



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

---

# Διερεύνηση Μοντελοποίησης Υποστηρικτικού Δικτυώματος για Πτέρυγα Ανεμογεννήτριας

---

Διπλωματική Εργασία

Σταυρόπουλος-Βασιλάκης Ευάγγελος

Επιβλέπων: Βουτσινάς Σπύρος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 10 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 2015





**National Technical University of Athens**  
**SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**SECTION OF FLUIDS**  
**LABORATORY OF AERODYNAMICS**

---

# **Modelling Supporting Truss Structure for Wind Turbine Blade**

---

Diplomat Thesis

**Stavropoulos-Vasilakis Evangelos**

*Supervisor:* Voutsinas Spyros, Professor NTUA

ATHENS 10 SEPTEMBER 2015



## Περίληψη

Οι τάσεις στο σχεδιασμό των σύγχρονων ανεμογεννητριών, επιβάλλουν τη μεγέθυνση των κατασκευών και επιζητούν πιο ελαφριές, πιο εύκαμπτες και πιο ανθεκτικές πτέρυγες. Προκύπτει η ανάγκη λοιπόν, χρήσης ανεπτυγμένων τεχνικών και υλικών στο σχεδιασμό και την κατασκευή των πτερύγων, με έμφαση στη σύζευξη των καταπονήσεων, την αύξηση του λόγου ευκαμψίας προς το βάρος, και τον ενεργητικό και παθητικό έλεγχο της κατασκευής. Σε αυτά τα πλαίσια, προτείνονται νέες υποστηρικτικές δομές για τις πτέρυγες και διατάξεις ελέγχου. Η παρούσα εργασία, διερευνά τη χρήση ενός δικτύωματος ως υποστηρικτική δομή στην πτέρυγα και εστιάζει στον προσδιορισμό της ισοδύναμης δοκού, ώστε να μπορεί να διεξαχθεί αεροελαστική ανάλυση της συνολικής κατασκευής. Η χρήση του δικτύωματος μπορεί να συμβάλει στην κατεύθυνση της μείωσης του βάρους αλλά και της εφαρμογής προηγμένων μεθόδων παθητικού και ενεργού ελέγχου.

## **Abstract**

Today's tendencies in wind turbine design, impose larger and larger machines and ask for lighter, more flexible and more resistant blades. This results in the need of use of advance techniques and materials in the design and construction of the blade, focusing on the couplings of loads, on the increase of flexibility to weight ratio, on the active and passive control of the structure. In this framework, new supporting structures for the blades and new control devices have been proposed. The present work, investigates the use of a truss as a supporting structure for the blade and focuses on the identification of the *equivalent beam*, so that aeroelastic analysis could be conducted on the whole structure. The use of a truss could contribute towards weight reduction as well as the application of advanced passive and active control methods.



## Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, με κέντρισε περισσότερο η μελέτη των δυναμικών φαινομένων, είτε πρόκειται για προβλήματα στερεών, ρευστών ή άλλων συστημάτων. Η δυναμική ανάλυση των προβλημάτων συνεισφέρει σημαντικά στην εμβάθυνση και καλύτερη αντίληψη του προβλήματος, ενώ η αξιοποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών των συστημάτων δίνει πολλές φορές λύσεις που σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν αδύνατο να συλληφθούν.

Η Μηχανική των Ρευστών αποτελεί ένα πεδίο αδιάλειπτης έρευνας και πολυποικίλων εφαρμογών, το οποίο με τράβηξε περισσότερο, οπότε και σε συνδυασμό με το ενδιαφέρον προς τα δυναμικά προβλήματα, η Αεροελαστικότητα φάνηκε πολύ ελκυστική. Η μη μόνιμη ροή, η αλληλεπίδραση στερεού σώματος και ρευστού και τα δυναμικά φαινόμενα που αναπτύσσονται απ' αυτή, αποτελούν πολύ ενδιαφέροντα θέματα προς εξερεύνηση για μένα, αλλά και αντικείμενο μελέτης από τους ερευνητές στα πλαίσια των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και την αεροναυπηγική.

Η διπλωματική εργασία αυτή έρχεται να επιστεγάσει τις σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, οι οποίες με τη σειρά τους κλείνουν τον κύκλο της δημόσιας δωρεάν παιδείας που με εξόπλισε με τις γνώσεις, τις εμπειρίες και τα εφόδια ώστε να μπορώ να σταθώ ως άρτιος επιστήμονας και συνειδητός πολίτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα, κ. Βουτσινά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στο συγκεκριμένο θέμα, για την καθοδήγηση και την πάντοτε ουσιαστική βοήθεια στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, καθώς και για την μεταδοτικότητα στα μαθήματα που μας δίδαξε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Δημήτρη Μανωλά, για την επικοινωνιακή, καίρια και πάντα πρόθυμη συνεισφορά του, η οποία με βοήθησε να ολοκληρώσω την προσπάθεια αυτή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μητέρα μου και τον αδερφό μου για την συμπαράστασή τους κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας.





# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Σκοπός της Εργασίας	1
1.2	Τοποθέτηση του Προβλήματος	1
1.3	Υπολογιστικά Εργαλεία	2
<b>2</b>	<b>Εναλλακτικές Δομές στήριξης πτερύγων</b>	<b>3</b>
2.1	Cellular Structures	3
2.2	Έλεγχος	7
<b>3</b>	<b>Μοντελοποίηση Πτερύγων Ανεμογεννήτριας</b>	
	<b>Υπολογισμός Ισοδύναμης Δοκού</b>	<b>12</b>
3.1	Generalized Timoshenko Model	13
3.2	Superelements	15
3.3	Δομική Εξιδανίκευση	16
3.4	Structural Data Reduction	17
<b>4</b>	<b>Εξαγωγή Ισοδύναμης Δοκού Δικτυώματος</b>	<b>21</b>
4.1	Άμεσος Προσδιορισμός	23
4.2	Έμμεσος Προσδιορισμός	24
4.3	Εξαγωγή Ισοδύναμης Δοκού Τυπικού Ορθογωνικού Δικτυώματος	25
4.3.1	Άμεσος Προσδιορισμός	26
4.3.2	Έμμεσος Προσδιορισμός	29
<b>5</b>	<b>Παραμετρική Ανάλυση Δικτυώματος</b>	<b>35</b>
5.1	Δομή Δικτυώματος	35
5.2	Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες	37
5.2.1	Σύγκριση Ιδιομορφών	37
5.2.2	Σύγκριση Ιδιοσυχνοτήτων	38
5.2.3	Στατική παραμόρφωση	43
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>47</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>49</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αντικατάστασης της εσωτερικής υποστηρικτικής δομής της πτέρυγας ανεμογεννήτριας, από ένα δικτύωμα. Αφορμή για αυτή την διερεύνηση αποτελεί το γεγονός ότι η ευστάθεια της ανεμογεννήτριας αλλά κι η κόπωση των υλικών από τα δυναμικά φορτία που εφαρμόζονται στις πτέρυγες, γίνονται όλο και πιο σημαντικοί παράγοντες σχεδίασης καθώς οδεύουμε σε όλο και μεγαλύτερες μηχανές. Συνυπολογίζοντας την ανάγκη για όσο πιο αποδοτική λειτουργία σε συνθήκες εκτός σημείου σχεδίασης, οι ερευνητές τείνουν να σχεδιάσουν πτέρυγες που να προσαρμόζονται καλύτερα στη ροή αρχικά δια εφαρμογής νόμων ελέγχου, και στη συνέχεια κάνοντάς τις πιο εύκαμπτες. Προς αυτή τη κατεύθυνση προσανατολίζονται οι προσπάθειες για ανάπτυξη εύκαμπτων αεροτομών που εντάσσονται στην κατηγορία των 'passive morphing aifoils'. Ακόμη μία σημαντική παράμετρος που οδηγεί προς αυτή την κατηγορία πτερυγών, κυρίως την αεροναυπηγική, είναι το γεγονός ότι οι συμβατικές επιφάνειες ελέγχου (flaps, slats...) αποτελούνται από κινητά μέρη τα οποία δημιουργούν ασυνέχειες στην επιφάνεια των πτερυγών και επηρεάζουν έτσι τη ροή γύρω από αυτές και εν συνεχεία την απόδοσή τους. Χρήση του δικτυώματος στοχεύει στην αντιμετώπιση όλων αυτών των ζητημάτων, και κυρίως στην επαρκή στήριξη της πτέρυγας, τη μείωση του βάρους της, την αύξηση της ελαστικότητάς της αλλά και στην ευκολότερη εφαρμογή ελέγχου μέσω γραμμικών επενεργητών.

### 1.2 Τοποθέτηση του Προβλήματος

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον προσδιορισμό της "ισοδύναμης δοκού" για το υπό εξέταση δικτύωμα, έτσι ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί στους αεροελαστικούς υπολογισμούς της ανεμογεννήτριας. Ο προσδιορισμός της "ισοδύναμης δοκού", είναι μια συνήθης διαδικασία καθώς η αεροελαστική ανάλυση της ανεμογεννήτριας σε πλήρη γεωμετρία δεν είναι υπολογιστικά δυνατή. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες από τους ερευνητές, οι οποίοι προσπαθούν να δώσουν μία προσέγγιση της συμπεριφοράς της πτέρυγας λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ασυμμετρίες και την ανισοτροπία της κατασκευής, αλλά και τις μεθόδους μοντελοποίησης της δοκού αυτής (Bernoulli ή Timoshenko). Στην παρούσα εργασία, λόγω της ασυνέχειας του υλικού, όπως προκύπτει από το δικτύ-

ωμα, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε μια απλή μέθοδο εξιδανίκευσης της κατασκευής (*structural idealisation*) και στοχεύουμε τόσο στην επικύρωση όσο και στην βελτίωση της μέσω αντίστροφου σχεδιασμού (*inverse design*).

### 1.3 Υπολογιστικά Εργαλεία

Η εργασία αυτή αποτελεί υπολογιστική διερεύνηση και ανάλυση δικτύωματος ως υποστηρικτική δομή πτέρυγας ανεμογεννήτριας. Προς αυτή τη κατεύθυνση επιλύθηκε το στατικό ελαστικό πρόβλημα και το πρόβλημα ιδιοτιμών για το δίκτυωμα και την "ισοδύναμη δοκό", κάνοντας χρήση του λογισμικού hydro-GAST.

Ο κώδικας hydro-GAST [18] [19] [25] [22] έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Αεροδυναμικής της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την αεροελαστική ανάλυση υπεράκτιων ανεμογεννητριών (off-shore HAWT). Βασίζεται σε multi-body ανάλυση, των πτερύγων, του πύργου της ανεμογεννήτριας που αποτελείται από ένα δίκτυωμα και της πλατφόρμας που επιπλέει, λαμβάνοντας υπόψη τόσο αεροδυναμικά όσο και υδροδυναμικά φαινόμενα. Για την αερολαστική ανάλυση των πτερυγίων, χρησιμοποιούνται "ισοδύναμες δοκοί" που αντιπροσωπεύουν τη δομή των πτερυγίων, και δίνονται ως δεδομένα στο πρόγραμμα. Για την αεροδυναμική ανάλυση γίνεται χρήση της μεθόδου Blade Element Momentum και μοντέλων ONERA και Beddoes–Leishmann.

