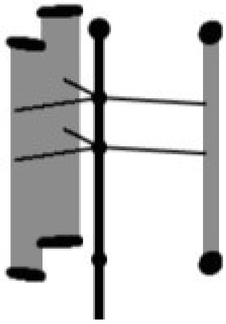
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΣΤΗΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: ΙΔΙΟΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΑΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ & ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΟΝΟΜΑ:ΚΕΒΟΡΚ

ΕΠΩΝΥΜΟ:ΤΟΡΟΣΙΑΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Β.ΡΙΖΙΩΤΗΣ

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2019-2020

Αφιερώνω την διπλωματική στην οικογένεια μου.

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου στην σχολή των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου πολυτεχνείου στο αντικείμενο της υπολογιστικής μηχανικής, κατά την περίοδο 2019-2020.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι ο η ιδιοδιανυσματική ανάλυση ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα με χρήση υπολογιστικού ελαστοδυναμικού κώδικα που βασίζεται στην τεχνική των πολλαπλών σωμάτων (multi-body) και των πεπερασμένων στοιχείων.

Για την διεκπεραίωση αυτής της εργασίας συνέβαλαν αρκετά άτομα τα οποία με βοήθησαν και με ενέπνευσαν. Πρώτον θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή Βασίλη Ριζιώτη για την καθοδήγηση του. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον διδακτορικό Νίκο Σπυρόπουλο, για την πλήρη υποστήριξη κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με με στήριξε καθ όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η εξαγωγή αποτελεσμάτων από την μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα με την μέθοδο πολλαπλών σωμάτων (multi-body) και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι παραπάνω μέθοδοι προγραμματίστηκαν σε κώδικα FORTRAN 90. Στην υλοποίηση του κώδικα σύμβαλε και ο γράφων. Για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων του νέου αυτού κώδικα πραγματοποιήθηκε ιδιοδιανυσματική ανάλυση σε διάφορους τύπους ανεμογεννητριών (τόσο οριζοντίου όσο και καθέτου άξονα) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ήδη πιστοποιημένων υπολογιστικών εργαλείων.

Ο κώδικας υλοποιεί τη δυναμική μοντελοποίηση στηριζόμενος στη μέθοδο των πολλαπλών σωμάτων, όπου όλα τα εύκαμπτα σώματα θεωρούνται ως ανεξάρτητες μεταξύ τους γραμμικοποιημένες δοκοί, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω κατάλληλων κινηματικών και δυναμικών εξισώσεων στα άκρα τους. Η μοντελοποίηση των δοκών έγινε σύμφωνα με τη θεωρία του Timochenko [13].

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1.Γενικές πληροφορίες για Α/Γ κατακορύφου άξονα

Με την αύξηση της ζήτησης για πιο βιώσιμη παγκόσμια ενέργεια, η αιολική ενέργεια αναδύεται ως μια από τις πιο οικονομικές εναλλακτικές σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην αρχή η εγκατάσταση αιολικής ενέργειας κέρδισε προσοχή σε χερσαίο πλαίσιο μόνο. Μεγάλες οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριες (HAWTs) έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί στο να αναπτυχθούν αιολικά πάρκα που παράγουν MW ενέργειας. Ωστόσο, λόγω των χαμηλών ταχυτήτων άνεμου, μικρών αριθμών εν δυνάμει αιολικών περιοχών και οπτικών επιπτώσεων στην στεριά, η παράκτια αιολική αγορά γρήγορα κέρδισε έδαφος. Πρόσφατα, η εγκατάσταση μεγάλων πάρκων αιολικής ενέργειας στην Βόρεια θάλασσα και στην Βαλτική ανοίγει δυνατότητες για παραγωγή ηλεκτρισμού και ανάπτυξη υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Επί του παρόντος το κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση παρακτίων ανεμογεννητριών είναι υψηλότερο από την εγκατάσταση αυτών στην στεριά και αυτό θεωρείται εμπόδιο για την αύξηση επενδύσεων στην παράκτια αιολική ενέργεια. Ένα σημαντικό βήμα για να ξεπεραστεί αυτό είναι να σχεδιαστούν πιο αξιόπιστες και πιο αποδοτικές ανεμογεννήτριες για παράκτια χρήση. Πρόσφατα, νέοι σχεδιασμοί ανεμογεννητριών προτείνονται για να αντιμετωπιστεί αυτό το θέμα. Μαζί με τις οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτριες έχουν γίνει δημοφιλείς και οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα.

Υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες ανεμογεννητριών οι κάθετου άξονα και οι οριζοντίου άξονα.

Οι καθέτου άξονα ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από το ότι μπορούν να αξιοποιήσουν τον άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις και δεν χρειάζονται μηχανισμούς στροφής για να ευθυγραμμιστούν με τον άνεμο. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, με αυτόν τον τρόπο είναι εύκολα προσβάσιμες. Ένα μειονέκτημα τους είναι ότι δεν είναι αυτό-εκκινούμενες.[2]

Οι οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτριες είναι τυπικά πιο αποδοτικές στο να μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρισμό από τις κάθετου άξονα. Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος αεροκινητήρα είναι στην ιδανικότερη των περιπτώσεων περίπου 59%, γνωστό και ως όριο του Betz [1]. Ο βαθμός απόδοσης που χαρακτηρίζει τους αεροκινητήρες και που ονομάζεται συντελεστής ισχύος ορίζεται ως

$$C_P = \frac{P}{1/2\,\rho V^3 A} \qquad \textit{(Σχέση 1.1)}$$

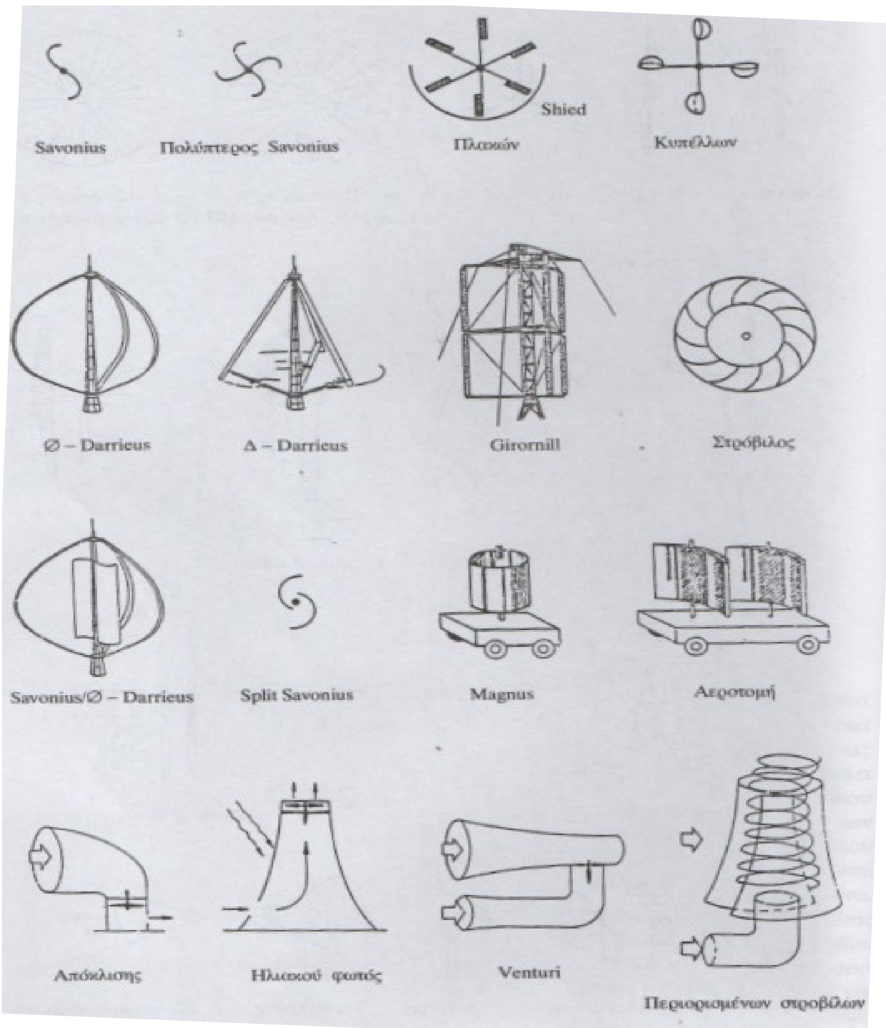
όπου P η ισχύς που αποδίδεται από τον άνεμο-κινητήρα ως προς την ισχύ που έχει ο άνεμος ταχυτάτας V και που περνάει από τον άνεμο-κινητήρα μετωπικής επιφάνειας A (ρ πυκνότητα του αέρα).

Για αυτό τον λόγο έχουν επικρατήσει στην εμπορική ωφέλιμου-μεγέθους αιολικής ενέργειας αγορά. Ωστόσο οι μικρές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα ταιριάζουν πιο πολύ στις αστικές περιοχές καθώς έχουν χαμηλό επίπεδο ήχου λόγω χαμηλότερης συχνότητας περιστροφής.

Αναμένεται να αυξηθεί η χρήση των καθέτου άξονα ανεμογεννητριών λόγω της απλότητας του σχεδιασμού τους. Έχει αναγνωριστεί ότι, παρότι λιγότερο αποδοτικές, οι καθέτου άξονα ανεμογεννήτριες δεν υποφέρουν από τα συνεχόμενα μεταβλητά βαρυτηκά φορτία που περιορίζουν το μέγεθος των οριζοντίου άξονα ανεμογεννητριών.

Υπάρχουν διάφοροι σχεδιασμοί ανεμογεννητριών καθέτου άξονα. Στη πραγματικότητα υπάρχουν αποδείξεις ύπαρξης ανεμογεννητριών καθέτου άξονα,που μπορούν να εντοπιστούν αιώνες πίσω πριν από των πιο συνηθισμένων οριζοντίου άξονα σχεδιάσεων.

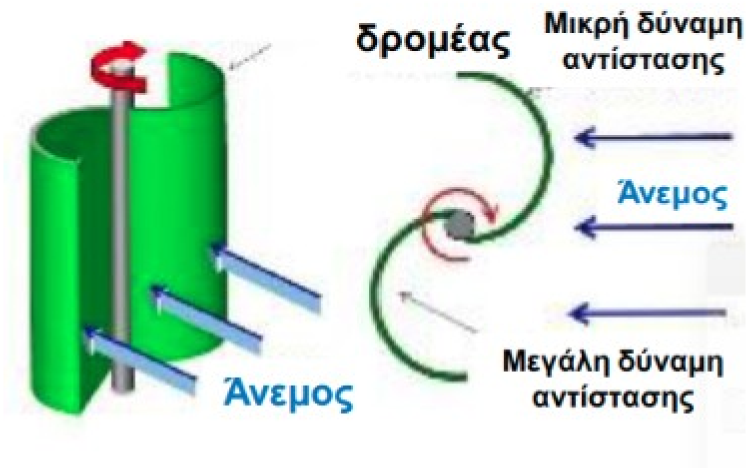
Οι κυριότεροι σχεδιασμοί φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.1: Τύποι ανεμογεννητριών καθέτου άξονα.[1]

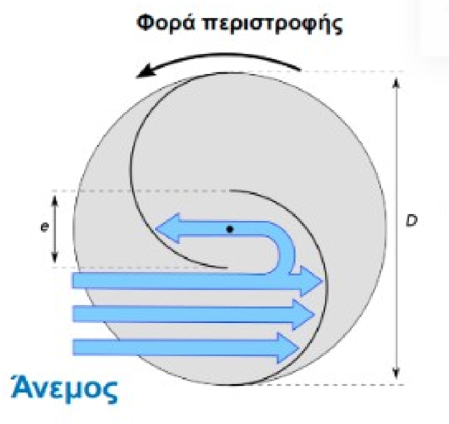
1.2.Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius

Όσον αφορά την ανεμογεννήτρια τύπου Savonius είναι μια κάθετη μηχανή η οποία χρησιμοποιεί ένα δρομέα που εισήχθη από τον Φιλανδό μηχανικό S. J. Savonius στο 1922. Πρόκειται για μία πολύ απλή ανεμογεννήτρια που λειτουργεί με βάση την αντίσταση, αφού αποτελείται από τα δύο μισά ενός κυλίνδρου τοποθετημένα σε αντίθετες κατευθύνσεις, σε σχήμα S πάνω στον ίδιο κατακόρυφο άξονα περιστροφής. Λόγω της καμπυλότητας, το πτερύγιο συναντά μικρότερη αντίσταση όταν περιστρέφεται ενάντια στον αέρα, παρά όταν περιστρέφεται με αυτόν.



Σχήμα 1.2: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonious.

Στην ανεμογεννήτρια Savonius η περιστροφή του δρομέα δεν οφείλεται μόνο στη διαφορά του συντελεστή αντίστασης του κοίλου και του κυρτού πτερυγίου αλλά και στο διάκενο, χάρις στο οποίο ο αέρας περνάει μέσα από αυτό και αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας έτσι τη ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα.



Σχήμα 1.3: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonious (Λειτουργία διακένου)

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα

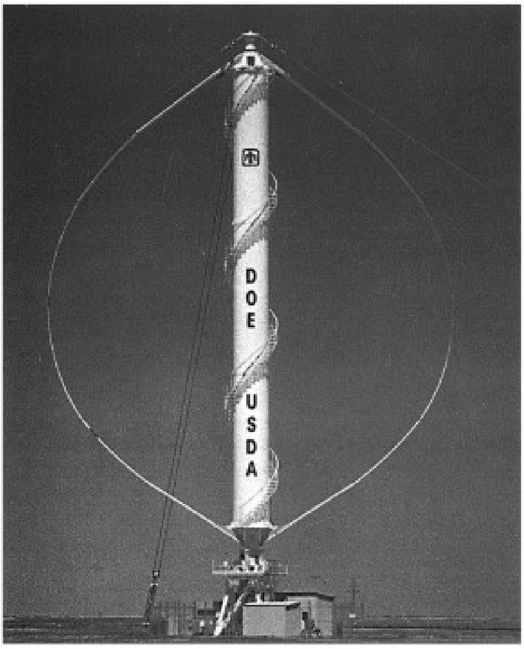
- Η λειτουργία της είναι ανεξάρτητη από την διεύθυνση του άνεμου.
- Ικανοποιητική λειτουργία ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες .
- Χαμηλά επίπεδα θορύβου,ευκολία στην κατασκευή της και σχετικά μικρού μεγέθους.

Μειονεκτήματα

- Παρόλο που οι τυπικές τιμές του μέγιστου συντελεστή απόδοσης κυμαίνονται στο 30% με 45% για άλλες ανεμογεννήτριες, στη Savonius περιορίζονται μόλις στο 25%.
- Λόγω χαμηλής ηλεκτροπαραγωγής βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις π.χ. οικιακή χρήση.

1.3.Ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus

Όσον αφορά την ανεμογεννήτρια Darrieus αυτή εφευρέθηκε το 1931 από τον Γάλλο George J. M. Darrieus. Πρόκειται για μία ανεμογεννήτρια που λειτουργεί από τη δυναμική άνωση. Η αρχή της λειτουργίας του εξαρτάται από το γεγονός ότι η ταχύτητα των πτερυγίων της είναι εξαρτημένη της ταχύτητας του άνεμου που έχει ως αποτέλεσμα έναν φαινόμενο άνεμο καθ' όλη την περιστροφή ερχόμενου μετωπικά με μόνο μια ελαχίστη απόκλιση στην γωνία. Ο αέρας που περνά από τα πτερύγια δημιουργεί αεροδυναμική άνωση, λόγω της γωνίας προσβολής που αντικρίζουν σε σχέση με τη ροή, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε περιστροφή. Η γωνία πρόσπτωσης η οποία μεταβάλλεται σε μια περιστροφή από περίπου-20 σε +20 μοίρες ,για γωνίες μεγαλύτερες από 20 deg η ροή αποκολλάται με αποτέλεσμα τη σημαντικά μειωμένη απόδοση.. Ένα πρόβλημα είναι η συνεχής αλλαγή της γωνίας προσβολής που δημιουργεί κυκλική φόρτιση στα πτερύγια και δυσχεραίνει το σχεδιασμό τους, ωστόσο δεν επηρεάζει την κίνηση, αφού και σε αρνητικές γωνίες προσβολής η κινητήρια δύναμη είναι προς την κατεύθυνση περιστροφής. Επίσης, αρνητικός παράγοντας είναι η δυσκολία στην αυτοεκκίνηση της ανεμογεννήτριας. Παρόλο αυτά η έλλειψη συστήματος έλεγχου στο να κατευθύνει τον ρότορα προς τον αέρα αντισταθμίζει αυτό το μειονέκτημα.



