
*Σύγκριση επί του ευθούς.*



Σχήμα 4.21 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.

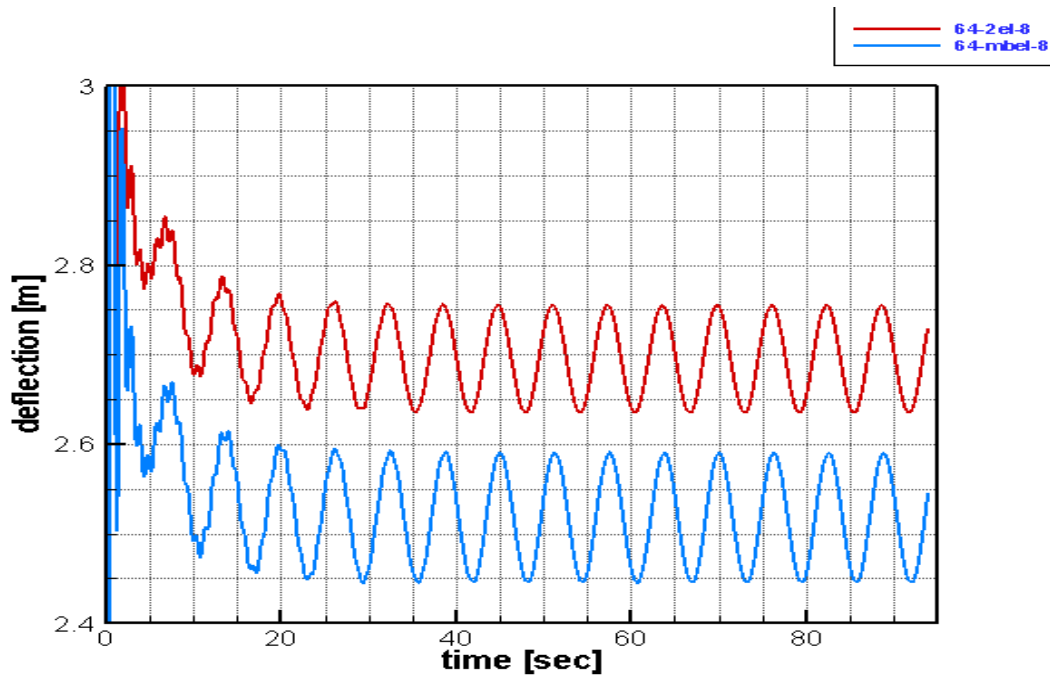


Σχήμα 4.22 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

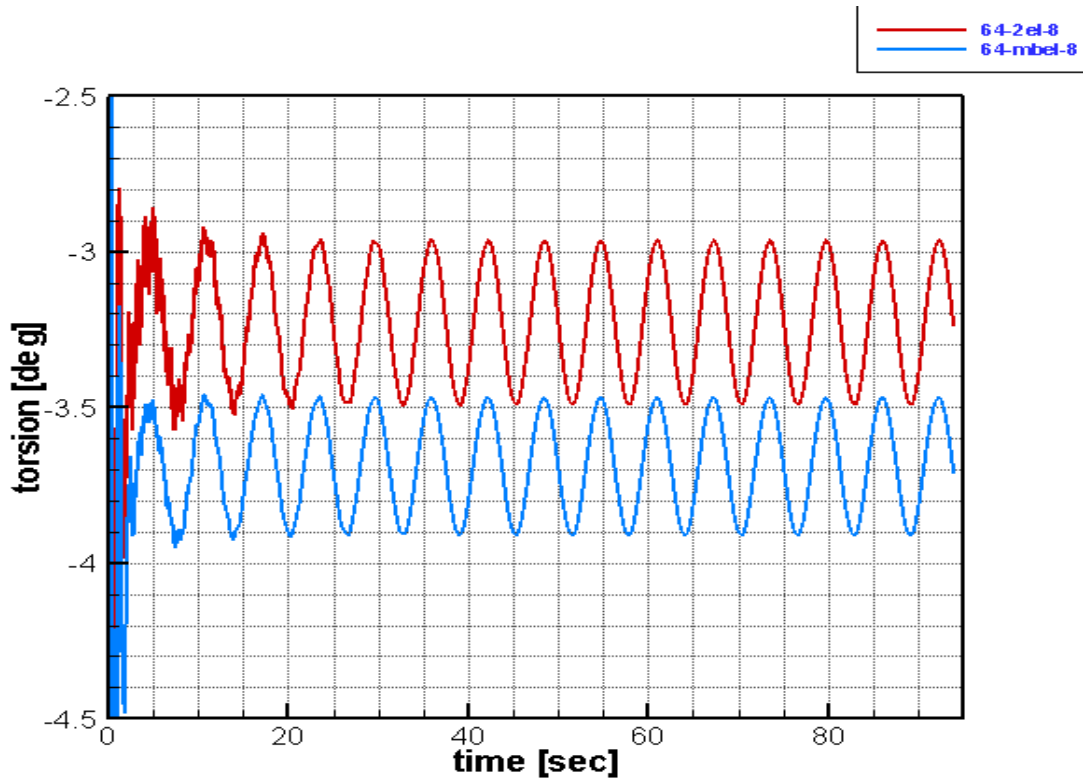


Σχήμα 4.23 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

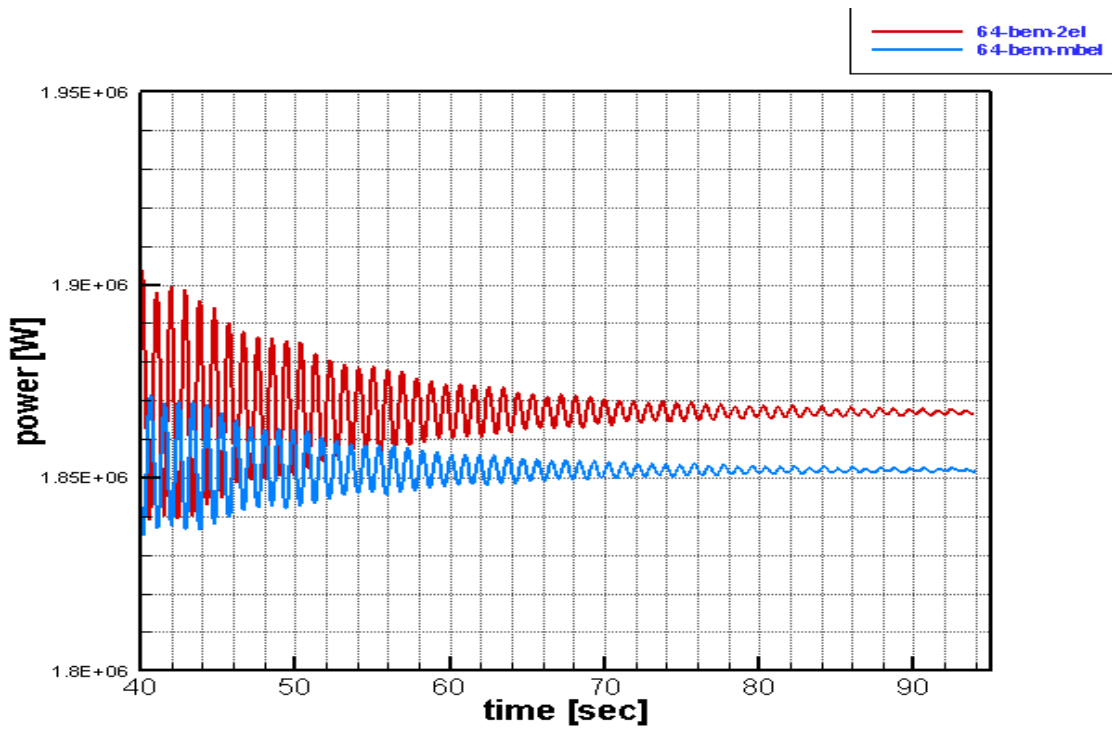
Σύγκριση επί του  $(a=6, b=4)$



Σχήμα 4.24 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της πτερύγισης συναρτήσει του χρόνου.

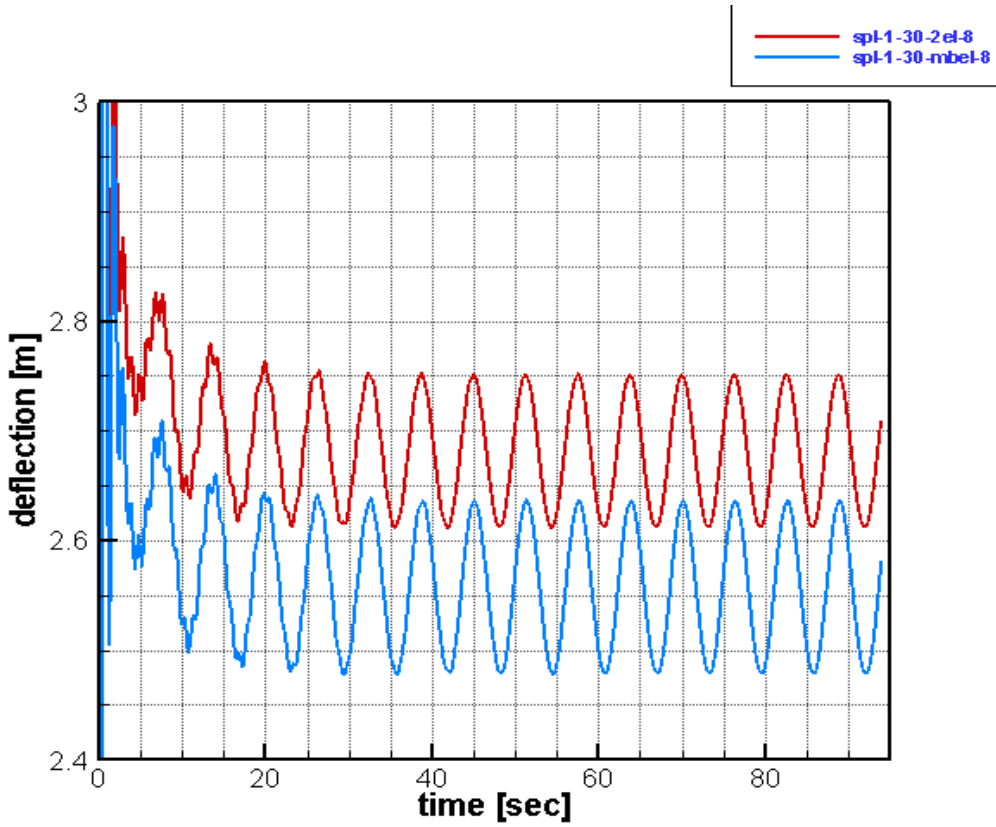


Σχήμα 4.25 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

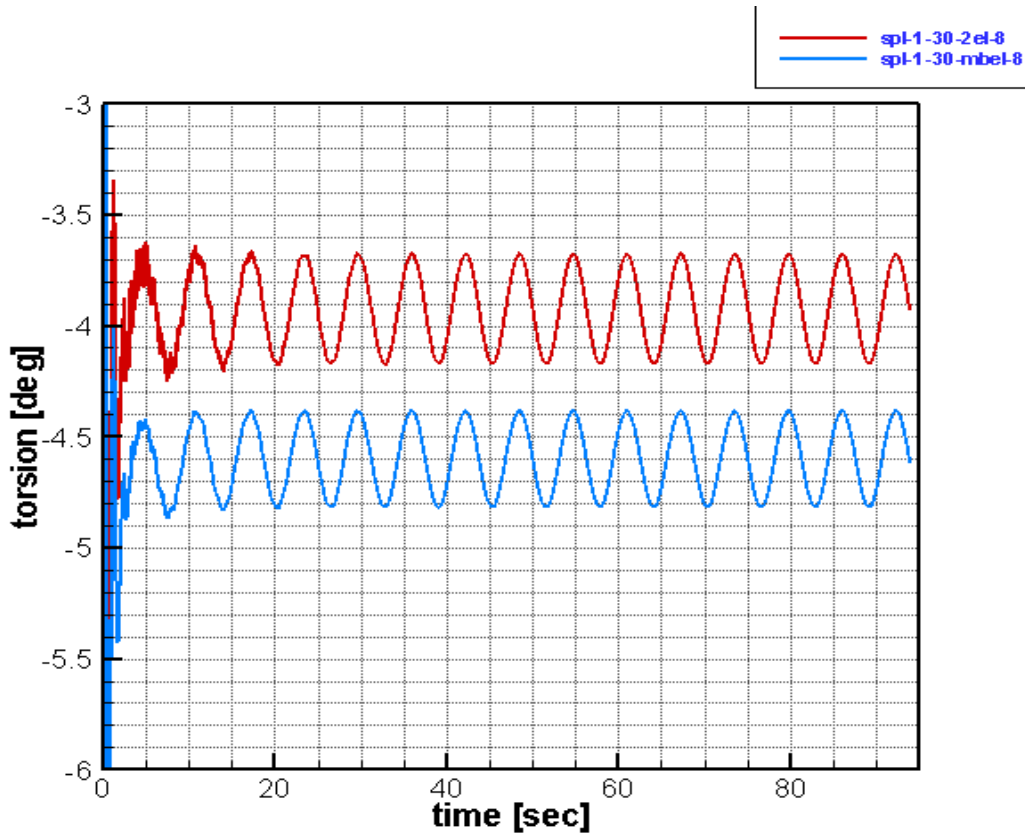


Σχήμα 4.26 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

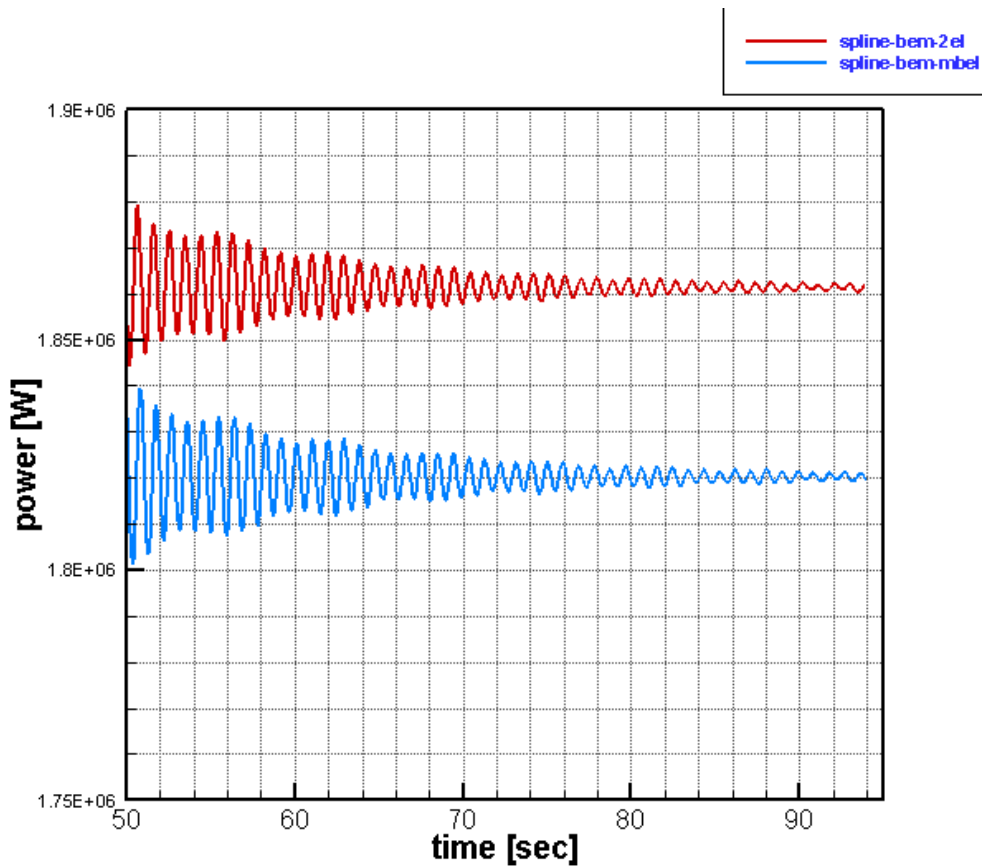
## Σύγκριση επί του spline



Σχήμα 4.27 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.28 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.



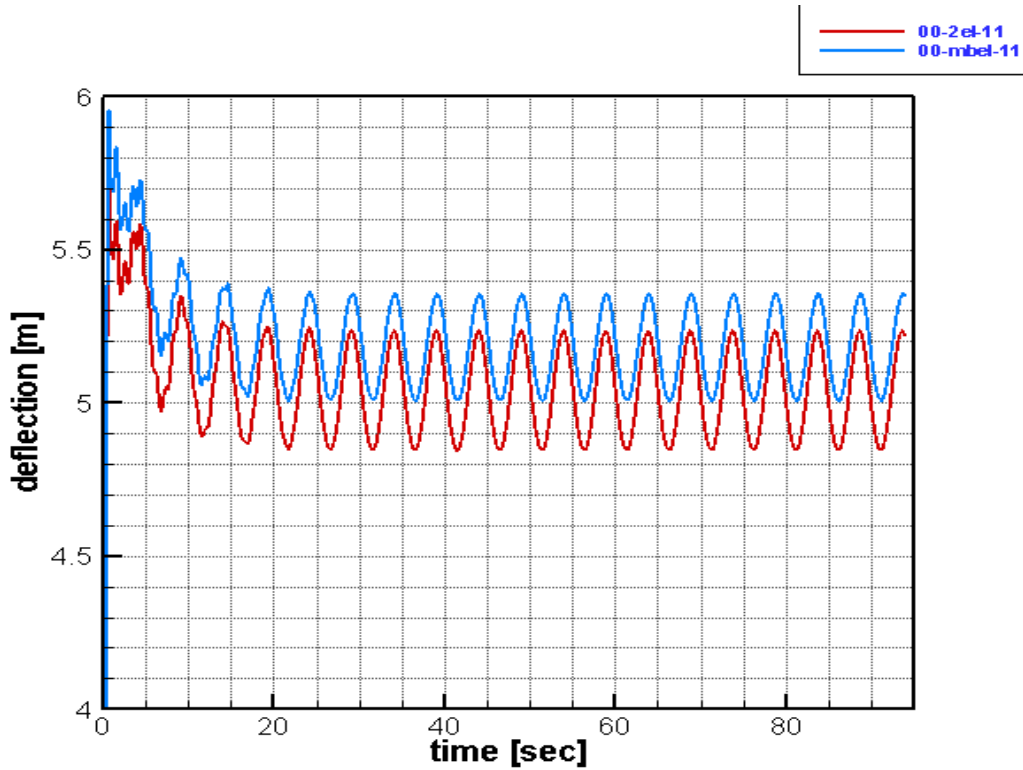
Σχήμα 4.29 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

aeroelastic gast 2nd order- gast multibody		
	Power [W]	%
2nd order straight	1925000	0
multibody straight	1925000	0
	Power [W]	%
2nd order 64	1865000	0
multibody 64	1850000	-0,80
	Power [W]	%
2nd order spline	1860000	0
multibody spline	1820000	-2,15

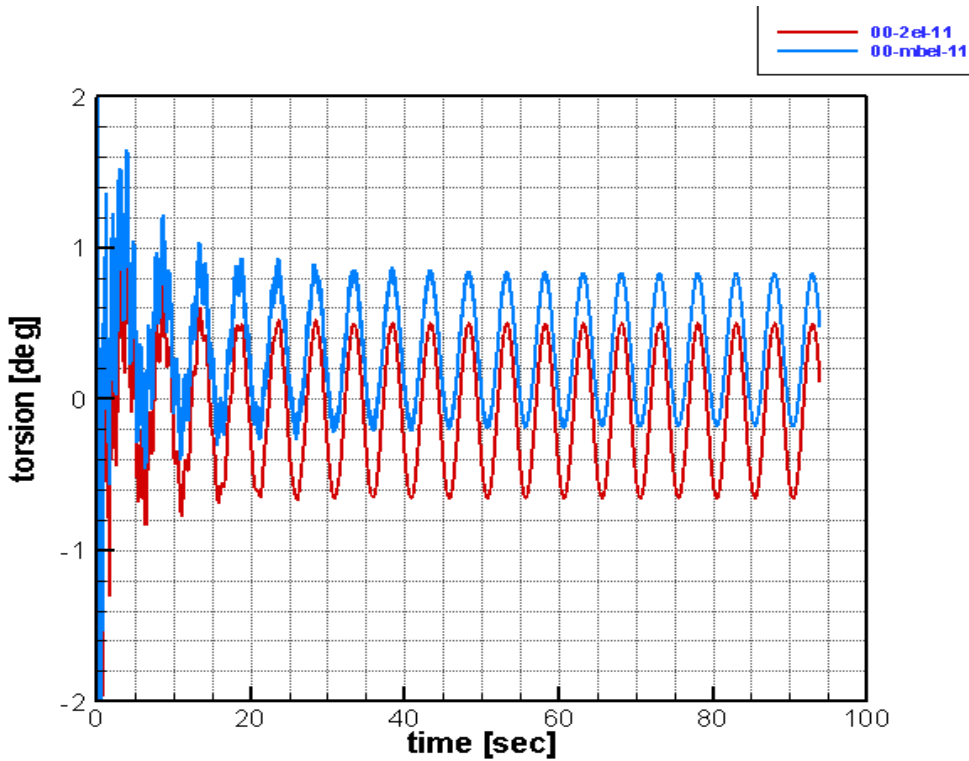
Ο πίνακας παρουσιάζει την αποδιδόμενη ισχύ που υπολογίζουν οι δύο κώδικες και τις ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των τιμών που παράγουν.

