

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Μεταπτυχιακή Εργασία

---

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ ΣΕ  
ΔΡΟΜΕΙΣ Α/Γ ΕΠΑΓΩΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ  
ΣΤΡΟΒΙΛΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΜΟΡΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΜΙΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

---

Διαμαντόπουλος Θεόδωρος

Επιβλέπων καθηγητής

Ριζιώτης Βασίλειος

Αθήνα, Ιούνιος 2016



## Ευχαριστίες

Με αφορμή την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Βασίλη Ριζιώτη για την ευκαιρία που μου έδωσε να καταπιαστώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο και για την καίρια καθοδήγησή του. Ευχαριστώ επιπλέον όλους τους ανθρώπους που απαρτίζουν το Εργαστήριο Αεροδυναμικής Ε.Μ.Π. για την αμεσότητά τους, την καλή τους διάθεση και συναδελφικότητα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την άνευ όρων συμπαράσταση τους και την Αγγελική για την στήριξή της τον τελευταίο χρόνο.



## Περίληψη

Σε μεγάλες γωνίες προσβολής οφειλόμενες σε γωνιακή απόκλιση της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τη ροή του αέρα, η ροή κατάντι του πτερυγίου αποκολλάται. Η αποκόλληση έχει ως συνέπεια την δημιουργία εναλλασσόμενων δινών οι οποίες προκαλούν περιοδικές ταλαντώσεις στα πτερύγια με συχνότητα που αντιστοιχεί στον αδιάστατο αριθμό Strouhal.

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάστηκαν οι ταλαντώσεις που προκαλούνται από τις δίνες υπό το παραπάνω καθεστώς ροής. Αρχικά, οι διαταραχές λόγω των δινών προστίθενται στις μέσες τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών των πτερυγίων της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας. Ειδικότερα διερευνάται το ενδεχόμενο συντονισμού που σχετίζεται με το γεγονός ότι η συχνότητα έκλυσης των δινών ταυτίζεται με κάποια από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετάται η εξαναγκασμένη ημι-τονοειδής κίνηση ενός εκ των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας για ένα εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης. Εξετάζεται το ποσό ενέργειας που απορροφάται από το πτερύγιο όταν η συχνότητα της ταλάντωσης συμπίπτει με την συχνότητα έκλυσης των δινών. Αύξηση της ενέργειας υποδηλώνει συνθήκες που ευνοούν τον συντονισμό.

## **Abstract**

Yaw misalignment between the wind turbine and the air flow can lead to high angles of attack, leading to massive flow separation over the entire blade span. As a result, a vortex shedding is evolving downstream giving rise to varying loads with a frequency corresponding to the Strouhal number of the vortices.

In this present thesis the vibrations due to vortex shedding are assessed under the above mentioned flow regime. Firstly the variations of the aerodynamic coefficients derived from the vortices are added to the respective mean values of the wind turbine's blade. More specifically the possibility of resonance is investigated. Resonance is taking place when the frequency of the shedded vortices is equal with one of the structure's natural frequencies.

On the second part of the thesis the behavior under imposed sinusoidal motions of the blade is assessed for a range of frequencies. In this case the amount of the aerodynamic power absorbed by the blade is evaluated. An increase of power implies that the motion favors resonance.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Περιγραφή υπολογιστικών εργαλείων - Αρχές λειτουργίας</b>	<b>3</b>
2.1	Εισαγωγή . . . . .	3
2.2	Ο υπολογιστικός κώδικας hGAST . . . . .	3
2.2.1	Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος . . . . .	3
2.2.2	Θεωρία Δοκού . . . . .	7
2.2.3	Το αεροδυναμικό πρότυπο . . . . .	7
2.3	Ο υπολογιστικός κώδικας FoIL2w . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Απλό Αεροελαστικό Μοντέλο</b>	<b>12</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	12
3.2	Υπολογισμός Αριθμού Strouhal . . . . .	12
3.2.1	Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων . . . . .	21
3.3	Προσθήκη Διαταραχών . . . . .	23
3.3.1	Χαρακτηριστικά των δινών του πτερυγίου (St, fs) - Μελέτη περιπτώσεων. . . . .	25
3.4	Αποτελέσματα - Σχόλια . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Συζευγμένο Αεροελαστικό Μοντέλο</b>	<b>39</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	39
4.2	Ο υπολογιστικός κώδικας GAST-FoIL2w . . . . .	40
4.3	Παραλληλοποίηση με το Πρότυπο Ανταλλαγής Μηνυμάτων MPI . . . . .	42
4.4	Εξαναγκασμένη ημιτονοειδής κίνηση στο πτερύγιο . . . . .	44
4.5	Αποτελέσματα - Σχόλια . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>56</b>
5.1	Συστάσεις για περαιτέρω μελέτη . . . . .	56
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>57</b>

## Κατάλογος σχημάτων

2.1	Τοπικό και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων της A/Γ [2]. . . . .	4
2.2	Κινηματική του στοιχείου ενός υποσώματος [2]. . . . .	6
2.3	Σύστημα συντεταγμένων της δοκού [2] . . . . .	8
2.4	Γωνία προσβολής $\phi$ στην περίπτωση ροής με γωνιακή απόκλιση και αεροελαστική σύζευξη [2]. . . . .	9
2.5	Συνεχής και διακριτή απεικόνιση των φυσικών μεγεθών της αποκολλημένης ροής γύρω από αεροτομή [6]. . . . .	11
3.1	Σχηματιζόμενος ομόρρους για $90^\circ$ μοίρες γωνία προσβολής (αεροτομή FFA-W3-241). . . . .	14
3.2	Χρονοσειρές αεροδυναμικών συντελεστών για $90^\circ$ μοίρες γωνία προσβολής (αεροτομή FFA-W3-241). . . . .	15
3.3	Φασματική ισχύς (PSD) του συντελεστή άνωσης ( $\alpha$ ) και συντελεστή αντίστασης ( $\beta$ ) για τις χρονοσειρές του Σχήματος 3.2. . . . .	17
3.4	Αριθμοί Strouhal σε σχέση με τη γωνία προσβολής ( $\alpha$ ) FFA-W3-241, ( $\beta$ ) FFA-W3-301. . . . .	19
3.5	Αριθμοί Strouhal σε σχέση με τη γωνία προσβολής ( $\alpha$ ) FFA-W3-360, ( $\beta$ ) FFA-W3-480. . . . .	20
3.6	Ιδιοσυχνότητες της ανεμογεννήτριας INNWIND για γωνία βήματος από $0^\circ$ έως $90^\circ$ μοίρες. . . . .	21
3.7	Σύγκριση μέσων τιμών αεροδυναμικών συντελεστών της τριδιάστατης αεροτομής FFA-W3-241 και των μέσων τιμών των χρονοσειρών από το πρόγραμμα FoIL2w. . . . .	24
3.8	Χρονοσειρά της συχνότητας των δινών ( $fs$ ) για $\bar{U} = 25m/s$ στα $2/3$ του πτερυγίου χωρίς (CNF) και με την εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου (CWF). . . . .	26
3.9	Θέση των πτερυγίων για τις μέσες τιμές γωνίας αζιμουθίου. . . . .	27
3.10	Χρονοσειρά της γωνίας αζιμουθίου των τριών πτερυγίων ( $\bar{U} = 25m/s$ ). . . . .	28
3.11	Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (flap-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου. . . . .	29
3.12	Διασταυρώσεις μεταξύ των μέσων συχνοτήτων των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων κατά μήκος του πρώτου πτερυγίου ( $\bar{U} = 5m/s$ ). . . . .	30



3.13	Χρονοσειρά των αδιάστατων, ως προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου, ροπών (edge-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου. . . . .	32
3.14	(α) Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (edge-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου (β) Η αντίστοιχη τυπική απόκλιση. . . . .	33
3.15	Διασταυρώσεις μεταξύ των μέσων συχνοτήτων των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων κατά μήκος του πρώτου πτερυγίου (α) $\bar{U} = 25m/s$ (β) $\bar{U} = 30m/s$ . . . . .	34
3.16	Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (α) flap-wise και (β) edge-wise στη ρίζα του δεύτερου πτερυγίου . . . . .	36
3.17	Διασταυρώσεις μεταξύ των μέσων συχνοτήτων των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων κατά μήκος του δεύτερου πτερυγίου (α) $\bar{U} = 5m/s$ (β) $\bar{U} = 25m/s$ . . . . .	37
4.1	Διακριτές αεροτομές και σχηματιζόμενος ομόρρους (α) και πλάγια όψη (β). Είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του ομόρρου των αεροτομών (quasi-3D). . . . .	41
4.2	Διαμοιρασμός των υπολειπομένων αεροτομών (AIRFOIL STRIPS) στις διεργασίες (MPI PROCS). . . . .	43
4.3	Ιδιομορφές των βαθμών ελευθερίας της εξαναγκασμένης κίνησης κατά μήκος του πτερυγίου. . . . .	46
4.4	Διασταυρώσεις των συχνοτήτων της εξαναγκασμένης κίνησης με τις συχνότητες των δινών κατά μήκος του πτερυγίου ( $St=0.105$ , $U=25m/s$ ). . . . .	47
4.5	Αδιαστατοποιημένη μέση αεροδυναμική ισχύς κατά μήκος του πτερυγίου ( $f=0.94$ Hz). . . . .	48
4.6	Χρονοσειρές $C_L - u^*$ για τις αεροτομές από 68.7 έως 78.2 m εντός της ζώνης συντονισμού (0.94 Hz - coupled). . . . .	49
4.7	Διαγράμματα $C_L - x^*$ για τις αεροτομές από 68.7 έως 78.2 m (0.94 Hz - coupled). . . . .	50
4.8	Διαγράμματα $C_L - x^*$ και $C_L - u^*$ για τις αεροτομές εκατέρωθεν της ζώνης συντονισμού (0.94 Hz - coupled) . . . . .	51
4.9	Διαγράμματα $C_L - x^*$ και $C_L - u^*$ για την αεροτομή στα 80.7 m, $\bar{P}_s^* \approx -0.7$ (0.94 Hz - edge) . . . . .	52
4.10	Αδιαστατοποιημένη μέση αεροδυναμική ισχύς κατά μήκος του πτερυγίου για διάφορες συχνότητες εξαναγκασμένης κίνησης. Οι κάθετες διακεκομμένες γραμμές είναι οι αντίστοιχες διασταυρώσεις σύμφωνα με το Σχήμα 4.4. . . .	54

## Λίστα συντομογραφιών

AF	Asymmetric Flap
CNF	Coherent No Filter
CWF	Coherent With Filter
DFT	Discrete Fourier Transform
DT	Drive Train
EH	asymmetric Edge coupled to Horizontal flexibility
EV	asymmetric Edge coupled to Vertical flexibility
FoIL2w	viscous-inviscid interaction 2D aerodynamic code
FT	asymmetric Flap coupled to Tilt
FY	asymmetric Flap coupled to Yaw
GAST	General Aeroelastic Structural Tool
hGAST	General hydro-Aeroelastic Structural Tool
MPI	Message Passing Interface
NCNF	No Coherent No Filter
NCWF	No Coherent With Filter
NV	No Vortex shedding
PSD	Power Spectral Density
ROP	Rotor Out of Plane
SD	Standard Deviation
SIP	Symmetric In Plane
SIV	Stall Induced Vibrations
TLA	Tower Lateral
TLO	Tower Longitudinal
VIV	Vortex Induced Vibrations
A/Γ	Ανεμογεννήτρια



# 1 Εισαγωγή

Οι ταλαντώσεις που έχουν παρατηρηθεί σε ακινητοποιημένες ανεμογεννήτριες πιθανώς να είναι ένα από τα κύρια αίτια αστοχίας τους. Ενδεχόμενη γωνιακή απόκλιση, της ροής σε σχέση με τον άξονα της Α/Γ, μπορεί να οδηγήσει σε γωνίες προσβολής οι οποίες να κυμαίνονται σε όλο το εύρος από  $-180^\circ$  έως  $180^\circ$  μοίρες προκαλώντας αποκόλληση της ροής κατάντι των πτερυγίων.

Οι μεγάλες τιμές της γωνίας προσβολής οδηγούν σε δύο διαφορετικά αλλά αλληλένδετα είδη ταλαντώσεων. Τις ταλαντώσεις λόγω μεγάλων γωνιών προσβολής και αποκόλλησης της ροής (Stall Induced Vibrations - SIV) και των ταλαντώσεων οφειλόμενων στην έκλυση των δινών (Vortex Induced Vibrations - VIV).

Οι SIV ταλαντώσεις σχετίζονται με την παρουσίαση χαμηλής ή ακόμα και αρνητικής απόσβεσης. Ειδικότερα λόγω της μη γραμμικότητας της αεροελαστικής σύζευξης η απόσβεση του πτερυγίου εξαρτάται από την κλίση του συντελεστή άνωσης σε σχέση με την γωνία προσβολής και με τον συντελεστή αντίστασης.

Οι αρνητικές τιμές της κλίσης του συντελεστή άνωσης που παρατηρείται για μεγάλες γωνίες προσβολής συντελεί σε μείωση της απόσβεσης του πτερυγίου και επομένως σε ευαισθησία του συστήματος σε διαταραχές.

Οι VIV ταλαντώσεις δημιουργούνται λόγω της έκλυσης, διαδοχικών και αντίθετης φοράς, δινών κατάντι του πτερυγίου. Η συχνότητα έκλυσης των δινών ( $f$ ) υπολογίζεται μέσω του αριθμού Strouhal ( $St = fc/U$ ). Στη περίπτωση όπου η συχνότητα των δινών λάβει παραπλήσιες τιμές με τις φυσικές συχνότητες της ανεμογεννήτριας παρατηρείται συντονισμός της κατασκευής.

Οι μελέτες γύρω από την επίδραση των δινών στις ανεμογεννήτριες έχουν επικεντρωθεί στην ανάλυση διαδιάστατων αεροτομών όπου επικρατούν συνθήκες εκτεταμένης αποκόλλησης της ροής. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση της συχνότητας των δινών στις αεροτομές έχει αναλυθεί στο πλαίσιο της εξαναγκασμένης κίνησης του πτερυγίου και στην προσθήκη ελαστικών χαρακτηριστικών [5, 6].

Κατά την εξέταση της εξαναγκασμένης κίνησης διαπιστώθηκε ότι η ενέργεια που απορροφάται από την αεροτομή μεγιστοποιείται στην περίπτωση συντονισμού μεταξύ της συχνότητας της κίνησης και της συχνότητας των δινών [5, 6]. Ενδεχόμενη συνέπεια των παραπάνω είναι η αύξηση των φορτίων που δέχεται η Α/Γ κατά τον συντονισμό. Επιπλέον ανάλογα με το πλάτος της εξαναγκασμένης κίνησης το εύρος του συντονισμού διευρύνεται για ένα εύρος συχνοτήτων καθιστώντας υπό

περιπτώσεις την συχνότητα των δινών ανεξάρτητη της ταχύτητας της ροής.

Στην περίπτωση της ελαστικής αεροτομής τα αποτελέσματα του συντονισμού της συχνότητας των δινών συγκρίνονται με τις φυσικές ιδιομορφές κατά την κατεύθυνση περιστροφής και πτερύγισης, με τον συντονισμό στην ιδιοσυχνότητα της κατεύθυνσης περιστροφής να επιδεικνύει τις μεγαλύτερες αστάθειες.

Στη διεθνή βιβλιογραφία απουσιάζει μια έστω και προσεγγιστική αξιολόγηση της επίπτωσης των VIV ταλαντώσεων σε ολόκληρο το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Για τον παραπάνω λόγο η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση των επιπτώσεων των VIV ταλαντώσεων στην Α/Γ μέσω της προσθήκης των διαταραχών στις μέσες τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της γεωμετρίας του πτερυγίου στην εφαρμογή εξαναγκασμένης κίνησης για ένα εύρος συχνοτήτων. Το πλάτος της κίνησης σταθμίζεται βάσει της φυσικής ιδιομορφής του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση περιστροφής.

## 2 Περιγραφή υπολογιστικών εργαλείων - Αρχές λειτουργίας

### 2.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν ορισμένες προσαρμογές στα ήδη υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία του εργαστηρίου αεροδυναμικής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Ειδικότερα οι τροποποιήσεις εφαρμόστηκαν στον υδρό-σερβό-αέρο-ελαστικό κώδικα hGAST στο πλαίσιο της αεροδυναμικής και στον αέρο-ελαστικό κώδικα GAST-FoIL2w με την παραλληλοποίηση του. Στη συνέχεια, για λόγους συνοχής της εργασίας παρουσιάζονται οι μέθοδοι που διέπουν τα παραπάνω υπολογιστικά εργαλεία. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα υπολογιστικά εργαλεία και στη θεωρία που βασίζεται η ανάπτυξη τους, μπορούν να εξαχθούν από την αντίστοιχη βιβλιογραφία.

### 2.2 Ο υπολογιστικός κώδικας hGAST

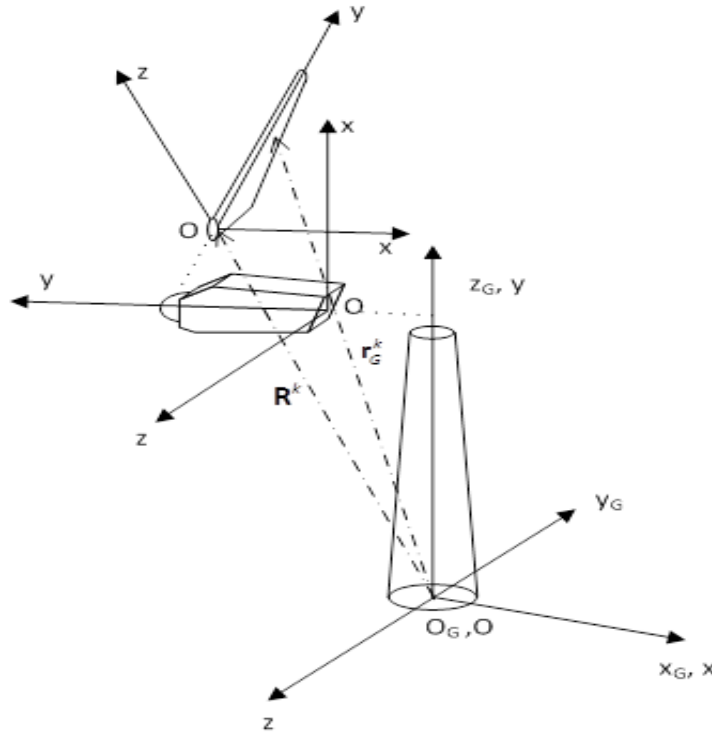
Ο υπολογιστικός κώδικας hGAST αποτελεί έναν συνδυασμό διακριτών και αλληλεπιδρώντων συνιστωσών. Συνοπτικά αναφέρονται οι μέθοδοι προσομοίωσης της αεροδυναμικής, της δυναμικής της κατασκευής, της υδροδυναμικής κτλ. Για την εξεταζόμενη εφαρμογή της χερσαίας ανεμογεννήτριας θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι μεθοδολογίες προσομοίωσης του ελαστικού και του αεροδυναμικού τμήματος του κώδικα.

#### 2.2.1 Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος

Το δυναμικό σύστημα της Α/Γ μοντελοποιείται στη λογική των πολλαπλών σωμάτων. Ειδικότερα η δυναμική της Α/Γ αναλύεται θεωρώντας ότι αποτελείται από ένα σύνολο διασυνδεδεμένων υπό-σωμάτων. Κάθε υπό-σώμα έχει ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων  $[Oxyz]$  όπου σε σχέση με αυτό εκφράζονται οι τοπικές μετατοπίσεις. Οι βαθμοί ελευθερίας του εκάστοτε υπό-σώματος είναι τρεις περιστροφές και τρεις στροφές κατά τους αντίστοιχους τοπικούς άξονες.