Επιπλέον δημιουργήθηκαν κώδικες προ- και μετα- επεξεργασίας για την δημιουργία του δικτύωματος προς ανάλυση και την εξαγωγή της αντίστοιχης ισοδύναμης δοκού. Οι κώδικες αυτοί γράφτηκαν με σκοπό να χρησιμοποιούνται παράλληλα με τον GAST οπότε γράφουν και διαβάζουν τα αρχεία εισαγωγής και εξαγωγής του GAST. Βασική λειτουργία τους είναι η δημιουργία ενός δικτύωματος που εντάσσεται στο εσωτερικό της πτέρυγας, η οποία δίνεται ως δεδομένο εισαγωγής, με λογική mesh mapping, χρησιμοποιώντας τη τεχνική της παρεμβολής Coons [23], και στη συνέχεια η εξαγωγή της ισοδύναμης δοκού βάσει της μεθόδου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια και σύγκρισης της απόκρισης της σε φορτία με αντίστοιχα αποτελέσματα του GAST.

## Κεφάλαιο 2

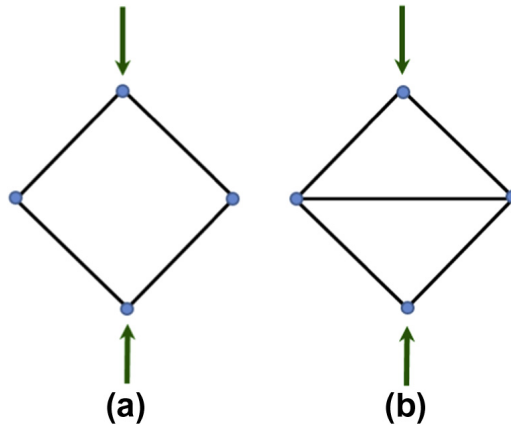
# Εναλλακτικές Δομές στήριξης πτερούγων

Η συμβατική εσωτερική δομή της πτέρυγας μιας ανεμογεννήτριας, αποτελείται από μια διάταξη διαμήκων μεταλλικών νεύρων που στηρίζουν τις στρώσεις προηγμένων σύνθετων υλικών (*Composite Materials*) που σχηματίζουν τις επιφάνειες των αεροτομών, οι οποίες διαδραματίζουν δομικό ρόλο.

Ερευνητές προτείνουν εναλλακτικές δομές που εντάσσονται σε μια κατηγορία κατασκευών που ονομάζεται "*Cellular Structures*" ή "*Κυψελοειδείς Κατασκευές*". Αυτές οι κατασκευές παρουσιάζουν ιδιότητες που ανταποκρίνονται πιο αποδοτικά στην λειτουργία των αεροτομών και ανοίγουν νέες προοπτικές στην προσαρμογή (ενεργό ή παθητικό έλεγχο) των αεροτομών στη περιβάλλουσα ροή.

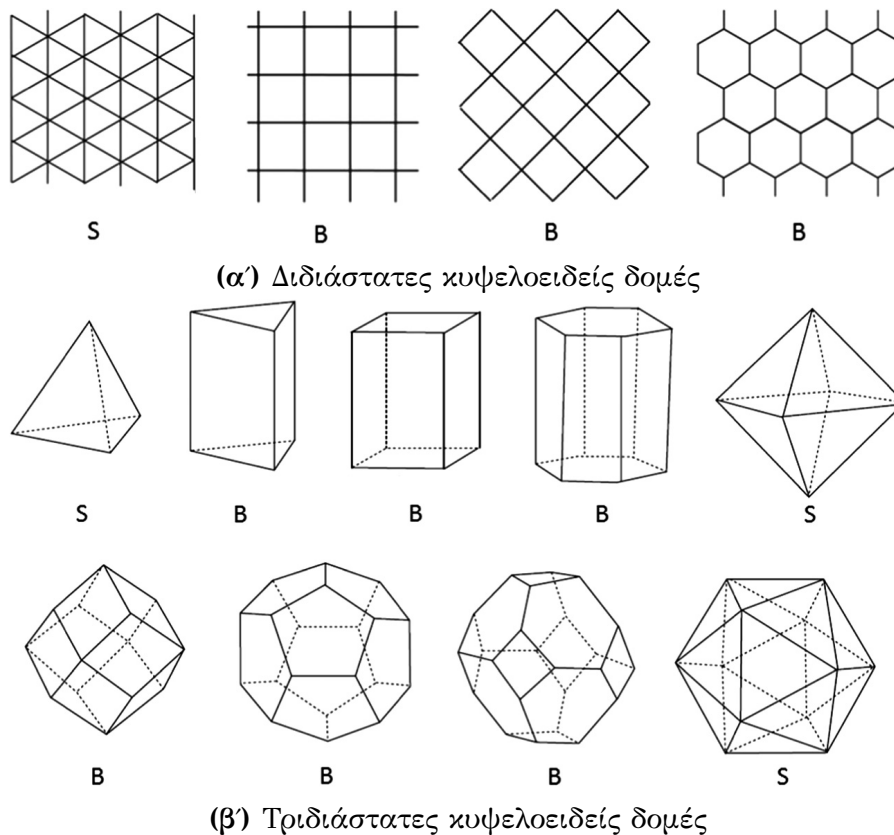
### 2.1 Cellular Structures

Σε αυτή τη κατηγορία, σύμφωνα με τους Heo et al. [11], εντάσσονται δομές που αποτελούνται από ένα δίκτυο στέρεων στύλων ή πλακών, όπως τα δικτυώματα από ράβδους, honeycombs (κυψελοειδείς διατάξεις πλακών) και πορώδη υλικά. Αυτές οι δομές παρουσιάζουν αρκετό ενδιαφέρον καθώς ο λόγος της στιβαρότητας προς το βάρος είναι πολύ υψηλός, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές όπου επιθυμείται ελαχιστοποίηση βάρους αλλά αύξηση της αντοχής και της ελαστικότητας της κατασκευής, βασικό στόχος για την αεροναυπηγική αλλά και τον τομέα των ανεμογεννητριών. Ακόμα ένα πλεονέκτημα των δομών αυτών είναι ότι σύνδεση των επιμέρους στοιχείων καθορίζει την στιβαρότητα ή την ελαστικότητα της συνολικής κατασκευής αλλά και τη απόκρισή τους στη φόρτιση είτε ως μηχανισμός είτε ως φορέας, δηλαδή είτε επιτρέποντας κάποια παραμόρφωση είτε παραλαμβάνοντας τη φόρτιση στηρίζοντας όλη τη κατασκευή, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Τέλος, οι ιδιότητες της δομής και η συμπεριφορά της συνολικής κατασκευής μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες του προβλήματος ρυθμίζοντας κάποιες βασικές παραμέτρους των δομών όπως τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους.