Ταχύτητα ανέμου 11m/s.

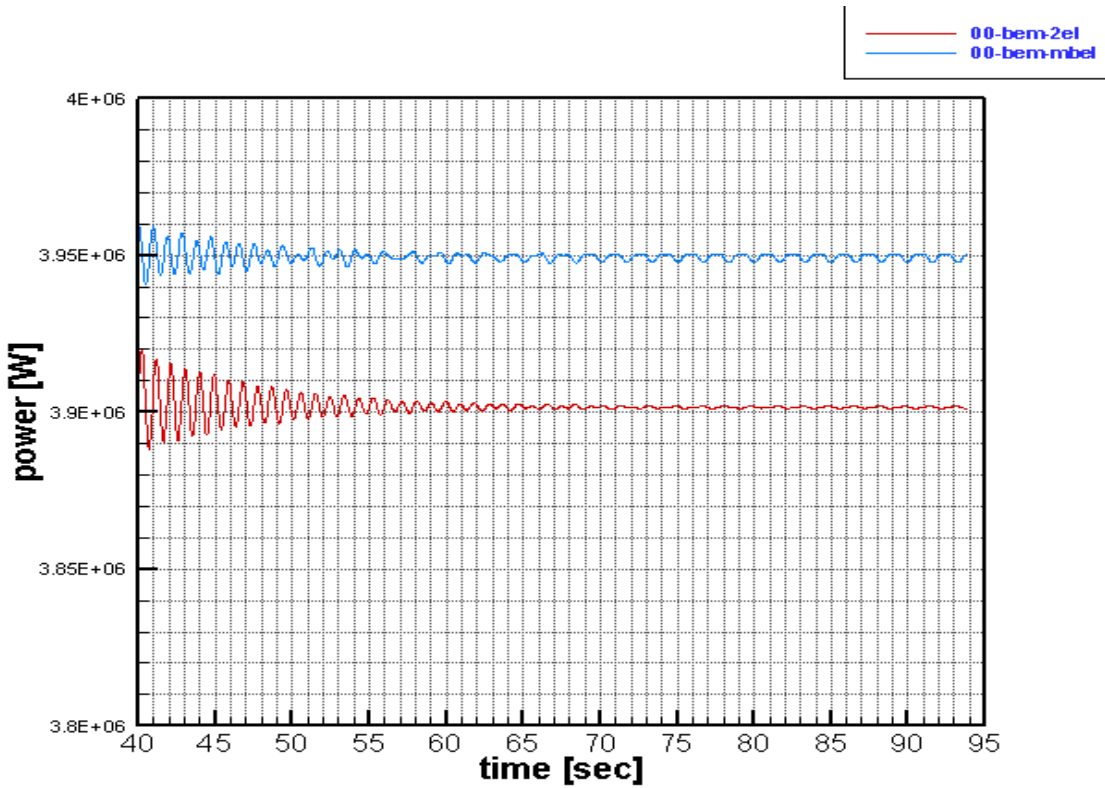
Σύγκριση επί του ευθούς.



Σχήμα 4.30 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.

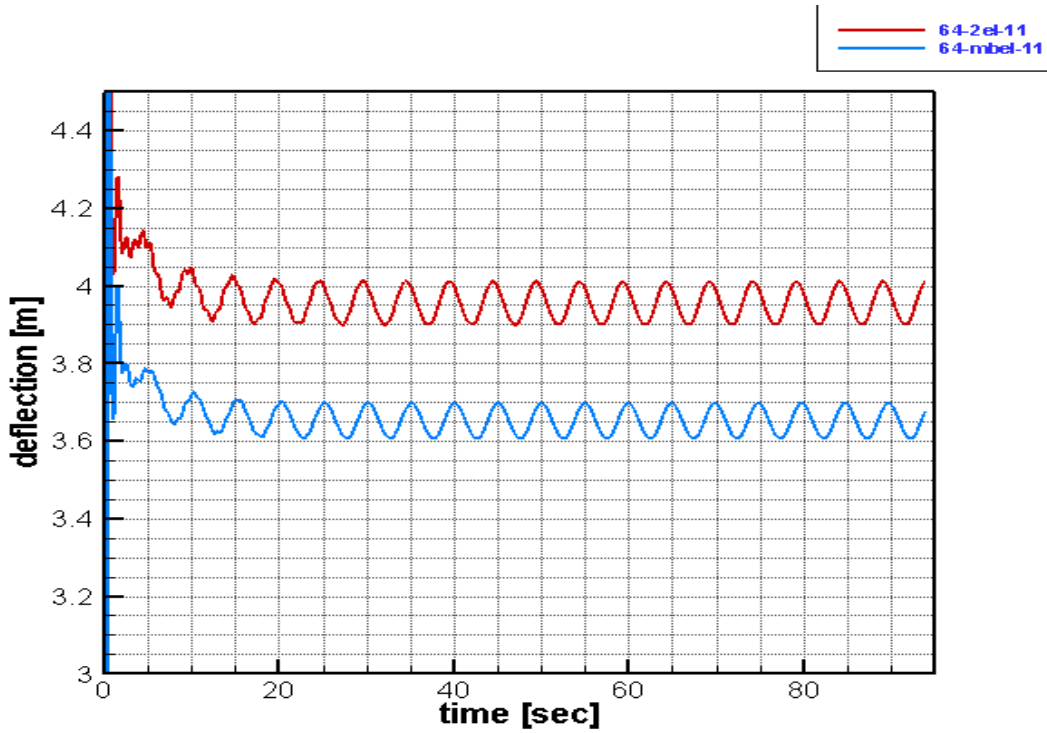


Σχήμα 4.31 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.



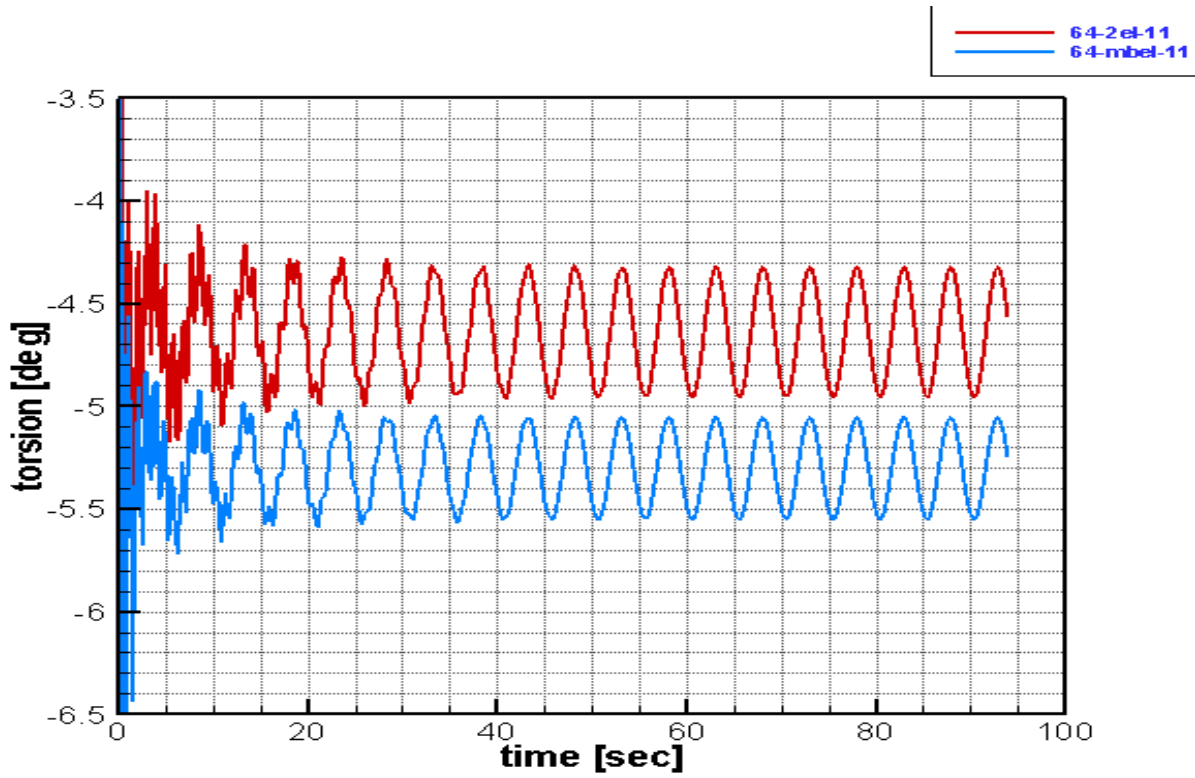
Σχήμα 4.32 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

Σύγκριση επί του  $(a=6, b=4)$

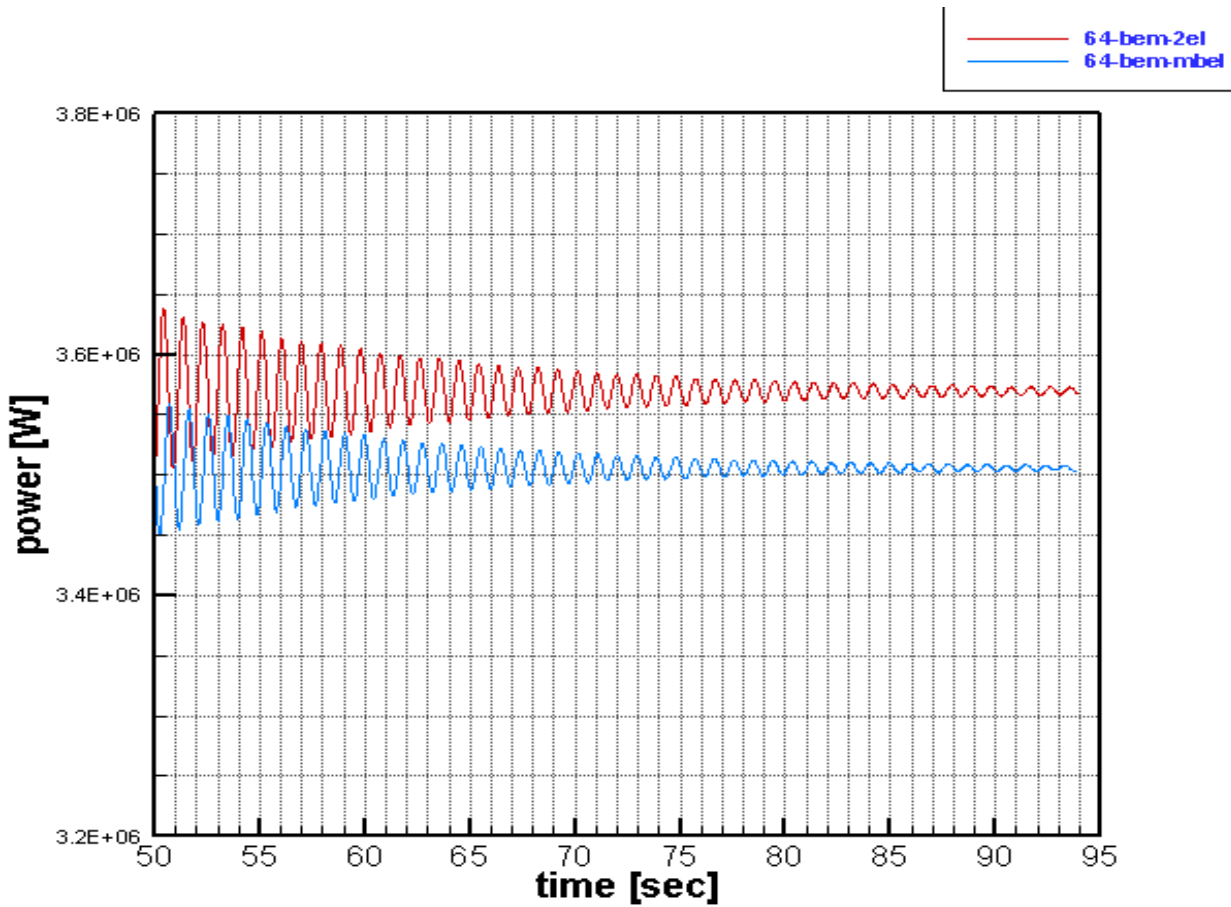


Σχήμα 4.33 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.



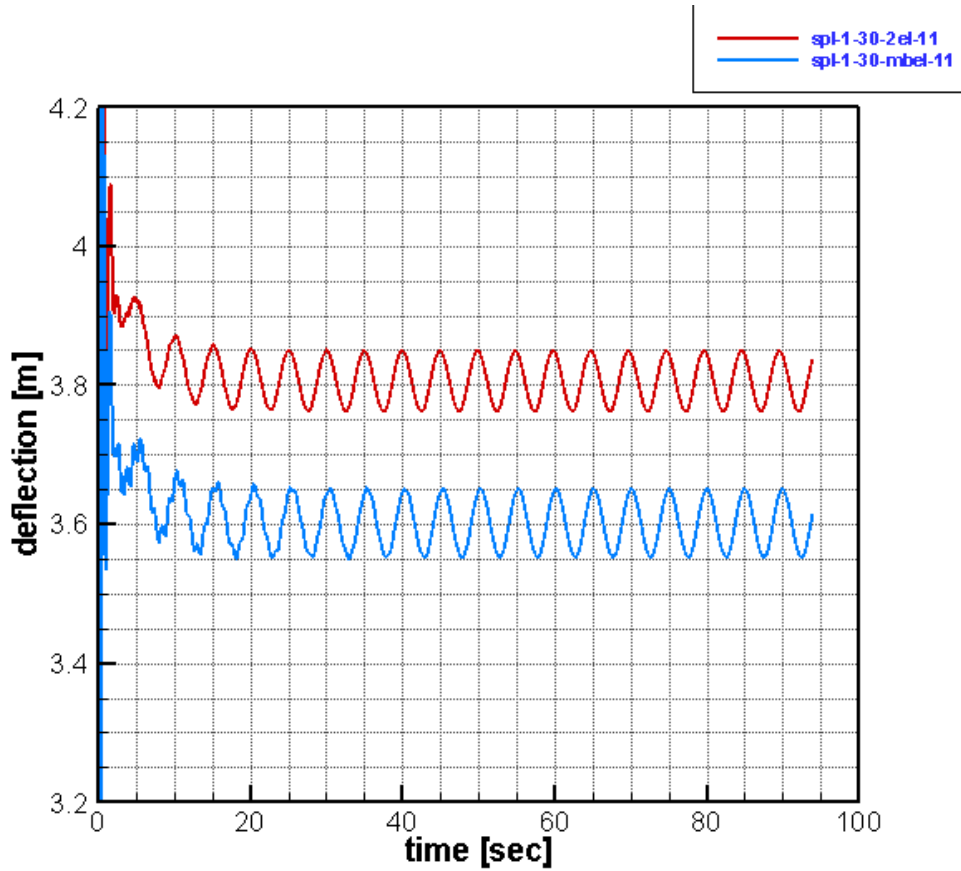


Σχήμα 4.34 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.

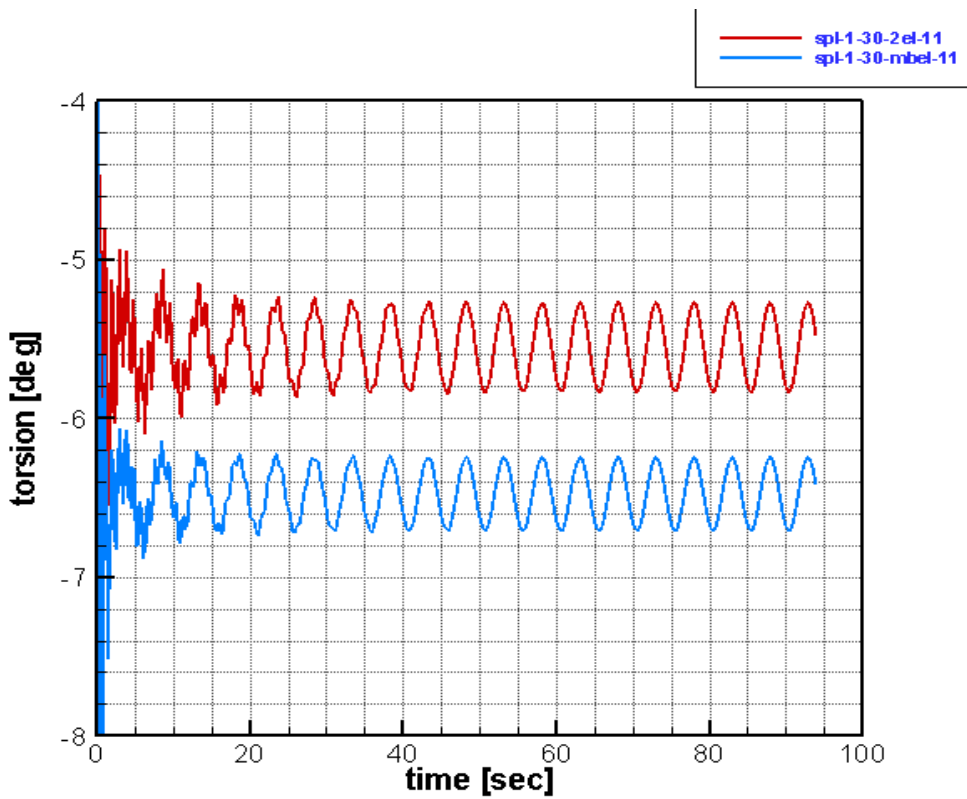


Σχήμα 4.35 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

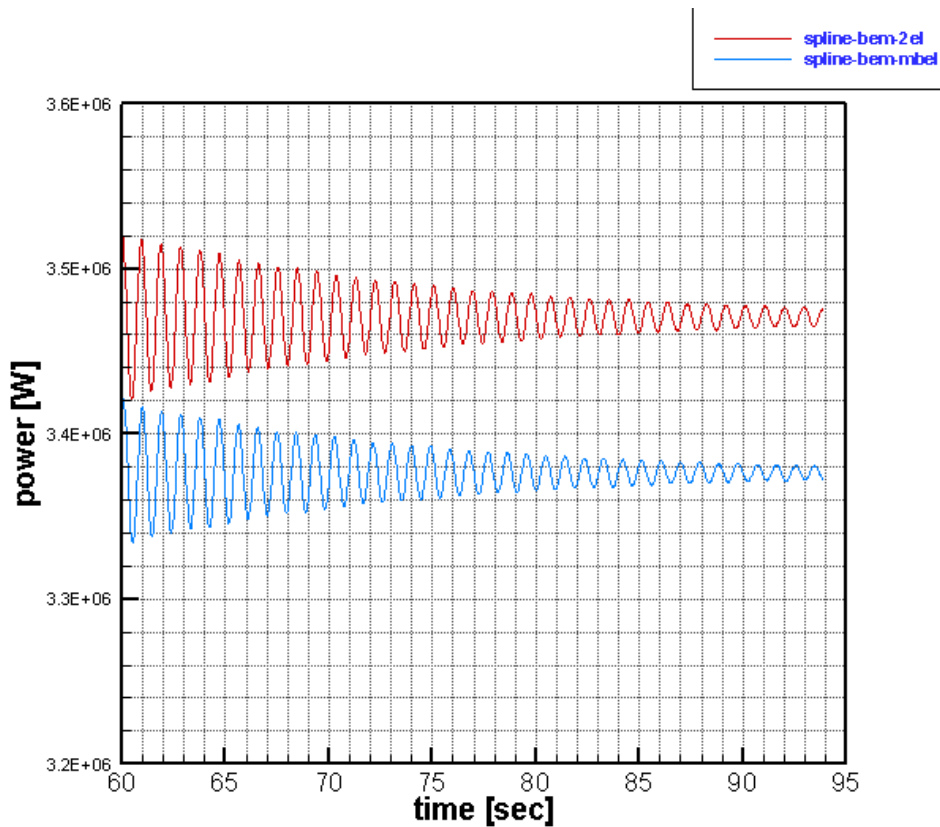
Σύγκριση επί του spline



Σχήμα 4.36 Μετακινήσεις στην κατεύθυνση της περύγισης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.37 Στρέψη συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.38 Ισχύς συναρτήσει του χρόνου.

aeroelastic gast 2nd order- gast multibody		
	Power [W]	%
2nd order straight	3900000	0
multibody straight	3950000	1,28
	Power [W]	%
2nd order 64	3850000	0
multibody 64	3500000	-9,09
	Power [W]	%
2nd order spline	3480000	0
multibody spline	3390000	-2,59

**Σχόλιο :** Η μέθοδος multibody περιμένουμε να μας δώσει πιο έγκυρα αποτελέσματα. Ωστόσο, υστερεί αισθητά σε σχέση με την second order, όσον αφορά την ταχύτητα των προσομοιώσεων. Ουσιαστικά, με τη σύγκριση των δύο μεθόδων, εξετάζουμε κατά πόσο μπορούμε να εκτελούμε 2<sup>nd</sup> order προσομοιώσεις με ασφάλεια ως προς τα αποτελέσματά μας.