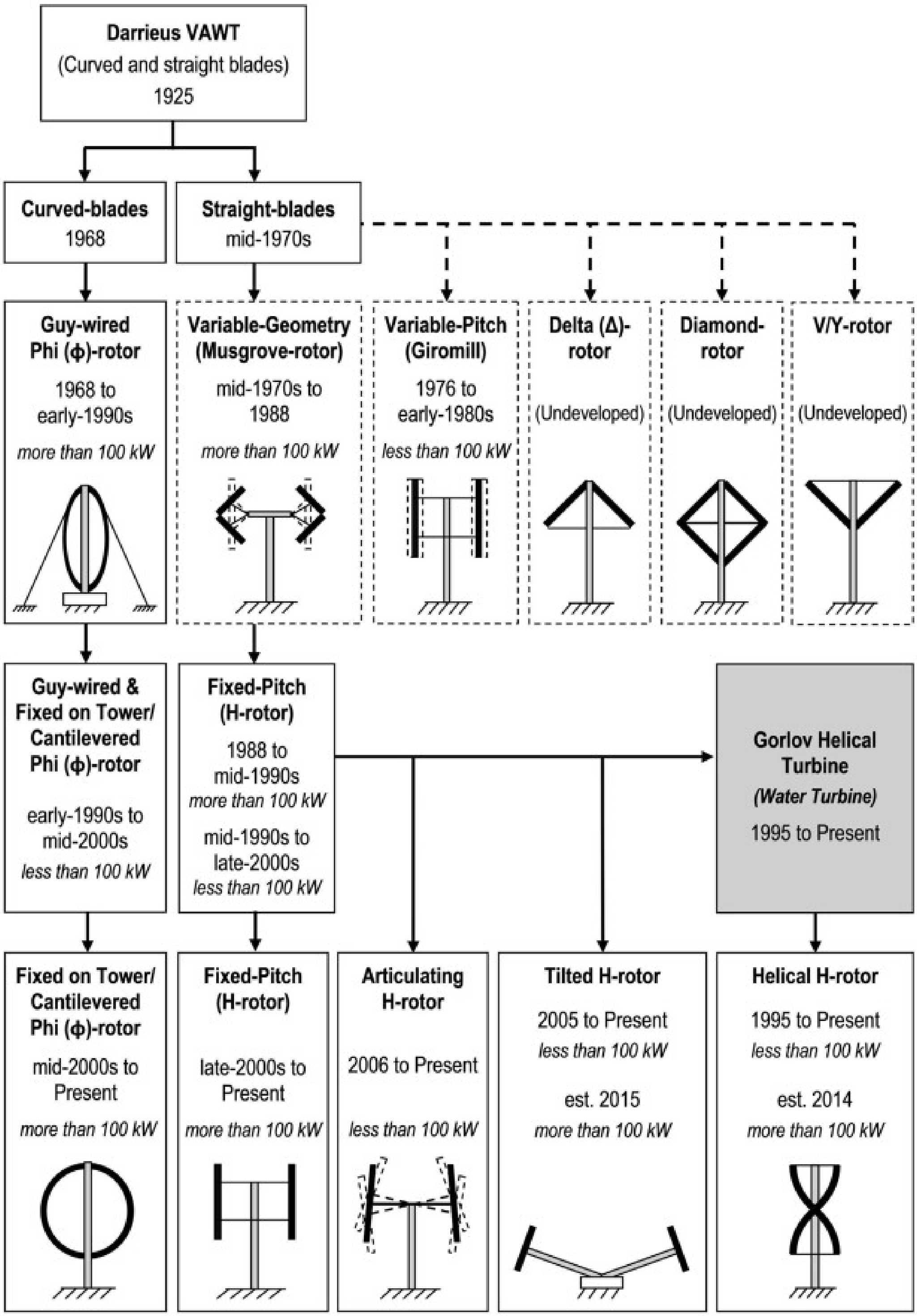
Σχήμα 1.4: Ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus.

Η αρχιτεκτονική της ανεμογεννήτριας Darrieus ενώ παράγει μειωμένη ισχύ σε σχέση με τις κοινές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, από την άλλη παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι:

- Καλύτερη αισθητική λόγω της τρισδιάστατης μορφής που επιτρέπει τον ρότορα να λειτουργήσει μέσα σε αστικό περιβάλλον.
- Δεν υπάρχει η ανάγκη να προσανατολίζεται προς τη διεύθυνση του ανέμου, άρα και καλύτερη απόδοση .
- Χαμηλότερα επίπεδα ηχορύπανσης λόγω της σχετικά χαμηλής γραμμικής ταχύτητας στα πτερύγια λόγω περιστροφής, καθιστώντας έτσι τον ρότορα ιδανικό για εγκατάσταση σε κατοικημένες περιοχές.
- Μικρότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις HAWTs λόγω απλούστερης γεωμετρίας των πτερυγίων.
- Πιθανή εγκατάσταση της γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων στο έδαφος, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη επίβλεψη και συντήρηση του.

Ο P. J. Musgrove στο 1975 έκανε έρευνα στο Reading University στο Ηνωμένο Βασίλειο της οποίας σκοπός ήταν στο να γίνει η προσπάθεια εξορθολογισμού της γεωμετρίας με χρήση ευθύγραμμων και όχι καμπύλων πτερυγίων.. Αυτό οδήγησε στον σχεδιασμό ίσιων πτερυγίων κάθετου άξονα ανεμογεννήτρια σχεδιασμένη με Η τύπου πτερύγια-δρομέα διάταξη.

Εκείνη την εποχή θεωρήθηκε ότι μια απλή Η τύπου διάταξη μπορούσε, σε υψηλές ταχύτητες άνεμου να αναπτύξει υπερβολική ταχύτητα και να γίνει ασταθής. Προτάθηκε λοιπόν ένας μηχανισμός που θα αλλάζει την διάταξη των πτερυγίων σε υψηλούς ανέμους σε σχήμα διπλού βέλους. Από την έρευνα που έγινε στο Ηνωμένο Βασίλειο κατά την διάρκεια 1970-1980 απεδείχθη ότι οι περίπλοκοι μηχανισμοί που χρησιμοποιηθήκαν για να αναδιατάξουν τα πτερύγια ήταν αχρείαστοι. Η οπισθέλκουσα που δημιουργείται από το πτερύγιο που αφήνει την ροή του αέρα θα περιορίσει την ταχύτητα του απέναντι πτερυγίου στην ροή του αέρα που μπορούσε να ωθήσει όλη την διάταξη πτερυγίων μπρος. Η σταθερή ευθεία πτερύγωση ,δηλαδή η διάταξης τύπου Η ήταν επομένως αυτορυθμιζόμενη σε όλες της ταχύτητες ανέμου φτάνοντας την βέλτιστη περιστροφική ταχύτητα νωρίς μετά τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Υπάρχουν μερικές εταιρίες που κατασκευάζουν τύπου Η-δρομέα ανεμογεννήτριες από την δεκαετία του 80. Ωστόσο οι σχεδιασμοί ανεμογεννητριών είχαν στόχο εξειδικευμένες περιοχές στην μικρή αγορά ανεμογεννητριών .Λόγω των μικρότερων και πιο προβλέψιμων φορτίων τάσεων στα πτερύγια των καθέτου άξονα ανεμογεννητριών, είναι ο ιδανικός τύπος μηχανής για μεγάλου μεγέθους παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το δυναμικό προς χρησιμοποίηση σε οικονομικά πολυ-μεγαβάτ παραγωγή ηλεκτρισμού δεν έχει ακόμη εκμεταλλευτεί. Αυτό είναι λόγω των νωριτέρων σχεδιαστικών αποτυχιών και μερικώς λόγω της ελαφρώς λιγότερης απόδοσης πτερυγίων.



Σχήμα 1.5: Χρονοδιάγραμμα

τύπου Darrieus και διάφορες διατάξεις.

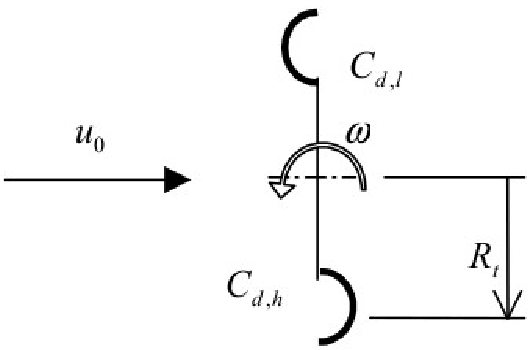
1.4.Υβριδικός τύπος ανεμογεννήτριας

Ένας άλλος τύπος ανεμογεννήτριας είναι ο υβριδικός όπως ο Ropotec. Ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από μέρη αεροτομής όπως του φτερού του αεροπλάνου. Ένα κεντρικό πάνελ μεταξύ των φτερών αναφερόμενο ως πλάτη χελώνας δρα σαν διαχύτης και κατευθύνει την ροή του αέρα προς τα φτερά, γυρίζοντας τον δρομέα του αέρα σε χαμηλή ταχύτητα ανέμου.

Σχήμα 1.6:Ανεμογεννήτρια τύπου Ropotec.

1.5.Ανεμογεννήτρια τύπου κυπέλλου

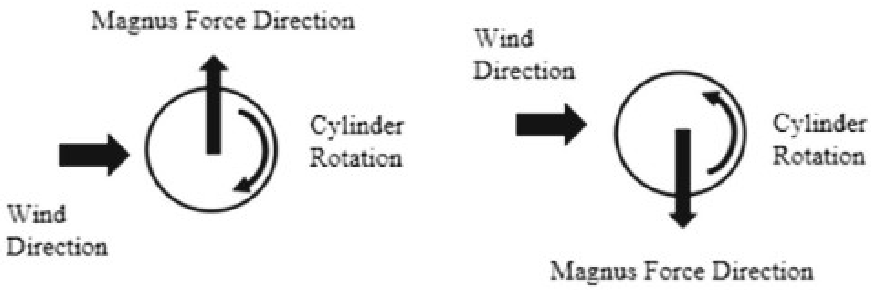
Ένα άλλο είδος ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα είναι η ανεμογεννήτρια κυπέλου η οποία είναι τύπου δράσεως, δηλαδή δεν έχει σχήμα αεροτομής για να παράγει ως αντίδραση άνωση η εικόνα 1.7 δείχνει ένα παράδειγμα δρομέα δράσεως που αποτελείται από κύπελλα. Το κύπελλο με την σφαιρική υπήνεμη μεριά έχει την λιγότερη οπισθέλκουσα από τα δυο κύπελλα. Έτσι αυτό το κύπελλο διαλύει ενέργεια καθώς κατευθύνεται προς τον άνεμο,ενώ το άλλο κύπελλο που κατευθύνεται προσήνεμα παράγει ενέργεια. Είναι χαρακτηριστικό λοιπόν στον δρομέας δράσεως ότι η ενέργεια παράγεται με το σώμα που κατευθύνεται προσήνεμα.



Σχήμα 1.7:Ανεμογεννήτρια τύπου κυπέλλου.

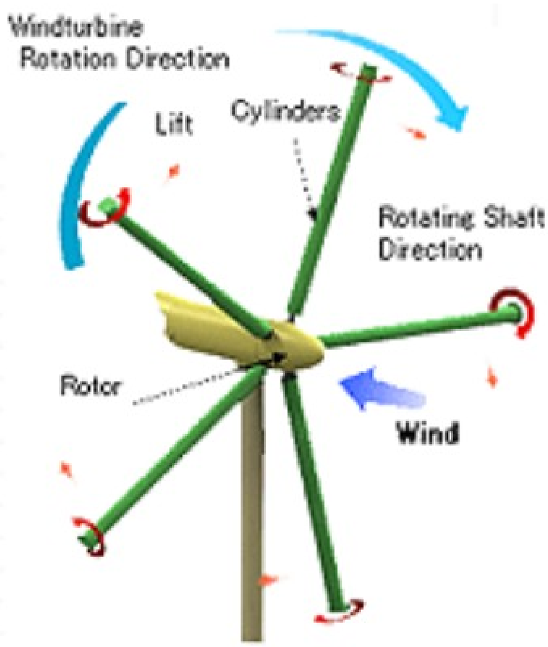
1.6.Ανεμογεννήτρια τύπου Magnus

Μια άλλου είδους ανεμογεννήτρια είναι αυτή μου εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Magnus αυτό περιγράφεται ως εξής. Όταν ένας στρεφόμενος κύλινδρος τοποθετείται σε αντικριστή ροή αέρα, διαφορά πιέσεως δημιουργείται γύρο από τον κύλινδρο ,έτσι προκύπτει η δύναμη magnus κάθετα στην ροή του αέρα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8: Φαινόμενο Magnus.

Αν τοποθετηθούν σε διάταξη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα ή κάθετου άξονα αρκετοί κύλινδροι μπορούν να γυρίσουν με το φαινόμενο αυτό και έτσι παράγεται αρκετή ροπή ώστε να περιστρέψουν ένα δρομέα και με αυτόν τον τρόπο και την ανεμογεννήτρια. Η ανεμογεννήτρια τύπου Magnus μπορεί να εκτεθεί σε εύρος άνεμου από 2 m/sec σε ταχύτητες θύελλας.



Σχήμα 1.9:Ανεμογεννήτρια τύπου Magnus οριζοντίου άξονα.

.

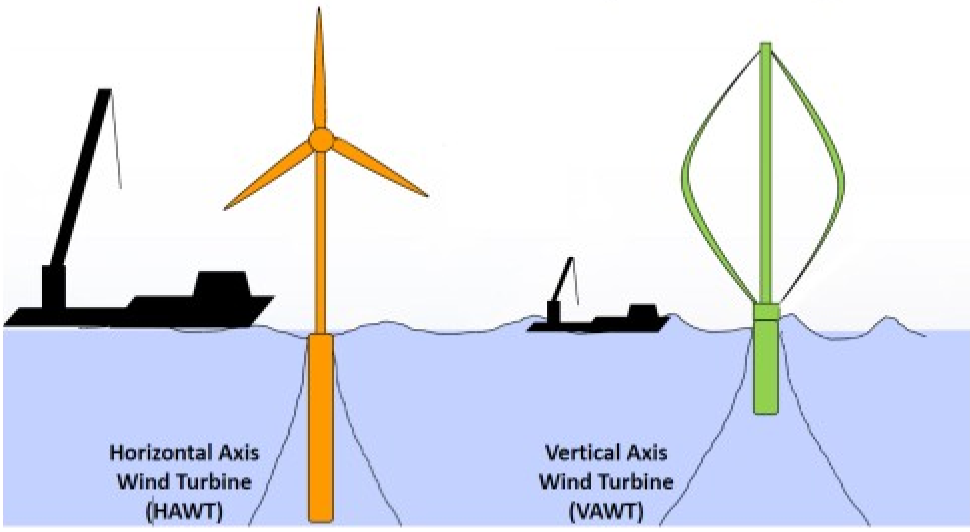
1.7.Ανεμογεννήτρια τύπου H

Έρευνα για τον H τύπου δρομέα στο University of Reading, UK άρχισε το 1975 ηγούμενο από τον Peter Musgrove μαζι με τον μαθητή του Ian Mays,ο Musgrove επικύρωσε τη νέα ιδέα για ρύθμιση της υπερταχύτητας των H-τύπου δρομέων και την εφεκτικότητα για όλων των μεγαβάτ ανεμογεννητριών. Το αρχικό σχεδιαστικό και αναπτυξιακό έργο των VAWT πραγματοποιήθηκε από μια κοινοπραξία που περιλαμβάνει το British Aerospace Aircraft Group (Bristol),το Taylor Woodrow Construction Ltd. Και το Reading University .H μεγαλύτερη Musgrove ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε στο Reading University είναι 3 μέτρα σε διάμετρο .Η μεταβλητής γεωμετρίας δυο-πτερυγίων ανεμογεννήτρια παρήγαγε ισχύ 130kW στα 11 m/s. Η διάμετρος του δρομέα είναι 25 μέτρα και σαρωτικού εμβαδού των 450 τετραγωνικών μέτρων. Η γεννήτρια και τα συστήματα μετάδοσης είναι εφαρμοσμένα στο έδαφος. Η ανεμογεννήτρια είναι εξοπλισμένη με αυτόματο σύστημα reefing που διπλώνει τα πτερύγια, παίρνοντας το σχήμα διπλής κεφαλής βέλους και αποδοτικά μειώνοντας το σαρωτικό εμβαδό εάν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από 30m/s. Η ανεμογεννήτρια σε αυτή την κατάσταση φαίνεται στο σχήμα1.10.

Σχήμα 1.10: Ανεμογεννήτρια μεταβλητού σχήματος.

Όμως έπειτα στο 1988, δεδομένα που συλλέχθηκαν από 200 αισθητήρες σε περίοδο 2 χρόνων έδειξαν πως αυτό το σύστημα είναι αναπαραίτητα περίπλοκο καθώς ο έλεγχος της ισχύος επιτεύχθηκε τότε αυτόματα από το φυσικό παθητικό stallin(απώλεια στήριξης) των πτερυγώσεων, ακόμα και σε δυνατούς ανέμους με τα πτερύγια παραμένοντα κάθετα. Η έρευνα για της ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα σταμάτησε λόγο μερικών λόγων .Όπως:υψηλό βάρος σε αναλογία με τα παραγόμενα kW, μικρή ζωή κόπωσης, όχι ενεργό σύστημα έλεγχου και έλλειψη χρηματοδότησης. Αλλά η έρευνα για της VAWT ήρθε πίσω με την ιδέα να τοποθετηθούν παράκτια,ειδικά με τον συνδυασμό με την πλωτή δομή στήριξης. Η βάση στήριξης ενός VAWT είναι πιο ρηχή,που εχει ως αποτέλεσμα λιγότερο βάρος και έτσι λιγότερα κόστη. Άλλα πλεονέκτημα είναι:

- Ανεξαρτησία κατεύθυνση εισροής, που σημαίνει ότι δεν χρειάζεται μηχανισμός στροφής δρομέα.
- Η γεννήτρια βρίσκεται στην βάση της κατασκευής ,κάνοντας την πιο προσβάσιμη,πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους συντήρησης.
- Το κέντρο βάρους είναι πλησιέστερο προς το έδαφος ,επειδή ο δρομέας είναι τοποθετημένος στην βάση και η γεννήτρια έχει μετακινηθεί κάτω, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μικρότερη πλωτή δομή στήριξης όπως το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.11: Γραφική αναπαράσταση επιπλέων HAWT και VAWT.

