

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ Ο/Α ΣΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ**

υπό

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΜΠΑΡΛΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2004



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 4049/1
Ημερ. Εισ.: 26-10-2004
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ
2004
ΜΠΑ

Βόλος 2004

Αθανάσιος Μπάρλας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Νίκος Πελεκάσης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Μηχανολόγων	Μηχανικών

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμον στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου ,τους κυρίους Ν. Πελεκάση και Ν. Ανδρίτσο, για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Γ. Γιαννακίδη για την πολύτιμη βοήθειά του στην δημιουργία των αρχείων των airfoils και των turbulence data files. Ευχαριστώ τους συναδέλφους μου ,τους φίλους μου και τους γονείς μου για την ηθική συμπαράστασή τους. Θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στους επιστήμονες και ερευνητές που πίστεψαν και απέδειξαν ότι η φύση δομείται και λειτουργεί με βάση στοχαστικές διαδικασίες.

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΤΕΡΩΤΗΣ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ Ο/Α ΣΕ ΕΙΔΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ**

ΛΘΑΝΑΣΙΟΣ ΜΠΑΡΛΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2004

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής, Αναπληρωτής Καθηγητής , Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	6
Κεφάλαιο 3 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	15
Κεφάλαιο 4 Περιγραφή περιπτώσεων φόρτισης	29
Κεφάλαιο 5 Computer Program	57
Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	77
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα	144
Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία , πίνακας συμβόλων	145

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας και περιγράφουμε συνοπτικά τις βασικές ενότητες της διπλωματικής εργασίας.

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

1.1.1 Σπουδαιότητα του προβλήματος

Η φόρτιση των πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα συνιστά ένα πρόβλημα πολύ σημαντικό ως προς τη φύση της εφαρμογής του και εξελίξιμο ως προς τις μεθόδους μελέτης και αντιμετώπισης των παραμέτρων του. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια μια πολύ σπουδαία ,από οικονομική και περιβαλλοντική σκοπιά, εφαρμογή της αεροδυναμικής ,και όχι μόνο, τεχνολογίας. Η εκτίμηση της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννήτριας αλλά και της απόδοσής της είναι πρωτεύουσας σημασίας για το σχεδιασμό και τη λειτουργίας της ,πρώτα απ'όλα ,εξαιτίας της επικινδυνότητας των πτερυγίων σε θραύση και γενικότερα της αντοχής και του χρόνου ζωής τους. Επιπρόσθετα, επειδή και τα κύριο λόγο η ενέργεια που προσφέρει η ανεμογεννήτρια είναι ηλεκτρική, επιβάλλεται μια σχεδίαση ομαλής λειτουργίας της ,σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του ανέμου πάντα, ώστε η γενικότερη ισχύς της να είναι εξομαλυσμένη. Ακόμα, πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μελέτη των φορτίσεων βοηθάει στην εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων όπως οι ταλαντώσεις, οι αλλαγές στη γωνία

προσβολής των πτερυγίων κ.α. ,με σημαντικά αποτελέσματα στην απόδοση. Ο αυξημένος θόρυβος είναι ένα ακόμα θέμα το οποίο μπορεί να εξεταστεί με τη βοήθεια της εκτίμησης των δυνάμεων που επιδρούν στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, αφού συνιστά κλασσικό μειονέκτημα των εφαρμογών ειδικά σε περιπτώσεις αιολικών πάρκων. Τέλος, σημαντικότερο είναι το γεγονός ότι μία πλήρης και αξιόπιστη μελέτη της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννήτριας μπορεί να προσφέρει αρκετά σε οικονομικό επίπεδο ,αφού μπορεί να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία εκμετάλλευσης της ενέργειας από τον άνεμο. Το υπό μελέτη πρόβλημα ενδιαφέρει αρκετά φορείς που σχετίζονται με το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων αλλά και με την παραγωγή και εκμετάλλευση της ενέργειας από αυτά.

1.1.2 Μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος και πρόοδος μέχρι σήμερα

Οι αποκλειστικά θεωρητικές προσεγγίσεις δεν επαρκούσαν, ειδικά πολλά χρόνια πριν, για να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Φυσικά, υπήρξαν καθοριστικές οι μελέτες των Eiffel και Durand-Lesley τις πρώτες δεκαετίες του εικοστού αιώνα. Ανά τα χρόνια έχουν γίνει πολλές προτάσεις για τη μελέτη του προβλήματος της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννήτριας. Φυσικά ,αρχικά, έχουν γίνει πολλές πειραματικές προσπάθειες τόσο σε πραγματικές όσο και σε εργαστηριακές εφαρμογές. Σημαντικό μειονέκτημα αυτής της κατεύθυνσης το κόστος αλλά και η δυσκολία ρεαλιστικής απεικόνιση σεναρίων της ροής του ανέμου. Μία άλλη προσέγγιση είναι αυτή από πλευράς θεωρίας της αεροδυναμικής και της μηχανικής των ρευστών. Τα προβλήματα σ'αυτόν τον τομέα έρχονται με τη δυσκολία επίλυσης των πολύπλοκων εξισώσεων που προκύπτουν και τη μειωμένη ευελιξία που παρέχουν. Ακόμα, σε θεωρητικό επίπεδο

σημαντική είναι η συμβολή των Axial Momentum Theory και General Momentum theory με τη θεώρηση ενός γενικευμένου προωστικού συστήματος κάθετο στη ροή του ρευστού.

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η εύκολη και εύελκτη προγραμματιστική χρήση τους επέτρεψε τις τελευταίες δεκαετίες τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων για την πρόβλεψη της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννητριών αλλά και της αποδιδόμενης ισχύς τους. Όμως, η ανάπτυξη αξιόπιστων και με σημαντική ακρίβεια υπολογιστικών μεθόδων σ' αυτόν τον τομέα παραμένει μια πρόκληση. Η βιβλιογραφία αναφέρει διάφορες τέτοιες μεθόδους για την πρόβλεψη πειραματικών δεδομένων. Η Vortex Lattice (VL) μέθοδος, που βασίζεται στη θεωρία των πλεγμάτων, περιγράφει τα πτερύγια και τη ροή του αέρα χρησιμοποιώντας γραμμές ή επιφάνειες στροβιλισμού (vortex lines/surfaces). Συχνά όμως, με τη χρήση της παρουσιάζονται ανακριβή αποτελέσματα, κυρίως σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, λόγω ανεπάρκειας σε σχέση με την κεντρική απώλεια στήριξης (inboard stall) και την επιβράδυνσή της. Η τελευταία λέξη στο χώρο της αεροδυναμικής πτερυγίων θεωρείται το σύνολο των μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής γνωστές ως CFD (Computational Fluid Dynamics). Οι πιο γνωστές είναι οι μέθοδοι Euler και Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα την τελευταία δεκαετία σε πολλές μορφές προβλημάτων, εξαιτίας και της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα υπολογιστικά πακέτα που βασίζονται σ' αυτές τις μεθόδους υπόσχονται ακρίβεια στην πρόβλεψη των φορτίσεων και της απώλειας στήριξης των πτερυγίων, όμως η ανακρίβεια στη μετάδοση του στροβιλισμού, στη μοντελοποίηση του οριακού τυρβώδους στρώματος και στην πυκνότητα του πλέγματος έχουν μειώσει την ακρίβειά τους. Γενικά αυτές οι μέθοδοι αποδεικνύονται ιδιαίτερα ακριβές για κάθε ερευνητική διαδικασία, ειδικά κατά τον υπολογισμό σε μη σταθερές ροές. Μία διαφορετική προσέγγιση στον υπολογισμό της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννήτριας αποτελούν οι

υπολογιστική κώδικες γνωστοί ως engineering codes. Αυτοί είναι σχετικά απλοί κώδικες γραμμένοι σε απλή γλώσσα που βασίζονται σε υπολογιστικές θεωρίες όπως η Momentum Theory αλλά κυρίως η Blade Element Theory (θεωρία στοιχείων πτερύγωσης-BEM).

Η θεωρία των Blade Elements γενικά θεωρεί το πτερόγιο ως ένα σύνολο αεροδυναμικά ανεξάρτητων διατομών η κάθε μία των οποίων θεωρείται σαν τμήμα αεροτομής. Οι ταχύτητες και οι φορτίσεις μελετώνται για κάθε element και συνδυάζοντας όλα τα στοιχεία έχουμε αποτελέσματα για της ανεμογεννήτρια. Τα υπολογιστικά προγράμματα που βασίζονται στην BEM χρησιμοποιούνται εκτενέστατα για τω υπολογισμό των φορτίσεων σε ανεμογεννήτριες και αποτελούν γρήγορες και αξιόπιστες τεχνικές ειδικά για τα προβλήματα συναρτήσε του χρόνου. Η BEM είναι μια μέθοδος υπολογισμού για σταθερές ροές αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα για ψευδοστατικές (quasi-steady) ροές και, μέσω μετατροπών και προγραμματιστικών τεχνικών, για τυρβώδεις ροές. Μία τέτοια προσέγγιση με κώδικα βασισμένο στην Blade Element Theory θα ακολουθηθεί στην παρούσα εργασία.

1.2 Οργάνωση Διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 2 - 8, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζουμε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων και προσεγγίσεων που σχετίζονται με το πρόβλημα της φόρτισης των πτερυγίων ανεμογεννήτριας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι περιπτώσεις φόρτισης που αναλύονται και οι ποσότητες που θα ερευνηθούν.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία του υπολογιστικού προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε.

Η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Τέλος ,στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ένας πίνακας συμβόλων.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρόβλημα της εκτίμησης των φορτίσεων της περρωτής ανεμογεννήτριας αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια ένα πολύ σημαντικό τομέα έρευνας και εξελίσσεται σε συνάρτηση με την πρόοδο των θεωριών σχετικά με τη σύνδεση των αεροδυναμικών φορτίων με τις φορτίσεις των πτερυγίων. Πολλές αναφορές βρίσκονται στην βιβλιογραφία ,σχετικά με διάφορες μεθόδους προσέγγισης και για λειτουργία σε ειδικές ροές ανέμου(αναφορά σε ασταθή ροή ή σε τύρβη).

Λιάφορες τεχνικές διατυπώθηκαν από πολύ παλιά.. Σημαντικές υπήρξαν οι μελέτες των Eiffel και Durand-Lesley τις πρώτες δεκαετίες του εικοστού αιώνα, των οποίων υπάρχουν αναφορές σε πολλές εκθέσεις της NACA. Οι Rankine και Froude αργότερα διατύπωσαν τη Θεωρία της Αξονικής Ροπής (Axial Momentum Theory) η οποία θεωρεί την περρωτή σαν ένα κινούμενο δίσκο κάθετο στη ροή ,ο οποίος διατηρεί διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές του και παράγει ορμή μέσω του κινούμενου ρευστού. Για το μηχανισμό παραγωγής της ώσης είναι αναγκαία η εκτίμηση της ροής της μάζας μέσα από το νοητό αγωγό που δημιουργείται στο δίσκο. Η αρχική θεωρία δεν λάμβανε υπ'όψη της τις επιδράσεις του ιξώδους, τις εναλλαγές στο οριακό στρώμα και την ανομοιόμορφη κατανομή των φορτίων. Μια σημαντική επέκταση της θεωρίας υπήρξε η εισαγωγή μια εξίσωσης ισορροπίας για τη στροφορμή στο οριακό στρώμα ώστε να λαμβάνεται υπ'όψη η περιστροφική κίνηση που μεταδίδεται στο ρευστό από το προωστικό σύστημα. Η θεωρία αυτή όπως διατυπώθηκε από τον Betz το 1926 διατυπώνει ότι υπάρχει κάποιο ανώτατο όριο

ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από μια ανεμογεννήτρια ακόμα και σε ατριβές ρευστό (συντελεστής ισχύος C_p περίπου 60%) και ένας μικρός συντελεστής απωλειών για μικρές φορτίσεις (της τάξης λίγων εκατοστιαίων μονάδων). Το όριο αυτό μικραίνει ακόμα περισσότερο όταν ληφθεί υπ'όψη και η επαγόμενη στροβιλότητα πίσω από την ανεμογεννήτρια και η διαταραχές στο απόρρευμα. Μία σχετικά απλή αντιμετώπιση έγινε από τον Glauert το 1959 με την εισαγωγή δύο προσδιοριστέων συντελεστών στις ταχύτητες του ρευστού και της περωτής. Άλλοι περιορισμοί τίθενται λόγω απωλειών τριβής (drag effects) στα περύγια και του αποτελέσματος της ύπαρξης πεπερασμένου αριθμού περυγίων (tip losses – λόγω μεγάλης διαφοράς πίεσης στο πάνω και στο κάτω άκρο των περυγίων), τα οποία οδηγούν σε μη ακριβή εκτίμηση των φορτίσεων.

Η Θεωρία στοιχείων περύγωσης (Blade Element Theory) όπως περιγράφεται από τους R.F.Wilson και P.B.Lissaman το 1974 θεωρεί το περύγιο ως ένα σύνολο αεροδυναμικά ανεξάρτητων διατομών η κάθε μία των οποίων θεωρείται σαν τμήμα αεροτομής. Σύμφωνα μ'αυτή χρησιμοποιούνται τοπικά δεδομένα αεροτομών ώστε να εξαχθούν ολοκληρωμένα στοιχεία για την περωτή. Η θεωρία αναπτύχθηκε αρκετά όταν κατανοήθηκε επαρκώς η συμπεριφορά των αεροτομών και υπήρχαν αρκετά δεδομένα από πειράματα σε αεροσύραγγα. Έτσι εξελίχθηκαν μέθοδοι εκτίμησης των φορτίσεων στην περωτή ανεμογεννητριών από τα blade elements που θεωρείται ότι έχουν χαρακτηριστικά αυτόνομων περυγίων σε κατάλληλη γωνία προσβολής. Ακόμα μ'αυτόν τον τρόπο εκτιμήθηκαν παράμετροι φορτίσεων σε συγκεκριμένα σημεία ακτινικά των περυγίων ,κάτι που μελετάται στην παρούσα εργασία. Ουσιαστικά ,όμως, η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι ένας συνδυασμός της Blade Element Theory με τη Momentum Theory , όπως αναφέρεται από τον Lakshmi N. Sankar, γνωστή ως Blade Element Momentum Theory (BEM). Η BEM προσεγγίζει καλύτερα το πεδίο των φερόμενων δυνάμεων στα περύγια και διορθώνει τις συνθήκες εισροής. Αυτή η

μορφή χρησιμοποιείται συνήθως στα υπολογιστικά μοντέλα και θα εννοείται από εδώ και πέρα όταν αναφέρεται ο όρος Θεωρία Στοιχείων Πτερίγωσης ή BEM. Η περαιτέρω μελέτη του Lakshmi N. Sankar για τα φαινόμενα στροβίλισμού σε συνδυασμό με τη BEM έδειξε ότι οι αποκλίσεις στη ισχύ και στις κάθετες φορτίσεις είναι τάξης του 2%. Μία άλλη εργασία των Anderson, Milborrow και Ross (1982) έδειξε ότι σε δυναμική εισερχόμενη ροή (μεταβολή της ταχύτητας με το χρόνο) όταν ο μειωμένος αριθμός Reynolds (Re_c) παραμένει σταθερός έχουμε μέγιστη εκμετάλλευση της ισχύος. Αυτό δείχνει ότι ένα τμήμα αεροτομής δεν χρειάζεται απαραίτητα να έχει υψηλό συντελεστή ανύψωσης (lift coefficient c_l). Ένας μικρότερος συντελεστής μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds και άρα σε μικρότερες απώλειες λόγω μείωσης της ταχύτητας του ανέμου.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις της Θεωρίας Στοιχείων Πτερίγωσης. Μια άλλη υλοποίηση όπως αναφέρεται από τους Johansson και Hjalman (1998) θεωρεί τις φορτίσεις στην ανεμογεννήτρια σαν ολοκληρωτικά τοπικές και έτσι οι φερόμενες ταχύτητες στα πετρίγια μεταβάλλονται ελεύθερα στην ακτινική και αξιμουθιακή κατεύθυνση. Μια σημαντική επέκταση για τη θεωρία αποτελεί η εισαγωγή παρεκκλίνουσας ροής (yawed flow) αφού η BEM αναφέρεται σε ροή κάθετη στην περσώτη. Μια τέτοια μέθοδος μπορεί να εντοπιστεί στην μελέτη του Glauert το 1926. Τα τελευταία χρόνια η πιο σημαντική κατεύθυνση στη θεωρία εντοπίζεται στις προσπάθειες για εισαγωγή ασταθών ροών στο πρόβλημα της φόρτισης ανεμογεννήτριας. Σπουδαία υπήρξε η μελέτη των Snel και Schepers το 1995, που περιέχει και διορθώσεις για τις απώλειες της θεωρίας λόγω της ύπαρξης πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων. Ακολουθεί αρκετά τη μέθοδο που είχε προταθεί από τον Stig Oye το 1986 η οποία εναλλακτικά για παρεκκλίνουσα ροή χρησιμοποιεί τη διατύπωση του Glauert. Η εφαρμογή της θεωρίας όπως διατυπώνεται από τον Johansson το 1998 κάνει εκτίμηση της μεταβολής των φερόμενων ταχυτήτων στο πετρίγιο σε περιπτώσεις απότομων

μεταβολών στην ταχύτητα του ανέμου ή περιοδικής ροής. Μία πολύ σημαντική προσέγγιση στο πεδίο της εκτίμησης της φόρτισης της πτερωτής ανεμογεννήτριας ,σε υπολογιστικό περιβάλλον, είναι αυτή του Anders Bjorek (2000). Ο υπολογιστικός κώδικας Aerforce που διατύπωσε σε γλώσσα Fortran περιέχει επεκτάσεις της BEM για δυναμική εισερχόμενη ροή (dynamic inflow) ,για παρεκκλίνουσα ροή (yawed flow) και ασταθή αεροδυναμική περιγύγιων (αεροδυναμικοί υπολογισμοί προσαρτημένοι σε δισδιάστατη ασταθή ροή και ένα ημί-εμπειρικό μοντέλο για δισδιάστατη απώλεια στήριξης. Τα τοπικά φορτία στα πτερώγια υπολογίζονται από δισδιάστατη εφαρμογή της BEM χρησιμοποιώντας πίνακες για τους συντελεστές ανήψωσης και αντίστασης αέρα ,σαν συνάρτηση των φερόμενων ποσοτήτων στα πτερώγια. Για σωστή λειτουργία του κώδικα σε όλες τις πιθανές γωνίες εισροής είναι αναγκαία κατάλληλα στοιχεία των αεροτομών στο εύρος των γωνιών προσβολής. Επίσης αυτά τα δεδομένα πρέπει να είναι προσαρμοσμένα για τρισδιάστατα επιδράσεις λόγω του φαινομένου της περιστροφής όπως περιγράφηκε από τον Bjorek το 1996 και τον Bak το 1999. Άλλες παραλλαγές της BEM σε υπολογιστικές εφαρμογές υπήρξαν οι προεκτάσεις με αεροελαστικούς κώδικες ,ώστε να μελετάται και η μηχανική συμπεριφορά του υλικού των πτερώγιων , όπως αναφέρονται από τον Σ. Βουτσινά το 1995 και τον Pedersen το 1996.

Στο πεδίο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) αρκετές προσεγγίσεις έχουν γίνει την τελευταία δεκαετία για την εκτίμηση των φορτίσεων της πτερωτής ανεμογεννητριών ,όπως και σε άλλες εφαρμογές. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Euler έχουν αναπτυχθεί αξιόλογα σχήματα όπως αυτό των Strawn και Barth το 1993. Τα περισσότερα από αυτά χρειάζονται πυκνά και πολυκομβικά πλέγματα για να αποδώσουν ακριβή αποτελέσματα και για να μειώσουν την αριθμητική διάχυση της στροβιλώδους ροής. Στις πραγματικές ροές ο στροβιλισμός εξασθενεί λόγω της επιρροής του ιξώδους και η διαδικασία της διάχυσης είναι αρκετά πιο πολύπλοκη με την εισαγωγή τήρβης. Αυτά τα φαινόμενα επηρεάζουν σημαντικά

τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Αρκετά υπολογιστικά σχήματα βασισμένα στη μέθοδο Navier-Stokes ,όπως αυτό του Sankar το 1986, έχουν προταθεί αλλά το υπολογιστικό κόστος είναι πάντα αρκετά υψηλό. State-of-the art αριθμητικές μέθοδοι είναι πιθανό να γίνουν εκμεταλλεύσιμες στη επόμενη γενιά των υπολογιστικών σχημάτων όπως αυτά που αναφέρει ο Landgrebe το 1994 ,ειδικά αν υψηλού επιπέδου συμβολικές γλώσσες γίνουν διαθέσιμες.

Μία πολύ σημαντική προσπάθεια στη μελέτη των φορτίσεων της περσώτης ανεμογεννήτριας έχει γίνει από τους David Laino και Craig Hansen από το 1992. Με τις μελέτες τους ανέπτυξαν ένα υπολογιστικό πρόγραμμα βασισμένο στη Θεωρία Στοιχείων Πτερυγώσης (BEM). Το πρόγραμμα ονομάζεται YawDyn και εξελίσσεται μέχρι σήμερα ,έχοντας πολλές εμπλουτισμένες λειτουργίες ,με τη χρηματοδότηση του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α. Παρέχεται ως shareware για ερευνητικές εκτιμήσεις. Το μοντέλο χρησιμοποιείται εκτενώς σήμερα για πολλές περιπτώσεις εφαρμογών και θεωρείται αρκετά αξιόπιστο ως προς τα αποτελέσματα του(στα όρια των δυνατοτήτων της θεωρίας πάντα) και εύχρηστο ως προς τις πολλές δυνατότητες επιλογών που προσφέρει στο χρήστη. Οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί του βασίζονται στη Blade Element Theory με προεκτάσεις για δυναμική (ασταθής) ροή ανέμου , παρεκκλίνουσα ροή ,χρήση μοντέλων απωλειών ακροπτερυγίου, εισαγωγή πολλών στοιχείων αεροτομών ,χρήση μοντέλων δυναμικής απώλειας στήριξης, υπολογισμό στροβιλισμού φερόμενων ταχυτήτων και μοντέλα για εισαγωγή δεδομένων τυρβώδους ροής.

Σ'αυτό το σημείο οφείλουμε να αναφερθούμε στη μελέτη των Earl P.N. Duque και Wayne Johnson το 2000 σχετικά με την εκτίμηση της φόρτισης περσώνων πειραματικού μοντέλου ανεμογεννήτριας χρησιμοποιώντας και συγκρίνοντας διάφορες υπολογιστικές μεθόδους. Τα προγράμματα που συγκρίθηκαν ήταν το Yawdyn, βασισμένο στη BEM θεωρία, το CamRad II ,βασισμένο στη Vortex-Lattice μέθοδο πλεγμάτων, και το OverFlow,

βασισμένο στη Reynolds-averaged Navier-Stokes υπολογιστική προσέγγιση. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα από τη βάση δεδομένων IEA Annex XIV του Λιεθνή Συνδέσμου Ενέργειας των Η.Π.Α. (IEA). Τα γενικά συμπεράσματα ήταν τα εξής :

Οι προσεγγίσεις των YawDyn και CamRad II δείχνουν ασυμφωνίες ως προς την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, λόγω ανεπάρκειας σε σχέση με την κεντρική απώλεια στήριξης (inboard stall) και την επιβράδυνσή της. Το μοντέλο του OverFlow υπόσχεται ακρίβεια στην πρόβλεψη των φορτίσεων και της απώλειας στήριξης των περυγίων, όμως η ανακρίβεια στη μετάδοση του στροβιλισμού, στη μοντελοποίηση του οριακού τυρβώδους στρώματος και στην πυκνότητα του πλέγματος έχουν μειώσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κάποια γενικά στοιχεία αποτελεσμάτων φαίνονται στα ακόλουθα γραφήματα :

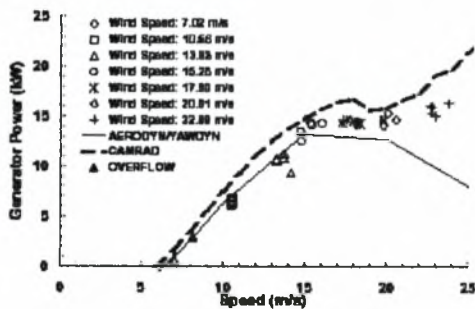


Figure 6: Comparison of power as predicted by computation methods

Σχήμα 1 – Υπολογισμένη ισχύς

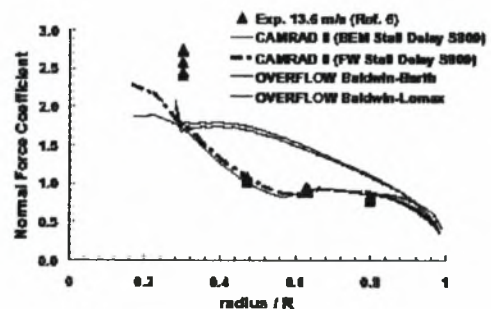


Figure 10: C_n vs. r/R
13.6 m/s average wind speed

Σχήμα 2 – Υπολογισμένος

συντελεστής αξονικής δύναμης

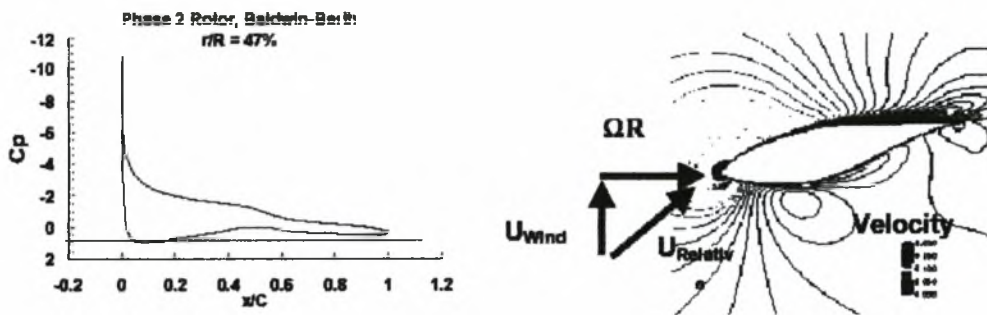
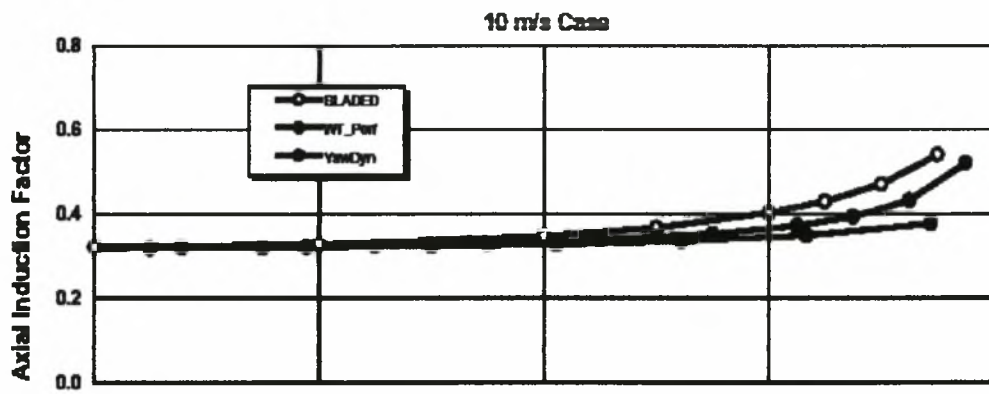


Figure 11: OVERFLOW pressure distribution and velocity contours
 $r/R = 47\%$, 13.6 m/s average wind speed

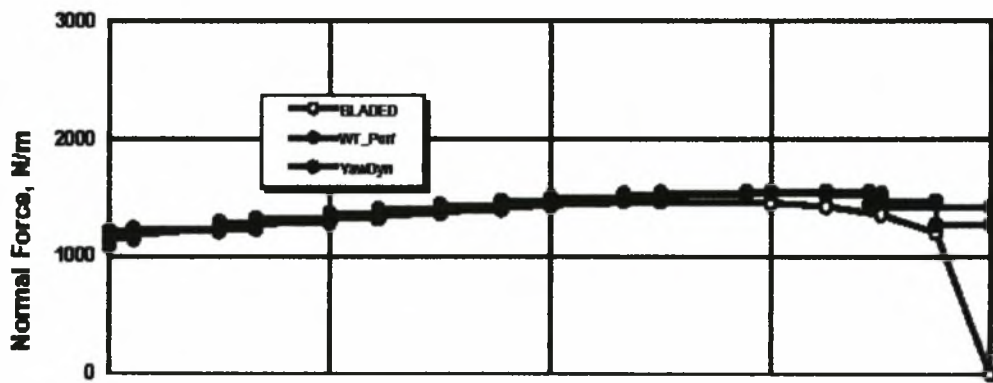
Σχήμα 3 – Υπολογισμένη κατανομή πίεσης και ταχύτητας

Αξίζει να αναφερθούμε και στην μελέτη των Marshall L., Buhl, Jr., Alan D. Wright και James L. Tangler η οποία συγκρίνει τα αποτελέσματα και τα αεροδυναμικά μοντέλα τριών υπολογιστικών προγραμμάτων βασισμένων στην Blade Element Theory, το Yawdyn , το Bladed και το WT_Perf. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα ανεμογεννητριών O/A και δεδομένα για σταθερή ροή ανέμου και ασταθή, ακραία ριπή ανέμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και τα τρία προγράμματα παρήγαγαν αξιόπιστα αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις και η χρήση δυναμικών μοντέλων ροής , απωλειών και απώλειας στήριξης κρίθηκε πολύ σημαντική.

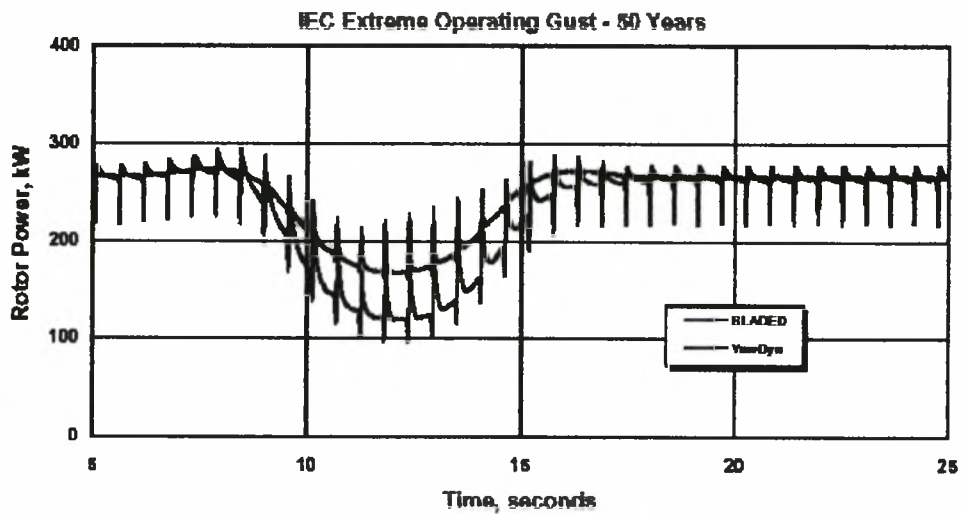
Κάποια από τα γενικά αποτελέσματα φαίνονται στη συνέχεια :



Σχήμα 4 – Υπολογισμένος συντελεστής αξονικής δύναμης



Σχήμα 5 – Υπολογισμένη αξονική δύναμη



Σχήμα 6 – Υπολογισμένη ισχύς

Αφού διαπιστώθηκαν αρκετά συμπεράσματα από διάφορες εργασίες στη βιβλιογραφία, στη παρούσα εργασία θα μελετηθεί συγκεκριμένα η συμπεριφορά ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα από άποψη φόρτισης ,κυρίως ,και ισχύος χρησιμοποιώντας το μοντέλο YawDyn και επεκτάσεις αυτού για συγκεκριμένα είδη ροών και κατανομών αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 3 Θεωρητικό υπόβαθρο

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των μεθόδων στις διάφορες ειδικές συνθήκες ροής που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

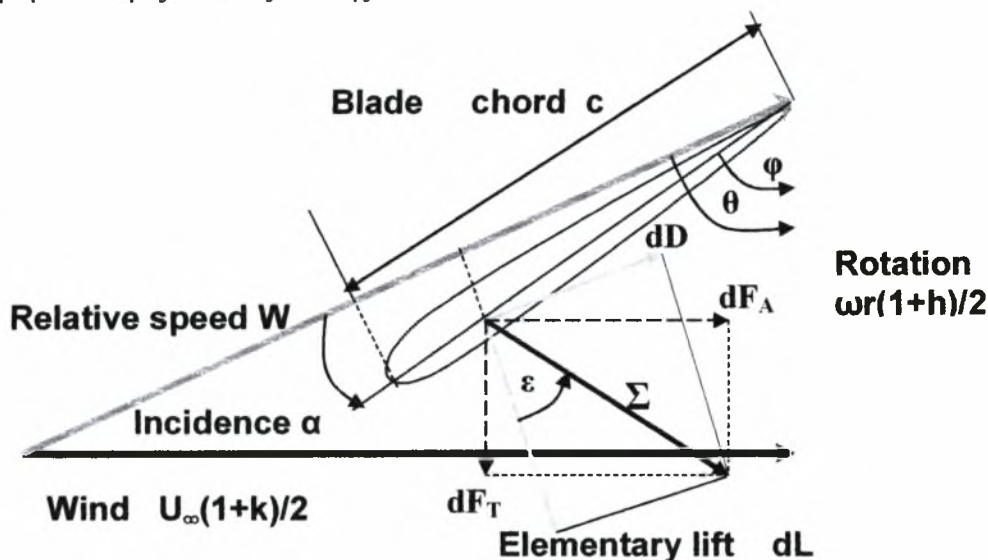
3.1 Βασική αεροδυναμική πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα– συνοπτική θεωρία στοιχείων πτερύγωσης σε σταθερή ροή χωρίς απόρευμα (Blade Element Theory -steady flow)

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στην παρούσα μελέτη βασίζεται στη θεωρία στοιχείων πτερύγωσης (Blade Element Theory) η οποία εμπλουτίζεται μέσω του υπολογιστικού προγράμματος YawDyn.

Η Blade Element Theory γενικά θεωρεί το πτερύγιο ως ένα σύνολο αεροδυναμικά ανεξάρτητων διατομών η κάθε μία των οποίων θεωρείται σαν τμήμα αεροτομής. Οι ταχύτητες και οι φορτίσεις μελετώνται για κάθε element και συνδυάζοντας όλα τα στοιχεία έχουμε αποτελέσματα για την ανεμογεννήτρια.

Στο Σχήμα 7 φαίνεται το τρίγωνο ταχυτήτων που προκύπτει για τη ροή γύρω από μια αεροτομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής. Η αεροτομή προκύπτει από την τομή του πτερυγίου με ένα επίπεδο παράλληλο

στον οριζόντιο άξονα και εφαπτόμενο στον κύκλο με ακτίνα r από τον άξονα περιστροφής. Η ανεμογεννήτρια εκτίθεται σε στρωτή μόνιμη ροή μέτρου U ή U_{∞} με διεύθυνση παράλληλη στον οριζόντιο άξονα της.



Σχήμα 7 - Τρίγωνο ταχυτήτων αεροτομής περρωτής σε περιστροφή.

. Λεχόμενα τη μη ύπαρξη στροβιλότητας στη ροή και διαταραχών στον απόρρου του περρωγίου. Το περρωγίο, που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω , εκτίθεται στη ροή των ταχυτήτων U_{∞} και $-\omega \cdot r$ (περιστροφική ταχύτητα σε κάθε θέση r). Η σχετική ταχύτητα W είναι το διανυσματικό άθροισμα των δυο αυτών ταχυτήτων. Το περρωγίο, ουσιαστικά, δέχεται τη συνολική ροή ταχύτητας W . Στην πραγματικότητα, λόγω του συνδυασμού της περιστροφής της ανεμογεννήτριας και της εισερχόμενης ροής, δημιουργούνται φαινόμενα στροβιλότητας και διαταραχών, στην εξερχόμενη από την ανεμογεννήτρια ροή. Μία μέθοδος εισαγωγής των μεταβολών, που προκαλούν αυτά τα φαινόμενα, στον υπολογισμό προτάθηκε από τον Glauert (1959) με την εισαγωγή δυο συντελεστών k και h στις ταχύτητες U_{∞} και

ωr , οι οποίοι τις διορθώνουν ως : $U_{\infty} \frac{1+k}{2}$ και $-\omega r \frac{1+h}{2}$ και η σχετική ταχύτητα στη θέση r είναι (βλ. Σχήμα A1).

$$W = U_{\infty} \frac{(1+k)^2}{2} + \omega r \frac{(1+h)^2}{2}^{1/2} \quad (1)$$

και η πραγματική γωνία προσβολής της αεροτομής με την σχετική ταχύτητα w θα είναι (βλ. Σχήμα A1)

$$\alpha = \alpha(r) = \theta \quad \varphi = \theta(r) \quad \varphi(r) \quad (2)$$

$$\text{όπου} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{U_{\infty} \frac{(1+k)}{2}}{\omega r \frac{(1+h)}{2}} = \tan^{-1} \frac{1+k}{\lambda(1+h)} \quad (3)$$

και το λ ορίζεται ως $\lambda = \omega r / U_{\infty}$, φ είναι η κλίση της χορδής της αεροτομής (μήκους c) ως προς την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ωr . (Η φ μπορεί να θεωρηθεί και ως η γεωμετρική γωνία συστροφής (pitch angle) του περυγίου σε κάθε θέση r , δεδομένου ότι η εφαπτομενική ταχύτητα έχει γνωστή διεύθυνση, κάθετη στην ακτίνα r).

Η αεροτομή δέχεται στοιχειώδεις δυνάμεις δυναμικής άνωσης (lift), dL , και αντίστασης (drag), dD , κάθετες και παράλληλες αντίστοιχα στην διεύθυνση της σχετικής ταχύτητας W . από τη γεωμετρία του σχήματος έχουμε ότι :

$$\varepsilon = \tan^{-1} \frac{dD}{dL} = \tan^{-1} \frac{C_D}{C_L} \quad (4)$$

Η συνισταμένη δύναμη $d\Sigma$ των dL και dD μπορεί να αναλυθεί στις dF_A και dF_T συνιστώσες .Η dF_A είναι η στοιχειώδης αξονική δύναμη και η dF_T , η εφαπτομενική (κάθετη στο περύγιο). Αυτές είναι ίσες με :

$$dF_A = \frac{1}{2} \rho c W^2 C_L \frac{\cos(\theta - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (5)$$

$$dF_T = \frac{1}{2} \rho c W^2 C_L \frac{\sin(\theta - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (6)$$

Ο υπολογισμός της ολικής στοιχειώδους αξονικής δύναμης γίνεται σύμφωνα με τον Gouhieres (1982) ο οποίος υπέδειξε ότι :

$$dF = B dF_A = \frac{1}{2} \rho B c W^2 C_L \frac{\cos(\theta - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (7)$$

όπου B ο αριθμός των περυγίων της ανεμογεννήτριας.

Η ολική στοιχειώδης ροπή στρέψης στον άξονα είναι

$$dT = rBdF_T = \frac{1}{2} \rho BcrW^2 C_L \frac{\sin(\theta - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (8)$$

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού των dF και dT μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας τα θεώρηματα αξονικής ορμής και στροφορμής (βλ. Gourieres, 1982).

Το θεώρημα της αξονικής ορμής δίνει:

$$dF = [\rho(U_\infty - kU_\infty) 2\pi r dr] U_\infty \frac{(1+k)}{2} = \rho \pi r dr U_\infty^2 (1 - k^2) \quad (9)$$

όπου kU_∞ είναι η ταχύτητα πίσω και μακριά από την πτερωτή και U_∞ είναι η ταχύτητα μπροστά και μακριά της, ενώ δια μέσου της πτερωτής είναι $U_\infty \frac{(1+k)}{2}$

Το θεώρημα της στροφορμής δίνει :

$$\begin{aligned} dT &= \text{Ροπή αδραν.} \cdot \square \text{ γων. επιταχ.} = 2\pi r dr \rho U_\infty \frac{(1+k)}{2} r^2 (h\omega - \omega) = \\ &= \pi r^3 \omega dr U_\infty (1+k) (h - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

όπου, $h\omega$ είναι η περιστροφική ταχύτητα του αέρα μακριά και πίσω από τον ρότορα, ενώ κοντά στον ρότορα είναι ω .