# 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΕΡΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΑΝΕΜΟ

---

## 5.1 Αεροελαστική συμπεριφορά πτερυγίων ανάλογα με τη γεωμετρία τους απέναντι σε στοχαστικό αέρα.

Στο τελευταίο αυτό κομμάτι της εργασίας εξετάζουμε και πάλι αεροελαστικά τη συμπεριφορά των πτερυγίων, θεωρώντας αυτή τη φορά στοχαστικό άνεμο. Ωστόσο, προσομοιώνεται η συμπεριφορά ολόκληρης της μηχανής μαζί με το σύστημα ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, επιλέξαμε τέσσερις γεωμετρίες πτερυγίων ως πιο αντιπροσωπευτικές και μελετήσαμε τη συμπεριφορά τους απέναντι σε μη σταθερό άνεμο (στοχαστικό). Οι γεωμετρίες αυτές είναι 1. το ευθύ πτερύγιο, 2. το ( $a=6$ ,  $b=4$ ) πτερύγιο, 3. το ( $a=6$ ,  $b=18$ ) πτερύγιο και 4. το spline πτερύγιο. Ο κώδικας που χρησιμοποιούμε εμπεριέχει υπορουτίνα η οποία παρέχει στοχαστικό πεδίο ροής ανέμου στο δίσκο του δρομέα. Γίνονται προσομοιώσεις για έξι διαφορετικές πραγματοποιήσεις ανέμου που αφορούν διαφορετικά στοχαστικά χαρακτηριστικά ανέμου. Αυτό γίνεται ώστε να εξασφαλίζουμε εγκυρότερο στατιστικό αποτέλεσμα, το οποίο επάγεται ως μέση τιμή των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε μία εκ των έξι περιπτώσεων.

## 5.2 Βασικά σημεία ελέγχου

Τα σημεία που εξετάζουμε σε αυτό το κομμάτι και αναφέρονται σε ισοδύναμα φορτία \*\* είναι :

### 1<sup>ο</sup> μέρος

- Η συνολική δύναμη thrust που ασκείται στον άξονα του κλωβού (rotor thrust force at hub).
- Η ροπή στρέψης στον άξονα του δρομέα (shaft torque).
- Η καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της πνοής του ανέμου (Blade flapwise).
- Η καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της περιστροφής τους (Blade edgewise).
- Η πλευρική ροπή του ανέμου στη βάση του πύργου (tower bottom lateral).
- Η ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στη βάση του πύργου (tower bottom fore-aft).
- Η ροπή απόκλισης στη βάση του πύργου (tower bottom yaw moment).

- Η ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στην κορυφή του πύργου (tower top fore-aft).
- Η ροπή απόκλισης στην κορυφή του πύργου (tower top yaw moment).

\* Ροπή απόκλισης ονομάζεται η ροπή στρέψης που ασκείται στη νασέλα η οποία προκαλείται από την περιστροφή των πτερυγίων.

\*\* Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί τί ορίζουμε «ισοδύναμα φορτία» : Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούμε, δίνουν σαν αποτέλεσμα, για κάθε μέγεθος, μία χρονοσειρά, δηλαδή τη μεταβολή του μεγέθους με το χρόνο. Εμείς μεταφράζουμε τη χρονοσειρά αυτή σε μία αντίστοιχη συχνότητας 1Hz και σταθερού πλάτους όσο είναι απαιτούμενο ώστε οι δύο χρονοσειρές να είναι ισοδύναμες όσον αφορά τη συνολική κόπωση που επιφέρουν. Το σταθερό αυτό πλάτος είναι διαφορετικό για κάθε ταχύτητα ανέμου. Τα διαγράμματα του πρώτου μέρους απεικονίζουν τα ισοδύναμα φορτία σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου.

## 2<sup>ο</sup> μέρος

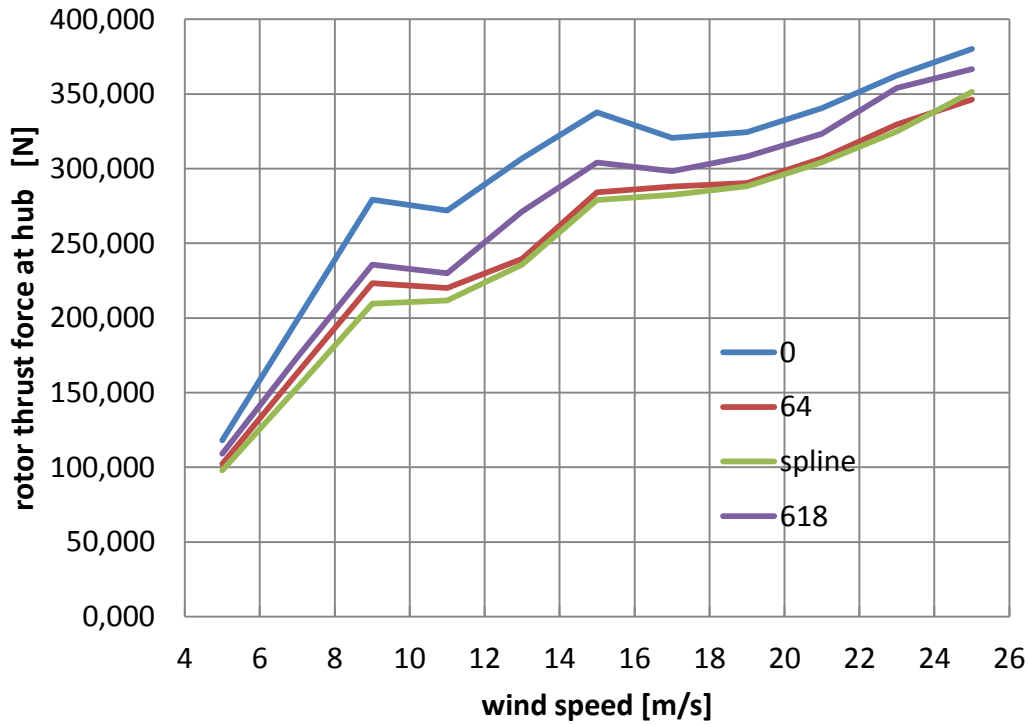
Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στη χρονοσειρά που παίρνουμε ως άμεσο αποτέλεσμα των προσομοιώσεων και πιο συγκεκριμένα, στη μέση τιμή της, τα ολικά ακρότατά της και την τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή. Έτσι εξετάζουμε τα εξής μεγέθη :

- Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της πνοής του ανέμου (Blade flapwise).
- Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της περιστροφής τους (Blade edgewise).
- Η συνολική δύναμη thrust επάνω στην πτερύγωση.
- Η ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στη βάση του πύργου (tower bottom fore-aft).
- Η ροπή απόκλισης στην κορυφή του πύργου (tower top yaw moment).
- Η ροπή απόκλισης στη βάση του πύργου (tower bottom yaw moment).
- Η συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς (Power).
- Η ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό (Rotor speed).
- Η γωνία βήματος (Pitch angle).
- Οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε ένα από τα παραπάνω σημεία ελέγχου (sdv).

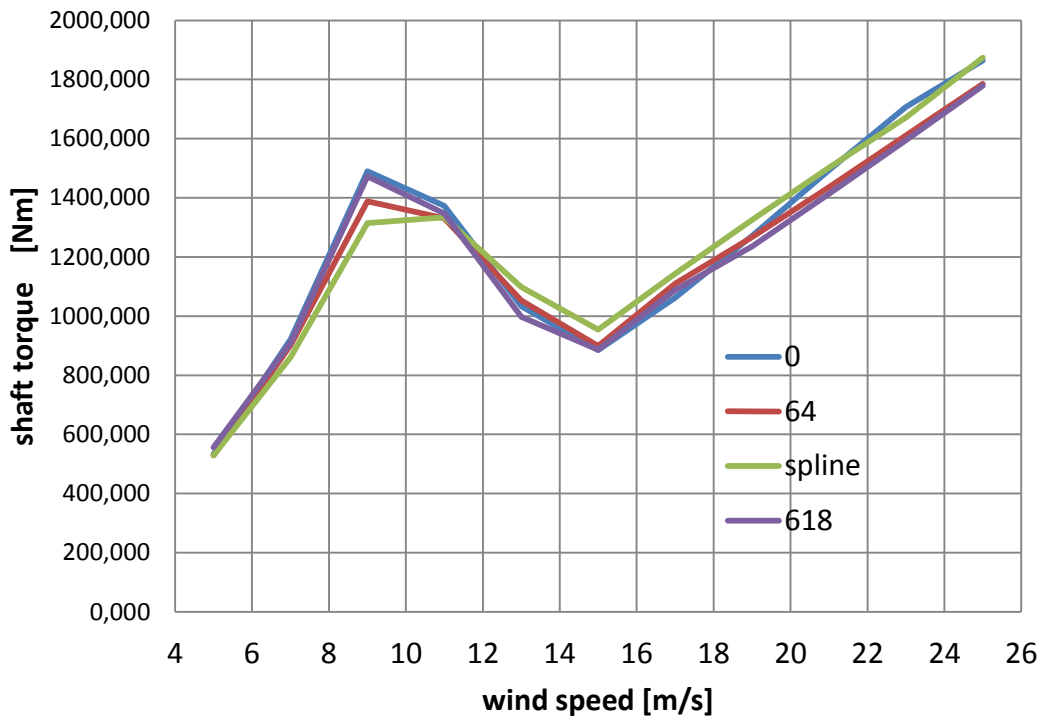
## 5.3 Συγκρίσεις GAST 2<sup>nd</sup> order

Επελέχθη ο κώδικας GAST σε συνδυασμό με τη μέθοδο 2<sup>nd</sup> order, ως πιο γρήγορο εργαλείο ανάμεσα σε αυτά που διαθέτουμε. Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων τα βασικά σημεία ελέγχου όπως αυτά προέκυψαν από τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων των έξι περιπτώσεων (γεννητριών τυχαίων αριθμών) για κάθε περίπτωση ταχύτητας.

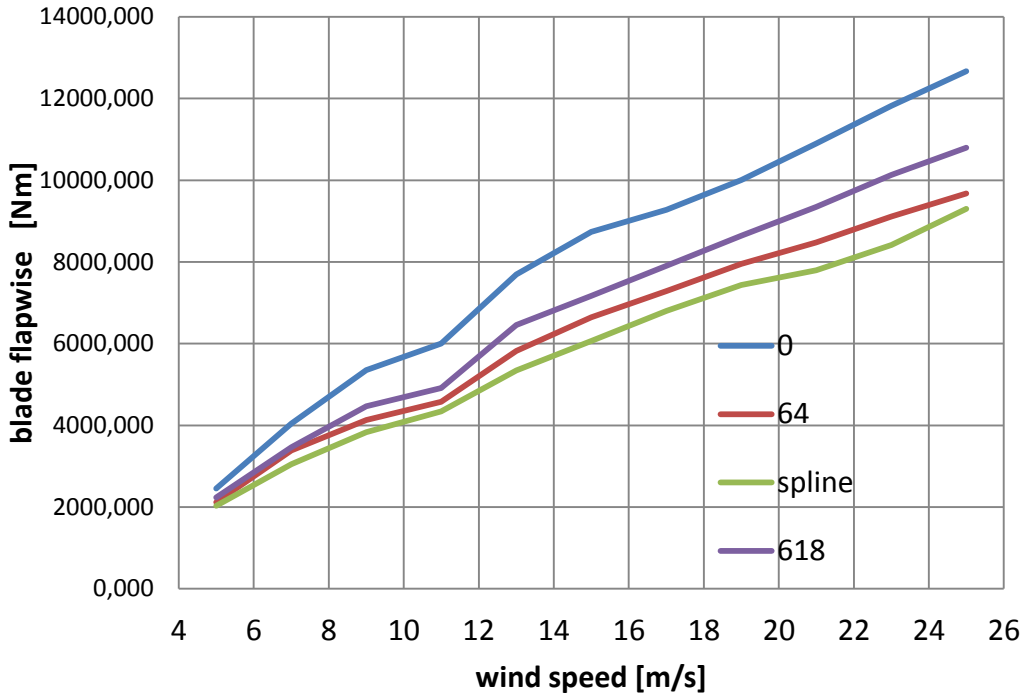
## 1<sup>ο</sup> μέρος



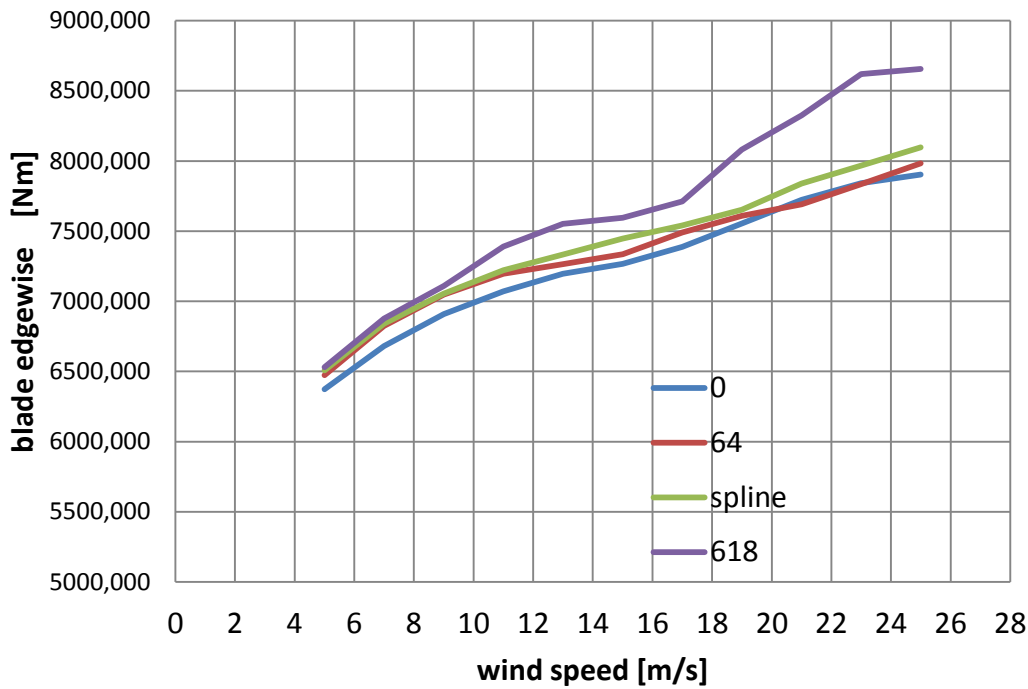
Σχήμα 5.1 Δύναμη ώσης συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



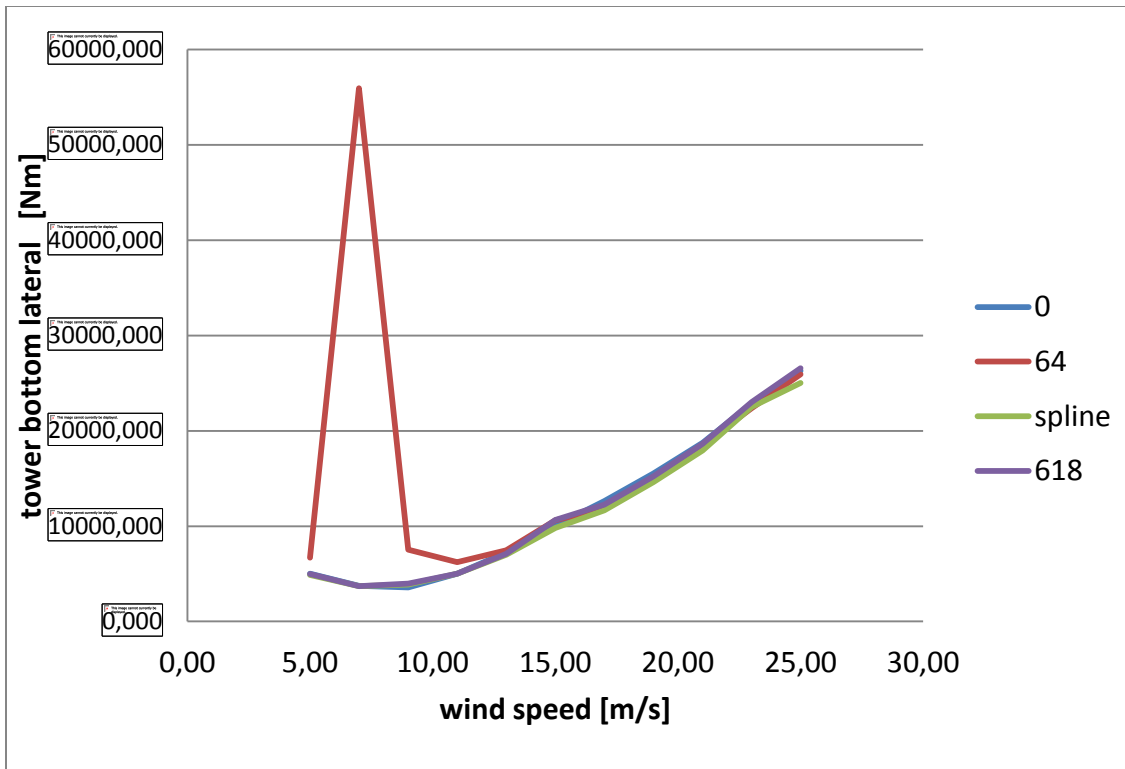
Σχήμα 5.2 Ροπή στρέψης στον άξονα του δρομέα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