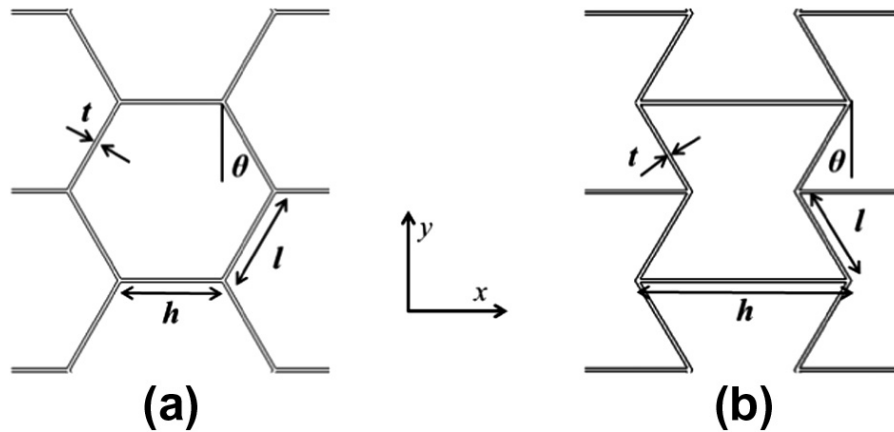
**Σχήμα 2.1:** Πλαίσια σε διάταξη (a) μηχανισμού-bending dominated και (b) φορέα-stretching dominated, κατά τους Heo et al. [11].

Η λειτουργία τους μπορεί να αλλάξει ανάλογα τη φόρτιση, γεγονός αρκετά ενδιαφέρον για passive morphing (παθητική διαμόρφωση) εφαρμογές. Η συνδεσμολογία των επιμέρους στοιχείων των δομών αυτών καθορίζει, ανάλογα και με τη φορά φόρτισης, την εμφάνιση καμπτικών ή εφελκυστικών τάσεων και τροπών (*stretching or bending dominated*), και με την ανάλυση της ομάδας του H. Heo [11] καταλήγουμε στην κατάταξη κάποιων βασικών επίπεδων και χωρικών δομών όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 2.2.

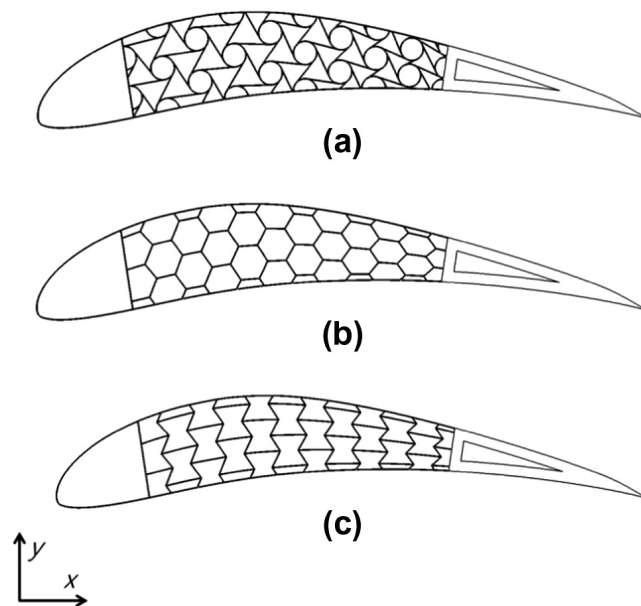


**Σχήμα 2.2:** Κατάταξη σε δομές stretching (S) και bending (B) dominated, σύμφωνα με τους Heo et al. [11].

Στο άρθρο τους [11], ο H.Heo κι η ομάδα του διερευνούν τη χρήση εξαγωνικών *re-entrant honeycomb* ως υποστηρικτικών εσωτερικών δομών αεροτομών υπό στατικών αεροδυναμικών φορτίων, σε μία διάταξη που δεν περιλαμβάνει τις ακμές προσβολής και εκφυγής. Καταλήγει στο συμπέρασμα ότι δομές bending dominated είναι κατάλληλες για παθητικά διαμορφούμενες αεροτομές. Σε αεροτομές υπό αεροστατικά φορτία, η πιο σημαντική φόρτιση που καταπονεί τις κυψελοειδείς κατασκευές είναι η διάτμιση και το *re-entrant honeycomb* εμφανίζει τη μεγαλύτερη διατμητική ελαστικότητα.