Γενικά μπορεί κανείς να συγκρίνει τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα HAWT με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα VAWT ως:

<u>Κατάσταση τεχνολογίας</u>: Καθώς οι HAWT ήταν το κύριο επίκεντρο στην βιομηχανία αιολικής ενεργείας κατά την διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών,η κατάσταση της τεχνολογίας είναι περισσότερη ώριμη από των VAWT, με μεγάλο αριθμό πετυχημένων αναπτυσσόμενων έργων και ο σχηματισμός ειδικού εφοδιασμού. Οι VAWT διερευνήθηκαν στα τέλη του 20ού αιώνα αλλά το ενδιαφέρον χάθηκε κυρίως λόγω θεμάτων όπως και χαμηλών αποδόσεων.

<u>Απόδοση μετατροπής:</u> Η μεγαλύτερη θεωρητική απόδοση μια ανεμογεννήτριας είναι 59,3% (όριο Betz) .Οι HAWT είναι εγγενώς πιο αποδοτικές από τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα με αποδόσεις ισχύος περίπου 50% συγκρίσιμα με το περίπου 40% των καθέτου άξονα. Αυτό δεν πρέπει να φαίνεται ως ο βέλτιστος παράγοντας απόφασης μεταξύ των δυο περιπτώσεων καθώς πολλοί άλλοι παράγοντες επηρεάζουν το τελικό κόστος του ηλεκτρισμού. Πρόσφατη έρευνα από τους Kinzel et al. ,βρήκαν ότι τοποθετώντας δυο ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους ,η απόδοση μετατροπής μπορεί να αυξηθεί με σύγκριση

από μόνες ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα .Αυτό μπορεί να προάγει την υπόθεση των VAWT και να επηρεάσει τον σχεδιασμό μελλοντικών αιολικών πάρκων VAWT.

Αναβάθμιση: Ένας κύριος παράγοντας στον σχεδιασμό πλωτών ανεμογεννητριών είναι η επεκτασιμότητα, καθώς το σύστημα είναι πιο αποδοτικό από άποψη κόστους σε μεγαλύτερες κλίμακες οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν ένα περιοριστικό παράγοντα λόγω της βαρυτικής κόπωσης καθώς τα πτερύγια υπόκειται σε κύκλους έντασης-συμπίεσης καθώς ο δρομέας περιστρέφεται. Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα δεν υπόκειται αυτό το φαινόμενο και μέχρι στιγμής δεν φαίνονται να έχουν σοβαρά εμπόδια στην αναβάθμιση.

Κόπωση:Καθώς οι HAWT έχουνε θέματα βαρυτικής κόπωσης ,οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα παράγουν μια κυκλικώς εναλλάξιμη ροπή και μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην μετάδοση και στο σύστημα ελέγχου .Καθώς αυτό παράγει μεγάλης συχνότητας κύκλου κόπωση σε μικρού μεγέθους ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, σε πολυ-μεγαβάτ ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα θα περιστρέφονται λίγες περιστροφές ανά λεπτό ,και αυτό δεν θα είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Επίσης με πρόοδο στη τεχνολογία υλικών, η κόπωση μπορεί να αντιμετωπιστεί ευκολότερα σήμερα.

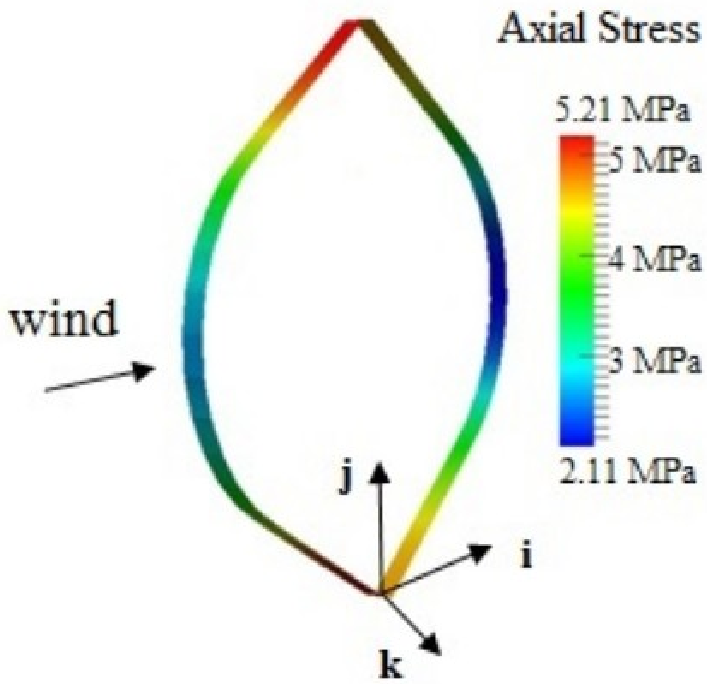
Ακραίες συνθήκες:Οι HAWT κλείνουν συνήθως σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 25 m/s ενώ οι κάθετου άξονα πρέπει να είναι ικανές να λειτουργήσουν σε ταχύτητες άνεμου έως 65m/s. Επίσης οι VAWT είναι πιο ανθεκτικές σε ακραίες καιρικές συνθήκες όπως βαριά χιονόπτωση, χαλάζι, πάγο ,άλας,άμμο και υγρασία.

1.8.Έρευνα πάνω στην αεροελαστική προσομοίωση.

Αεροελαστική προσομοίωση έχει γίνει από αρκετούς επιστήμονες μερικές θεωρίες και αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Απο τον Amin Fereidooni έγινε η αεροελαστική προσομοίωση .Σε ένα πρόβλημα αεροελαστικής αλληλεπίδρασης, η χαλαρή σύζευξη μεταξύ των δύο πραγματοποιείται ακολουθώντας δύο βήματα: πρώτα αξιολογούνται οι δομικές αποκρίσεις στα φορτία του αέρα, και στη συνέχεια, οι δομικές αποκρίσεις χρησιμοποιούνται ως ανατροφοδότηση προς το αεροδυναμικό πρόβλημα.

Το Σχήμα 1.12 δείχνει την αξονική τάση του ελαστικού άξονα κατά μήκος των πτερυγίων του 17-μέτρου DOE-Sandia VAWT. Αυτό το στιγμιότυπο λήφθηκε στη γωνία αζιμουθίου (θ) 1890 ∘ ή 90 ∘ μετά με πέντε επαναλήψεις. Σε αυτήν τη θέση, η ορθή τάση του ελαστικού άξονα στη ρίζα του υπήνεμου πτερύγιου βρίσκεται στην μέγιστη τιμή της. Οι ρίζες των πτερυγίων βιώνουν υψηλότερη πίεση σε σύγκριση με τον ισημερινό. Αυτός ο αριθμός αποδεικνύει επίσης ότι οι λεπίδες βρίσκονται σε υψηλότερο επίπεδο πίεσης όταν βρίσκονται στην υπήνεμη θέση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υψηλότερη ποσότητα αεροδυναμικών δυνάμεων στην υπήνεμη θέση σε σύγκριση με τη προσήνεμη θέση .

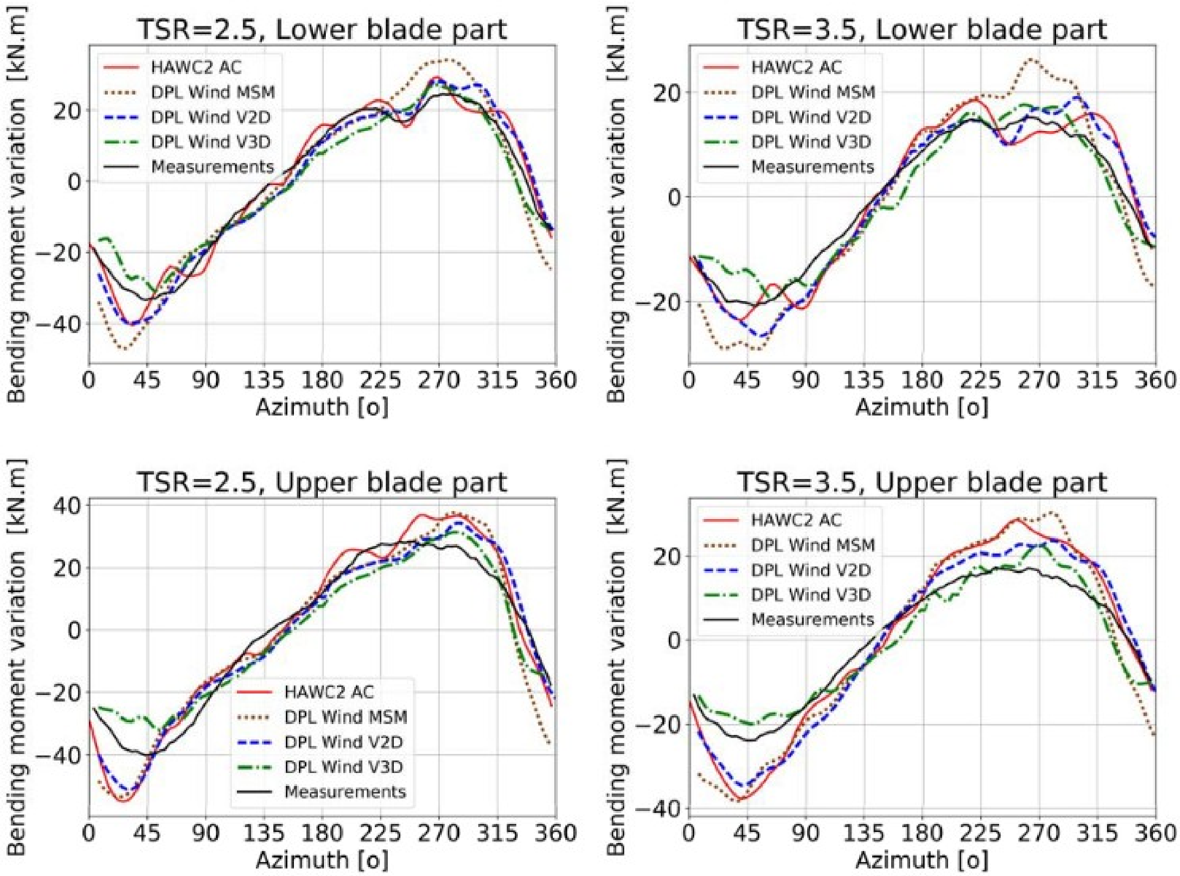


Σχήμα 1.12:Ελαστικού άξονα αξονική τάση κατά μήκος των πτερυγίων σε 17-meterDOE-Sandia VAWT: operating angular velocity Ω = 50.6 rpm,tip speed ratio = 4.36, azimuth angle (θ) = 1890

Oi F. Blondel et al [12] χρησιοιποιήσαν διάφορους κώδικες προσομοίωσης αυτοί είναι

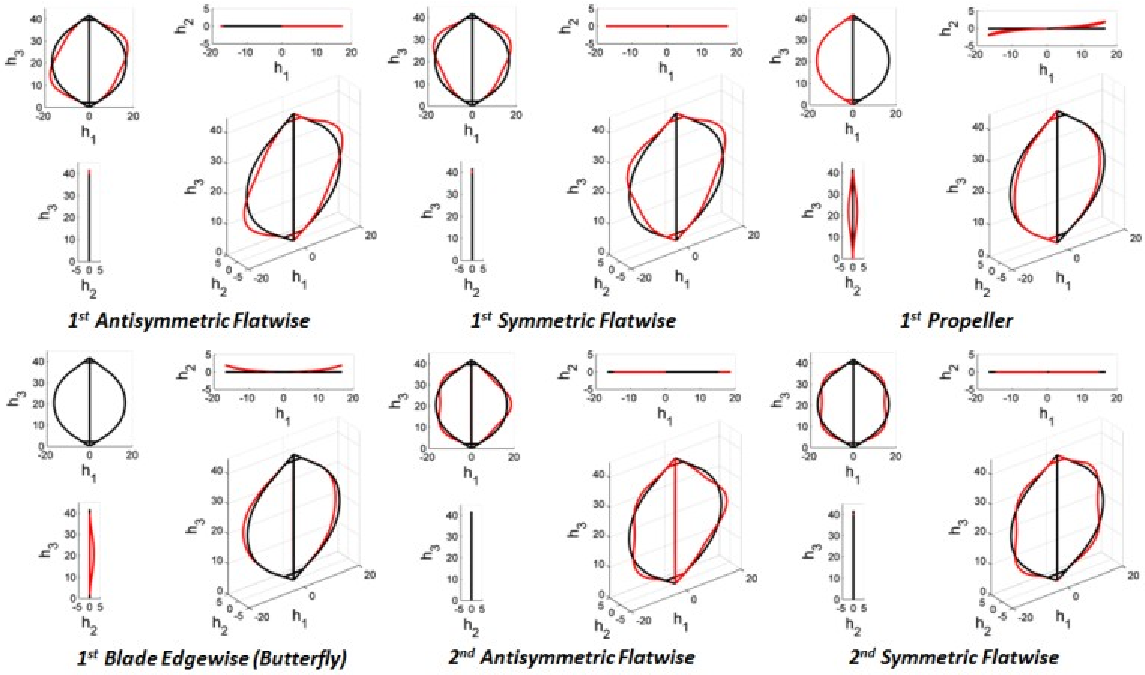
- Το DeepLines Wind ™. είναι ένας αερο-υδρο-σερβο-ελαστικός κώδικας, ικανός να προσομοιώσει πλήρη πλωτά συστήματα ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων των ανεμογεννητριών οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Τα δομικά στοιχεία μοντελοποιούνται χρησιμοποιώντας μη-γραμμικά στοιχεία πεπερασμένων δοκών, ενώ τα υδροδυναμικά φορτία βασίζονται σε γραμμικά και μη γραμμικά μοντέλα . Ο έλεγχος του ρότορα μπορεί να επιτευχθεί συνδέοντας εξωτερικές δυναμικές βιβλιοθήκες. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται για τα αεροδυναμικά μοντέλα: μια εξωτερική βιβλιοθήκη συνδέεται με το επιλύτη. Αυτή η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει όλα τα αεροδυναμικά μοντέλα IFPEN που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ένα πεπλεγμένο σχήμα βασισμένο στη μέθοδο Newmark χρησιμοποιείται για ολοκλήρωση στον χρόνο.
- Ο κωδικός HAWC2 είναι ένας κώδικας που προορίζεται για τον υπολογισμό της απόκρισης ανεμογεννητριών στο χρονικό πλαισιο. Το δομικό μέρος του κώδικα βασίζεται σε μια διαμόρφωση πολλάπλών σωμάτων όπου το καθένα αποτελεί ένα σύνολο στοιχείων δοκού Timoshenko. Ο στρόβιλος διαμορφώνεται από ένα συγκρότημα σωμάτων συνδεδεμένων με εξισώσεις περιορισμού, όπου ένας περιορισμός θα μπορούσε να είναι ένας άκαμπτος σύνδεσμος, ένα έδρανο, μια καθορισμένη σταθερή γωνία εδράνου κ.λπ.

Συμπερασματικά οι προβλέψεις των αεροδυναμικών μοντέλων, σε συνδυασμό με ελαστικούς λύτες, συγκρίθηκαν με τα δεδομένα μετρήσεων του NENUPHAR(ενός προτύπου ανεμογεννήτριας) Επιτεύχθηκε μια καλή συμφωνία. Παρατηρήθηκαν κάποιες τάσεις: στο πάνω μέρος παρατηρήθηκε μια πρόβλεψη των ροπών κάμψης και αποδίδεται σε υπερβολικό stall. Αυτό μπορεί να είναι συνέπεια της υψηλής αναταραχής περιβάλλοντος, που τείνουν να καθυστερήσουν το στατικό stall. Η χρήση ενός μοντέλου 3D δίνης βελτιώνει τα αποτελέσματα. Σε υψηλότερο TSR, παρατηρήθηκε global υπερεκτίμηση των εναλλαγών ροπής κάμψης.



Σχήμα 1.13: Εναλλαγές ροπής κάμψης ανεμογεννήτριας VAWT γύρω από την μέση τιμή της στο κάτω μέρος του πτερυγιου (επάνω) και στο πάνω μέρος του πτερυγίου (κάτω) σύγκριση μεταξύ μετρήσεων , DeepLines Wind TM και HAWC2 μοντέλων, TSR=2.50 (αριστερά) και 3.50 (δεξιά).