Εξισώνοντας τα dF και τα dT που βρέθηκαν, με διαφορετικούς τρόπους, στις (7), (8), (9) και (10) προκύπτει ότι:

$$\frac{C_L B c \cos(\theta - \varepsilon)}{8\pi r \cos \varepsilon \sin^2 \theta} = \frac{1 - k}{1 + k} \quad (11)$$

$$\frac{C_L B c \sin(\theta - \varepsilon)}{4\pi r \sin 2\theta \cos \varepsilon} = \frac{h - 1}{h + 1} \quad (12)$$

Ο τοπικός βαθμός απόδοσης στη θέση r της αεροτομής είναι:

$$\eta(r) = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho (2\pi r dr) U_\infty^3} = \frac{\omega dT}{\rho \pi r dr U_\infty^3} = \lambda^2 (1 + k) \left(\frac{h - 1}{h + 1} \right) \quad (13)$$

Για να είναι ο βαθμός απόδοσης βέλτιστος πρέπει :

$$\frac{d\eta(r)}{dk} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{d\eta(r)}{d\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \eta = \eta_{opt} \quad (14)$$

Ο τύπος της αεροτομής δίνεται από γνωστές συναρτήσεις των αδιάστατων συντελεστών C_L και C_L .

$$C_L = f_1(\alpha) \quad (15)$$

$$C_D = f_2(\alpha) \quad (16)$$

Κατά το σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας θεωρούνται γνωστά τα μεγέθη : U_∞ , w , B , $R = R_{max}$, $r_{πλήμνη}$ και $\lambda_0 = \omega R / U_\infty$. Οι άγνωστες συναρτήσεις που ψάχνουμε είναι οι : $\alpha(r)$, $\theta(r)$, $\phi(r)$, $\varepsilon(r)$, $h(r)$, $k(r)$, $\lambda(r)$, $C_L(r)$, $C_D(r)$, $C(r)$, $\eta(r)$. Το r είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή του συστήματος (οι θέσεις ακτινικά πάνω στο πτερύγιο). Το σύστημα που προκύπτει αποτελείται από 10 εξισώσεις με 11 αγνώστους. Η τελική εξίσωση μπορεί να προέλθει από διάφορες υποθέσεις που αφορούν το σχεδιασμό της πτερωτής. Κατά μια από αυτές, ο σχεδιασμός της πτερύγωσης πρέπει να γίνει έτσι, ώστε ο λόγος C_D/C_L σε κάθε θέση r να είναι ο ελάχιστος, πράγμα το οποίο προσδιορίζει αμέσως τη γωνία προσβολής $\alpha(r)$ σαν σταθερή (με αναγκαία υπόθεση μόνο ένα τύπο αεροτομής σε όλο το μήκος του πτερυγίου). Έτσι έχουμε :

$$C_D/C_L = \min f_1(\alpha)/f_2(\alpha) \Rightarrow \alpha(r) = const \quad (17)$$

Άλλη υπόθεση είναι να δεχθούμε κάποια γωνία προσβολής $\alpha = \alpha_0$ για $r = R = R_{max} = D/2$, στο άκρο του πτερυγίου και μετά να υποθέσουμε ότι η $\alpha(r)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το r μέχρι την πλήμνη, αλλά κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το C_D/C_L προχωρώντας από το άκρο προς την πλήμνη να αυξάνεται. Έτσι έχουμε :

$$\alpha(r) = \alpha_1 - \alpha_2 \frac{r}{R} \quad (18)$$

$$\text{με } \alpha_0 = \alpha_1 - \alpha_2, \quad \alpha_{\text{πλημνη}} = \alpha_1 - \alpha_2 \frac{r_{\text{πλημνη}}}{R} \quad \text{και } \alpha_{\text{πλημνη}} < \alpha_{\text{απωλεια στήριξης}} = \alpha_{\text{max}}.$$

Μια άλλη υπόθεση είναι ότι από τη σχέση $C_D/C_L = \min$ προκύπτει η βέλτιστη γωνία

προσβολής α_{opt} για $r = R$, και μετά η $\varphi(r) = \theta(r) - \alpha(r)$ μεταβάλλεται με τη σχέση :

$$2\pi r \tan \varphi(r) = 2\pi R \tan(\theta_{opt} - \alpha_{opt}) = \text{const} \quad (19)$$

Οι εξισώσεις λοιπόν μπορούν να συμπληρωθούν με μια από τις (17), (18) ή (19) και το πρόβλημα να λυθεί.

Στην περίπτωση γνωστών δεδομένων αεροτομής, όπως στο παρόν πρόβλημα, η μορφή του περιγίου είναι γνωστή καθώς επίσης η κατανομή της χορδής $c(r)$ και η κατανομή της γωνίας συστροφής $\varphi(r)$. Επομένως δεν χρειάζονται πρόσθετες υποθέσεις για την κατανομή $a(r)$ και τον λόγο C_L/C_D .

Αφού υπολογισθούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά της πτερωτής σε κάθε θέση r , ολοκληρώνοντας μπορούν να βρεθούν ο ολικός βαθμός απόδοσης, h_{oi} , η αξονική ώθηση, F στην πτερωτή, η ροπή στρέψης, T , και η ισχύς P όπως φαίνεται παρακάτω :

Η αξονική ώθηση είναι :

$$F = \int_{\text{επιφάνεια}} \rho \pi r U_{\infty}^2 (1 + k^2) dr \quad (20)$$

ο συντελεστής αξονικής ώθησης :

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S} = \frac{2\pi}{S} \int_{\text{επιφάνεια}} r (1 + k^2) dr \quad (21)$$

(όπου $S = \pi (R^2 - r_{\text{επιφάνεια}}^2)$ είναι η συνολική επιφάνεια που καλύπτεται)

(22)

$$T = \int_{\text{επιφάνεια}} \pi r r^3 \omega U_{\infty} (1 + k) (h - 1) dr \quad (23)$$

ο συντελεστής ροπής στρέψης

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 S R} = \frac{2\pi \omega}{U_{\infty} S R} \int_{\text{επιφάνεια}} r^3 (1 + k) (h - 1) dr \quad (24)$$

και ο ολικός βαθμός απόδοσης $h_{ολ}$,

$$\eta_{ολ} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 S} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 S} = C_T \lambda_0 \quad (25)$$

ο βαθμός απόδοσης $h_{ολ}$ μπορεί να διορθωθεί για να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση του φαινομένου της ύπαρξης πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων το οποίο έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφική αναφορά . Σύμφωνα με τον Gouieres (1982) η διόρθωση είναι :

$$\eta'_{ολ} = \eta_{ολ} \left[1 - \frac{1.39}{B} \sin^2 \theta_{r-R} \right] \quad (26)$$

Οι υπολογισμοί των μεγεθών που ενδιαφέρουν την παρούσα μελέτη γίνονται με το μοντέλο YawDyn ,με εξισώσεις βασισμένες στην BEM , μέσω προγραμματιστικών τεχνικών που θα αναλυθούν στα κεφάλαια 4 και 5.

3.2 Quasi-steady (unsteady)

Στην απλή αεροδυναμική θεωρία ,με τη θεώρηση ενός κινούμενου δισκοειδούς επιπέδου στην πτερωτή της ανεμογεννήτριας, οι συνθήκες ροής και τα αεροδυναμικά φορτία θεωρούνται σταθερά στην ακτινική και στην αζιμουθιακή κατεύθυνση. Η θεωρία στοιχείων περύγωσης (BFM) βασίζεται στον υπολογισμό των αντιδράσεων από τα περύγια σε σχέση με την αλλαγή της οριμής του ανέμου. Θεωρείται ότι οι δυνάμεις στα περύγια προκαλούν φερόμενες ταχύτητες στο επίπεδο του θεωρούμενου δίσκου (induced velocities ή induction). Αυτές οι ταχύτητες είναι συνάρτηση των φορτίων στα περύγια. Αυτή η σύζευξη αποτελεί καθοριστική σχέση για τη διατύπωση υπολογισμών και τη σύνδεση με οποιαδήποτε μη σταθερή μορφή αεροδυναμικών φορτίων.

Γενικά η τεχνική που ακολουθείται βασίζεται στον υπολογισμό με καταστάσεις ψευδοισοροπίας (quasi-steady). Τα αεροδυναμικά φορτία ,οι φερόμενες ταχύτητες στην πτερωτή, η γωνίες προσβολής και τα φορτία θεωρούνται συναρτήσεις του χρόνου και οι υπολογισμοί γίνονται σε χρονικά βήματα ώστε να προσομοιωθεί η κατάσταση της μη σταθερής ροής (dynamic inflow). Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές στις προγραμματιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Λεπτομέρειες για το πώς χειρίζεται στα μεταβλητά αεροδυναμικά στοιχεία το μοντέλο YawDyn θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 5 ,αλλά αυτή η προσέγγιση ξεφεύγει από τις κατευθύνσεις της παρούσας εργασίας. Στη μεταβαλλόμενη κατάσταση ανέμου θα μελετηθούν μόνο συγκεκριμένες κατανομές συναρτήσεων του χρόνου και καθαρά στην κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πτερωτής, αφού η κύρια κατεύθυνση της εργασίας είναι οι εκτιμήσεις των φορτίσεων των περυγίων παρά η γενικότερη ανάλυση χειρισμού μεταβατικών αεροδυναμικών στοιχείων σε υπολογιστική μορφή.

3.3 Τύρβη

Μία σημαντική και ρεαλιστική μορφή ροής ανέμου που εισέρχεται στην περωτή της ανεμογεννήτριας είναι η τυρβώδης ροή.

Η τύρβη στον αέρα αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο λόγω της ανισοτροπικής κατανομής των χαρακτηριστικών του. Το θεωρητικό υπόβαθρο που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται σε δύο μορφές περιγραφής του φαινομένου :

A) Καθοριστική περιγραφή (deterministic description).

Η μορφή της τυρβώδους ροής θεωρείται ότι αποτελεί μια περιοδική κατανομή ταχυτήτων σε τρεις διαστάσεις. Έχει συνιστώσες U , V , W (οριζόντια κατά την διεύθυνση του άξονα της περωτής, εγκάρσια και κατακόρυφη αντίστοιχα).

Οι τρεις συνιστώσες είναι:

Αξονική συνιστώσα $U(y,z,t)$:

$$U(y,z,t) = U(z) + A_1 \sin(2\pi f_1 t) + \\ A_2 y \sin \left(2\pi \left[f_2 t + \frac{1}{4} \sin(2\pi f_3 t) \right] \right) + \\ A_3 z \sin \left(2\pi \left[f_2 t + \frac{1}{4} \cos(2\pi f_3 t) \right] \right)$$

όπου: x , y , z οι συντεταγμένες με αρχή των αξόνων το κέντρο της περωτής και x τον άξονα της περωτής και f η συχνότητα της τύρβης.

όπου :

$$U(z) = U_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.2}$$

Εγκάρσια συνιστώσα $V(t)$:

$$V(t) = A_3 \sin \left[2\pi \left(f_4 t + \frac{1}{4} \sin(2\pi f_5 t) \right) \right]$$

Η Κατακόρυφη συνιστώσα εδω θεωρείται ότι είναι $W(t) = 0$.

Οι συντελεστές στις εξισώσεις αυτές είναι:

$$A_1 = 2\sigma_1 \quad (\sigma : \text{μέση τετραγωνική τιμή της τάρβης})$$

$$A_2 = A_1 / D$$

$$A_3 = 0.8 A_1$$

και οι συχνότητες:

$$f_1 = 0.0194 U_{hub} / \Delta_1$$

$$f_2 = 4f_1$$

$$f_3 = f_1 / 10$$

$$f_4 = 0.6f_1$$

$$f_3 = f_4/10$$

B) Στοχαστική περιγραφή

Στην περιγραφή αυτή η τυρβώδης ροή θεωρείται μη ομοιόμορφη και εξετάζονται όλες οι συχνότητες της.

Λιακυμάνσεις τύρβης:

$$\sigma_u = \sigma_1 \quad (\text{αξονική συνιστώσα})$$

$$\sigma_v = 0.8\sigma_1 \quad (\text{εγκάρσια συνιστώσα})$$

$$\sigma_w = 0.5\sigma_1 \quad (\text{κατακόρυφη συνιστώσα})$$

Κλίμακα τύρβης (φάσμα κατά Kaimal)

$$L_x = 8.1 \Lambda_1$$

$$L_y = 2.7 \Lambda_1$$

$$L_z = 0.66 \Lambda_1$$

Το πώς χρησιμοποιήθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο για την τύρβη και πως μορφοποιήθηκαν τα δεδομένα της για εισαγωγή στο υπολογιστικό μοντέλο θα αναφερθούμε στα κεφάλαια 4 και 5.

Κεφάλαιο 4 Περιγραφή περιπτώσεων φόρτισης

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα οριστούν και θα αναλυθούν οι περιπτώσεις φόρτισης της περρωτής ανεμογεννήτριας που θα μελετηθεί ,θα παρουσιαστούν τα δεδομένα ,οι παραδοχές και οι ποσότητες που θα ερευνηθούν και συγκεκριμένα η μέθοδος που ακολουθήθηκε.

Γενικά, για ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα χωρίς απόρρευμα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο YawDyn, θα μελετηθούν τρία είδη φόρτισης :

- 1) Σταθερή ροή
- 2) Ακραία ριπή ανέμου (extreme operating gust - eog)
- 3) Τύρβη

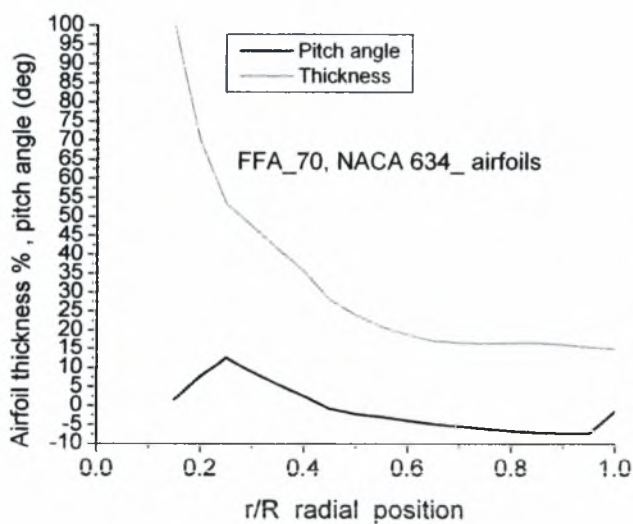
4.1 Σταθερή ροή

4.1.1 Γενικά στοιχεία και δεδομένα

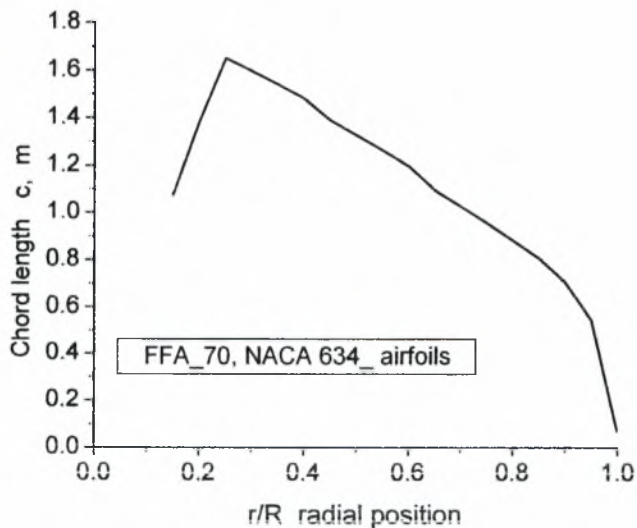
Πριν οριστούν τα χαρακτηριστικά τη εισερχόμενης ροής ανέμου στην ανεμογεννήτρια, θα πρέπει να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά του πειραματικού μοντέλου ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκαν και τα δεδομένα που υπήρξαν αναγκαία για τους υπολογισμούς.

- Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας :
 - Τρία πτερύγια
 - Μορφή αεροτομών : FFA_70 και NACA 634_XX
 - Διάμετρος πτερωτής : $D = 2R = 43 \text{ m}$
 - Ταχύτητα αναφοράς ανέμου $U_{ref} = 15 \text{ m/s}$
 - Ταχύτητα περιστροφής πτερωτής : $\omega = 27 \text{ rpm}$
 - Μήκος πτερυγίου : 19.04 m
 - Ενεργό αεροδυναμικό μήκος : 16.04 m
 - Γωνία ακροπτερυγίου : -1.5 μοίρες
 - Η επιφάνεια του πτερυγίου θεωρείται λεία και καθαρή
 - Η ισχύς ρυθμίζεται με απώλεια στήριξης (stall regulated wind turbine)

Στα Σχήματα 1 και 2 φαίνονται οι το πάχος (thickness $t/c \%$), η γωνία συστρόφη φ (pitch angle φ , deg.) και το μήκος χορδής (c (m)) των πτερυγίων συναρτήσει της απόστασης από τον άξονα r/R της ανεμογεννήτριας.



Σχ. 8 Διανομή πάχους t και γωνίας συστρόφης φ του πτερυγίου



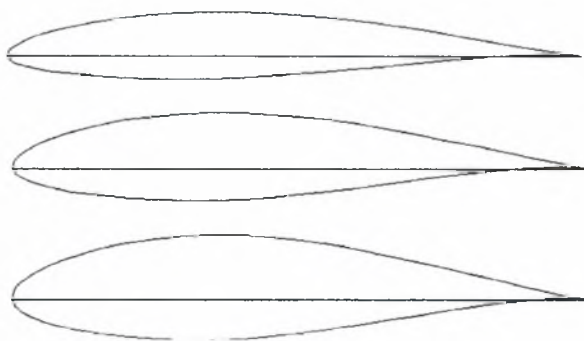
Σχ. 9 Διανομή μήκους της χορδής c του πτερυγίου

Στα σχήματα 10 και 11 φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία περυγίου και η μορφή της αεροτομής του περυγίου σε διάφορες θέσεις r :

Σχ.10. Γεωμετρικά στοιχεία περυγίου

Αριθμός θέσης	απόσταση r από τον άξονα (m)	Μήκος χορδής c (m)	Twist angle (μοίρες)	Γωνία συστροφής φ (μοίρες)	r/R	Πάχος t/c %
1	3.23	1.075	9	1.6	0.15	100
2	4.3	1.383	15	7.6	0.2	69.69
3	5.38	1.65	20	12.6	0.25	53.4
4	6.45	1.596	16.3	8.9	0.3	47.52
5	7.53	1.54	13	5.6	0.35	41.43
6	8.6	1.481	10.05	2.65	0.4	35.65
7	9.68	1.389	6.6	-0.8	0.45	28.08
8	10.75	1.326	5.2	-2.2	0.5	24.1
9	11.83	1.262	4.5	-2.9	0.55	20.95
10	12.9	1.196	3.55	-3.85	0.6	18.93
11	13.98	1.095	2.6	-4.8	0.65	17.2
12	15.05	1.026	2.02	-5.38	0.7	16.6
13	16.13	0.955	1.36	-6.04	0.75	16.4
14	17.2	0.881	0.77	-6.63	0.8	16.55
15	18.28	0.806	0.33	-7.07	0.85	16.6
16	19.35	0.705	0.14	-7.26	0.9	16.1
17	20.43	0.545	0.05	-7.35	0.95	15.4
18	21.45	0.07	5.9	-1.5= γωνία ακροπερυγίου	1	15

Σχ.11. Μορφή αεροτομής του περυγίου σε διάφορες θέσεις r



NACA 63412 Πάχος 12%

NACA 63415 Πάχος 15%

NACA 63418 Πάχος 18%



NACA 63421 Πάχος 21%



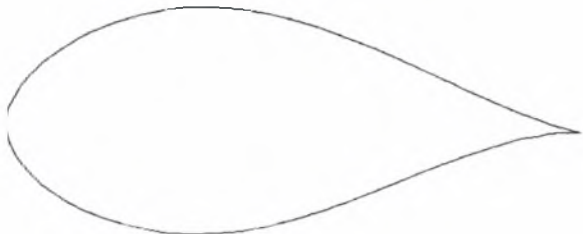
NACA 63424 Πάχος 24%



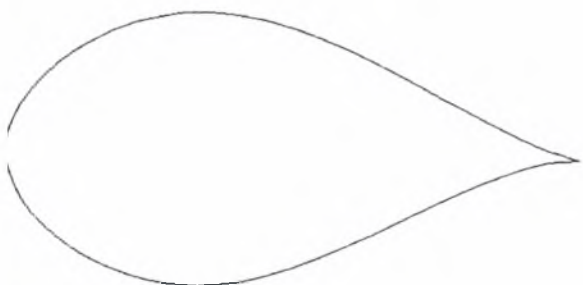
NACA 63428 Πάχος 28%



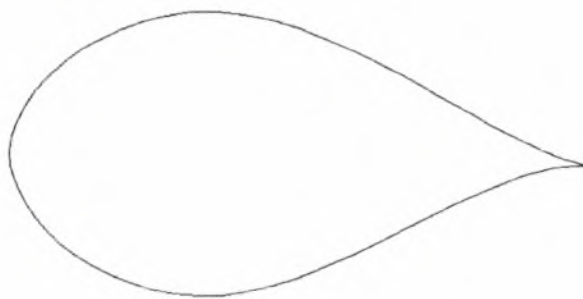
NACA 63435 Πάχος 35%



NACA 63440 Πάχος 40%



NACA 63448 Πάχος 48%



NACA 63450 Πάχος 50%

The image shows the upper and lower surfaces of an airfoil profile. The upper surface is a smooth curve that starts at a leading edge on the left and tapers to a sharp point on the right. The lower surface is a similar curve, slightly more pronounced, also tapering to a sharp point on the right. The airfoil is oriented horizontally with the leading edge on the left.

FFA70 Πάχος 70%

The image shows the upper and lower surfaces of a thicker airfoil profile. The upper surface is a smooth curve that starts at a leading edge on the left and tapers to a sharp point on the right. The lower surface is a similar curve, slightly more pronounced, also tapering to a sharp point on the right. The airfoil is oriented horizontally with the leading edge on the left.

FFA100 Πάχος 100%

Για κάθε στοιχείο περιήγωσης (blade element) ,το μοντέλο YawDyn μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα αρχείο δεδομένων για στοιχείο αεροτομής (airfoil data file). Χρησιμοποιώντας το συνοδευτικό κώδικα του YawDyn , το FoilCheck, δημιουργήθηκαν 10 τέτοια αρχεία τα οποία περιέχουν δεδομένα για αντίστοιχο αριθμό αεροτομών. Οι αεροτομές που περιγράφουν τα αρχεία είναι οι : ffa70,NACA63450, NACA 63448, NACA 63440, NACA 63435, NACA 63428, NACA 63424, NACA 63421, NACA 63418, NACA 63415. Τα δεδομένα που εισάγονται σε κάθε airfoil data file ,και που είναι αναγκαία ώστε το πρόγραμμα να κάνει τους αεροδυναμικούς υπολογισμούς με βάση τη Blade Element Theory, είναι οι

γωνία προσβολής, ο στατικός συντελεστής δυναμικής άνωσης C_l , ο συντελεστής αντίστασης C_d και ο συντελεστής καμπτικής ροπής C_m .

Χρησιμοποιήθηκαν 18 στοιχεία περύγωσης (blade elements) ανά περύγιο. Τα στοιχεία που εισάγονται για κάθε element είναι : η απόσταση του κέντρου του element από τη βάση του περυγίου, η γωνία συστροφής του, το μήκος του (μετρημένο στον άξονα του περυγίου) και το μήκος της χορδής του. Σχηματικά φαίνονται παρακάτω :

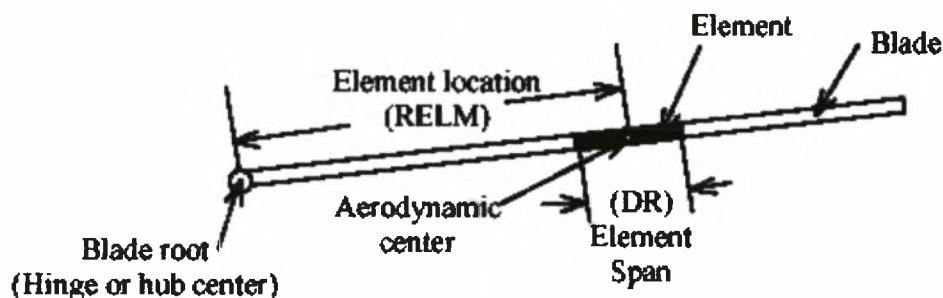


Figure 6.1 Sketch of the blade element geometry and nomenclature.

Σχήμα 12 – Μορφή και χαρακτηριστικά στοιχείου περύγωσης

Το πώς γίνεται η διαχείριση στοιχείων εισόδου από το YawDyn ,η μορφή των αρχείων και ο τρόπος επεξεργασίας θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 5.

4.1.2 Λιατόπωση και εισαγωγή της ροής του ανέμου

Το πρώτο είδος της ροής που μελετάται είναι σταθερή ροή ανέμου. Η κατανομή της ταχύτητας είναι σταθερή σε μία τιμή σε όλο το τοπικό εύρος της και έχει κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της περρωτής της ανεμογεννήτριας. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται τα συστήματα των αξόνων και οι τοπικές μεταβλητές, όπως ορίζονται από το YawDyn :

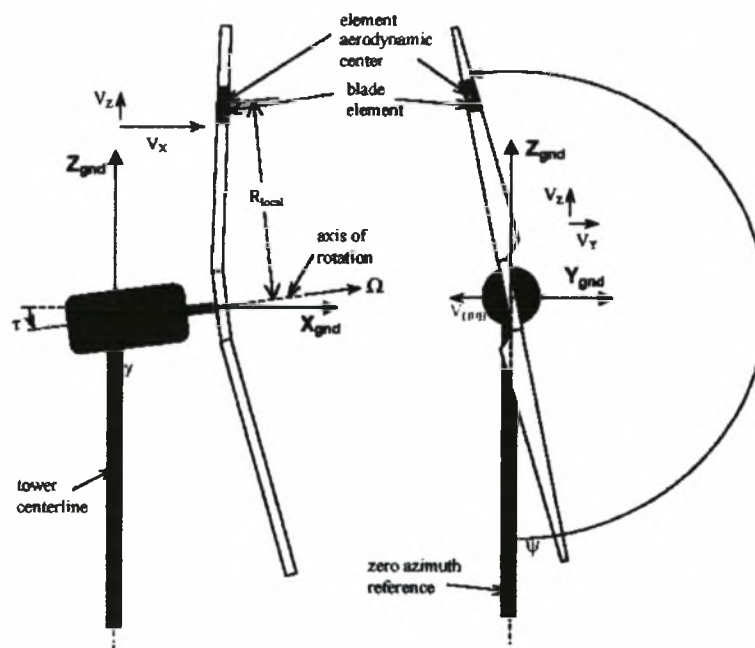


Figure C1 – AeroDyn ground coordinate system and sign conventions. All angles shown are positive. Rotor shown in zero yaw angle condition. Ground coordinate system, X, Y, Z does not move or rotate with any part of the turbine.

Σχήμα 13 – Μορφή ανεμογεννήτριας και θέση στοιχείου περιήγωσης

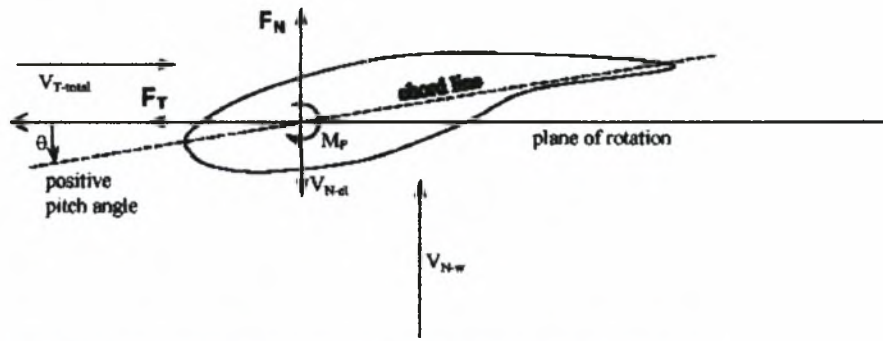


Figure C2 – Cross-section view of a blade element indicating a positive pitch angle, ϕ .

Σχήμα 14 – Τομή στοιχείου περύγωσης και σχετικά μεγέθη

Η εισαγωγή της κατανομής της ταχύτητας (σ' αυτή την περίπτωση μία σταθερή τιμή συναρτήσει του χρόνου) στο υπολογιστικό μοντέλο γίνεται μέσω των αρχείων δεδομένων του ανέμου (Hub-Height Wind Data Files). Επειδή το πρόβλημα κάνει υπολογισμούς με quasi-steady διαδικασίες εισάγουμε μόνο μία επιθυμητή τιμή για την ταχύτητα τη χρονική στιγμή 0.

Οι τιμές σταθερών ταχυτήτων οι οποίες μελετώνται και για τις οποίες θα πάρουμε αποτελέσματα είναι οι εξής :

2 m/s 4 m/s 6 m/s 8 m/s 10 m/s 12 m/s 14 m/s 16 m/s
 18 m/s 20 m/s 22 m/s 24 m/s 26 m/s

Αυτές οι τιμές της ταχύτητας καλύπτουν ένα λογικό εύρος τιμών.

Όλες θα υπολογιστούν με βάση ταχύτητα περιστροφής της περρωτής 27 rpm.

Υπενθυμίζεται ότι όλες οι μονάδες των μεταβλητών εισόδου και εξόδου στο πρόγραμμα ακολουθούν το σύστημα μονάδων του S.I.

Οι μεταβλητές εξόδου που θα εξαχθούν και θα συνιστούν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι (όλες σε συνάρτηση με τις διάφορες ταχύτητες εισροής) :

- Η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας (Power –kW)
- Η ροπή λόγω περιστροφής της περρωτής (Torque –N.m)
- Η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται στην ανεμογεννήτρια (Axial Thrust –kN)
- Η ροπή που ασκείται στην πλήμνη (Hub Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται σε κάθε περύγιο με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της περρωτής (out-of-plane Bending Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται στα περύγια στην κατεύθυνση της περιστροφής της περρωτής (in-plane Bending Moment –kN.m)
- Η ροπή στα περύγια που τείνει να τα περιστρέψει γύρω από τον διαμήκη άξονά τους (διεύθυνση r) (Pitching Moment – kN.m)

Επιπρόσθετα θα ερευνηθούν φορτίσεις σε συγκεκριμένα σημεία ακτινικά των περυγίων.

Τα σημεία αυτά επιλέγονται στο εύρος συγκεκριμένων elements για αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω της φύσης της Blade Element Theory.

Τα σημεία αυτά βρίσκονται στις εξής αποστάσεις (μετρημένες ακτινικά στα περύγια από το κέντρο της πλήμνης) :

number	r (m)
1	1.82
2	3.97
3	6.12
4	9.35
5	11.5
6	14.72
7	17.95
8	18.97

Οι φορτίσεις που θα μελετηθούν για αυτά τα σημεία είναι :

- Η αξονική δύναμη κάθετη στο επίπεδο της περρωτής (Axial Force – N)
- Η κάθετη δύναμη με κατεύθυνση την κατεύθυνση περιστροφής της περρωτής (Tangential Force –N)
- Η ροπή στρέψης (pitching moment –N.m)

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν στο Κεφάλαιο 6.

Άλλες επιλογές εισόδου και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο είναι :

- Ύψος αναφοράς : 46m
- Πυκνότητα αέρα : 1.225 kg/m³
- Κινηματικό ιξώδες αέρα : 1.5*10⁻⁵ (m² /s)
- Γωνία ακροπερυγίου : -1.5 (μοίρες)
- Ακτίνα πλήμνης : 2.46 (m)
- Μάζα περυγίου 1850 (kg)

- Επιλογή του μοντέλου Beddoes-Leishman για τον υπολογισμό της δυναμικής απώλειας στήριξης
- Επιλογή μοντέλου υπολογισμού δυναμικής εισροής και στροβιλισμού (Generalised Dynamic Wake Inflow Swirl Model)

4.2 Ακραία ριπή ανέμου (extreme operating gust - eog)

Για τις επόμενες περιπτώσεις ελέγχου φόρτισης με δυναμικά φορτία (ακραία ριπή ανέμου , τύρβη) ακολουθούνται οι παρακάτω προσεγγίσεις ,χρησιμοποιώντας στοιχεία που αναφέρονται στις απαιτήσεις ασφαλείας της IEC 61400-1 του 1998, :

- Ανεμογεννήτρια κλάσης I A (υψηλή τύρβη).
- $V_{ref} = 50 \text{ m/s}$, $V_{ave} = 10 \text{ m/s}$
- Ένταση τύρβης $I_{15} = 0.18$
- $V_{hub} = 15 \text{ m/s}$
- $a = 2$ (παράμετρος κλίσης της ταχύτητας)
- $\sigma_1 = I_{15} (15 \text{ m/s} + aV_{hub})(a + 1)$, m/s (μέση τετραγωνική τιμή της τύρβης)
- Λιάρκεια ζωής : το λιγότερο 20 χρόνια.
- $V(z) = V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.2}$ (η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος)
- $\Lambda_1 = 21 \text{ m}$ (κλίμακα της τύρβης – αφού $z_{hub} = 46 \text{ m}$ και για $z_{hub} \leq 30$ ισχύει $\Lambda_1 = 0.7 z_{hub}$)

$$S_1(f) = 0.05(\sigma_1^2) \left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}} \right)^{-2/3} f^{-5/3} \quad (\text{το φάσμα της τύρβης - όπου } f \text{ η συχνότητα (Hz))}$$

- Μελέτη της ακραίας ριπής ανέμου (cog)

Η ακραία ριπή ανέμου είναι το φαινόμενο της απότομης αύξησης της ταχύτητας του ανέμου για ένα μικρό χρονικό διάστημα (T sec) .Το φαινόμενο αυτό εκτιμάται ότι εμφανίζεται σπάνια και ανάλογα με την τυχαιότητα της εμφάνισής του προσδιορίζεται και το μέγεθός της. Πριν και μετά τη χρονική διάρκεια της ριπής θεωρείται ότι η ταχύτητα παραμένει σταθερή και ίση με $V_{hub} = 15 \text{ m/s}$.

Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ότι η περιστροφική ταχύτητα της περρωτής της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή και ίση με $\omega = 27 \text{ rpm}$.

Το μέγεθος της ριπής προσδιορίζεται από την :

$$V_{gustN} = \beta \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0.1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \text{ m/s}$$

όπου $D = \text{διάμετρος περρωτής} = 43 \text{ m}$

$\Lambda_1 = \text{κλίμακα τήρβης} = 21 \text{ m}$ (αφού $z_{hub} = 46 \text{ m}$)

$\sigma_1 = \text{διακύμανση ταχύτητας τήρβης}$

$N = \text{υποδείκτης για συχνότητα εμφάνισης κάθε } N \text{ χρόνια}$

Η τιμή της σ_1 στην περίπτωσή μας είναι :

$$\sigma_1 = I_{15} \frac{(15 + 2V_{hub})}{3} = 0.18 \frac{(15 + 30)}{3} = 2.7 \text{ m/s}$$

Οι περιπτώσεις εμφάνισης της ακραίας ριπής ανέμου που θα μελετηθούν είναι :

- N=50 χρόνια (μία φορά στα 50 χρόνια)
- N=1 χρόνος (μία φορά το χρόνο)

Ο συντελεστής β που αναφέρεται παραπάνω παίρνει τιμές $\beta = 6.4$ για N = 50 χρόνια, (οπότε τότε έχει διάρκεια T = 14 sec) και $\beta = 4.8$ για N = 1 χρόνο (οπότε T = 10.5 sec).

Έτσι λοιπόν οι τιμές του μεγέθους της ριπής είναι

$$V_{gust50-15} = 14.34 \text{ m/s (N = 50 χρόνια, } V_{hub} = 15 \text{ m/s, } \omega = 27 \text{ rpm)}$$

$$V_{gust1-15} = 10.75 \text{ m/s (N = 1 χρόνος, } V_{hub} = 15 \text{ m/s, } \omega = 27 \text{ rpm)}$$

Η χρονοσειρά της ριπής για τη διάρκεια εμφάνισής της (T sec) υπολογίζεται από τη σχέση :

$$V(z,t) = V(z) - 0.37V_{gustN} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)$$

Στην παρούσα περίπτωση η ταχύτητα θεωρείται σταθερή με το ύψος και ίση με $V_{hub} = 15 \text{ m/s}$.

Έτσι οι συνδυασμοί είναι:

- $V(t) = 15 - 5.30 \sin(0.673t) \cdot (1 - \cos(0.448t)) \text{ m/s}$

για $N = 50$ χρόνια, $V_{hub} = 15$ m/s, $\omega = 27$ rpm, διάρκεια $T = 14$ sec

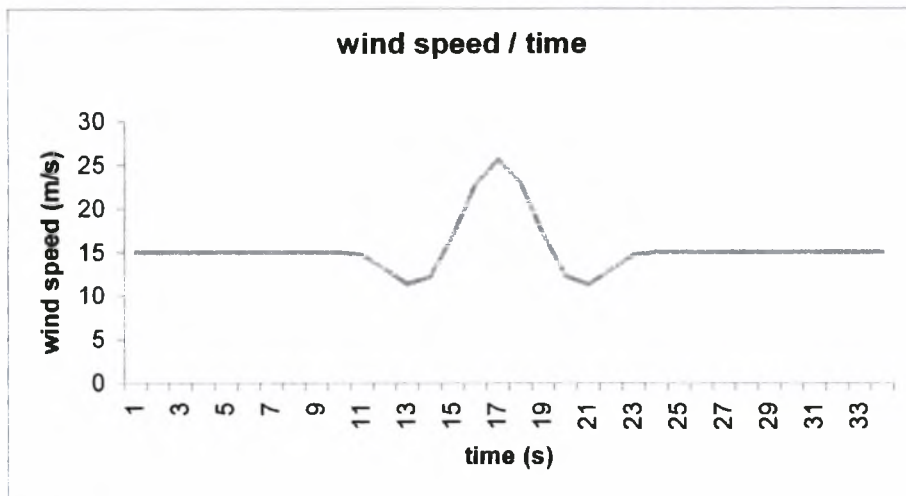
Για $t < 0$ και για $t > 14$ sec, $V(t) = 15$ m/s .

$$\blacksquare V(t) = 15 - 3.97 \sin(0.897t) \cdot (1 - \cos(0.598t)) \text{ m/s}$$

για $N = 1$ χρόνο, $V_{hub} = 15$ m/s, $\omega = 27$ rpm, $T = 10.5$ sec

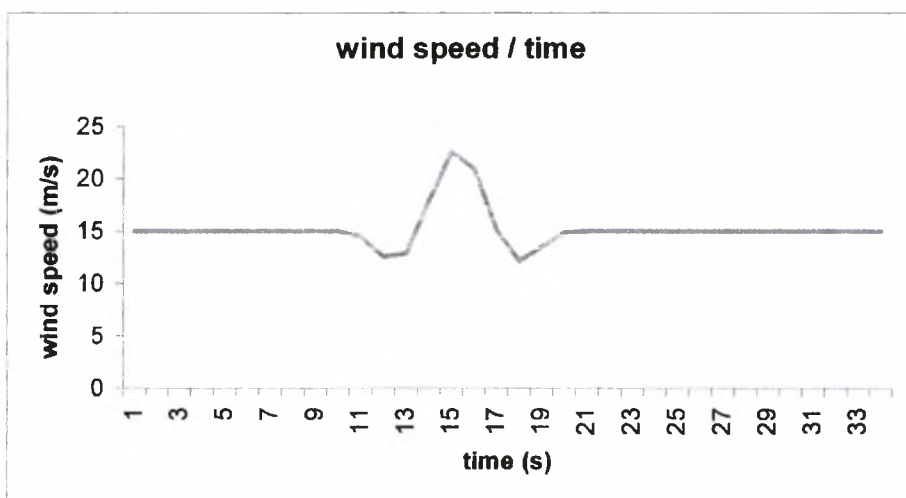
Για $t < 0$ και για $t > 10.5$ sec, $V(t) = 15$ m/s .

Οι υπολογισμοί των χρονοσειρών της ταχύτητας στις δύο περιπτώσεις ακραίας ριπής ανέμου έγιναν με κώδικα σε Fortran και τα γραφήματα αυτών των εισερχόμενων δυναμικών ροών φαίνονται παρακάτω :



Σχήμα 15 – Υπολογισμένη ταχύτητα για ριπή ανέμου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά

$N=50$ χρόνια , $V_{hub}=15$ m/s , $\omega=27$ rpm , $T=14$ sec , για $t<0$ και για $t>14$ sec $V(t)=15$ m/s



Σχήμα 16 – Υπολογισμένη ταχύτητα για ριπή ανέμου με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά

$N=1$ χρόνο , $V_{hub}=15$ m/s , $\omega=27$ rpm , $T=10.5$ sec , για $t<0$ και για $t>10.5$ sec $V(t)=15$ m/s

Οι μεταβλητές εξόδου που θα ερευνηθούν στη περίπτωση της ακραίας ριπής ανέμου (cog) είναι (όλες σε συνάρτηση με το χρόνο εμφάνισης του φαινομένου, όπως ορίστηκε παραπάνω):

- Η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας (Power –kW)
- Η ροπή λόγω περιστροφής της πτερωτής (Torque –N.m)
- Η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται στην ανεμογεννήτρια (Axial Thrust –kN)
- Η ροπή που ασκείται στην πλήμνη (Hub Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται σε κάθε περύγιο με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πτερωτής (out-of-plane Bending Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται στα περύγια στην κατεύθυνση της περιστροφής της πτερωτής (in-plane Bending Moment –kN.m)
- Η ροπή στα περύγια που τείνει να τα περιστρέψει γύρω από τον διαμήκη άξονά τους (διεύθυνση r) (Pitching Moment – kN.m)



Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν στο Κεφάλαιο 6.