Η συσχέτιση μεταξύ του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων  $[Ox_Gy_Gz_G]$  και του εκάστοτε τοπικού πραγματοποιείται μέσω των μητρώων θέσης  $R$  και μητρώων στροφής  $T$ . Σύμφωνα με τα παραπάνω η  $k$  συνιστώσα του διανύσματος θέσης εκφράζεται ως προς το αδρανειακό ως εξής [2]:

$$\begin{aligned}
\hat{r}_G^k &= R^k + T^k \hat{r}^k \\
\dot{\hat{r}}_G^k &= \dot{R}^k + \dot{T}^k \hat{r}^k + T^k \dot{\hat{r}}^k \\
\ddot{\hat{r}}_G^k &= \ddot{R}^k + \ddot{T}^k \hat{r}^k + 2\dot{T}^k \dot{\hat{r}}^k + T^k \ddot{\hat{r}}^k
\end{aligned} \tag{2.1}$$



Σχήμα 2.1: Τοπικό και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων της Α/Γ [2].

Το διάνυσμα θέσης  $R$  και μητρώο στροφής  $T$  εξαρτώνται από τις μετατοπίσεις και τις στροφές όλων των υπό-σωμάτων. Συγκεντρώνοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος εισάγονται οι κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας  $q$ . Λόγω της μη γραμμικής εξάρτησης των μητρώων με τους κινηματικούς βαθμούς ελευθερίας (2.1) ανεξάρτητα του μοντέλου της δοκού [2], γραμμικοποιούνται οι εκφράσεις των  $R$  και  $T$  θεωρώντας μικρές διαταραχές (small perturbations) και αμελώντας τους προκείμενους όρους 2<sup>ης</sup> τάξης.

Η θεώρηση των υπό-σωμάτων για τα διακριτά τμήματα της Α/Γ (περυγία, πύργος, νασέλα κτλ.) ανάγεται και στο πλαίσιο του εκάστοτε υπό-σώματος. Έτσι τα περυγία μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο δοκών (beam-elements) όπου παρομοίως το εκάστοτε υπό-στοιχείο έχει

το δικό του τοπικό σύστημα συντεταγμένων [Oxyz] το οποίο ακολουθεί τις παραμορφώσεις του σώματος που ανήκει. Τα δύο άκρα της δοκού θεωρούνται ως η αρχή του τοπικού συστήματος (P1) και του ελεύθερου άκρου (P2).

Το εκάστοτε διάνυσμα θέσης  $R^k_\nu$  της  $\nu$  δοκού εκφράζεται συναρτήσει του συστήματος συντεταγμένων του  $k$  σώματος που ανήκει  $[0_k x_k y_k z_k]$  και του αντίστοιχου μητρώου στροφής  $T^k_\nu$ . Τα παραπάνω εξαρτώνται από το αντίστοιχο διάνυσμα  $\hat{q}_\nu^k$  το οποίο περιλαμβάνει τις μετατοπίσεις και τις στροφές των άκρων της δοκού.

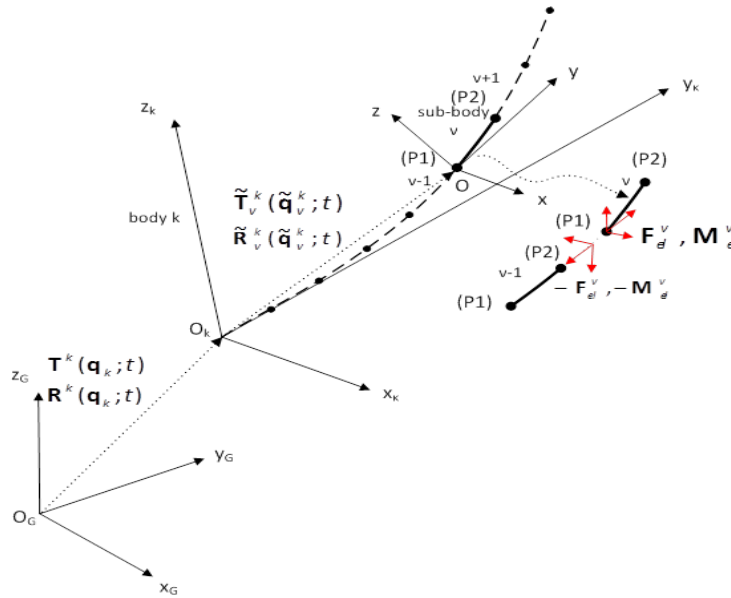
Η κατάλληλη διαμέριση των υπό-σωμάτων σε ένα διακριτό πλήθος δοκών επιτρέπει την θεώρηση των μικρών παραμορφώσεων. Σύμφωνα με το παραπάνω μπορεί το εκάστοτε στοιχείο να μοντελοποιηθεί μέσω γραμμικών εξισώσεων δοκού.

Το διάνυσμα θέσης ενός τυχαίου σημείου που ανήκει στο 'ν' υπό-σώμα του  $k$  σώματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς είναι:

$$\hat{r}_{G,\nu}^k = R^k(\hat{q}_k; t) + T^k(\hat{q}_k; t) \left\{ R^k(\hat{q}_k; t) + T^k(\hat{q}_k; t) \hat{r}_\nu^k \right\} \quad (2.2)$$



Ο όρος  $\hat{r}_v^k$  εκφράζει το τυχαίο διάνυσμα θέσης στην παραμορφωμένη κατάσταση έτσι όπως μοντελοποιείται από την θεωρία δοκού (Timoshenko). Το φορτία ( 3 δυνάμεις και 3 ροπές) του ελεύθερου άκρου (P2) του εκάστοτε υπό-σώματος μεταφέρονται στην αρχή του (P1) γειτονικού του.



Σχήμα 2.2: Κινηματική του στοιχείου ενός υποσώματος [2].

### 2.2.2 Θεωρία Δοκού

Η θεωρία δοκού συσχετίζει την अपαραμόρφωτη κατάσταση ενός τυχαίου διανύσματος θέσης με την παραμορφωμένη. Έστω το σύστημα αξόνων  $[Oxyz]$  όπου η δοκός είναι απαραμόρφωτη και ο ελαστικός άξονας συμπίπτει με τον άξονα  $y$  ενώ οι υπόλοιποι άξονες συμπίπτουν με τις καμπτικές κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το μοντέλο δοκού πρώτης τάξης το τυχαίο διάνυσμα θέσης της παραμορφωμένης κατάστασης δίνεται από την παρακάτω διανυσματική εξίσωση:

$$\begin{aligned} \hat{r}(\hat{r}_o; t) &= \hat{r}_o + \hat{S}(x_o, z_o)\hat{u}(y_o; t) = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_o & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_o & 0 & x_o \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -x_o & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Ως  $\hat{r}_o$  συμβολίζεται το διάνυσμα θέσης στην απαραμόρφωτη κατάσταση. Το διάνυσμα  $\hat{u}(y_o; t)$  περιέχει της καμπτικές μετατοπίσεις  $u$ ,  $w$ , την αξονική μετατόπιση  $v$ , την γωνία συστροφής  $\theta_y$  και τις καμπτικές γωνίες  $\theta_x$ ,  $\theta_z$ .

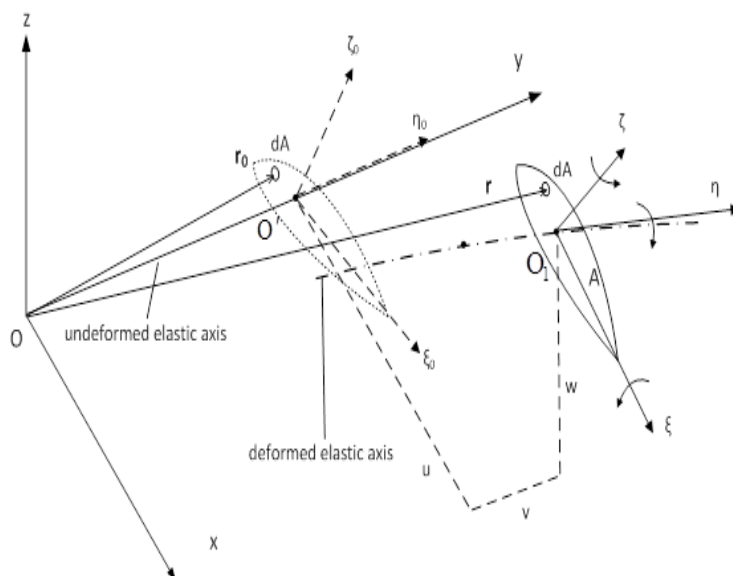
Για τη συσχέτιση των τάσεων-παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται οι ορισμοί των τάσεων κατά Green και ο νόμος του Hooke. Έπειτα από ολοκλήρωση σε οποιαδήποτε διατομή της δοκού προκύπτουν οι εσωτερικές δυνάμεις και ροπές οι οποίες θα εισαχθούν στην συνέχεια στις εξισώσεις ισορροπίας. Οι εξισώσεις ισορροπίας προκύπτουν από την εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα και είναι αυτές οι οποίες διακριτοποιούνται στη συνέχεια με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Η τελική μορφή του συστήματος των εξισώσεων σε μητρική μορφή (Εξίσωση 2.4) περιλαμβάνει τα μητρώα μάζας  $M$ , απόσβεσης  $C$  και δυσκαμψίας  $K$  καθώς επίσης και τις εξωτερικές δυνάμεις  $Q$ . Τονίζεται η εξάρτηση των δυνάμεων από τους βαθμούς ελευθερίας  $X$  και τις παραγώγους αυτών. Το παραπάνω συνιστά ότι το σύστημα των εξισώσεων είναι μη γραμμικό.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = Q \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Το αεροδυναμικό πρότυπο

Τα αεροδυναμικά φορτία στο πλαίσιο της εργασίας επιλέχθηκαν να υπολογίζονται βάσει του πρότυπου δίσκου ορμής ( Blade Element Momentum



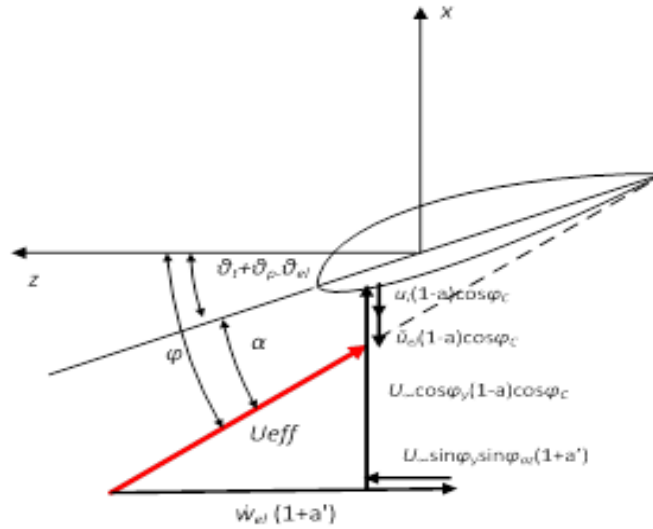
Σχήμα 2.3: Σύστημα συντεταγμένων της δοκού [2]

Theory). Αναφέρεται ότι ο υπολογιστικός κώδικας περιλαμβάνει και την δυνατότητα υπολογισμού των αεροδυναμικών φορτίων με ένα σύνθετο τρισδιάστατο πρότυπο ελεύθερου ομόρρου, το οποίο δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Πιο συγκεκριμένα στο πρότυπο του δίσκου ορμής υπολογίζονται οι συντελεστές επαγωγής (induction factors)  $a$  και  $a'$ . Οι συντελεστές προκύπτουν από την διατήρηση της ορμής και της στροφορμής σε άνευ απωλειών, μόνιμης και μονοδιάστατης άξονοσυμμετρικής ροής. Στη παρούσα μελέτη, όπου η εξεταζόμενη A/G βρίσκεται σε άεργη λειτουργία (idle), οι συντελεστές θεωρούνται μηδενικοί, όπως και στην περίπτωση ακινητοποιημένης A/G.

Αντίστοιχα ορίζονται οι συνιστώσες τις σχετικής ταχύτητας όπου στην περίπτωση της αεροελαστικής σύζευξης λαμβάνονται και οι ανάλογες κατά κατεύθυνση ταχύτητες των ελαστικών παραμορφώσεων. Ενδεικτικά στο Σχήμα 2.4 είναι εμφανής η συσχέτιση της γωνίας προσβολής  $\phi$  με τις ελαστικές ταχύτητες  $\dot{w}_{el}$  και  $\dot{u}_{el}$ . Επιπλέον συνυπολογίζονται η γωνία λόγω ελαστικής στρέψης  $\theta_{el}$  οι γωνίες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου ( γωνία συστροφής  $\theta_t$ , βήματος  $\theta_p$  ), η γωνία λόγω απόκλισης (yaw) του αέρα ( $\phi_y$ ) και η γωνία κώνου ( $\phi_y$ ).

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι συντελεστές των δυνάμεων  $C_n$  και  $C_t$  της κάθετης και εφαπτόμενης δύναμης στο επίπεδο του δρομέα αντί-



Σχήμα 2.4: Γωνία προσβολής  $\phi$  στην περίπτωση ροής με γωνιακή απόκλιση και αεροελαστική σύζευξη [2].

στοιχα 2.5.

$$\begin{aligned} C_n &= C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \\ C_t &= C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \end{aligned} \quad (2.5)$$

Οι αεροδυναμικοί συντελεστές άνωσης  $C_L$  και αντίστασης  $C_D$  είναι σταθεροί στον χρόνο και εξαρτώνται αποκλειστικά από την γωνία προσβολής. Επιπλέον έχουν υπολογιστεί για διαστάτες αεροτομές είτε από πειραματικά δεδομένα είτε από λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Στις παραπάνω τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών θα προστεθούν για την εξεταζόμενη  $A/\Gamma$  οι διαταραχές λόγω μεγάλων γωνιών προσβολής όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.

## 2.3 Ο υπολογιστικός κώδικας FoIL2w

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται συνοπτικά η βασική μέθοδος που εφαρμόζεται στον υπολογιστικό κώδικα FoIL2w. Αρχικά περιγράφονται οι κυρίαρχες εξισώσεις όπου βασίζεται ο κώδικας σε συνδυασμό με την αριθμητική μεθοδολογία επίλυσης που ακολουθείται.

Σύμφωνα με τη θεωρία του δυναμικού, το πεδίο της ταχύτητα  $u$  γύρω από μια αεροτομή δύναται να εκφραστεί ως (Εξίσωση 2.6). Όπου  $U_\infty$  είναι η ταχύτητα της επ'άπειρου ροής και  $u_i$  εκφράζει την διαταραχή της ταχύτητας παρουσία της αεροτομής.

$$u(x; t) = U_\infty(x; t) + u_i(x; t) \quad (2.6)$$

Για υψηλές γωνίες προσβολής όπου κυριαρχεί η αποκόλληση της ροής κατάντι του πτερυγίου υιοθετείται η μεθοδολογία του διπλού ομόρρου όπου εκτός από την έκλυση των δινών από την ακμή εκφυγής, εκλύονται δίνες και από το σημείο αποκόλλησης. Στην παρούσα μελέτη όπου οι εξεταζόμενες γωνίες προσβολής λαμβάνουν τιμές σε όλο το εύρος  $[-180^\circ, 180^\circ]$ , το σημείο αποκόλλησης ταυτίζεται με το χείλος προσβολής.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Green το πεδίο των ταχυτήτων των διαταραχών  $u_i$ , για μη συνεκτική ροή, μπορεί να εκφραστεί μέσω της διανομής ιδιομορφιών (singularities) στην αεροτομή και στον ομόρρο. Στο σύνορο  $S$  της αεροτομής διαμοιράζονται όροι  $\sigma$  πηγών και επιφανειακής στροβιλότητας  $\gamma$ .

$$\begin{aligned} u_i(x_o; t) = & \int_S \sigma(x; t) \frac{r}{2\pi r^2} ds(x) + \int_S \gamma(x; t) \frac{r \times k}{2\pi r^2} ds(x) \\ & + \int_{S_w} \gamma_w(x_w; t) \frac{r \times k}{2\pi r^2} ds(x_w) + \int_{S_s} \gamma_s(x_s; t) \frac{r \times k}{2\pi r^2} ds(x_s) \end{aligned} \quad (2.7)$$

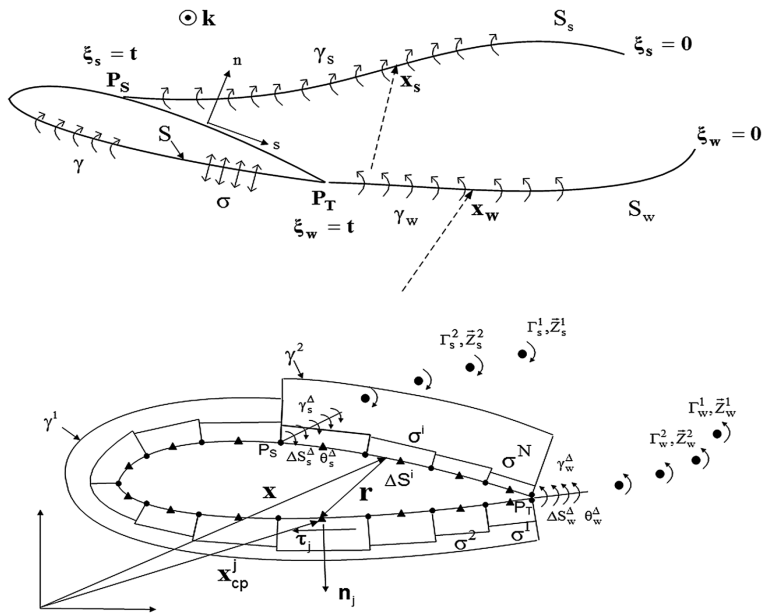
Όπου  $r = x_o - x$  είναι το διάνυσμα της απόστασης μεταξύ του σημείου  $x$  όπου υπολογίζεται η ταχύτητα και ενός τυχαίου σημείου  $x$  της ιδιομορφίας είτε στην επιφάνεια της αεροτομής είτε του ομόρρου. Ενώ το μοναδιαίο διάνυσμα  $k$  είναι κάθετο στο επίπεδο της ροής.

Μέσω της εξίσωσης 2.7 το αριθμητικό πρόβλημα για κάθε χρονικό βήμα, ανάγεται στον υπολογισμό των πηγών στην επιφάνεια της αεροτομής  $\sigma^i$ , στην κατανομή της στροβιλότητας της αεροτομής  $\gamma^{1,2}$  και στην κατανομή στροβιλότητας του κοντινού ομόρρου για τα δύο φύλλα στροβιλότητας  $\gamma^{\Delta_{1,2}}$ .

Οι συνολικοί άγνωστοι υπολογίζονται ικανοποιώντας τις παρακάτω συνθήκες [1, 6] καταλήγοντας για την εκάστοτε χρονική στιγμή σε ένα

γραμμικό σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.

- Τη συνθήκη μη εισχώρησης στο κέντρο του εκάστοτε στοιχείου  $x_{cp}$
- Χρήση του θεωρήματος του Kelvin σύμφωνα με το οποίο η κυκλοφορία διατηρείται γύρω από οποιαδήποτε υλική γραμμή που εμπεριέχει την αεροτομή.
- Συνθήκης Kutta η οποία επιβάλλει μηδενική διαφορά πίεσης εκατέρωθεν των γραμμών εκπομπής του ομόρρου.