Το άρθρο των Brian C. Owens et al [11] .συζητά τα κίνητρα για την διερεύνηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέσω διαμορφώσεων VAWT και παρουσιάζει ένα αρθρωτό πλαίσιο ανάλυσης που βρίσκεται υπό ανάπτυξη. Η προσομοίωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (OWENS) πλαίσιο επιτρέπει την μοντελοποίηση αυθαίρετων ρυθμίσεων VAWT, επιτρέποντας έτσι καινοτόμες σχεδιαστικές έννοιες να αναπτυχθούν και να υπολογιστούν υπολογιστικά. Η υποκείμενη διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει ένα υψηλότερο επίπεδο πιστότητας μοντελοποίησης σε σύγκριση με τα προηγούμενα εργαλεία VAWT τόσο ως προς τη φυσική περιγραφή ενός VAWT όσο και στις δυνατότητες διαμόρφωσης και ανάλυσης. Συζητείται η επαλήθευση του εργαλείου ανάλυσης, χρησιμοποιώντας έναν αριθμό αναλυτικών και αριθμητικών ασκήσεων επαλήθευσης. Συζητούνται στρατηγικές σύζευξης με εξωτερικές μονάδες και παρουσιάζεται μια «χαλαρής» σύνδεσμολογιας προσέγγιση, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερο βαθμό αρθρωτότητας. Αποτελέσματα ανάλυσης για μια ρεαλιστική VAWT δομή παρουσιάζεται υπό αεροδυναμικά φορτία για σταθερά και πλωτά θεμέλια και η σύζευξη μεταξύ VAWT και κίνηση πλατφόρμας παρουσιάζεται .



Σχήμα 1.14: Οπτικοποίηση των προβλέψιμων modes μιας SNL 34-meter VAWT.

Κεφάλαιο 2 Μεθοδολογία

2.1.Θεωρία υπολογιστικού κώδικα

Ακολουθώντας τη μέθοδο των πολλαπλών σωμάτων (multi body),η δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας αναλύεται θεωρώντας έναν αριθμό διασυνδεμένων υπο-σωμάτων (sub-bodies). Κάθε υποστοιχείο μπρορεί να αναπαριστά μια φυσική δομή της ανεμογεννήτριας .Ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων εφαρμόζεται στην αρχή του κάθε υπό-στοιχειου, με βάση το οποίο ορίζονται οι τοπικές ελαστικές μετατοπίσεις . Αυτό το τοπικό σύστημα επιτρέπεται να κινείται και υποβάλλεται σε κινήσεις απόλυτου στερεού (rigid moby movements). Οι άκαμπτες κινήσεις σώματος μπορεί να είναι μηδενικές ή κινηματικά και δυναμικά καθορισμένες καθόλη την λύση του συστήματος

Έστω $\boldsymbol{R}^{K}$ ορίζεται το διάνυσμα θέσης της αρχής [**Oxyz**] του ''k'' στοιχείου και $\boldsymbol{T}^{K}$ το μητρώο στροφής από το τοπικό σύστημα του σώματος στο αδρανειακό σύστημα.Έτσι η θέση του σημείου του Κ στοιχείου σε σχέση με το γενικό αδρανειακό σύστημα[$\boldsymbol{O_G x_G y_G z_G}$] $\boldsymbol{r}_G^K$ και οι πρώτες και δεύτερες χρονικές παράγωγοί τους ορίζονται ως :

$$\boldsymbol{r}_G^k=\boldsymbol{R}^k+\boldsymbol{T}^k\boldsymbol{r}^k \quad \textit{(Σχέση: 2.1)}$$

$$\dot{\boldsymbol{r}}_G^k=\dot{\boldsymbol{R}}^k+\dot{\boldsymbol{T}}^k\boldsymbol{r}^k+\dot{\boldsymbol{r}}^k\boldsymbol{T}^k \quad \textit{(Σχέση: 2.2)}$$

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_G^k=\ddot{\boldsymbol{R}}^k+\ddot{\boldsymbol{T}}^k\boldsymbol{r}^k+2\dot{T}^k\dot{\boldsymbol{r}}^k+\ddot{\boldsymbol{r}}^k\boldsymbol{T}^k \quad \textit{(Σχέση: 2.3)}$$

η επιτάχυνση εκφρασμένη σε τοπικές συνταγμένες είναι η παρακάτω

$$(\boldsymbol{T}^k)^T\ddot{\boldsymbol{r}}_G^k=(\boldsymbol{T}^k)^T\ddot{\boldsymbol{R}}^k+(\boldsymbol{T}^k)^T\ddot{\boldsymbol{T}}^k\boldsymbol{r}^k+2(\boldsymbol{T}^k)^T\dot{\boldsymbol{T}}^k\dot{\boldsymbol{r}}^k+\ddot{\boldsymbol{r}}^k \quad \textit{(Σχέση: 2.4)}$$

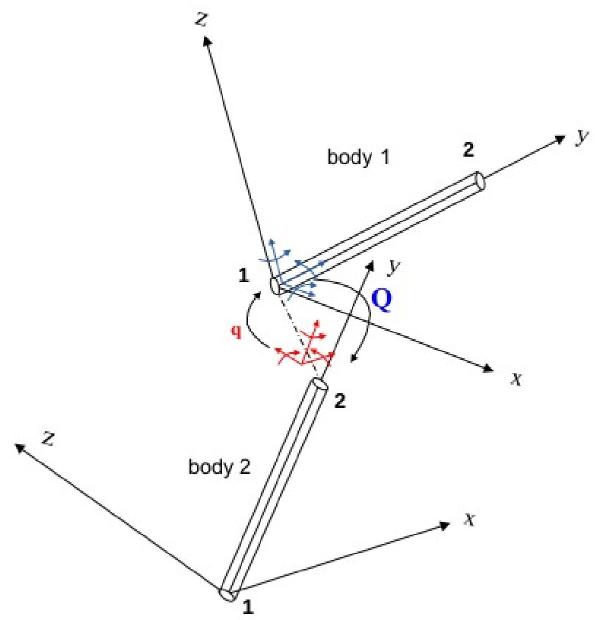
όπου ο δεύτερος όρος είναι η φυγόκεντρος επιτάχυνση και ο τρίτος η επιτάχυνση coriolis

$\boldsymbol{R}^k$ και $\boldsymbol{T}^k$ ορίζονται σαν μια σειρά μετατοπίσεων και στροφών $\boldsymbol{d}_j$ και $\boldsymbol{t}_j$ που συνδέουν το τοπικό πλαίσιο [**Oxyz**] του κ-στοιχείου στο γενικό πλαίσιο [$\boldsymbol{O_G x_G y_G z_G}$]

$$\boldsymbol{r}_G^k=\boldsymbol{d}_m+\boldsymbol{t}_m\{\ldots[\boldsymbol{d}_2+\boldsymbol{t}_2\cdot(\boldsymbol{d}_1+\boldsymbol{t}_1\cdot\boldsymbol{r}^k)]\}\Rightarrow\boldsymbol{R}^k=\boldsymbol{d}_m+\boldsymbol{t}_m\cdot\{\ldots[\boldsymbol{d}_2+\boldsymbol{t}_2\cdot\boldsymbol{d}_1]\},\boldsymbol{T}^k=\prod_{j=1}^{j(k)}\boldsymbol{t}_j \quad \textit{(Σχέση: 2.5)}$$

Κάθε $\boldsymbol{d}_j$ και $\boldsymbol{t}_j$ συνδέεται με μια μόνη μετατόπιση ή μια μόνη περιστροφή σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Συλλέγοντας όλες τις μετατοπίσεις και τις στροφές που συμμετέχουν στον ορισμό των $\mathbf{R}^k$ και $\mathbf{T}^k$ για όλα τα υπο-στοιχεία , εισάγεται το διάνυσμα των κινηματικών βαθμών ελευθέριας Κ.Β.Ε. **q** .Κάθε στοιχείο του **q** σχετίζεται με συγκεκριμένη κατεύθυνση στροφής και μετατόπισης έτσι λοιπόν $\mathbf{d}_j = \mathbf{d}_j(\mathbf{q}_n; \mathbf{dir}_n)$ αντιστοιχεί σε $\mathbf{q}_n$ μετατόπιση στην $\mathbf{dir}_n$ κατεύθυνση και αντίστοιχα για τις στροφές .Συγκεκριμένα το διάνυσμα **q** μπορεί να περιλαμβάνει μεγάλες σταθερού σώματος στροφές και μετατοπίσεις άλλα και δομικές παραμορφώσεις στα σώματα προσαρμοσμένα στο κ- σώμα.

Επίσης υπάρχουν 3 μετατοπίσεις και 3 στροφές στην αρχή κάθε υπό-σώματος ώστε να μπορούν να συνδεθούν τα σώματα. Τα σώματα συνδέονται μέσω κατάλληλων κινηματικών και δυναμικών συνθηκών στα άκρα τους. Παραδείγματος χάρη, το σώμα 1 λαμβάνει τέτοιες κινηματικές συνθήκες, ούτως ώστε η αρχή του να ταυτίζεται με το τελευταίο σημείο του σώματος 2. Η ταύτιση αυτή αφορά τόσο στις συντεταγμένες των δύο σημείων (Σχέση 2.6), όσο και στις κλίσεις αυτών. Αντίστοιχα το σώμα 2 απαιτείται να ικανοποιεί τη δυναμική συνθήκη που προκύπτει από τη μεταφορά των οριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην αρχή του 1ου σώματος $\boldsymbol{r}_G^{sb1} = \boldsymbol{r}_G^{sb2}$ ***(Σχέση: 2.6)***



Σχήμα 2.1: Σύνδεση δύο σωμάτων.

Το πλεονέκτημα της παραπάνω διαδικασίας σε σχέση με άλλες πολυσωματκές φόρμουλες που εφαρμόζουν πολλαπλασιαστές Lagrange είναι ότι οι δυναμικές εξισώσεις που προκύπτουν μπορούν εύκολα να γραμμικοποιηθούν αναλυτικά και ύστερα μπορεί να εφαρμοστεί γραμμική ιδιοδιανυσματική ανάλυση σε σχέση με πιθανόν μεγάλης απόκλισης σταθερή ή περιοδική κατάσταση .Η μη γραμμική κινηματική που ορίστηκε στην σχέση 2.4 θα καθιστά τις δυναμικές εξισώσεις του συστήματος μη γραμμικές ανεξάρτητα από το αν το μοντέλο δοκού είναι γραμμικό ή όχι. Η μη-γραμμικότητα οφείλεται στην εξάρτηση των $\mathbf{T}^k$,$\mathbf{R}^k$ και των χρονικών παραγώγων τους με το $\mathbf{q}$. Θεωρώντας μικρές διακυμάνσεις δ$\mathbf{q}$ γύρω από την

κατάσταση αναφοράς $\mathbf{q}^0$,το $\mathbf{q}$ και οι χρονικές παράγωγοι προσεγγίζονται ως

$$q \simeq q^0 + \delta q \, , \dot{q} \simeq \dot{q}^0 + \delta \dot{q} \, , \ddot{q} \simeq \ddot{q}^0 + \delta \ddot{q} \quad \textit{(Σχέση: 2.7)}$$

και έτσι το $\mathbf{R}^k$ και παρόμοια το $\mathbf{T}^k$ μπορούν να γραμμικοποιηθούν όπως παρακάτω(το κ παραλείπεται λόγω απλότητας)

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}) \simeq \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) + \partial_j \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \delta q_j \quad \textit{(Σχέση: 2.8)}$$

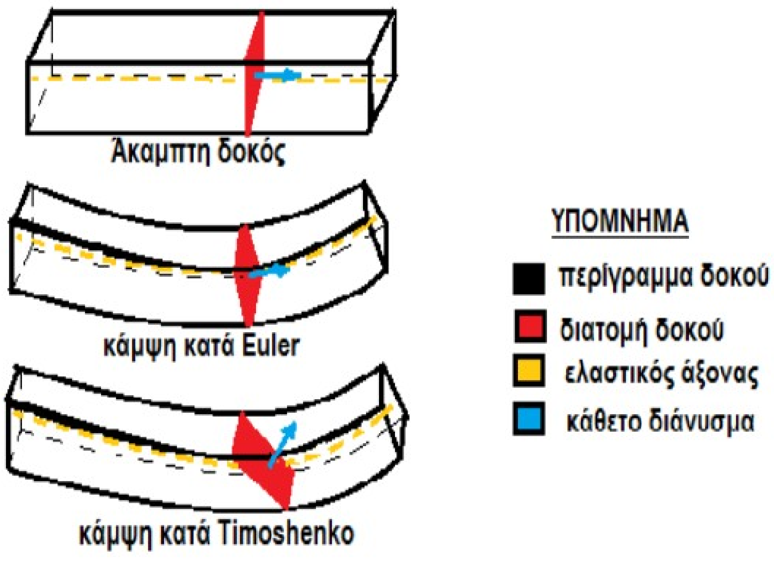
$$\dot{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{q}) \simeq \partial_j \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \dot{q}_j^0 + \partial_{jk} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \dot{q}_j^0 \cdot \delta q_k + \partial_j \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \delta \dot{q}_j \quad \textit{(Σχέση: 2.9)}$$

$$\ddot{\boldsymbol{R}}(\boldsymbol{q}) \simeq \partial_j \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \ddot{q}_j^0 + \partial_{jk} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \dot{q}_k^0 \cdot \dot{q}_j^0 + \partial_{jkm} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \dot{q}_k^0 \cdot \dot{q}_j^0 \cdot \delta q_j \quad .$$
$$+ \partial_{jk} \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \ddot{q}_k^0 \cdot \delta q_j + \partial_{jk} 2 \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \dot{q}_k^0 \cdot \delta \dot{q}_j + \partial_j \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}^{\boldsymbol{0}}) \cdot \delta \ddot{q}_j \quad \textit{(Σχέση: 2.10)}$$

στις παραπάνω εξισώσεις τα επαναλαμβανόμενα υποσύμβολα σημαίνουν άθροιση ενώ οι μερικές παράγωγοι σημαίνουν παράγωγο σε σχέση με το αντίστοιχο q. Αν αυτές οι εκφράσεις αντικατασταθούν στην 2.4 αυτή λαμβάνει γραμμική μορφή. .Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι μη γραμμικοί περιορισμοί αποφεύγονται. Εξισώσεις περιορισμών αυξάνουν την στιβαρότητα του πινάκα του συστήματος και επιβραδύνουν την σύγκληση. Η ίδια πολύ-σωματική φόρμουλα μπορεί επίσης να επεκταθεί στο επίπεδο των στοιχείων. Με αυτόν τον τρόπο ,μεγάλα ελαστικά υπο-στοιχεία που υποβάλλονται σε μεγάλες παραμορφώσεις, όπως τα πτερύγια, υποδιαιρούνται σε έναν αριθμό διασυνδεμένων υπο-σωμάτων, καθένα θεωρείται ως ξεχωριστή δοκός-στοιχείο ή ως μια σύνδεση δοκών-στοιχείων

2.2.Θεωριά πεπερασμένων στοιχείων

Για την επίλυση του συστήματος, εφαρμόζεται η θεωρία της δοκού κατά Timoshenko,όπου κάθε διατομή της υποτίθεται πως παραμένει επίπεδη (όπως και στη θεωρία κατά Euler). Η διαφορές των δυο αυτών θεωριών, έγκειται στο γεγονός ότι η θεωρία Euler,απαιτεί την καθετότητα της διατομής (μετά την παραμόρφωση), ως προς τον ελαστικό άξονα. Αντίθετα η θεωρία Timoshenko,αποδέχεται τη δυνατότητα της διατομής να παρουσιάσει μια επιπλέον κλίση. Στην πραγματικότητα, στη θεωρία, λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της κάμψης.



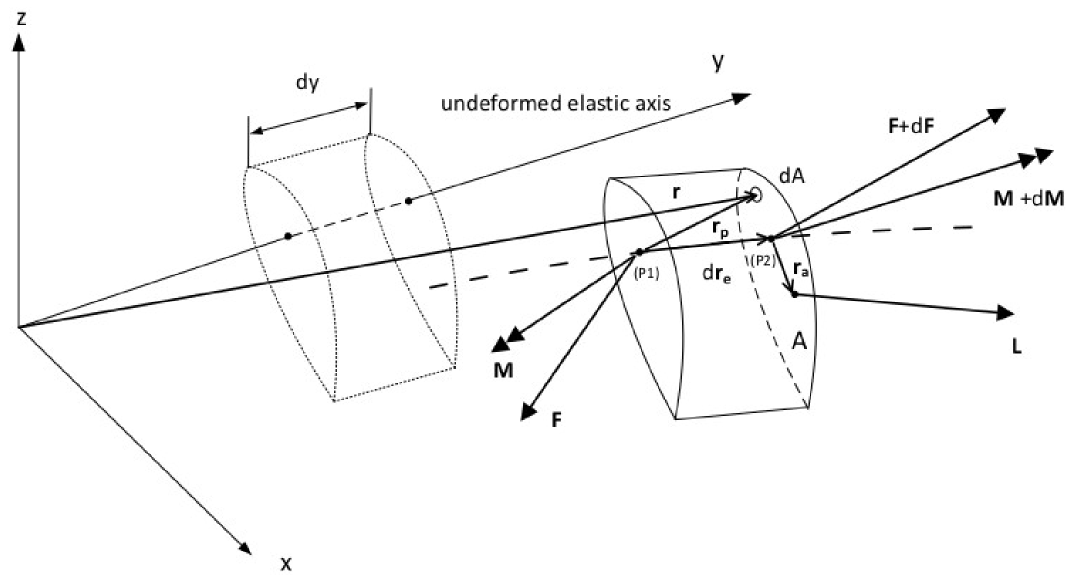
Σχήμα 2.2: κάμψη δοκού κατά Euler και Timoshenko.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων του μοντέλου ,η ισορροπία των φορτίων βάση του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα χρησιμοποιείται,η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί στα ακόλουθα βήματα:

1) Ορίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του πεπερασμένου στοιχείου,
2) Σε σχέση με τα διανύσματα των βαθμών ελευθερίας καθώς και αυτών στην απαραμόρφωτη κατάσταση υπολογίζονται τα διανύσματα των σημείων στην παραμορφωμένη κατάσταση του σώματος,
3) Προσδιορίζονται οι παραμορφώσεις με παραγώγιση των μετακινήσεων.
4) Υπολογίζονται οι εσωτερικές δυνάμεις συναρτήσει των μετατοπίσεων, χρησιμοποιώντας τον νόμο τάσεων-παραμορφώσεων.
5) Καταγράφονται οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα

Σύμφωνα με το σχήμα 2.3 ο άξονας της δοκού για το σύστημα συνταγμένων είναι ο άξονας y .Οι άξονες x,z αντιστοιχούν στις δυο πλευρικές κατευθύνσεις κάμψεων. Η δοκός που θεωρείται να υπόκειται σε συνδυασμό δυο πλευρικών κάμψεων συμπεριλαμβανομένου διάτμησης ,στρέψης και έντασης στην y κατεύθυνση.