4.3 Τύρβη

Σε αυτήν την ενότητα μελετάται η φόρτιση της περωτής της ανεμογεννήτριας λόγω τυρβώδους ροής ανέμου.

Στην παρούσα περίπτωση η φόρτιση τύρβης αντιμετωπίζεται με δυο μεθόδους.

4.3.1 Καθοριστική περιγραφή (deterministic description).

Η μορφή της τυρβώδους ροής θεωρείται ότι αποτελεί μια περιοδική κατανομή ταχυτήτων σε τρεις διαστάσεις. Έχει συνιστώσες U , V , W (οριζόντια κατά την διεύθυνση του άξονα της περωτής, εγκάρσια και κατακόρυφη αντίστοιχα).

Οι τρεις συνιστώσες είναι:

Αξονική συνιστώσα $U(y,z,t)$:

$$U(y,z,t) = U(z) + A_1 \sin(2\pi f_1 t) + \\ A_2 y \sin \left(2\pi \left| f_2 t + \frac{1}{4} \sin(2\pi f_3 t) \right| \right) + \\ A_2 z \sin \left(2\pi \left| f_3 t + \frac{1}{4} \cos(2\pi f_3 t) \right| \right)$$

όπου: x, y, z οι συντεταγμένες με αρχή των αξόνων το κέντρο της περρωτής και x τον άξονα της περρωτής και f η συχνότητα της τύρβης.

$$\text{όπου: } U(z) = U_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0.2} \quad \text{δηλ.} \quad U(z) = 15 \left(\frac{z}{46} \right)^{0.2}$$

Εγκάρσια συνιστώσα $V(t)$:

$$V(t) = A_3 \sin \left(2\pi \left(f_4 t + \frac{1}{4} \sin(2\pi f_5 t) \right) \right)$$

Η Κατακόρυφη συνιστώσα εδó θεωρείται óτι είναι $W(t) = 0$.

Οι συντελεστές στις εξισώσεις αυτές είναι:

$$A_1 = 2\sigma_1$$

$$A_2 = A_1 / D$$

$$A_3 = 0.8A_1$$

και οι συχνότητες:

$$f_1 = 0.0194 \frac{U_{hub}}{\Delta_1}$$

$$f_2 = 4f_1$$

$$f_3 = f_1 / 10$$

$$f_4 = 0.6f_1$$

$$f_3 = f_4/10$$

Έτσι έχουμε :

$$A_1 = 5.4$$

$$A_2 = 0.12558$$

$$A_3 = 4.32$$

$$f_1 = 0.013857$$

$$f_2 = 0.055428$$

$$f_3 = 0.0013857$$

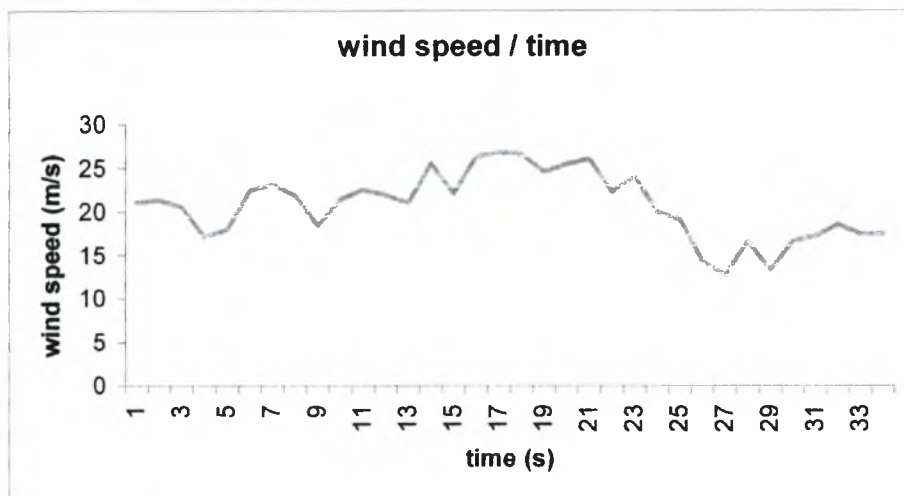
$$f_4 = 0.0083142$$

$$f_5 = 0.00083142$$

$$U(y, z, t) = 15 \left(\frac{z}{46} \right)^{0.2} + 5.4 \sin(0.0870t) + \\ 0.1255y \sin[6.2831(0.055428t + 0.25 \sin(0.008706t))] + \\ 0.1255z \sin[6.2831(0.055428t + 0.25 \cos(0.008706t))]$$

$$V(t) = 4.32 \sin[6.2831(0.008314t + 0.25 \sin(0.005223t))]$$

Η κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, που προέκυψε, φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 17 – Υπολογισμένη ταχύτητα για την καθοριστική περιγραφή τυρβώδους ροής

Η εισαγωγή των παραπάνω χαρακτηριστικών της καθοριστικής περιγραφής της τήρβης σε αρχείο δεδομένων του ανέμου, ώστε να διαβαστούν από το πρόγραμμα, έγινε με τη βοήθεια του βοηθητικού προγράμματος SNWind της NREL. Τα χαρακτηριστικά που εισάγονται είναι αυτά που υπολογίστηκαν θεωρητικά παραπάνω (κλάση ένταση, κλίμακα τήρβης, παράμετρος κλίσης ταχύτητας). Το πρόγραμμα παράγει ένα αρχείο δεδομένων ανέμου όμοιο μ' αυτό που αναφέρθηκε και παραπάνω, το οποίο επιτρέπει μία ακριβή προσομοίωση της κατανομής της ταχύτητας με τις απαραίτητες αναλογίες και τη συσχέτιση (correlation) των χαρακτηριστικών της. Η ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών και η γενικότερη μελέτη της αναπαράστασης

της τύρβης σε υπολογιστικό περιβάλλον ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας μελέτης, αφού αποτελεί από μόνος του ένα πεδίο έρευνας με μεγάλο εύρος.

Οι μεταβλητές εξόδου που θα ερευνηθούν στη περίπτωση της καθοριστικής περιγραφής της τύρβης είναι (όλες σε συνάρτηση με το χρόνο εμφάνισης του φαινομένου)

- Η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας (Power –kW)
- Η ροπή λόγω περιστροφής της περρωτής (Torque –N.m)
- Η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται στην ανεμογεννήτρια (Axial Thrust –kN)
- Η ροπή που ασκείται στην πλήμνη (Hub Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται σε κάθε περύγιο με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της περρωτής (out-of-plane Bending Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται στα περύγια στην κατεύθυνση της περιστροφής της περρωτής (in-plane Bending Moment –kN.m)
- Η ροπή στα περύγια (Pitching Moment – kN.m)

4.3.2 Στοχαστική περιγραφή

Στην περιγραφή αυτή η τυρβώδης ροή θεωρείται μη ομοιόμορφη και εξετάζονται όλες οι συχνότητες της.

Λιακυμάνσεις τύρβης:

$$\sigma_u = \sigma_l \quad (\text{αξονική συνιστώσα})$$

$$\sigma_v = 0.8\sigma_l \quad (\text{εγκάρσια συνιστώσα})$$

$$\sigma_w = 0.5\sigma_l \quad (\text{κατακόρυφη συνιστώσα})$$

Κλίμακα τύρβης (φάσμα κατά Kaimal)

$$L_x = 8.1 \Lambda_l$$

$$L_y = 2.7 \Lambda_l$$

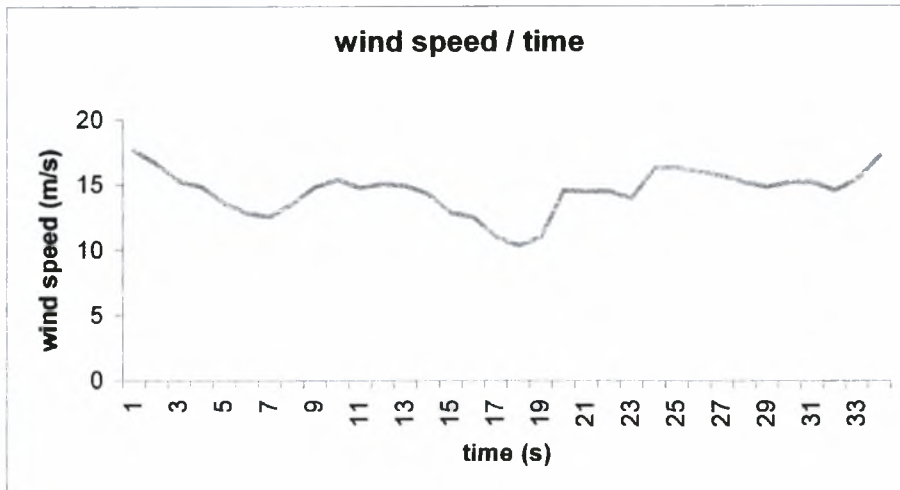
$$L_z = 0.66 \Lambda_l$$

Στην περίπτωσή μας, για $U_{hub} = U = 15 \text{ m/s}$ και $\omega = 27 \text{ rpm}$, έχουμε :

$$\sigma_u = 2.7 \text{ m/s} \quad \sigma_v = 2.16 \text{ m/s} \quad \sigma_w = 1.35 \text{ m/s}$$

$$L_x = 170.1 \text{ m} \quad L_y = 56.7 \text{ m} \quad L_z = 13.86 \text{ m}$$

Η κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, που προέκυψε, φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 18 – Υπολογισμένη ταχύτητα για την στοχαστική περιγραφή τυρβώδους ροής

Η εισαγωγή των παραπάνω χαρακτηριστικών της καθοριστικής περιγραφής της τύρβης σε αρχείο δεδομένων του ανέμου ,ώστε να διαβαστούν από το πρόγραμμα, έγινε όμοια με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω. Σε αυτή την περίπτωση το αρχείο που παράγεται(full-field turbulence wind data file) ,λόγω της πιθανολογικής φύσης της κατανομής της τύρβης, περιέχει δεδομένα σε δυαδική μορφή τα οποία διαβάζονται από το πρόγραμμα σε συνδυασμό με ένα άλλο αρχείο που παράγεται ,το οποίο περιέχει τις οδηγίες για τα χαρακτηριστικά της τύρβης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών και η γενικότερη μελέτη της αναπαράστασης της τύρβης σε υπολογιστικό περιβάλλον ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας μελέτης.

Οι μεταβλητές εξόδου που θα ερευνηθούν στη περίπτωση της καθοριστικής περιγραφής της τύρβης είναι (όλες σε συνάρτηση με το χρόνο εμφάνισης του φαινομένου)

- Η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας (Power –kW)
- Η ροπή λόγω περιστροφής της πτερωτής (Torque –N.m)
- Η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται στην ανεμογεννήτρια (Axial Thrust –kN)
- Η ροπή που ασκείται στην πλήμνη (Hub Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται σε κάθε πτερύγιο με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της πτερωτής (out-of-plane Bending Moment –kN.m)
- Η καμπτική ροπή που ασκείται στα πτερύγια στην κατεύθυνση της περιστροφής της πτερωτής (in-plane Bending Moment –kN.m)
- Η ροπή στα πτερύγια (Pitching Moment – kN.m)

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν στο Κεφάλαιο 6.

4.4 Ενέργεια που παραλαμβάνεται σε ένα έτος

Ο κύριος στόχος της παρούσας μελέτης είναι η μελέτη της φόρτισης της περσικής ανεμογεννήτριας. Θα υπολογίσουμε όμως και την παραλαμβανόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια αφού περιέχεται στους υπολογισμούς μας και αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό που συνήθως ενδιαφέρει σε μία ανεμογεννήτρια.

Ουσιαστικά, η περίπτωση ροής ανέμου που θα μελετηθεί σε σχέση με την ετήσια αποδιδόμενη ενέργεια είναι η σταθερή ροή ανέμου, αφού για κάνουμε υπολογισμό σε ετήσια κλίμακα χρησιμοποιούμε στατιστικές μέσες τιμές.

Η ετήσια αποδιδόμενη ετήσια ενέργεια E_y προκύπτει από την ολοκλήρωση της καμπύλης ισχύος $P(U)$:

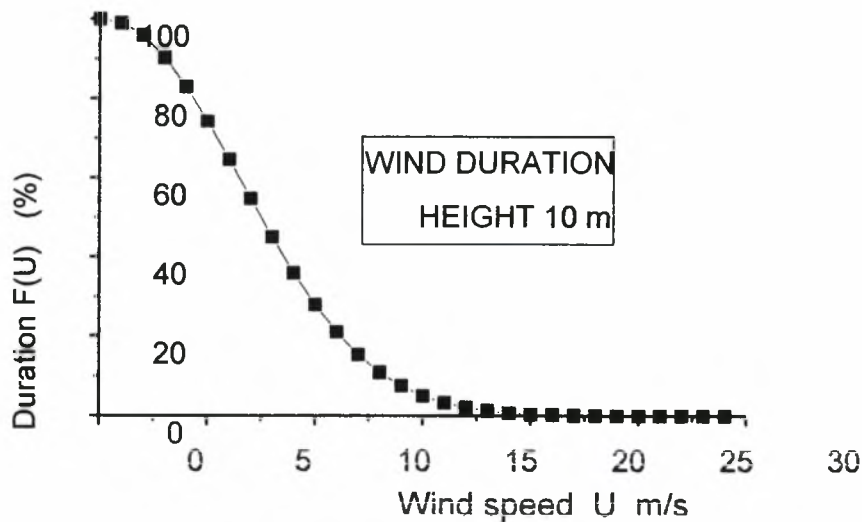
$$E_y = 8760 \int_{U_1}^{U_2} P(U) f(U) dU \quad \text{KWhrs}$$

όπου το U είναι σε m/s , η ισχύς P σε KW και η πυκνότητα πιθανότητας (PDF) του ανέμου f σε s/m . Τα U_1 και U_2 είναι τα όρια λειτουργίας της Α/Γ (cut in, cut out speed). Η f ευρίσκεται από παραγώγιση της καμπύλης διάρκειας $F(U)$:

$$f(U) = - \frac{dF(U)}{dU}$$

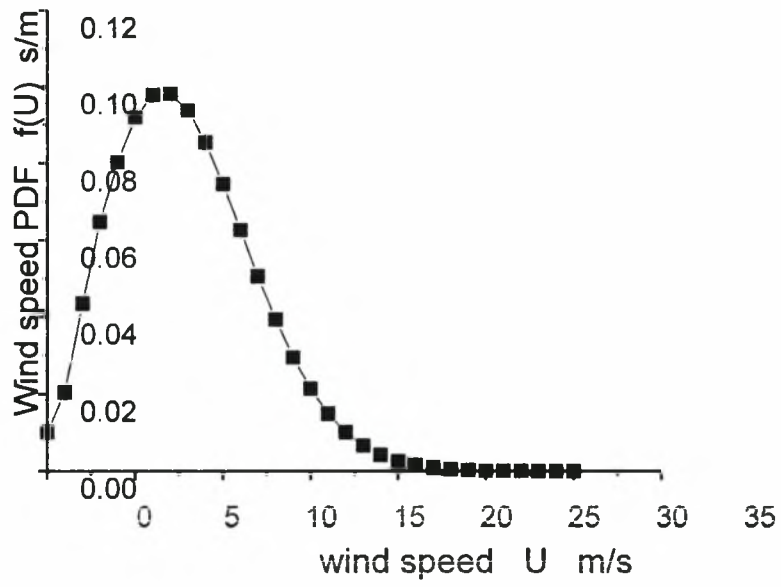
Τα όρια λειτουργίας (cut in, cut out speed) επιλέγονται ως : $U_1 = 3 \text{ m/s}$ και $U_2 = 26 \text{ m/s}$

Θα αναφερθούν τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται, δεδομένου ότι η ανεμογεννήτρια που μελετάμε θεωρείται πειραματικό μοντέλο. Τα ανεμολογικά στοιχεία που χρειαζόμαστε (δηλαδή η καμπύλη διάρκειας ανέμου, από την οποία προκύπτει η πυκνότητα πιθανότητας του ανέμου) θα εισαχθούν από πραγματικά στοιχεία τυχαίας περιοχής της Ελλάδας, για τα οποία στην παρούσα μελέτη δεν υπάρχει ενδιαφέρον αναφοράς.



Σχήμα 19 – Καμπύλη διάρκειας ανέμου

Η $f(U)$ υπολογίζεται από παραγώγιση της καμπύλης διάρκειας $F(U)$.



Σχήμα 20 – πυκνότητα πιθανότητα ανέμου

Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν και θα συζητηθούν στο Κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 5 Computer Program

Όπως είδη έχει αναφερθεί, το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς της φόρτισης της περσικής ανεμογεννήτριας είναι το YawDyn. Το πρόγραμμα εξελίσσεται μέχρι σήμερα ,έχοντας πολλές εμπλουτισμένες λειτουργίες ,με τη χρηματοδότηση του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α. Το μοντέλο χρησιμοποιείται εκτενώς σήμερα για πολλές περιπτώσεις εφαρμογών και θεωρείται αρκετά αξιόπιστο ως προς τα αποτελέσματα του(στα όρια των δυνατοτήτων της θεωρίας πάντα) και εύχρηστο ως προς τις πολλές δυνατότητες επιλογών που προσφέρει στο χρήστη. Οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί του βασίζονται στη Blade Element Theory με προεκτάσεις για δυναμική (ασταθή) ροή ανέμου , παρεκκλίνουσα ροή ,χρήση μοντέλων απωλειών ακροπεριγίου, εισαγωγή πολλών στοιχείων αεροτομών ,χρήση μοντέλων δυναμικής απώλειας στήριξης, υπολογισμό στροβιλισμού φερόμενων ταχυτήτων και μοντέλα για εισαγωγή δεδομένων τυρβώδους ροής. Ουσιαστικά, το πρόγραμμα αποτελείται από δυο διαφορετικούς κώδικες , το YawDyn και το AeroDyn. Το YawDyn πραγματοποιεί τη γενική διαχείριση των μεταβλητών εισόδου και εξόδου και των υπορουτίνων , ενώ το AeroDyn λειτουργεί ως ρουτίνα ανάλυσης αεροδυναμικών στοιχείων, στο επίπεδο των blade elements ,τα οποία παίρνει από το YawDyn. Το AeroDyn βρίσκεται ενσωματωμένο στο YawDyn.

Τα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιούν το YawDyn και το AeroDyn φαίνονται παρακάτω :

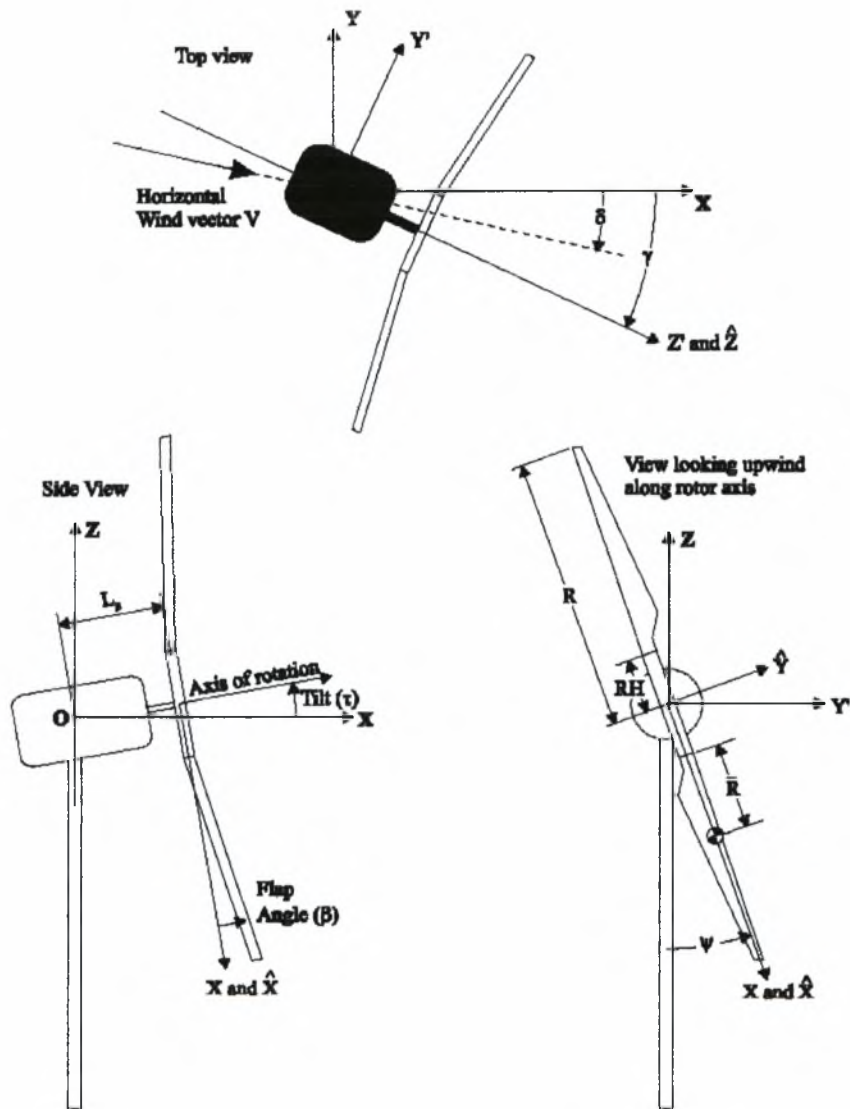


Figure 5.1 View of the HAWT defining selected terms and coordinate systems. All angles are shown in their positive sense. The hold X, Y, Z axes are fixed in space and are the coordinates in which the wind components are defined (V_X, V_Y, V_Z). Note that blade azimuth is zero when the blade is at the 6 o'clock position

Σχήμα 21 – Συστήματα συντεταγμένων του YawDyn

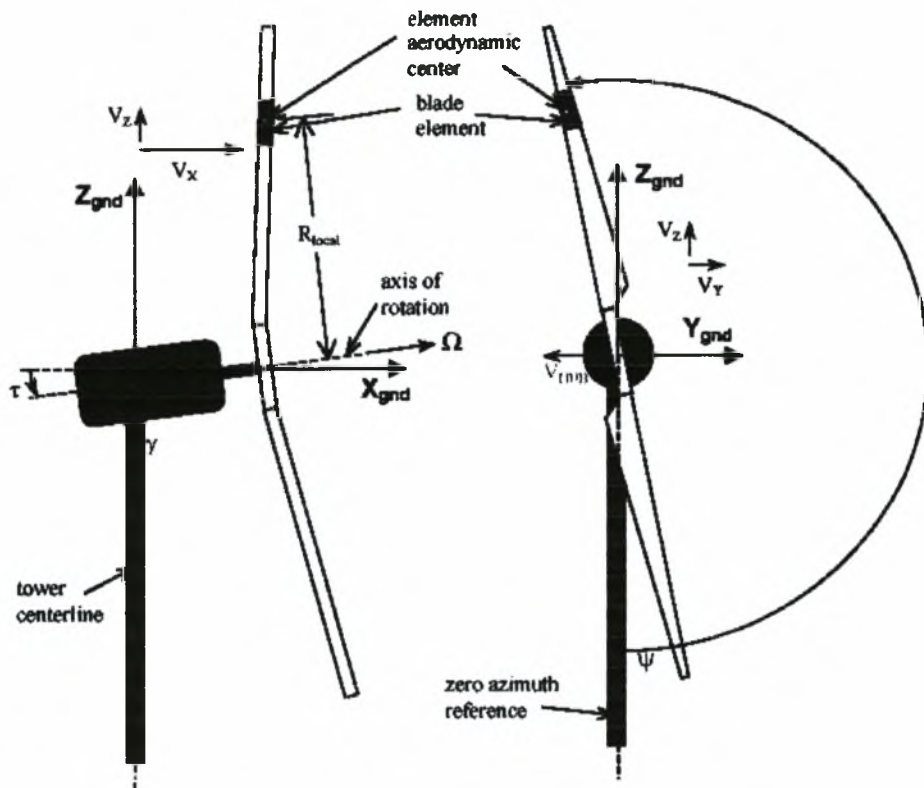


Figure C1 – AeroDyn ground coordinate system and sign conventions. All angles shown are positive. Rotor shown in zero yaw angle condition. Ground coordinate system, X, Y, Z does not move or rotate with any part of the turbine.

Σχήμα 21 – Μορφή και θέση στοιχείου περύγωσης στην ανεμογεννήτρια

Οι υπορουτίνες του AeroDyn εκτελούνται για κάθε element σε κάθε χρονικό βήμα. Λεπτομέρειες για τα χαρακτηριστικά των elements θα αναφερθούν παρακάτω. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται χαρακτηριστικά μεγέθη στην τομή ενός element.

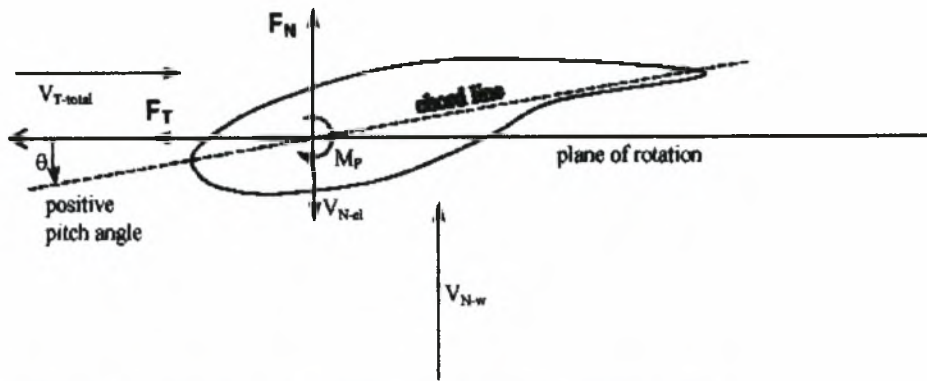


Figure C2 – Cross-section view of a blade element indicating a positive pitch angle, ϕ

Σχήμα 22 – Τομή και χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου περύγωσης

- Αρχεία ελέγχου μεταβλητών εισόδου και εξόδου

Τα αρχεία που ρυθμίζουν τις παραμέτρους στο μοντέλο είναι :

- **Aerodyn.ipt** (εισαγωγή αεροδυναμικών χαρακτηριστικών, ορισμός airfoils/ elements , επιλογή μοντέλων)
- **Yawdyn.ipt** (εισαγωγή χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας, προσομοίωσης, επιλογή μοντέλων, επιλογή μεταβλητών εξόδου)
- ***.wnd** (εισαγωγή χαρακτηριστικών ροής ανέμου ή έτοιμο αρχείο που έχει δημιουργηθεί από το SNWind)
- ***.r5** (αρχεία χαρακτηριστικών των airfoils που έχουν δημιουργηθεί με το FoilCheck)

Τα αρχεία που περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι :

- Yawdyn.plt** (αποτελέσματα για τις μεταβλητές που επιλέχθηκαν στο Yawdyn.ipt , σε συνάρτηση με τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης)

Element.plt (αποτελέσματα για τις φορτίσεις σε κάθε ένα element που έχει οριστεί στο Aerodyn.ipt)

Yawdyn.opt (αρχείο συνοπτικών στοιχείων της προσομοίωσης)

- Ανάλυση αρχείων ,μεθόδων και μεταβλητών

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αρχείου Aerodyn.ipt :

Table 6.1 - Sample AeroDyn Input Data File for the NREL Combined Experiment Wind Turbine

```

Combined Experiment Baseline for AeroDyn version 12.5
ENGLISH      Units for input and output [SI or ENGLISH]
BEDDOES     Dynamic stall model [BEDDOES or STEADY]
USE_CM      Aerodynamic pitching moment model [USE_CM or NO_CM]
EQUIL       Inflow model [DYNIN or EQUIL]
SWIRL       Induction factor model [NONE or MAKE or SWIRL]
5.0000E-03  Convergence tolerance for induction factor
PRAND       Tip-loss model (for EQUIL only) [PRANDtl, GTECH, or NONE]
PRAND       Hub-loss model (for EQUIL only) [PRANDtl, or NONE]
"yawdyn.wnd"  Hub-height wind file name (quoted string)
55.0        Wind reference (hub) height.
0.1         Tower shadow centerline velocity deficit.
3.0         Tower shadow half width.
4.0         Tower shadow reference point.
2.0000E-03  Air density.
1.63e-4     Kinematic air viscosity
1.0000E-03  Time interval for aerodynamic calculations.
1           Number of airfoil files used. Files listed below:
"9809_Cln.dat"  Airfoil data file name (quoted string)
10          Number of blade elements per blade
RELM        Twist      DR      Chord      File ID      Elem Data
0.7400      0.0000     1.4800    1.5000     1
2.2200      0.0000     1.4800    1.5000     1          PRINT
3.7000      0.0000     1.4800    1.5000     1
5.1800      0.0000     1.4800    1.5000     1          PRINT
6.6600      0.0000     1.4800    1.5000     1
8.1400      0.0000     1.4800    1.5000     1          PRINT
9.6200      0.0000     1.4800    1.5000     1
11.1000     0.0000     1.4800    1.5000     1          PRINT
12.5800     0.0000     1.4800    1.5000     1
14.0600     0.0000     1.4800    1.5000     1          PRINT
    
```

Εδώ ορίζουμε τις αεροδυναμικές παραμέτρους που μας ενδιαφέρουν, το αρχείο ροής ανέμου που θα χρησιμοποιηθεί, τα αρχεία των airfoils που θα χρησιμοποιηθούν και τα blade elements.

Χρησιμοποιήθηκαν 18 στοιχεία περιύγωσης (blade elements) ανά περιύγιο. Τα στοιχεία που εισάγονται για κάθε element είναι : η απόσταση του κέντρου του element από τη βάση του περυγίου, η γωνία συστροφής του, το μήκος του (μετρημένο στον άξονα του περυγίου) και το μήκος της χορδής του. Σχηματικά φαίνονται παρακάτω :

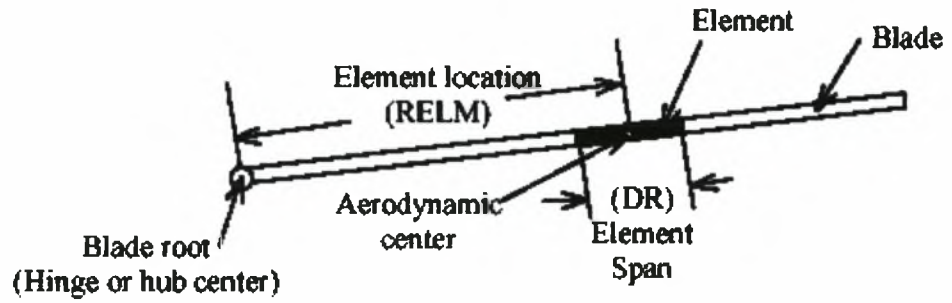


Figure 6.1 Sketch of the blade element geometry and nomenclature.

Σχήμα 23 – Μορφή και χαρακτηριστικά στοιχείου περιύγωσης

Τα στοιχεία που δόθηκαν για τα elements ήταν τα εξής :

18 Number of blade elements per blade				
RELM	Twist	DR	Chord	File ID
0.7500	9.0000	1.5400	1.0750	1
1.8200	15.0000	0.6000	1.3830	1
2.9000	20.0000	1.5600	1.6500	2
3.9700	16.3000	0.5800	1.5960	3
5.0500	13.0000	1.5800	1.5400	4
6.1200	10.0500	0.5600	1.4810	5
7.2000	6.6000	1.6000	1.3890	6
8.2700	5.2000	0.5400	1.3260	7
9.3500	4.5000	1.6200	1.2620	8
10.4200	3.5500	0.5200	1.1960	9
11.5000	2.6000	1.6400	1.0950	9
12.5700	2.0200	0.5000	1.0260	10
13.6500	1.3600	1.6600	0.9550	10
14.7200	0.7700	0.4800	0.8810	10
15.8000	0.3300	1.6799	0.8060	10
16.8700	0.1400	0.4600	0.7050	10

17.9500 0.0500 1.7000 0.5450 10

18.9700 5.9000 0.3400 0.0700 10

Τα airfoils που ορίστηκαν ήταν τα εξής :

'foils/ffa70.r5'

'foils/63450.r5'

'foils/63448.r5'

'foils/63440.r5'

'foils/63435.r5'

'foils/63428.r5'

'foils/63424.r5'

'foils/63421.r5'

'foils/63418.r5'

'foils/63415.r5'

,που αντιστοιχούν στα ffa70, NACA63450, NACA 63448, NACA 63440, NACA 63435, NACA 63428, NACA 63424, NACA 63421, NACA 63418, NACA 63415.

Τα αρχεία των airfoils δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας το συνοδευτικό κώδικα του YawDyn , το FoilCheck

Τα δεδομένα που εισάγονται σε κάθε airfoil data file ,και που είναι αναγκαία ώστε το πρόγραμμα να κάνει τους αεροδυναμικούς υπολογισμούς με βάση τη Blade Element Theory, είναι οι γωνία προσβολής, ο στατικός συντελεστής δυναμικής άνωσης C_l , ο συντελεστής αντίστασης C_d και ο συντελεστής καμπτικής ροπής C_m .

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αρχείου airfoil :

Table 9.1 - Sample Airfoil Data File for the NREL Combined Experiment Wind Turbine

```

S809 Airfoil, OSU data at Re=.75 Million, Clean roughness
NREL/TP-442-7817 Appendix B, Viterna used aspect ratio=11
1      Number of airfoil tables in this file
.00    Table ID parameter
.00    No longer used, enter zero
.00    No longer used, enter zero
.00    No longer used, enter zero
.00    No longer used, enter zero
-.38   Zero lift angle of attack (deg)
7.12499 Cn slope for zero lift (dimensionless)
1.9408  Cn at stall value for positive angle of attack
-.8000  Cn at stall value for negative angle of attack
2.0000  Angle of attack for minimum CD (deg)
.0116   Minimum CD value
-180.00 .000 .1748 .0000
-170.00 .230 .2116 .4000
-160.00 .460 .3172 .1018
-150.00 .494 .4784 .1333
-140.00 .510 .6743 .1727
-130.00 .486 .8799 .2132
-120.00 .415 1.0684 .2498

```

portion deleted for brevity, see the sample file on the distribution disk

Η παραγωγή των airfoil files ,η βέλτιστη τοποθέτησή τους και η ανάλυση των χαρακτηριστικών τους είναι ένα θέμα που ξεφεύγει από του στόχους της παρούσας μελέτης.

Airfoil files για συγκεκριμένες αεροτομές μπορούν να μπορούν να βρεθούν κατευθείαν από τη βάση δεδομένων της IEA σε περίπτωση προσομοίωσης συγκεκριμένου μοντέλου ανεμογεννήτριας. Σ'αυτή την εργασία σκοπός μας δεν είναι η εύρεση των κατάλληλων αεροτομών για βελτιστοποίηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ,αλλά με συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας οι φορτίσεις που προκύπτουν σε ειδικές ροές ανέμου.

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αρχείου Yawdyn.ipt :

Table 6.1 - Sample Input Data File for the NREL Combined Experiment Wind Turbine

```

Combined Experiment Baseline for YawDyn version 12.14
30.0      Time duration of the simulation (sec)
200.0     Number of azimuth sectors used for integration
5         Decimation factor for output printing
1.0000E-02  TOLER, Trim solution tolerance (deg)
3         Number of blades
14.0 14.0 14.0  Initial pitch angles (deg)
4.0      Rotor hub sling (distance from yaw axis to hub; positive downwind) (ft)
0.0      Shaft tilt angle (deg)
3.0      Rotor precone angle (deg)
72.0     RPM, rotor speed in revolutions per minute
0.0      PsiInit, Initial rotor position (zero for Blade 1 down) (deg)
FIXED    Yaw Model: FREE or FIXED yaw system
0.0      Initial yaw angle (deg)
0.0      Initial yaw rate (deg/sec)
1000.0   Mass moment of inertia about yaw axis (slug-ft^2)
0.0      YawStiff, stiffness of yaw spring (lb-ft/rad)
0.0      YawDamp, yaw damping coefficient (lb-ft-sec)
0.0      YawFriction, constant friction moment at yaw axis (lb-ft)
HINGE    Hub model: HINGE, TEETER or RIGID
3.0 3.0 3.0  Initial flap angles (deg)
0.0 0.0 0.0  Initial flap rates (deg/sec)
1.7      RBlng, radius of rotor hub (ft)
5.44     RBar, distance from hinge to blade c.g. (ft)
3.34     Mass of one blade (slug)
178.0    Mass moment of inertia of blade about hinge axis (slug-ft^2)
1.5500E+05  Torsional stiffness of blade root spring (lbf-ft/rad)
0.02     Teeter sling distance of teeter axis upwind of rotor apex (ft)
0.0      Free teeter angle (deg)
0.0      Teeter stiffness, first or linear coeff. (lbf-ft/rad)
0.0      Teeter stiffness, coeff. of deflection (lbf-ft/rad^2)
0.0      Teeter damping coefficient (lbf-ft-sec)
1,20,16,10,30,33,36,24,26,28
1 = Horizontal wind speed at hub center, len/s. [HWSpeed]
2 = Horizontal wind direction at hub center, deg. [HWDDir]
3 = Nacelle yaw angle, deg. [YawAng]
4 = Nacelle yaw rate, deg/sec. [YawRate]
5 = Blade azimuth angle (0 when blade 1 down), deg. [AzimAngBlD]

portion deleted for brevity, see the sample file

45 = Blade 3 in-plane mom., kiloforce*len.
46 = Blade 1 pitching mom., kiloforce*len.
47 = Blade 2 pitching mom., kiloforce*len.
48 = Blade 3 pitching mom., kiloforce*len.

```

Εδώ ορίζονται τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και ποιες μεταβλητές θα εκτυπωθούν (output channels).

-Τα αρχεία εισαγωγής ροής ανέμου

Στα wind data files (hub-height wind data files) εισάγεται η χρονοσειρά της ταχύτητας και η κλίση της κατεύθυνσής της (δεν μελετάται εδώ). Σε περίπτωση σταθερής ροής εισάγεται μόνο μία τιμή ταχύτητας τη χρονική στιγμή 0. Στα αρχεία τυρβώδους ροής (full field turbulence wind data files) της καθοριστικής περιγραφής υπάρχουν δεδομένα ταχύτητας και κατευθύνσεων σε όλο το πεδίο της τύρβης για το χρόνο προσομοίωσης. Στα αρχεία τυρβώδους ροής της στοχαστικής περιγραφής, λόγω πιθανολογικής φύσης του φαινομένου

υπάρχουν δεδομένα σε δυαδική μορφή. Ένα άλλο αρχείο το *.sum είναι απαραίτητο για την ανάγνωση των δεδομένων από το πρόγραμμα.

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αρχείου hub-height wind data file :

Table 7.1 – Sample hub-height Wind File

! Time	Wind Speed	Wind Dir	Vert. Speed	Horiz. Shear	Vert. Shear	LinV Shear	Gust Speed
!	15.000	5.000	-1	0.020	0.14	0	0
0	16.545	4.755	-0.9	0.022	0.14	0	0
0.1	17.939	4.045	-0.8	0.024	0.14	0	0
0.2	19.045	2.939	-0.7	0.027	0.14	0	0
0.3	19.755	1.545	-0.6	0.030	0.14	0	0
0.4	20.000	0.000	-0.5	0.033	0.14	0	0
0.5	19.755	-1.545	-0.4	0.036	0.14	0	0
0.6	19.045	-2.939	-0.3	0.040	0.14	0	0
0.7	17.939	-4.045	-0.2	0.045	0.14	0	0
0.8	16.545	-4.755	-0.1	0.049	0.14	0	0
0.9	15.000	-5.000	0	0.054	0.14	0	0
1	13.455	-4.755	0.1	0.060	0.14	0	0
1.1	12.061	-4.045	0.2	0.066	0.14	0	0
1.2	10.955	-2.939	0.3	0.073	0.14	0	0
1.3	10.245	-1.545	0.4	0.081	0.14	0	0
1.4	10.000	0.000	0.5	0.090	0.14	0	0
1.5	10.245	1.545	0.6	0.099	0.14	0	0
1.6	10.955	2.939	0.7	0.109	0.14	0	0
1.7	12.061	4.045	0.8	0.121	0.14	0	0
1.8	13.455	4.755	0.9	0.134	0.14	0	0
1.9	15.000	5.000	1	0.148	0.14	0	0
2							

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα αποσπάσματος αρχείου full field turbulence wind

data file summary (*.sum) :

Grid Point Variance Summary:

Y-coord -30.00 -10.00 10.00 30.00

Height Standard deviation at grid points for the u component:

76.00 2.785 2.215 2.251 2.690

56.00 2.612 2.222 2.200 2.463

36.00 2.461 2.075 2.336 2.125

16.00 2.085 1.962 2.302 2.597

Height Standard deviation at grid points for the v component:

76.00 2.019 2.019 2.019 2.019

56.00 2.014 2.014 2.014 2.014

36.00 2.006 2.006 2.006 2.006

16.00 1.930 1.930 1.930 1.930

Height Standard deviation at grid points for the w component:

76.00 1.282 1.282 1.282 1.282

56.00 1.283 1.283 1.283 1.283

36.00 1.284 1.284 1.284 1.284

16.00 1.283 1.283 1.283 1.283

U-component statistics from the average of the four center grid points:

Mcan = 14.942 m/s

Tl = 15.436 %

Normalizing Parameters for Binary Data:

UBar = 15.000 m/s

Tl(u) = 13.700%

Tl(v) = 13.200%

Tl(w) = 8.400%

Το YawDyn ,σε συνδυασμό με το ενσωματωμένο AeroDyn ,υπολογίζει τα αεροδυναμικά μεγέθη κάνοντας υπολογισμούς (βασισμένους στην προσαρμοσμένη Blade Element Theory) για κάθε element σε κάθε χρονικό βήμα.