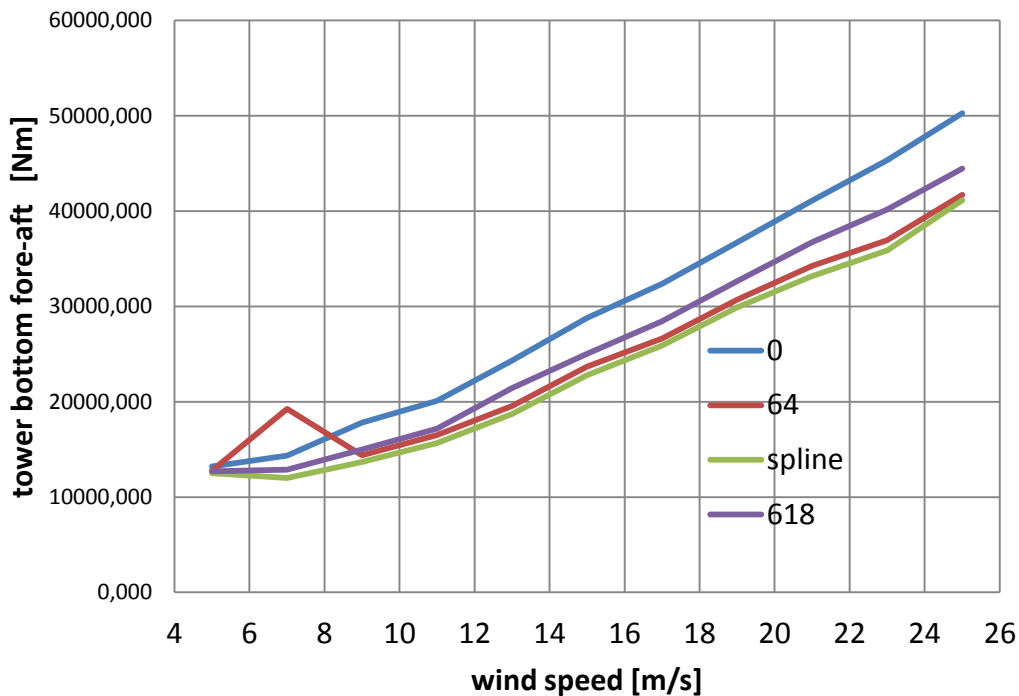
Σχήμα 5.3 Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της πνοής του ανέμου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.4 Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της περιστροφής τους συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

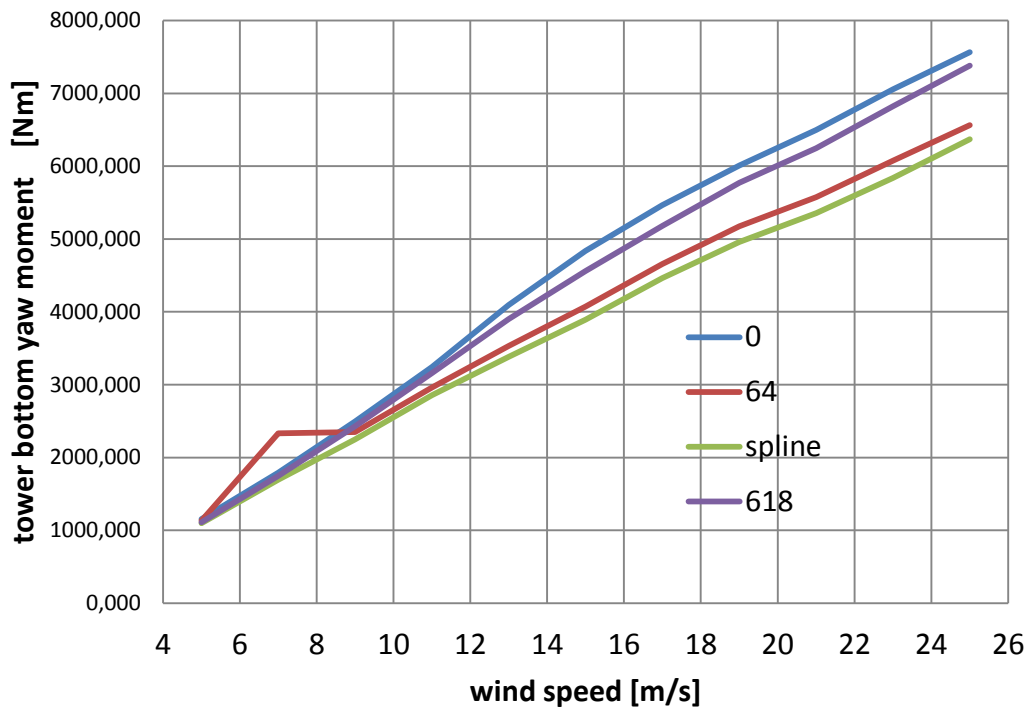


Σχήμα 5.5 Πλευρική ροπή του ανέμου στη βάση του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

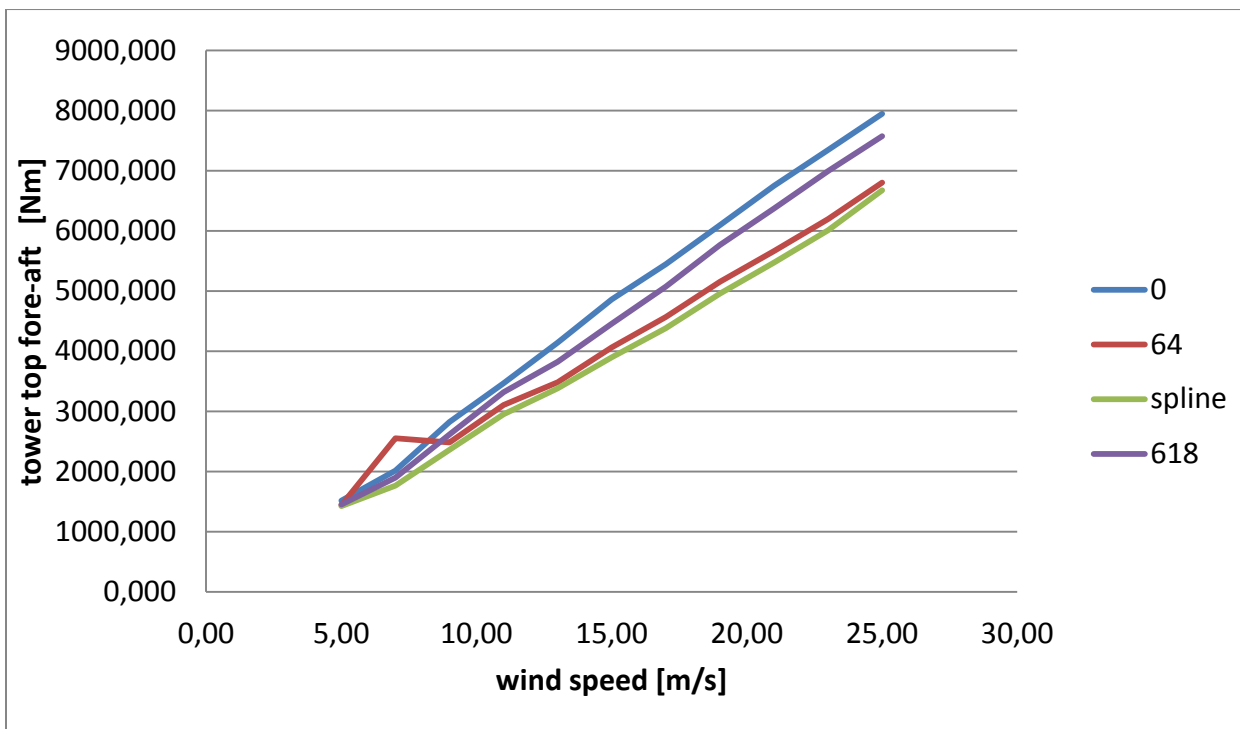


Σχήμα 5.6 Ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στη βάση του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

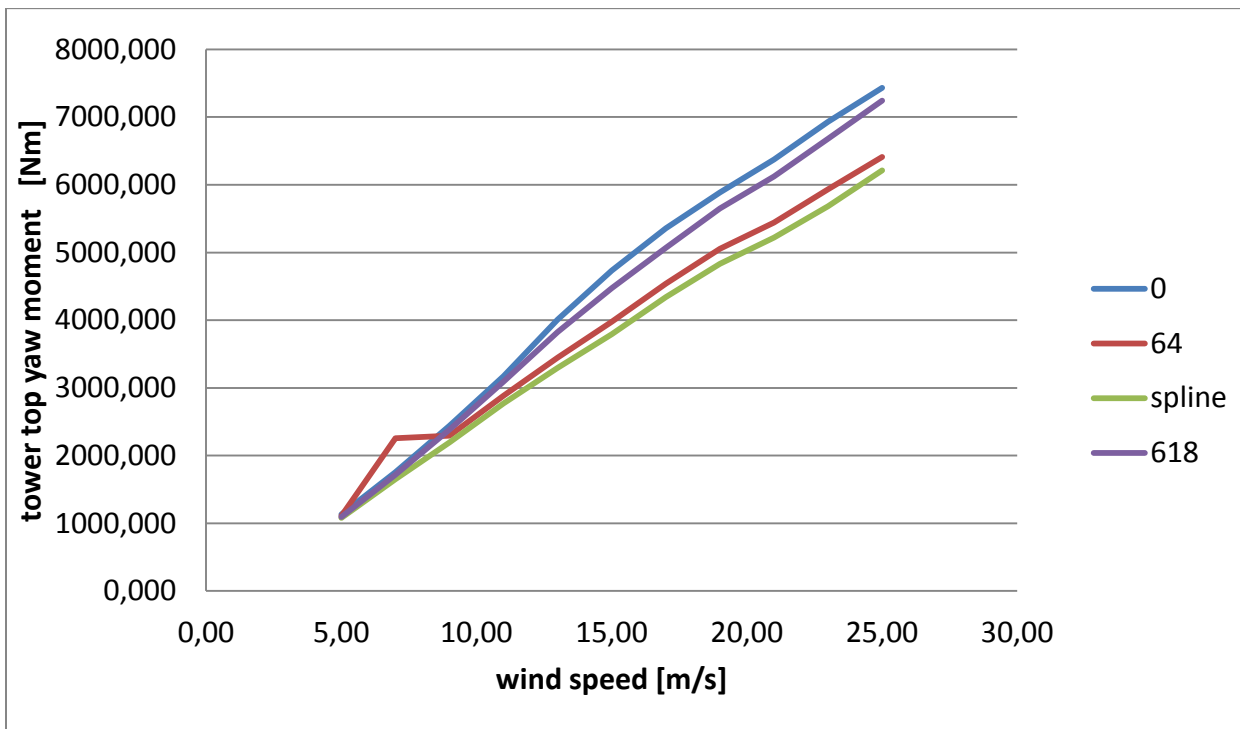




Σχήμα 5.7 Ροπή απόκλισης στη βάση του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



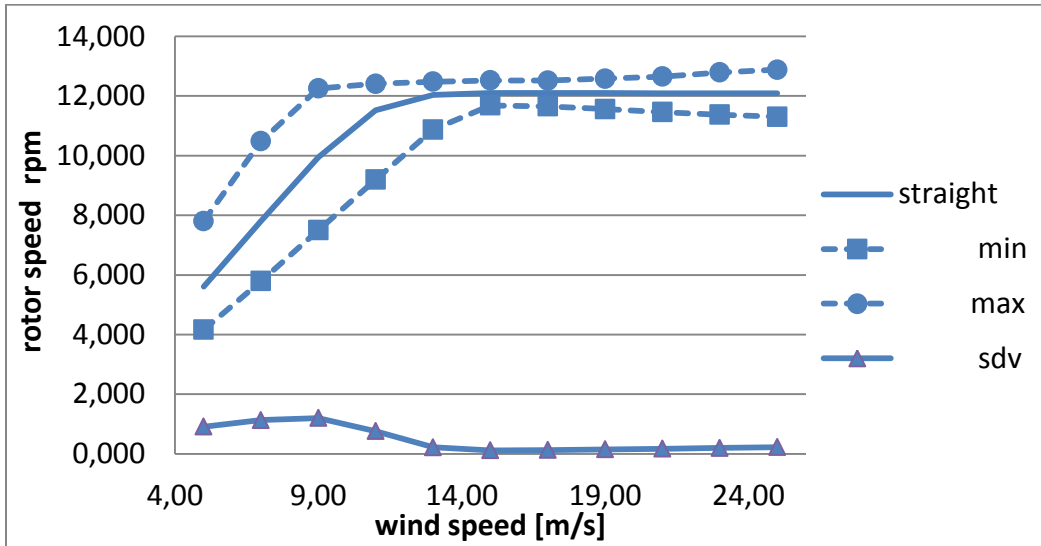
Σχήμα 5.8 Ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στην κορυφή του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



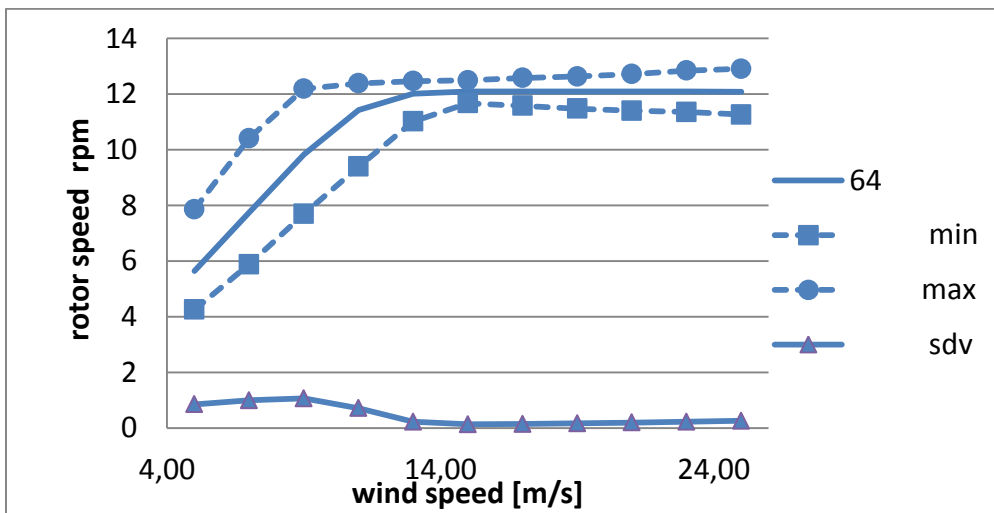
Σχήμα 5.9 Ροπή απόκλισης στην κορυφή του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

\*\* Σχόλιο : Η καμπυλότητα επηρεάζει αισθητά τη συμπεριφορά των Α/Γ, όσον αφορά τα σημεία ελέγχου που μας ενδιαφέρουν. Όσο η πρώτη αυξάνεται, μέχρι ενός σημείου, τόσο η δεύτερη αποκλίνει από αυτή της ευθείας Α/Γ. Από ένα σημείο κι έπειτα, όμως, μεγάλος δείκτης καμπυλότητας (απότομη αλλαγή κλίσης της πτέρυγας) συνεπάγεται σύγκλιση προς τη συμπεριφορά της ευθείας Α/Γ. Έτσι, ευθεία και (a=6, b=18) Α/Γ μας δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Ομοίως και για τις περιπτώσεις spline και (a=6, b=4). Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι πως η περίπτωση spline δίνει τις μικρότερες τιμές αποτελεσμάτων.

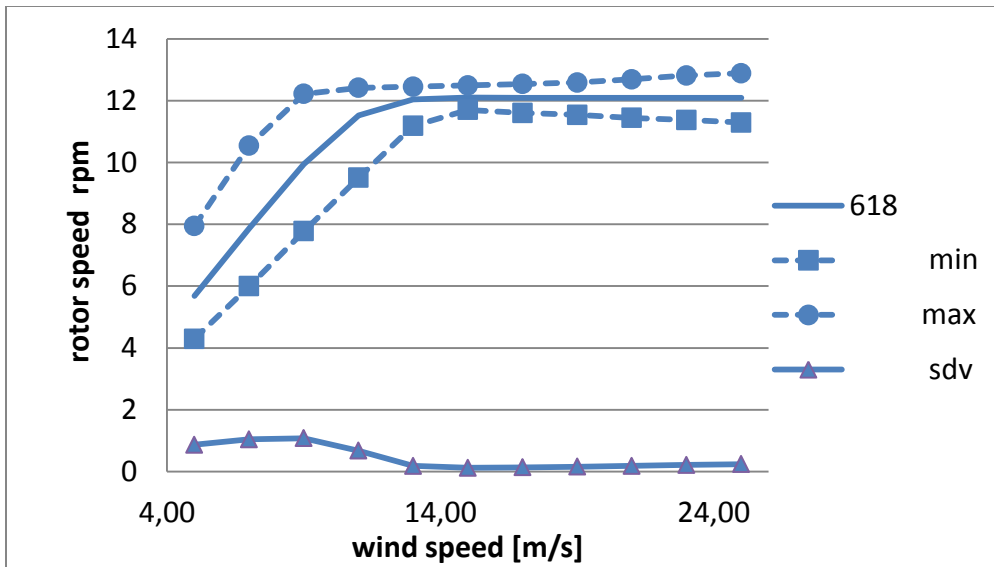
## 2<sup>ο</sup> μέρος



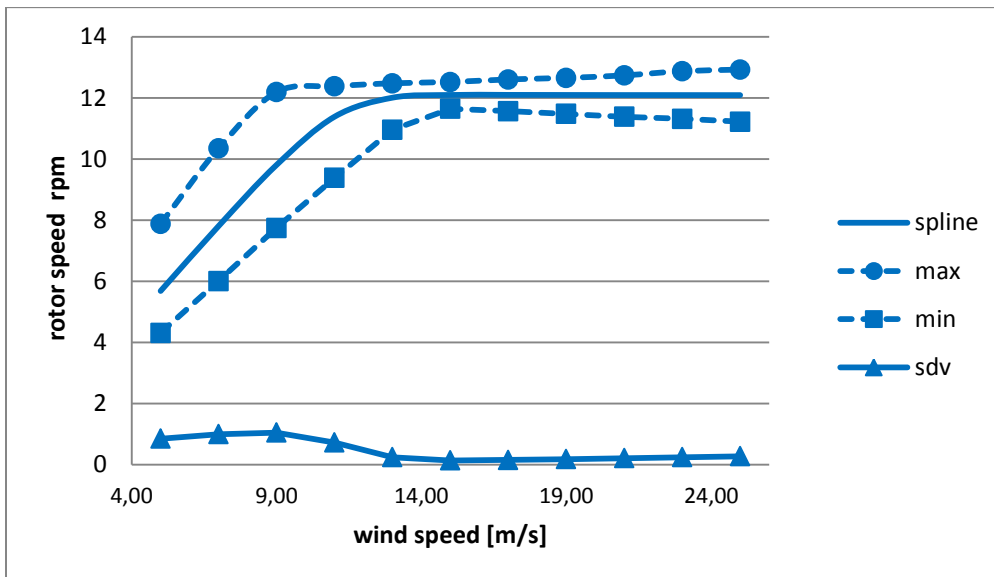
Σχήμα 5.10 Ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