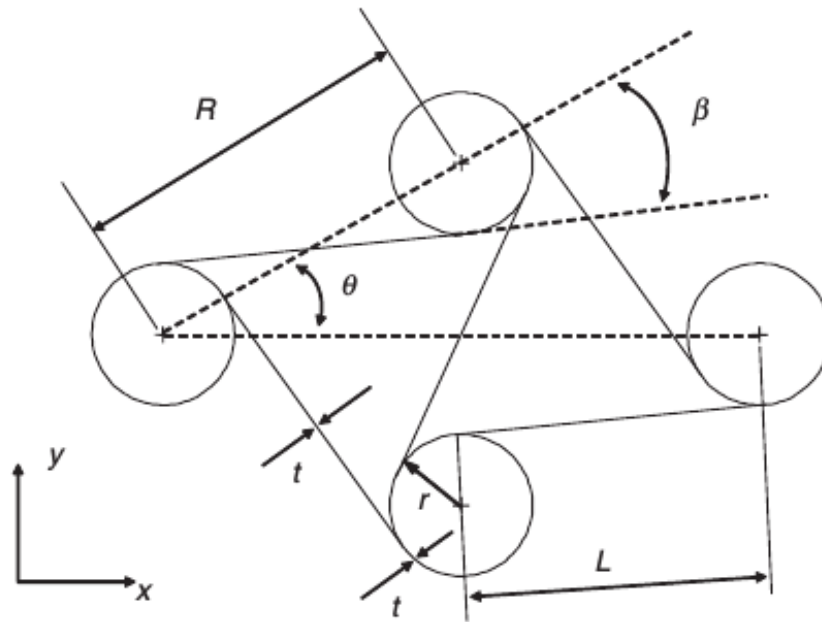


**Σχήμα 2.3:** Η δομή και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των regular και re-entrant honeycombs, σύμφωνα με το [11].



**Σχήμα 2.4:** Παράδειγμα προσαρμογής των cellular δομών σε αεροτομές μέσω της τεχνικής mapping, από το [11]: (a) chiral core (b) regular honeycomb (c) re-entrant honeycomb.

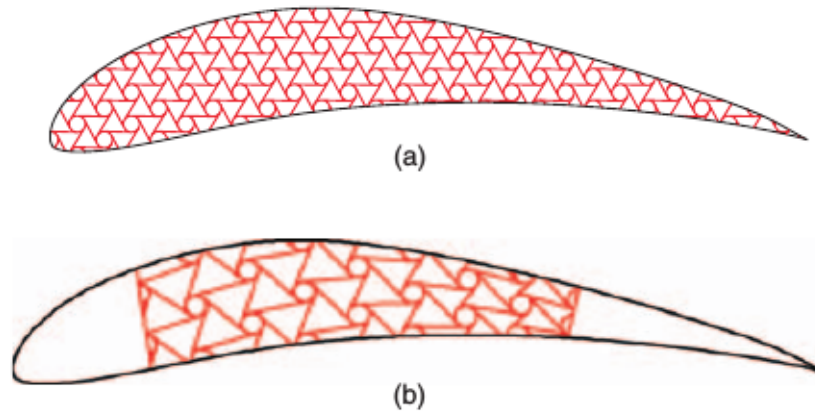
Οι Spadoni και Ruzzene, έχουν προηγηθεί της ομάδας του H.Heo, και διερευνούν το ίδιο πρόβλημα χρησιμοποιώντας χειρικές δομές (*chiral structures*), [1].



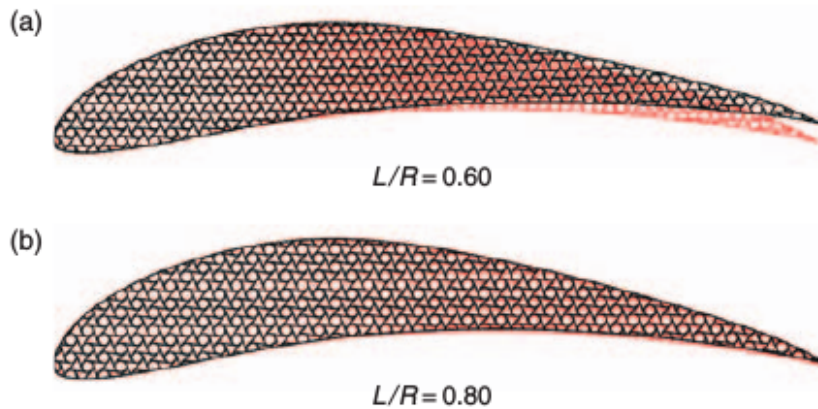
Σχήμα 2.5: Η βασική γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά μεγέθη της χειρικής δομής των Spadoni και Ruzzene [1].

Οι δομές αυτές εμφανίζουν μεγάλο ενδιαφέρον καθώς διαθέτουν in-plane αριθμό Poisson ίσο με  $-0.91$  οπότε παραμορφώνονται με μοναδικό τρόπο κάτω από συνηθισμένα φορτία. Επίσης παρουσιάζουν υψηλό συντελεστή διάτμησης και μπορούν να παραλάβουν μεγάλες παραμορφώσεις λειτουργώντας στην ελαστική περιοχή. Η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών μεγεθών της δομής μπορεί να τροποποιήσει τη συμπεριφορά της, καθιστώντας τις chiral δομές ιδιαίτερα εύκολα προσαρμόσιμες στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τέλος η δομή αυτή μπορεί να δημιουργεί τοπικές δυναμικές παραμορφώσεις, ιδιότητα δυνητικά χρήσιμη για ενεργό έλεγχο της ροής (*active flow control*). Στην υπολογιστική έρευνά τους, [1], επεξεργάστηκαν δύο βασικές διατάξεις, μία όπου η chiral δομή καταλαμβάνει όλη την αεροτομή και μια όπου περιορίζεται στο κεντρικό τμήμα, ανάμεσα στην ακμή πρόσπτωσης και την ακμή εκφυγής, βλ. εικόνα 2.6. Γίνεται κατανοητή η ευκολία προσαρμογής της δομής σε απαιτητικές γεωμετρίες και η ελευθερία που δίνεται στον μηχανικό να εξειδικεύσει τη κατασκευή για τις ανάγκες του, γεγονός που ενισχύεται από την δυνατότητα περαιτέρω ρύθμισης των χαρακτηριστικών μεγεθών όπως φαίνεται από τη παραμετρική μελέτη που διεξήγαγαν οι Spadoni και Ruzzene, βλ. εικόνα 2.7. Οι έρευνες έχουν συνεχιστεί και ένα πρωτότυπο έχει κατασκευαστεί, βλ. [26] και [5].