Σχήμα 2.5: Συνεχής και διακριτή απεικόνιση των φυσικών μεγεθών της αποκολλημένης ροής γύρω από αεροτομή [6].

## 3 Απλό Αεροελαστικό Μοντέλο

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε, στον αεροελαστικό κώδικα hGAST, για την προσομοίωση των περιοδικών φορτίων που προκύπτουν σε μεγάλες γωνίες προσβολής λόγω αποκόλλησης της ροής και ταυτόχρονη έκλυση δινών στον ομόρρου. Στο πρώτο μέρος αναλύεται ο υπολογισμός των αεροδυναμικών φορτίων των δισδιάστατων αεροτομών που απαρτίζουν την πτέρυγα της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας. Αναφέρεται ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το υπολογιστικό εργαλείο FoIL2w, για ένα εύρος γωνιών προσβολής από  $-135^\circ$  έως  $135^\circ$  μοίρες. Τα παραπάνω είχαν ως στόχο την εξαγωγή του αριθμού Strouhal συναρτήσεως της γωνίας προσβολής για την εκάστοτε αεροτομή. Αναφέρεται ότι για  $Re > 10^6$  ο αριθμός St εξαρτάται κυρίως από την γωνία προσβολής [6]. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοτιμών της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας. Ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος συντελεί στην αποτίμηση ενός ενδεχομένου συντονισμού μεταξύ των συχνοτήτων έκλυσης των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων της Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα ο συντονισμός αναμένεται να εμφανιστεί στην περίπτωση όπου η συχνότητα εναλλαγής των στροβίλων του ομόρρου, εξαρτώμενη από τον αριθμό Strouhal ( $f_s$ ), λάβει παραπλήσια τιμή με μια από τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής. Στο τρίτο μέρος αναλύεται η προσθήκη των παραπάνω στον αεροελαστικό κώδικα και οι εξεταζόμενες περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Τέλος στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αναλύονται τα αποτελέσματα και τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

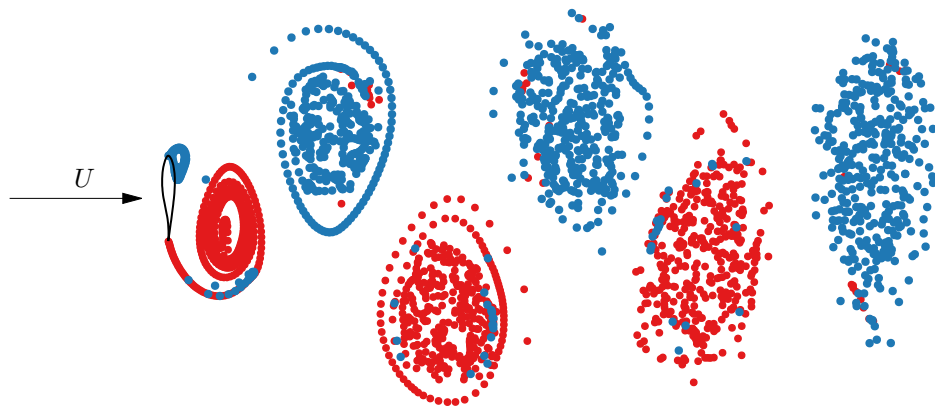
### 3.2 Υπολογισμός Αριθμού Strouhal

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται ο υπολογισμός του αριθμού Strouhal για τέσσερα διαφορετικά πάχη αεροτομών από 24% έως 48% και για γωνίες προσβολής από  $-135^\circ$  έως  $135^\circ$ . Αναφέρεται ότι οι αεροτομές της ανεμογεννήτριας INNWIND ανήκουν στη σειρά FFA [3]. Επιπλέον τονίζεται ότι ο έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων του λογισμικού FoIL2w έχει ήδη πραγματοποιηθεί [6] και δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας ανάλυσης.

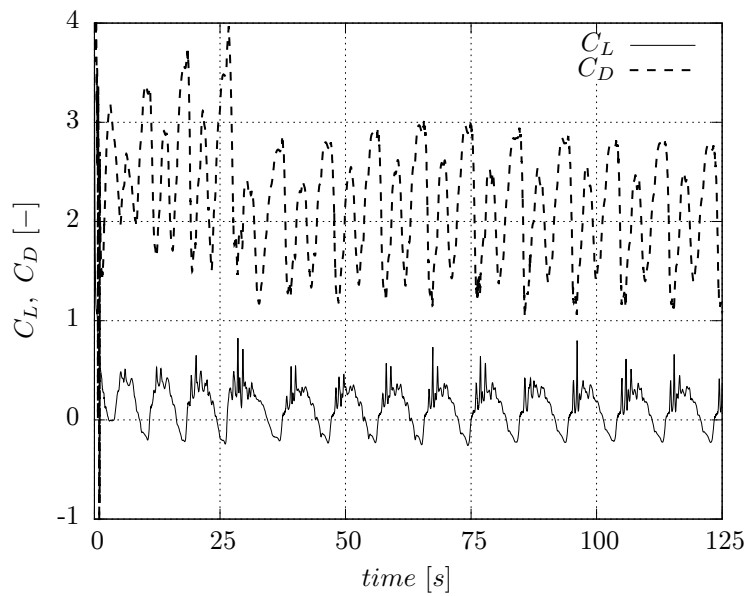
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ο ομόρρους που σχηματίζεται για γωνία προσβολής ίση με  $90^\circ$  μοίρες για την αεροτομή FFA-W3-241. Ο ομόρρους εμφανίζει χαρακτηριστική δομή δινών κατά Karman. Πιο συγκεκριμένα οι δίνες που παράγονται λόγω αποκόλλησης της ροής στην ακμή προσβολής και εκφυγής εναλλάσσονται με συχνότητα ( $f_s$ ) η οποία

καθορίζει και τον αριθμό Strouhal ( $St = f_s c/U$ ). Ο σχηματισμός της δίνης στην ακμή προσβολής δημιουργεί τοπική αύξηση της ταχύτητας της ροής σε αυτή την περιοχή με την αντίστοιχη μείωση της πίεσης. Στο παραπάνω στιγμιότυπο ο συντελεστής άνωσης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή. Ομοίως συμβαίνει και κατά την έκλυση της δίνης στην ακμή εκφυγής όπου ο συντελεστής άνωσης λαμβάνει την ελάχιστη τιμή του (Σχήμα 3.1 και 3.2) . Συμπερασματικά, η συχνότητα μεταβολής του συντελεστή άνωσης συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα σχηματισμού των δινών ( $f_s$ ). Αναφορικά με τον συντελεστή αντίστασης η συχνότητα μεταβολής των τιμών του είναι  $(2f_s)$  [6].





Σχήμα 3.1: Σχηματιζόμενος ομόρρους για  $90^\circ$  μοίρες γωνία προσβολής (αεροτομή FFA-W3-241).

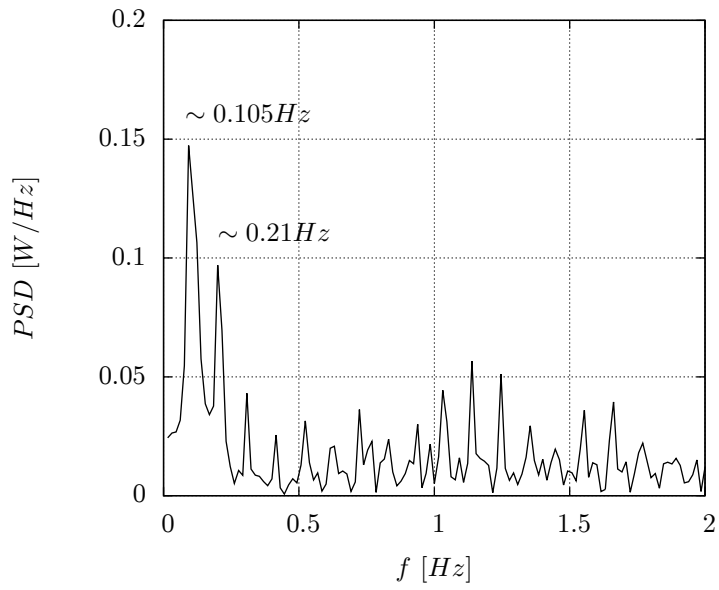


Σχήμα 3.2: Χρονοσειρές αεροδυναμικών συντελεστών για  $90^\circ$  μοίρες γωνία προσβολής (αεροτομή FFA-W3-241).

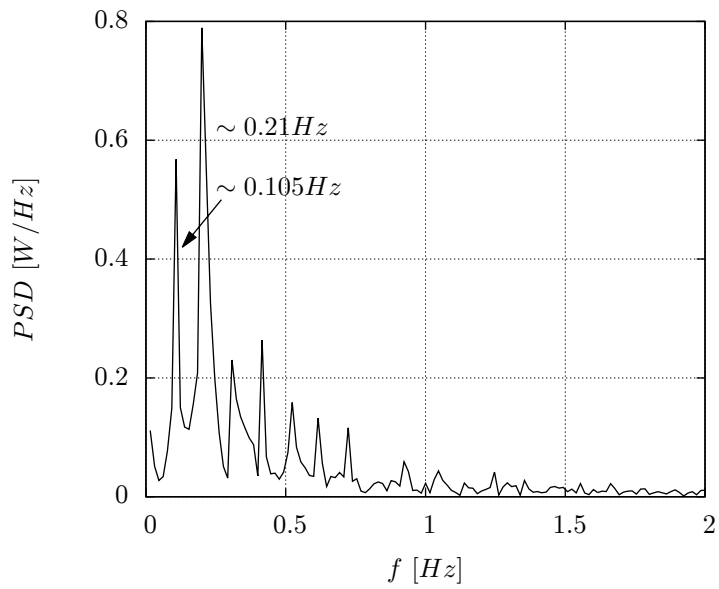
Για τη διερεύνηση της συχνότητας που κυριαρχεί στους αεροδυναμικούς συντελεστές επομένως και στα φορτία που δέχεται η αεροτομή, πραγματοποιήθηκε διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) για την εκάστοτε αεροτομή και για το εύρος των εξεταζόμενων γωνιών προσβολής. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού για την αεροτομή FFA-W3-241 και για  $90^\circ$  γωνία προσβολής (Σχήμα 3.3)

Η φασματική ισχύς (PSD) του αεροδυναμικού συντελεστή άνωσης εμφανίζει μέγιστη τιμή για  $\sim 0.105Hz$  ενώ η αμέσως μεγαλύτερη τιμή αντιστοιχεί σε  $\sim 0.21Hz$ . Σχετικά με τον αεροδυναμικό συντελεστή αντίστασης η κυριαρχούσα συχνότητα είναι η  $\sim 0.21Hz$ . Ο διπλασιασμός της συχνότητας έναντι του συντελεστή άνωσης δύναται να επαληθευτεί ποιοτικά και από τις αντίστοιχες χρονοσειρές (Σχήμα 3.2).

Συμπερασματικά παρατηρείται ότι οι συχνότητες που επικρατούν στους αεροδυναμικούς συντελεστές, η κάθε μια με διαφορετικό ποσοστό συνεισφοράς είναι τελικά δύο. Με γνώμονα τα παραπάνω για την προσέγγιση των αεροδυναμικών συντελεστών και συνεπαγωγικά των φορτίων λόγω αποκόλλησης, λαμβάνονται υπ' όψιν οι δύο πρώτες αρμονικές των σειρών Fourier.



(α')



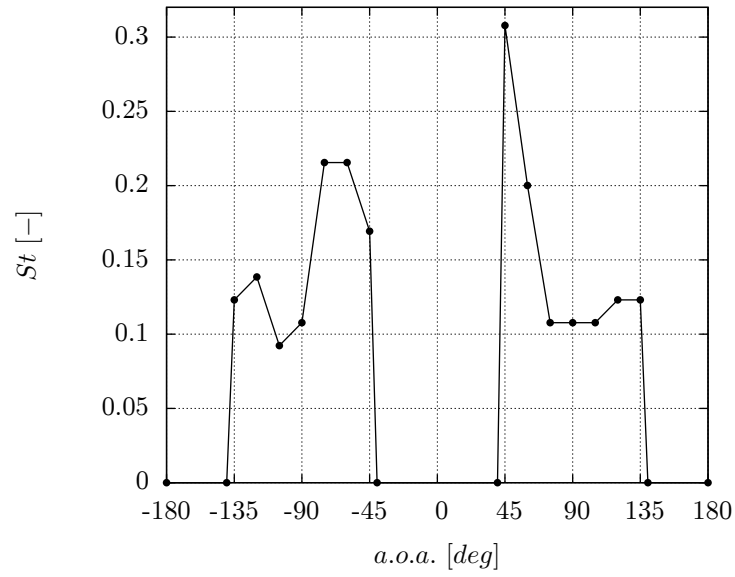
(β')

Σχήμα 3.3: Φασματική ισχύς (PSD) του συντελεστή άνωσης (α) και συντελεστή αντίστασης (β) για τις χρονοσειρές του Σχήματος 3.2.

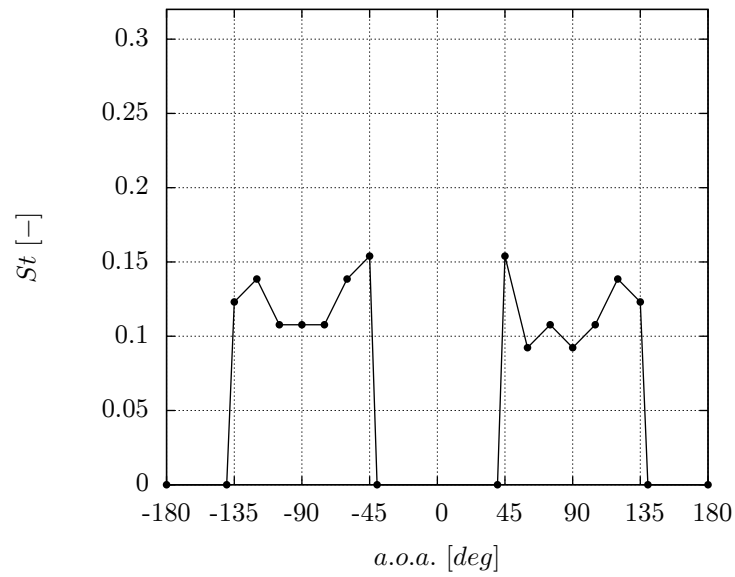
Τα αποτελέσματα από τον μετασχηματισμό Fourier πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητα ροής ίση με  $U = 1m/s$  και για χορδή  $c = 1m$ . Από τον ορισμό του αδιάστατου αριθμού Strouhal και για τις παραπάνω τιμές, προκύπτει ότι η κυριαρχούσα συχνότητα του αεροδυναμικού συντελεστή άνωσης είναι ίση με τον αριθμό Strouhal ( $St = f_s$ ).

Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται οι αριθμοί Strouhal όπως προκύπτουν από τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier για τον συντελεστή αεροδυναμικής άνωσης. Οι υπολογισμοί περιορίστηκαν για ένα εύρος γωνιών προσβολής από  $-135^\circ$  έως  $-45^\circ$  και από  $45^\circ$  έως  $135^\circ$ . Για το παραπάνω εύρος γωνιών προσβολής θεωρήθηκε ότι το σημείο αποκόλλησης της ροής λαμβάνει χώρα στο χείλος προσβολής. Η παραπάνω υπόθεση με τις συνεπαγόμενες επιπτώσεις στους αεροδυναμικούς συντελεστές, της μετακίνησης του σημείου αποκόλλησης, έχει διερευνηθεί στην βιβλιογραφία [6]. Για γωνίες προσβολής μικρότερες των  $90^\circ$  το σημείο αποκόλλησης δεν εμφανίζει κάποια μετακίνηση, παρόλα αυτά δεν μπορεί να ισχύσει η ίδια υπόθεση και για γωνίες προσβολής άνω των  $90^\circ$  μοιρών [6]. Επιπροσθέτως επισημαίνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία για τους εξεταζόμενους αριθμούς  $Re$  και για τις εξεταζόμενες αεροτομές, δεν υπάρχει πειραματική πιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Ο αριθμός Strouhal για τις υποθέσεις της παρούσας μελέτης λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα αφενός με την γεωμετρία της αεροτομής και αφετέρου με την γωνία προσβολής. Επιπλέον για ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών προσβολής το οποίο κυμαίνεται ανά αεροτομή και προσεγγιστικά βρίσκεται μεταξύ των  $(-105^\circ \div -60^\circ)$  και  $(105^\circ \div 60^\circ)$  ο αριθμός Strouhal δεν εμφανίζει κάποια χαρακτηριστική μεταβολή. Το παραπάνω φαινόμενο έχει παρατηρηθεί και σε αεροτομή άλλης οικογένειας [6] το οποίο πιθανώς να συνηγείται στην υπόθεση ότι η γωνία προσβολής παίζει καθοριστικό ρόλο στην συχνότητα έκλυσης των στροβίλων έναντι της γεωμετρίας της αεροτομής. Η αλλαγή της γωνίας προσβολής δύναται να εμφανιστεί σε περιοχές γωνιακής απόκλισης του δρομέα σε σχέση με τη ροή του ανέμου (*yaw misalignment*) μεταβάλλοντας τη συχνότητα έκλυσης των στροβίλων και την πιθανότητα εμφάνισης *lock in*.

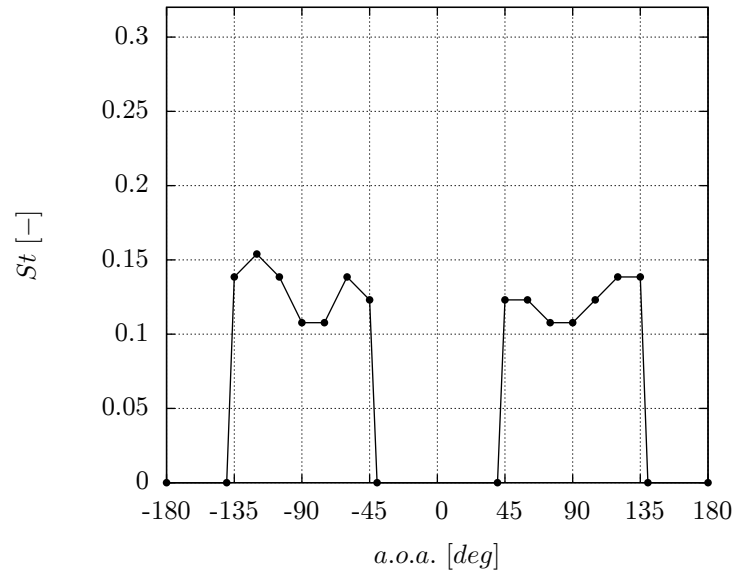


(α')

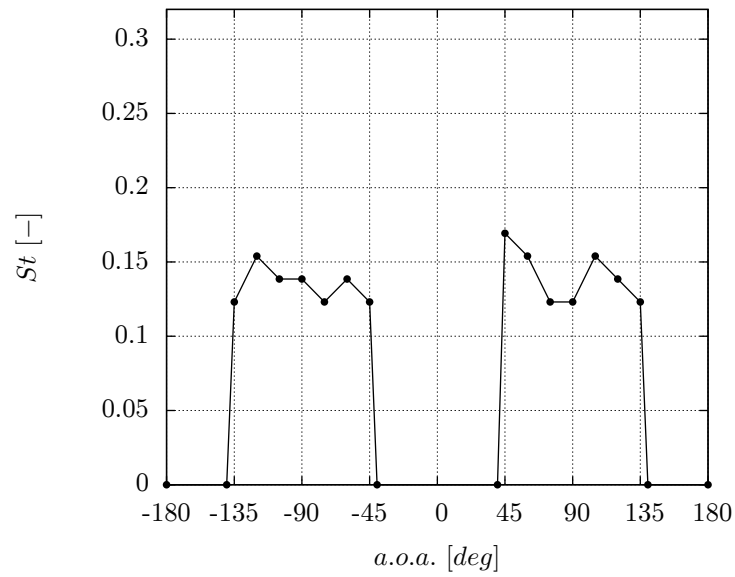


(β')

Σχήμα 3.4: Αριθμοί Strouhal σε σχέση με τη γωνία προσβολής (α) FFA-W3-241, (β) FFA-W3-301.