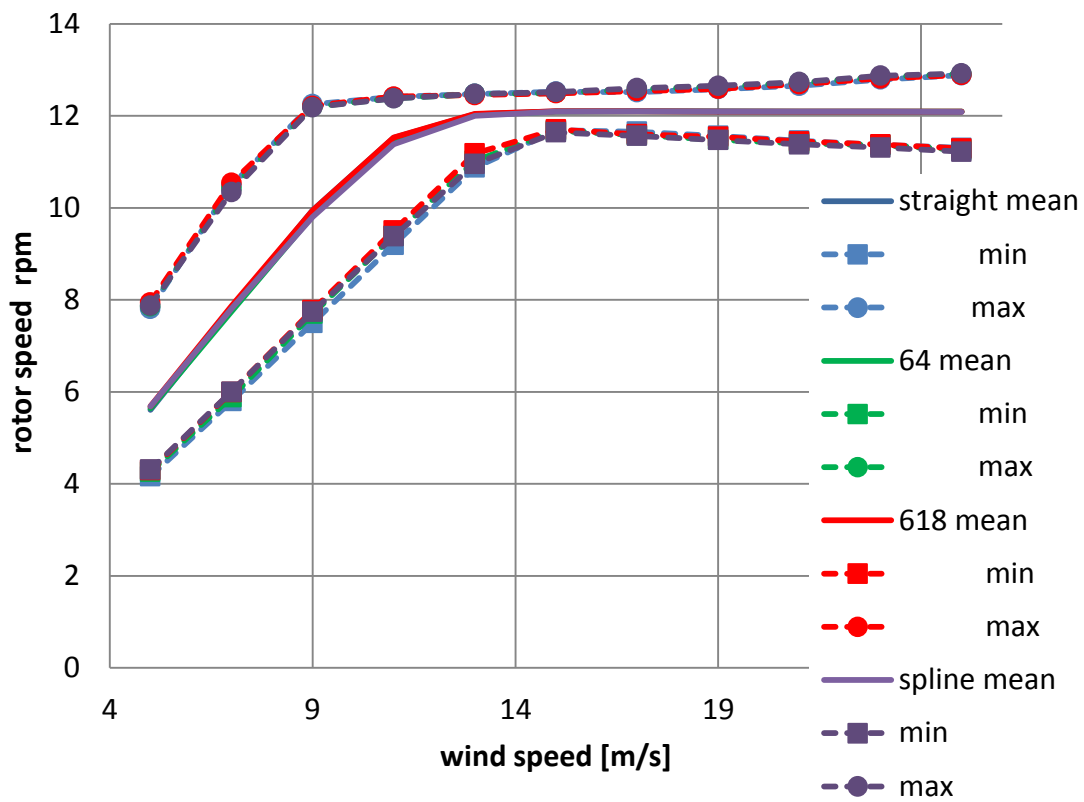
Σχήμα 5.11 Ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



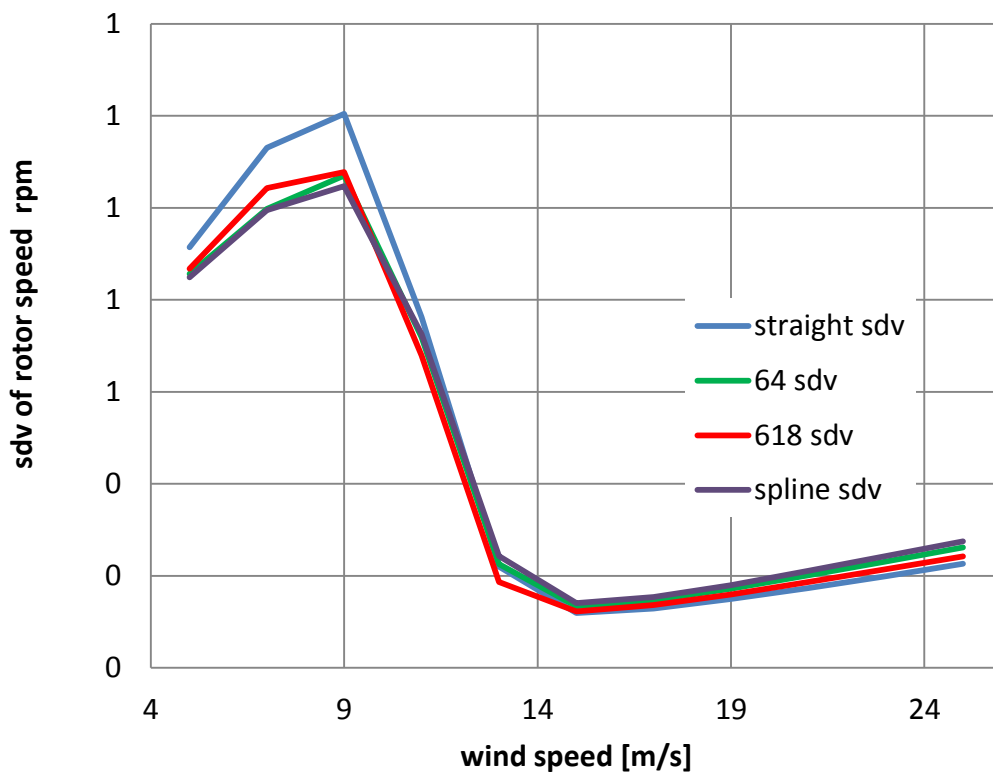
Σχήμα 5.12 Ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



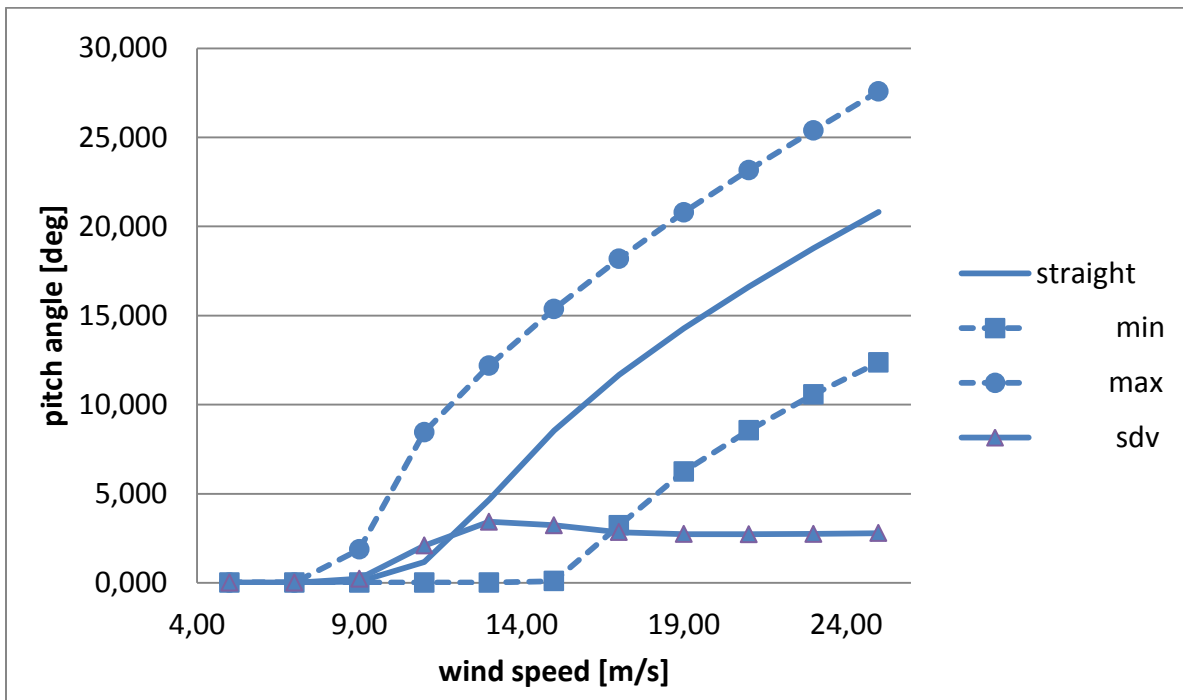
Σχήμα 5.13 Ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



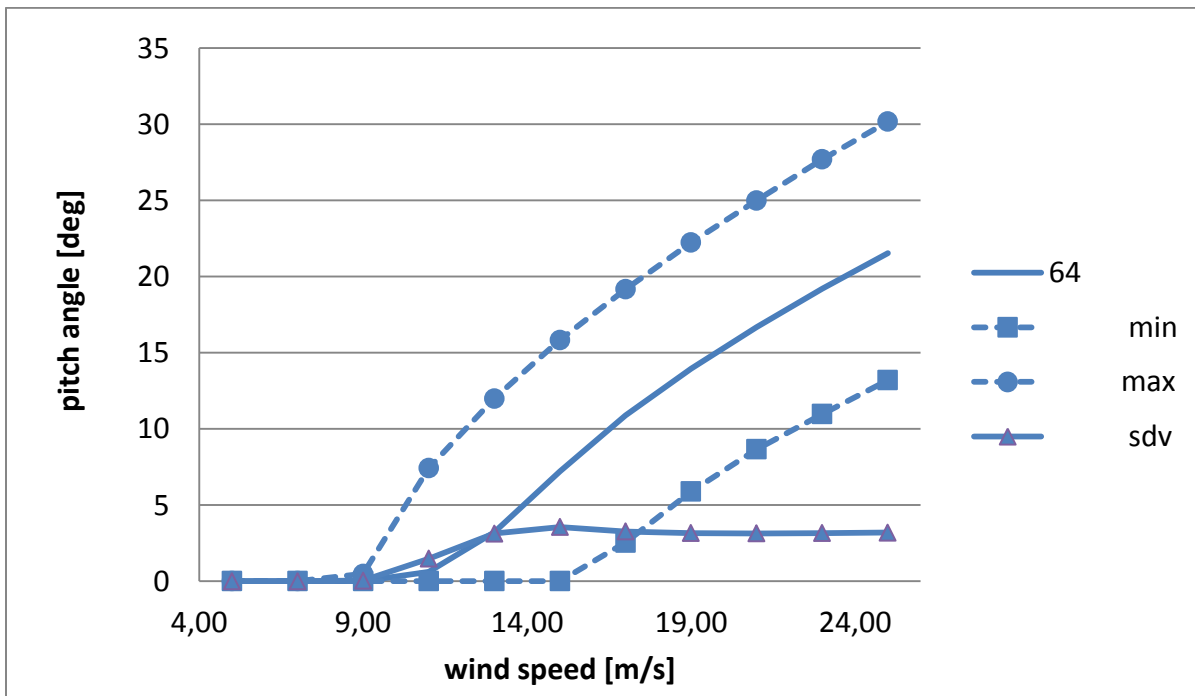
Σχήμα 5.14 Ταχύτητα περιστροφής της πτέρυγας σε στροφές ανά λεπτό συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



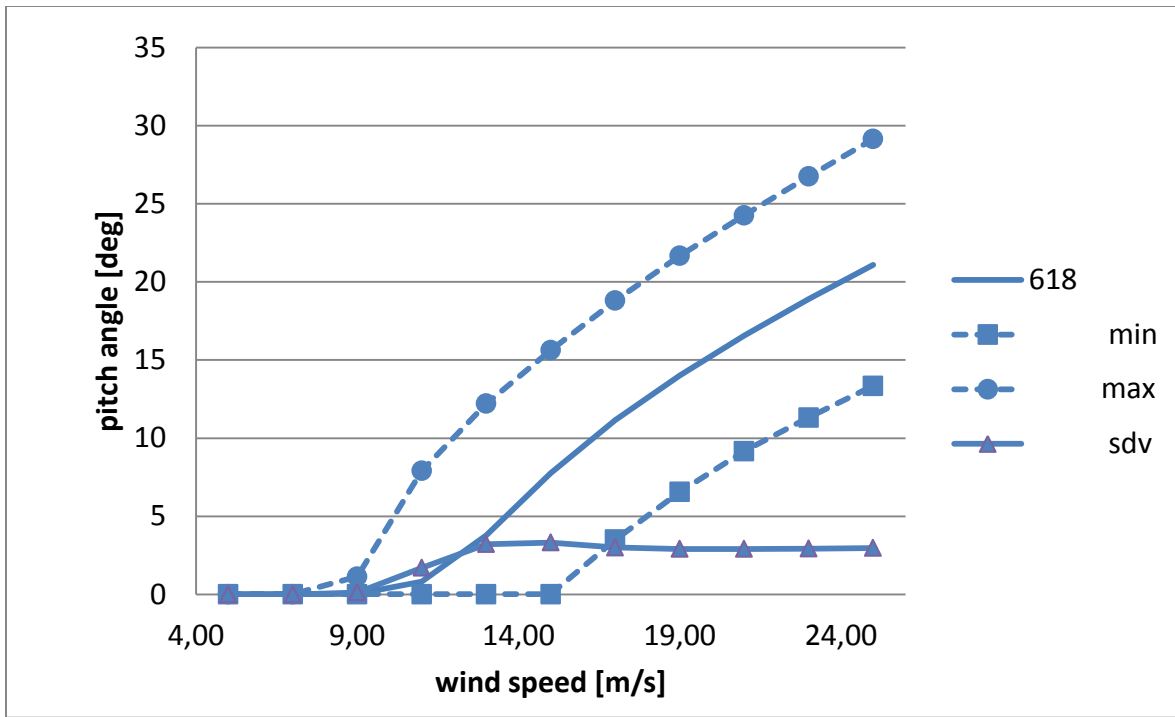
Σχήμα 5.15 Τυπική απόκλιση.



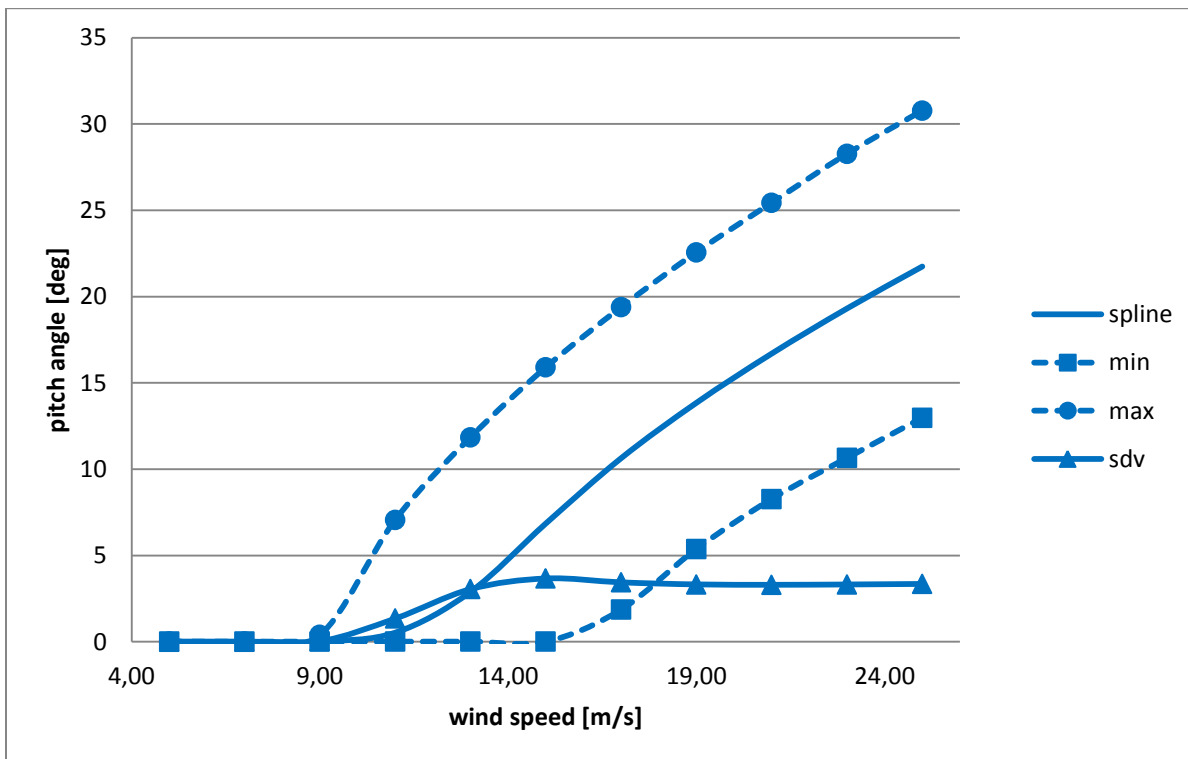
Σχήμα 5.16 Γωνία βήματος συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



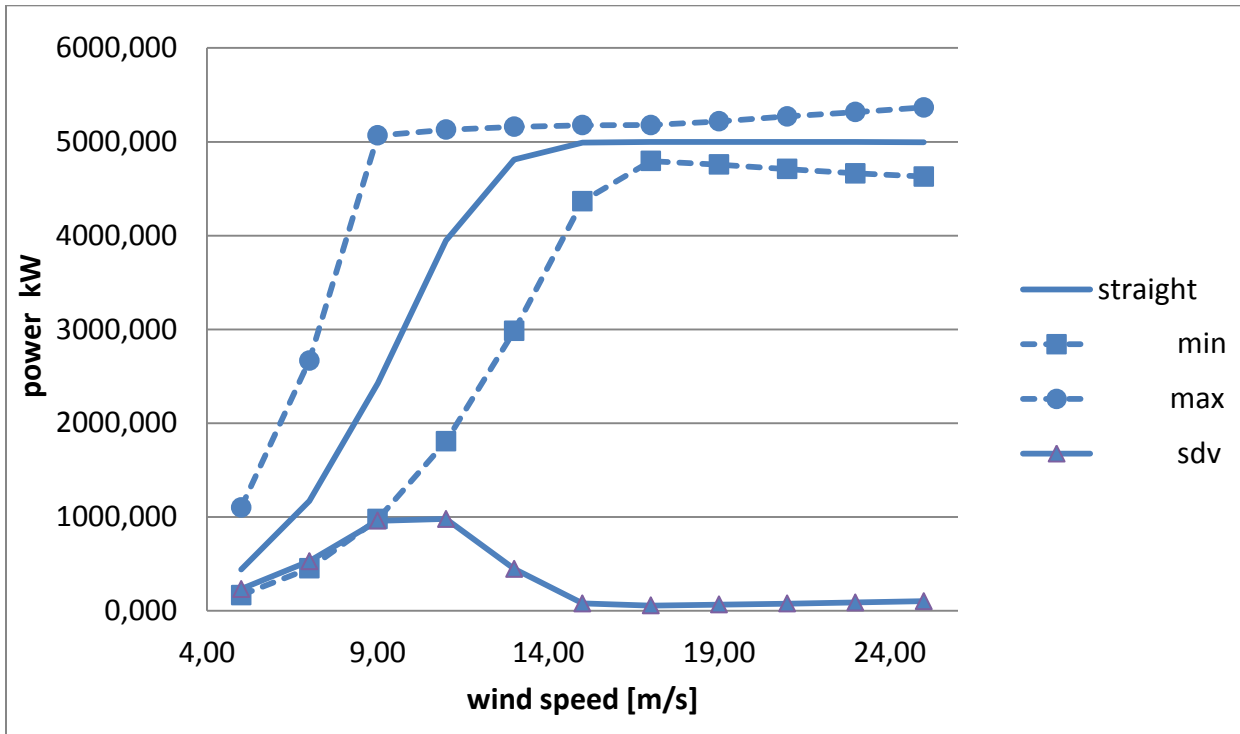
Σχήμα 5.17 Γωνία βήματος συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



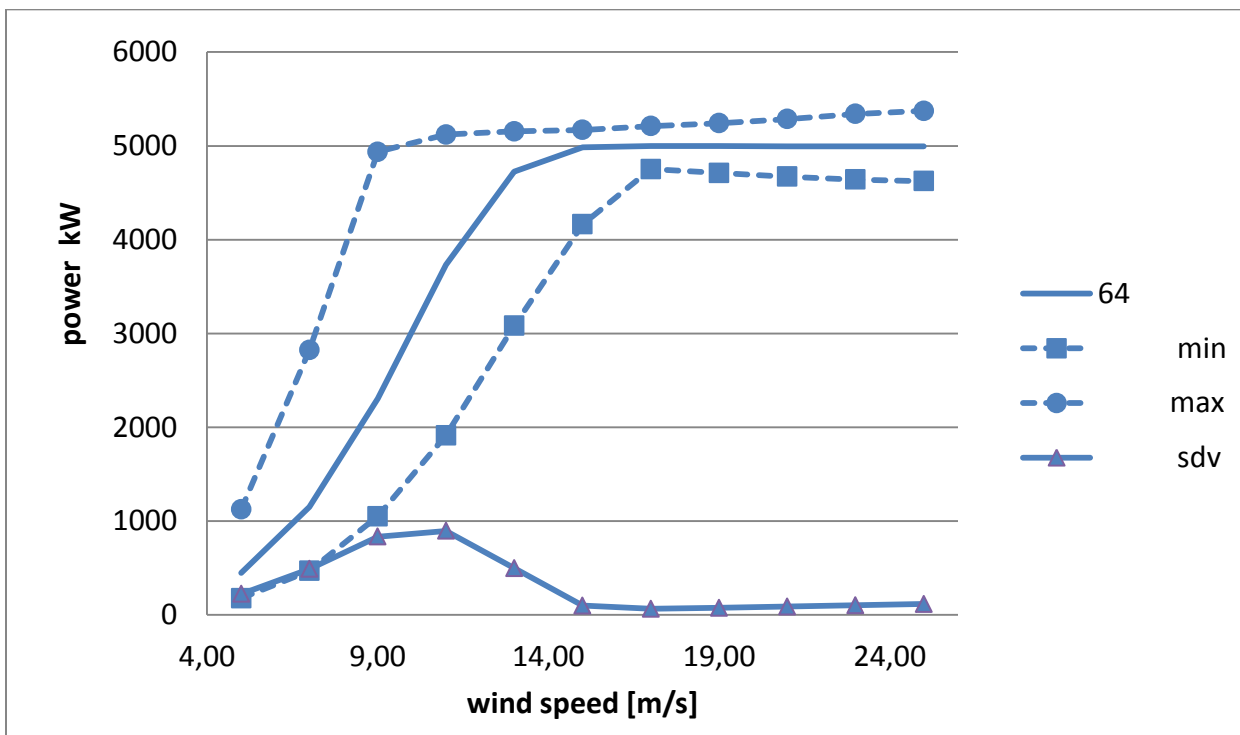
Σχήμα 5.18 Γωνία βήματος συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.19 Γωνία βήματος συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