**Σχήμα 2.6:** Οι δύο διαφορετικές προσαρμογές της χειρικής δομής στη εξωτερική γεωμετρία, που εξέτασαν οι Spadoni και Ruzzene [1].



**Σχήμα 2.7:** Ρύθμιση της απόκρισης της κατασκευής σε φορτία προσαρμόζοντας το λόγο δύο βασικών μεγεθών της χειρικής δομής, σύμφωνα με τους Spadoni και Ruzzene [1].

## 2.2 Έλεγχος

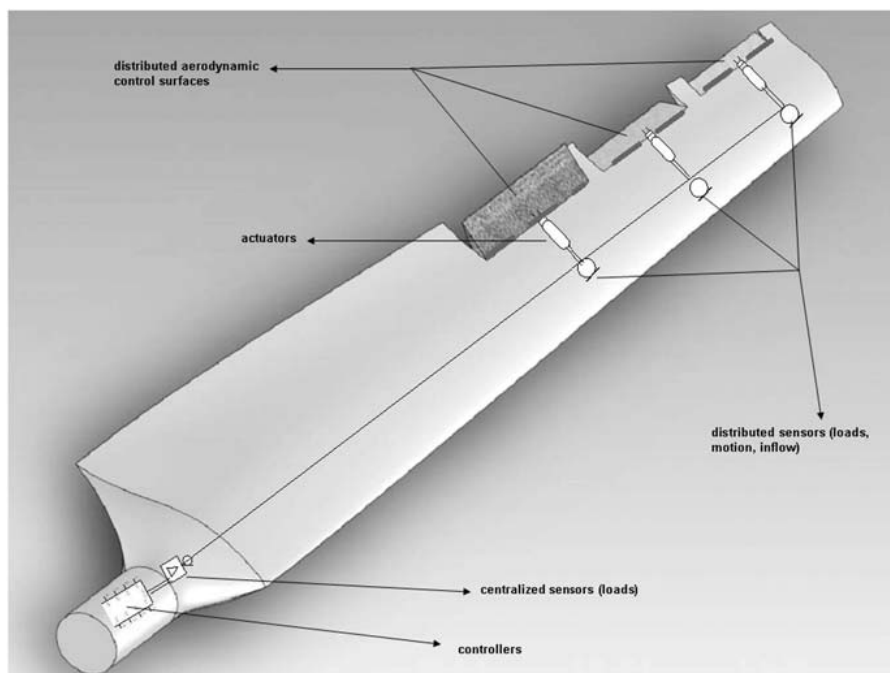
Οι κυψελοειδείς δομές, εκτός από τις ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν, δίνουν νέες δυνατότητες για εφαρμογή ενεργού και παθητικού ελέγχου στις αεροτομές των πτερυγών.

Στις ανεμογεννήτριες ο έλεγχος είναι χρήσιμος για την ελάττωση των φορτίων και της κόπωσης της κατασκευής, ειδικά όσο οι μηχανές αυξάνουν σε μέγεθος, και την πιο αποδοτική λειτουργία των κάτω από διάφορες συνθήκες. Ο έλεγχος μπορεί να είναι είτε ενεργός είτε παθητικός [4] [14].

Στον παθητικό έλεγχο εντάσσονται τεχνικές προσαρμογής της αεροδυναμικής και αεροελαστικής απόκρισης των πτερυγίων στη ροή, με πιο παραδοσιακή τη μέθοδο της

τεχνικής απώλειας στήριξης (stall regulation/stall control). Στον ενεργό έλεγχο κατατάσσονται μέθοδοι που ρυθμίζουν δυναμικά τις αεροδυναμικές ιδιότητες των πτερυγών βάσει μετρήσεων αισθητήρων, η πιο ανεπτυγμένη των οποίων είναι η τεχνική pitch control. Συνδυασμό των δύο τεχνικών προτείνουν οι Muljadi et al. [21] καθώς και κατάλληλο νόμο ελέγχου ώστε να επιτυγχάνεται μεγιστοποίηση της απόδοσης στις μικρές ταχύτητες και να περιορίζεται η μέγιστη περιστροφική ταχύτητα στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.

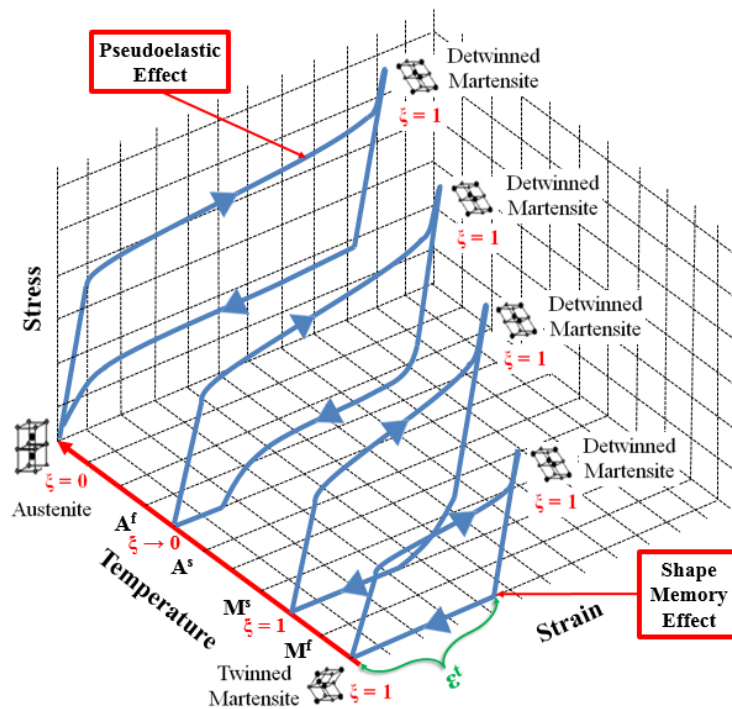
Άλλες πιο εξελιγμένες και αποδοτικές τεχνικές, που ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις των σύγχρονων ανεμογεννητριών, περιλαμβάνουν σύζευξη παραμορφώσεων (tension-torsion, bend-twist, sweep-twist coupling) για το παθητικό έλεγχο, υπεραντωτικές διατάξεις (flaps, microtabs) για τον ενεργό έλεγχο και τεχνικές Μορφοποίησης Σχήματος (Shape morphing), οι οποίες μπορούν να λειτουργούν είτε παθητικά είτε δυναμικά.