Ένα αποσπασματικό παράδειγμα δεδομένων που εμφανίζονται στην οθόνη κατά τη λειτουργία του μοντέλου φαίνεται παρακάτω :

```
Running AeroDyn(12.51, 13-Jan-2003) in YawDyn(12.14, 13-Jan-2003).
Heading of the yawdyn.ipt file:
Combined Experiment Baseline in ENGLISH units for YawDyn version 12.1
Heading of the aerodyn.ipt file :
Combined Experiment Baseline for YawDyn version 12.1
Detected full-field wind files:
"turb.wnd" and
"turb.sum"
Reading a 6x6 grid of 65.62 fps full-field wind data.
800 records processed. FF wind data rate is 20 Hz.
Using 39.95 of 39.95 seconds of this FF wind file.
YawDyn using English units as per AeroDyn input.
Seeking trim solution for flap DOF
      AZMTH= 85.  FLAP= 0.2
portion deleted for brevity, see the sample file
TRIM REVOLUTION 5
BLADE #1  FLAP= 0.38      FLAP RATE= -4.01      RMS ERROR= 0.00098
BLADE #2  FLAP= 0.26      FLAP RATE= -0.63      RMS ERROR= 0.00306
BLADE #3  FLAP= 0.41      FLAP RATE= 2.77       RMS ERROR= 0.00262
Initial values for transient solution:
BLADE    FLAP    FLAP RATE
1        3.401    -4.011
2        3.262    -0.631
3        3.404     2.772
Starting transient solution...
T= 3.0  AZ= 216.  YAW= 0.0  YR= 0.0  FLAP= 3.4  FR= -0.4
T= 6.0  AZ= 72.   YAW= 0.0  YR= 0.0  FLAP= 3.6  FR= -4.1
T= 9.0  AZ= 288.  YAW= 0.0  YR= 0.0  FLAP= 3.4  FR= -0.3
T= 12.0 AZ= 144.  YAW= 0.0  YR= 0.0  FLAP= 3.5  FR= -0.2
```

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα γενικά διαγράμματα ροής των Aerodyn και Yawdyn όπου φαίνονται η λειτουργία των υπορουτίνων ,η επιλογή των μοντέλων και η διαχείριση των μεταβλητών.

Flow Chart of the Aerodynamics Calculations
and Major Assumptions in AeroDyn
May, 2001

AeroDyn called by
dynamics routine for aero
forces on an element
AeroFrcIntrface

- Dynamics routine calls AeroDyn to request aerodynamic forces

AeroDyn requests status
of the dynamics model
GetVel, NewTime

- AeroDyn calls specific subroutines in the dynamics program to request model status, including element pitch and velocities.
- All velocities expressed as components normal and tangential to the rotor plane

Start calculation of the
element aero forces
ELEMFRFC

- Call appropriate routines to calculate induction factors and aero coefficients

EQUIL option
Determine quasi-
steady induced velocity

EQUIL Option

- Iterative procedure to determine induction factor
- Drag force excluded in momentum balance
- Prandtl tip-loss model included
- Static C_L is used in momentum balance

Apply skewed wake
correction
VNMOD

- Skewed wake correction based on dynamic inflow method of Pitt and Peters
- Applied in quasi-steady manner to the local induced velocity
- Uses average induced velocity to determine inflow angle to rotor

DYNIN option
Determine induced
velocity
VINDINF, INFDIST

DYNIN Option

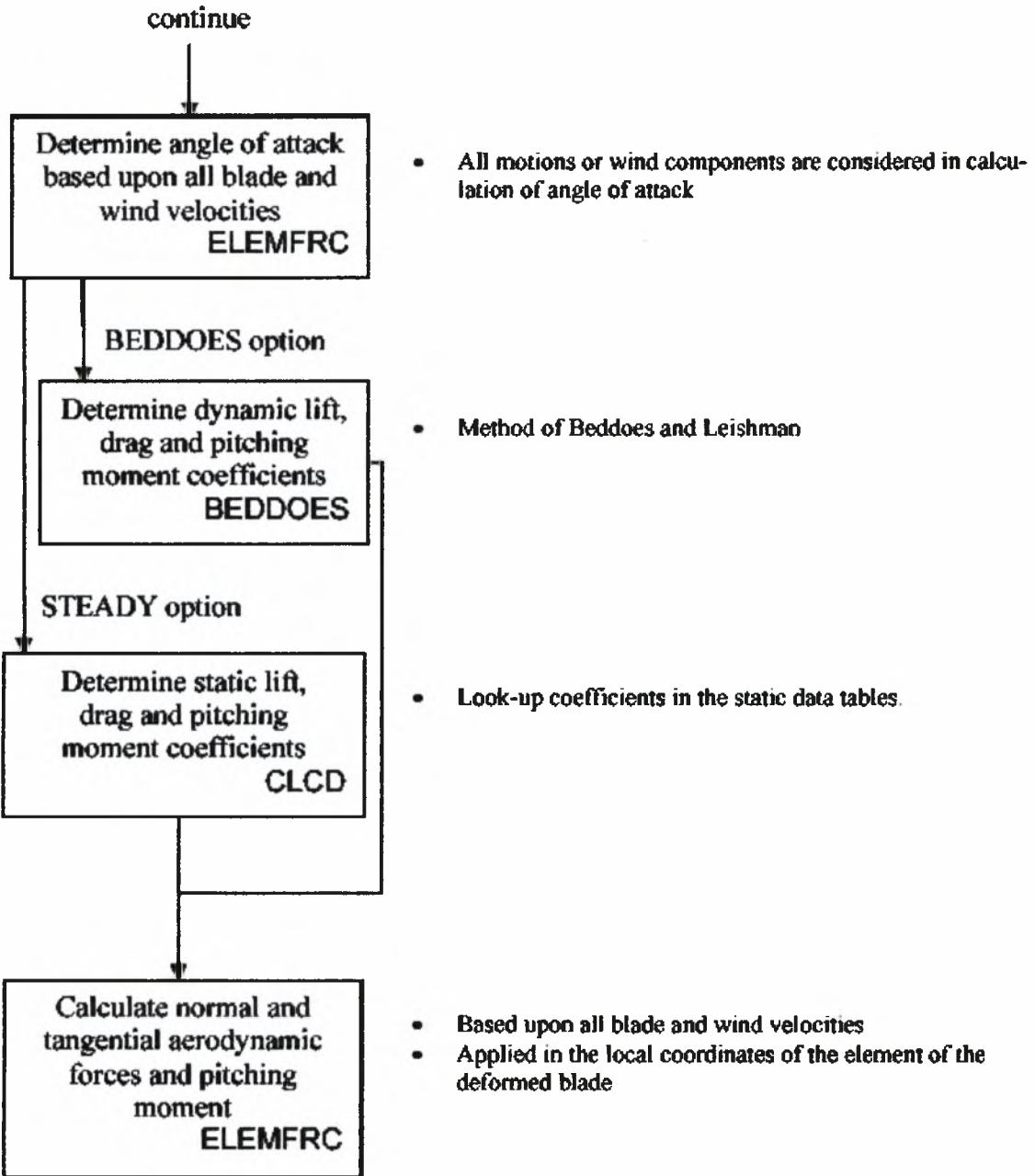
- Induced velocity calculated directly based on modified method of Pitt and Peters
- Skewed wake correction is inherent in the model
- Prandtl tip-loss model included

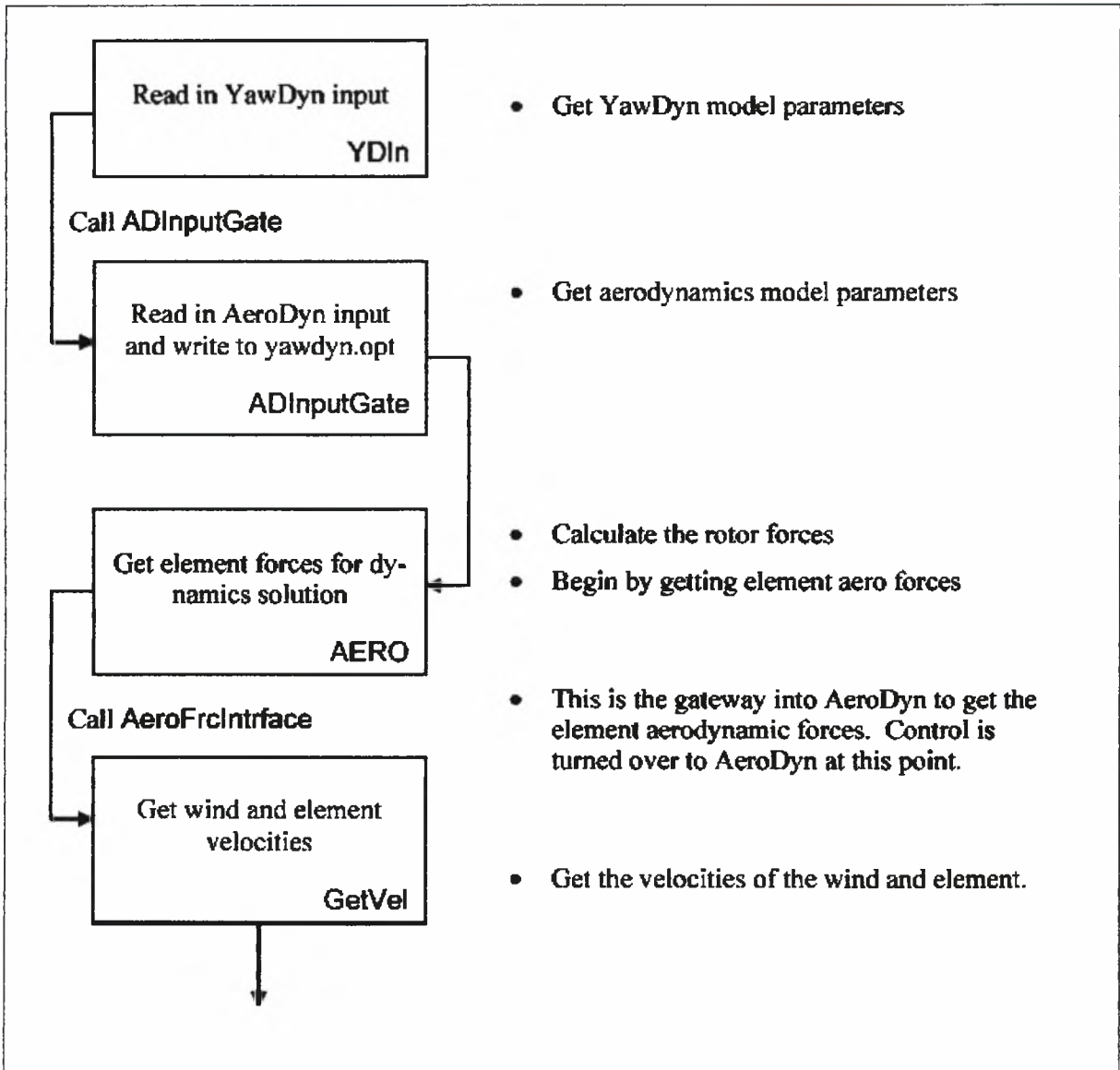
NONE option
Set induction factors to
zero
ELEMFRFC

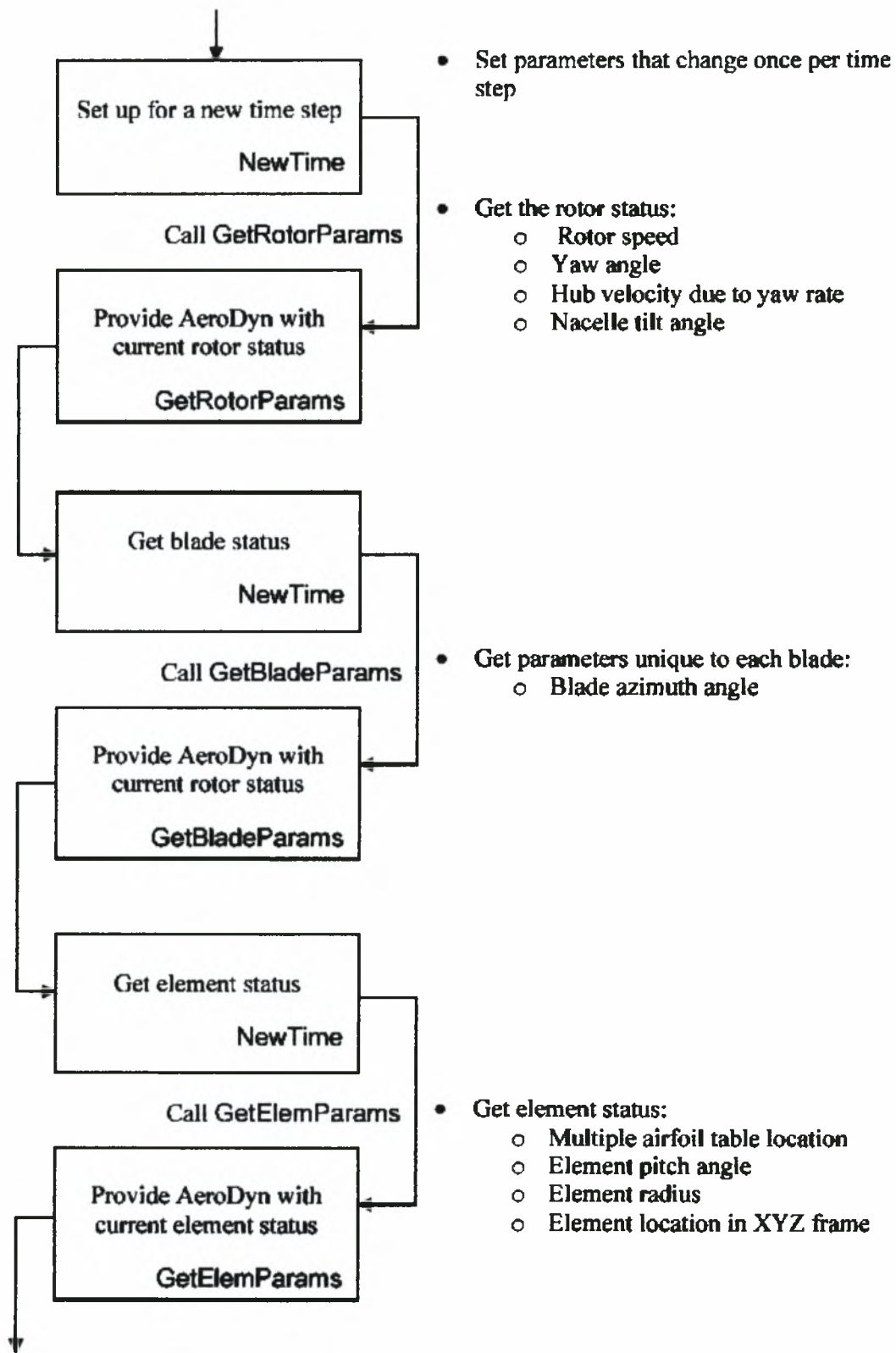
NONE Option

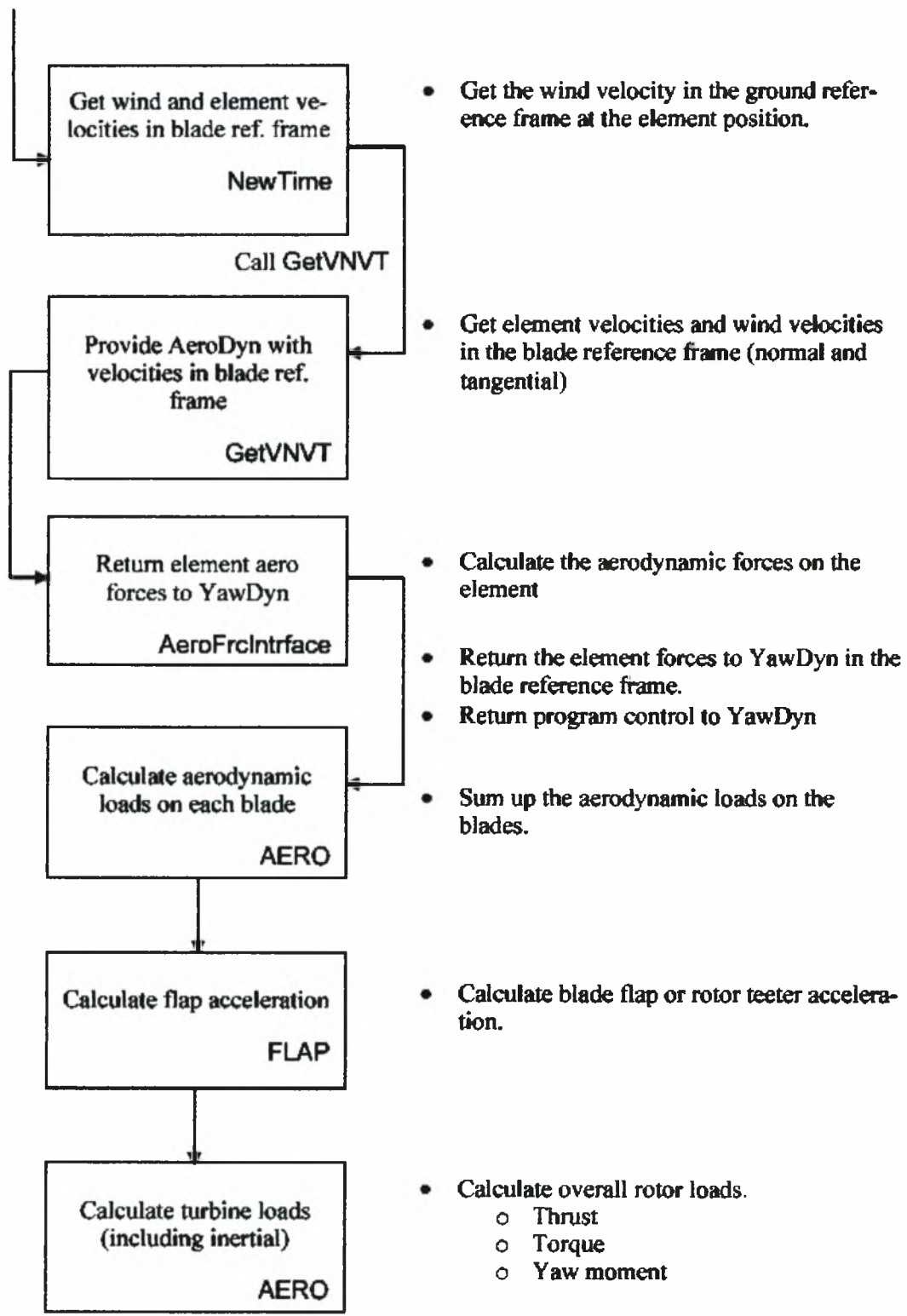
- Induced velocity calculations bypassed
- Induction factors set to zero.

Aerodynamics Flow Chart (continued)









- Get the wind velocity in the ground reference frame at the element position.
- Get element velocities and wind velocities in the blade reference frame (normal and tangential)
- Calculate the aerodynamic forces on the element
- Return the element forces to YawDyn in the blade reference frame.
- Return program control to YawDyn
- Sum up the aerodynamic loads on the blades.
- Calculate blade flap or rotor teeter acceleration.
- Calculate overall rotor loads.
 - Thrust
 - Torque
 - Yaw moment

Στο παρόν κεφάλαιο σε καμία περίπτωση δεν υπήρχε πρόθεση να γίνει σε βάθος ανάλυση του κώδικα του προγράμματος ,αλλά παρουσίαση των λειτουργιών του και της προσαρμογής του στις περιπτώσεις που μελετάμε.

Γενικά το υπολογιστικό μοντέλο YawDyn κρίθηκε ως αρκετά εύχρηστο στη διαχείριση του ,και αξιόπιστο λόγω των πολλών επιλογών που προσφέρει και της προσαρμογής του σε συγκεκριμένα προβλήματα. Ως μειονεκτήματα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τη δυσκολία εισαγωγής δεδομένων για τις αεροτομές και την έλλειψη μοντέλου για την εκτίμηση των απωλειών στην πλήμνη της ανεμογεννήτριας. Επίσης η περιορισμένη δυνατότητα επιλογής των στοιχείων περύγωσης και η μη εξειδικευμένη μελέτη των απωλειών στις άκρες των πτερυγίων μειώνουν την ακρίβειά του σε ορισμένα σημεία.

Κεφάλαιο 6 Παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φορτίσεων και της ισχύος όπως προέκυψαν από το υπολογιστικό μοντέλο YawDyn. Αναλύονται τα γραφήματα των μεταβλητών, η ακρίβειά τους και η σημασία τους. Τα γραφήματα έγιναν στο Microsoft Excel με δημιουργία εξωτερικού αρχείου βάση δεδομένων για ανάκτηση των αποτελεσμάτων από το αρχείο εξόδου του υπολογιστικού προγράμματος σε κάθε περίπτωση λειτουργίας του.

Οι περιπτώσεις αεροδυναμικής φόρτισης που έχουν μελετηθεί είναι :

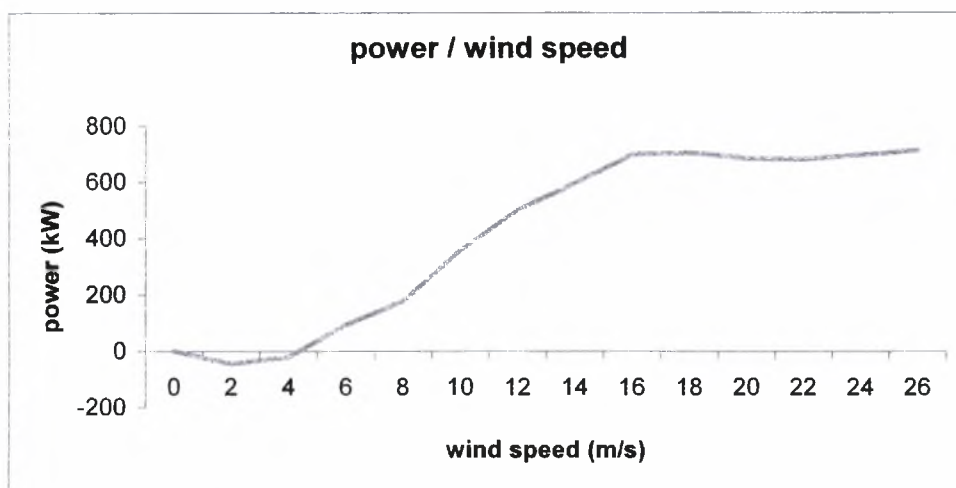
A) Σταθερή ροή

B) Ακραία ριπή ανέμου (extreme operating gust - eog)

Γ) Τύρβη

A) Σταθερή ροή

Με σταθερό ρυθμό περιστροφής της πτερωτής ($\omega=27$ rpm), προέκυψαν οι παρακάτω φορτίσεις και η ισχύς, για σταθερή ταχύτητα σε τιμές από 2 έως 26 m/s.

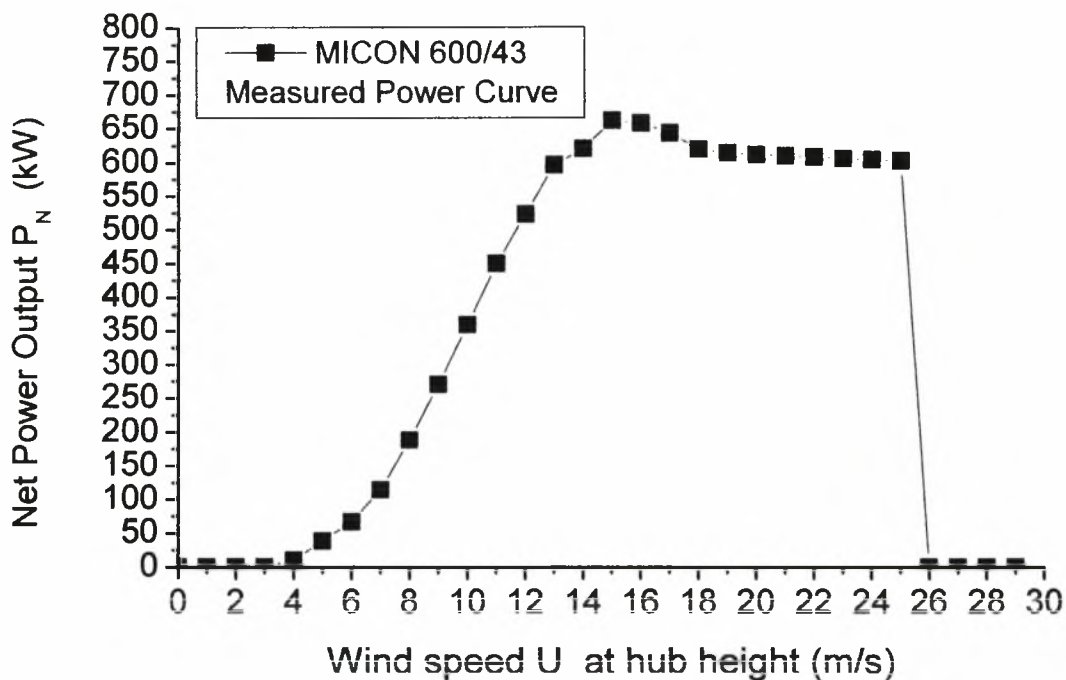


Γράφημα 1 - Αποδιδόμενη ισχύς ως προς διάφορες τιμές ταχυτήτων (καμπύλη ισχύος)

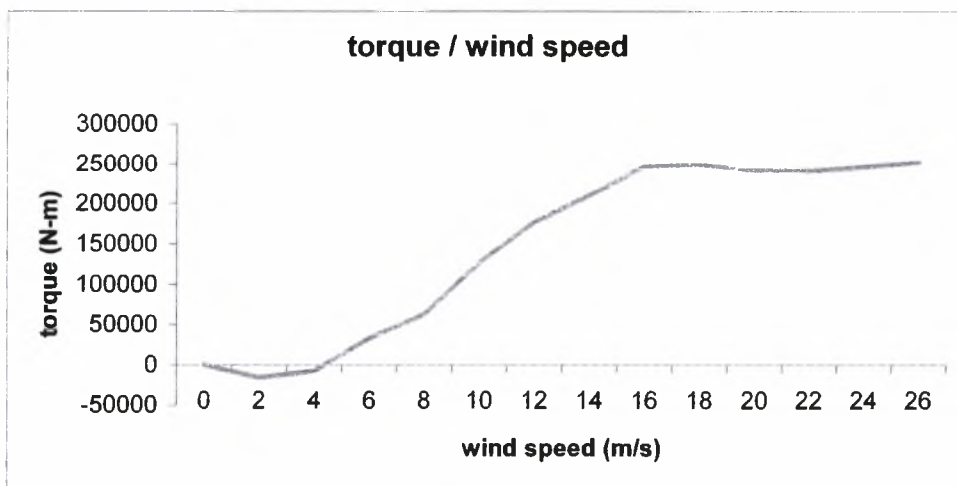
Από το γράφημα φαίνεται ότι η ανεμογεννήτρια ουσιαστικά αρχίζει να αποδίδει ισχύ μετά τα 4 m/s εισερχόμενης τιμής ανέμου. Από εκεί και πέρα έχουμε μια συνεχή αύξηση της ισχύος η οποία μεγιστοποιείται για ταχύτητα ανέμου 18 m/s και μετά μέχρι το όριο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (26 m/s) είναι σχεδόν σταθερή με μέση τιμή 680 kW.

Όλα τα γραφήματα στην περίπτωση της σταθερής ταχύτητας ανέμου θα αναφέρονται συναρτήσει των τιμών των ταχυτήτων.

Τα αποτελέσματα τις ισχύος συμφωνούν αρκετά με τα πειραματικά δεδομένα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, όπως φαίνεται από την καμπύλη ισχύος του :

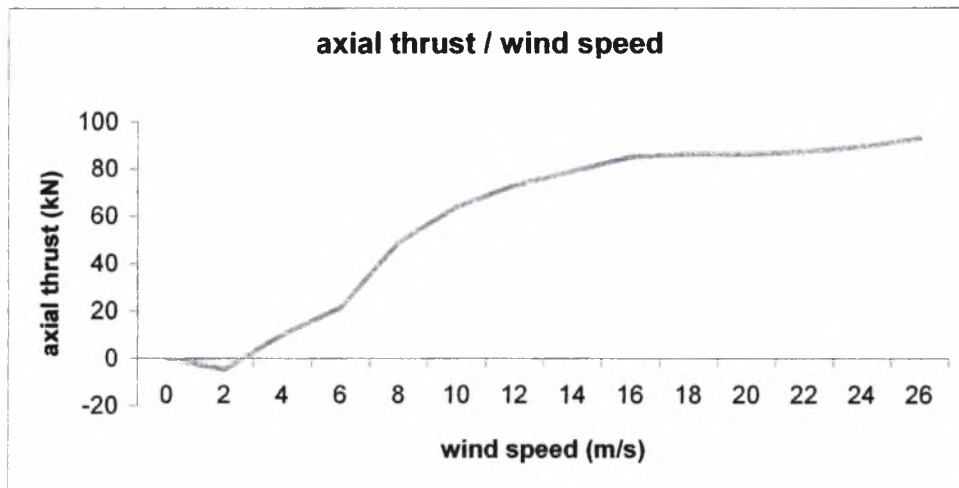


Γράφημα 2 - Καμπύλη ισχύος της MICON 600/43



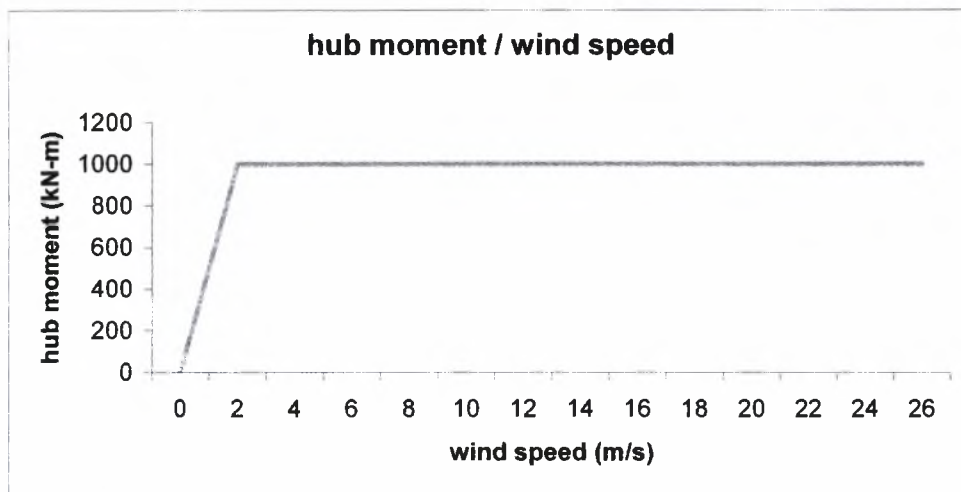
Γράφημα 3 - Ροπή στρέψης της πτερωτής

Παραπάνω φαίνεται το διάγραμμα της ροπής στρέψης της πτερωτής για διάφορες τιμές ταχυτήτων. Η καμπύλη της ροπής ακολουθεί την κλίση της καμπύλης ισχύος αφού έχουμε σταθερό ρυθμό περιστροφής της πτερωτής ($\omega=27$ rpm). Το μέγιστο της ροπής επιτυγχάνεται πάλι για 18 m/s ταχύτητα ανέμου.



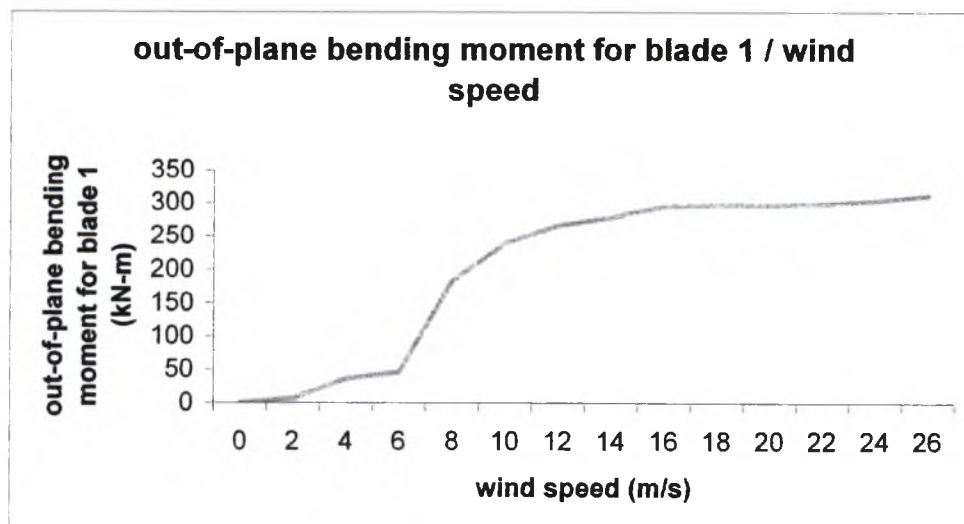
Γράφημα 4 – Αξονική φόρτιση της πτερωτής

Στο Γράφημα 4 φαίνεται η συνολική αξονική φόρτιση της πτερωτής. Είναι η δύναμη που ασκείται στην πλήμνη της και αποτελεί το άθροισμα όλων των αξονικών φορτίσεων που ασκούνται στην πτερωτή. Γενικά είναι ανοδική με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και μέγιστη τιμή 92.8 kN σε ταχύτητα 26 m/s.

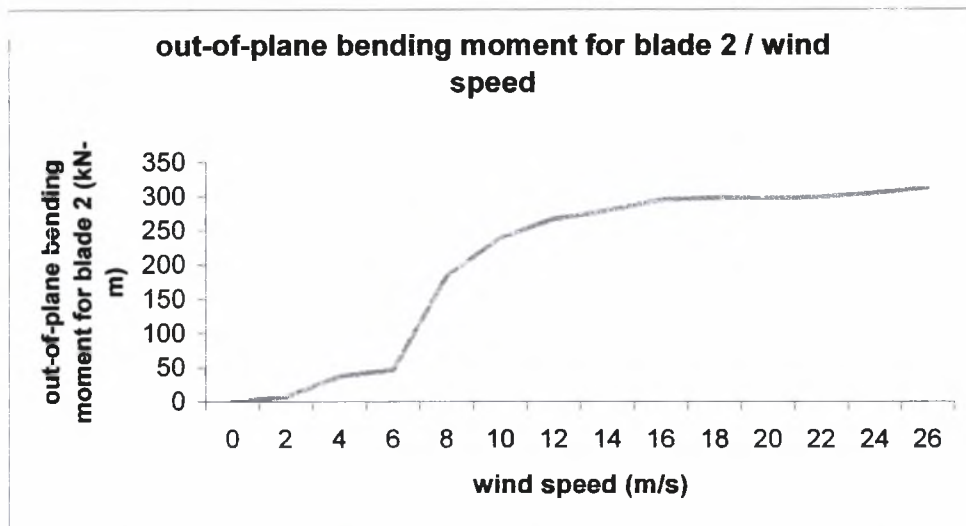


Γράφημα 5 – Συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής

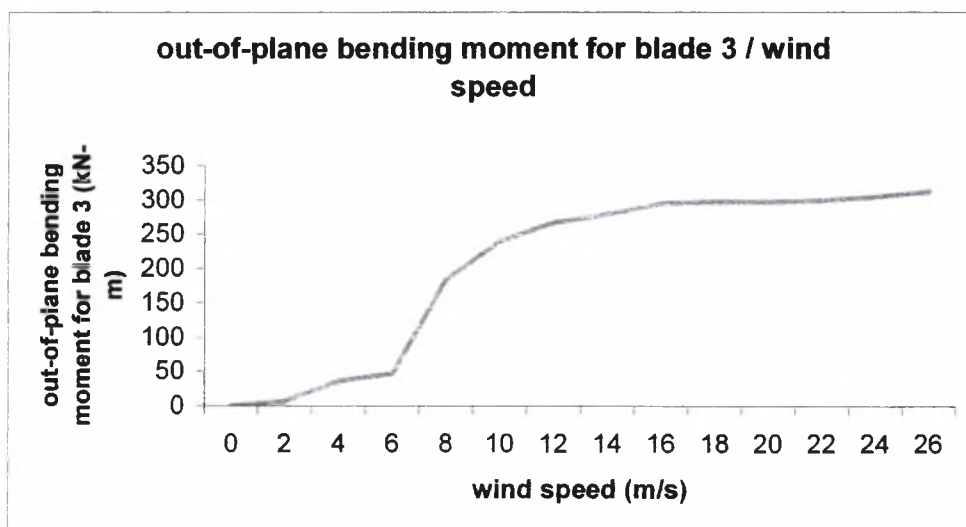
Σ'αυτό το γράφημα φαίνεται η συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτή. Είναι σταθερή στα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας αφού έχουμε ορίσει σταθερό μοντέλο πλήμνης στο πρόγραμμα. Έτσι το πρόγραμμα ορίζει πάντα μία σταθερή τιμή ροπής που δέχεται η πλήμνη. Η επιλογή έγινε ώστε να αποφευχθεί η μελέτη του μοντέλου της πλήμνης με ταλαντωτή (teeter hub model) που δεν ενδιαφέρει την παρούσα εργασία.



Γράφημα 6 – Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου



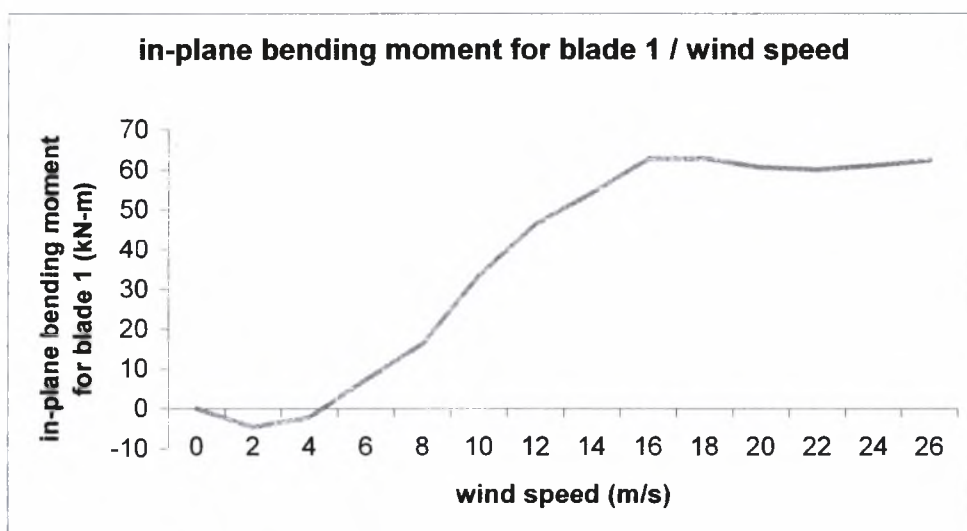
Γράφημα 7 – Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου



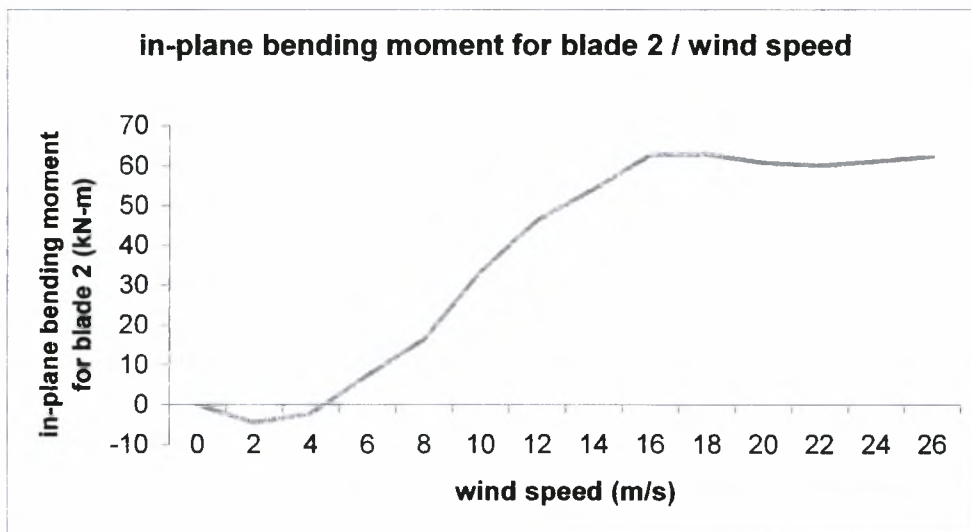
Γράφημα 8 – Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου πτερυγίου

Η καμπτική ροπή στη βάση κάθε πτερυγίου M_B (out-of-plane bending moment) υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα των ροπών των αξονικών δυνάμεων στο πτερύγιο ως προς ένα σημείο πού κείται στον άξονα της πτεροπότης και στο επίπεδο περιστροφής. Ο υπολογισμός της έγινε με υπορουτίνα σε Fortran στην οποία εισέρχονται τα δεδομένα των αξονικών φορτίσεων σε κάθε element και βρίσκεται το ολοκλήρωμα τους. Οι τιμές είναι

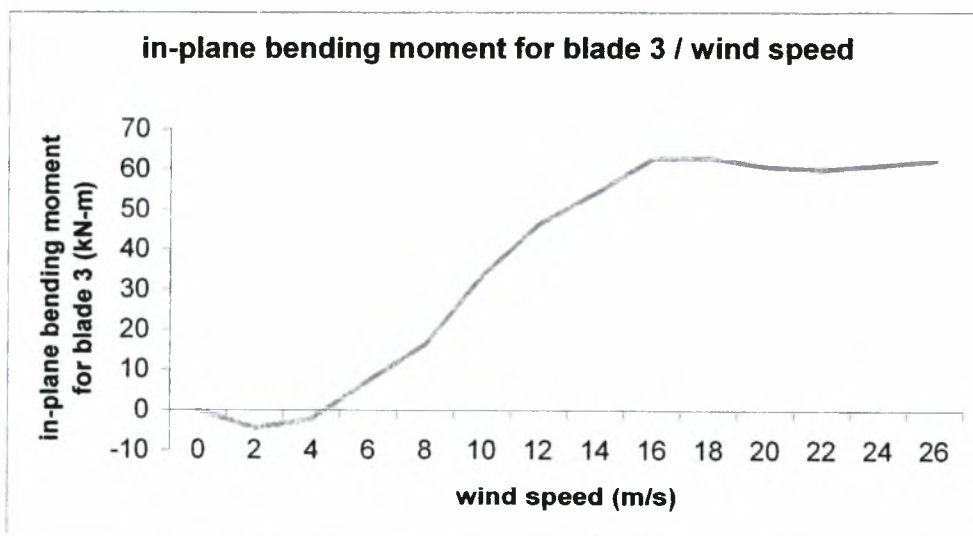
όμοιες και για τα τρία περύγια λόγω σταθερής κατανομής του ανέμου με το χρόνο. Για μικρές ταχύτητες ανέμου οι καμπτικές ροπές λόγω αξονικών φορτίων στην βάση του περηνγίου δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Για υψηλές ταχύτητες ανέμου οι ροπές αυτές έχουν συνεχώς ανοδική πορεία με μεγάλη κλίση στην περιοχή ταχυτήτων 6 – 18 m/s. Μέγιστη τιμή βρίσκεται για $U = 26 \text{ m/s}$ η $M_B = 312 \text{ kN.m}$.