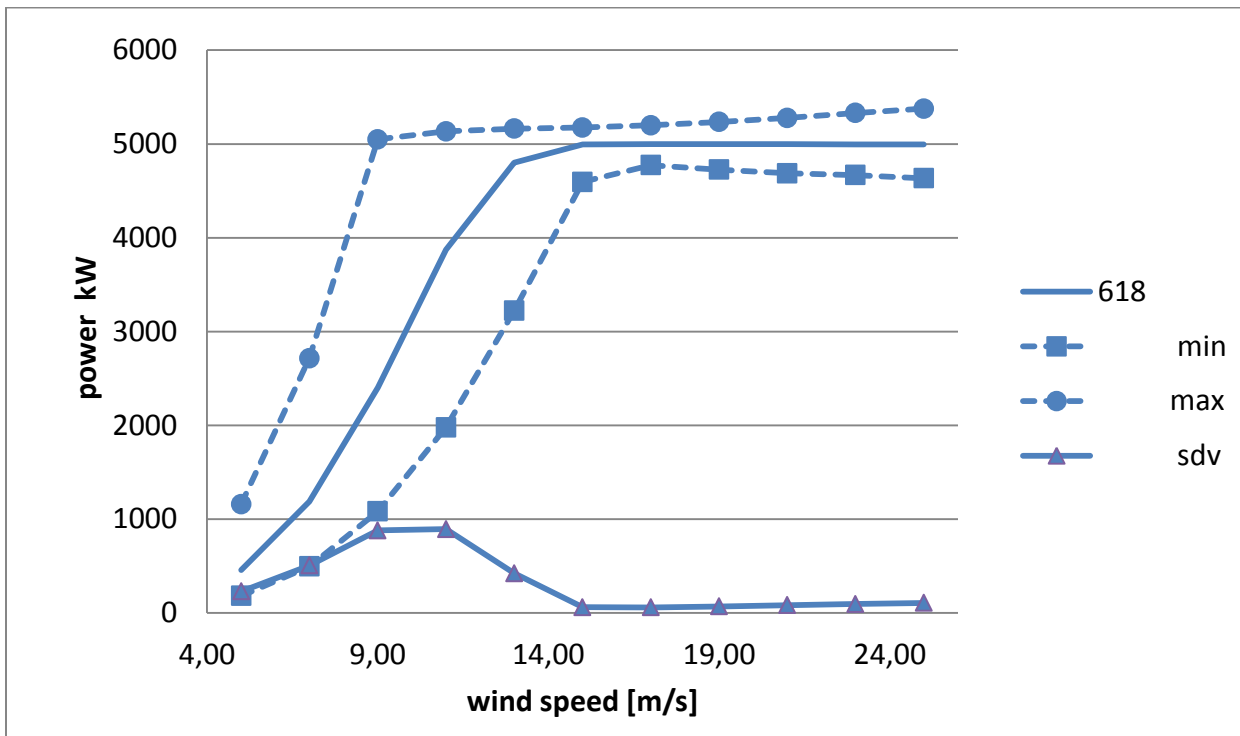


Σχήμα 5.20 Συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

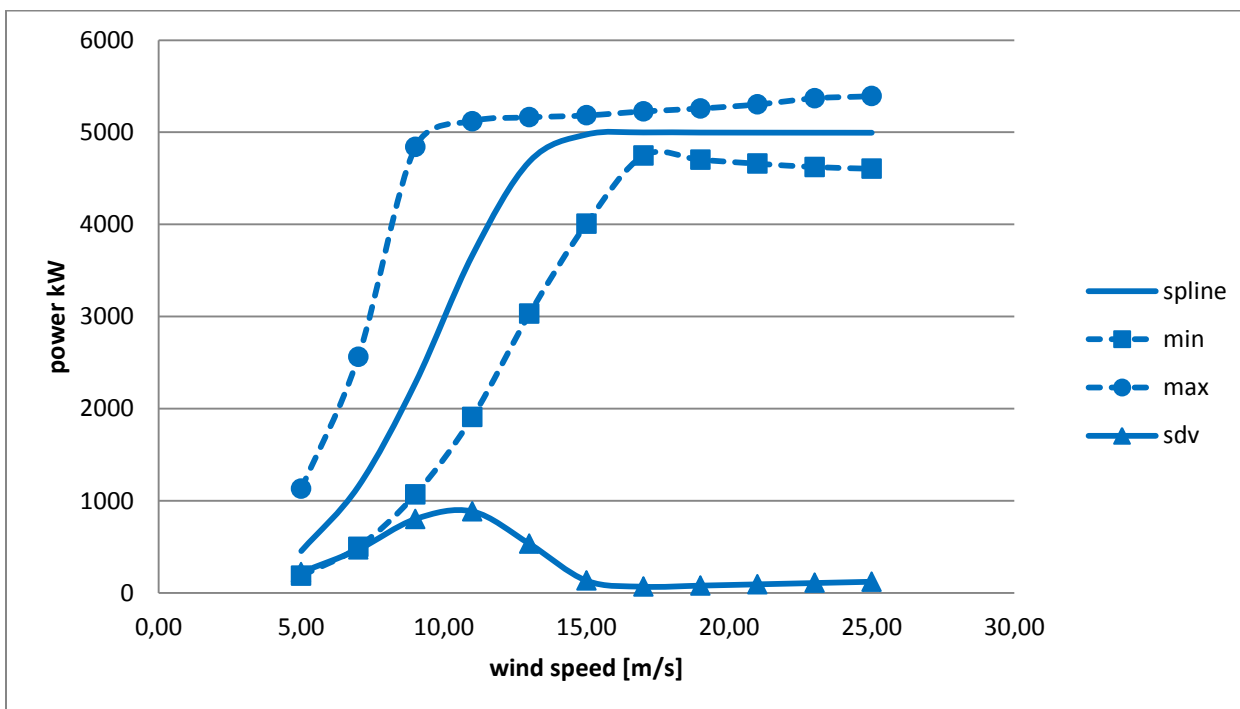


Σχήμα 5.21 Συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.

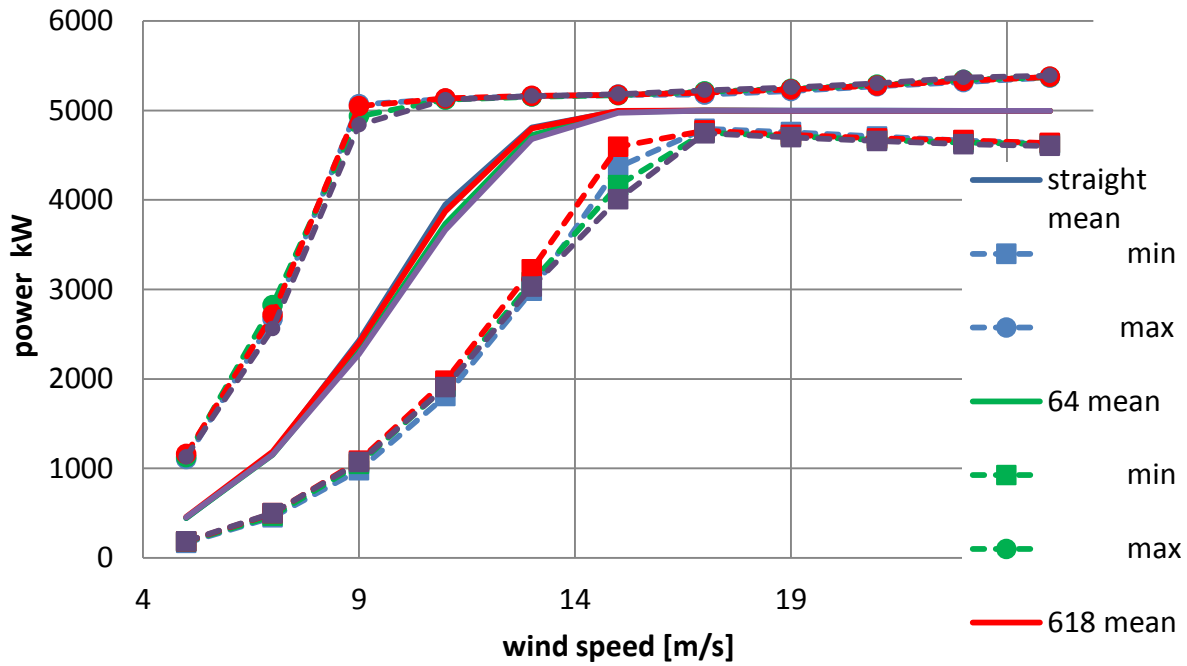




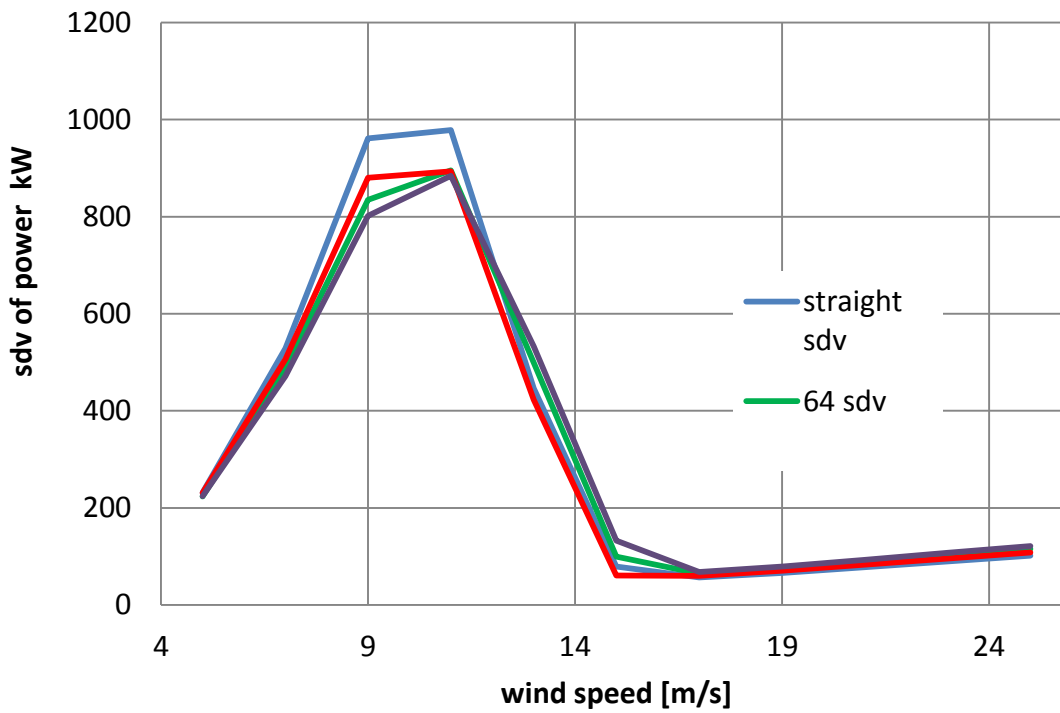
Σχήμα 5.22 Συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς συναρτήσεως της μέσης ταχύτητας ανέμου.



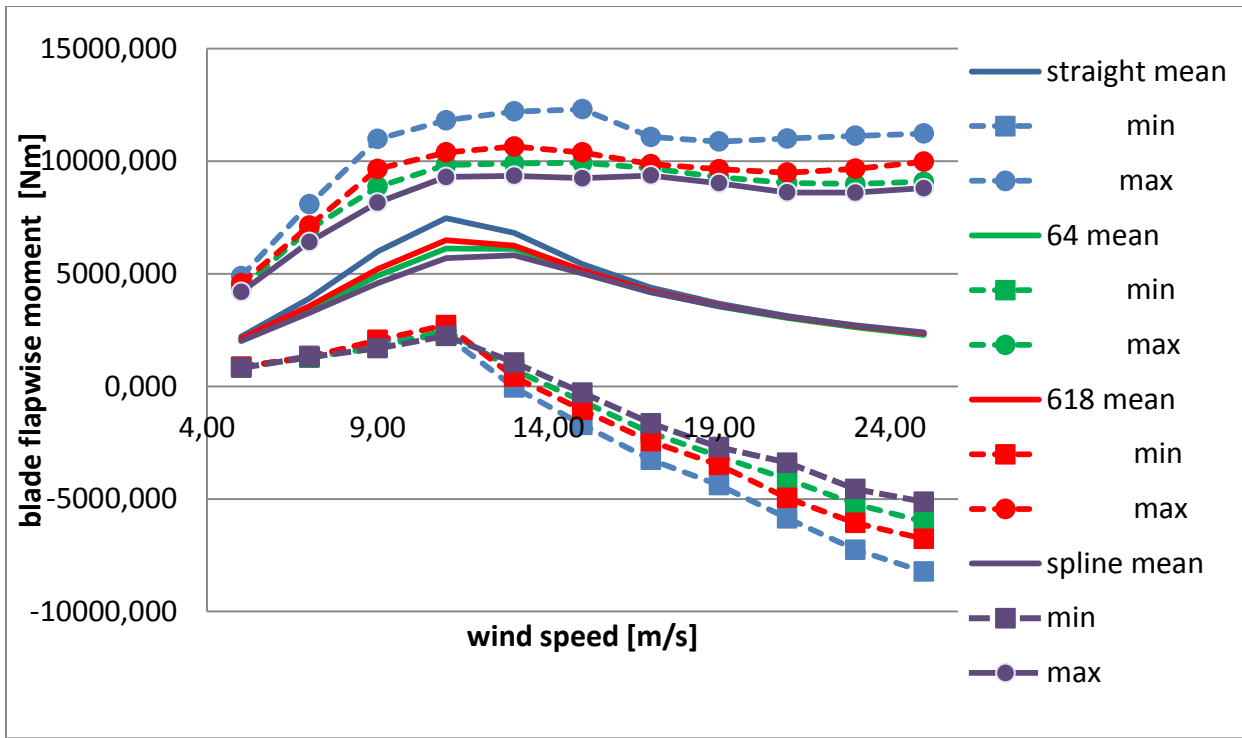
Σχήμα 5.23 Συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς συναρτήσεως της μέσης ταχύτητας ανέμου.



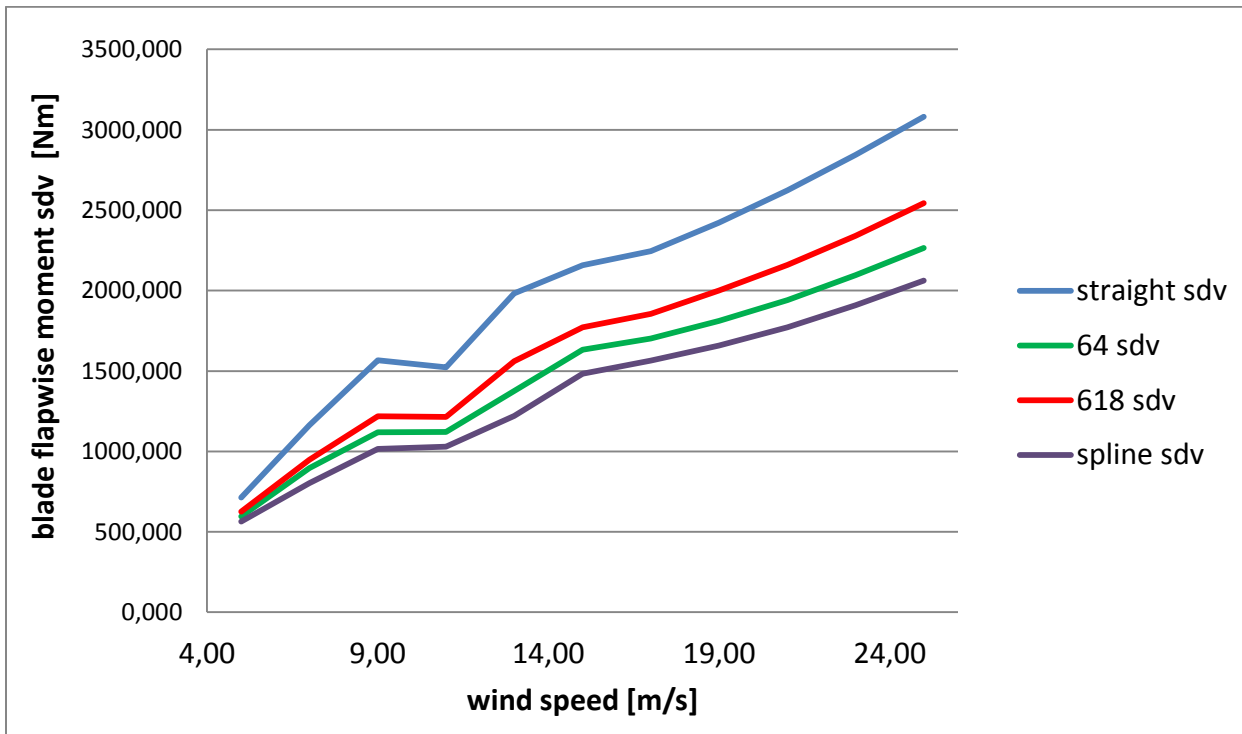
Σχήμα 5.24 Συνολικά αποδιδόμενη από την Α/Γ ισχύς συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



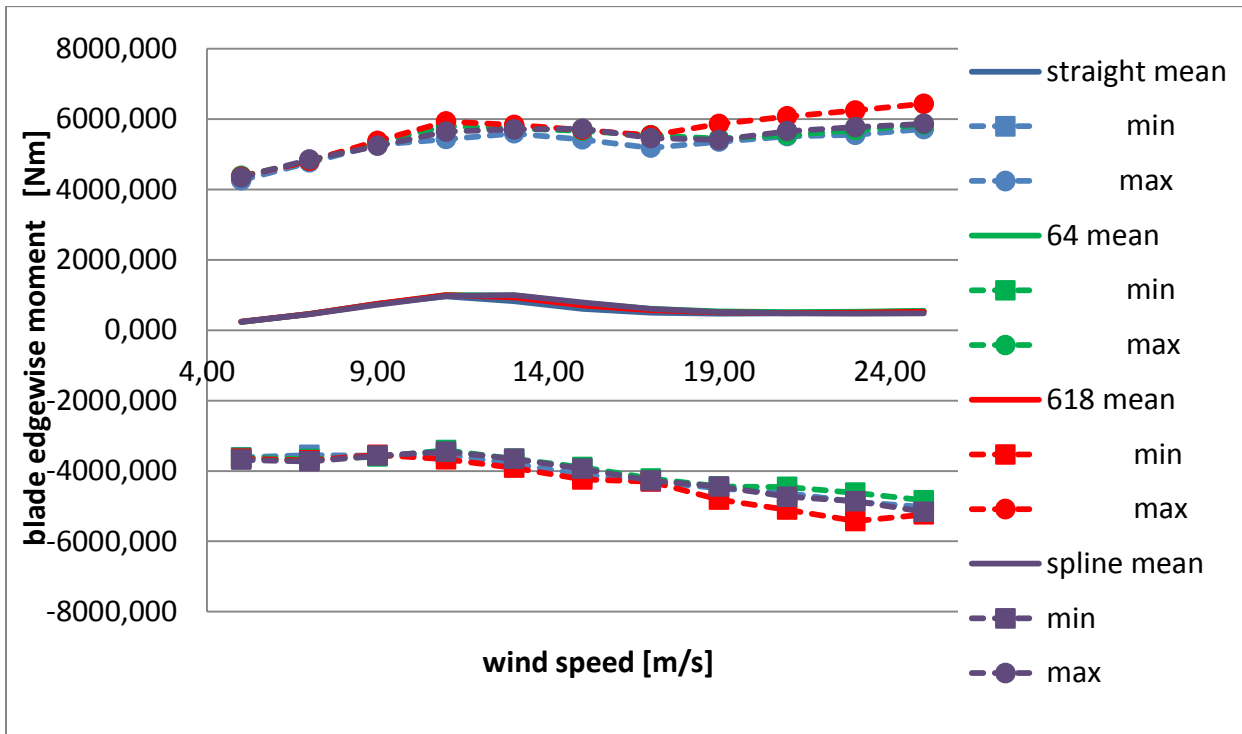
Σχήμα 5.25 Τυπική απόκλιση.