(α')

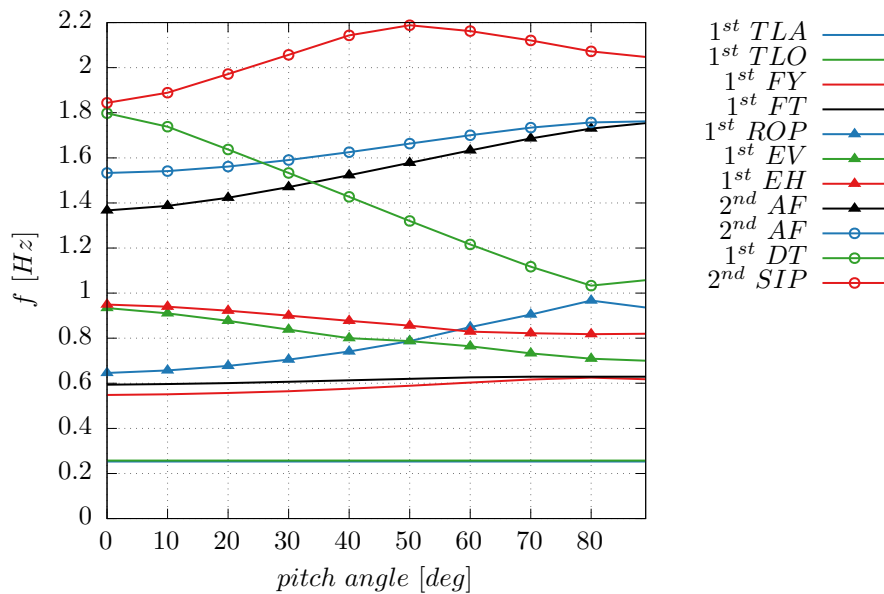


(β')

Σχήμα 3.5: Αριθμοί Strouhal σε σχέση με τη γωνία προσβολής (α) FFA-W3-360, (β) FFA-W3-480.

### 3.2.1 Ανάλυση Ιδιοσυχνοτήτων

Στη προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε η μέθοδος υπολογισμού της συχνότητας της έκλυσης των δινών του ομόρρου και των αντίστοιχων αριθμών Strouhal, για μια σειρά από αεροτομές που απαρτίζουν το περύγιο της ανεμογεννήτριας INNWIND. Για τη διερεύνηση της πιθανής εμφάνισης 'κλειδώματος' της συχνότητας έκλυσης των στροβίλων πραγματοποιήθηκε ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος. Η ανάλυση περιορίστηκε σε διάφορες τιμές γωνιακού βήματος (pitch angle) των πτερυγίων και για μη περιστρεφόμενο σύστημα (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Ιδιοσυχνότητες της ανεμογεννήτριας INNWIND για γωνία βήματος από 0° έως 90° μοίρες.

Οι φυσικές συχνότητες της Α/Γ εμφανίζονται κατά ζεύγη [4]. Αρχικά οι δύο πρώτες περιγράφουν την κίνηση του πύργου παράλληλα με το επίπεδο του δρομέα (1<sup>st</sup> Tower Lateral) και κάθετα (1<sup>st</sup> Tower Longitudinal).

Οι σχετιζόμενες ιδιοσυχνότητες κατά τις κατευθύνσεις περιστροφής και πτερύγισης εμφανίζονται σε ζευγάρια των τριών. Πιο συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται ως συμμετρικές δηλαδή όταν οι ιδιομορφές και των τριών πτερυγίων έχουν την ίδια κατεύθυνση, και ασύμμετρες όταν έχουν διαφορετική. Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση έγκειται στη σύζευξη που εμφανίζουν οι παραπάνω ιδιοσυχνότητες-ιδιομορφές με την γωνία κλίσης (tilt) και την γωνιακή απόκλιση (yaw). Συνοφίζοντας και από το Σχήμα



3.6, οι ιδιοσυχνότητες που ακολουθούν αμέσως μετά του πύργου είναι οι ιδιοσυχνότητες κατά την κατεύθυνση πτερύγισης. Οι ασύμμετρες ιδιοσυχνότητες όπου η κάθε μία αναφέρεται και σε κίνηση της Α/Γ κατά την γωνιακή απόκλιση (1<sup>st</sup> asymmetric Flap coupled to Yaw) και την γωνία κλίσης (1<sup>st</sup> asymmetric Flap coupled to Tilt) Η συμμετρική χαρακτηρίζεται από την απόκλιση των πτερυγίων κατά το επίπεδο του δρομέα (Rotor Out of Plane).

Ομοίως ακολουθούν και οι ιδιοσυχνότητες κατά την κατεύθυνση περιστροφής. Οι ασύμμετρες ιδιομορφές σχετίζονται με την ασύμμετρη κίνηση των πτερυγίων παράλληλα με το επίπεδο του δρομέα. Ειδικότερα εμφανίζεται μία κάθετη (1<sup>st</sup> asymmetric Edge coupled to Horizontal flexibility) και μία οριζόντια (1<sup>st</sup> asymmetric Edge coupled to Vertical flexibility) ιδιοσυχνότητα. Η συμμετρική κατά την κατεύθυνση περιστροφής ιδιοσυχνότητα είναι πεπλεγμένη με την ελαστικότητα του άξονα μετάδοσης (1<sup>st</sup> Drive Train).

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και ορισμένες από τις δεύτερες ιδιοσυχνότητες. Οι δύο ασύμμετρες ιδιοσυχνότητες κατά την κατεύθυνση πτερύγισης (2<sup>nd</sup> Asymmetric Flap) και κατά την η δεύτερη συμμετρική ως προς το επίπεδο του δρομέα (2<sup>nd</sup> Symmetric in Plane).

Στη παρούσα εργασία η εξεταζόμενη περίπτωση εμφάνισης ταλαντώσεων λόγω των σχηματιζόμενων δινών πραγματοποιήθηκε όταν η ανεμογεννήτρια είναι σταθμευμένη. Για την ακινητοποίηση των πτερυγίων η γωνία βήματος είναι 90°, επομένως εξετάζονται και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες του συστήματος.

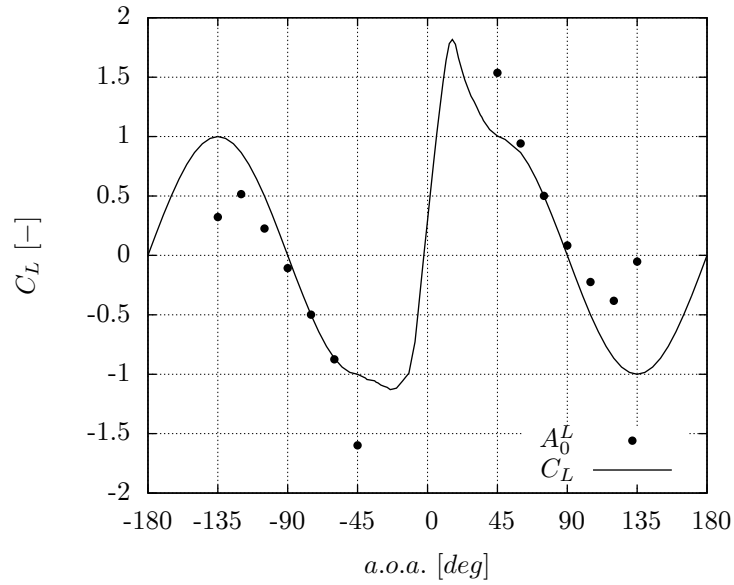
### 3.3 Προσθήκη Διαταραχών

Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών φορτίων σε συνθήκες αποκόλλησης της ροής και η αντίστοιχη ανάλυση συχνοτήτων είχε ως στόχο την ποσοτική διερεύνηση των αεροδυναμικών συνιστωσών που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στα φορτία που δέχεται η αεροτομή. Σκοπός της απλής αεροελαστικής προσέγγισης είναι μια αρχική εκτίμηση της επίδρασης της αποκόλλησης της ροής και του πιθανού συντονισμού της συχνότητας έκλυσης των δινών σε κάποια περιοχή των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος. Ο παραπάνω συντονισμός θα παρατηρηθεί στην περίπτωση που τα φορτία-ροπές που δέχεται η ανεμογεννήτρια εμφανίσουν αστάθειες όχι μόνο λόγω αποκόλλησης (SIV) αλλά και αστάθειες λόγω έκλυσης των δινών (VIV). Στη συνέχεια παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προσθήκη των διαταραχών στις μέσες τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών.

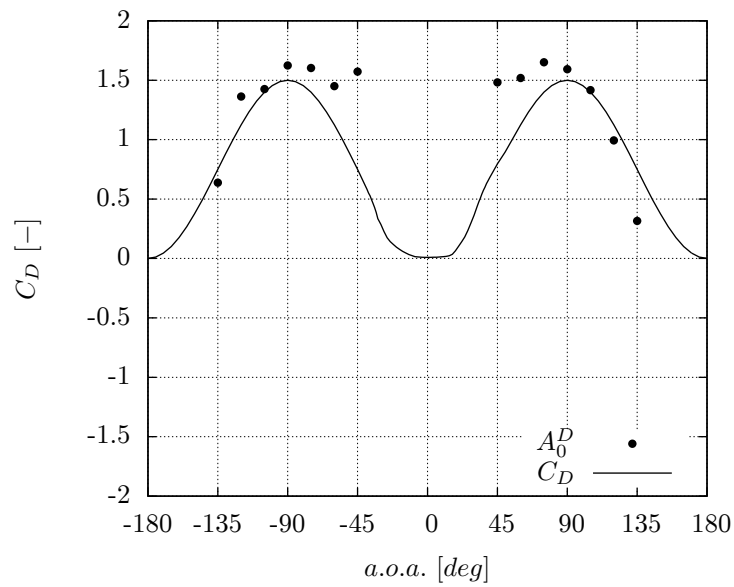
Από τη φασματική ισχύ των χρονοσειρών οι δύο κυρίαρχες συχνότητες που επικρατούν στους αεροδυναμικούς συντελεστές είναι η συχνότητα έκλυσης των δινών και η διπλάσια τιμή της. Ανεξάρτητα της γωνίας προσβολής οι συχνότητες αυτές κυριαρχούν, κατά διαφορετικό ποσοστό [6]. Για τον παραπάνω λόγω πραγματοποιήθηκε προσέγγιση της χρονοσειράς των αεροδυναμικών συντελεστών μέσω σειρών Fourier όπου ελήφθησαν υπ'όψιν οι δύο πρώτες αρμονικές.

$$C_i = A_0^i + A_1^i \sin(2\pi f_s t) + A_2^i \sin(2\pi 2f_s t) \quad \text{όπου: } i = L, D \quad (3.1)$$

Η μέση τιμή της χρονοσειράς των αεροδυναμικών συντελεστών  $A_0^L$ ,  $A_0^D$  για τις εξεταζόμενες γωνίες προσβολής συγκρίνεται με τις αντίστοιχες μέσες τιμές για την τρισδιάστατη αεροτομή. Για γωνίες προσβολής στην περιοχή ενδιαφέροντος παρατηρούμε ότι οι μέσες τιμές του συντελεστή άνωσης είναι ταυτόσημες ενώ υπερεκτιμάται ο συντελεστής αντίστασης. Τιμές της γωνίας εκτός του εύρους αυτού, οι συντελεστές εμφανίζουν αρκετά μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις 3D τιμές. Τονίζεται ότι οι μέσες τιμές των συντελεστών της 3D αεροτομής δεν προέρχονται από πειραματικά δεδομένα(πηγή). Για λόγους συνέπειας και καλύτερης σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των αριθμητικών προσομοιώσεων των διαταραχών λόγω δινών και μη, οι μέσες τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών ελήφθησαν ίσες με αυτές της 3D αεροτομής.



(α)



(β)

Σχήμα 3.7: Σύγκριση μέσων τιμών αεροδυναμικών συντελεστών της τρισδιάστατης αεροτομής FFA-W3-241 και των μέσων τιμών των χρονοσειρών από το πρόγραμμα FoIL2w.

Συμπερασματικά στην απλή αεροελαστική προσέγγιση πραγματοποιήθηκε υπέρθεση των αεροδυναμικών συντελεστών, που προκύπτουν λόγω έκλυσης των δινών, στις μέσες τιμές των 3D αεροτομών. Πιο συγκεκριμένα προστίθενται οι χρονικά μεταβαλλόμενοι όροι των δύο αρμονικών (Εξίσωση 3.1) στις μέσες τιμές.

Τα πλάτη των διαταραχών εξαρτώνται αφενός από τη γωνία προσβολής αφετέρου από την γεωμετρία της αεροτομής δηλαδή από χαρακτηριστικά που απορρέουν από την κατασκευή της αεροτομής και δεν εξαρτώνται από την ελαστική συμπεριφορά του συστήματος. Το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί και για την συχνότητα έκλυσης των δινών. Η άμεση εξάρτηση της συχνότητας από τον αδιάστατο αριθμό  $St$  περιορίζεται στην παρούσα μελέτη αλλά και στην βιβλιογραφία σε δισδιάστατες γεωμετρίες. Στην περίπτωση ενός πτερυγίου όπου η γεωμετρία είναι τρισδιάστατη και αρκετά πιο σύνθετη π.χ. λόγω συστρόφης (twist), η συχνότητα έκλυσης των δινών ενδεχομένως να παρουσιάζει τελείως διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με την δισδιάστατη γεωμετρία. Στη παρούσα μελέτη για την καλύτερη αξιολόγηση της επίδρασης της σύνθετης γεωμετρίας στον αριθμό Strouhal και του ενδεχομένου 'κλειδώματος' (lock-in) υιοθετήθηκαν διάφορα σενάρια τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

### 3.3.1 Χαρακτηριστικά των δινών του πτερυγίου ( $St$ , $fs$ ) - Μελέτη περιπτώσεων.

Λόγω της αεροελαστικής σύζευξης και του τρισδιάστατου χαρακτήρα του φαινομένου ο αριθμός Strouhal ενδεχομένως να μην εμφανίζει διακριτό χαρακτήρα ανά αεροτομή αλλά να υπερισχύει μία τιμή κατά μήκος ολόκληρου του πτερυγίου. Σε αυτή την περίπτωση οι εκλυόμενες δίνες σε ολόκληρη την πτέρυγα συσχετίζονται (coherence) καθώς τα χαρακτηριστικά τους ( $St$ ,  $fs$ ) προσδιορίζονται από μία συγκεκριμένη θέση κατά μήκος του πτερυγίου. Στη παρούσα ανάλυση η θέση αυτή επιλέχθηκε να είναι στα 2/3 του συνολικού μήκους του πτερυγίου. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι στη συγκεκριμένη θέση παρουσιάζονται τα μέγιστα αεροδυναμικά φορτία.

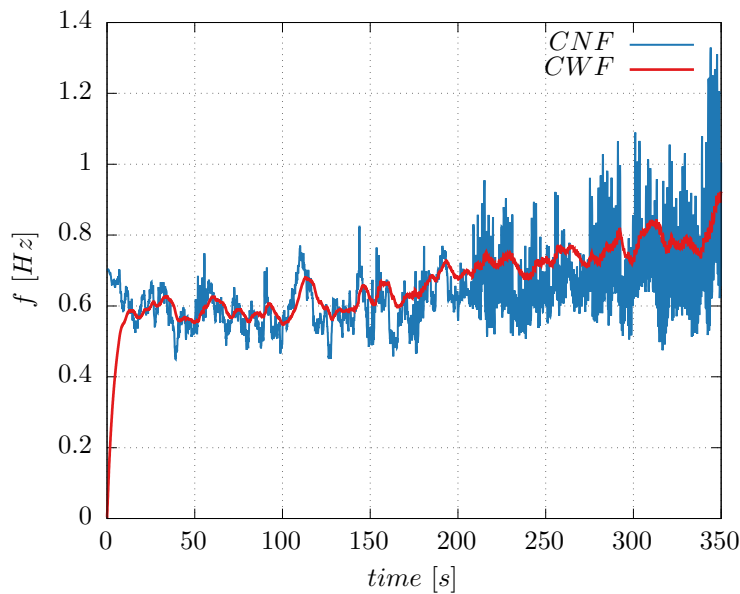
Αντιθέτως ενδέχεται λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας του πτερυγίου η συχνότητα έκλυσης των δινών να διαφέρει κατά μήκος του. Για το παραπάνω ενδεχόμενο εξετάσθηκε η υπόθεση όπου κάθε αεροτομή - τμήμα που απαρτίζει το πτερύγιο έχει τα δικά του χαρακτηριστικά.

Συνοπτικά η προσέγγιση των χαρακτηριστικών των δινών του πτερυγίου διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις:

- *coherent* Επιβολή μιας συγκεκριμένης συχνότητας των δινών ( $fs$ ), από μια χαρακτηριστική θέση, σε όλο το μήκος του πτερυγίου.

- *no coherent* Διαφορετικά χαρακτηριστικά ανά τμήμα του πτερυγίου.

Όλες οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για στοχαστικό άνεμο. Η χρήση του στοχαστικού ανέμου αποσκοπεί στην πιο ρεαλιστική αποτίμηση των φορτίων που δέχεται το ελαστικό σύστημα. Από τον ορισμό όμως του αριθμού Strouhal προκύπτει ότι η συχνότητα των δινών είναι ανάλογη της ταχύτητας της ροής,  $f_s = USt/c$ . Με δεδομένο τον στοχαστικό άνεμο συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της συχνότητας των δινών θα επηρεάζεται από τη στοχαστικότητα της ταχύτητας της ροής. Το παραπάνω έχει ως συνέπεια να μην λαμβάνεται υπόψιν η αδράνεια του ομόρου έναντι των ταχύτερων μεταβολών της ταχύτητας. Για την προσθήκη της προαναφερθείσας αδράνειας εξετάσθηκε για όλες προσεγγίσεις, η εφαρμογή ενός χαμηλοπερατού φίλτρου στις συχνότητες των δινών (Σχήμα 3.8).

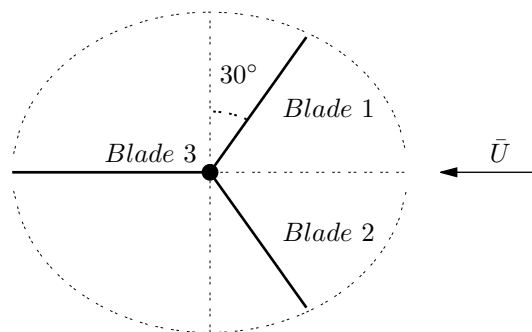


Σχήμα 3.8: Χρονοσειρά της συχνότητας των δινών ( $f_s$ ) για  $\bar{U} = 25m/s$  στα  $2/3$  του πτερυγίου χωρίς (CNF) και με την εφαρμογή χαμηλοπερατού φίλτρου (CWF).