Γράφημα 9 – Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου περηνγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής

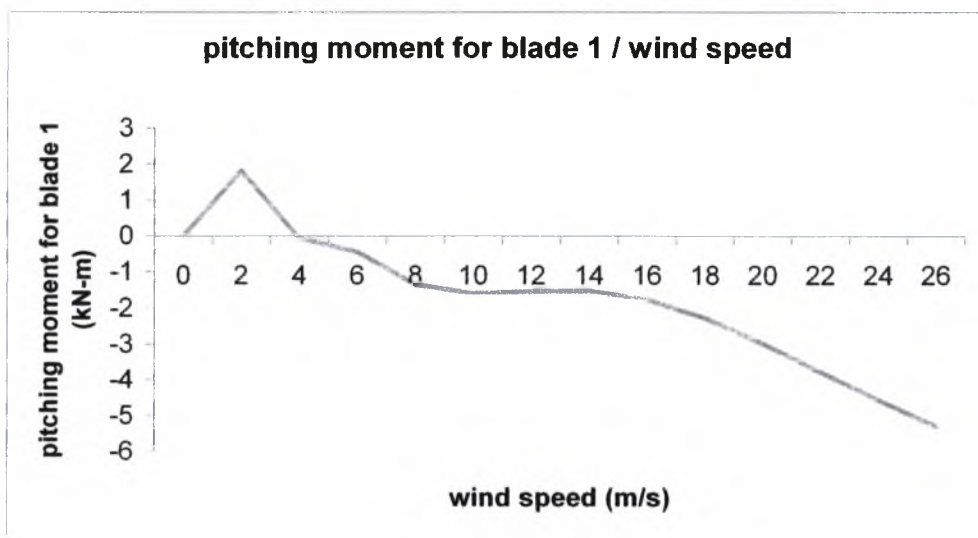


Γράφημα 10 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής

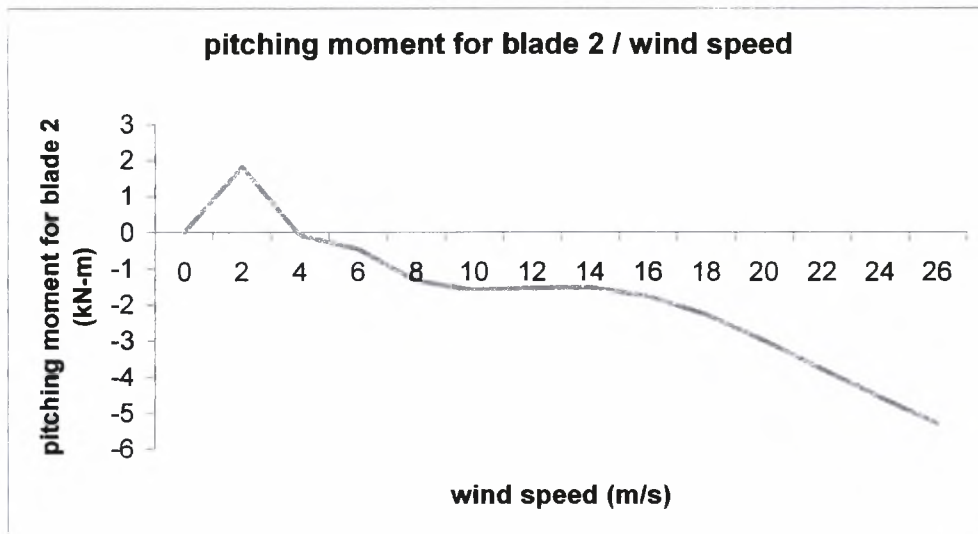


Γράφημα 11 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής

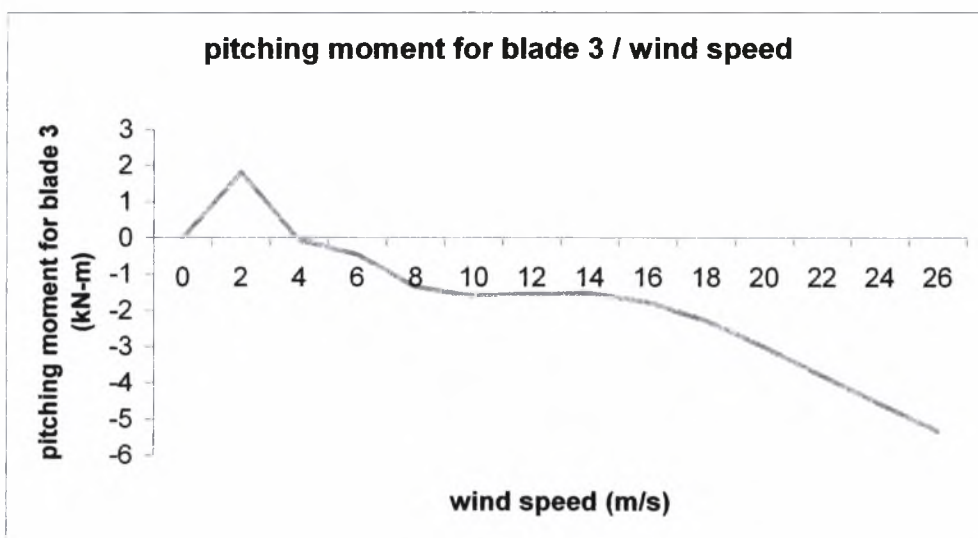
Στα Γραφήματα 9,10 και 11 φαίνεται η καμπτική ροπή M_E (in-plane bending moment) στη βάση κάθε πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής (δηλαδή κατά τον άξονα περιστροφής της πτερωτής). Αυτές οι ροπές (οι τιμές των οποίων είναι όμοιες και για τα τρία πτερύγια λόγω σταθερής κατανομής του ανέμου) αυξάνονται με την ταχύτητα ανέμου U , αλλά με αργότερο ρυθμό από ότι οι ροπές λόγω αξονικών φορτίων. Είναι κατά μία τάξη μικρότερες από τις προηγούμενες, με μέγιστη τιμή 62.36 kN.m για $U=26$ m/s.



Γράφημα 12 – Ροπή στρέψης στο πρώτο πτερύγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του



Γράφημα 13 - Ροπή στρέψης στο δεύτερο περύγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του



Γράφημα 14 - Ροπή στρέψης στο τρίτο περύγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του

Το περύγιο υφίσταται και καταπόνηση λόγω φορτίων που τείνουν να το περιστρέψουν γύρω από τον διαμήκη άξονά του (διεύθυνση r). Κάθε τμήμα του περυνγίου πάχους dr δέχεται ροπή που μπορεί να υπολογισθεί αν είναι γνωστός ο αεροδυναμικός συντελεστής ροπής C_M (pitching moment coefficient). Οι μοχλοβραχίονες που δημιουργούν αυτές τις ροπές είναι μόνο μικρό μέρος της χορδής, και επομένως δύο τάξεις μεγέθους

μικρότερες από τις ροπές λόγω αξονικών φορτίων. Αυτές φαίνονται στα Γραφήματα 12,13 και 14 (pitching moments M_m). Οι τιμές είναι όμοιες και για τα τρία πτερύγια λόγω σταθερής κατανομής του ανέμου.

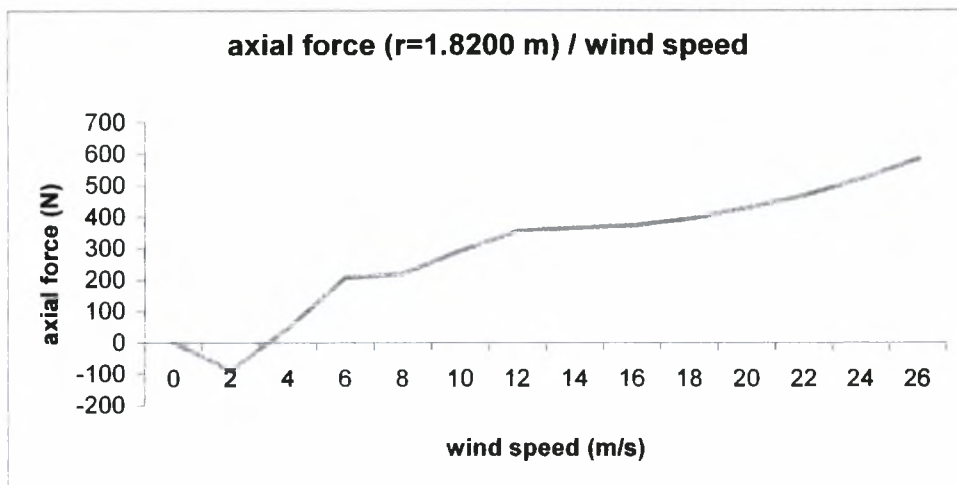
Παρατηρούμε ότι οι καμπτικές ροπές στις βάσεις των πτερυγίων είναι πολύ μεγαλύτερες σε κλίμακα μεγέθους από τα άλλα είδη ροπών λόγω της μεγαλύτερης επίδρασης των αξονικά κατευθυνόμενων φερόμενων ταχυτήτων σε σχέση με την περιστροφή της πτερωτής.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των φορτίσεων σε συγκεκριμένα σημεία ακτινικά των πτερυγίων.

Τα σημεία αυτά επιλέγονται στο εύρος συγκεκριμένων elements για αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω της φύσης της Blade Element Theory.

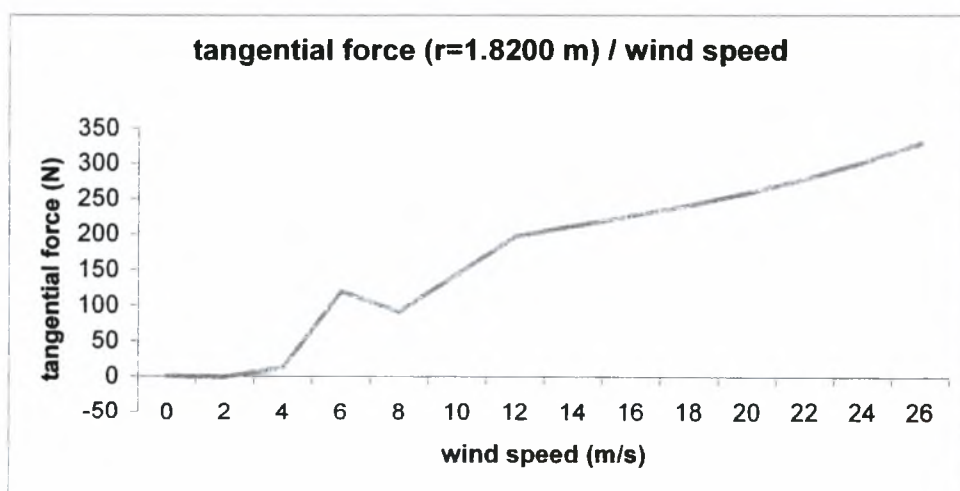
Τα σημεία αυτά βρίσκονται στις εξής αποστάσεις (μετρημένες ακτινικά στα πτερύγια από το κέντρο της πλήμνης) :

number	r (m)
1	1.82
2	3.97
3	6.12
4	9.35
5	11.5
6	14.72
7	17.95
8	18.97



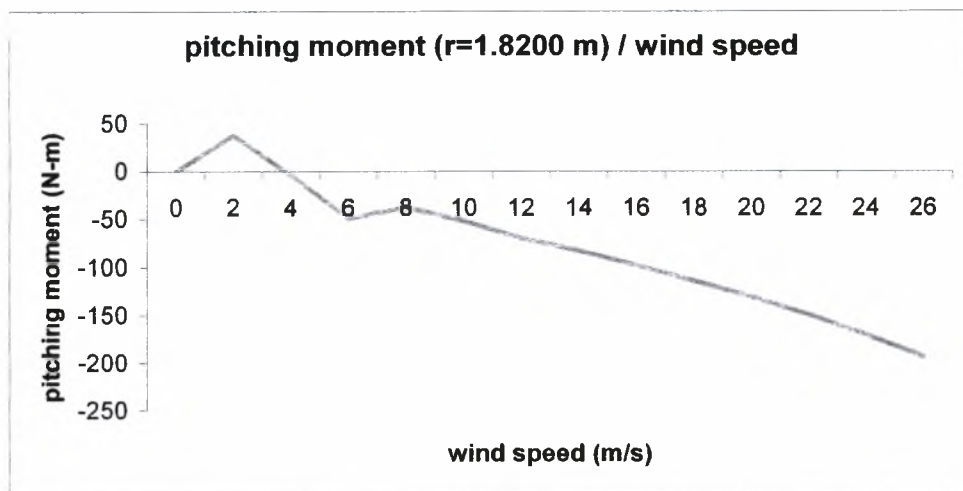
Γράφημα 15 – Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου

Στο Γράφημα 15 φαίνεται η αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου. Αυξάνεται σχεδόν ομαλά με αύξηση της ταχύτητας, με μέγιστη τιμή 589 N στα 26 m/s.



Γράφημα 16 – Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου

Στο Γράφημα 16 φαίνεται η κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου. Αυξάνεται σχεδόν ομαλά με αύξηση της ταχύτητας, με μέγιστη τιμή 328 N στα 26 m/s.



Γράφημα 17 – Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου

Στο Γράφημα 17 φαίνεται η ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=1.8200$ m του περυγίου. Αυξάνεται σχεδόν ομαλά με αύξηση της ταχύτητας ,με μέγιστη τιμή 193 N.m στα 26 m/s. (Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στη φορά της). Οι μοχλοβραχίονες που δημιουργούν αυτές τις ροπές είναι μόνο μικρό μέρος της χορδής και επομένως δυο τάξεις μεγέθους μικρότερες από τις ροπές λόγω αξονικών φορτίων.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται η αξονική δύναμη (F_T), η κάθετη δύναμη(F_N) και η ροπή στρέψης (F_P) στην τομή ενός στοιχείου περύγωσης :

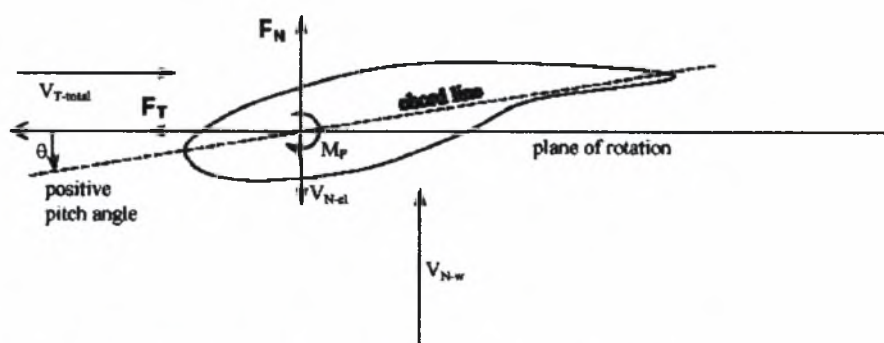
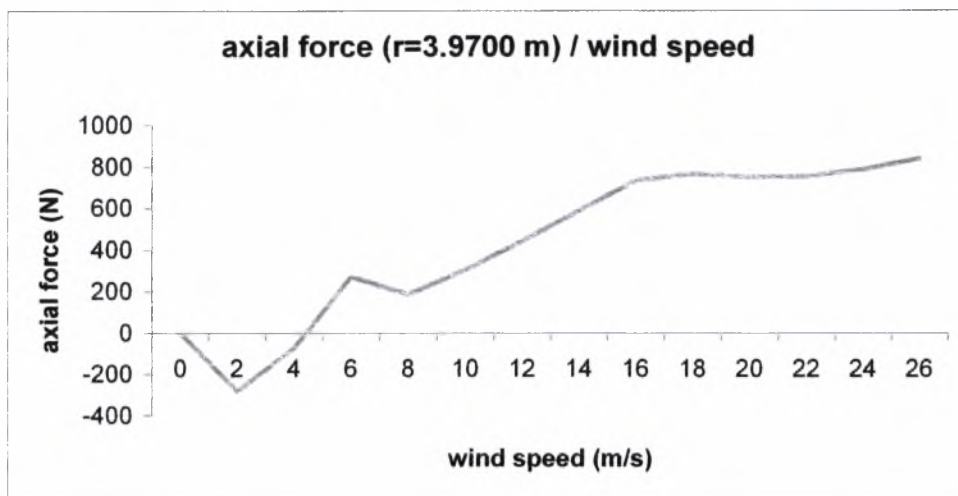
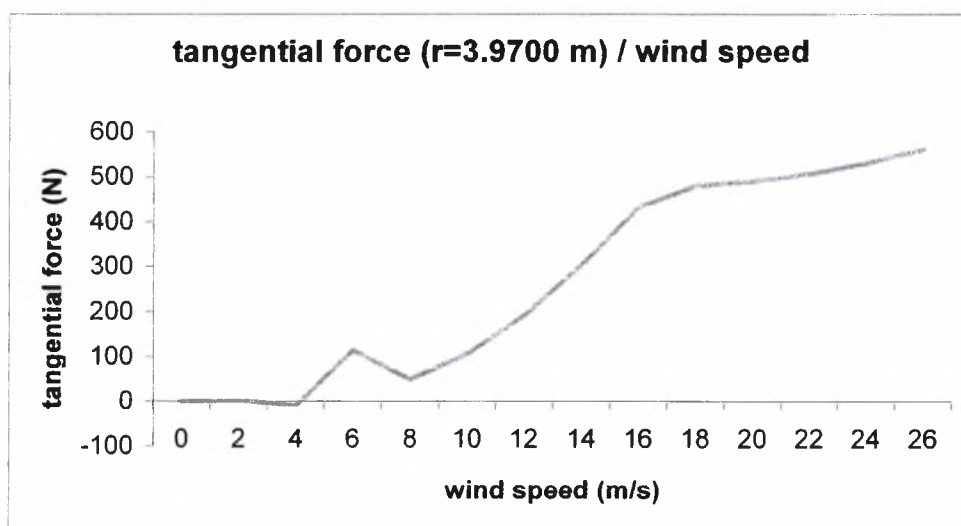


Figure C2 – Cross-section view of a blade element indicating a positive pitch angle, ϕ .

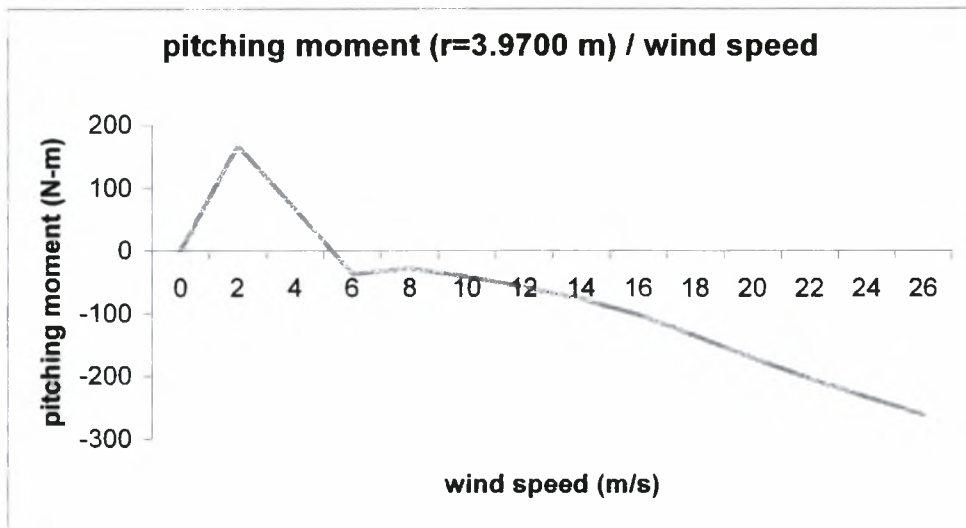
Παρακάτω φαίνονται τα γραφήματα για την αξονική δύναμη, την κάθετη δύναμη και τη ροπή στρέψης σε άλλα σημεία του περυγίου.



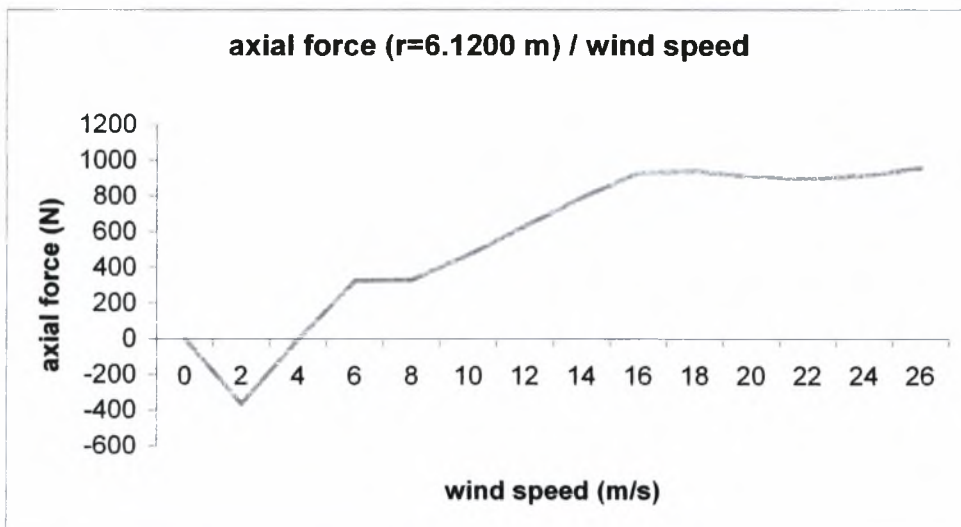
Γράφημα 18 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=3.9700$ m του περυγίου



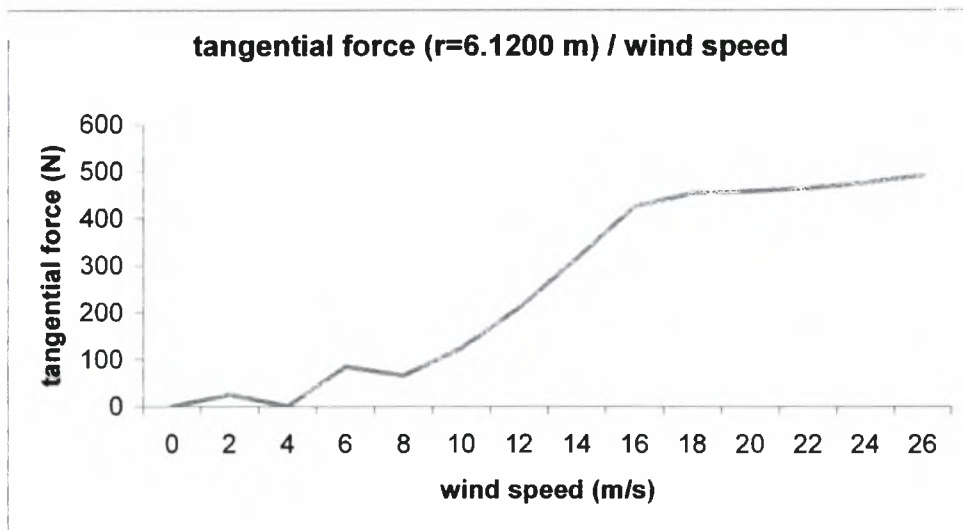
Γράφημα 19 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=3.9700$ m του περυγίου



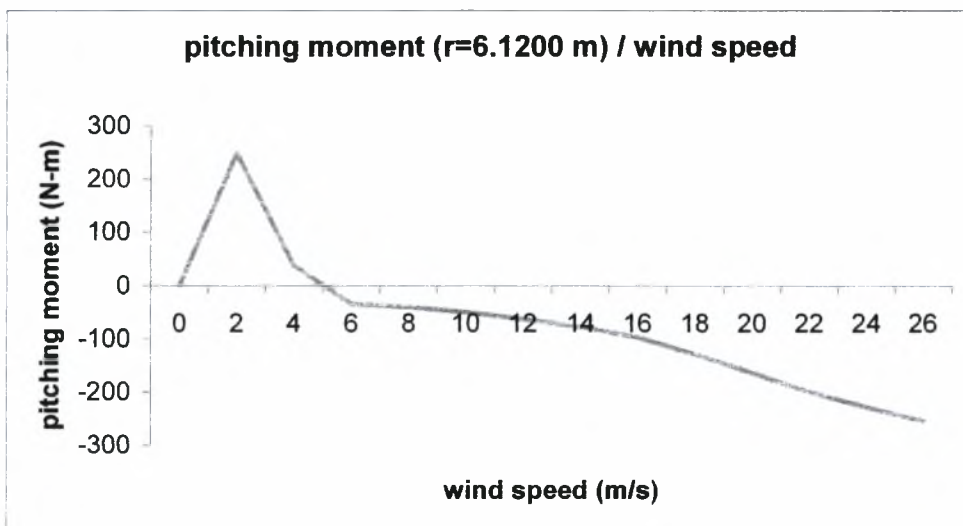
Γράφημα 20 - Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=3.9700$ m του περυγίου



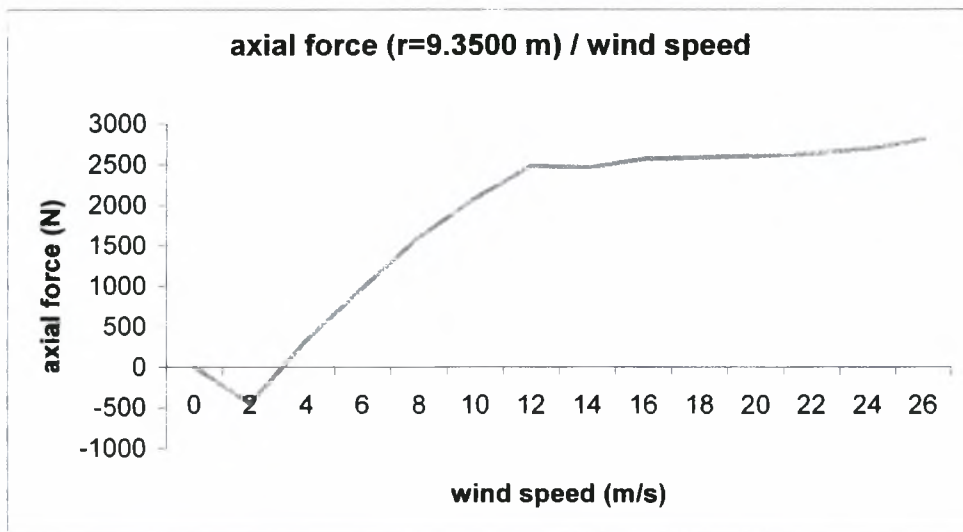
Γράφημα 21 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=6.1200$ m του περυγίου



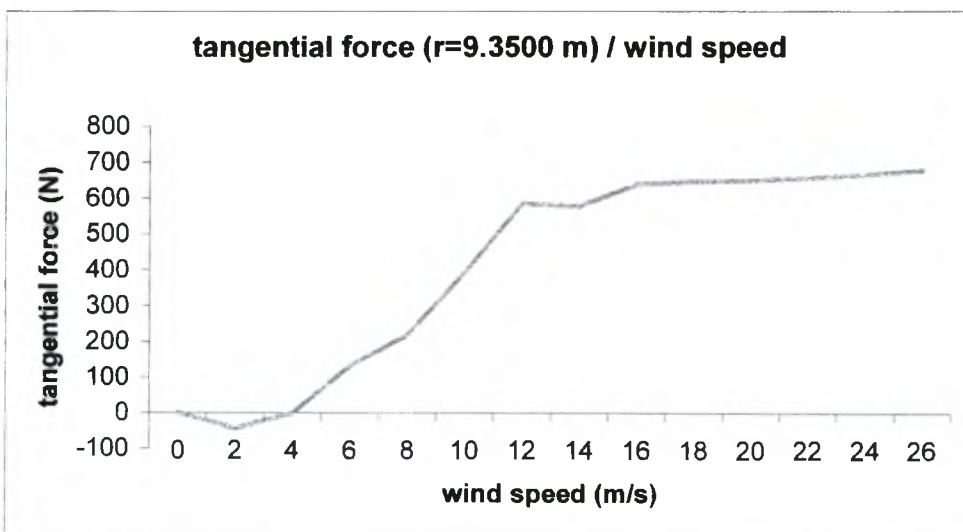
Γράφημα 22 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=6.1200$ m του περυγίου



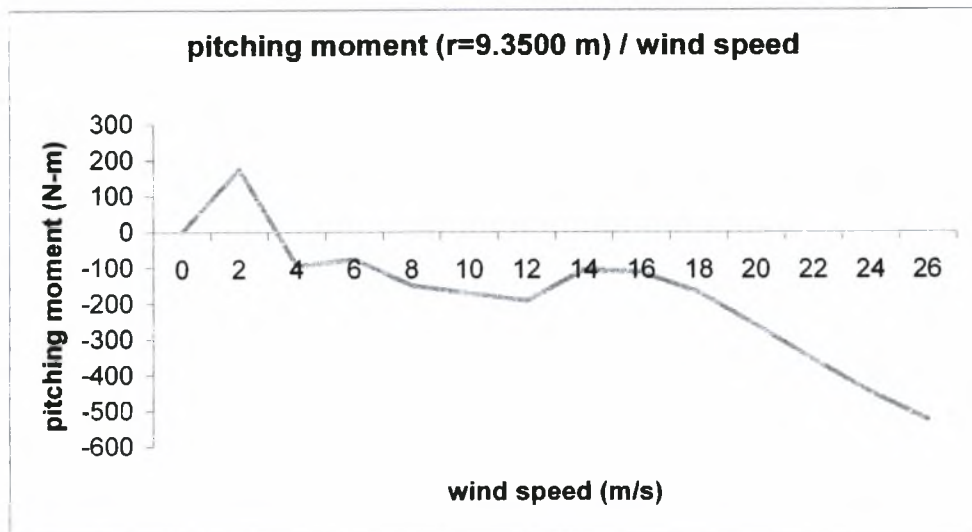
Γράφημα 23 - Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=6.1200$ m του περυγίου



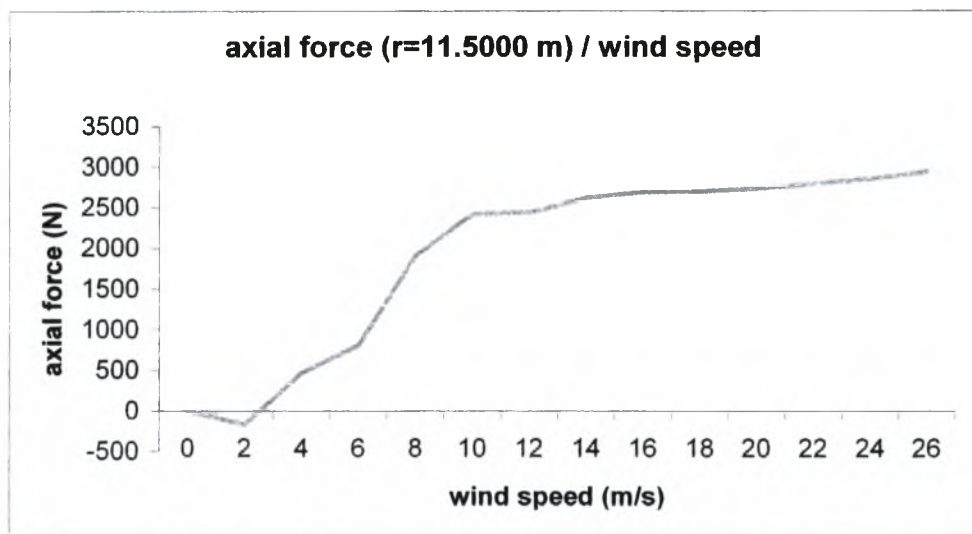
Γράφημα 24 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=9.3500$ m του πτερυγίου



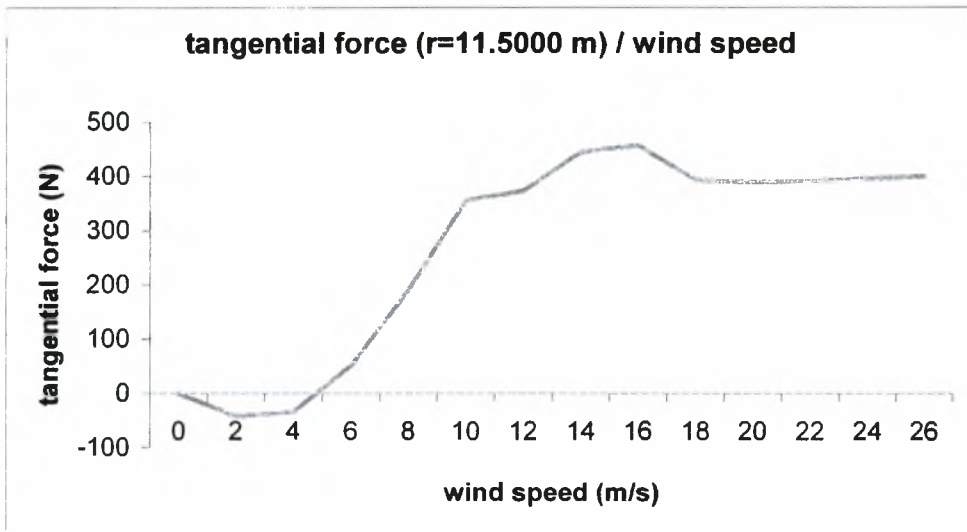
Γράφημα 25 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=9.3500$ m του πτερυγίου



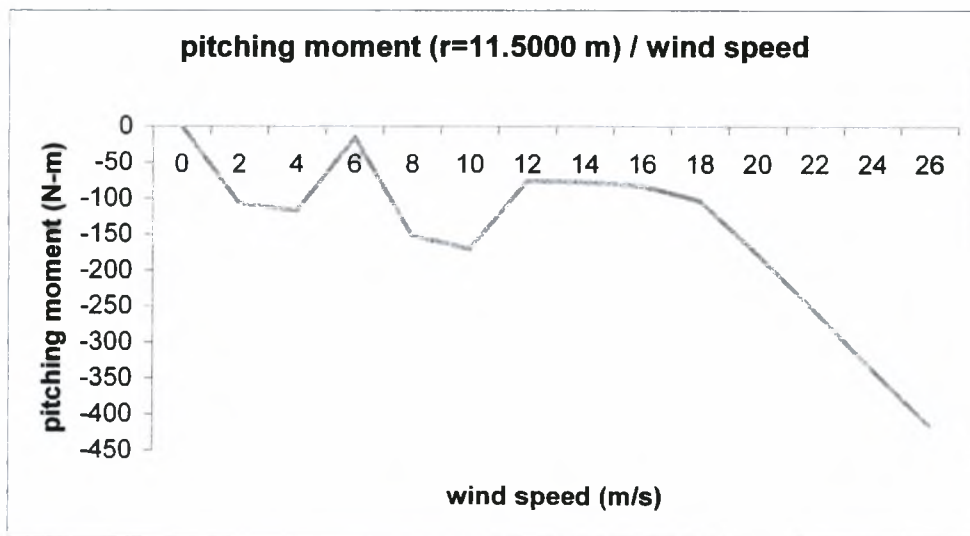
Γράφημα 26- Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=9,3500$ m του πτερυγίου



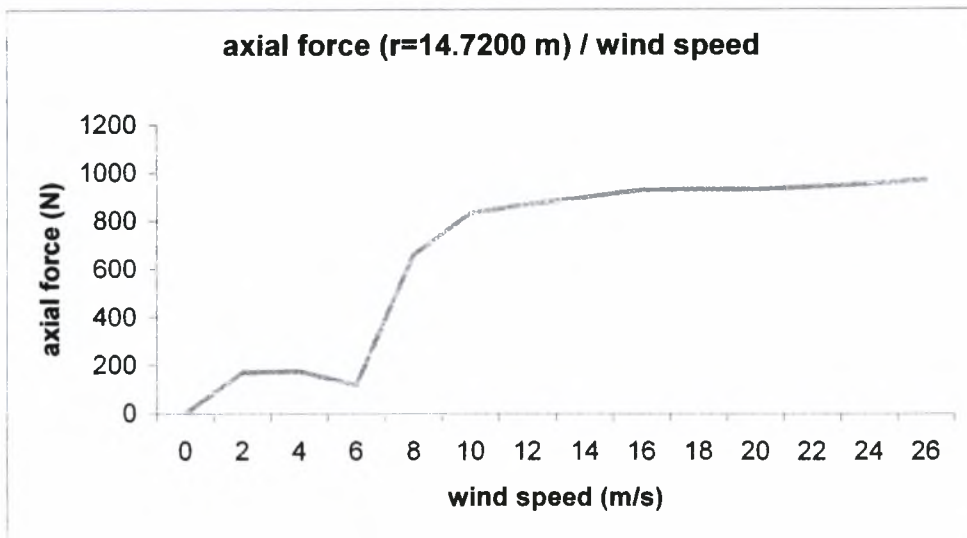
Γράφημα 27 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=11,5000$ m του πτερυγίου



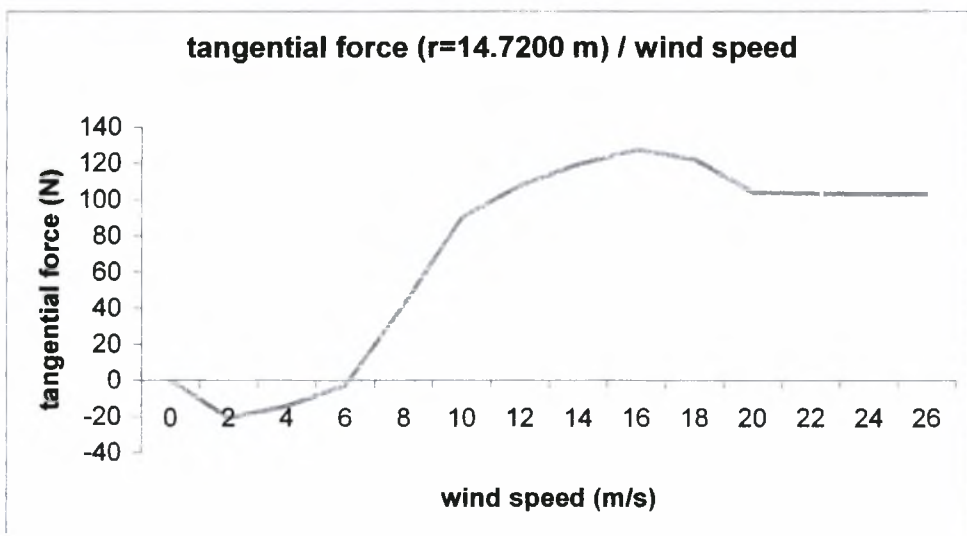
Γράφημα 28 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=11.5000$ m του πτερυγίου