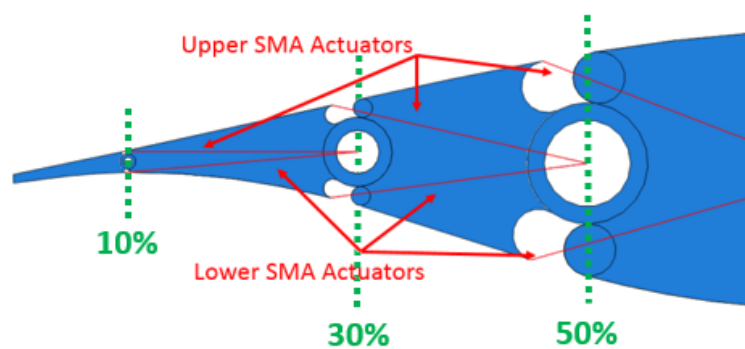
Σχήμα 2.8: Ιδέα Έξυπνης Πτέρυγας (Smart Blade) με υπεραντωτικές διατάξεις για ενεργό έλεγχο [4].

Στην εργασία των Andersen et al. [2], η χρήση flaps αποδεικνύεται πολύ αποδοτική, επιτυγχάνοντας μέχρι 60% μείωση της flapwise ροπής στη ρίζα της πτέρυγας. Οι Karakalas, Riziotis et al. [14] [15] διερεύνησαν τη χρήση Shape Memory Alloys (SMA) σε επενεργητές για την κατάλληλη παραμόρφωση της ακμής εκφυγής (Trailing Edge) βάσει ενός νόμου ελέγχου στη ροή και την ελάττωση των ασκούμενων στη πτέρυγα φορτίων, ώστε να μειωθεί η κόπωση και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της.

Στην αεροναυπηγική, ενεργός έλεγχος εφαρμόζεται στα αεροσκάφη μέσω υπεραντωτικών διατάξεων (flaps, slats, ailerons) ενώ παθητικός μέσω του αεροδυναμικού σχεδιασμού της πτέρυγας. Έχουν προταθεί διατάξεις Shape Memory Alloys από τους Icardi et al. [13] για το Trailing Edge σε συνδυασμό με κυψελωτή υποστηρικτική δομή (honeycomb

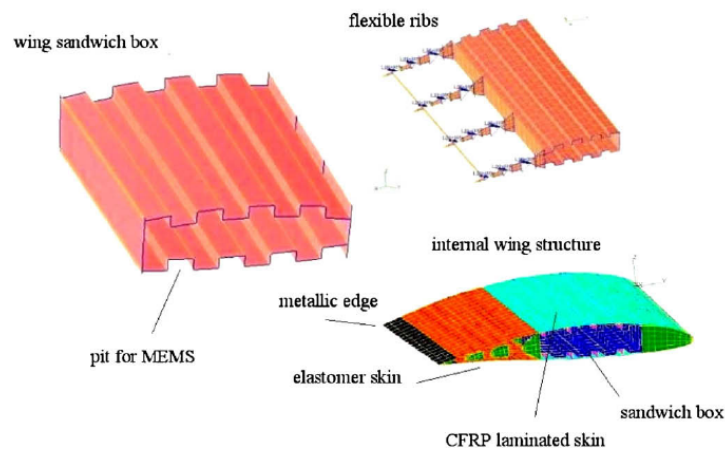


Σχήμα 2.9: Η ιδιότητα των Shape Memory Alloys είναι ότι "θυμούνται" την προ-παραμόρφωσης κατάσταση και γυρνάνε σε αυτή με την αύξηση της θερμοκρασίας (από [14]).



Σχήμα 2.10: Η προτεινόμενη από τους Karakalas et al. [14] [15] δομή του επενεργητή από SMA στην ακμή εκφυγής.

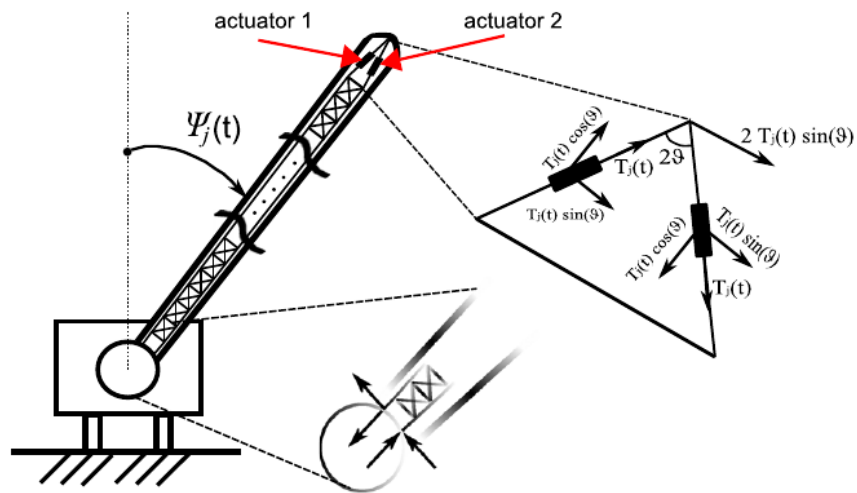
sandwich box) για την υπόλοιπη πτέρυγα, ώστε να είναι δυνατή η μορφοποίηση των αεροτομών (shape morphing) με συνεχή τρόπο.