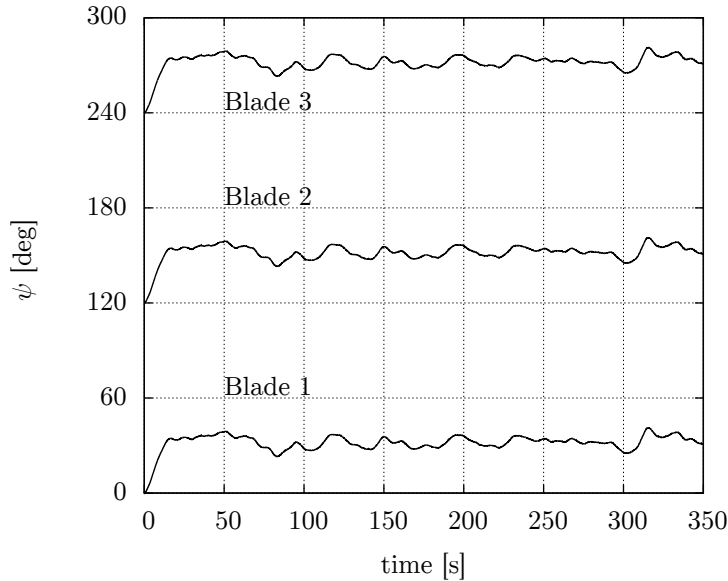
### 3.4 Αποτελέσματα - Σχόλια

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα σενάριο στοχαστικών ταχυτήτων ανέμου με μέση τιμή από 5m/s έως 50m/s. Η γωνία βήματος για όλες τις περιπτώσεις είναι  $90^\circ$  μοίρες. Η ανεμογεννήτρια δεν είναι ακινητοποιημένη αλλά περιστρέφεται έως ότου ισορροπήσει γύρω από μία γωνία αζιμουθίου χωρίς να παράγει ισχύ (idling). Η παραπάνω επιλογή βασίζεται στο γεγονός ότι οι αστάθειες λόγω των σχηματιζόμενων δινών έχουν παρατηρηθεί σε περιπτώσεις μεγάλης γωνιακής απόκλισης (yaw misalignment)) η οποία εμφανίζεται κατά την αστοχία των συστημάτων ελέγχου [6] όπου η ανεμογεννήτρια είναι είτε ακινητοποιημένη (parked) είτε βρίσκεται σε άεργη λειτουργία (idle). Η γωνία απόκλισης θεωρήθηκε ίση με  $90^\circ$  μοίρες όπου η ροή είναι παράλληλη με το επίπεδο του δρομέα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους και ανεξάρτητα της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου οι μέσες τιμές των γωνιών αζιμουθίου των πτερυγίων είναι  $\sim 30^\circ$ ,  $\sim 150^\circ$  και  $\sim 270^\circ$  για το εκάστοτε πτερύγιο αντιστοίχως. Επομένως το τρίτο πτερύγιο λόγω της αζιμουθιακής θέσης του, επηρεάζεται ελάχιστα από τη ροή για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν αναφέρονται στα υπόλοιπα πτερύγια (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Θέση των πτερυγίων για τις μέσες τιμές γωνίας αζιμουθίου.



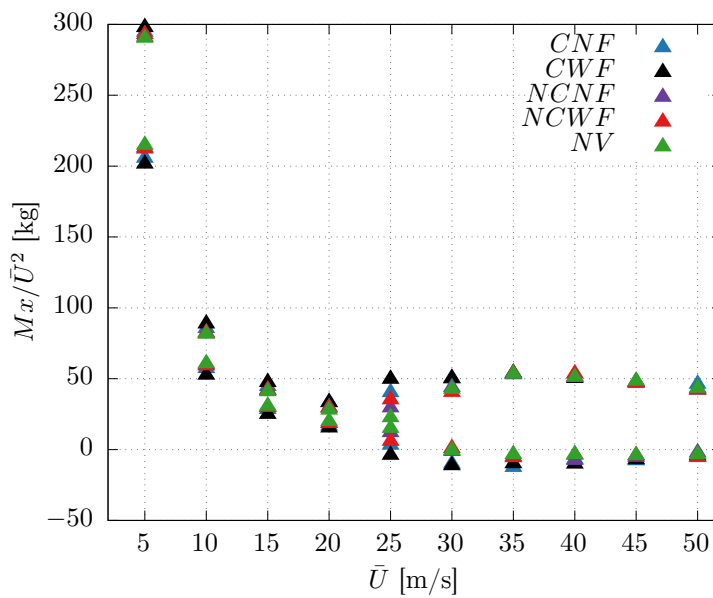
Σχήμα 3.10: Χρονοσειρά της γωνίας αζιμουθίου των τριών πτερυγίων ( $\bar{U} = 25m/s$ ).

Η πιθανή εμφάνιση συντονισμού των δινών σε ορισμένη εκ των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων της ανεμογεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φορτίων που δέχεται η ανεμογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα στη περίπτωση που η συχνότητα των δινών του συντελεστή αντίστασης ( $2fs$ ) λάβει παρόμοιες τιμές με την φυσική ιδιοσυχνότητα της κατεύθυνσης πτερύγισης (flap-wise) τα φορτία που δέχεται το πτερύγιο κατά την κατεύθυνση αυτή είναι μεγαλύτερα ακόμα και για υψηλότερες ταχύτητες ροής. Επιπλέον το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στην κατεύθυνση περιστροφής (edge-wise) [6].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το εκάστοτε πτερύγιο. Ειδικότερα εξετάστηκαν τα μέγιστα και τα ελάχιστα αδιαστατοποιημένα φορτία-ροπές των χρονοσειρών στη ρίζα του πτερυγίου. Επιπλέον παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των συχνοτήτων έκλυσης των δινών συγκριτικά με τις φυσικές συχνότητες της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 3.6) για τις αντίστοιχες ταχύτητες.

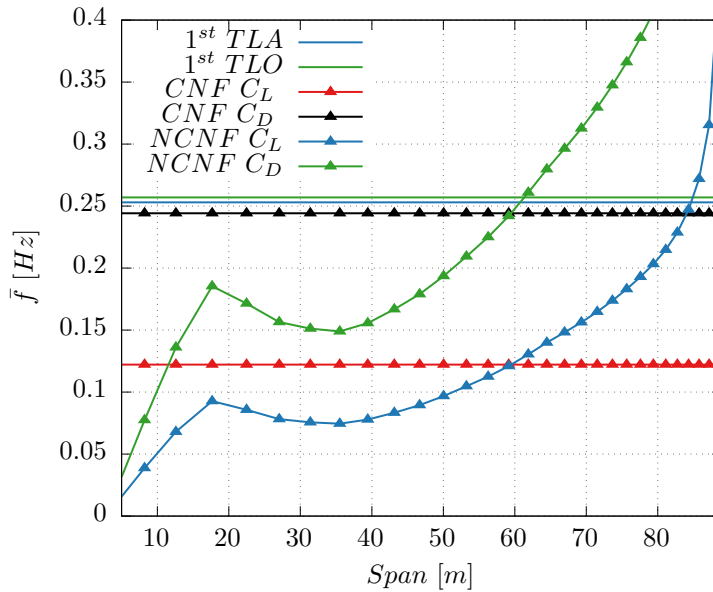
Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές της αδιαστατοποιημένης ροπής στη ρίζα του πτερυγίου λόγω της δύναμης κατά τη κατεύθυνση πτερύγισης. Για μέση ταχύτητα ανέμου ίση με  $5m/s$  τα φορτία είναι αρκετά μεγαλύτερα έναντι των υπόλοιπων ταχυτήτων. Στο διάγραμμα των μέσων συχνοτήτων για  $5m/s$  η συχνότητα δινών

του συντελεστή αντίστασης (CNF  $C_D$ ) λαμβάνει παραπλήσιες τιμές με τις φυσικές συχνότητες του πύργου (3.12). Για τις διάφορες μέσες συχνότητες τα φορτία διαφέρουν μόλις κατά  $\sim 4\%$  επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι η προσθήκη των διαταραχών δεν επιφέρει κάποια σημαντική αύξηση στα φορτία για την δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου. Παρόλα αυτά η αύξηση της ροπής σε σχέση με τις μεγαλύτερες ταχύτητες ροής ενδεχομένως να οφείλεται στο πιθανό κλείδωμα των συχνοτήτων των δινών στις φυσικές συχνότητες του πύργου.



Σχήμα 3.11: Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (flap-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου.





Σχήμα 3.12: Διασταυρώσεις μεταξύ των μέσων συχνοτήτων των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων κατά μήκος του πρώτου πτερυγίου ( $\bar{U} = 5\text{m/s}$ ).

Για  $25\text{ m/s}$  η ροπή  $M_x$  για όλες τις περιπτώσεις προσέγγισης των συχνοτήτων, εμφανίζει μεγαλύτερα φορτία. Η συχνότητα του συντελεστή αντίστασης ( $2fs$ ) είναι μεγαλύτερη από τις φυσικές συχνότητες που αφορούν την κατεύθυνση πτερύγισης. Ενώ η συχνότητα των δινών λαμβάνει κοντινές τιμές με τις φυσικές συχνότητες της κατεύθυνσης πτερύγισης (Σχήμα 3.15 - (α)). Αναφέρεται ότι οι παραπάνω φυσικές ιδιομορφές (FY, FT, EV) για τις  $90^\circ$  μοίρες γωνία βήματος είναι πεπλεγμένες. Ειδικότερα τα πτερύγια για τις παραπάνω ιδιοσυχνότητες παραμορφώνονται και κατά την κατεύθυνση πτερύγισης και περιστροφής. Με κύρια παραμόρφωση μια εκ των δύο κατευθύνσεων χωρίς να είναι αμελητέα όμως και η παραμόρφωση κατά την δευτερεύουσα κατεύθυνση.

Επομένως η διασταύρωση των συχνοτήτων των δινών στις παραπάνω ιδιομορφές πέρα από την αύξηση της  $M_z$  ροπής επιφέρει και αύξηση της  $M_x$  ροπής.

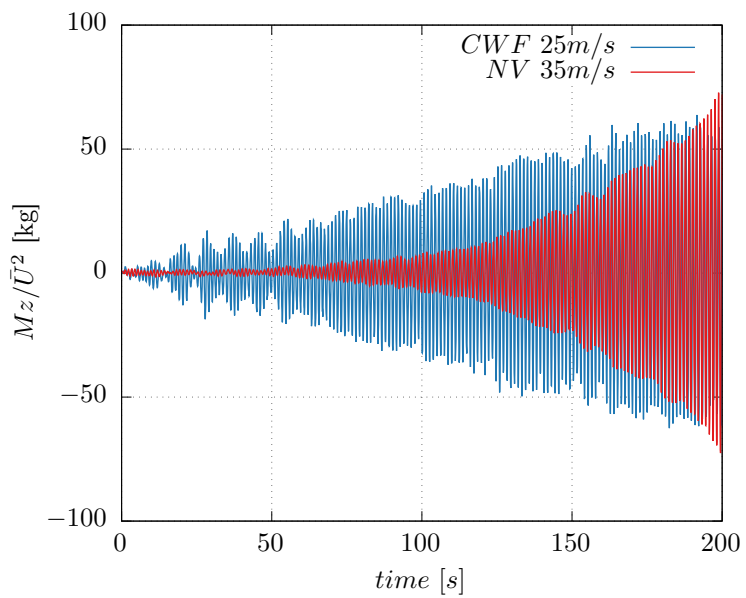
Για  $30\text{ m/s}$  μέση ταχύτητα ανέμου τα φορτία είναι ελαφρώς μεγαλύτερα κατά περιπτώσεις σε σχέση με την απλή περίπτωση (NV). Συγκεκριμένα, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις των φορτίων παρατηρούνται για τις περιπτώσεις όπου επικρατεί μία συχνότητα καθ' όλο το μήκος του πτερυγίου (CNF και CWF). Οι παραπάνω συχνότητες βρίσκονται εντός της περιοχής των συμμετρικών ιδιοσυχνοτήτων των κατευθύνσεων πτερύγισης ( $1^{\text{st}}$  ROP) και περιστροφής ( $1^{\text{st}}$  DT). Οι παραπάνω περιπτώσεις

εμφανίζουν και τις ανάλογες αυξήσεις στα φορτία  $M_z$  και  $M_x$ . Σημειώνεται ότι για τις περιπτώσεις των NCNF και NCWF δεν εμφανίζεται κάποια διαφορά στα φορτία με την περίπτωση της μη προσθήκης των διαταραχών (NV).

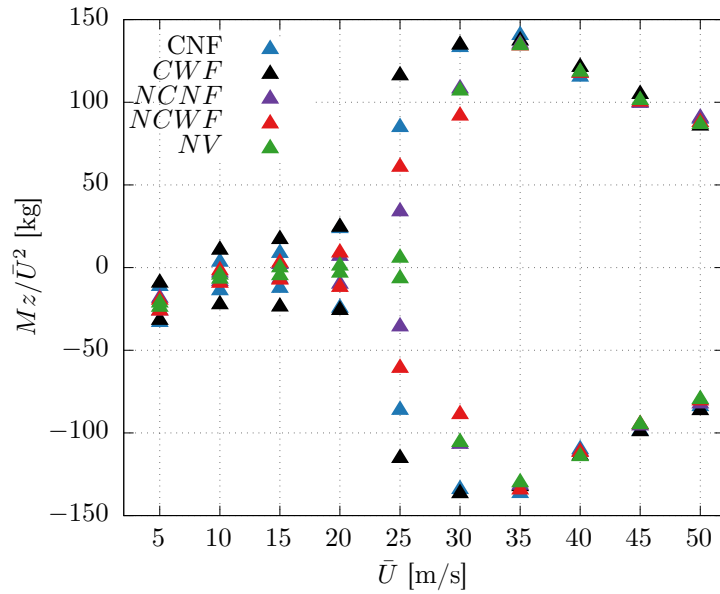
Όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται από τον ορισμό του αριθμού Strouhal τόσο θα αυξάνονται και οι συχνότητες των δινών. Επομένως για μεγαλύτερες ταχύτητες η επίδραση των δινών δεν είναι αισθητή, ενώ επικρατούν αστάθειες λόγω αποκόλλησης της ροής και αρνητικού πρόσημου του συντελεστή άνωσης.

Αναφορικά με τις ροπές κατά την κατεύθυνση περιστροφής. Παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες διαφορές των φορτίων εμφανίζονται για μέση ταχύτητα ανέμου ίση με 25m/s. Για την περίπτωση CWF ασκούνται τα μεγαλύτερα φορτία το οποίο σχετίζεται με το γεγονός ότι η μέση συχνότητα των δινών που επιβάλλεται σε ολόκληρο το πτερύγιο είναι παραπλήσια της ασύμμετρης φυσικής ιδιοσυχνότητας κατά την κατεύθυνση περιστροφής (1<sup>st</sup> EV) (Σχήμα 3.15-(α)). Η χαμηλή απόσβεση στην παραπάνω ιδιομορφή καθιστά πιθανό το γεγονός στην περίπτωση 'lock-in' το πτερύγιο να δέχεται αυξημένα φορτία [6].

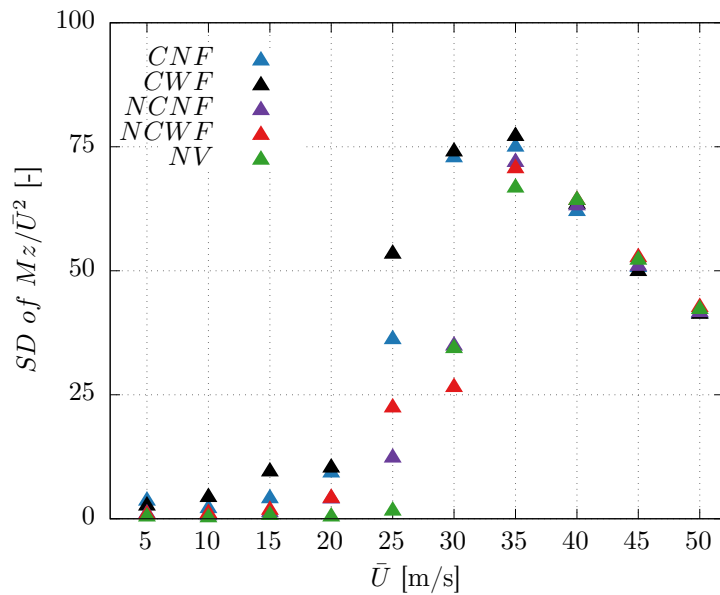
Ένα επιπλέον ποιοτικό μέγεθος για την αξιολόγηση την εμφάνισης διαταραχών (VIV) είναι η τυπική απόκλιση των φορτίων (Σχήμα 3.14-(β)) . Στην περίπτωση όπου εκτός από αστάθειες μεγάλων γωνιών προσβολής (SIV) εμφανίζονται και αστάθειες λόγω των δινών (VIV), η περιοχή έντονων μεταβολών των φορτίων επομένως και ταλαντώσεων της Α/Γ παρατηρούνται πιο νωρίς. Συνεπώς ο συνδυασμός ασταθειών λόγω μεγάλων γωνιών προσβολής και συντονισμού των δινών προκαλεί πρόωρες ταλαντώσεις οι οποίες μπορούν να αναγνωριστούν και με την τυπική απόκλιση των φορτίων (Σχήμα 3.13) [6].



Σχήμα 3.13: Χρονοσειρά των αδιάστατων, ως προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου, ροπών (edge-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου.