Σχήμα 2.3: Ορισμός συστήματος συντεταγμένων της δοκού.

Στο πλαίσιο 1ης τάξης γραμμική θεωρία η θέση r οποιουδήποτε σημείου P(x,y,z) στην παραμορφώσιμη κατάσταση ορίζεται σε σχέση με τις μετακινήσεις και τις στροφές ως εξής

$$-\Box\, \boldsymbol{r}(\boldsymbol{r_0};t)=\boldsymbol{r_0}+\boldsymbol{U}(\boldsymbol{r_0};t)=\boldsymbol{r_0}+\boldsymbol{S}(x_0,z_0)\cdot\boldsymbol{u}(y_0;t)=\boldsymbol{r_0}+\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x_0 & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.11)}$$

$\boldsymbol{r_0}=(x_0,y_0,z_0)^T$ δηλώνει την θέση του P στην απαραμόρφωτη κατάσταση και $\boldsymbol{u}(y_0,;t)=(u,v,w,\theta_x,\theta_y,\theta_z)^T$ περιέχει τις δυο μετατοπίσεις κάμψεων u,w, την αξονική μετατόπιση v ,τη γωνία στρέψης θ_y και της γωνίες κάμψεως θ_x,θ_z ,που περιλαμβάνουν και τις διατμητικές παραμορφώσεις. Η παραπάνω έκφραση ορίζει το πεδίο μετακινήσεων $\mathbf{U}=(U,V,W)^T$ σε σχέση με την οποία ο παραμορφώσεις ορίζονται

Χρησιμοποιώντας τις παραμορφώσεις κατά Green και τον νόμο του Hooke για τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων ισοτροπικού υλικού ,προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις :

$$\sigma_{yy}=E\cdot\varepsilon_{yy}=\frac{E\cdot\partial V}{\partial y_0}=E\cdot v'-E\cdot z_0\cdot\theta'_x+E\cdot x_0\cdot\theta'_z \quad \textit{(Σχέση: 2.12)}$$

$$\tau_{xy}=G_x\cdot\gamma_{xy}=G_x\cdot\left(\frac{\partial U}{\partial y_0}+\frac{\partial V}{\partial x_0}\right)=G_x\cdot u'+G_x\cdot z_0\cdot\theta'_y+G_x\cdot\theta_z \quad \textit{(Σχέση: 2.13)}$$

$$\tau_{yz}=G_x\cdot\gamma_{yz}=G_z\cdot\left(\frac{\partial V}{\partial z_0}+\frac{\partial W}{\partial y_0}\right)=G_z\cdot w'+G_z\cdot x_0\cdot\theta'_y+G_z\cdot\theta_x \quad \textit{(Σχέση: 2.14)}$$

Ολοκληρώνοντας τις τάσεις πάνω σε οποιαδήποτε τομή της δοκού οι εσωτερικές δυνάμεις και ροπές προκύπτουν:

$$F_x=\int_A \tau_{xy}\,dA=\int_A (G_x u'+G_x z_0\theta'_y+G_x\theta_z)dA \quad \textit{(Σχέση: 2.15)}$$

$$F_y=\int_A \sigma_{yy}\,dA=\int_A (E v'-E z_0\theta'_x+E x_0\theta'_z)dA \quad \textit{(Σχέση: 2.16)}$$

$$F_z=\int_A \tau_{yz}\,dA=\int_A (G_z w'-G_z x_0\theta'_y-G_z\theta_x)dA \quad \textit{(Σχέση: 2.17)}$$

$$M_x=-\int_A \sigma_{yy} z_0\,dA=\int_A (E z_0 v'-E z_0^2\theta'_X+E x_0 z_0\theta'_z)dA \quad \textit{(Σχέση: 2.18)}$$

$$M_y=\int_A (\tau_{xy}z_0-\tau_{yz}x_0)dA=\int_A [(G_x z_0^2+G_z x_0^2)\theta'_y+G_x z_0 u'+G_x z_0\theta_z-G_z x_0 w'+G_z x_0\theta_x]dA$$

(Σχέση: 2.19)

$$M_z=\int_A \sigma_{yy}x_0\,dA=\int_A (E x_0 v'-E z_0 x_0\theta'_X+E x_0^2\theta'_z)dA \quad \textit{(Σχέση: 2.20)}$$

Οι ελαστικές ιδιότητες των τομών της δοκού ορίζονται ως:

$$EA=\int_A E\,dA,\quad EAx=\int_A E z_0\,dA,\quad EAz=\int_A E x_0\,dA,\quad EIxz=\int_A E z_0 x_0\,dA,$$

$$EIzz=\int_A E x_0^2\,dA,\quad EIxx=\int_A E z_0^2\,dA,\quad GJ=\int_A (G_x z_0^2+G_z x_0^2)dA,\quad GxA=\int_A G_x\,dA,$$

$$GzA=\int_A G_z\,dA,\quad GxAx=\int_A G_x z_0\,dA,\quad GzAz=\int_A G_z x_0\,dA,\quad (\textbf{\textit{Σχέσεις 2.21}})$$

Για ένα στοιχειώδες στοιχείο δοκού διατομής A με σημεία τέλους (P1),(P2) η ισορροπία των δυνάμεων και ροπών σε σχέση με το σημείο (P1) στο [Oxyz] σύστημα αναφοράς παίρνει τη ακολουθεί μορφή

$$\boldsymbol{f^i}\,dy=d\boldsymbol{F}+\boldsymbol{f^e}\,dy:\boldsymbol{f^i}=\int_A \ddot{\boldsymbol{r}}\,dA,\boldsymbol{f^e}=\int_A \rho\boldsymbol{g}\,dA+\boldsymbol{L} \quad \textit{(Σχέση: 2.22)}$$

$$\boldsymbol{m^i}\,dy = d\boldsymbol{M} + d\boldsymbol{r_e} \times (\boldsymbol{F} + d\boldsymbol{F}) + \boldsymbol{m^e}\,dy : \boldsymbol{m^i} = \int_A \rho(\boldsymbol{r_p} \times \ddot{\boldsymbol{r}})\,dA,\ \boldsymbol{m^e} = \int_A (\boldsymbol{r_p} \times \boldsymbol{g})\,dA + \boldsymbol{r_a} \times \boldsymbol{L} \quad \textit{(Σχέση: 2.23)}$$

Στις εξισώσεις 22 ,23 το $\mathbf{L}=(L_x, L_y, L_z)^T$ αντιστοιχεί σε εξωτερικό διάνυσμα δυνάμεως ανά μονάδα μήκους που δρα στο στοιχείο το $\mathbf{F}=(F_x,F_y,F_z)^T$ και το $\mathbf{M}=(M_x,M_y,M_z)^T$ είναι οι καθαρές ελαστικές δυνάμεις και ροπές, **g** είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ,**F+dF** είναι το διάνυσμα της συνισταμένης ελαστικής δύναμης στο τελικό σημείο (P2), $\mathbf{r_e}$ είναι το διάνυσμα θέσεως ενός σημείου στον παραμορφωμένο ελαστικό άξονα.

$$\boldsymbol{r_e} = \begin{Bmatrix} 0 \\ y \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.24)}$$

Έστω $\mathbf{r}_e^{(1,2)}$ να δηλώνει τα διανύσματα θέσεως στα δυο τέλη $\mathbf{dr}_e = \mathbf{r}_e^{(2)} - \mathbf{r}_e^{(1)}$,το $\mathbf{r}_a = (\mathbf{x}_a, 0, \mathbf{z}_a)^T$ δηλώνει την τοπική θέση του κέντρου των εξωτερικών δυνάμεων σε σχέση με τον ελαστικό άξονα της δοκού και $\mathbf{r}_p = \mathbf{r} - \mathbf{r}_e^{(1)}$.

Εισάγοντας τις εξισώσεις 2.15 με 2.20 και της 2.21 στις 2.22 και 2.23 και γράφοντας αυτές σε μορφή πινάκων προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\int_A \rho dA\, \boldsymbol{II}\, \boldsymbol{S} \ddot{\boldsymbol{r}} = [\boldsymbol{K_1} \boldsymbol{u}']' + [\boldsymbol{K_2} \boldsymbol{u}]' + [\boldsymbol{K_3} \boldsymbol{u}'] + [\boldsymbol{K_4} \boldsymbol{u}] + \int_A \rho dA\, \boldsymbol{II}\, \boldsymbol{T^T} \boldsymbol{g} + \boldsymbol{II_a} \boldsymbol{L} \quad \textit{(Σχέση: 2.25)}$$

Όπου οι πινάκες της 2.25 ορίζονται ως:

$$\boldsymbol{K_1} = \begin{bmatrix} G_x A & 0 & 0 & 0 & G_x Ax & 0 \\ 0 & EA & 0 & -EAx & 0 & EAz \\ 0 & 0 & G_z A & 0 & -G_z Az & 0 \\ 0 & -EAx & 0 & EIxx & 0 & -EIxz \\ G_x Ax & 0 & -G_z Az & 0 & GJ & 0 \\ 0 & EAz & 0 & -EIxz & 0 & EIzz \end{bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.26)}$$

$$\boldsymbol{K_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_x A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_z A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_z Az & 0 & G_x Ax \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.27)}$$

$$\boldsymbol{K_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_z A - F_y & 0 & -G_z Az & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_y - G_x A & 0 & 0 & 0 & -G_x A & 0 \end{bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.28)}$$

$$\boldsymbol{K_4}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_z A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_x A \end{bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.29)}$$

$$\boldsymbol{II}=\boldsymbol{S}^{\boldsymbol{T}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_0 & 0 & x_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & x_0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad \textit{(Σχέση: 2.30)}$$

$$\boldsymbol{II}_{\boldsymbol{\alpha}}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -x_\alpha & 0 \end{bmatrix} \quad \textit{(Σχέση: 2.31)}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ,παρόλο που χρησιμοποιείται μια κλασική πρώτης τάξεως γραμμική δοκός,οι μη γραμμικοί περιστροφικοί οροί στιβαρότητας $F_y w'$ και $F_y u'$ στις x και z αδράνειας εξισώσεις, διατηρούνται λόγω τον σημαντικής συνεισφοράς φορτίου. Το σύστημα των δυναμικών εξισώσεων έπειτα από την εισαγωγή της επιτάχυνσης της εξίσωσης 2.4,αναδιατυπώνεται σε παραλλαγής μορφή εφαρμόζοντας την αρχή του δυνατού έργου

$$\int_0^L \delta \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \int_A \rho dA\, \boldsymbol{II}\, \boldsymbol{S}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}} \ddot{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{G}})dy+\int_0^L (\delta \boldsymbol{u}')^T \boldsymbol{K_1} \boldsymbol{u}'\, dy+\int_0^L (\delta \boldsymbol{u}')^T \boldsymbol{K_2} \boldsymbol{u}\, dy-\int_0^L \delta \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{K_3} \boldsymbol{u}'\, dy-\int_0^L \delta \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{K_4} \boldsymbol{u}\, dy=¿$$

$$\int_0^L \delta \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \int_A \rho dA\, \boldsymbol{II}\, \boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{g}\, dy+\int_0^L \delta \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{T}} \boldsymbol{II}_{\boldsymbol{\alpha}} \boldsymbol{L}\, dy+[(\delta \boldsymbol{u}')^T [\boldsymbol{K_1} \boldsymbol{u}'+\boldsymbol{K_2} \boldsymbol{u}]]_0^L \quad \textit{(Σχέση: 2.32)}$$

όπου δ**u** δηλώνεται η εικονική μετατόπιση και ο τελευταίος όρος στο δεξί μέλος αντιστοιχεί σε οριακές συνθήκες που εμφανίζονται έπειτα από την ολοκλήρωση κατά μέλη, η παραπάνω εξίσωση διακριτοποιείται βάση προσεγγίσεων πεπερασμένων στοιχείων

Αυτό γίνεται με το να εκφραστεί το πεδίο μετακινήσεων u και την κινηματικά αποδεκτή εικονική μετατόπιση δu σε σχέση με την ίδια διακριτή συνάρτηση βάσης. Στο επίπεδο στοιχείου (ορίζεται με το υποσύμβολο ‘’e’’) όπου **N**(y) δηλώνεται ο πινάκας των συναρτήσεων μορφής

$$\boldsymbol{u_e}(y,t)=\boldsymbol{N}(y)\hat{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{e}}(t);,\delta \boldsymbol{u_e}(y,t)=\boldsymbol{N}(y)\delta \hat{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{e}}(t) \quad \textit{(Σχέσεις: 2.33)}$$

ο πίνακας στροφής παίρνει την εκάστοτε μορφή ανάλογα με τους κόμβους και τους βαθμούς ελευθερίας του πεπερασμένου στοιχείου

Μετά από της εισαγωγή της εξίσωσης 2.33 και 2.4 στην 2.32 , εξαλείφοντας τις εικονικές μετατοπίσεις και εφαρμόζοντας γραμμικοποίηση, το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων σε επίπεδο στοιχείου προκύπτει:

$$\boldsymbol{M}\delta \ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{C}\delta \dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\delta \boldsymbol{u}+\boldsymbol{M_q}\delta \ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C_q}\delta \dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{K_q}\delta \boldsymbol{q}=\boldsymbol{Q} \quad \textit{(Σχέση: 2.34)}$$

όπου το υποσύμβλο e παραλείπεται από τις $\delta \boldsymbol{u}, \delta \dot{\boldsymbol{u}}, \delta \ddot{\boldsymbol{u}}$ οι οποίες δηλώνουν την διατάραξη των ελαστικών βαθμών ελευθερίας του στοιχείου και ορίζονται από την γραμμικοποίηση των βαθμών ελευθερίας όπως στην εξίσωση 2.7

$$\boldsymbol{u}\simeq \boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}+\delta \boldsymbol{u}, \dot{\boldsymbol{u}}\simeq \dot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+\delta \dot{\boldsymbol{u}}, \ddot{\boldsymbol{u}}\simeq \ddot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+\delta \ddot{\boldsymbol{u}} \quad \textit{(Σχέση: 2.35)}$$

Προβολή της γενικής επιτάχυνσης στο τοπικό σύστημα του στοιχείου μετά από την εισαγωγή της 2.11 στη 2.4 προκύπτει η εξίσωση

$$\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{r}}_{\boldsymbol{G}}=\boldsymbol{S}\ddot{\boldsymbol{u}}+2\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\dot{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{S}\dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{R}}+\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{0}} \quad \textit{(Σχέση: 2.36)}$$

η οποία γραμμικοποιήται εν βάση των 2.7 με 2.10 και 2.35 .Έτσι οι πίνακες στην 2.34 ορίζονται

$$\boldsymbol{M}=L\int_0^1\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,dy$$

$$\boldsymbol{C}=L\int_0^1\int_A 2\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\dot{\boldsymbol{T}})^0\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,dy$$

$$\boldsymbol{K}=L\int_0^1\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})^0\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,dy+L\int_0^1(\boldsymbol{N}')^T\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{N}'\,dy+L\int_0^1(\boldsymbol{N}')^T\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{N}\,dy-L\int_0^1\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{3}}(\boldsymbol{N}')^T\,dy$$
$$-\int_0^1\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{3}}\boldsymbol{N}\,dy$$

$$\boldsymbol{M}_{\boldsymbol{q}}=L\int_0^1\sum_{i=1}^{nq}\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,[\partial_{\ddot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\dot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+\partial_{\ddot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{R}})_i+\partial_{\ddot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{0}}]dy$$

$$\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{q}}=L\int_0^1\sum_{i=1}^{nq}\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,[2\partial_{\dot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\dot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\dot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+\partial_{\dot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}+\partial_{\dot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{R}})_i+\partial_{\dot{q}}(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{0}}]dy$$

$$\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{q}}=L\int_0^1\sum_{i=1}^{nq}\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,[2\,\partial_q(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\dot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\dot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+\partial_q(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}+\partial_q(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{R}})_i+\partial_q(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})_i\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{0}}]dy$$
$$-L\int_0^1\sum_{i=1}^{nq}\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,\partial_q(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}})_i\,\boldsymbol{g}\,dy$$