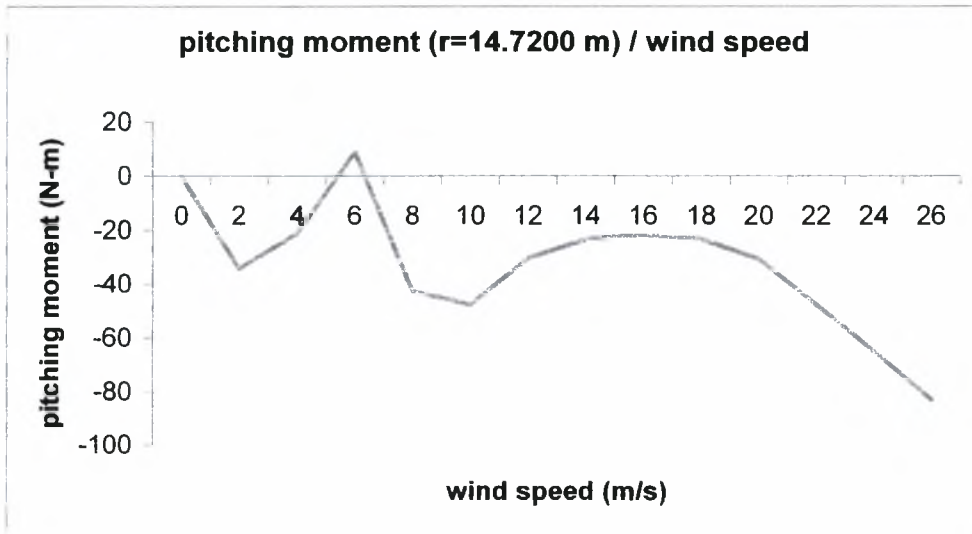
Γράφημα 29 - Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=11.5000$ m του πτερυγίου



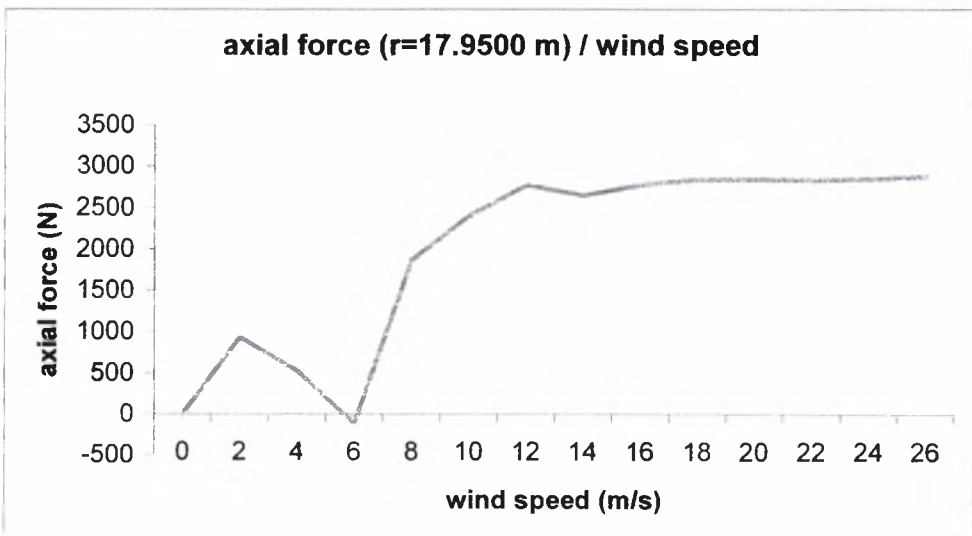
Γράφημα 30 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=14.7200$ m του πτερυγίου



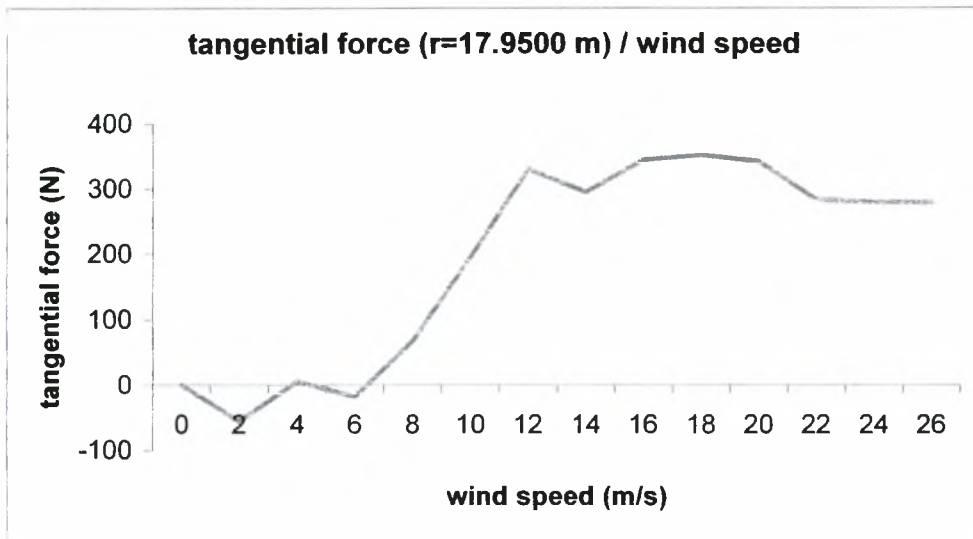
Γράφημα 31 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=14.7200$ m του πτερυγίου



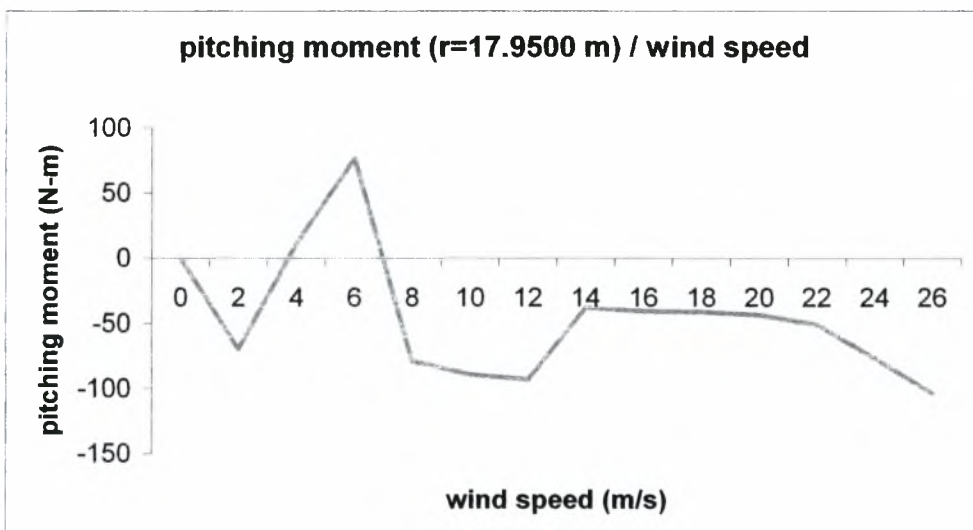
Γράφημα 32- Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=14.7200$ m του περυγίου



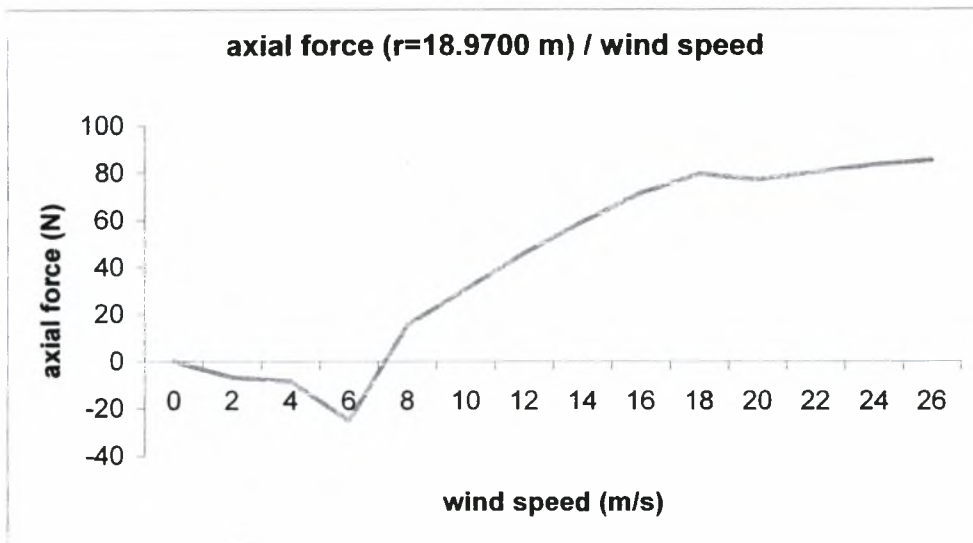
Γράφημα 33 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=17.9500$ m του περυγίου



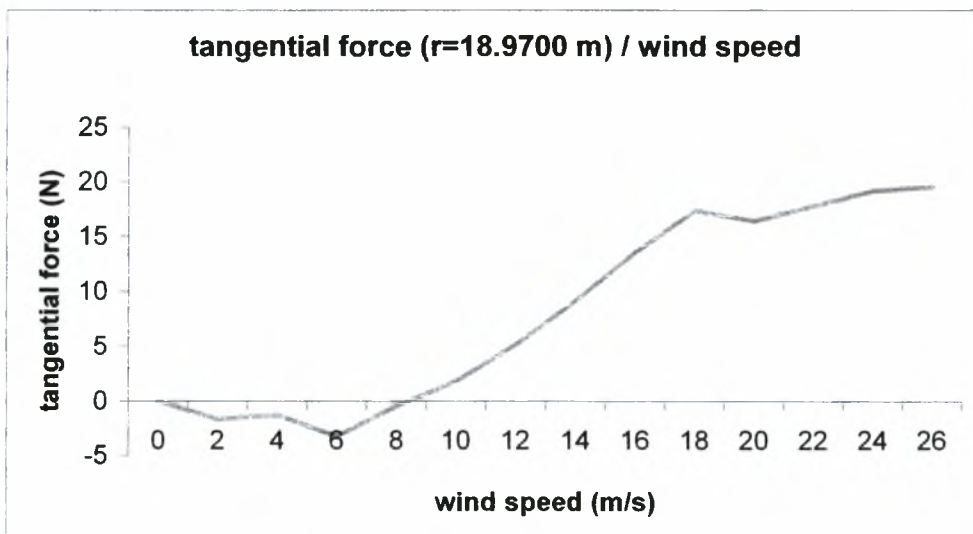
Γράφημα 34 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=17.9500$ m του περυγίου



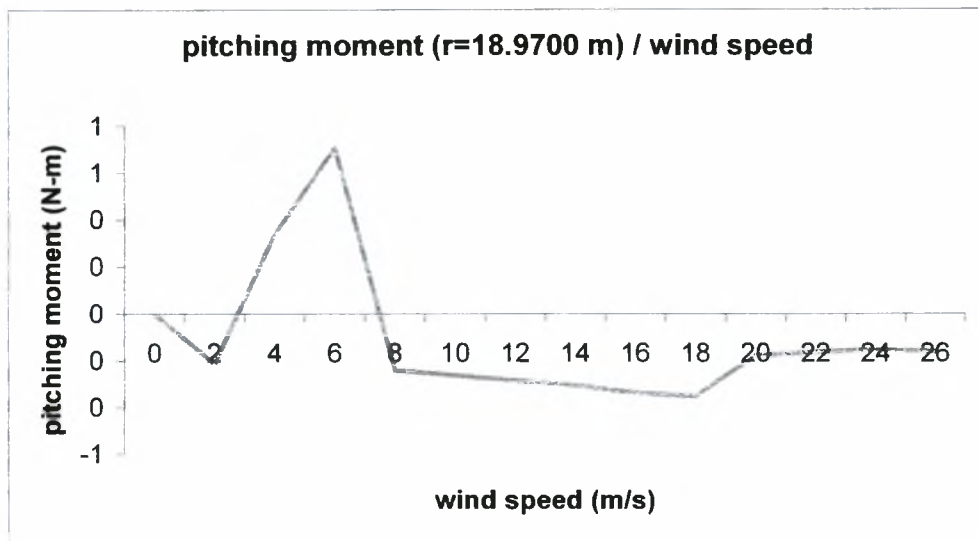
Γράφημα 35 - Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=17.9500$ m του περυγίου



Γράφημα 36 - Αξονική δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=18.9700$ m του περυγίου

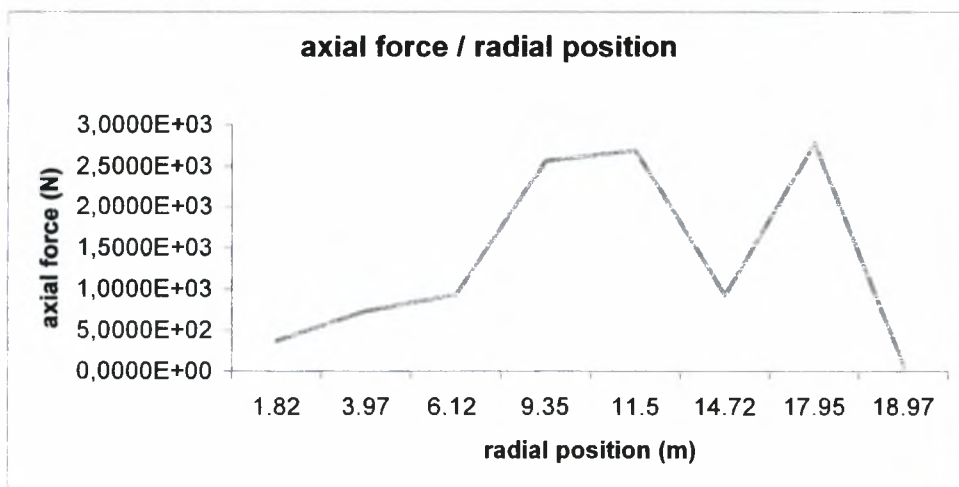


Γράφημα 37 - Κάθετη δύναμη που ασκείται στο σημείο $r=18.9700$ m του περυγίου

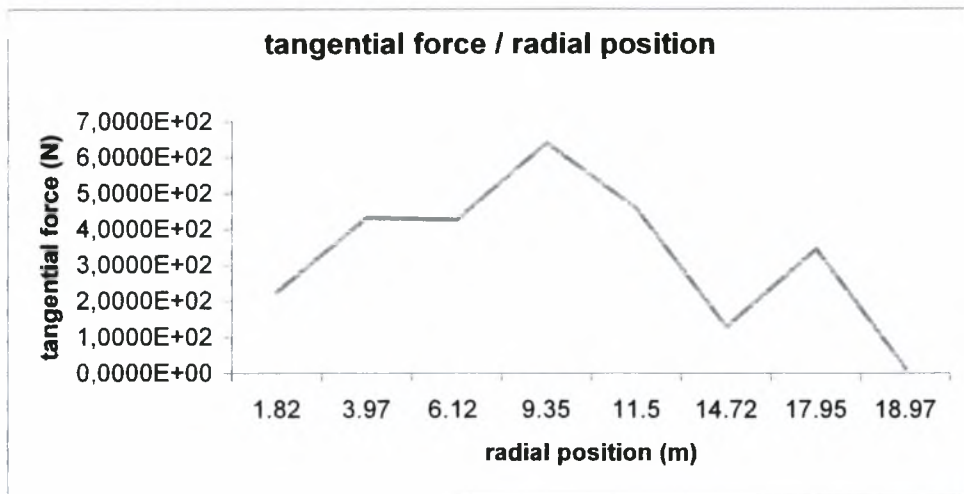


Γράφημα 38 - Ροπή στρέψης που ασκείται στο σημείο $r=18,9700$ m του πτερυγίου

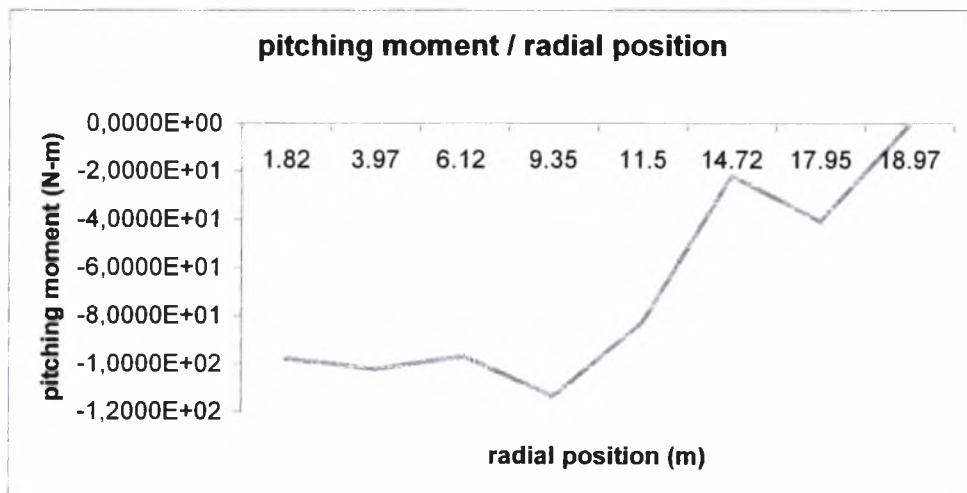
Η γενίκευση των προηγούμενων γραφημάτων φαίνεται στα επόμενα τρία γραφήματα. Παρουσιάζονται η αξονική δύναμη, η κάθετη δύναμη και η ροπή στρέψης σε συνάρτηση με την ακτινική θέση του σημείου (μετρημένη από το κέντρο της πλήμνης) για ταχύτητα ανέμου 15 m/s.



Γράφημα 39 – Αξονική δύναμη σε σχέση με τη θέση του σημείου του πτερυγίου που ασκείται



Γράφημα 40 - Κάθετη δύναμη σε σχέση με τη θέση του σημείου του πτερυγίου που ασκείται



Γράφημα 41 - Ροπή στρέψης σε σχέση με τη θέση του σημείου του πτερυγίου που ασκείται

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι η αξονική δύναμη έχει υψηλές τιμές στα σημεία κοντά στο κέντρο του πτερυγίου (10 m) και στα 18 m περίπου από την πλήμνη. Υπενθυμίζεται ότι το μήκος του πτερυγίου είναι 19.04 m (ενεργό αεροδυναμικό μήκος 16.04 m). Μέγιστη τιμή αξονικής δύναμης είναι 2.78 kN στο σημείο $r = 17.95$ m.

Η κάθετη δύναμη παρουσιάζει και αυτή υψηλές τιμές στις ίδιες περιοχές με μέγιστη τιμή 639 N στο σημείο $r = 9,35$ m. Η κάθετη δύναμη είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την αξονική.

Η ροπή στρέψης (καταπόνηση λόγω φορτίων που τείνουν να περιστρέψουν το περύγιο γύρω από τον διαμήκη άξονά του) παρουσιάζει μέγιστη τιμή 113 N.m και η τιμή της μειώνεται αισθητά μετά από τη μέση σχεδόν του περυγίου μέχρι την άκρη του.

B) Ακραία ριπή ανέμου

(extreme operating gust - eog)

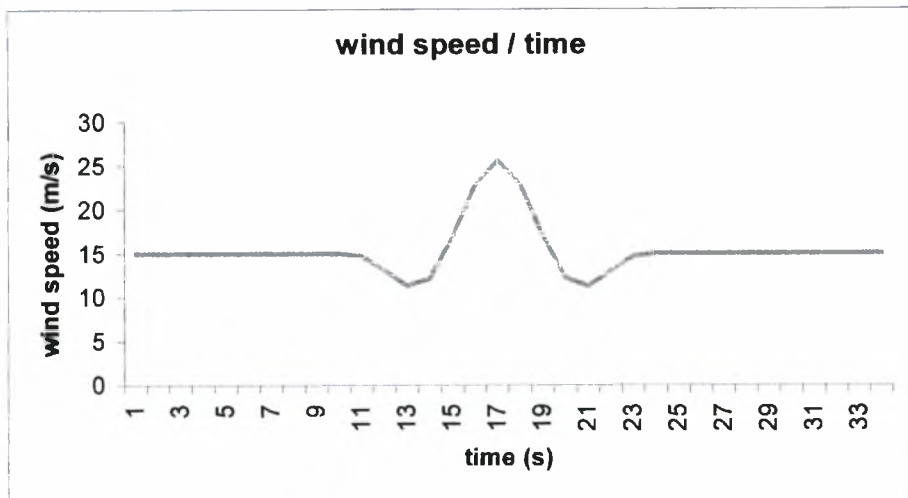
Τα αποτελέσματα αφορούν τις δύο περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί : την ακραία ριπή ανέμου που εκτιμάται ότι εμφανίζεται κάθε 50 χρόνια και αυτή που εκτιμάται ότι εμφανίζεται κάθε 1 χρόνο.

B1) N=50 χρόνια , $V_{hub}=15$ m/s , $\omega=27$ rpm , $T=14$ sec , για $t<0$ και για $t>14$ sec

$V(t)=15$ m/s

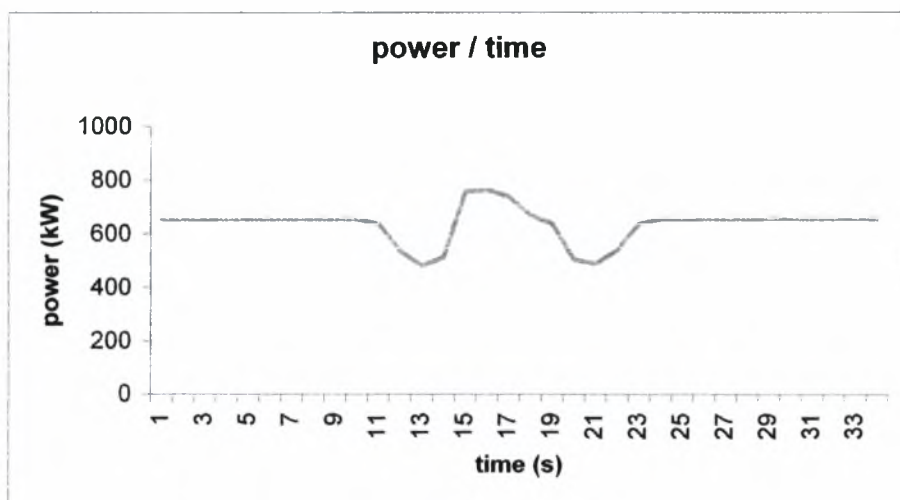
$$(V(t) = 15 - 5.30 \sin(0.673t) - (1 - \cos(0.448t)) \text{ m/s})$$

Το διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της θεωρίας και τον υπολογισμό των τιμών με κώδικα σε Fortran, φαίνεται παρακάτω :



Γράφημα 42 - Κατανομή ταχύτητας ανέμου για ακραία ριπή ανέμου

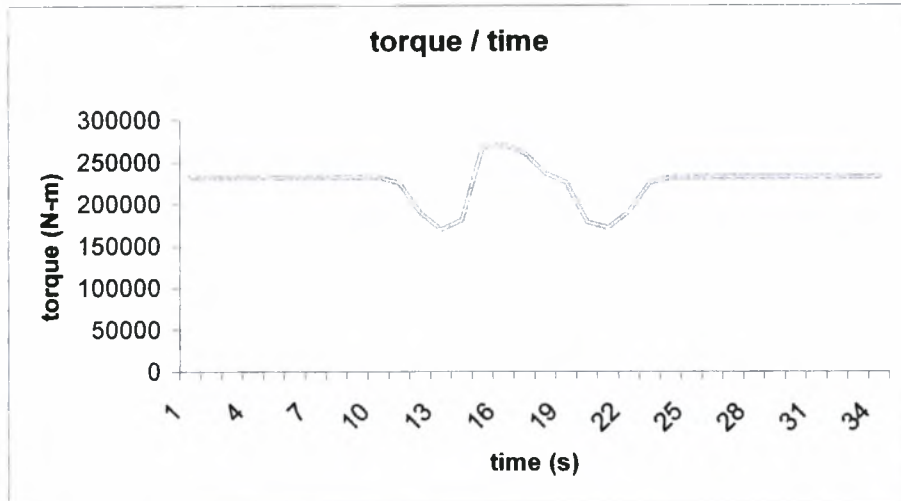
Στο γράφημα φαίνεται η απότομη αύξηση της ταχύτητας στο χρονικό διάστημα 14 sec έως 20 sec με μέγιστη τιμή 25.5 m sec για $t = 17$ sec.



Γράφημα 43 – Αποδιδόμενη ισχύς για ακραία ριπή ανέμου

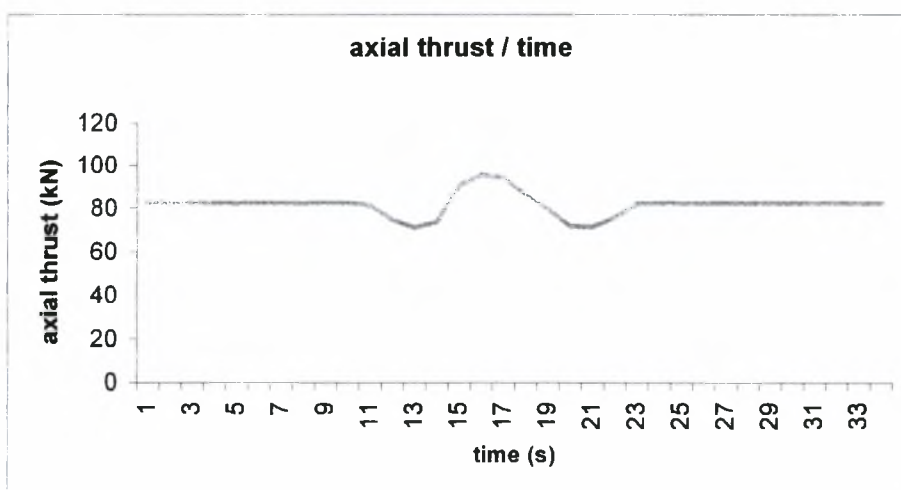
Στο Γράφημα 43 φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας σε ακραία ριπή ανέμου. Παρατηρούμε ότι είναι σταθερή στα 600 kW με μία μικρή αύξηση (μέγιστη τιμή 763

kW) στην περιοχή εμφάνισης του gust, η οποία όμως δεν μας ενδιαφέρει αφού εμφανίζεται για λίγα δευτερόλεπτα.



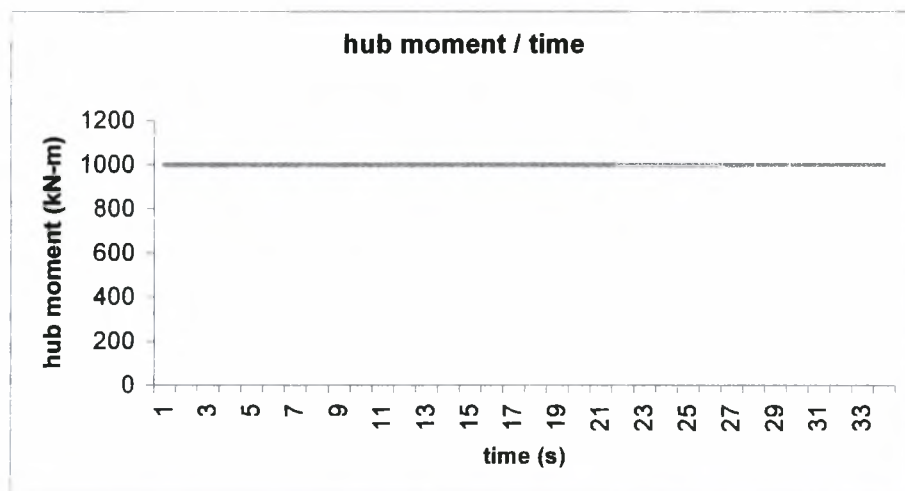
Γράφημα 44 - Ροπή στρέψης της περρωτής για ακραία ριπή ανέμου

Στο γράφημα 44 φαίνεται η ροπή στρέψης της περρωτής. Παρατηρούμε ότι είναι σταθερή στα 232 kN με μια μικρή αύξηση (μέγιστη τιμή 270 kN) στην περιοχή εμφάνισης του gust.



Γράφημα 45 - Αξονική φόρτιση της περρωτής για ακραία ριπή ανέμου

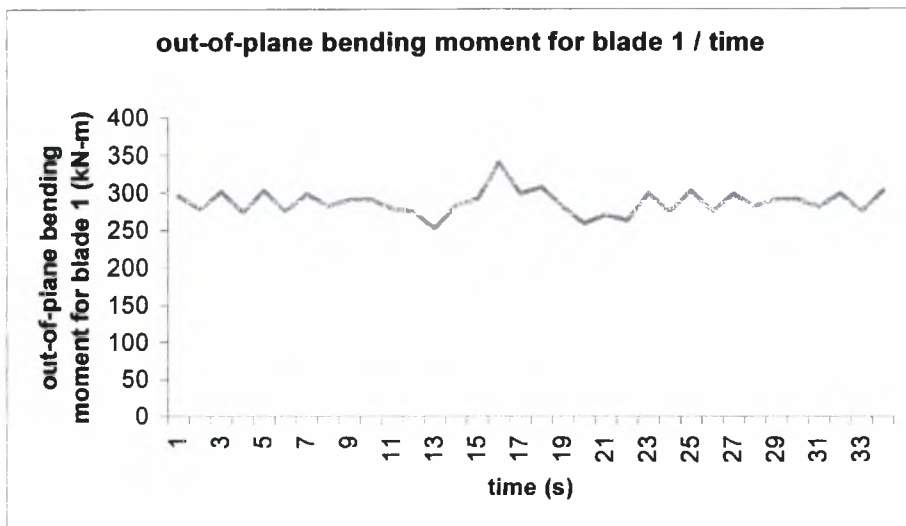
Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η συνολική αξονική δύναμη που ασκείται στην πτερωτή. Είναι σταθερή στα 80 kN με μία μικρή αύξηση (μέγιστη τιμή 95.5 kN) στη περιοχή εμφάνισης της ριπής.



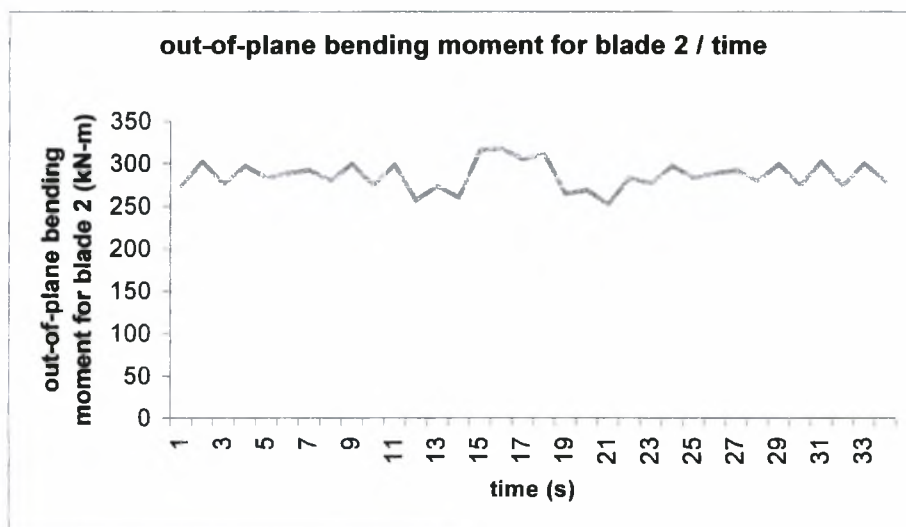
Γράφημα 46 - Συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής

Στο γράφημα 46 φαίνεται η συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής. Είναι σταθερή στα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας αφού έχουμε ορίσει σταθερό μοντέλο πλήμνης στο πρόγραμμα.

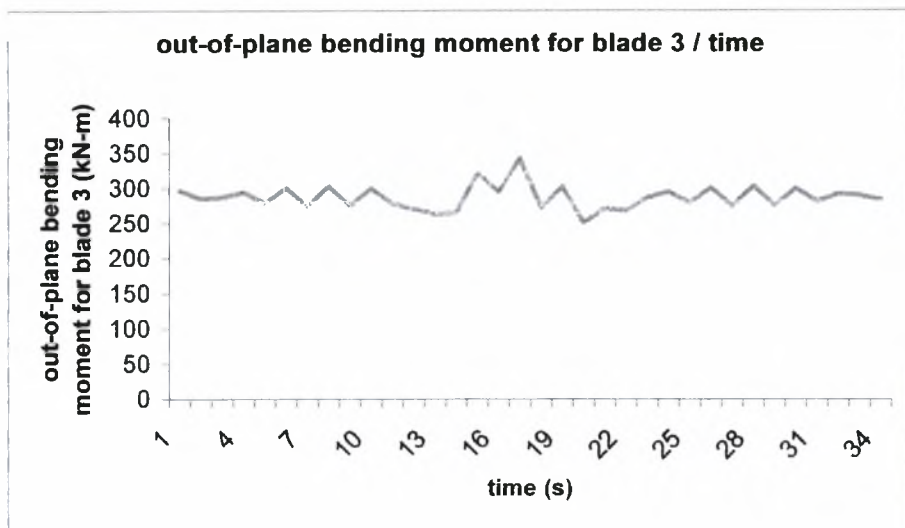
Στα επόμενα τρία γραφήματα φαίνεται η καμπτική ροπή στη βάση κάθε πτερυγίου M_B (out-of-plane bending moment).



Γράφημα 47 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 48 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου για ακραία ριπή ανέμου

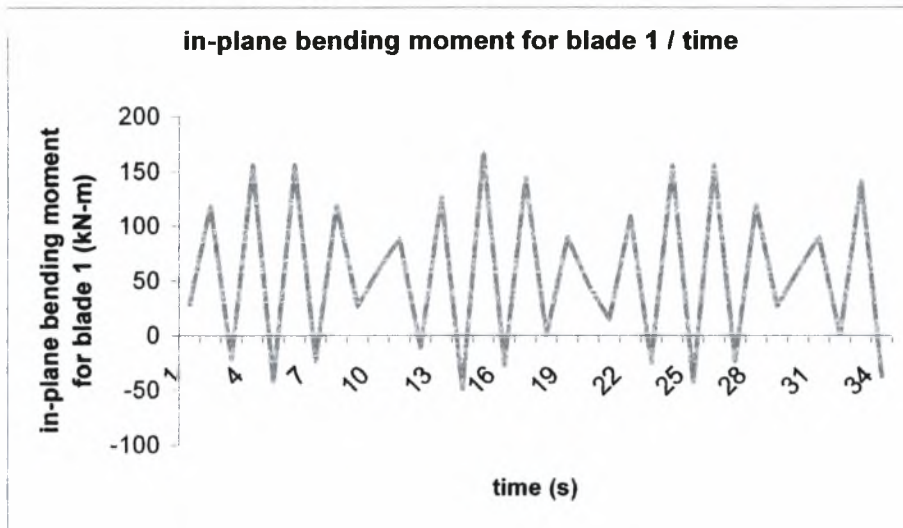


Γράφημα 49 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου περυγίου για ακραία ριπή ανέμου

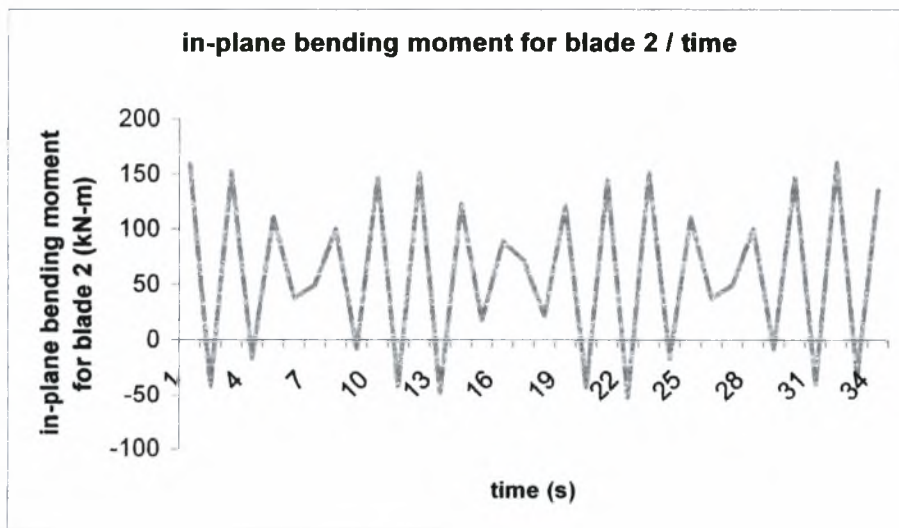
Όλες οι καμπτικές ροπές παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση στο χρονικό διάστημα της εμφάνισης του gust.

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε διαφορές στα αποτελέσματα για κάθε περύγιο λόγω την ανομοιόμορφης κατανομής των ταχυτήτων συναρτήσει του χρόνου (και φυσικά περιστροφής της περρωτής)

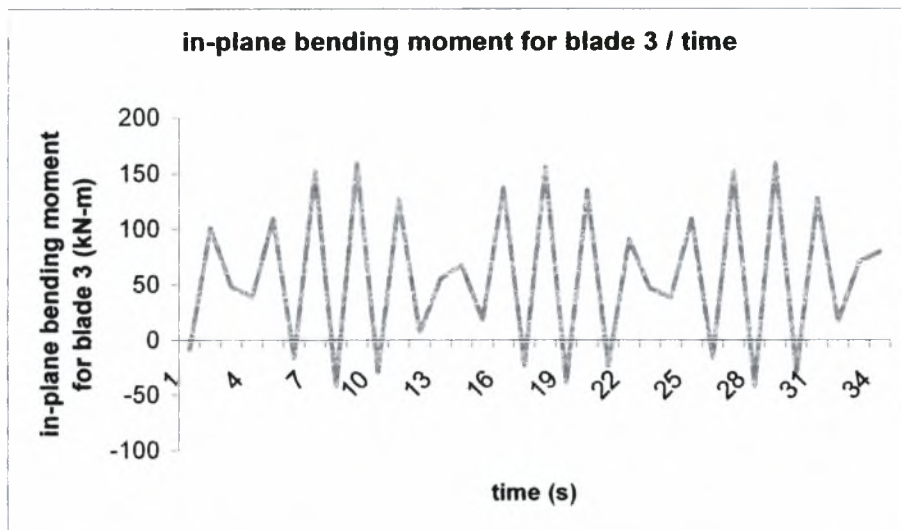
Στα Γραφήματα 50,51 και 52 φαίνεται η καμπτική ροπή M_E (in-plane bending moment) στη βάση κάθε περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής (δηλαδή κατά τον άξονα περιστροφής της περρωτής). Οι απότομες διακυμάνσεις που παρουσιάζουν οφείλονται στην επιλογή των time steps σε περιορισμένο χρονικό διάστημα για προσομοίωση του gust. Γενικά δεν παρουσιάζουν απότομη αλλαγή στην περιοχή της ακραίας ριπής ανέμου.