(α)

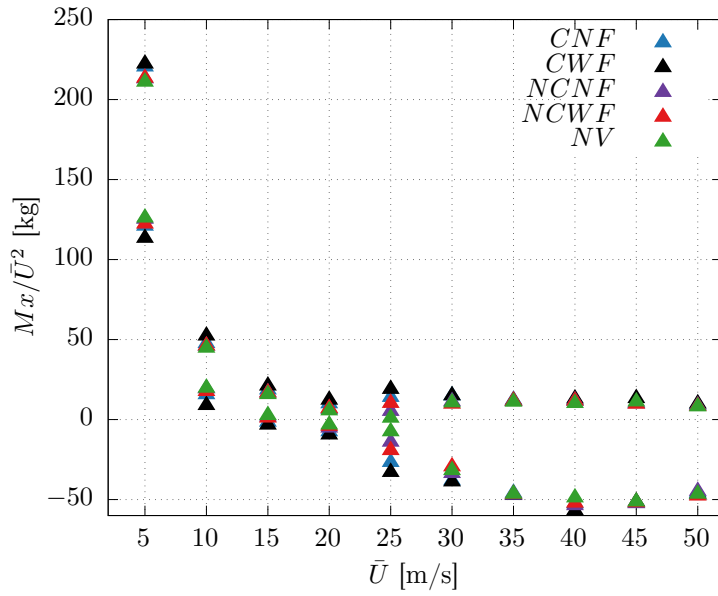


(β)

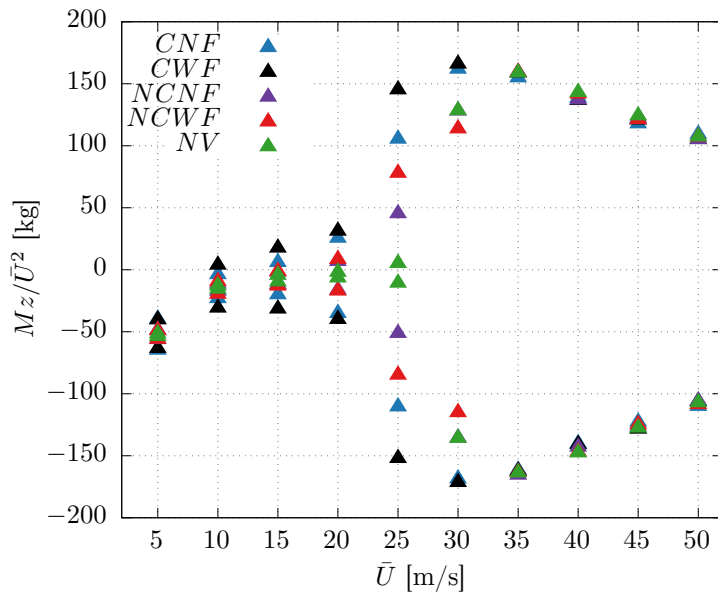
Σχήμα 3.14: (α) Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (edge-wise) στη ρίζα του πρώτου πτερυγίου (β) Η αντίστοιχη τυπική απόκλιση.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το δεύτερο πτερύγιο (Σχήμα 3.9). Σε γενικές γραμμές τα φορτία εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτά του πρώτου πτερυγίου. Αναφορικά με τα φορτία που ασκούνται κατά την κατεύθυνση πτερύγισης για μέση ταχύτητα ανέμου ίση με 5m/s εμφανίζουν μία μέγιστη τιμή. Από το διάγραμμα των συχνότητων για την παραπάνω ταχύτητα (Σχήμα 3.17-(α)) προκύπτει ότι η συχνότητα του συντελεστή αντίστασης (2fs) και σε αυτό το πτερύγιο λαμβάνει παραπλήσιες τιμές με τις φυσικές συχνότητες του πύργου. Για τα φορτία κατά την κατεύθυνση περιστροφής ενδιαφέρον αποτελεί η περίπτωση όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 25m/s καθώς η συχνότητα των δινών είναι σχεδόν ίση με την φυσική ιδιοσυχνότητα της κατεύθυνσης περιστροφής (1<sup>st</sup> EH) (Σχήμα 3.17-(β)) . Με άμεση σύγκριση των Mz ροπών των δύο πτερυγίων για την παραπάνω μέση ταχύτητα ανέμου (Σχήματα 3.14-(α) και 3.16-(β)) προκύπτει ότι τα φορτία του δευτέρου πτερυγίου είναι μεγαλύτερα έναντι του πρώτου.

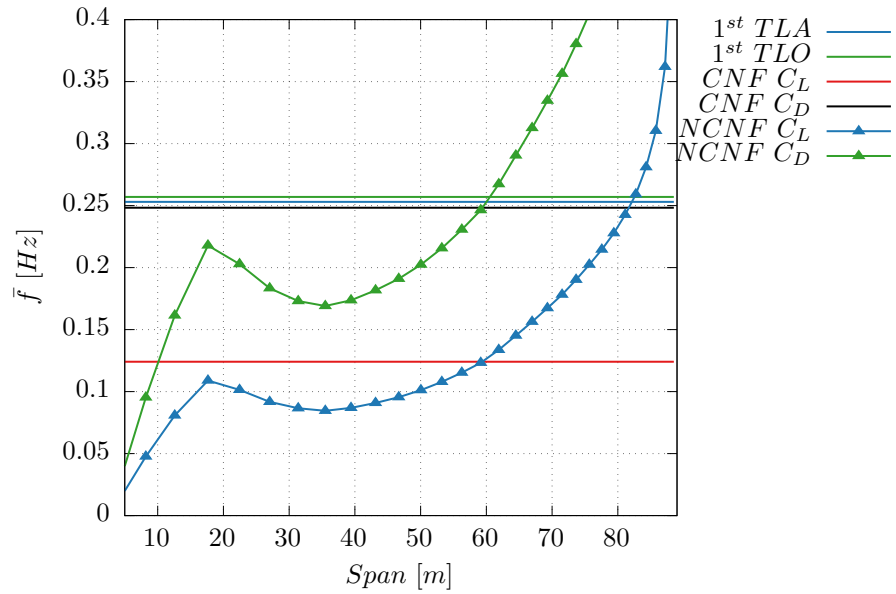


(α')

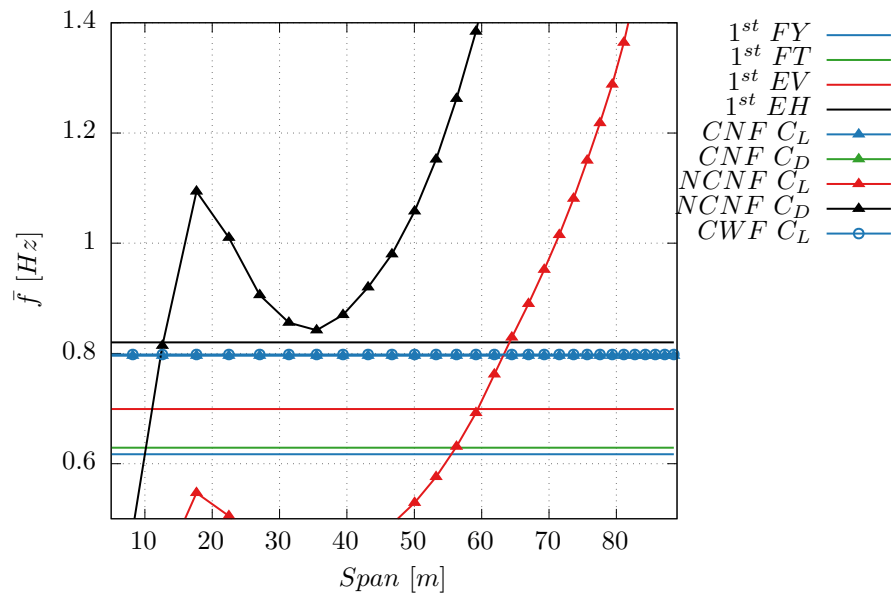


(β')

Σχήμα 3.16: Εύρος της αδιαστατοποιημένης, ως προς τη μέση ταχύτητα της ροής, ροπή (α) flap-wise και (β) edge-wise στη ρίζα του δεύτερου περυγίου



(α)



(β)

Σχήμα 3.17: Διασταυρώσεις μεταξύ των μέσων συχνοτήτων των δινών και των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων κατά μήκος του δευτέρου πτερυγίου (α)  $\bar{U} = 5m/s$  (β)  $\bar{U} = 25m/s$ .



Τα παραπάνω αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν για στοχαστικό άνεμο και για γωνία βήματος ίση με 90 μοίρες. Η ανεμογεννήτρια ακινητοποιείται γύρω από μία μέση γωνία αζιμουθίου για γωνιακή απόκλιση (yaw) ίση με 90 μοίρες. Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι από την ανάλυση των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων της Α/Γ οι φυσικές ιδιομορφές για την κατεύθυνση περιστροφής και πτερύγισης είναι πεπλεγμένες. Στην περίπτωση όπου η συχνότητα των δινών λάβει παραπλήσιες τιμές σε σχέση με τις φυσικές συχνότητες των παραπάνω ιδιομορφών εμφανίζεται αύξηση των φορτίων στη ρίζα του πτερυγίου και κατά την κατεύθυνση πτερύγισης και περιστροφής. Τα μεγαλύτερα φορτία  $Mz$  συναντώνται στην περίπτωση όπου η συχνότητα των δινών πλησιάζει την τιμή της φυσικής ιδιοσυχνότητας για την κατεύθυνση πτερύγισης όπως συναντάται στο δεύτερο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας.

Για  $5\text{m/s}$  μέση ταχύτητα ανέμου οι συχνότητες των δινών ( $2fs$ ) προσεγγίζουν τις φυσικές συχνότητες του πύργου. Σε αυτή την περίπτωση τα φορτία κατά την κατεύθυνση πτερύγισης λαμβάνουν υψηλές τιμές. Οι διαφορές στα φορτία μεταξύ των εξεταζόμενων περιπτώσεων προσέγγισης των δινών κατά μήκος του πτερυγίου είναι αμελητέες για την δεδομένη μέση ταχύτητα ροής.

Οι υψηλότερες τιμές φορτίων παρουσιάζονται για την περίπτωση εφαρμογής του φίλτρου. Ειδικότερα για την περίπτωση όπου επικρατεί μία συχνότητα σε όλο το μήκος του πτερυγίου ασκούνται τα μεγαλύτερα φορτία. Στην περίπτωση που η  $fs$  συχνότητα λάβει παραπλήσιες τιμές σε σχέση με την φυσική ιδιοσυχνότητα είτε κατά την κατεύθυνση πτερύγισης είτε περιστροφής για όλες τις προσεγγίσεις των δινών, ασκούνται αρκετά υψηλότερα φορτία στην ανεμογεννήτρια. Τα μεγαλύτερα φορτία κατά την κατεύθυνση περιστροφής συναντώνται στην περίπτωση όπου η συχνότητα των δινών είναι παραπλήσια με την αντίστοιχη φυσική ιδιομορφή.

Για ταχύτητες άνω των  $35\text{m/s}$  η υπέρθεση των διαταραχών δεν παρουσιάζει κάποια αύξηση στα ασκούμενα φορτία. Για τα παραπάνω μέτρα των ταχυτήτων οι αστάθειες που κυριαρχούν στο πτερύγιο είναι λόγω αποκόλλησης της ροής (SIV). Οι συχνότητες των δινών είναι αρκετά μεγαλύτερες έναντι των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων των πτερυγίων και δεν δύναται να εμφανιστεί κάποιο 'κλείδωμα'.

## 4 Συζευγμένο Αεροελαστικό Μοντέλο

### 4.1 Εισαγωγή

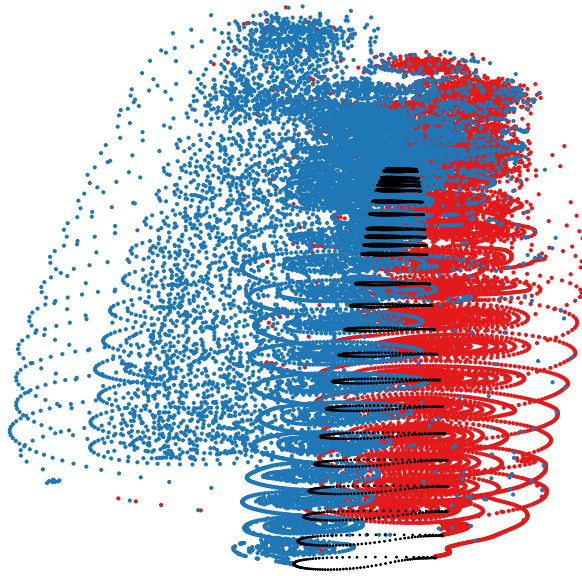
Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε η προσθήκη των διαταραχών στα αεροδυναμικά φορτία σε συνθήκες αποκόλλησης της ροής. Στη παραπάνω περίπτωση τα χαρακτηριστικά των διαταραχών (μέση τιμή - πλάτη) είναι σταθερά στο χρόνο και εξαρτώνται αποκλειστικά από τη γωνία προσβολής. Λόγω της ελαστικής κίνησης του πτερυγίου ο ομόρρους επομένως και τα αεροδυναμικά φορτία μεταβάλλονται, συσχέτιση η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στην απλή αεροελαστική προσέγγιση. Για την αξιολόγηση της σύζευξης της ελαστικής κίνησης με την αεροδυναμική πραγματοποιήθηκαν ορισμένες αριθμητικές προσομοιώσεις του συζευγμένου κώδικα GAST-FoIL2w για ένα πτερύγιο της A/G INNWIND. Αρχικά περιγράφεται το λογικό διάγραμμα του πηγαίου προγράμματος και η μεθοδολογία παραλληλοποίησής του. Η παραλληλοποίηση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε στη λογική ανταλλαγής μηνυμάτων σε αρχιτεκτονικές κατανεμημένης μνήμης (MPI). Για την αξιολόγηση του συζευγμένου αεροελαστικού μοντέλου, το πτερύγιο τίθεται σε εξαναγκασμένη κίνηση σύμφωνα με την ιδιομορφή κατά την κατεύθυνση περιστροφής. Στο δεύτερο μέρος αναλύεται η εξαναγκασμένη κίνηση και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

## 4.2 Ο υπολογιστικός κώδικας GAST-FoIL2w

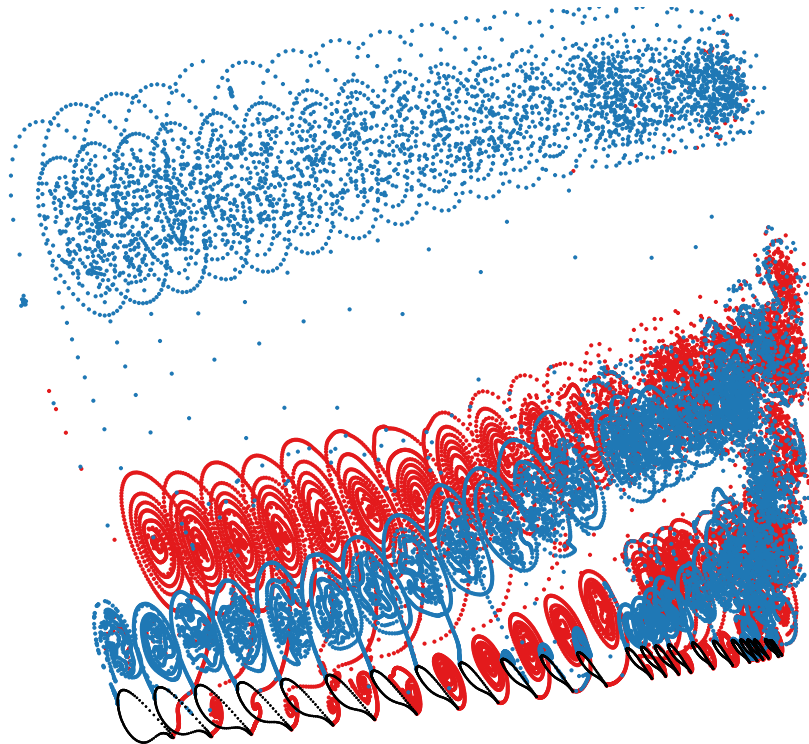
Ο υπολογιστικός κώδικας GAST-FoIL2w επιλύει σε πρώτο στάδιο την αεροδυναμική του πτερυγίου στην εκάστοτε αεροτομή. Στη συνέχεια λαμβάνοντας τα αεροδυναμικά φορτία υπολογίζονται τα ελαστικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεταφέρονται στην εκάστοτε αεροτομή και υπολογίζονται εκ νέου τα αεροδυναμικά φορτία.

Η σύζευξη μεταξύ του ελαστικού τμήματος του κώδικα και του αεροδυναμικού έγκειται στην ενημέρωση των απαραίτητων μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές εκφράζουν φυσικά χαρακτηριστικά του προβλήματος και αποτελούν την διεπιφάνεια μεταξύ του ελαστικού-αεροδυναμικού επιλύτη. Συγκεκριμένα το ελαστικό τμήμα του προγράμματος χρειάζεται τα αεροδυναμικά φορτία της εκάστοτε αεροτομής έτσι ώστε να υπολογίζει τις ελαστικές παραμορφώσεις του πτερυγίου. Ως ελαστικές παραμορφώσεις δεν αναφέρονται μόνο οι ελαστικές μετατοπίσεις αλλά και οι ταχύτητες και επιταχύνσεις. Στη συνέχεια το ελαστικό μέρος του κώδικα ενημερώνει το αεροδυναμικό ότι η εκάστοτε αεροτομή έχει μετατοπισθεί σύμφωνα με την παραμόρφωση που έχει υποστεί το πτερύγιο. Αντίστοιχη ενημέρωση πραγματοποιείται για τις ελαστικές ταχύτητες και επιταχύνσεις καθώς μεταβάλλουν τα ροϊκά χαρακτηριστικά.

Ο συζευγμένος κώδικας GAST-FoIL2w επιλύει τη ροή στην εκάστοτε αεροτομή χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την αλληλεπίδραση του ομόρρου κατά μήκος του πτερυγίου. Το πτερύγιο διακριτοποιείται σε αεροτομές (Σχήμα 4.1), οι οποίες δεν αλληλεπιδρούν αεροδυναμικά μεταξύ τους παρά μόνο ελαστικά λόγω της παραμόρφωσης του πτερυγίου. Η αεροδυναμική επομένως έχει έναν σαφή διδιάστατο χαρακτήρα, σε αντίθεση με το ελαστικό τμήμα του προγράμματος το οποίο ενημερώνεται από την εκάστοτε αεροτομή και υπολογίζει τα ελαστικά χαρακτηριστικά για το τρισδιάστατο πτερύγιο. Συμπεραίνουμε ότι ο κώδικας είναι ψευδο-τρειςδιάστατος (quasi 3D). Παρόλα αυτά η παραπάνω σύζευξη δύναται να σκιαγραφήσει λεπτομερέστερα την επίδραση των μεγάλων γωνιών προσβολής και της αποκόλλησης της ροής εν γένει, στις ταλαντώσεις του πτερυγίου.



(α')



(β')

Σχήμα 4.1: Διακριτές αεροτομές και σχηματιζόμενος ομόρρος (α) και πλάγια όψη (β). Είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του ομόρου των αεροτομών (quasi-3D).

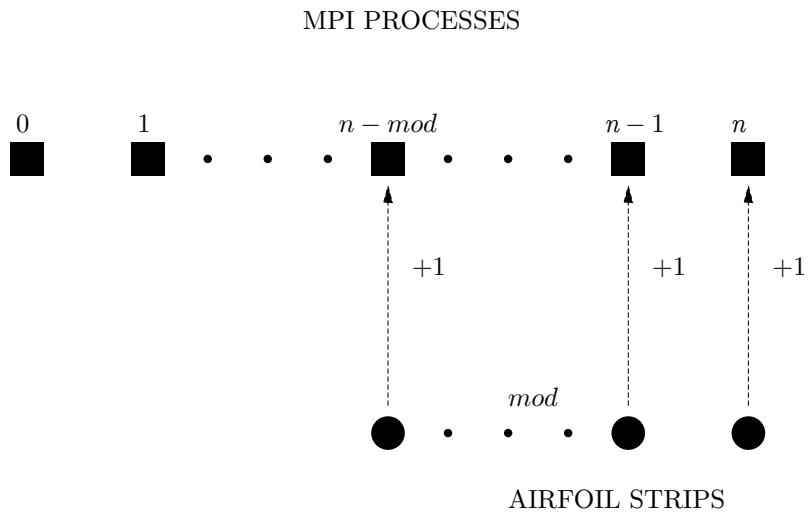
### 4.3 Παραλληλοποίηση με το Πρότυπο Ανταλλαγής Μηνυμάτων MPI

Στη σειριακή εκδοχή του προγράμματος ο υπολογισμός των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της κάθε αεροτομής εκτελείται σειριακά για το εκάστοτε χρονικό βήμα. Λόγω του δισδιάστατου χαρακτήρα της αεροδυναμικής κάθε αεροτομή είναι ανεξάρτητη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επομένως η παραλληλοποίηση στράφηκε εξ' ολοκλήρου στο αεροδυναμικό τμήμα του κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, ο διαμοιρασμός των αεροτομών εξαρτάται από το πλήθος των παράλληλων διεργασιών. Κάθε διεργασία αναλαμβάνει από μία έως έναν συγκεκριμένο αριθμό αεροτομών προς επίλυση. Εξάριση αποτελεί η κύρια διεργασία (root process) η οποία εκτελεί υπολογισμούς για τις αεροτομές που της αναλογούν και για την ελαστικότητα. Η επικοινωνία μεταξύ των διεργασιών περιορίζεται μεταξύ της εκάστοτε διεργασίας και της κύριας. Ειδικότερα, λόγω της ανεξαρτησίας της αεροδυναμικής επίλυσης μεταξύ των αεροτομών, δεν υφίσταται επικοινωνία μεταξύ των διεργασιών παρεκτός με τη κύρια. Κατά συνέπεια, η επικοινωνία περιορίζεται στη συλλογική αποστολή-λήψη μηνυμάτων (Collective Communications) μεταξύ της κύριας και των λοιπών διεργασιών.