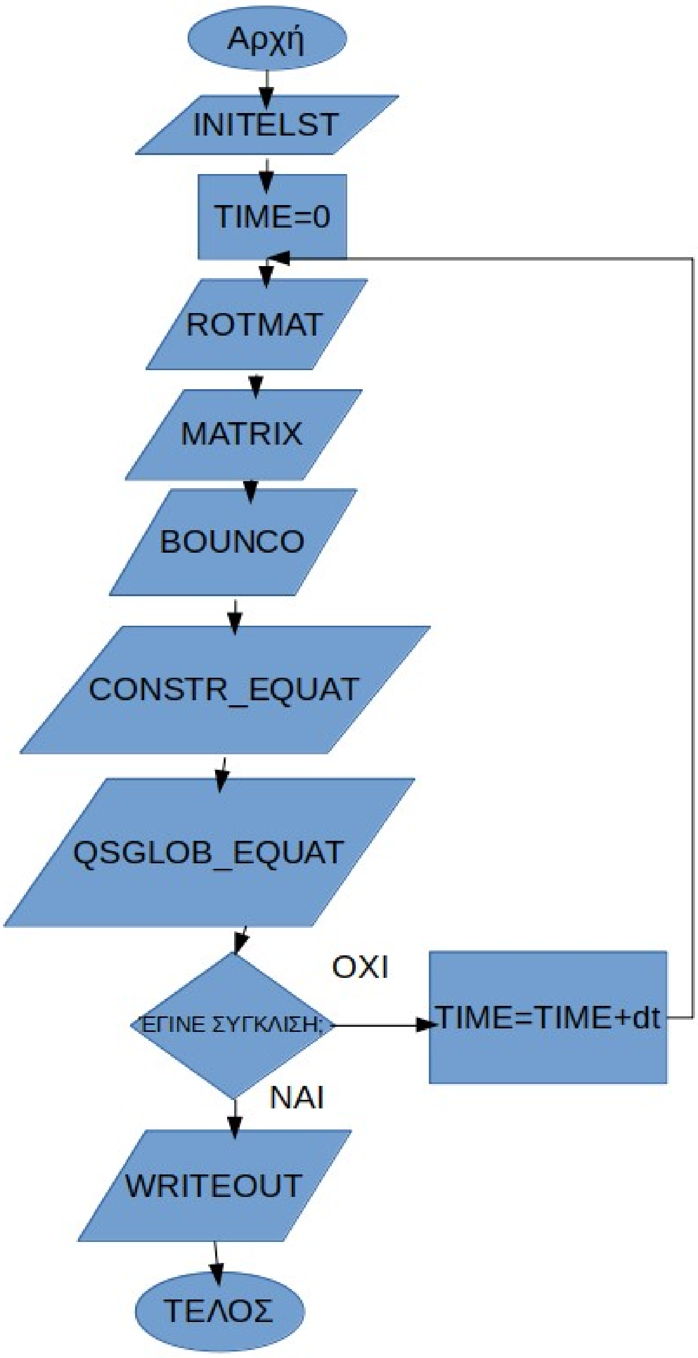
$$\boldsymbol{Q}=L\int_0^1\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{g}\,dy+L\int_0^1\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}_{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{L}\,dy$$
$$-L\int_0^1\int_A\rho\,dA\,\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{II}\,[\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\ddot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+2(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\dot{\boldsymbol{T}})^0\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\dot{\boldsymbol{u}}^{\boldsymbol{0}}+(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})^0\boldsymbol{S}\,\boldsymbol{N}\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}+(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{R}})^0++(\boldsymbol{T}^{\boldsymbol{T}}\ddot{\boldsymbol{T}})^0\boldsymbol{r}_{\boldsymbol{0}}]dy$$
$$-L\int_0^1(\boldsymbol{N}')^T\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{1}}\boldsymbol{N}'\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}\,dy+L\int_0^1(\boldsymbol{N}')^T\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{N}\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}\,dy-L\int_0^1\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{3}}(\boldsymbol{N}')^T\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}\,dy-L\int_0^1\boldsymbol{N}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{4}}\boldsymbol{N}\,\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{0}}\,dy$$

(Σχέσεις 2.37)

όπου το nq δηλώνει των συνολικό αριθμό των βαθμών ελευθερίας.

3.1.Περιγραφή της δομής του υπολογιστικού κώδικα

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή του κωδικά. Ο κύριος κώδικας έχει την παρακάτω μορφή σε μορφή διαγράμματος:



Διάγραμμα: 3.1.Ροή κώδικα

Οι παραπάνω υπορουτίνες είναι οι εξής:

- ➔ INITELAST:Διαβάζει από αρχεία: Πρώτον,τον αριθμό των σωμάτων, σήμα εάν πρόκειται για ιδοδιανυσματική ανάλυση, το χρονικό βήμα,τον χρόνο της προσομοίωσης,και σταθερές που χρησιμοποιούνται στην Newmark επίλυση συστήματος,Δεύτερο τις ονομασίες των αρχείων εισόδου. Τρίτον τις αρχικές τιμές των γενικών βαθμών ελευθερίας και τον τύπο τους (στροφή ή μετατόπιση).Τέταρτον τις μετακινήσεις και τις στροφές για να πάει το τοπικό σύστημα στην αρχή κάθε στοιχείου με την σωστή κατεύθυνση των αξόνων. Πέμπτον τον αριθμό και των τύπο των πεπερασμένων στοιχείων κάθε σώματος. Έκτον τα κατασκευαστικά στοιχεία κάθε πεπερασμένου στοιχείου και τέλος υπολογίζει μεταβλητές που χρειάζονται στο υπόλοιπο κώδικα όπως π.χ. αθροισμένοι βαθμοί ελευθερίας κάθε πεπερασμένου στοιχείου.
- ➔ ROTMAT: Υπολογίζονται οι μετακινήσεις και οι στροφές κάθε σώματος καθώς και οι μερικές παράγωγοι αυτών καθώς και οι χρονικές παράγωγοι τους και επιπλέον οι συνδυασμοί των γινομένων τους που χρησιμοποιούνται στην θεωρία.
- ➔ MATRIX:Δημιουργία των πινάκων και η συναρμολόγηση τους.
- ➔ BOUNCO:Εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες του συστήματος.
- ➔ CONSTRAIN_EQUAT: Δηλώνονται πως συνδέονται τα σώματα μεταξύ τους

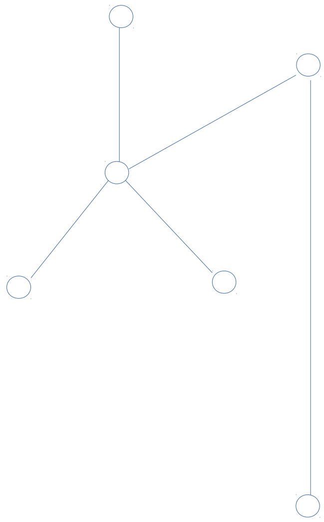
Κεφάλαιο 3

3.2.Διάρθρωση της εργασίας

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας έγιναν μερικά βήματα αυτά είναι

- Συμμετοχή στην ανάπτυξη του κώδικα
- Συμμετοχή στη διόρθωση των λαθών του κώδικα (Debuging)
- Σύγκριση αποτελεσμάτων ιδιοδιανυσματικής ανάλυσης για διάφορες διατάξεις.

Πρώτα ελέγχθηκε η διάταξη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που προκύπτουν από τον κώδικα hGAST

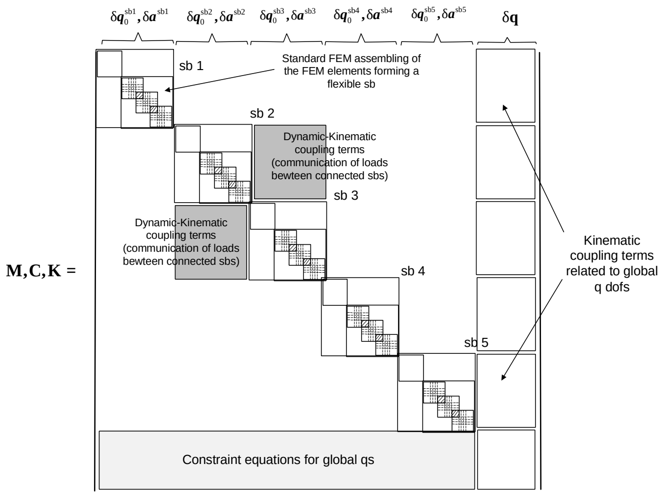


Σχήμα: 3.2:Διάταξη HAWT

Η ιδιοδιανυσματική ανάλυση γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:υπολογίζεται το μητρώο A Ως

$$\left\{\begin{matrix}\dot{\boldsymbol{x}}_1\\ \boldsymbol{x}_2\end{matrix}\right\}=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}\\ \boldsymbol{I} & 0\end{bmatrix}\cdot\left\{\begin{matrix}\boldsymbol{x}_1\\ \boldsymbol{x}_2\end{matrix}\right\} \quad \textit{(Σχέση 3.1)}$$

και υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες και τα ιδιοδιανύσματα του ένας τυπικός πίνακας M,C ή K έχει την μορφή



Σχήμα 3.3:Μορφή πινάκων M,C ή K.

Η μορφή των πινάκων αυτών περιγράφεται ως εξής: στα τρία πτερύγια καθώς και στον άξονα και στον πύργο έχουμε τα πεπερασμένα στοιχεία όπου το ένα επικαλύπτει το άλλο στους κοινούς κόμβους. Στην αντιδιαγώνιο των πεπερασμένων στοιχείων εκτός από μηδενικά εμφανίζονται και οι όροι κινηματικής και δυναμικής σύνδεσης. ,ενώ κάτω βρίσκονται οι εξισώσεις περιορισμών των βαθμών ελευθερίας και τέλος δεξιά βρίσκονται οι κινηματικές συνδέσεις στο σχήμα φαίνονται και οι έξι βαθμοί ελευθερίας του κάθε σώματος ,αυτοί υπάρχουν ώστε να μπορούν να συνδεθούν τα σώματα μεταξύ τους

3.3.Σύγκριση & πιστοποίηση αποτελεσμάτων του καινούργιου κώδικα

Παρακάτω φαίνονται οι ιδιοσυχνότητες του hGAST για διάταξη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, και συγκεκριμένα για την πρότυπη ανεμογεννήτρια ισχύος 10MW που αναπτύχθηκε στο πολυτεχνείο της Δανίας (DTU) στα πλαίσια του ερευνητικού έργου INNWIND.EU [#].

Freq[Hz]	Damping[%]	
0.40431159	-0.00000049	0.40431159
0.43269561	0.00000019	0.43269561
0.54341827	0.00000001	0.54341827
0.57884297	-0.00000000	0.57884297
0.60602716	0.00000003	0.60602716
0.73363627	0.00000002	0.73363627
0.93225638	0.00000000	0.93225638
1.00203064	0.00000008	1.00203064
1.41803459	0.00000000	1.41803459
1.53678775	-0.00000000	1.53678775
1.83804361	-0.00000000	1.83804361
2.01155883	-0.00000000	2.01155883
2.51054720	-0.00000001	2.51054720
2.56687126	-0.00000000	2.56687126
2.82183120	0.00000000	2.82183120
2.93448056	0.00000001	2.93448056
3.07384848	0.00000001	3.07384848
3.32862148	-0.00000000	3.32862148
3.92698419	-0.00000001	3.92698419
4.58364063	-0.00000000	4.58364063
4.92776401	-0.00000000	4.92776401
5.11244591	0.00000000	5.11244591
5.42344267	0.00000000	5.42344267
5.44678513	-0.00000000	5.44678513
5.46290886	-0.00000000	5.46290886
5.75790886	0.00000000	5.75790886
5.92043264	0.00000000	5.92043264
6.18417513	-0.00000000	6.18417513
6.79803740	0.00000000	6.79803740

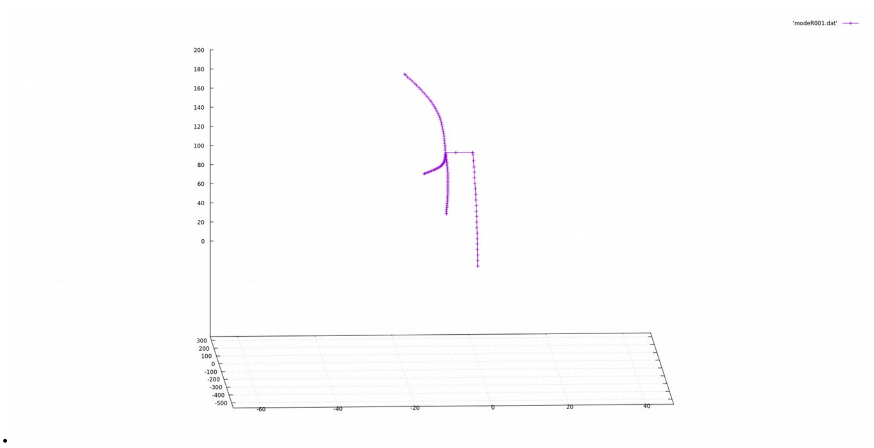
7.06394772	-0.00000000	7.06394772
7.87182303	-0.00000000	7.87182303
8.11710341	0.00000000	8.11710341
8.32173632	-0.00000000	8.32173632
9.03085862	0.00000000	9.03085862
9.47510717	0.00000000	9.47510717
9.49710019	-0.00000000	9.49710019
9.51936681	0.00000000	9.51936681
9.63871147	-0.00000000	9.63871147
9.91555318	0.00000000	9.91555318
10.37016618	0.00000000	10.37016618
10.58820139	0.00000000	10.58820139
11.69504983	0.00000000	11.69504983
12.18099596	0.00000000	12.18099596
12.39538501	-0.00000000	12.39538501
12.91784475	-0.00000000	12.91784475
13.04741415	0.00000000	13.04741415
13.76558562	-0.00000000	13.76558562
13.91902342	0.00000000	13.91902342
13.98189487	-0.00000000	13.98189487
14.04645100	-0.00000000	14.04645100

και στην συνέχεια του καινούργιου κώδικα

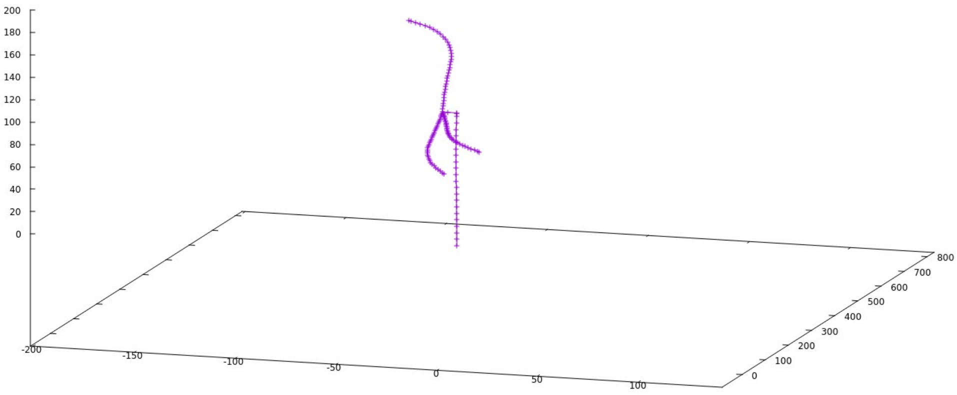
Freq[Hz]	Damping[%]	
0.41490477	0.00000878	0.41490477
0.43558914	-0.00000297	0.43558914
0.55057562	-0.00000110	0.55057562
0.58392276	-0.00000542	0.58392276
0.61251159	-0.00000035	0.61251159
0.73356695	0.00000130	0.73356695
0.93278284	-0.00000006	0.93278284
1.00221131	-0.00000067	1.00221131
1.45994837	0.00000001	1.45994837
1.56557144	0.00000145	1.56557144
1.83835461	-0.00000010	1.83835461
2.09062076	-0.00000027	2.09062076
2.51806560	0.00000064	2.51806560
2.58160541	-0.00000017	2.58160541
2.82563980	-0.00000013	2.82563980
2.98878381	-0.00000000	2.98878381
3.10459178	0.00000003	3.10459178
3.36662241	-0.00000060	3.36662241
3.92653085	-0.00000022	3.92653085
4.77431826	0.00000002	4.77431826
5.03636574	-0.00000006	5.03636574
5.19809478	-0.00000047	5.19809478
5.42352890	0.00000000	5.42352890

5.45282799	-0.00000012	5.45282799
5.47868514	-0.00000006	5.47868514
5.77410195	-0.00000044	5.77410195
5.92931966	0.00000004	5.92931966
6.18724885	0.00000009	6.18724885
6.77790133	-0.00000009	6.77790133
7.05296752	-0.00000069	7.05296752
8.02705341	-0.00000005	8.02705341
8.26907784	0.00000010	8.26907784
8.55161608	0.00000005	8.55161608
9.01808068	-0.00000291	9.01808068
9.47453891	-0.00000001	9.47453891
9.49188078	-0.00000001	9.49188078
9.51648538	-0.00000004	9.51648538
9.65364366	0.00000000	9.65364366
9.92023022	0.00000002	9.92023022
10.38281076	-0.00000110	10.38281076
10.58531648	-0.00000055	10.58531648
11.85642027	-0.00000121	11.85642027
12.19476279	0.00000011	12.19476279
12.42689011	-0.00000002	12.42689011
12.97734158	-0.00000004	12.97734158
13.31136655	-0.00000009	13.31136655
13.76092751	0.00000040	13.76092751
13.92149245	-0.00000000	13.92149245
13.98453953	0.00000022	13.98453953
14.05288402	0.00000004	14.05288402

Παρατηρείται ότιείναι πολύ κοντά μεταξύ τους οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων.
Έτσι με τον καινούργιο κώδικα βγήκαν κάποιες ιδιομορφές για την ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές ιδιομορφές το συστήματος

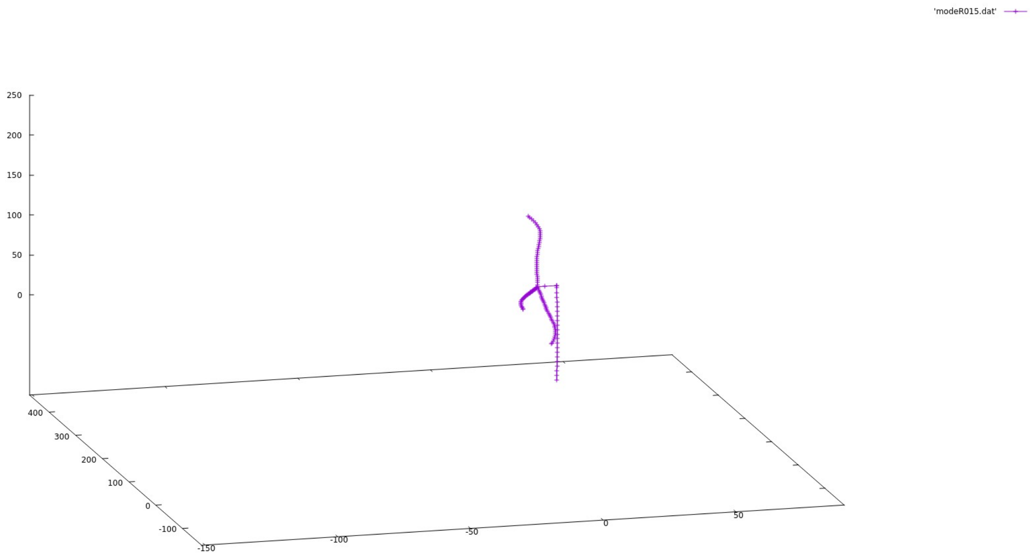


Σχήμα 3.4:Πρώτη ιδιοσυχνότητα HAWT



Σχήμα 3.5: Δέκατη ιδιοσυχνότητα HAWT.