Γράφημα 50 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου

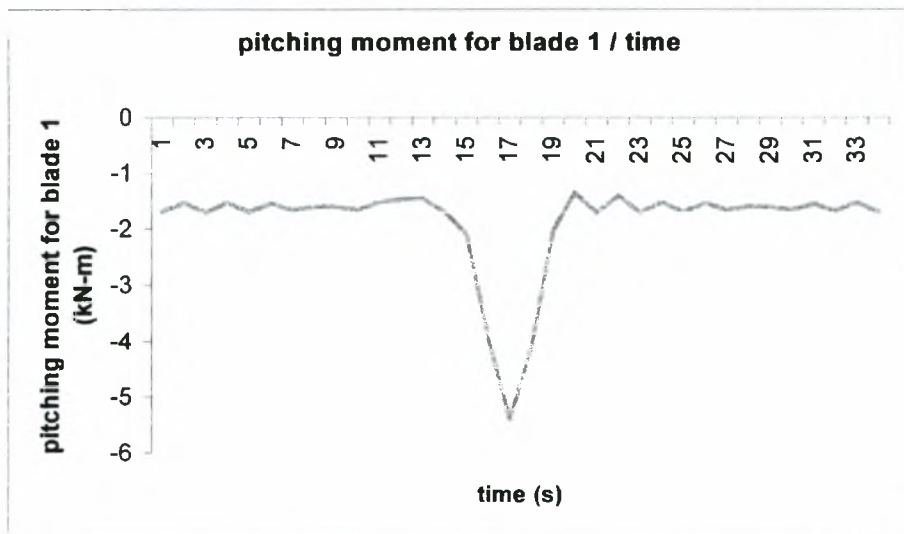


Γράφημα 51 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου

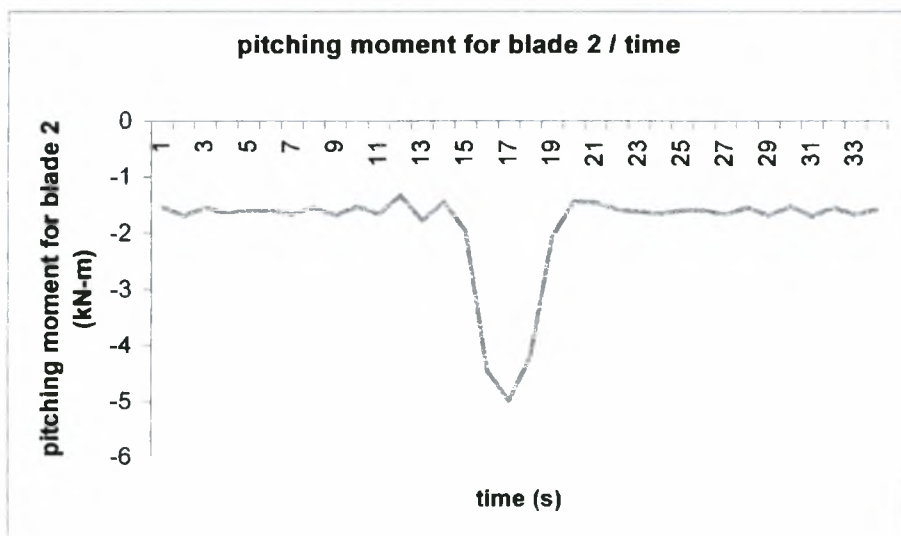


Γράφημα 52 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου

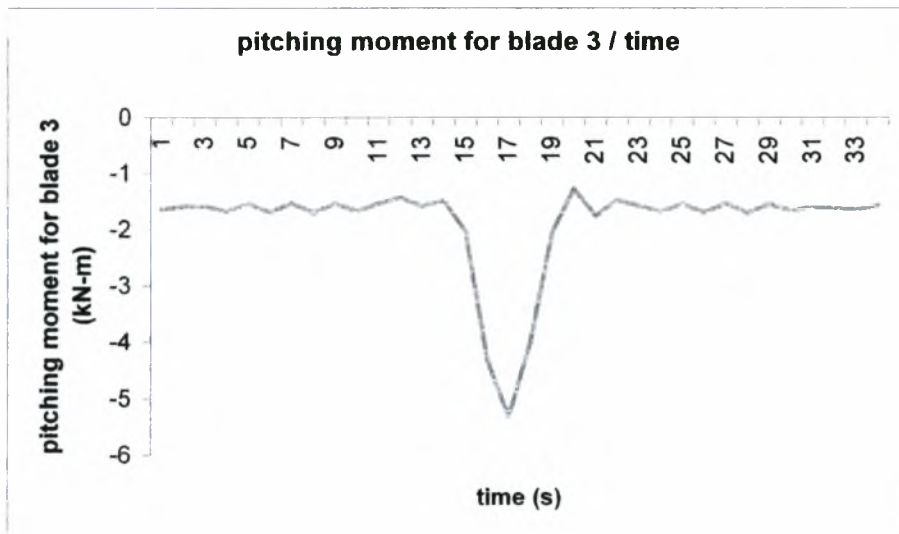
Στα γραφήματα 53, 54 και 55 παρουσιάζεται η ροπή στρέψης σε κάθε πτερίγιο που τείνει να το περιστρέψουν γύρω από τον διαμήκη άξονά του (διεύθυνση r) για την ακραία ριπή ανέμου.



Γράφημα 53 - Ροπή στρέψης στο πρώτο περὶγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 54 - Ροπή στρέψης στο δεύτερο περὶγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 55 - Ροπή στρέψης στο τρίτο περικόγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου

Τα παραπάνω γραφήματα παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον ,αφού φαίνεται ότι στο χρονικό διάστημα τις ακραίας ριπής ανέμου έχουμε μία μεγάλη αύξηση (της τάξης των 3 kN) στη ροπή στρέψης με μέγιστη τιμή περίπου 5.3 kN.

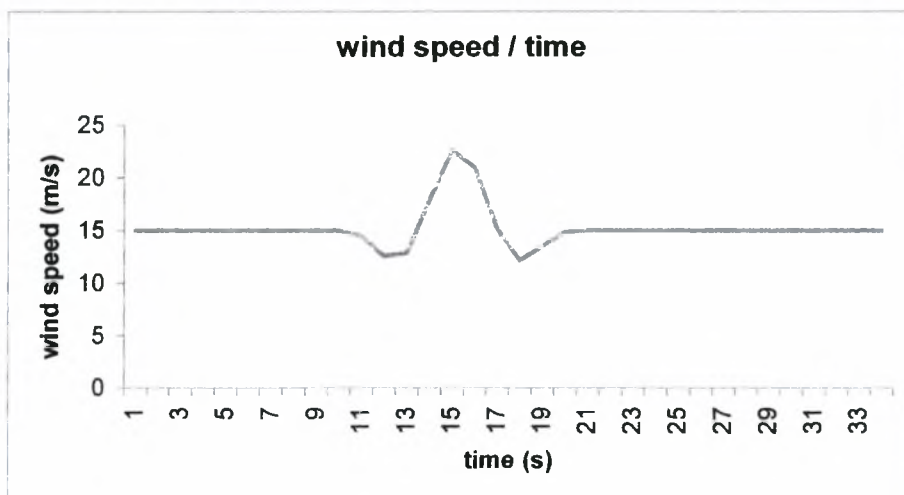
Σε σχέση με τις κλίμακες μεγέθους οι καμπτικές ροπές είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τα άλλα είδη ροπών, όπως έχουμε είδη εξηγήσει.

B2) N=1 χρόνο , $V_{hub}=15 \text{ m/s}$, $\omega=27 \text{ rpm}$, $T=10.5 \text{ sec}$, για $t < 0$ και για $t > 10.5 \text{ sec}$

$V(t)=15 \text{ m/s}$

$$(V(t) = 15 - 3.97 \sin(0.897t) \cdot (1 - \cos(0.598t)) \text{ m/s})$$

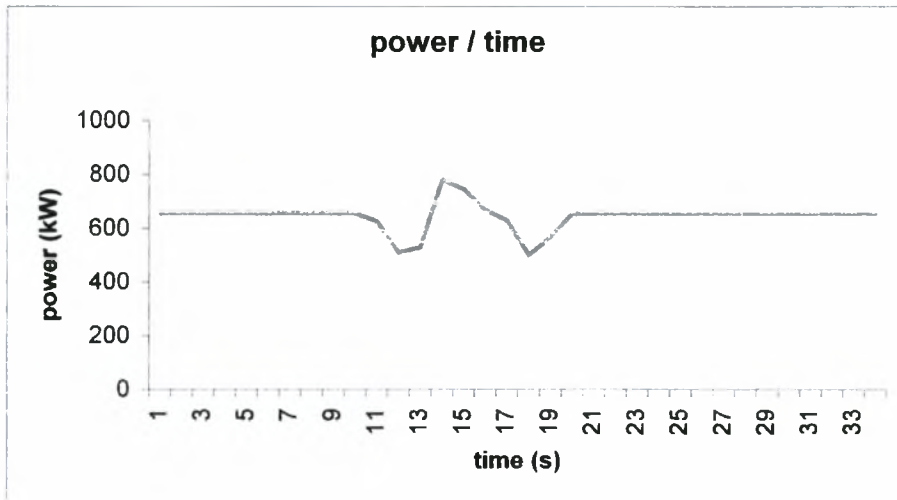
Το διάγραμμα κατανομής της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψε από την εφαρμογή της θεωρίας και τον υπολογισμό των τιμών με κώδικα σε Fortran, φαίνεται παρακάτω :



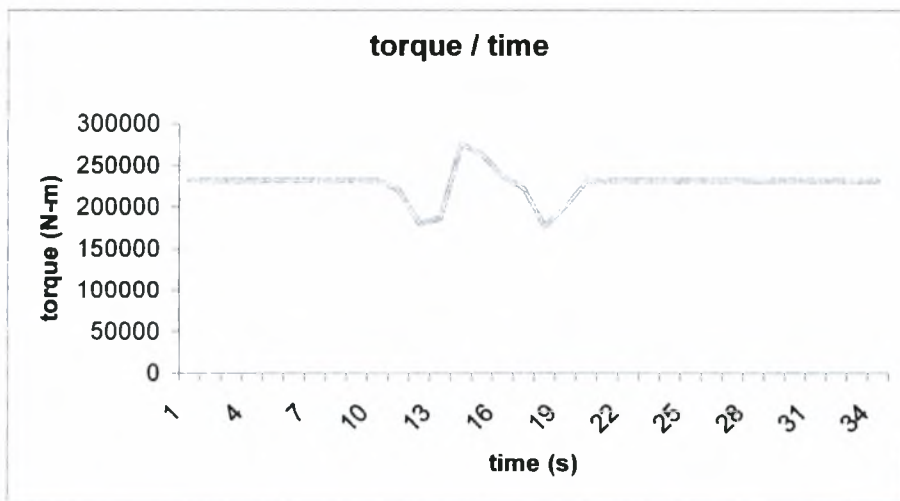
Γράφημα 56 - Κατανομή ταχύτητας ανέμου για ακραία ριπή ανέμου

Στο γράφημα φαίνεται η απότομη αύξηση της ταχύτητας στο χρονικό διάστημα 13 sec έως 18 sec με μέγιστη τιμή 22.5 m sec για $t = 15 \text{ sec}$.

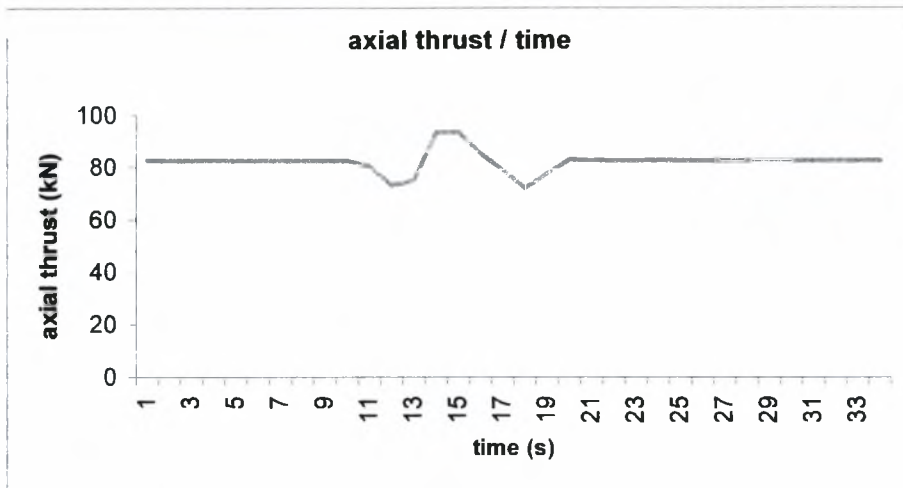
Στη δεύτερη περίπτωση ακραίας ριπής ανέμου ,που εκτιμάται ότι εμφανίζεται μία φορά το χρόνο, τα αποτελέσματα των μεγεθών που μελετήθηκαν και στην προηγούμενη περίπτωση ,φαίνονται παρακάτω :



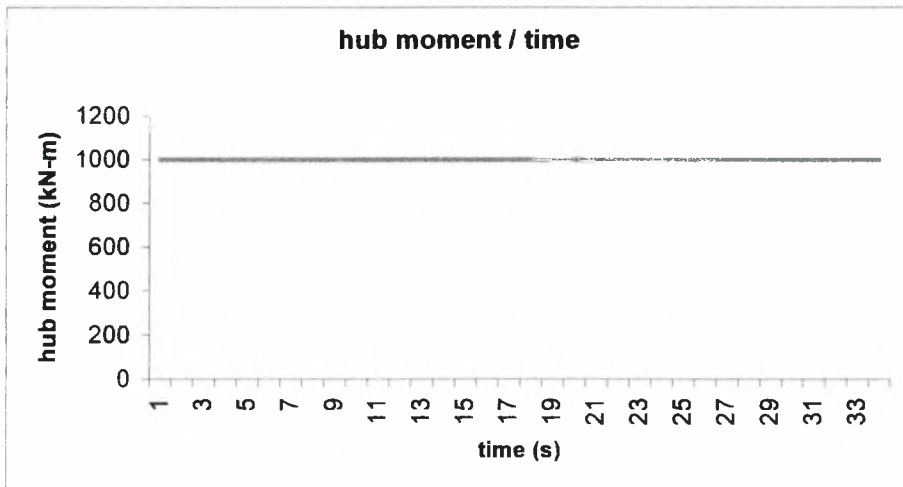
Γράφημα 57 - Αποδιδόμενη ισχύς για ακραία ριπή ανέμου



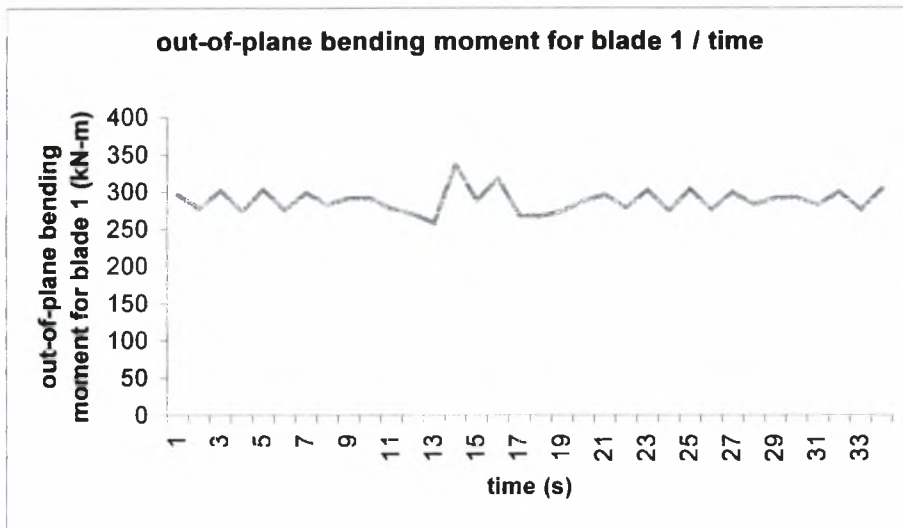
Γράφημα 58 - Ροπή στρέψης της περρωτής για ακραία ριπή ανέμου



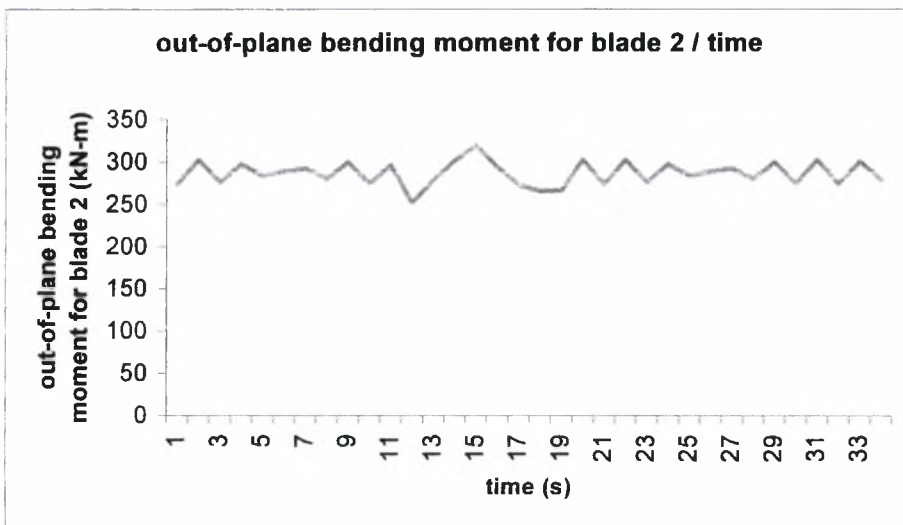
Γράφημα 59 - Αξονική φόρτιση της περρωτής για ακραία ριπή ανέμου



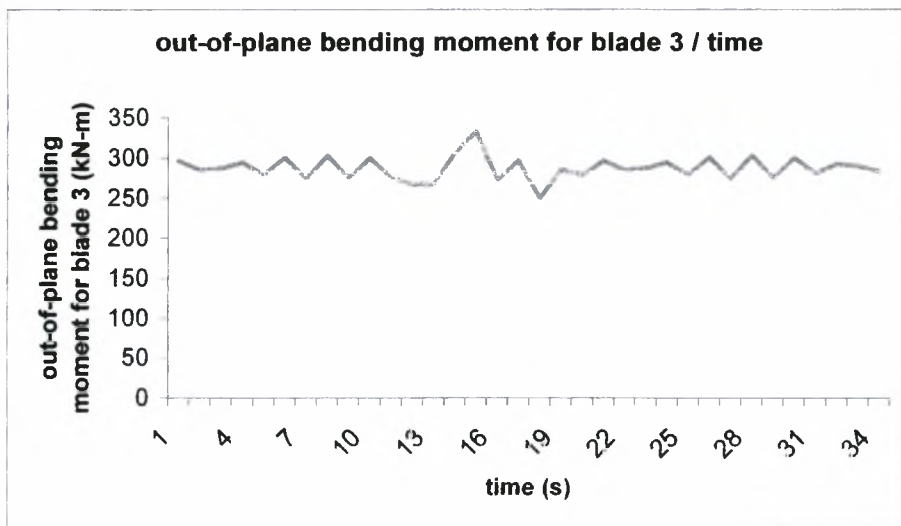
Γράφημα 60 - Συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της περρωτής



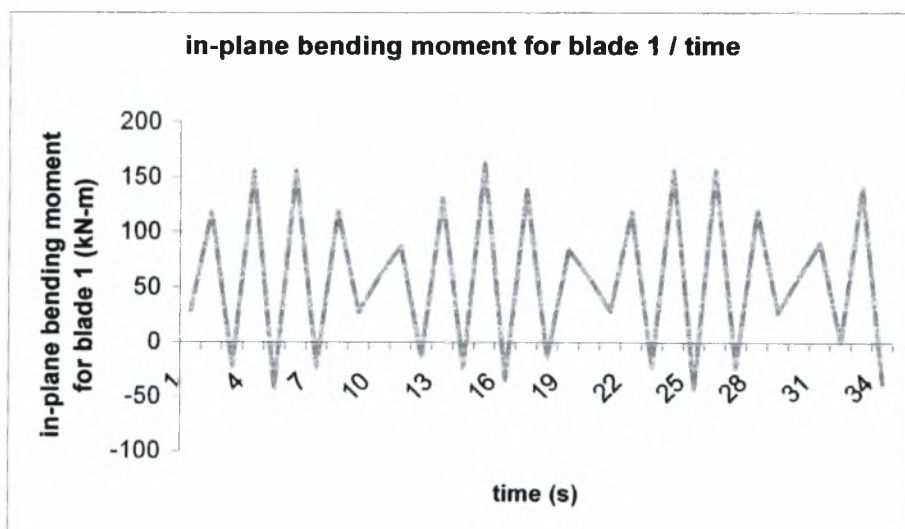
Γράφημα 61 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου περυγίου για ακραία ριπή ανέμου



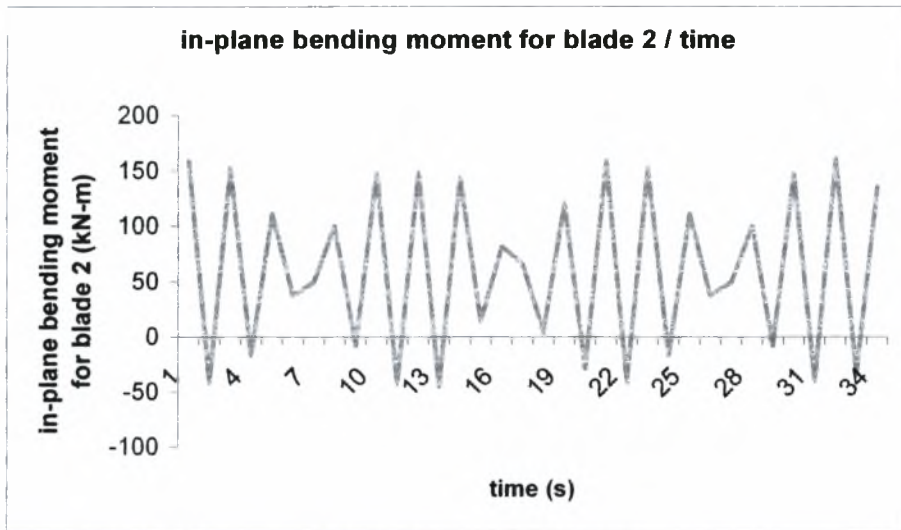
Γράφημα 62 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου περυγίου για ακραία ριπή ανέμου



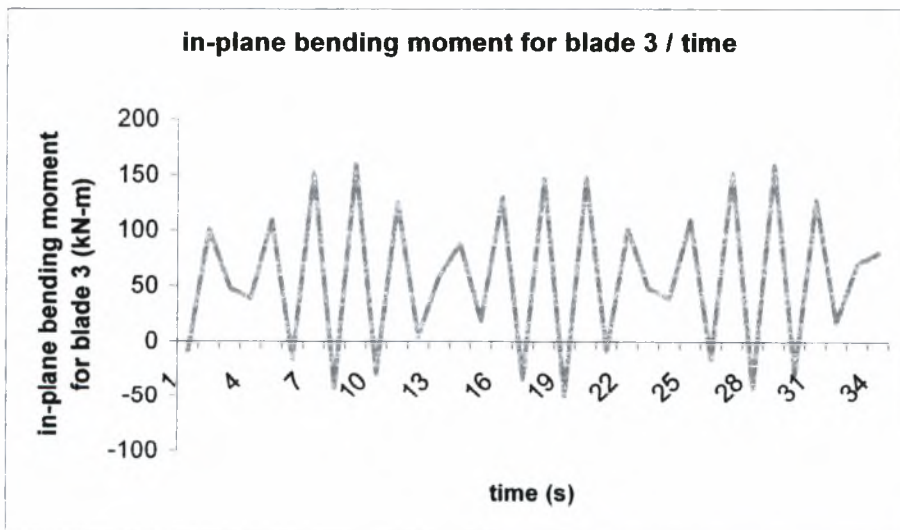
Γράφημα 63 - Καμπτική ροπή στη βάση του τριτοπτερυγίου για ακραία ριπή ανέμου



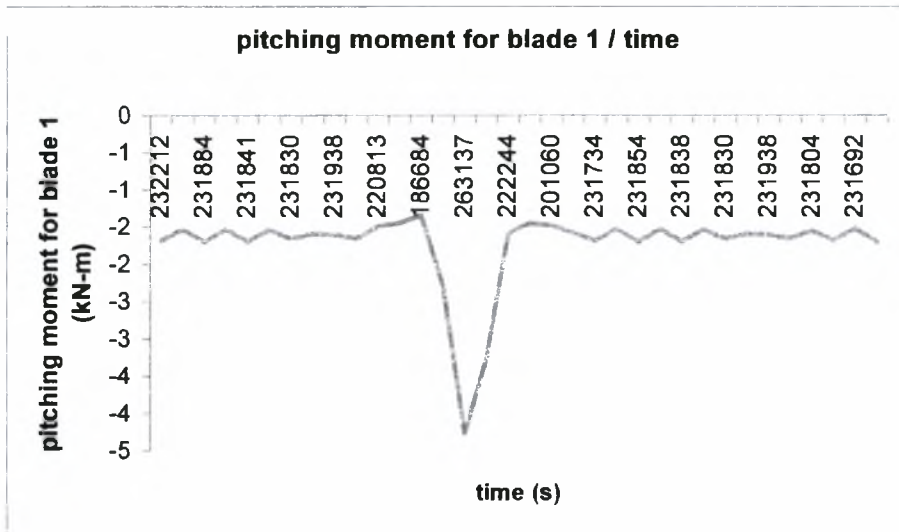
Γράφημα 64 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου



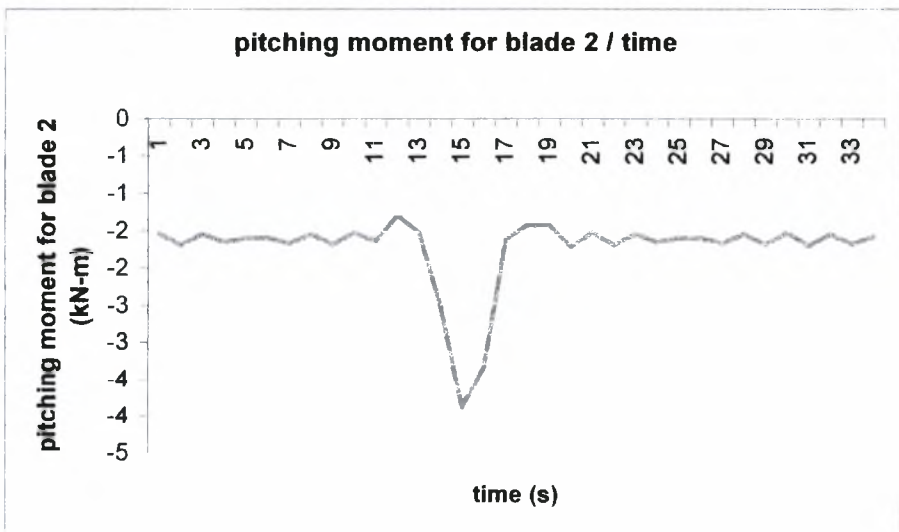
Γράφημα 65 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου



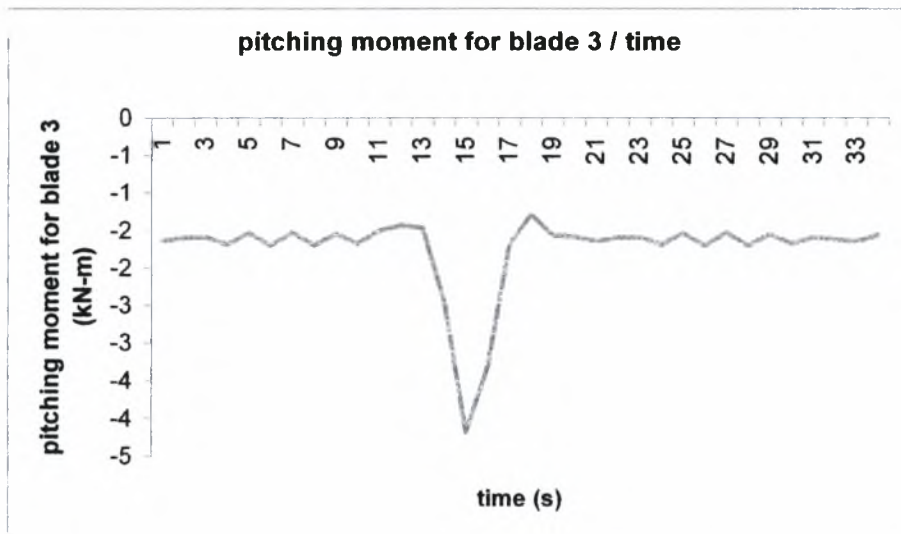
Γράφημα 66 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 67 - Ροπή στρέψης στο πρώτο περὶγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 68 - Ροπή στρέψης στο δεύτερο περὶγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου



Γράφημα 69 - Ροπή στρέψης στο τρίτο περβύγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του για ακραία ριπή ανέμου

Η ανάλυση της προηγούμενης ενότητας ισχύει και για αυτήν την περίπτωση του gust με λίγο πιο μειωμένα αποτελέσματα στις φορτίσεις.

Σε σχέση με τις κλίμακες μεγέθους οι καμπτικές ροπές είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τα άλλα είδη ροπών, όπως έχουμε είδη εξηγήσει.

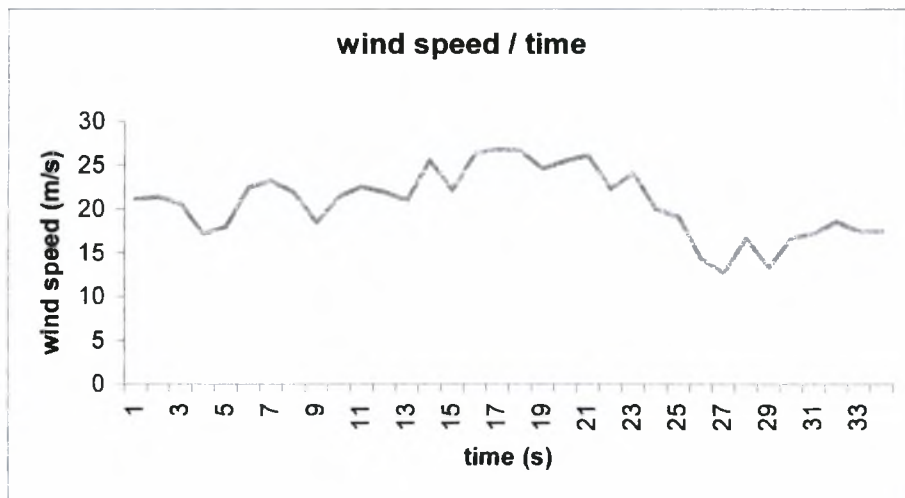
Γ) Τύρβη

Τα αποτελέσματα αφορούν τις δύο περιπτώσεις που έχουν μελετηθεί : αυτή με βάση την καθοριστική περιγραφή και αυτή με βάση την στοχαστική περιγραφή.

Γ1) Καθοριστική περιγραφή (deterministic description)

Η εφαρμογή της θεωρίας και η δημιουργία των full-field turbulence wind data files μας έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Η κατανομή της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου, που προέκυψε, φαίνεται παρακάτω :



Γράφημα 70 - Κατανομή της ταχύτητας στην περίπτωση καθοριστικού μοντέλου τυρβώδους ροής

Τιμή RMS (τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των ταχυτήτων) 20.7 m/s

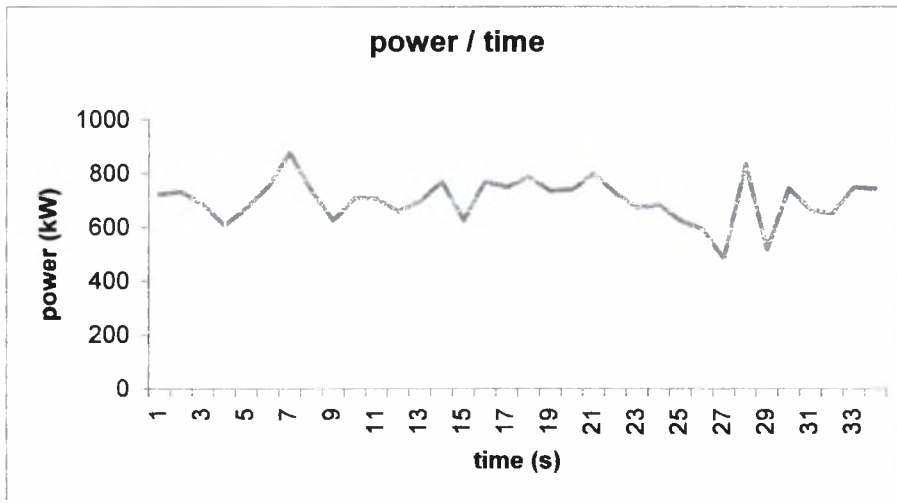
Μέγιστη τιμή 27 m/s

Μέση τιμή 20.7 m/s

Η φόρτιση λόγω τύρβης οφείλεται στην ατμοσφαιρική τύρβη που είναι μη ισοτροπική και ανομοιογενής.

Έτσι, όπως φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας παρουσιάζει πολλές διακυμάνσεις. Κατά συνέπεια όλα τα αποτελέσματα των φορτίσεων στην περίπτωση τυρβώδους ροής είναι μεταβαλλόμενα σε μεγάλη κλίμακα σε σχέση με το χρόνο.

Αυτά φαίνονται παρακάτω :

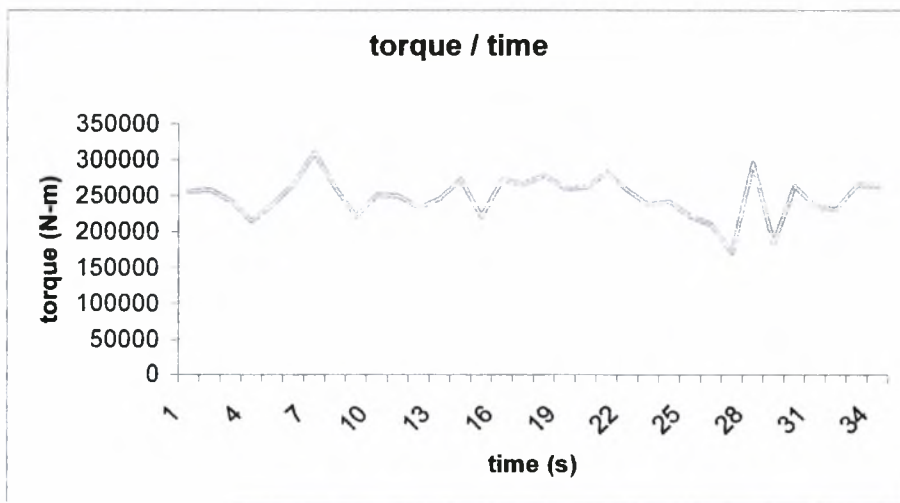


Γράφημα 71 - Αποδιδόμενη ισχύς στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 701 kW

Μέγιστη τιμή ισχύος 876 kW

Μέση τιμή 701 kW

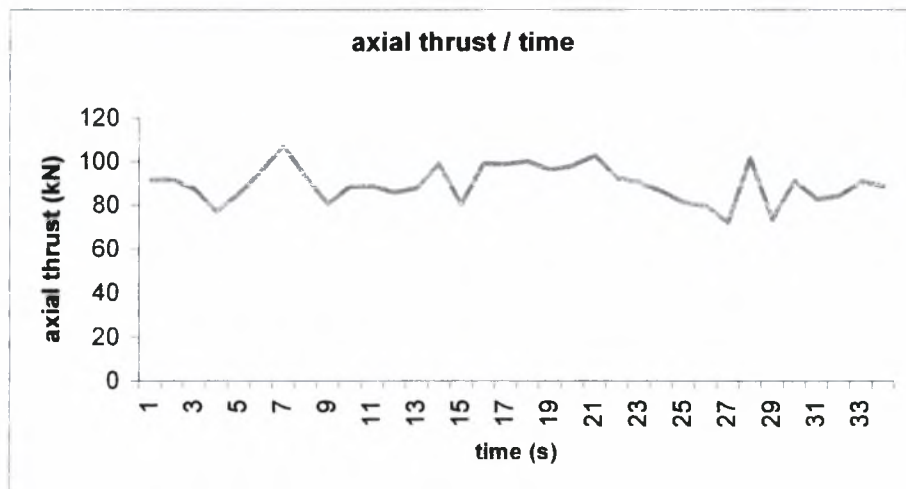


Γράφημα 72 - Ροπή στρέψης της περρωτής στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 248 kN.m

Μέγιστη τιμή ροπής στρέψης 310 kN.m

Μέση τιμή 248 kN.m

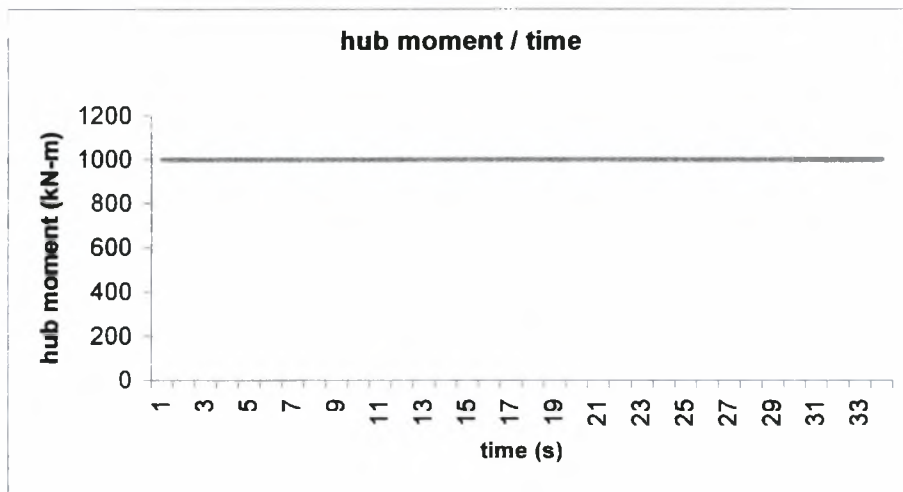


Γράφημα 73 - Αξονική φόρτιση της περσόνης στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 89.6 kN

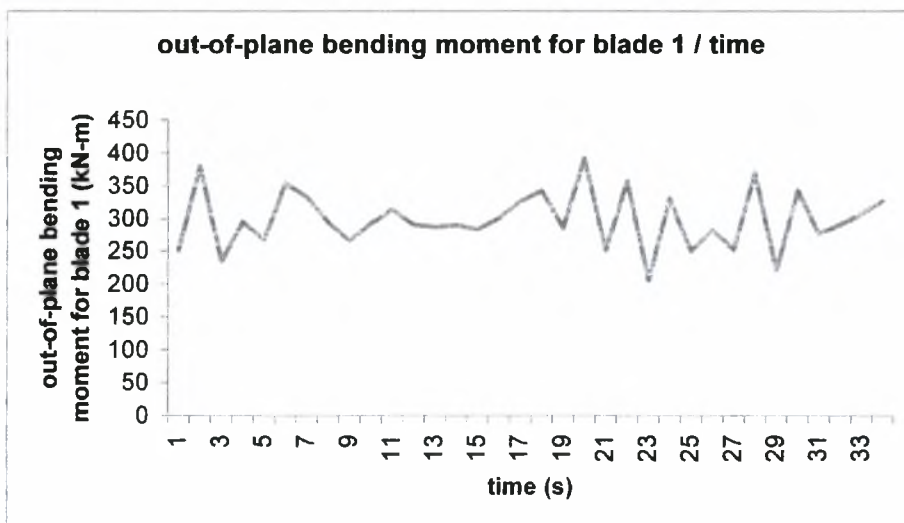
Μέγιστη τιμή αξονικής δύναμης 107 kN

Μέση τιμή 89.6 kN

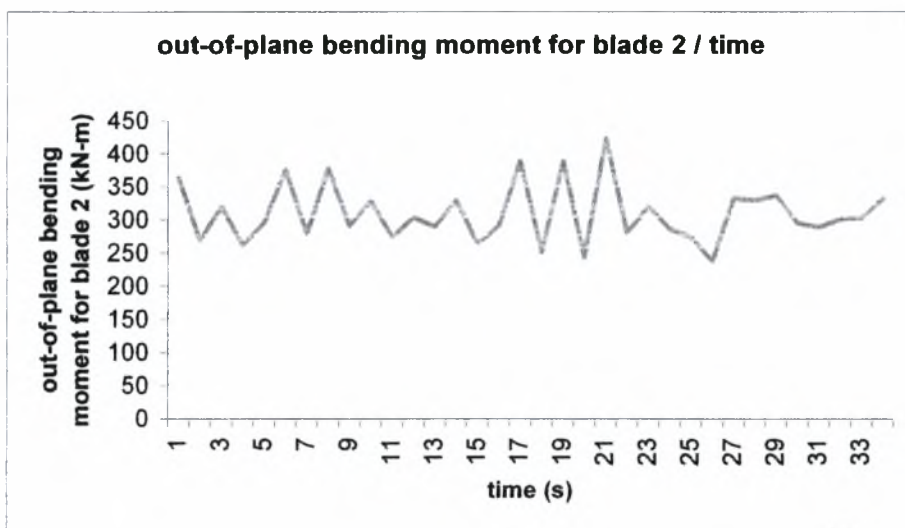


Γράφημα 74 - Συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

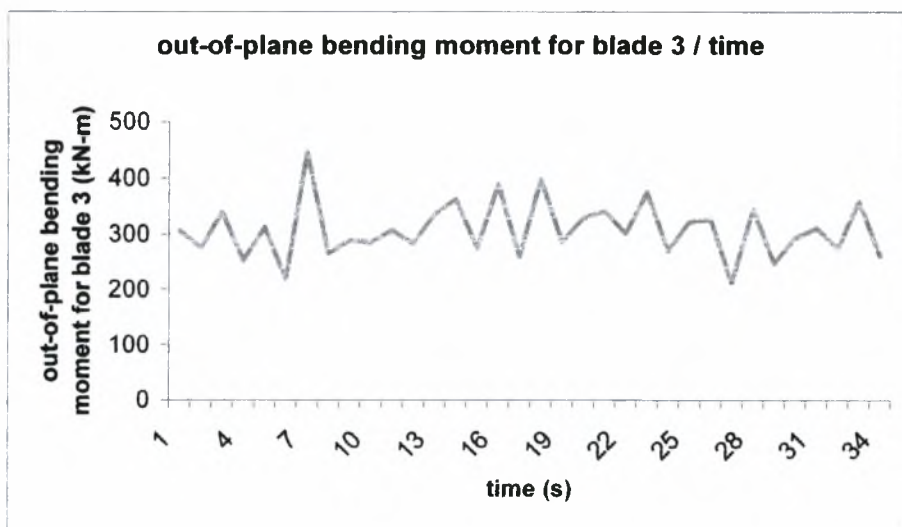
Η συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής παραμένει σταθερή στα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας αφού έχουμε ορίσει σταθερό μοντέλο πλήμνης στο πρόγραμμα.