Ο μέγιστος αριθμός διεργασιών περιορίζεται από το συνολικό πλήθος των αεροτομών. Στην περίπτωση που οι αεροτομές (strips) είναι περισσότερες σε σχέση με τις διεργασίες (size) ο διαμοιρασμός τους πραγματοποιείται έτσι ώστε:

- $\text{mod}(\text{size}, \text{strips}) = 0$  Όλες οι διεργασίες υπολογίζουν τον ίδιο αριθμό αεροτομών.
- $\text{mod}(\text{size}, \text{strips}) \neq 0$  Κάθε μια από τις υπολειπόμενες αεροτομές προστίθεται ξεκινώντας από την τελευταία διεργασία

Η ένα προς ένα προσθήκη των υπολειπομένων αεροτομών στις τελευταίες διεργασίες (Σχήμα 4.2) αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της αναμονής των διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση όπου μία διεργασία έχει  $\text{mod}(\text{size}, \text{strips})$  παραπάνω αεροτομές προς επίλυση, είναι εμφανές ότι στον εκάστοτε υπολογιστικό κύκλο όλες οι υπόλοιπες διεργασίες θα έχουν ολοκληρώσει τους υπολογισμούς και θα αναμένουν. Επιπλέον η προσθήκη των περισσευόμενων αεροτομών επιλέχθηκε να πραγματοποιείται στις τελευταίες διεργασίες έτσι ώστε να μην αυξάνεται ο υπολογιστικός φόρτος της κύριας διεργασίας.



Σχήμα 4.2: Διαμοιρασμός των υπολειπομένων αεροτομών (AIRFOIL STRIPS) στις διεργασίες (MPI PROCS).

## 4.4 Εξαναγκασμένη ημιτονοειδής κίνηση στο πτερύγιο

Στην παραλληλοποιημένη εκδοχή του αεροελαστικού προγράμματος GAST-FoIL2w τροποποιήθηκε η επίλυση των ελαστικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου της A/Γ INNWIND. Η τροποποίηση έγκειται στην επιβολή της παραμόρφωσης του πτερυγίου βάσει μιας εξαναγκασμένης ημιτονοειδούς κίνησης. Το παραπάνω έχει ως στόχο:

- Την αξιολόγηση της εμφάνισης συντονισμού των δινών με την επιβαλλόμενη συχνότητα της κίνησης κατά μήκος του πτερυγίου.
- Την μελέτη της επίδρασης της τρισδιάστατης γεωμετρίας του πτερυγίου στον συντονισμό, π.χ. λόγω συστροφής.
- Την επικύρωση της παραλληλοποίησης του προγράμματος.

Η μεθοδολογία για την αξιολόγηση του συντονισμού βασίζεται στον υπολογισμό της μέσης αδιάστατης αεροδυναμικής ισχύος για την εκάστοτε αεροτομή [5, 6]. (Εξίσωση 4.1). Για θετικές τιμές της  $\bar{P}_s^*$  η ενέργεια τροφοδοτείται στο πτερύγιο και αποτελεί ένδειξη κλειδώματος της συχνότητας των δινών με την συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης. Κατά αναλογία με το ελαστικό σύστημα, οι θετικές τιμές της ισχύος σχετίζονται με την παρουσία αρνητικής απόσβεσης [5]. Οι αρνητικές τιμές της ισχύος εκφράζουν τη διαφορά φάσης μεταξύ των αεροδυναμικών φορτίων και της κίνησης του πτερυγίου. Για μεγάλες αρνητικές τιμές της ισχύος, ίσου περίπου μέτρου με την περίπτωση 'lock-in' (Σχήμα 4.5), τα φορτία σε σχέση με την εξαναγκασμένη κίνηση βρίσκονται σε αντίθετη φάση (Σχήμα 4.9). Επομένως μια ενδεχόμενη ισοδυναμία για την περίπτωση ελαστικού συστήματος είναι αυτή της θετικής απόσβεσης.

$$\bar{P}_s^* = \frac{1}{\rho A c_s U_\infty^2} \int_0^T F_x \dot{x}(t) dt \quad (4.1)$$

Οι κύριες παράμετροι της εξαναγκασμένης κίνησης είναι η συχνότητα και το πλάτος της ταλάντωσης. Πιο συγκεκριμένα εισάγονται οι αδιάστατες παράμετροι της κίνησης  $A^* = A/c$  και  $T^* = TU_\infty/c$  οι οποίες σχετίζονται με την μέγιστη μεταβολή της γωνίας προσβολής  $a_{eff}^{max}$ . Η σχέση που συνδέει τις παραπάνω παραμέτρους για εξαναγκασμένη κίνηση μόνο κατά την κατεύθυνση περιστροφής (edge-wise) είναι [5, 6]:

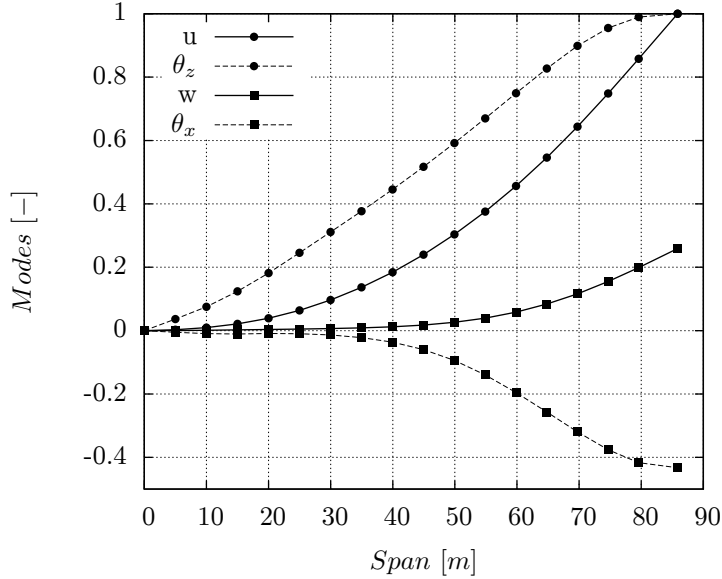
$$\frac{A^*}{T^*} = \frac{1}{2\pi} \tan a_{eff}^{max} = \frac{1}{2\pi} \frac{\dot{x}_{max}}{U_\infty} = \frac{1}{2\pi} \frac{(2\pi/T)A}{U_\infty} \quad (4.2)$$

Για την ορθότερη αξιολόγηση της επίδρασης που έχει η συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης στην συχνότητα των δινών, οι βαθμοί ελευ-

θερίας της κίνησης δεν περιορίστηκαν μόνο κατά την κατεύθυνση περιστροφής αλλά συνυπολογίστηκε και η κατεύθυνση πτερύγισης.

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών στο πτερύγιο με χρήση του υπολογιστικού κώδικα hGAST. Από τις προκείμενες ιδιομορφές επιλέχτηκε αυτή της κατεύθυνσης περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, η επιβολή της κίνησης έχει ως στόχο την προσομοίωση της παραμόρφωσης του πτερυγίου βάσει της παραπάνω ιδιομορφής. Στον εκάστοτε κόμβο του ελαστικού πλέγματος επιβάλλεται ημιτονοειδής διαταραχή συγκεκριμένου πλάτους το οποίο σταθμίζεται (Σχήμα 4.3) σε σχέση με την θέση που βρίσκεται η αεροτομή κατά μήκος του πτερυγίου. Αναφέρεται ότι στην κίνηση λαμβάνονται υπ' όψιν όχι μόνο οι καμπτικές μετατοπίσεις  $u$  (edge-wise),  $w$  (flap-wise) αλλά και οι καμπτικές γωνίες  $\theta_z$  και  $\theta_x$  αντίστοιχα. Οι επιπρόσθετοι βαθμοί ελευθερίας στις αριθμητικές προσομοιώσεις δεν έχουν διαφορά φάσης.





Σχήμα 4.3: Ιδιομορφές των βαθμών ελευθερίας της εξαναγκασμένης κίνησης κατά μήκος του πτερυγίου.

Εξαναγκάζοντας το πτερύγιο σε κίνηση και κατά την κατεύθυνση πτερύγισης η σχέση 4.2 παύει να ισχύει καθώς η μέγιστη μεταβολή της γωνίας προσβολής εξαρτάται και από την ταχύτητα του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση πτερύγισης  $\dot{z}_{max}$  (Εξίσωση 4.3).

Στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκε το πλάτος της ταλάντωσης να προκύπτει από τον λόγο  $A^*/T^* = A/TU_\infty$  για δεδομένη σαφώς συχνότητα ημιτονοειδούς κίνησης. Επομένως τα πλάτη των ταλαντώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις είναι παρόμοια με αυτά της βιβλιογραφίας [5, 6] για την περίπτωση της εξαναγκασμένης κίνησης μόνο κατά την κατεύθυνση περιστροφής και για μία αεροτομή. Η παραπάνω επιλογή πραγματοποιήθηκε με σκοπό την άμεση σύγκριση της μέσης αδιάστατης αεροδυναμικής ισχύος  $\bar{P}_s^*$  στην παρούσα μελέτη με τιμές της βιβλιογραφίας. Αναφέρεται ότι η μέση αδιάστατη αεροδυναμική ισχύς αποτελεί και ένδειξη κλειδώματος των συχνοτήτων των δινών με την συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης [6].

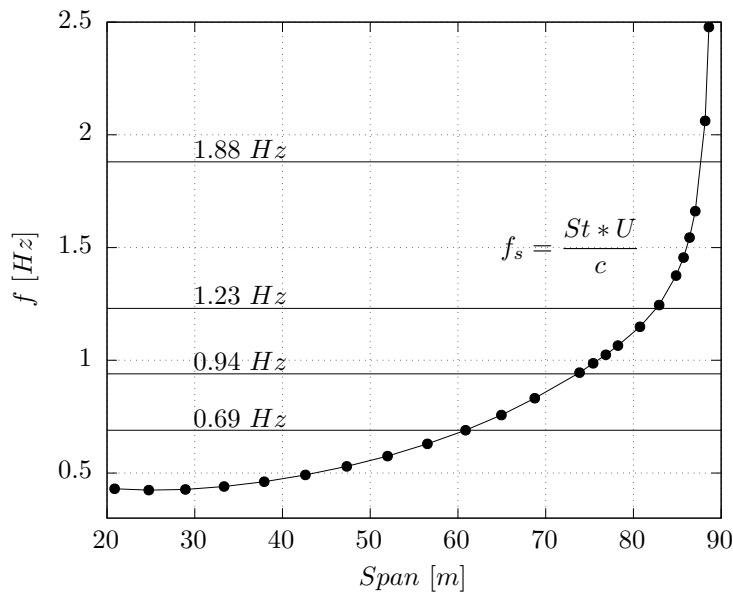
$$\tan a_{eff}^{max} = \frac{\dot{x}_{max}}{U_\infty - \dot{z}_{max}} \quad (4.3)$$

## 4.5 Αποτελέσματα - Σχόλια

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για σταθερή ταχύτητα ανέμου ίση με 25m/s και γωνία προσβολής 90° μοιρών για την περίπτωση μηδενικής συστροφής του πτερυγίου. Η συχνότητα διέγερσης κυμάνθηκε από 0.68 έως 1.88 Hz, όπου τα 0.94 Hz συμπίπτουν με την φυσική ιδιοσυχνότητα κατά την κατεύθυνση περιστροφής.

Μια αρχική προσεγγιστική εκτίμηση για την περιοχή, κατά μήκος του πτερυγίου, εμφάνισης 'lock-in' είναι μέσω του ορισμού του αριθμού St. Από την φασματική ανάλυση των αεροτομών (Παράγραφος 3.2) θεωρήθηκε μια μέση τιμή  $St=0.105$ .

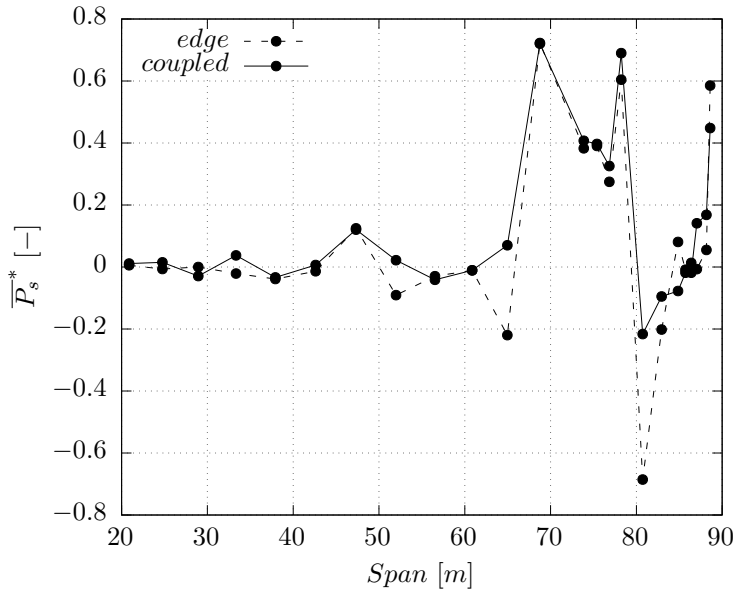
Σύμφωνα με τα παραπάνω οι προσεγγιστικές διασταυρώσεις της συχνότητας διέγερσης με την συχνότητα των δινών είναι αυτές που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Διασταυρώσεις των συχνοτήτων της εξαναγκασμένης κίνησης με τις συχνότητες των δινών κατά μήκος του πτερυγίου ( $St=0.105$ ,  $U=25\text{m/s}$ ).

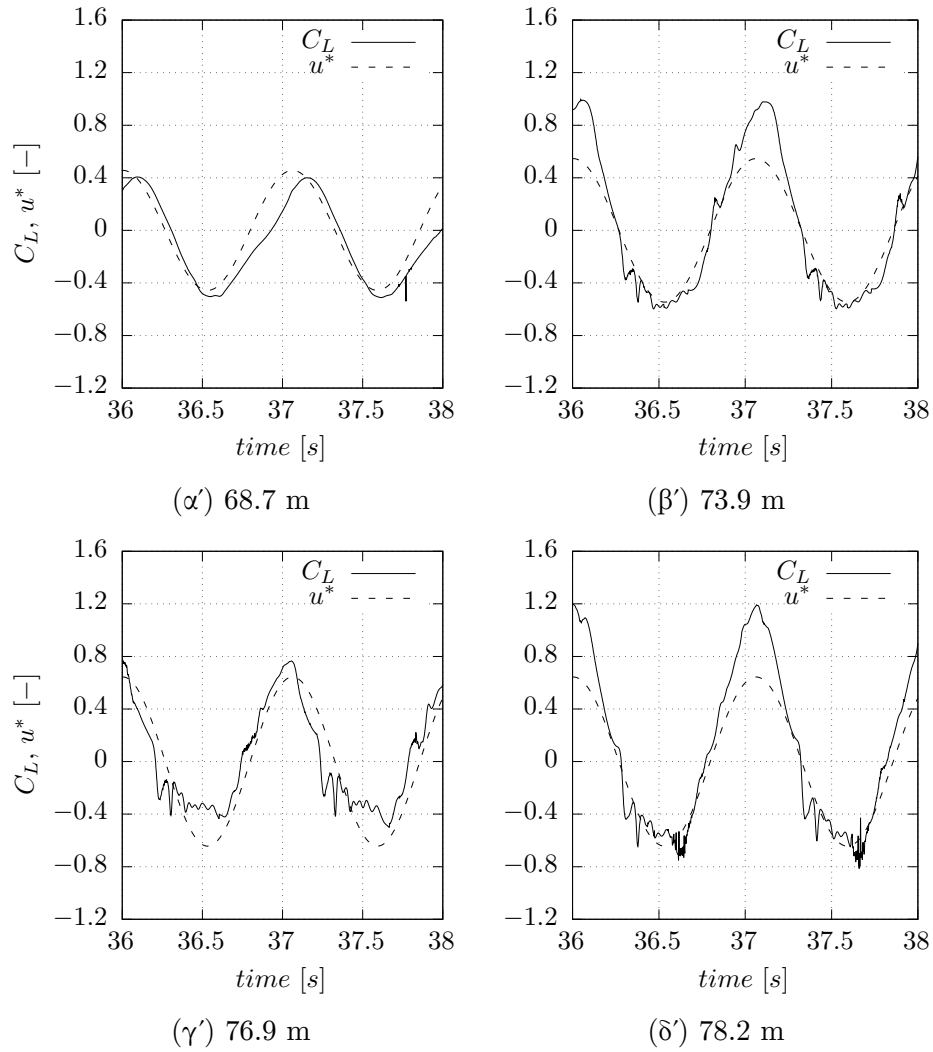
Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η μέση αδιάστατη ισχύς (Εξίσωση 4.1) κατά μήκος του πτερυγίου για την περίπτωση της εξαναγκασμένης κίνησης ( $f=0.94\text{ Hz}$ ) μόνο κατά την κατεύθυνση περιστροφής (edge-wise) και για την συζευγμένη περίπτωση όπου λαμβάνεται και η κατεύθυνση πτερύγισης (coupled). Στην περιοχή από 68.8 έως και 78.2 m παρατηρούμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις η  $\overline{P_s}^*$  λαμβάνει αρκετά υψηλές

τιμές οι οποίες υποδεικνύουν την εμφάνιση συντονισμού των δινών με την συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης.