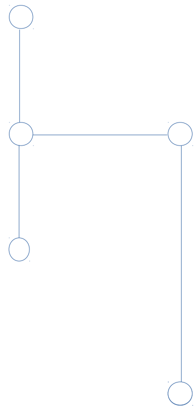
Ο άξονας κάμπτεται μπροστά καθώς και τα πτερύγια-δρομέα



Σχήμα 3.6: Δέκατη πέμπτη ιδιοσυχνότητα HAWT.

3.4.Σύγκριση αποτελεσμάτων καινούργιου κώδικα με της GENFEM

Σαν ενδιάμεσο βήμα (μιας και η μορφή της διάταξης θυμίζει ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα) ελέγχτηκαν οι ιδιοσυχνότητες της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα με ένα φτερό με αυτές του κώδικα με ένα κλασσικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων χωρίς χρήση πολλαπλών σωμάτων GENFEM. το σχήμα της φαίνεται παρακάτω



Σχήμα 3.7:Διάταξη VAWT (μόνο ένα φτερό)

Ο κώδικας GENFEM είναι ένας ήδη πιστοποιημένος κώδικας που πραγματοποιεί παντός είδους σύνδεση μεταξύ σωμάτων, χωρίς ωστόσο να λαμβάνει υπ' όψιν του μη γραμμικά φαινόμενα.

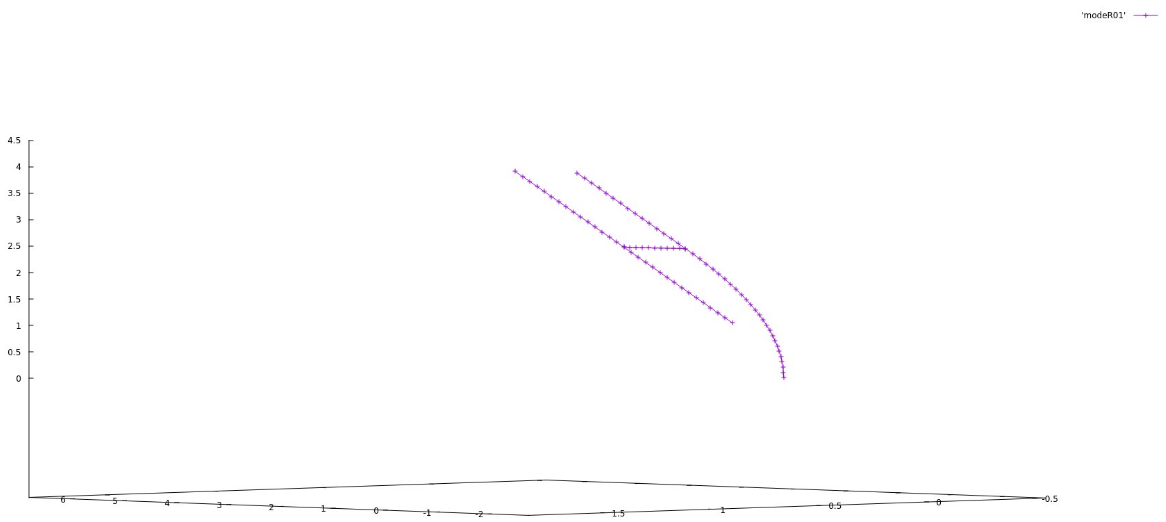
Οι ιδιοσυχνότητες της είναι για τον καινούργιο κώδικα και τον GENFEM.

GENFEM	New_Code
1.61102	1.69065826
2.19309	2.31572170
2.34193	2.34520825
7.99815	8.07329464
8.81092	8.86635021
15.94336	15.95064535
29.12337	29.13001644
31.84556	31.90640978
45.37826	45.38011069
47.83040	48.02700687
51.56532	51.57055630
57.43882	57.48154681
62.20432	62.49371297
64.79482	64.79769752
67.55438	67.73783016
79.72090	80.63025929
87.88898	88.04673961
95.19274	96.69558120
107.50813	107.52116458
111.62529	114.11602535
117.99314	118.37300189
126.22275	129.55587025
138.69137	138.76443384
143.56540	146.86589246
145.78649	148.38694097
147.53813	148.45471393
148.05510	148.84165538

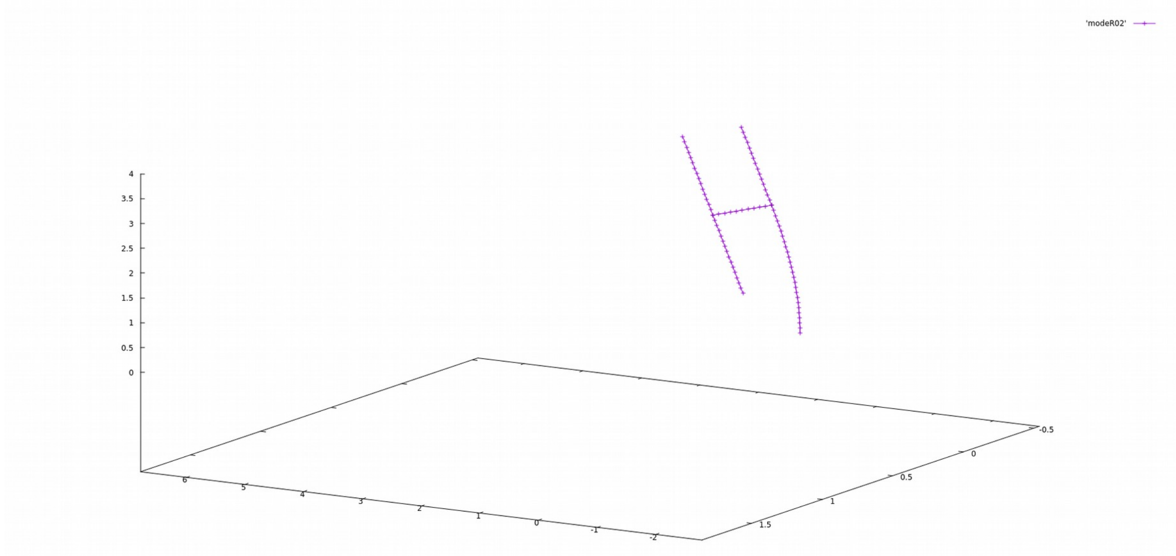
160.07866	166.79273131
175.57767	178.46708812
177.19641	185.15537445
190.83727	192.89558496
192.88582	202.64948324
206.28200	208.27352454

Πίνακας 3.2: Ιδιοσυχνότητες σε Hz VAWT (μόνο ένα φτερό)

Παρακάτω φαίνονται οι ιδιομορφές της παραπάνω διάταξης



Σχήμα 3.8:Πρώτη ιδιομορφή VAWT (μόνο ένα φτερό)

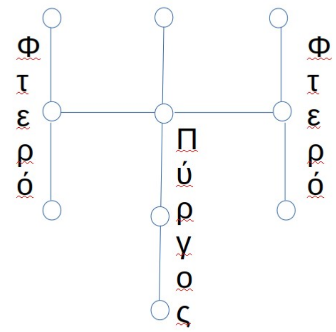


Σχήμα 3.9:Δεύτερη ιδιομορφή VAWT (μόνο ένα φτερό)

Οι παραπάνω ιδιομορφές είναι ενδεικτικές αποτελεσμάτων του κώδικα πιο αναλυτικά δείχνονται οι ιδιομορφές στην επόμενη διάταξη

3.5.Η διάταξη H-type (ενός άξονα)

Ύστερα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τον παλιό κώδικα τρέχτηκε μια τυπική διάταξη ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 3.10:Διάταξη VAWT με έναν άξονα και δύο πτερύγια.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής είναι:

Ύψος πύργου	4 m
Μήκος κάθε αξόνων	1 m
Μήκος κάθε φτερού	2 m
Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής	30 rad/sec
Διάμετρος διατομής (εξωτερική) άξονα	0,42 m
Διάμετρος διατομής (εσωτερική) άξονα	0,239 m
Σταθερά ελαστικότητας άξονα	395E+06 Pa
Πυκνότητα άξονα	7850 kg/m^3
Αριθμός σωμάτων	9

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά πρώτης διάταξης VAWT

Ο υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα έγινε με τον εξής τρόπο: δοκιμάστηκαν διάφορες διάμετροι και τρέχτηκε μόνος του ο άξονας ώστε να υπολογιστεί η πρώτη ιδιοσυχνότητα ώστε να είναι:

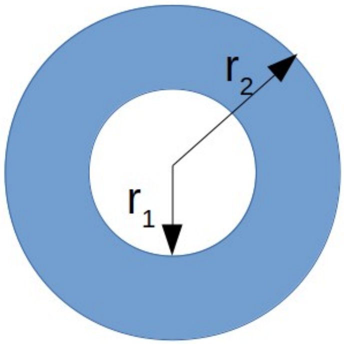
$$\omega_{first}=1{,}875^2\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}\simeq 1{,}5\,p \quad \textit{(Σχέση 3.1.)}$$

όπου p η συχνότητα περιστροφής ,E το μέτρο Young ,I η ροπή αδράνειας, ρ η πυκνότητα,A το εμβαδό και L το μήκος του άξονα ο υπολογισμός τις ιδιοσυχνότητας έγινε στο καινούργιο πρόγραμμα,τα χαρακτηριστικά στοιχεία του αρχείου εισόδου έγινε με τους παρακάτω τύπους:

$$m=\pi\frac{\left(d_2^2-d_1^2\right)}{4}\rho_{IRON} \quad \textit{(Σχέση 3.2.)}$$

$$I_{zz}=I_{xx}=\pi\frac{\left(d_2^4-d_1^4\right)}{64} \quad \textit{(Σχέση 3.3.)}$$

$$I_t = I_{xx} + I_{zz} \quad \textit{(Σχέση 3.4.)}$$



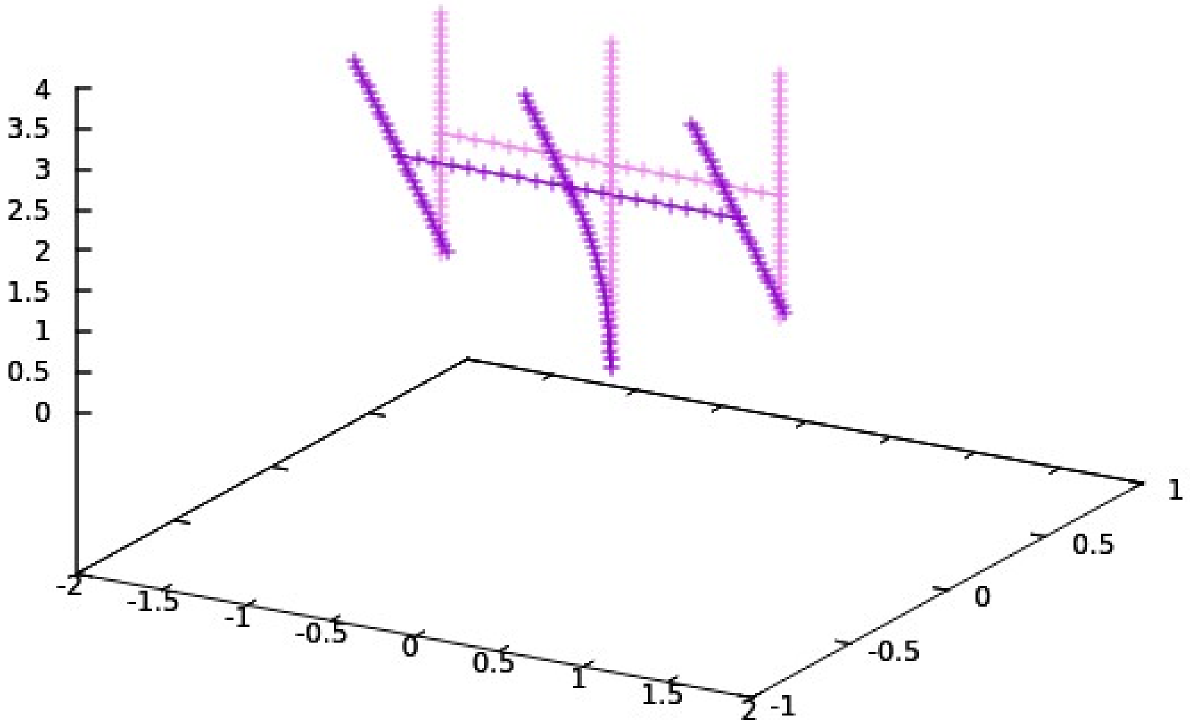
Σχήμα 3.11:Διατομή άξονα VAWT.

Παρακάτω είναι οι ιδιοσυχνότητες των δυο κωδίκων:

GENFEM	New_code
1.15949	1.21859631
1.57573	1.63857693
1.63851	1.65593641
5.57572	5.62879285
6.33081	6.37815595
15.93864	15.94592126
15.94336	15.95064546
15.94336	15.95064550
27.61239	27.62933516
28.49909	28.50469772
29.13512	29.14133235
29.89402	29.91815229
42.61624	42.61623890
42.64020	42.64020629
45.36939	45.36388349
45.53563	45.53667354
47.81625	48.01267911
47.83040	48.02700684
47.83040	48.02700688
56.69483	56.73065376
57.84257	58.13435944
62.12107	62.12422879
64.91426	64.92190570
68.10110	68.10650575
79.69730	80.60586841

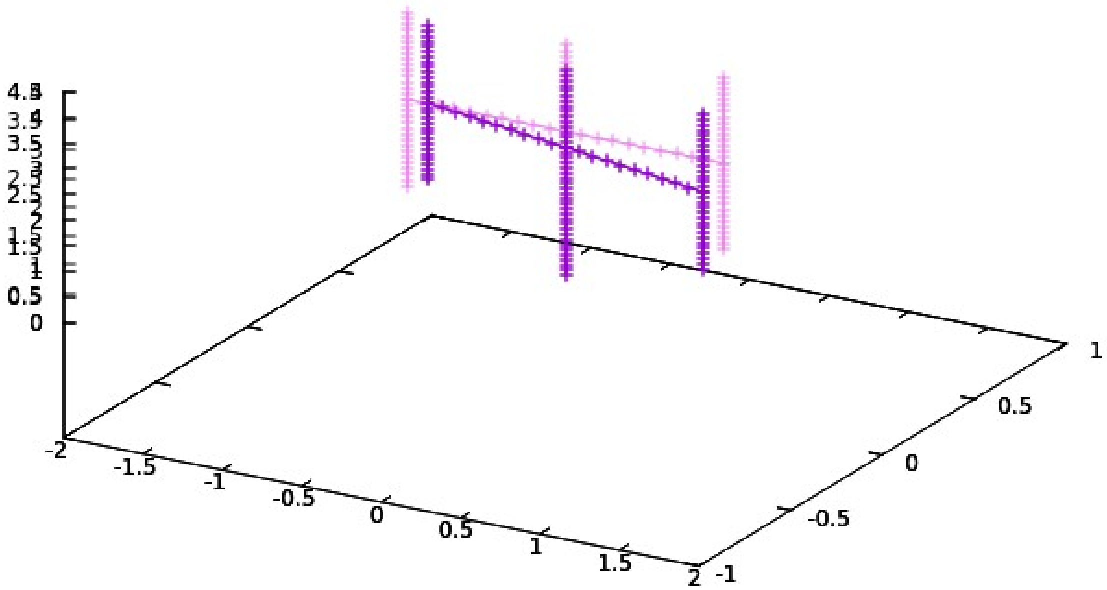
Παρατηρούνται παρόμοιες ιδιοσυχνότητες και στους δύο κώδικες.