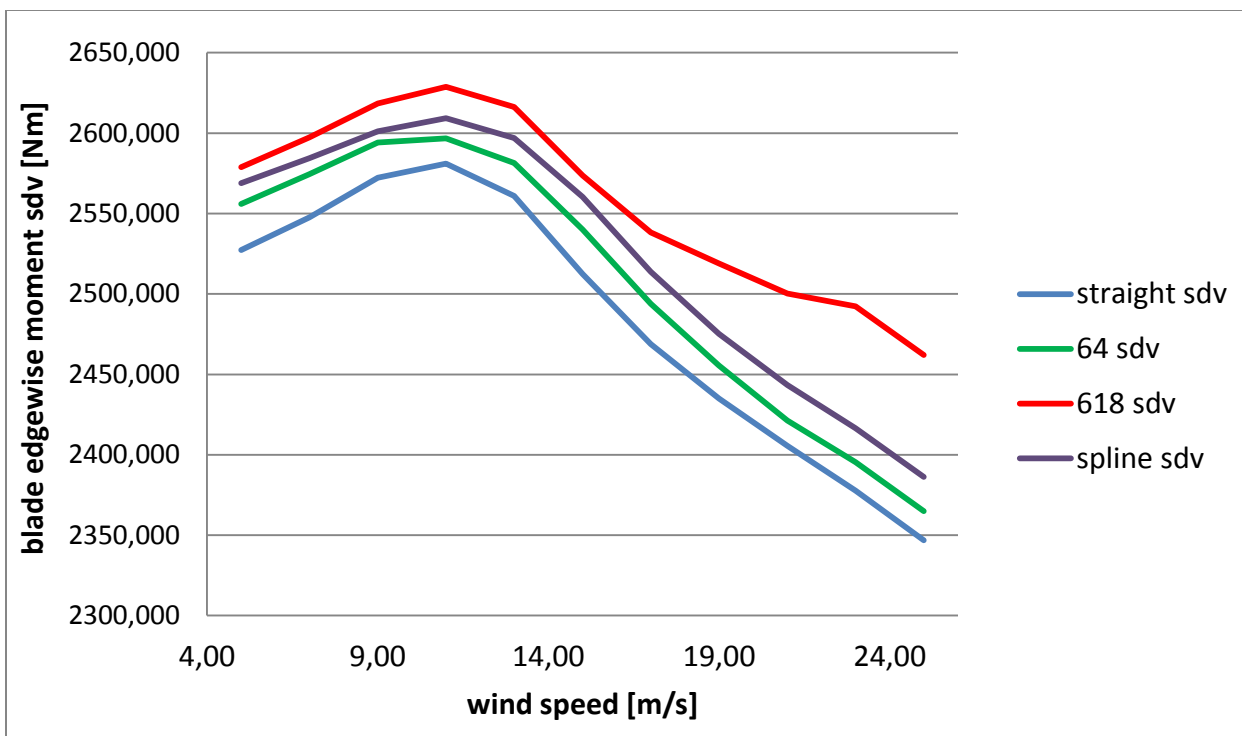
Σχήμα 5.26 Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της πνοής του ανέμου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



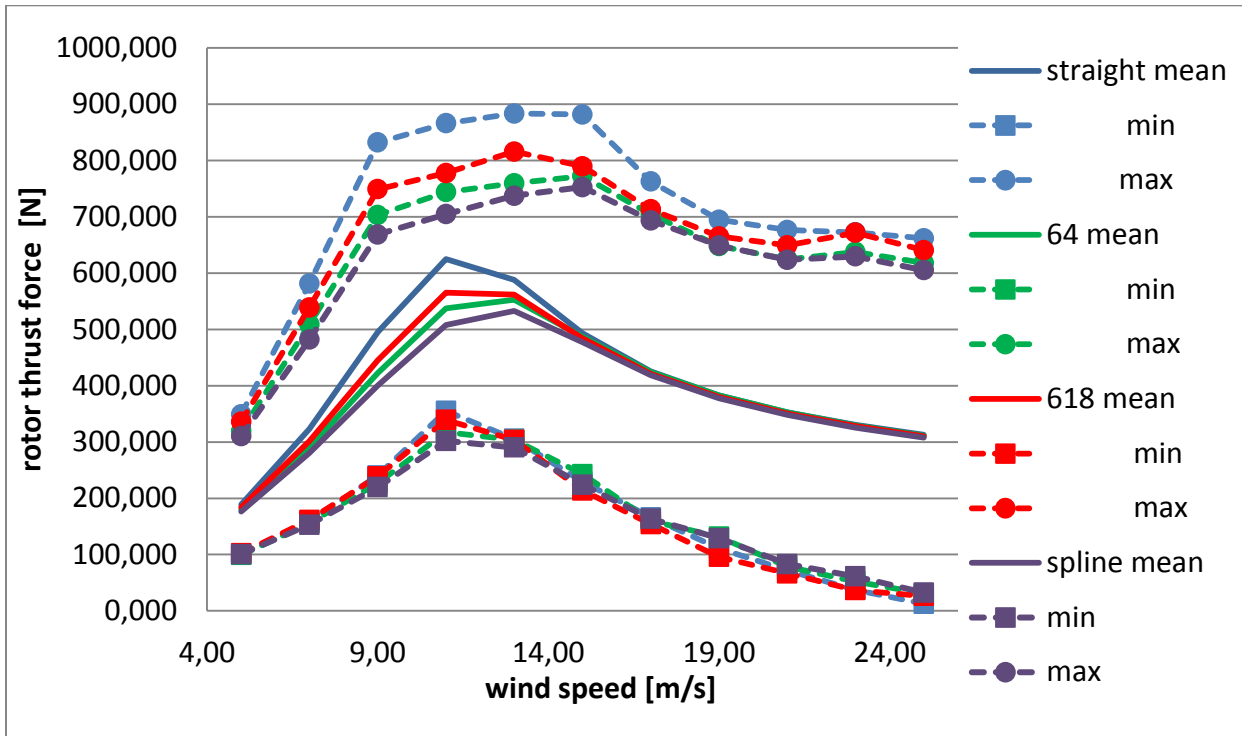
Σχήμα 5.27 Τυπική απόκλιση.



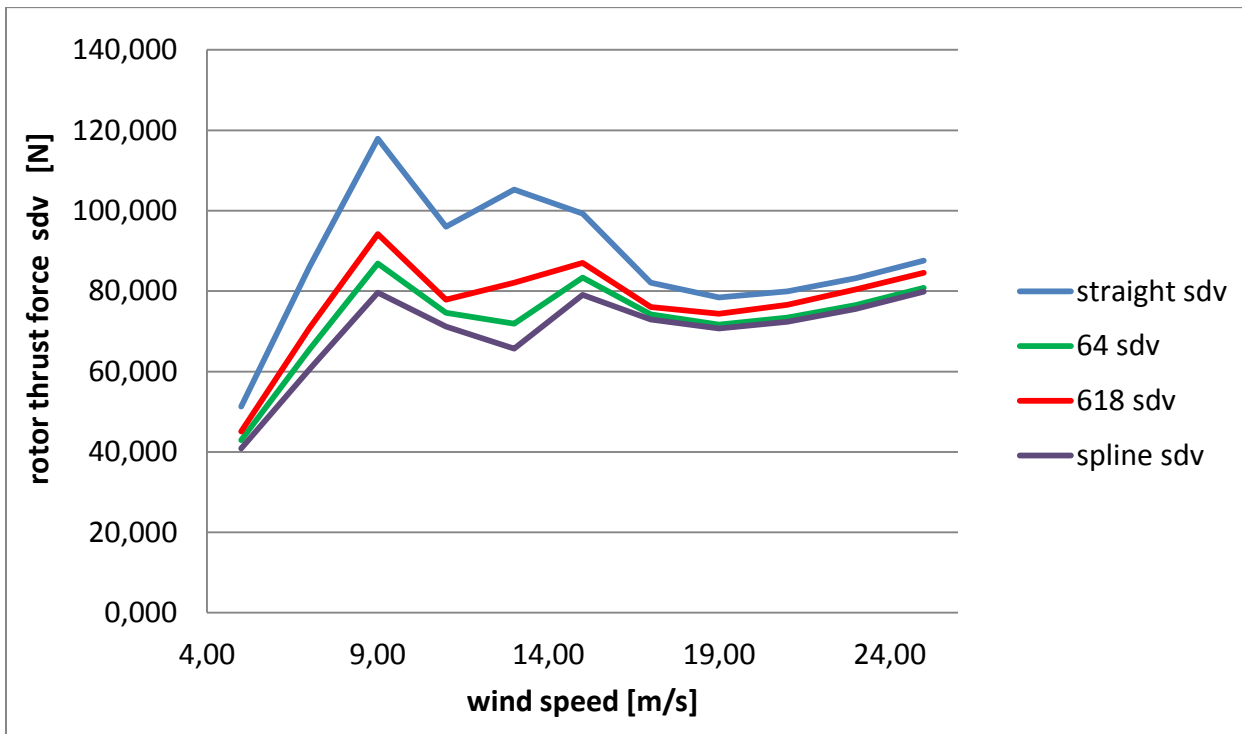
Σχήμα 5.28 Καμπτική ροπή επάνω στα πτερύγια, στην κατεύθυνση της περιστροφής τους συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



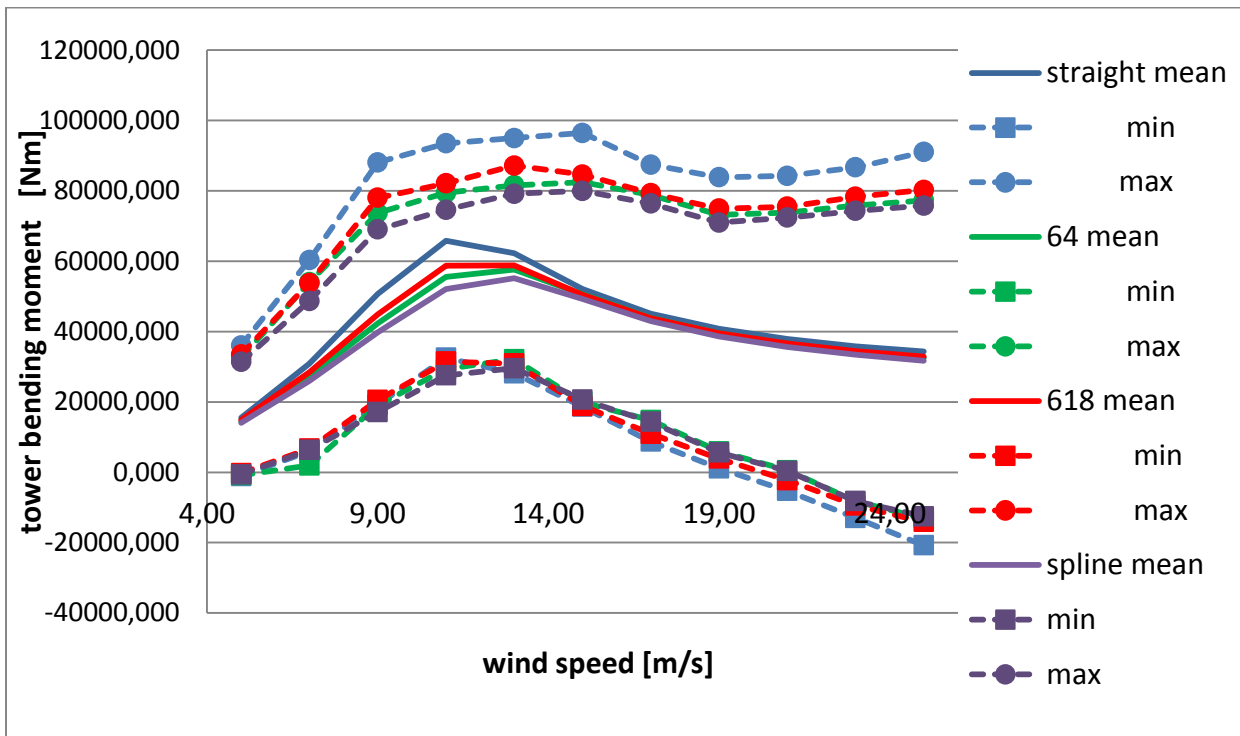
Σχήμα 5.29 Τυπική απόκλιση.



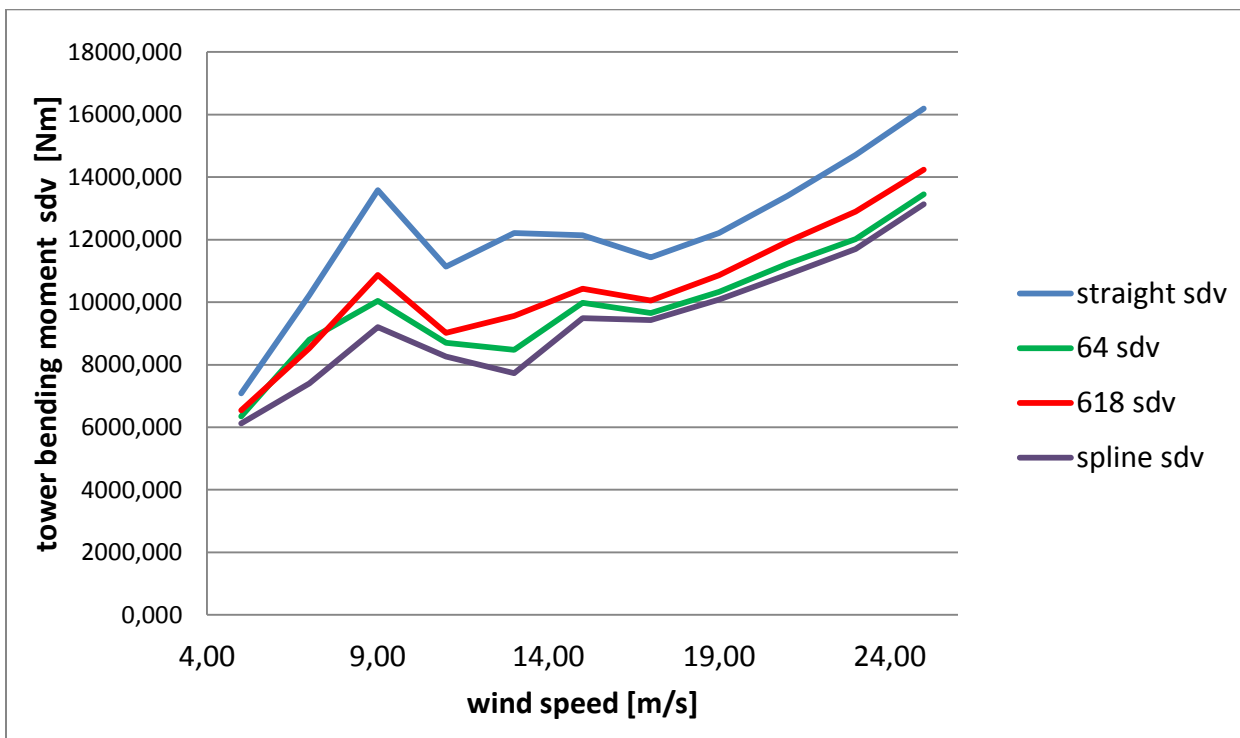
Σχήμα 5.30 Η συνολική δύναμη ώσης επάνω στην πτερύγωση συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



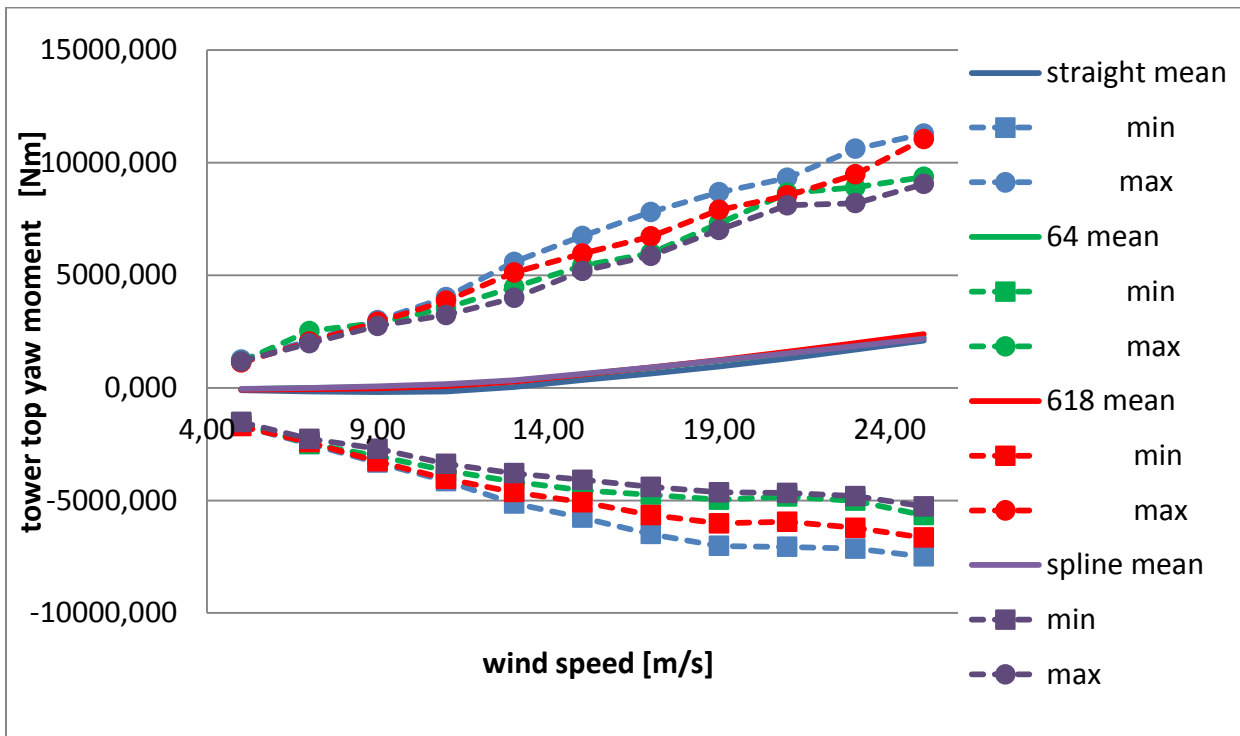
Σχήμα 5.31 Τυπική απόκλιση.