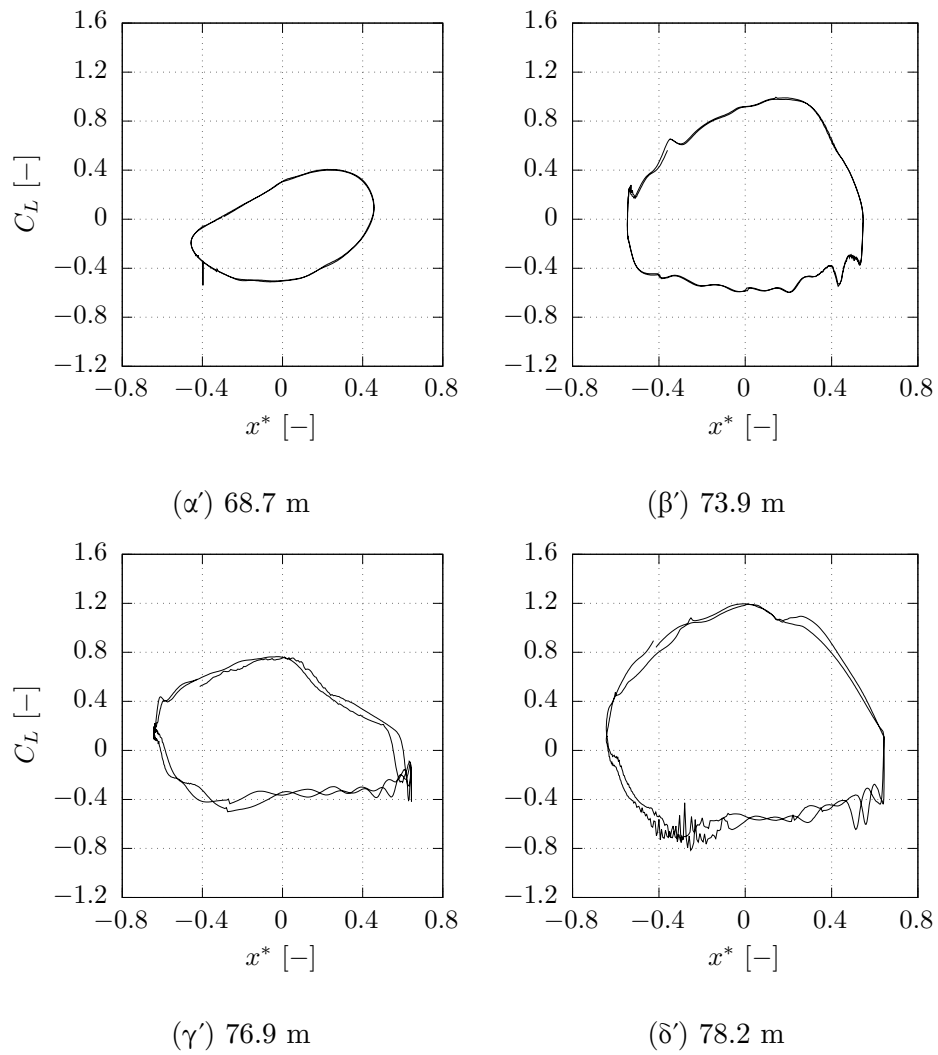


Σχήμα 4.5: Αδιαστατοποιημένη μέση αεροδυναμική ισχύς κατά μήκος του πτερυγίου ( $f=0.94$  Hz).

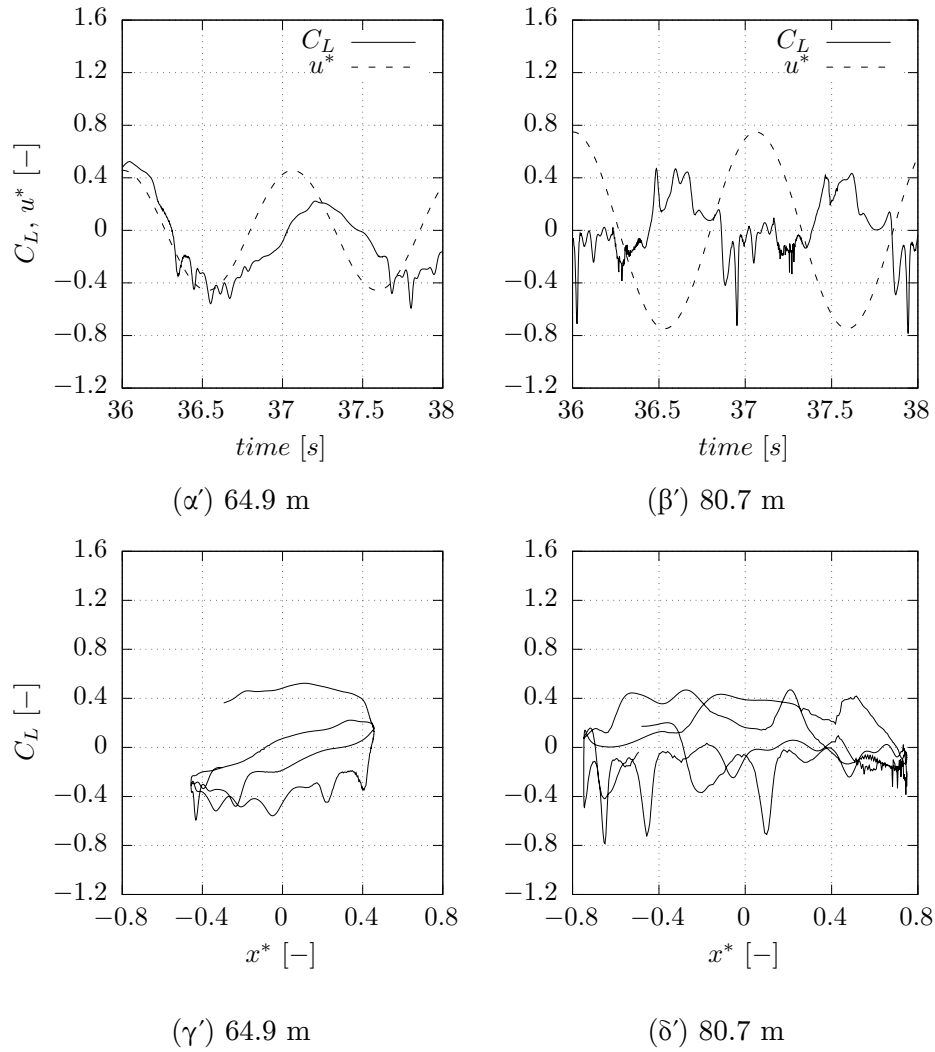
Για την ποιοτική αξιολόγηση του κλειδώματος των συχνοτήτων συγκρίνονται οι χρονοσειρές μεταξύ του συντελεστή άνωσης και της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας παραμόρφωσης ( $u^* = \dot{u}T/2\pi A = \dot{u}/\dot{u}_{max}$ ). Στη περίπτωση όπου οι χρονοσειρές των δύο αυτών μεγεθών βρίσκονται σε φάση υποδηλώνεται ότι η συχνότητα των εκλυομένων δινών λαμβάνει παραπλήσιες τιμές με την συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης (Σχήμα 4.6) .



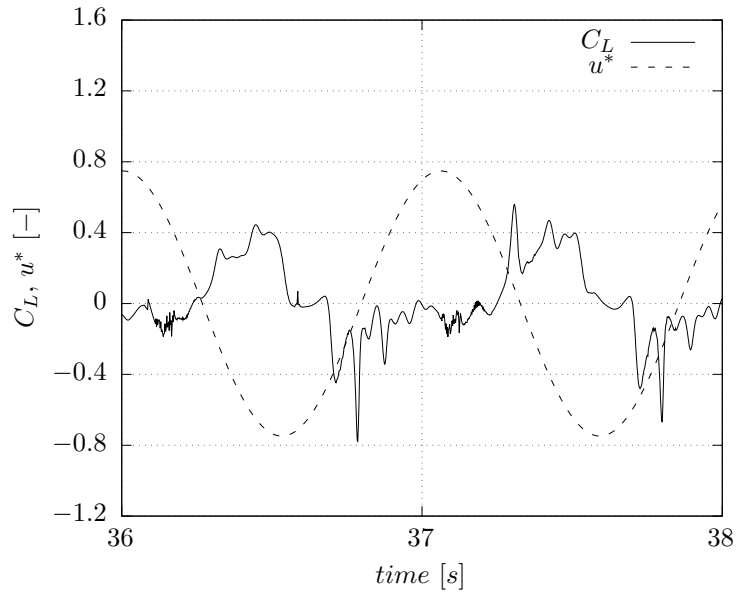
Σχήμα 4.6: Χρονοσειρές  $C_L - u^*$  για τις αεροτομές από 68.7 έως 78.2 m εντός της ζώνης συντονισμού (0.94 Hz - coupled).



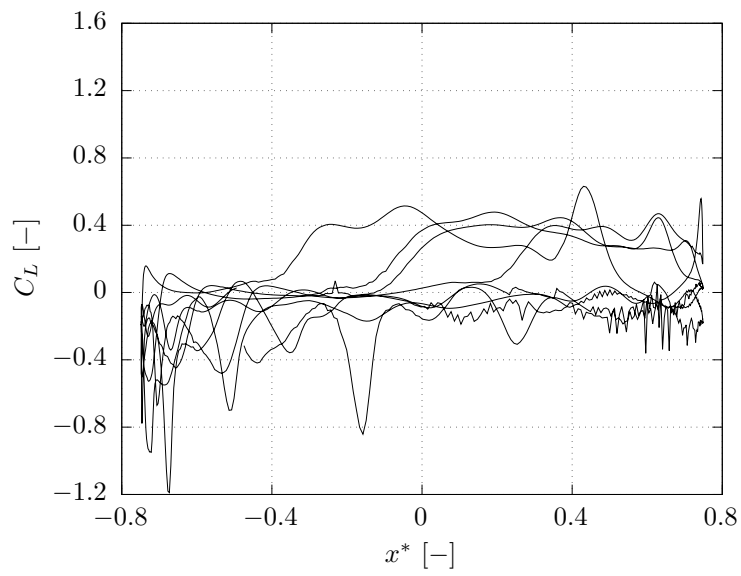
Σχήμα 4.7: Διαγράμματα  $C_L - x^*$  για τις αεροτομές από 68.7 έως 78.2 m (0.94 Hz - coupled).



Σχήμα 4.8: Διαγράμματα  $C_L - x^*$  και  $C_L - u^*$  για τις αεροτομές εκατέρωθεν της ζώνης συντονισμού (0.94 Hz - coupled)



(α')



(β')

Σχήμα 4.9: Διαγράμματα  $C_L - x^*$  και  $C_L - u^*$  για την αεροτομή στα 80.7 m,  
 $\bar{P}_s^* \approx -0.7$  (0.94 Hz - edge)

Επιπλέον μέσω της σύγκρισης του αεροδυναμικού συντελεστή άνωσης και της αδιαστατοποιημένης μετατόπισης ( $x^* = x/A$ ,  $x = u$ ) κατά την κατεύθυνση περιστροφής, λαμβάνονται οι οικογένειες καμπυλών οι οποίες παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτες για διάφορες περιόδους ταλαντώσεων το οποίο αποτελεί ένδειξη 'κλειδώματος' (Σχήμα 4.7) [6].

Τα παραπάνω συμπεραίνονται για τις αεροτομές που βρίσκονται στην περιοχή υψηλής αεροδυναμικής ισχύος.

Εκατέρωθεν της ζώνης υψηλής ισχύος ο συντελεστής άνωσης εμφανίζει διαφορά φάσης με την ταχύτητα παραμόρφωσης (Σχήμα 4.8 - (α-β)) ενώ οι καμπύλες  $C_L-x^*$  δεν επαναλαμβάνονται (Σχήμα 4.8 - (γ-δ)).

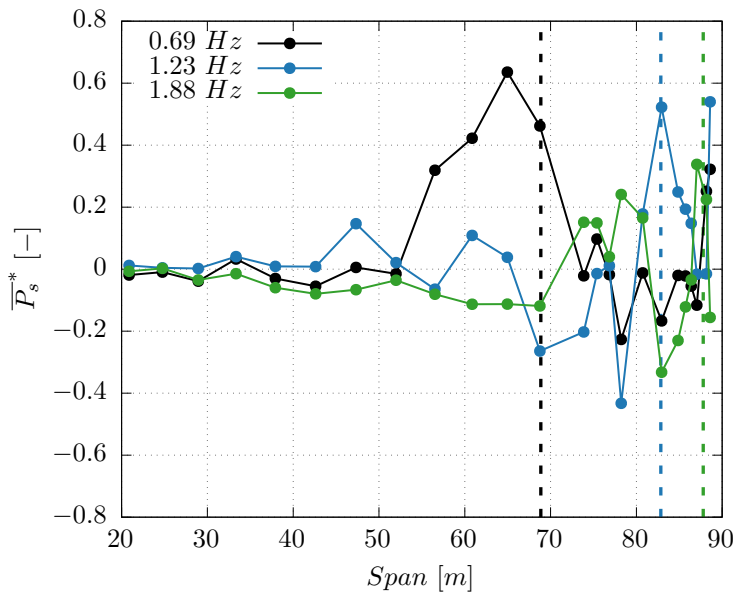
Αντιθέτως οι υψηλές αρνητικές τιμές της  $\overline{P_s^*}$  όπως παρατηρούνται στην περίπτωση της αποκλειστικά κατά την edge-wise κίνησης ( $\sim 80$  m) ο συντελεστής άνωσης έχει αντίθετη φάση από την ταχύτητα της εξαναγκασμένης κίνησης κατά την κατεύθυνση περιστροφής (Σχήμα 4.9). Αναφέρεται ότι οι τιμές της αδιάστατης αεροδυναμικής ισχύος στις τρεις από το τέλος αεροτομές, είναι εσφαλμένες λόγω αριθμητικής αστάθειας οφειλόμενης στην μικρή τιμή της χορδής.

Αναφορικά με τις συχνότητες διέγερσης μεγαλύτερης της φυσικής κατά την κατεύθυνση περιστροφής ιδιομορφής (0.94 Hz) (Σχήμα 4.10) επικρατούν μικρότερες τιμές της αδιάστατης ισχύος στην αντίστοιχη περιοχή συντονισμού (Σχήμα 4.4).

Η προσεγγιστική εύρεση του συντονισμού κατά μήκος του πτερυγίου δεν αποκλίνει σημαντικά από τα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, λόγω του υψηλού πλάτους ταλάντωσης ο συντονισμός μεταξύ της εξαναγκασμένης κίνησης και των δινών διευρύνεται για ένα εύρος αεροτομών κατά μήκος του πτερυγίου. Όπως έχει παρατηρηθεί και στην βιβλιογραφία [6] στην περίπτωση που το πλάτος της εξαναγκασμένης κίνησης - παραμόρφωσης λάβει υψηλές τιμές ο συντονισμός μεταξύ της συχνότητας της κίνησης και των δινών διευρύνεται για ένα εύρος συχνοτήτων ανάλογο του πλάτους της κίνησης.

Η αντίστοιχη ζώνη εμφάνισης συντονισμού - υψηλών τιμών της  $\overline{P_s^*}$  εμφανίστηκαν για τις περιπτώσεις των 0.69 και 0.94 Hz.





Σχήμα 4.10: Αδιαστατοποιημένη μέση αεροδυναμική ισχύς κατά μήκος του πτερυγίου για διάφορες συχνότητες εξαναγκασμένης κίνησης. Οι κάθετες διακεκομμένες γραμμές είναι οι αντίστοιχες διασταυρώσεις σύμφωνα με το Σχήμα 4.4.

Τα παραπάνω αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν για σταθερή ταχύτητα ανέμου ίση με 25 m/s και 90° μοίρες γωνία προσβολής για μηδενική συστροφή. Οι παράμετροι της εξαναγκασμένης κίνησης υπολογίστηκαν για  $A^*/T^* = 0.03$  ενώ τα πλάτη της κίνησης σταθμίστηκαν σύμφωνα με την ιδιομορφή του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση περιστροφής. Οι συχνότητες της εξαναγκασμένης κίνησης κυμάνθηκαν από 0.69 έως 1.88 Hz όπου διερευνήθηκαν οι περιοχές εμφάνισης συντονισμού κατά μήκος του πτερυγίου. Κριτήριο αξιολόγησης του συντονισμού αποτέλεσε η μέση αδιάστατη αεροδυναμική ισχύς. Σύμφωνα με τα προηγούμενα και για τις συχνότητες κίνησης που εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές της  $\overline{P_s^*}$  ο συντονισμός μεταξύ της εξαναγκασμένης κίνησης και των δινών συντελείται σε μια ζώνη κατά μήκος του πτερυγίου. Ειδικότερα οι μεγαλύτερες ζώνες συντονισμού εμφανίστηκαν για τις αεροτομές που βρίσκονται από το 65% έως το 85% του συνολικού μήκους του πτερυγίου. Για τις αεροτομές που ξεπερνούν το ποσοστό αυτό ακόμα και στην περίπτωση συντονισμού το εύρος περιορίζεται σε μία μόλις αεροτομή (Σχήμα 4.10 1.23 Hz).

## 5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αναπτύχθηκε γύρω από δύο διακριτούς άξονες διερεύνησης των ταλαντώσεων λόγω των δινών την απλή και την συζευγμένη προσέγγιση.

Στην απλή αεροελαστική προσέγγιση πραγματοποιήθηκε προσθήκη των διαταραχών λόγω έκλυσης των δινών στις μέσες τιμές των αεροδυναμικών συντελεστών του πτερυγίου της Α/Γ. Το πλάτος της διαταραχής εξαρτώταν αποκλειστικά από την γωνία προσβολής ενώ υιοθετήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις της συχνότητας των δινών κατά μήκος του πτερυγίου.

Στη συνέχεια αξιολογήθηκε η επίδραση του συντονισμού της συχνότητας των δινών με τις φυσικές συχνότητες της Α/Γ και τις επιπτώσεις που επιφέρει στα ελαστικά φορτία.

Ειδικότερα αναφέρονται οι διασταυρώσεις των συχνοτήτων των δινών με τις συχνότητες του πύργου για χαμηλές μέσες ταχύτητες ανέμου. Καθώς επίσης και οι περιπτώσεις διασταύρωσης με τις φυσικές συχνότητες των πτερυγίων.

Αναφέρεται ότι από ένα συγκεκριμένο μέτρο μέσης ταχύτητας και άνω κυριαρχούν οι ταλαντώσεις λόγω αποκόλλησης της ροής (SIV).

Η συζευγμένη αεροελαστική προσέγγιση περιορίστηκε στην εξαναγκασμένη κίνηση του πτερυγίου σύμφωνα με την ιδιομορφή του κατά την κατεύθυνση περιστροφής (edge-wise). Η περιοχή εμφάνισης συντονισμού μεταξύ της συχνότητας της εξαναγκασμένης κίνησης και της συχνότητας των δινών εμφανίζεται σε μια ζώνη-περιοχή κατά μήκος του πτερυγίου. Το εύρος της περιοχής συντονισμού εξαρτάται από την συχνότητα της εξαναγκασμένης κίνησης και το πλάτος της.

### 5.1 Συστάσεις για περαιτέρω μελέτη

Σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση μελλοντικά δύναται να μελετηθούν - αναπτυχθούν τα παρακάτω:

- Σύγκριση της ζώνης συντονισμού της συζευγμένης προσέγγισης με την αντίστοιχη προσθήκη των διαταραχών στην απλή αεροελαστική προσέγγιση.
- Παραμετρική ανάλυση της επίδρασης του συντονισμού των δινών με τις διάφορες φυσικές συχνότητες και τις συνεπαγόμενες επιπτώσεις στα ελαστικά φορτία.
- Αριθμητικές προσομοιώσεις της συζευγμένης αεροελαστικής προσέγγισης σε όλη την Α/Γ.

## Βιβλιογραφία

- [1] Riziotis V. A. *Adaptation of a vortex code for the modelling of highly separated flows in NEREA/ATENEA aeroelastic tools*. Αδημοσίευτη ερευνητική εργασία. NTUA, 2012.
- [2] Manolas D. “Hydro-Aero-Elastic analysis of Offshore Wind Turbines”. Διδακτορική διατρ. NTUA, School of Mechanical Engineering, Fluids Sector, 2015.
- [3] *EU project INNWIND: INNovative WIND conversion systems (10-20MW) for offshore applications*. URL: <http://www.innwind.eu>.
- [4] Hansen M. H. “Aeroelastic Instability Problems for Wind Turbines”. Στο: *Wind Energy* (2007).
- [5] Sorensen N. Skrzypinski W. Gaunaa M., Zahle F. και Heinz J. “Vortex-induced vibrations of a DU96-W-180 airfoil at 90° angle of attack”. Στο: *Wind Energy* (2014).
- [6] Voutsinas S. G. Zou F. Riziotis V. A. και Wang J. “Analysis of vortex-induced and stall induced vibrations at standstill conditions using a free wake aerodynamic code”. Στο: *Wind Energy* (2014).