Παρακάτω είναι αναλυτικά οι ιδιομορφές:



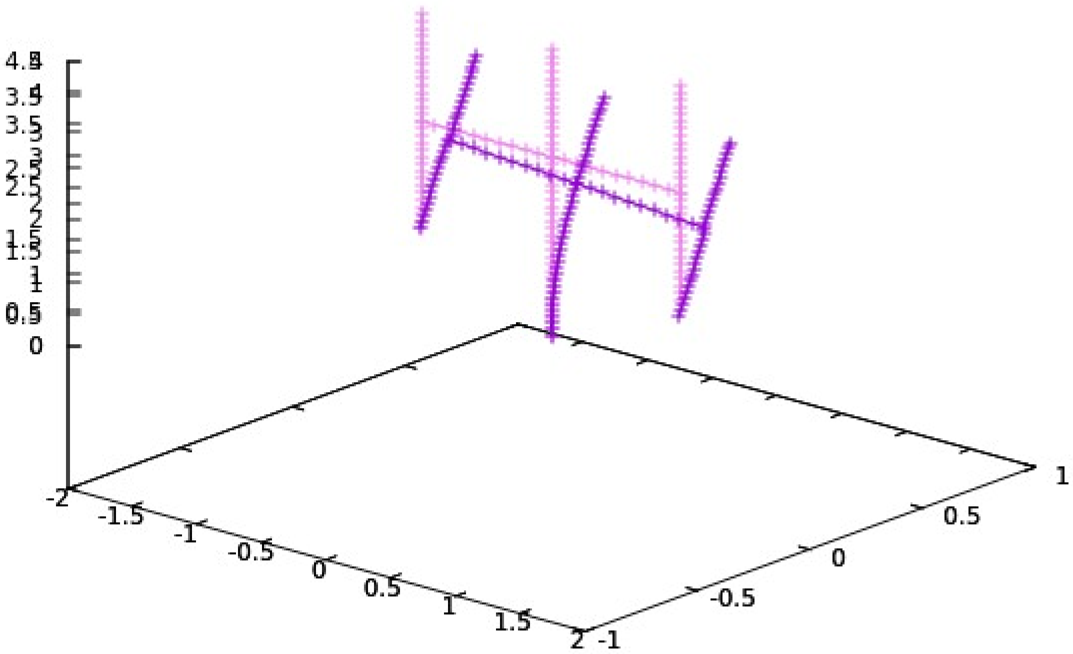
Σχήμα 3.12:Πρώτη ιδιομορφή VAWT.

Όλος ο άξονας και η κατασκευή κάμπτεται αρνητικά του y τα φτερά είναι ίσια στην δικιά τους ευθεία σε σχέση σε σχέση με τον άξονα.



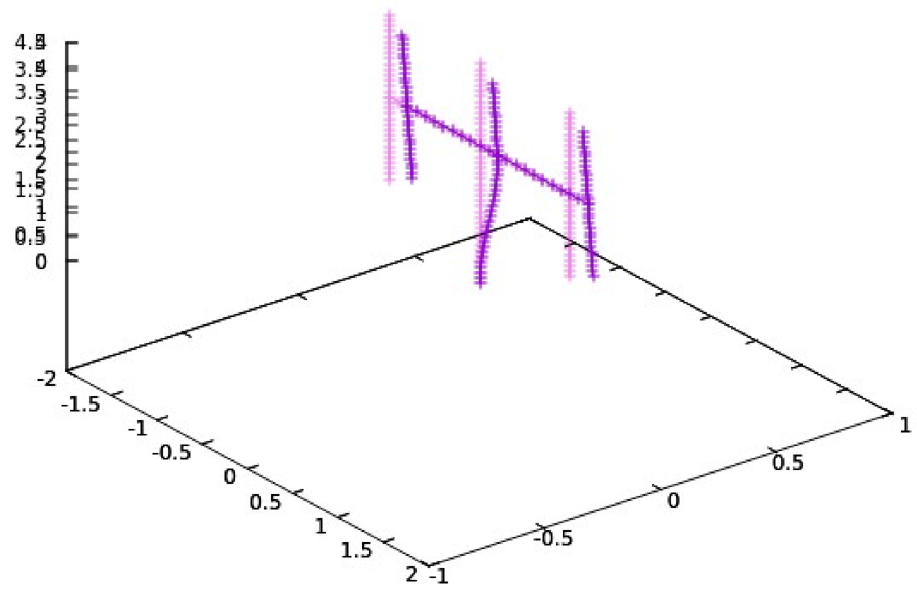
Σχήμα 3.13: Δεύτερη ιδιομορφή VAWT .

Όλος ο άξονας και η κατασκευή στρέφεται αρνητικά του z.



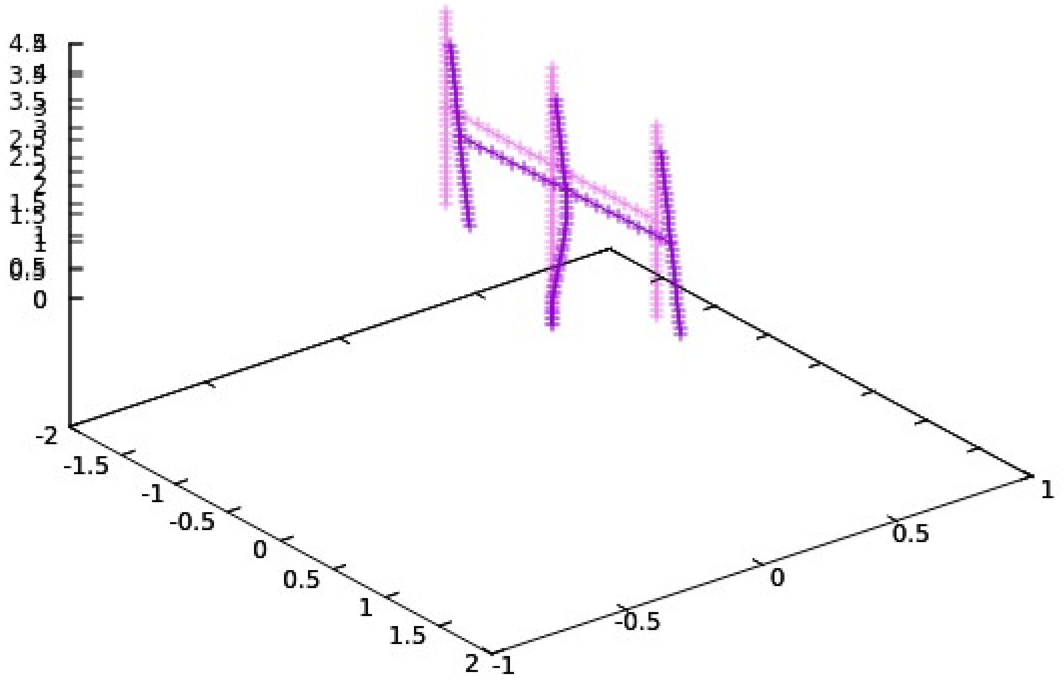
Σχήμα 3.14: Τρίτη ιδιομορφή VAWT.

Τα φτερά κάμπτοτνται σε αυτήν την ιδιομορφή.



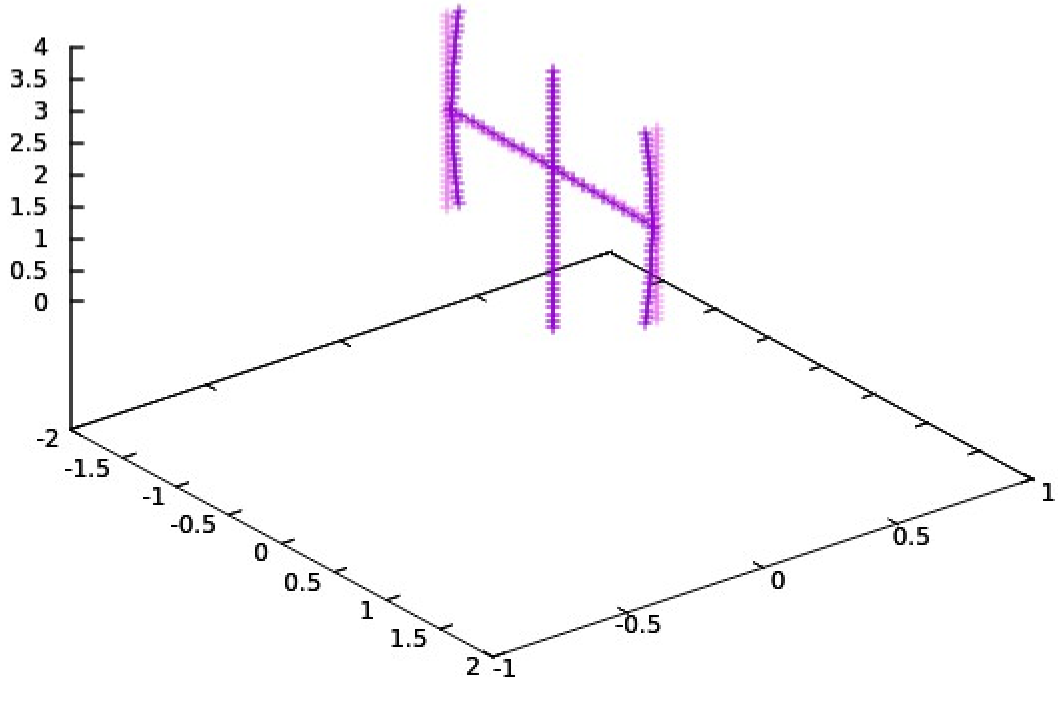
Σχήμα 3.15: Τέταρτη ιδιομορφή VAWT.

Εδώ κάμπτεται ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατά y Σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.16: Πέμπτη ιδιομορφή VAWT

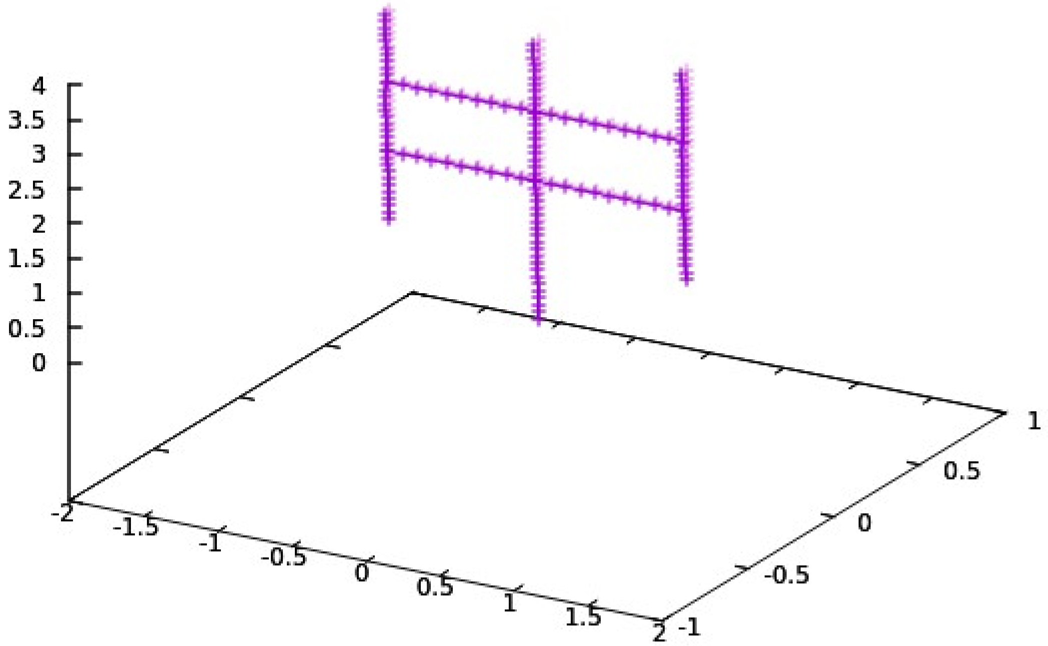
Εδώ κάμπτεται ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατά x.



Σχήμα 3.17: Ένατη ιδιομορφή VAWT.

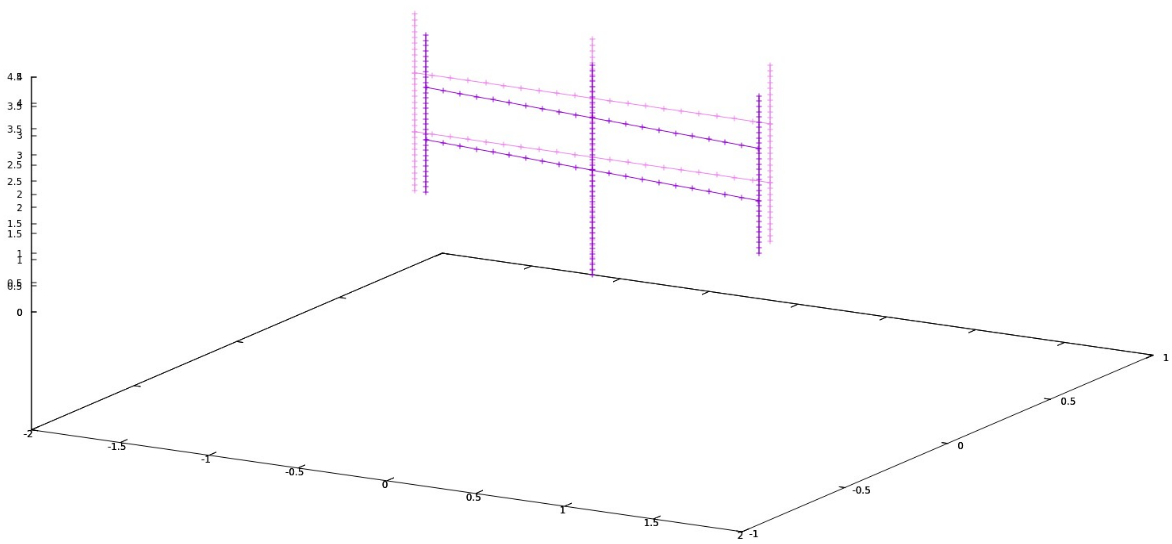
Σε αυτήν την ιδιομορφή κάμπτονται τα φτερά.

3.6 Η διάταξη H-type (δύο αξόνων).



Σχήμα 3.17: Πρώτη ιδιομορφή VAWT

Όλος ο άξονας και η κατασκευή κάμπτεται αρνητικά του y τα φτερά είναι ίσια στην δικιά τους ευθεία σε σχέση σε σχέση με τον άξονα.



Σχήμα 3.17: Δεύτερη ιδιομορφή VAWT

Όλος ο άξονας και η κατασκευή στρέφεται αρνητικά του z.

Συμπεράσματα

Ύστερα από την αναφορά στις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα αναπτύχθηκε ο καινούργιος κώδικας και δοκιμάστηκε με άλλους προηγούμενους κώδικες για διαφορές διατάξεις και ύστερα βγήκαν αποτελέσματα ιδιομορφρών και ιδιοσυχνοτήτων. Ο κώδικας λειτουργεί ικανοποιητικά .Αυτός ο κώδικας μπορεί να τροποποιηθεί επιπλέον να συμπεριλαμβάνει και άλλου είδους συνδέσεις.

Βιβλιογραφία

1) ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ:Γ.ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.,ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ
2) VERTICAL AXIS WIND TURBINES M. Ragheb 3/21/2015
3) ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :Βελτιστοποίηση ανεμογεννητριών κάθετου άξονα τύπου H-Darrieus (H-Darrieus VAWT) ΓΙΩΡΓΟΣ ΜΠΑΓΙΑΤΗΣ
4) Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings, Sander Mertens
5) Blade shape influence on aerodynamic efficiency of a Magnus wind turbine using particle image velocimetry A. Massaguer 1
6) Structural Optimization Of A Vertical Axis Wind Turbine With Aeroelastic Analysis B. Roscher
7) Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I:Assessment of Darrieus VAWT configurations Willy Tjiu , Tjukup Marnoto , Sohif Mat a, Mohd Hafidz Ruslan a , Kamaruzzaman Sopian
8) Review on the Evolution of Darrieus Vertical AxisWind Turbine: Large Wind Turbines Palanisamy Mohan Kumar , Krishnamoorthi Sivalingam , Teik-Cheng Lim 2, Seeram Ramakrishna and He Wei
9) Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modelling stateof the art. part I: Aerodynamics Michael Borg n , Andrew Shires, Maurizio Collu
10) NUMERICAL STUDY OF AEROELASTIC BEHAVIOUR OF A TROPOSKIEN SHAPE VERTICAL AXIS WIND TURBINE.Amin Fereidooni
11) Aeroelastic Modeling of Large Offshore Vertical-axis Wind Turbines: Development of the Offshore Wind Energy Simulation Toolkit Brian C. Owens and John E. Hurtado
12) Comparison of Aero-Elastic Simulations andMeasurements Performed on NENUPHAR's 600kW Vertical Axis Wind Turbine: Impact of the Aerodynamic Modelling Methods F. Blondel1, C. Galinos ,U.Paulsen,P.Bozonnet1, M. Cathelain1,G. Ferrer1, H.A. Madsen G. Pirrung, F. Silvert
13) Hydro-Aero-Elastic analysis of Offshore Wind Turbines Ph.D. Thesis Dimitris Manolas
14) ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΜΨΗΣ/ΣΤΡΕΨΗΣ ,Γιάννης Ανδρέου-Σεραφείμ