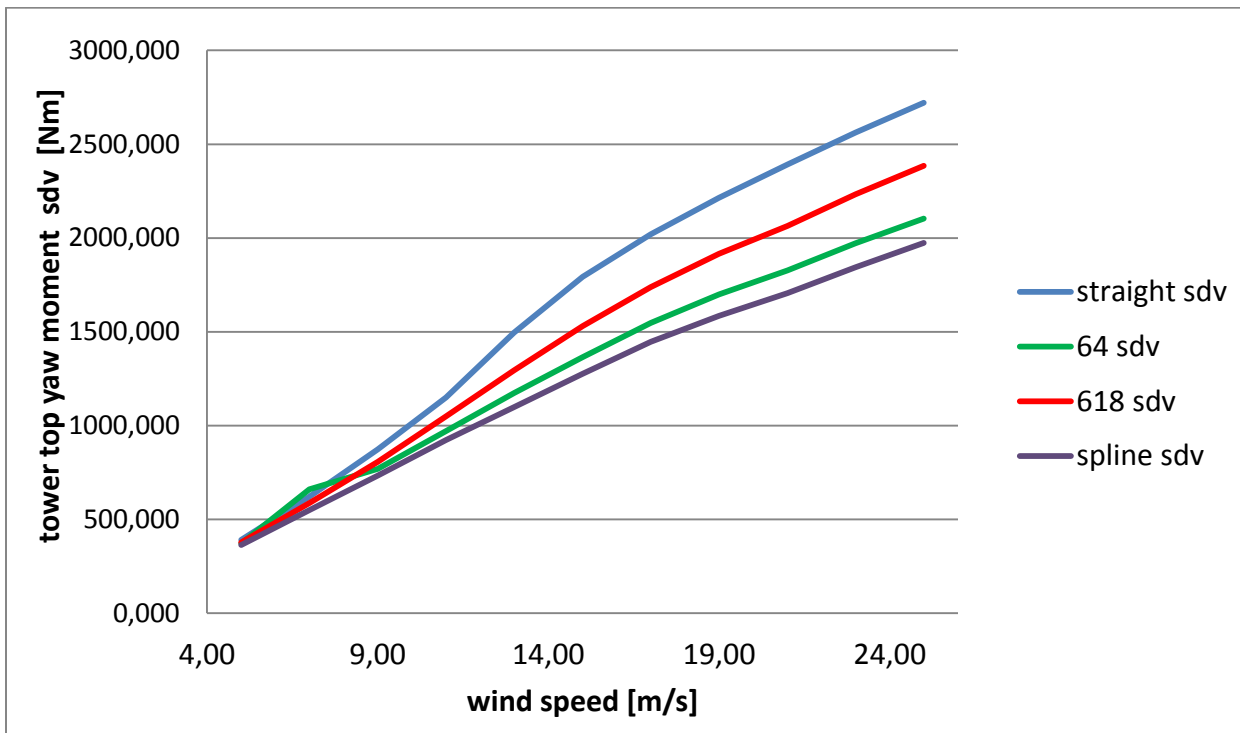
Σχήμα 5.32 Ροπή του ανέμου στην κατεύθυνση της πνοής του στη βάση του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



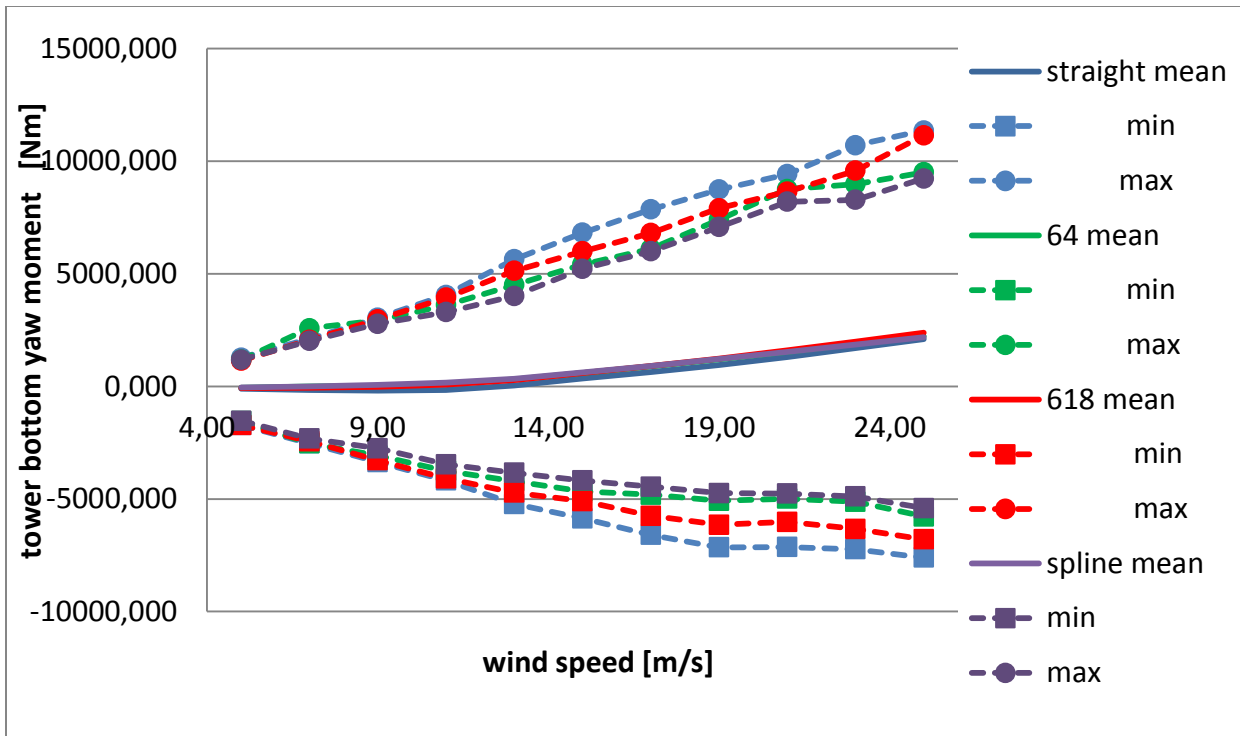
Σχήμα 5.33 Τυπική απόκλιση.



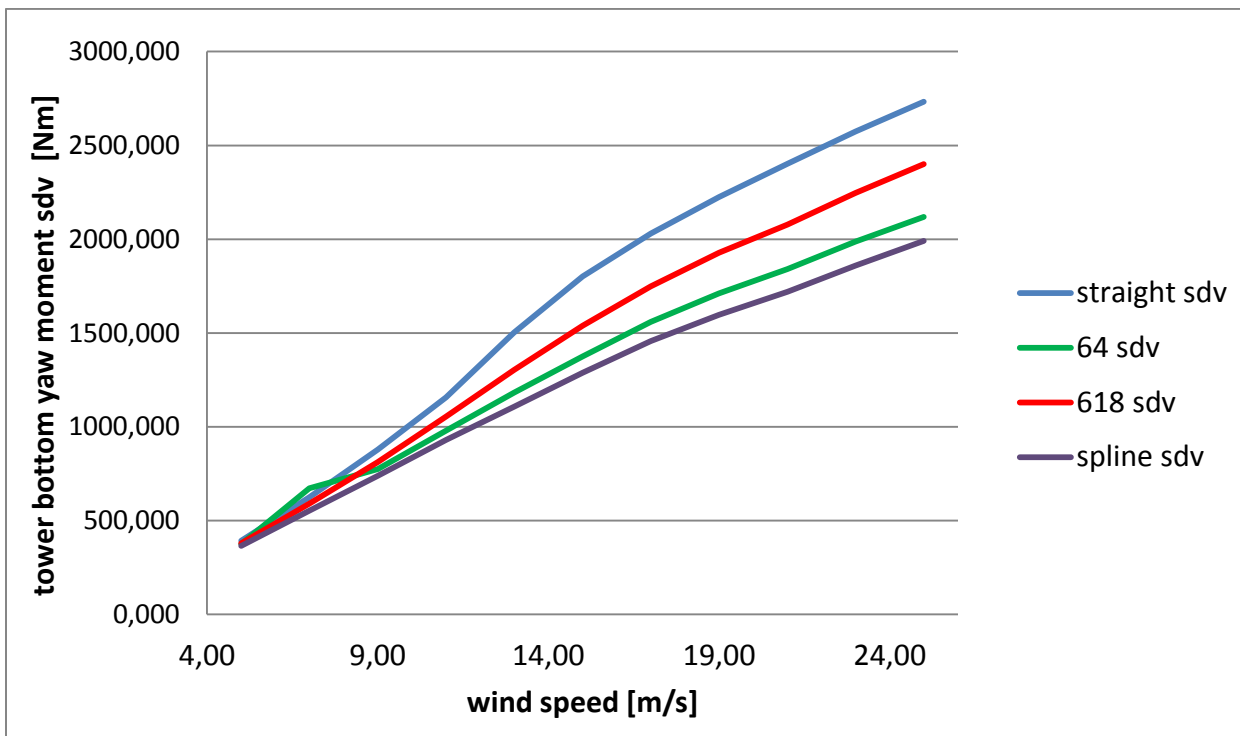
Σχήμα 5.34 Ροπή απόκλισης στην κορυφή του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.35 Τυπική απόκλιση.



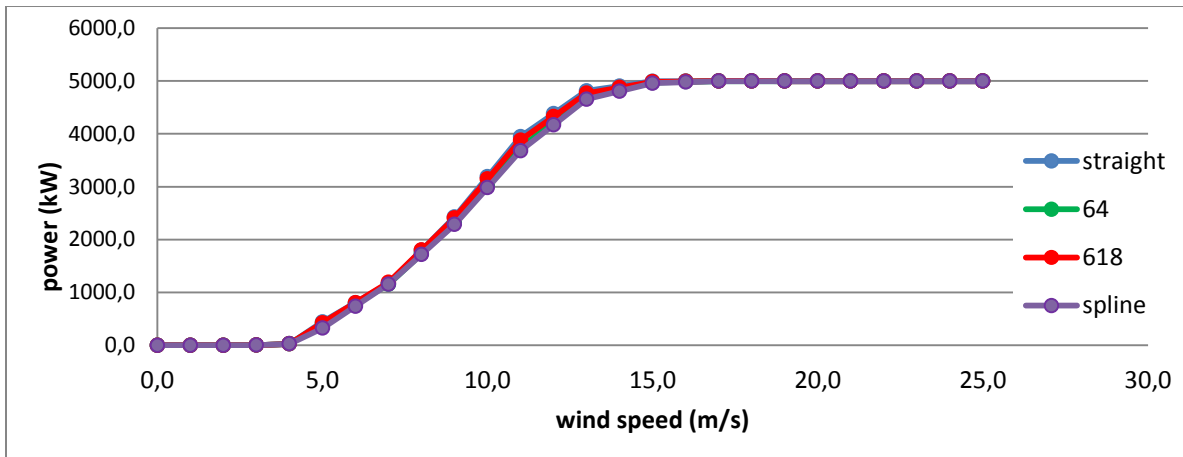
Σχήμα 5.36 Ροπή απόκλισης στη βάση του πύργου συναρτήσει της μέσης ταχύτητας ανέμου.



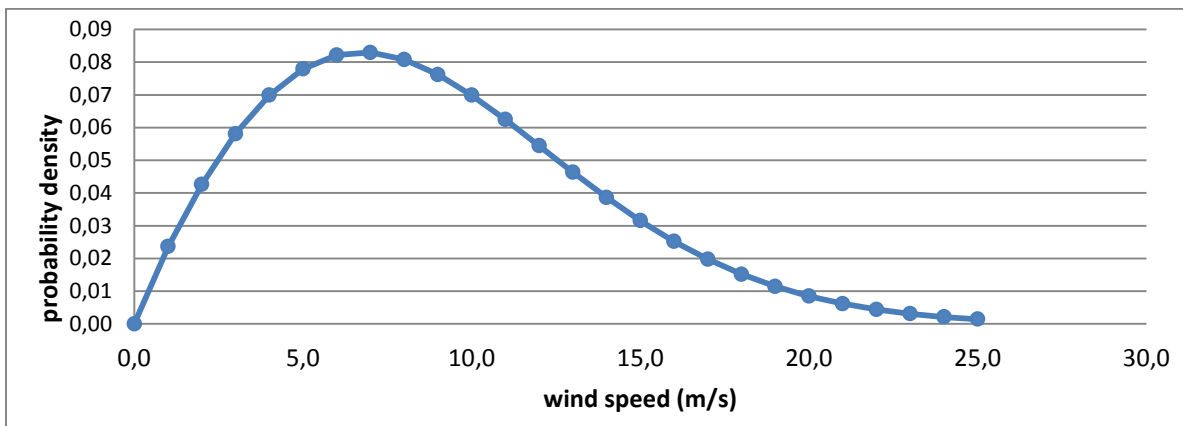
Σχήμα 5.37 Τυπική απόκλιση.



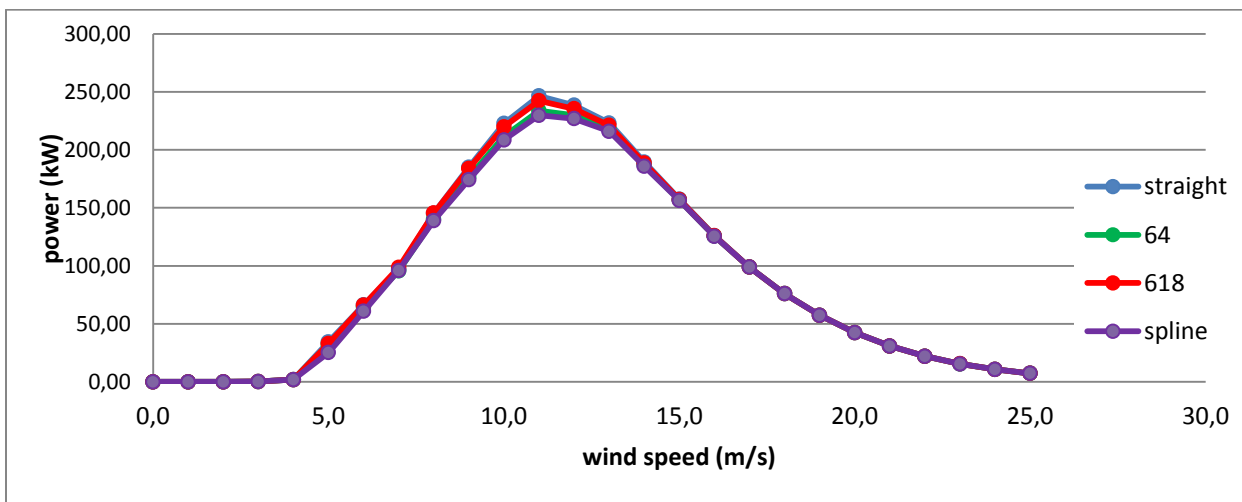
Τέλος, θα πρέπει να εξετασθούν τρία σημαντικά διαγράμματα αποτελεσμάτων. Το πρώτο αναφέρεται στην ισχύ που δύναται να αποδοθεί από κάθε τύπο Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου που πνέει, το δεύτερο μας δίνει την πιθανότητα να πνέει άνεμος με συγκεκριμένη ταχύτητα και το τρίτο αποτελεί το γινόμενο των δύο προϋγουμένων και μας δίνει την ισχύ που εν τέλει αποδίδεται για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου, με βάση την πιθανότητα αυτή να εμφανίζεται. Επομένως, έχουμε :



Σχήμα 5.38



Σχήμα 5.39



Σχήμα 5.40

# 6ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ - ΑΝΑΦΟΡΕΣ

---

## 6.1 Τελικό συμπέρασμα

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί πως από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι μπορούμε να χρησιμοποιούμε για τις προσομοιώσεις μας τη μέθοδο 2<sup>nd</sup> order αντί της multibody, με ασφάλεια. Το ίδιο ισχύει και για τον κώδικα GAST αντί του κώδικα GENUVP.

Ως προς την αεροδυναμική των πτερυγίων, τα pre-swept πτερύγια δέχονται μικρότερες καταπονήσεις από τα ευθεία. Ωστόσο, για τα pre-swept υπάρχει ξεκάθαρο κόστος στη συνολικά αποδιδόμενη ισχύ. Ακόμη, ο κώδικας GENUVP προβλέπει μεγαλύτερες αξονικές και περιφερειακές καταπονήσεις σε σχέση με τον κώδικα GAST, μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου, μεγαλύτερη ισχύ αλλά μικρότερη δύναμη thrust. Επίσης, οι διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων, όσον αφορά τα παραπάνω σημεία ελέγχου, αποδίδονται αισθητά μεγαλύτερες στα αποτελέσματα του GENUVP σε σχέση με τα αποτελέσματα του GAST.

Σε ό,τι αφορά την αεροελαστική κίνηση της Α/Γ, το κόστος σε ισχύ των pre-swept πτερυγίων έναντι του ευθύς παραμένει. Οι παραμορφώσεις, βέβαια, είναι μειωμένες για τις pre-swept περιπτώσεις. Ο GENUVP κώδικας προβλέπει μικρότερες τιμές αποδιδόμενης ισχύος σε σχέση με τον GAST, ενώ οι παραμορφώσεις είναι σε κοντινά επίπεδα τιμών. Αναφορικά με τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων γεωμετρικών περιπτώσεων, ο GENUVP μας δίνει μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στις ισχείς. Όσο για τη σύγκριση 2<sup>nd</sup> order και multibody, η δεύτερη μέθοδος δίνει μικρότερες τιμές για τα μεγέθη που εξετάζουμε, αλλά οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων πτερυγίων είναι παρόμοιες για τις δύο μεθόδους.

Τέλος, σχετικά με τις στοχαστικές προσομοιώσεις, αυτό που πρέπει να κρατήσουμε είναι η μείωση των ροπών και των παραμορφώσεων για τις pre-swept περιπτώσεις και η μικρή διαφορά στη δυνάμενη να αποδοθεί ισχύ ανάμεσα στις τέσσερις πιο αντιπροσωπευτικές γεωμετρικές περιπτώσεις.

## 6.2 Βιβλιογραφία

1. Lobitz, D.W and Veers, P.S., “Load Mitigation with Bending/Twist-coupled Blades on Rotors Using Modern Control Strategies,” J. Wind Energy, 2003, 6, 105–117
2. Ριζιώτης Βασίλειος, Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Ανεμογεννητριών. Διδακτορική Διατριβή (2003).

3. Hodges, D.H. and Dowell, E.H., “Non-linear Equations of Motion for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Non-uniform Rotor Blades”, NASA TN D-7818, (1974).
4. Crisfield, M.A., (1998), “Non linear finite element analysis of solids and structures, essentials,” Jon Wiley and Sons
5. Riziotis, V.A., Voutsinas, S.G., Politis, E.S. and Chaviaropoulos, P.K., Hansen, A.M., Madsen, H.A., Rasmussen, F., “Identification of structural non-linearities due to large deflections on a 5MW wind turbine blade,” Proc. of EWEC’2008, Brussels, Belgium.
6. National Renewable Energy Laboratory, *About the Program: WindPACT*, <http://www.nrel.gov/wind/windpact/>, National Renewable Energy Laboratory, January 2005.
7. Μπεργελές Γεώργιος, ANEMOKINHTHPEΣ.
8. Ριζιώτης Βασίλειος, Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Ανεμογεννητριών. Διδακτορική Διατριβή (2003).
9. Evangelos Politis<sup>1</sup> and Vasilis Riziotis<sup>2</sup>, Importance of shape induced non-linear effects on the 5 MW RWT, Project UpWind.
10. V. A. Riziotis, D. I. Manolas and S. G. Voutsinas, Free-wake Aeroelastic Modelling of Swept Rotor Blades.
11. Επίσημη ιστοσελίδα Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών κι Εξοικονόμησης Ενέργειας, cres.gr .
12. Bir, G., & Jonkman, J. (2007). *Aeroelastic Instabilities of Large Offshore and Onshore Wind Turbines*. Lyngby, Denmark.
13. Αθανασιάδης Νικόλαος & Μπεργελές Γεώργιος. Αιολική Ενέργεια και Βιομηχανική Αεροδυναμική. Αθήνα (1980).