Γράφημα 75 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου περηνιού στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 76 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

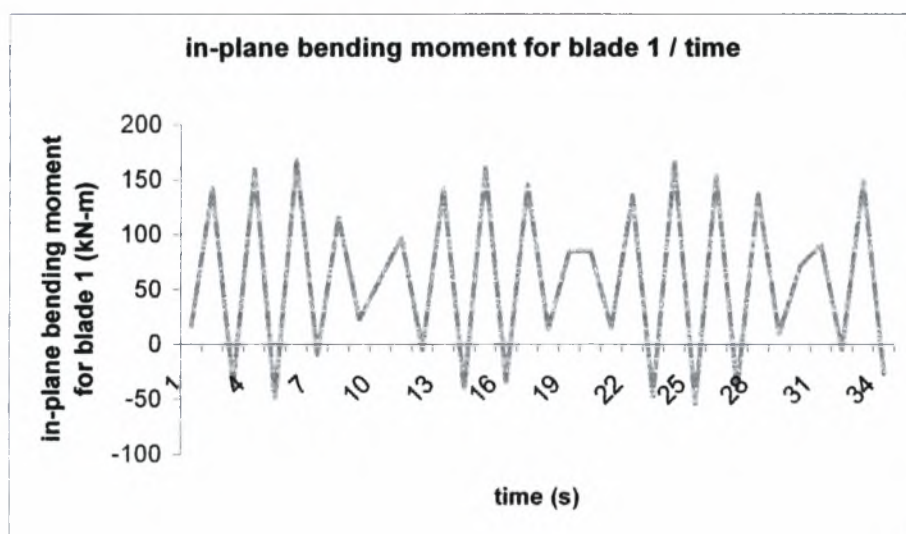


Γράφημα 77 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου πτερυγίου στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

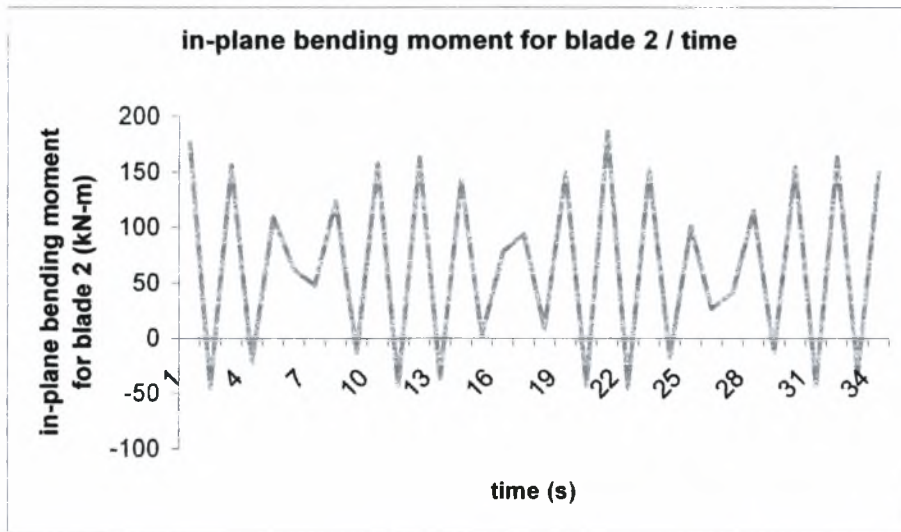
Τιμή RMS 305 kN.m

Μέγιστη τιμή καμπτικής ροπής 446 kN.m

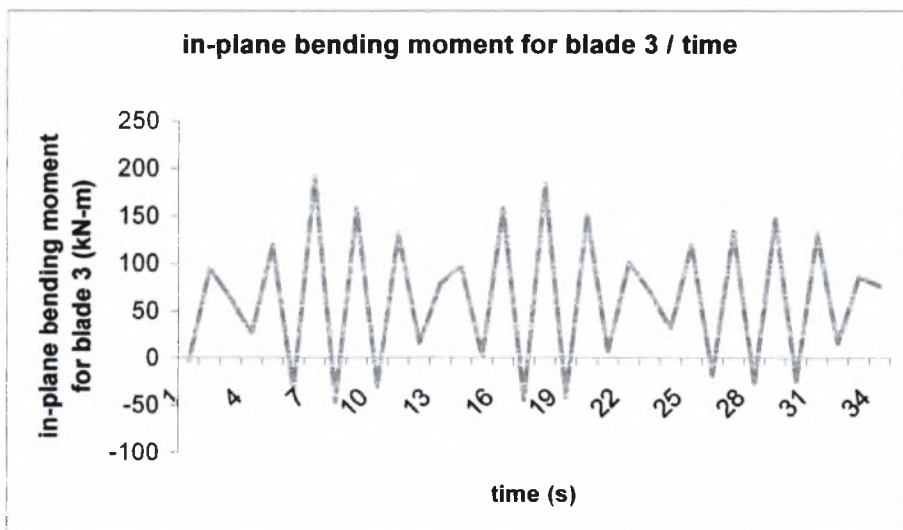
Μέση τιμή 305.6 kN.m



Γράφημα 78 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής, στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 79 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής , στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

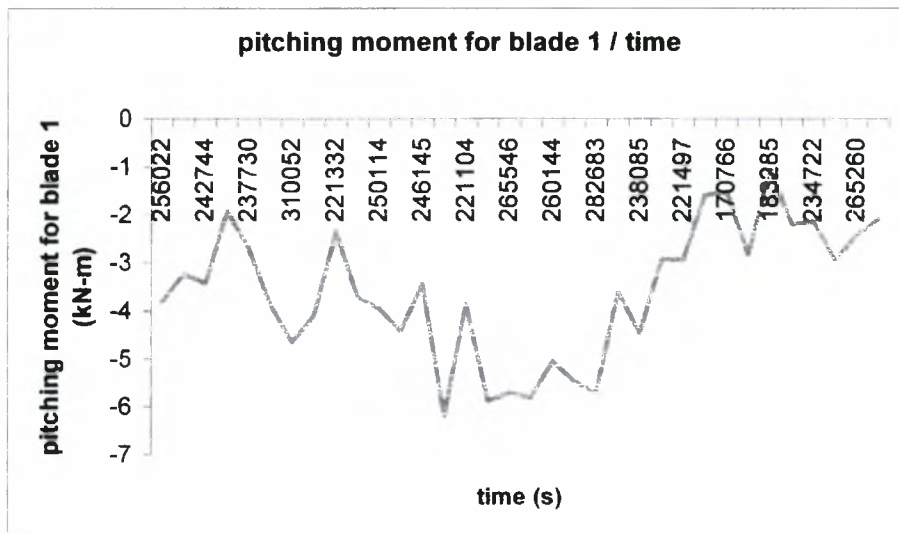


Γράφημα 80 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής , στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

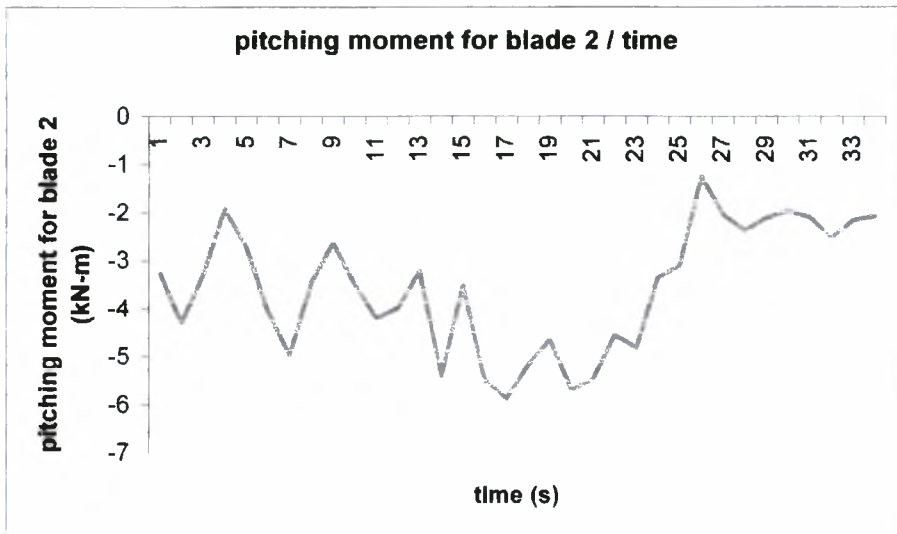
Τιμή RMS 61.9 kN.m

Μέγιστη τιμή καμπτικής ροπής που τείνει να περιστρέψει το πτερύγιο στον άξονα της μηχανής 191 kN.m

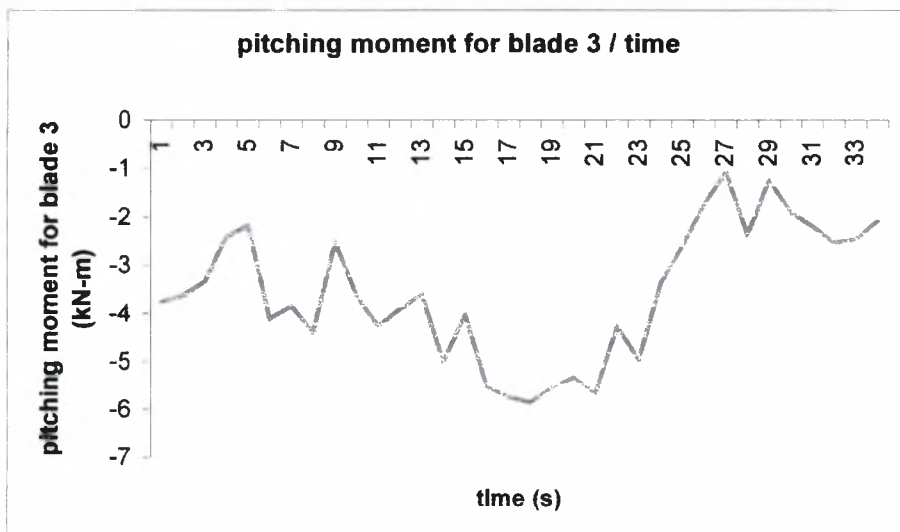
Μέση τιμή 61.9 kN.m



Γράφημα 81 - Ροπή στρέψης στο πρώτο πτερύγιο γύρω από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 82 - Ροπή στρέψης στο δεύτερο περύγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 83 - Ροπή στρέψης στο τρίτο περύγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση καθοριστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 3.56 kN.m

Μέγιστη τιμή ροπής στρέψης γύρω από το διαμήκη άξονα του πτερυγίου 6.19 kN.m

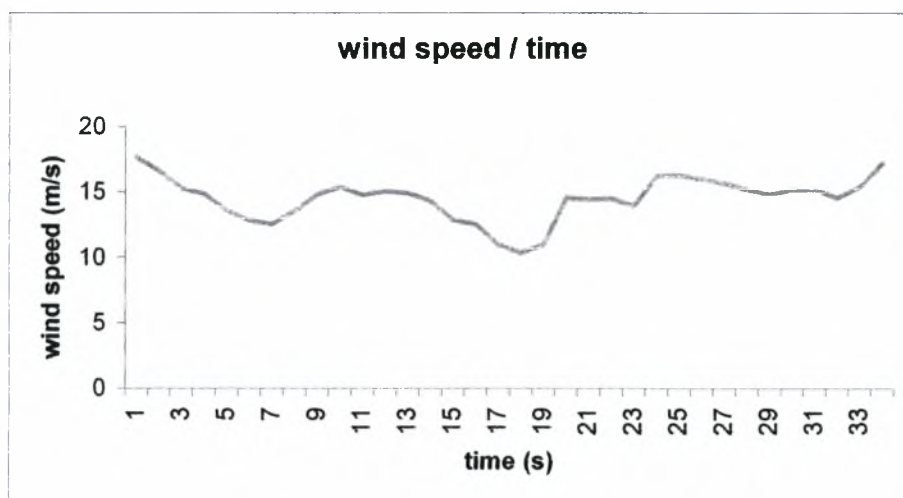
Μέση τιμή 3.56 kN.m

Σε σχέση με τις κλίμακες μεγέθους οι καμπτικές ροπές είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τα άλλα είδη ροπών, όπως έχουμε είδη εξηγήσει.

Γ1) Στοχαστική περιγραφή (stochastic description - Kaimal)

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η επίδραση όλων των συχνοτήτων της τήρβης στο πεδύγιο. Υποτίθεται μη ομοιόμορφη τήρβη (φάσμα τήρβης κατά Kaimal)

Το φάσμα των ταχυτήτων φαίνεται παρακάτω :



Γράφημα 84 - Κατανομή ταχυτήτων στη περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 14.5 m/s

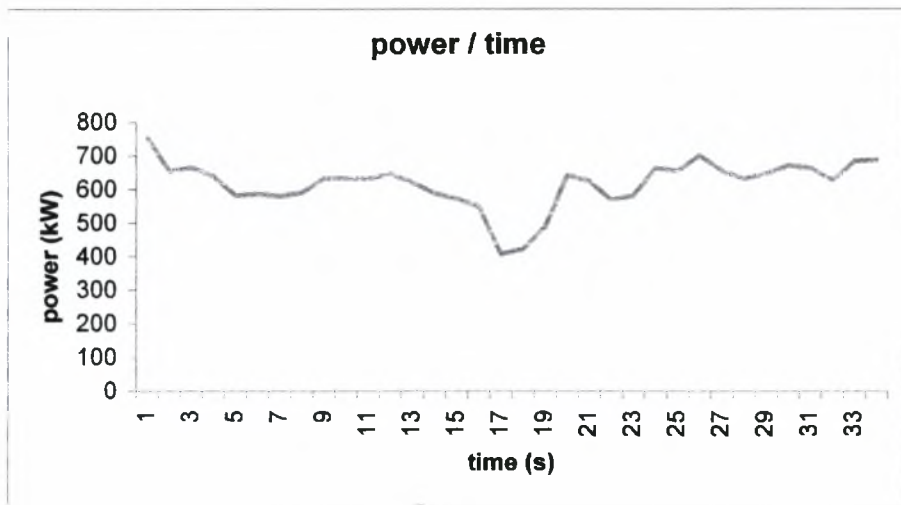
Μέγιστη τιμή ταχύτητας 17.6 m/s

Μέση τιμή 14.4 m/s

Όπως φαίνεται έχουμε μια πιθανολογική κατανομή ταχυτήτων ,όμως με λιγότερο απότομες αλλαγές απ'ότι στην περίπτωση της καθοριστικής περιγραφής.

Τα αποτελέσματα των φορτίσεων ακολουθούν και αυτά αυτή τη διασπορά των τιμών.

Φαίνονται παρακάτω :

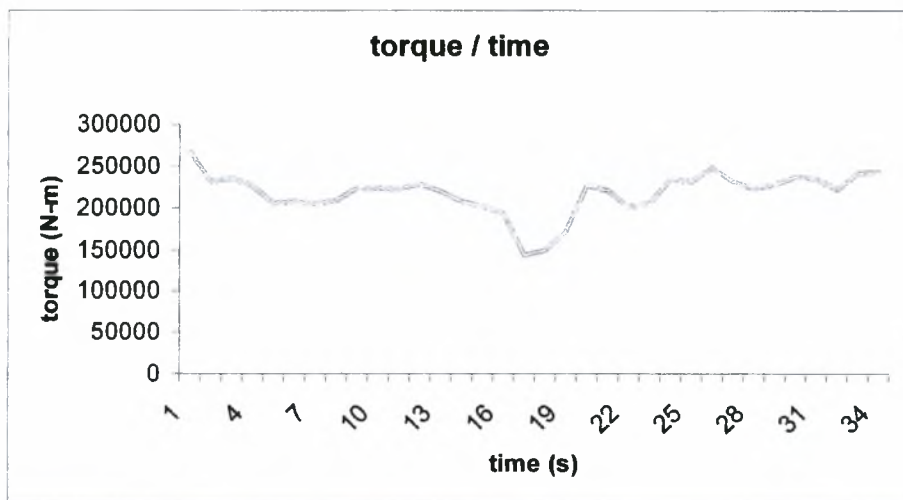


Γράφημα 85 - Αποδιδόμενη ισχύς για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 615 kW

Μέγιστη τιμή 700 kW

Μέση τιμή 615.5 kW

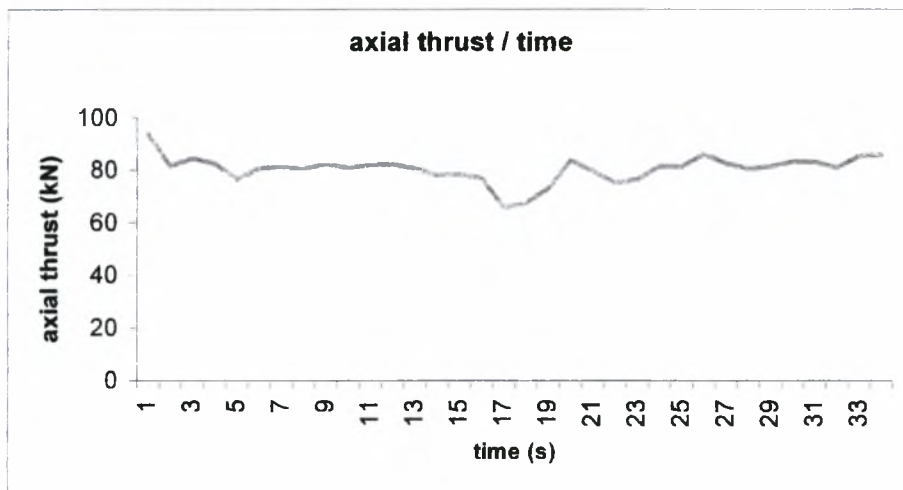


Γράφημα 86 – Ροπή στρέψης της πτερωτής για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 217 kN.m

Μέγιστη τιμή 247 kN.m

Μέση τιμή 217.5 kN.m

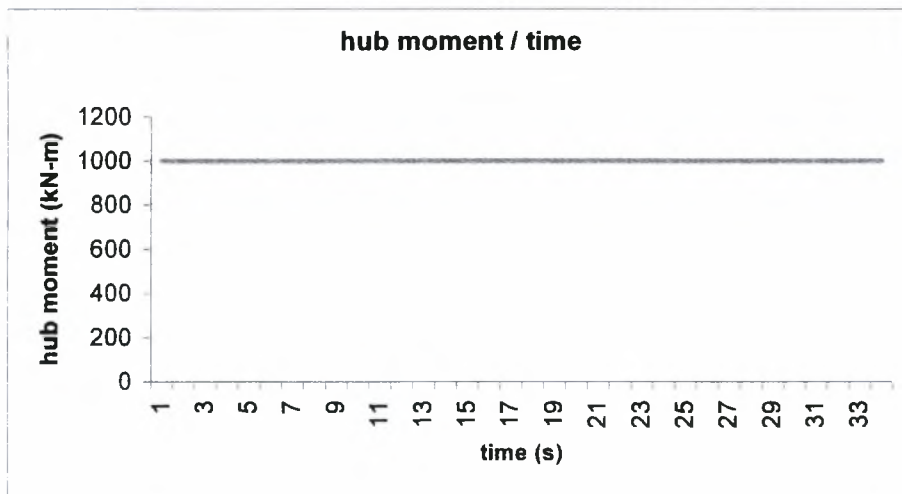


Γράφημα 87 - Αξονική φόρτιση της πτερωτής για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 80.4 kN

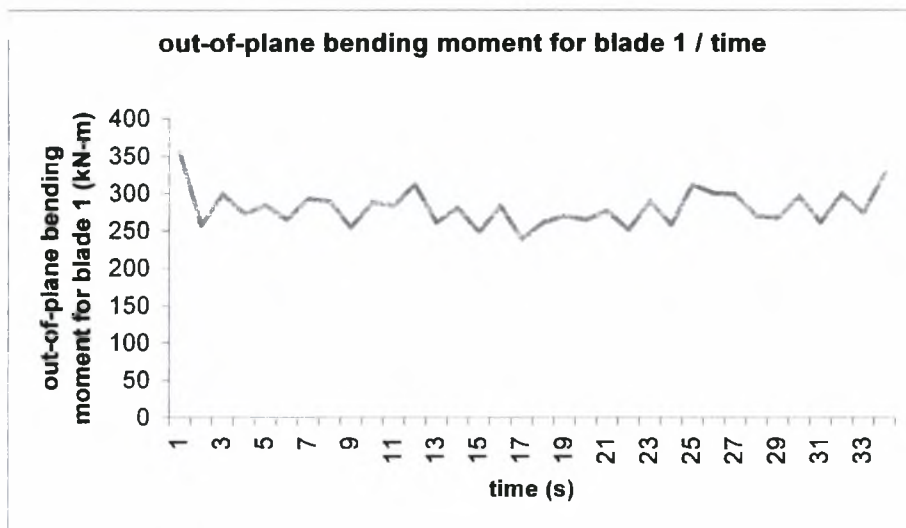
Μέγιστη τιμή 86.2 kN

Μέση τιμή 80.5 kN

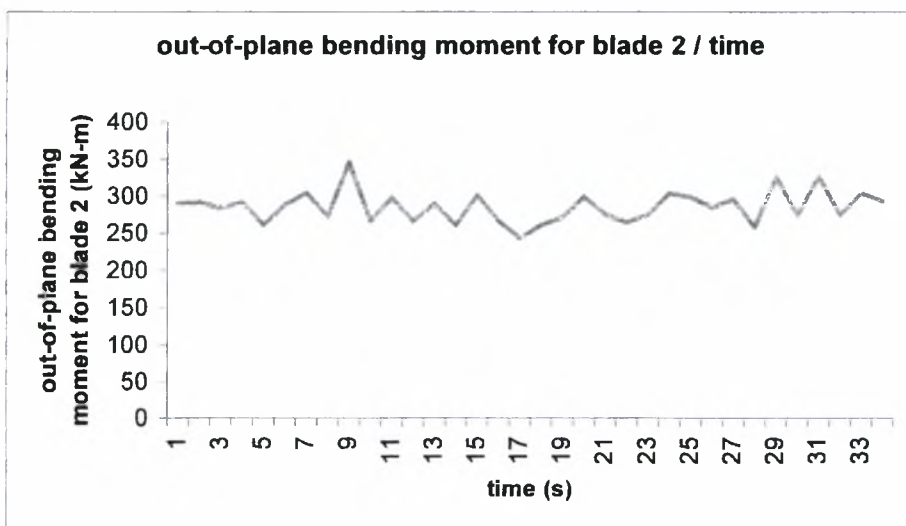


Γράφημα 88 - Συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

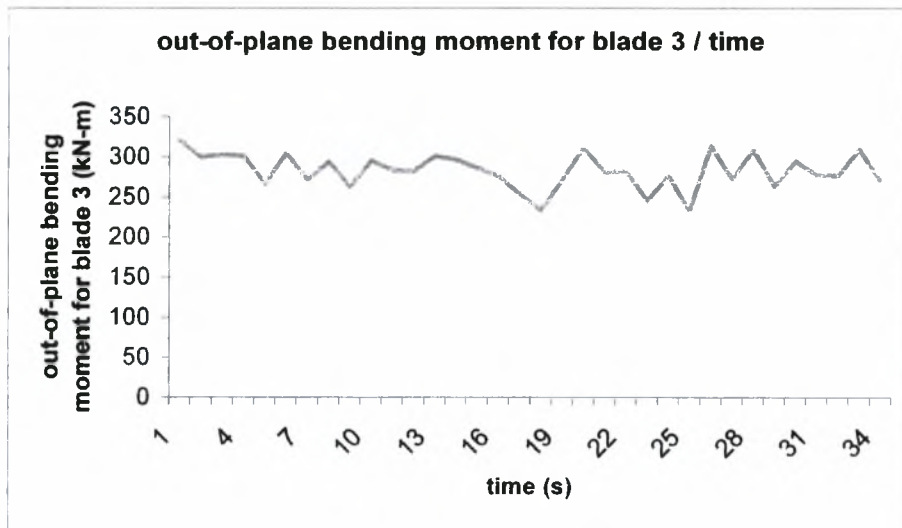
Η συνολική ροπή που ασκείται στην πλήμνη της πτερωτής παραμένει σταθερή στα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας αφού έχουμε ορίσει σταθερό μοντέλο πλήμνης στο πρόγραμμα.



Γράφημα 89 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου πτερυγίου για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 90 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου πτερυγίου για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

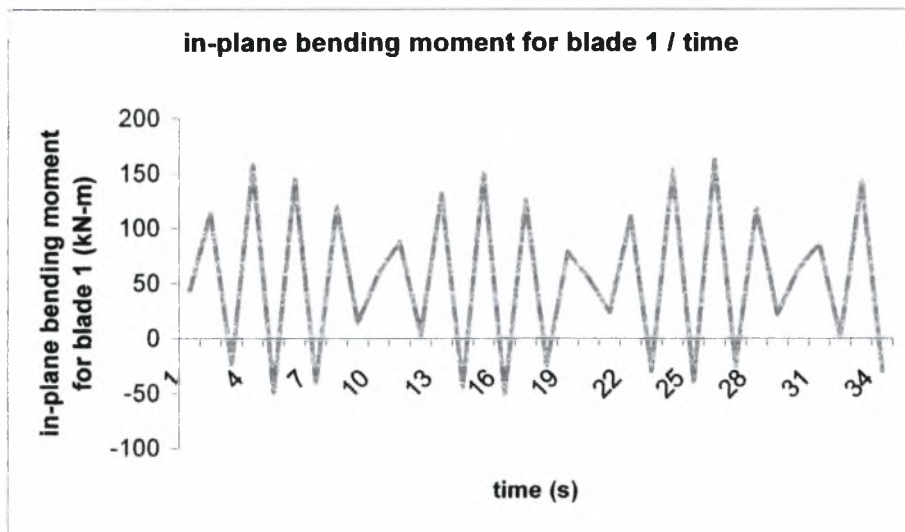


Γράφημα 91 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου περυγίου για την περίπτωση
στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

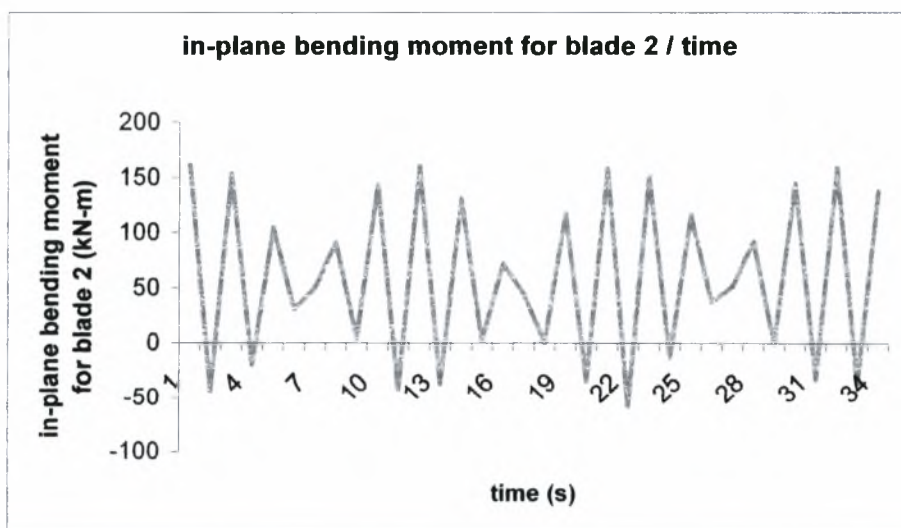
Τιμή RMS 283 kN.m

Μέγιστη τιμή ροής 353 kN.m

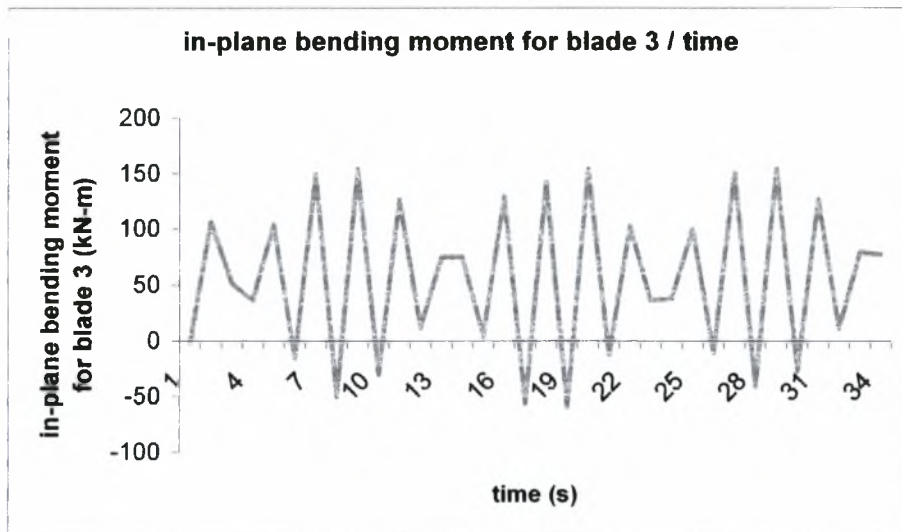
Μέση τιμή 283 kN.m



Γράφημα 92 - Καμπτική ροπή στη βάση του πρώτου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής , για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 93 - Καμπτική ροπή στη βάση του δεύτερου περυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής , για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

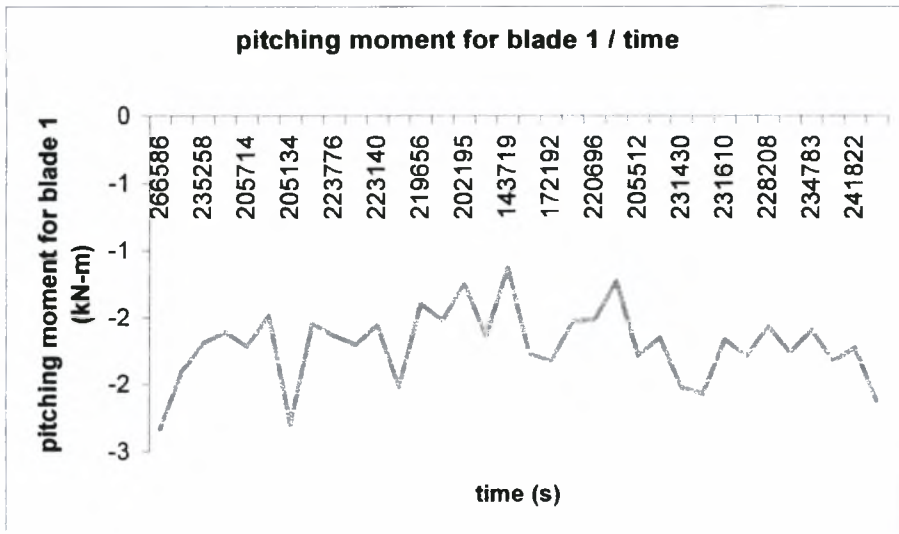


Γράφημα 94 - Καμπτική ροπή στη βάση του τρίτου πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής , για την περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

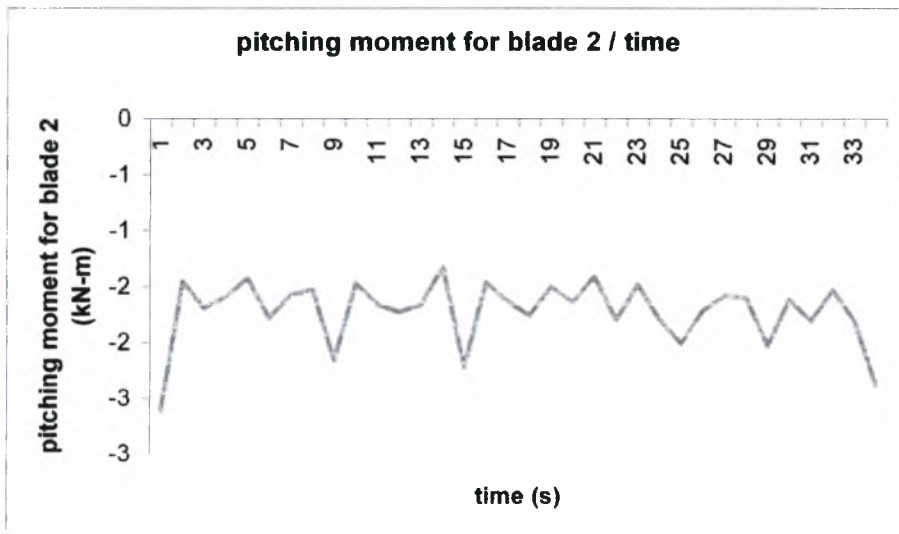
Τιμή RMS 55.7 kN.m

Μέγιστη τιμή ροπής 162 kN.m

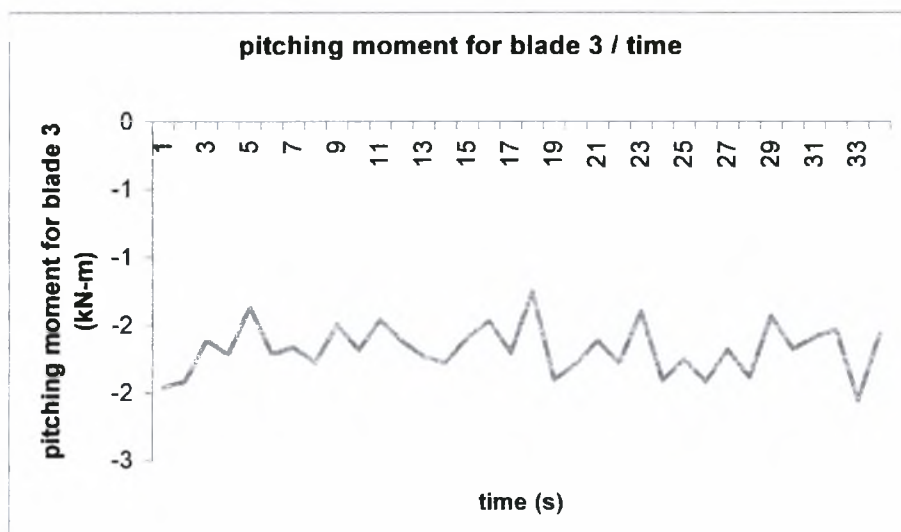
Μέση τιμή 55.7 kN.m



Γράφημα 95 - Ροπή στρέψης στο πρώτο περὶγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 96 - Ροπή στρέψης στο δεύτερο περὶγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής



Γράφημα 97 - Ροπή στρέψης στο τρίτο περύγιο γύρο από το διαμήκη άξονά του , στην περίπτωση στοχαστικής περιγραφής τυρβώδους ροής

Τιμή RMS 1.7 kN.m

Μέγιστη τιμή ροπής 2.6 kN.m

Μέση τιμή 1.7 kN.m

Σε σχέση με τις κλίμακες μεγέθους οι καμπτικές ροπές είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με τα άλλα είδη ροπών, όπως έχουμε είδη εξηγήσει.

Παραλαμβανόμενη ενέργεια σε ένα έτος

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για την συνολική ετήσια αποδιδόμενη ενέργεια της υπό μελέτης ανεμογεννήτριας.

Συνδέοντας την καμπύλη ισχύος που έχει υπολογιστεί με τα ανεμολογικά στοιχεία έχουμε :

Η ετήσια αποδιδόμενη ετήσια ενέργεια E_y προκύπτει από την ολοκλήρωση της καμπύλης ισχύος $P(U)$:

$$E_y = 8760 \int_{U_1}^{U_2} P(U) f(U) dU \quad \text{KWhrs}$$

όπου το U είναι σε m/s , η ισχύς P σε KW και η πυκνότητα πιθανότητας (PDF) του ανέμου f σε s/m . Τα U_1 και U_2 είναι τα όρια λειτουργίας της Α/Γ (cut in , cut out speed). Η μέθοδος έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4.

Η ολοκλήρωση της κλασικής καμπύλης ισχύος $P(U)$ της ανεμογεννήτριας με $U_1 = 3 \text{ m/s}$ και $U_2 = 25 \text{ m/s}$ δίνει σαν αποτέλεσμα :

$$E_y = 2.018 \text{ GWh}$$

Αυτή η τιμή θεωρείται ένα ικανοποιητικό ποσό ενέργειας σε σχέση με τα στοιχεία της περιοχής (η μέση ταχύτητα του ανέμου \bar{U} είναι $\bar{U} = \int U f(U) dU$ και ευρίσκεται ίση με 7.88 m/s (χαρακτηρισμός περιοχής "Ανεμώδης").

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Γενικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας

Οι αεροδυναμικοί υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν μέσω του υπολογιστικού μοντέλου YawDyn κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικοί. Η εκτίμηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας ήταν πολύ ακριβής σε σχέση με το διάγραμμα ισχύος των πειραματικών δεδομένων για τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Στις ειδικές συνθήκες ροής αποτιμήθηκαν αρκετά ρεαλιστικά τα αποτελέσματα των διαφόρων ειδών των φορτίσεων στα κύρια σημεία της ανεμογεννήτριας. Γενικά, οι ακραίες ριπές ανέμου προκάλεσαν μικρές αλλά υπολογίσιμες αυξήσεις στα μεγέθη της φόρτισης και ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις ροπές στρέψης γύρω από το διαμήκη άξονα του περιγύου, οι οποίες εκτιμήθηκαν ως ιδιαίτερα αυξημένες σε μεταβαλλόμενη ροή ανέμου.

Η συγκεκριμένη μελέτη δίνει δυνατότητες για περαιτέρω έρευνα του θέματος κυρίως στον τομέα της μελέτης άλλων μορφών ασταθών κατανομών ταχύτητας ανέμου όπως η αλλαγή κατευθύνσεων και άλλα είδη συναρτήσεων, εκτός από αυτά που μελετήθηκαν. Μία επιπρόσθετη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι αυτή της μελέτης των φορτίσεων με τη βοήθεια αεροελαστικού κώδικα για την εκτίμηση της αντοχής σε επίπεδο υλικών της ανεμογεννήτριας.

Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία , Πίνακας συμβόλων

Βιβλιογραφία

- [1] Σταπουντζής F., 2002. Σημειώσεις Εφαρμοσμένης Αεροδυναμικής. ΠΘ-TMMB
- [2] Anders Bjorck ,2000 ,Aerforce – Suroutine package for unsteady Blade Element /Momentum calculations
- [3] Introduction to Wind Turbine Techmology , 2001, University of Newcastle
- [4] Rotors for Wind Power, P.T. Smulders , 2004, University of Technology, Eindhoven
- [5] Lakshmi N. Samkar , 1991, Combined Blade Element Nomentum Theory, Georgia Tech
- [6] A. Fillipone ,Computational Models for Rotor Aerodynamics ,2001,
- [7] Earl P.N. Duque ,Wayne Johnson ,Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads, 2000, AIAA 0038
- [8] Marshall L. Buhl,Jr. ,Alan D. Wright και James L. Tangler ,1998 ,Wind Turbine Design Codes ; a preliminary comparison of the aerodynamics

- [9] David J. Laino, A. Graig Hansen, 2002 ,User's guide to the wind turbine aerodynamics computer program AeroDyn ,Windward Engineering
- [10] David J. Laino, A. Graig Hansen, 2002 ,User's guide to the wind turbine aerodynamics computer program YawDyn ,Windward Engineering

Πίνακας Συμβόλων

- r** απόσταση από τον άξονα περιστροφής της πτερωτής (m)
- U** ταχύτητα ανέμου (m/s)
- ω** συχνότητα περιστροφής (περιστροφική ταχύτητα) (rpm)
- w** σχετική ταχύτητα (m/s)
- k** προσδιοριστέος συντελεστής της ταχύτητας U
- h** προσδιοριστέος συντελεστής της ταχύτητας $\omega \cdot r$
- α** γωνία προσβολής της αεροτομής (μοίρες)
- c** μήκος χορδής αεροτομής (m)
- f** κλίση χορδής αεροτομής
- dI** στοιχειώδης δύναμη άνωσης (N)
- dD** στοιχειώδης δύναμη αντίστασης (N)

- B** αριθμός περιγίων ανεμογεννήτριας
- $n(r)$** τοπικός βαθμός απόδοσης
- $n_{ολ}$** ολικός βαθμός απόδοσης
- C_L** συντελεστής άνωσης (ή ανύψωσης)
- C_D** συντελεστής αντίστασης
- F** αξονική ώθηση (N)
- T** ροπή στρέψης (N.m)
- P** ισχύς (W)
- C_F** συντελεστής αξονικής ώθησης
- C_T** συντελεστής ροπής στρέψης
- f** συχνότητα τύρβης
- σ** συνιστώσα μέσης ταχύτητας τύρβης (m/s)
- L** κλίμακα τύρβης (m)
- D** διάμετρος περωτής (m)
- R** ακτίνα περωτής (m)
- ϕ** αεροδυναμική γωνία συστροφής (μοίρες)
- F_N** κάθετη δύναμη σε blade element (N)
- F_T** αξονική δύναμη σε blade element (N)
- M_P** ροπή στρέψης σε blade element (N)
- I** ένταση τύρβης

- U_{ref} ταχύτητα αναφοράς (m/s)
- U_{hub} ταχύτητα στο ύψος της πλήμνης (m/s)
- $S(f)$ φάσμα της τύρβης (Hz)
- T διάρκεια ριπής ανέμου (sec)
- E_y ετήσια αποδιδόμενη ενέργεια (Whrs)
- $f(U)$ πυκνότητα πιθανότητας διάρκειας ανέμου
- $F(U)$ καμπύλη διάρκειας ανέμου
- M_B καμπτική ροπή στη βάση πτερυγίου (N.m)
- M_E καμπτική ροπή στη βάση πτερυγίου που τείνει να το περιστρέψει στον άξονα της μηχανής (N.m)
- C_M αεροδυναμικός συντελεστής ροπής
- M_M ροπή στρέψης γύρω από το διαμήκη άξονα του πτερυγίου (N.m)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074163