Σχήμα 2.11: Προτεινόμενη δομή πτερυγίου από τους Icardi et al. [13], με honeycomb sandwich box και SMA επενεργητή στην ακμή εκφυγής.

Στις νέες και εξελισσόμενες αυτές μεθόδους, ειδικά στις τεχνικές shape morphing, οι κυψελωτές κατασκευές μπορεί να αποδειχθούν πολύ χρήσιμες, λόγω της εύκολα προσαρμόσιμης δομής τους, των μηχανικών ιδιοτήτων τους αλλά και της ευκολίας εφαρμογής ελέγχου που εμφανίζουν.

Οι Ramrakhiani et al. [24] πρότειναν διατάξεις υποστηρικτικών δικτυωμάτων, οι οποίες συνδυάζονται με καλώδια που τραβούν ή ελευθερώνουν μέρη της κατασκευής, ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη παραμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας και να εφαρμόζεται ο επιθυμητός ενεργός έλεγχος. Έχουν όμως προταθεί και διατάξεις με ενεργά στοιχεία, δηλαδή γραμμικούς επενεργητές στη θέση ράβδων, όπως αυτή των Baker και Friswell [3], οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα πλήθος επενεργητών ώστε να μεταβάλλουν τη καμπυλότητα της αεροτομής με συνεχή τρόπο. Οι Staino et al. [27], προτείνουν τη χρήση ενός ζεύγους επενεργητών, τοποθετημένο στην μέση ενός εσωτερικού πλαισίου ή δικτυώματος στο tip των πτερυγίων ανεμογεννητριών, για τον έλεγχο των edgewise ταλαντώσεων. Οι επενεργητές αυτοί μπορούν να παραλαμβάνουν τα φορτία, να τα μεταφέρουν στον άξονα και να ασκούν μια εσωτερική δύναμη ώστε να αντισταθμίζονται οι ταλαντώσεις.



Σχήμα 2.12: Δομή υποστηρικτικού δικτύωματος με γραμμικούς επενεργητές στην κορυφή της πτέρυγας για το έλεγχο της πλάγιας ταλάντωσης κατά [27].

## Κεφάλαιο 3

# Μοντελοποίηση Πτερύγων Ανεμογεννήτριας Υπολογισμός Ισοδύναμης Δοκού

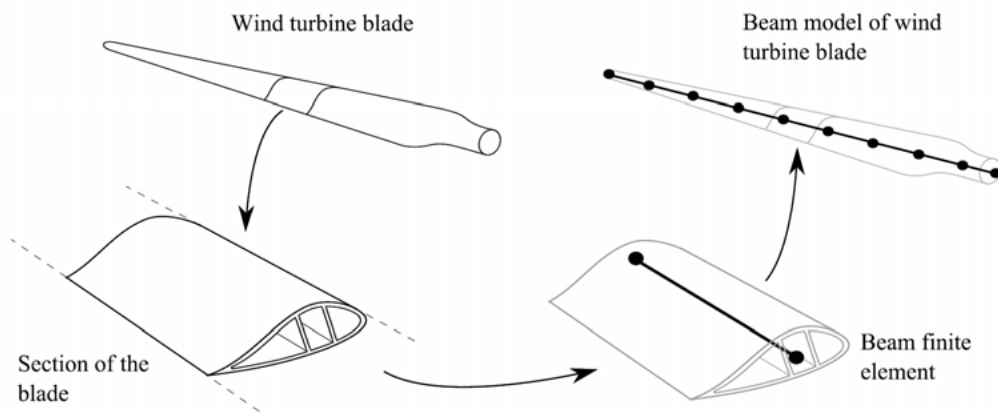
Η τυπική πτέρυγα ανεμογεννήτριας αποτελείται από μια δομή spar-beam που υποστηρίζει πολλαπλές στρώσεις προηγμένων σύνθετων υλικών που σχηματίζουν την επιφάνεια της αεροτομής. Για τους αεροελαστικούς υπολογισμούς και την μελέτη της συμπεριφοράς της συνολικής κατασκευής κατά τη τυπική λειτουργία της ανεμογεννήτριας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη αλληλεπίδραση με τη ροή όσο και τη περιστροφή των πτερύγων, είναι υπολογιστικά αδύνατο να επιλυθεί το πρόβλημα με όρους διαφορικών εξισώσεων, βάσει μεθόδων Finite Elements Analysis (FEA) και Computational Fluid Dynamics (CFD). Για αυτό το λόγο, οι μελετητές καταφεύγουν σε προσεγγιστικές μεθόδους μείωσης της τάξης του προβλήματος, με βασική αυτή του υπολογισμού της *Ισοδύναμης Δοκού* (equivalent beam). Επειδή η πτέρυγα της ανεμογεννήτριας είναι μία κατασκευή με μικρό λόγο πλάτους ή ύψους προς μήκος που φέρει κυρίως καμπτικά και στρεπτικά φορτία, μπορεί να αντικατασταθεί στα αεροελαστικά προβλήματα από μία δοκό με ισοδύναμες μηχανικές ιδιότητες, μειώνοντας κατά πολύ την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Οι κλασσικές θεωρίες δοκών, Euler-Bernoulli και Timoshenko, δεν επαρκούν για την μοντελοποίηση των πτερύγων που αποτελούνται έχουν σύνθετες γεωμετρίες και πολυσύνθετες δομές προηγμένων υλικών με αποτέλεσμα να εμφανίζονται συζεύξεις στις παραμορφώσεις. Αυτό το φαινόμενο, για μεγάλου μεγέθους ανεμογεννήτριες μπορεί να αποτελέσει σχεδιαστική επιλογή ώστε οι κατασκευαστές να επωφεληθούν και να δημιουργήσουν πιο ελαφρές αλλά και πιο εύκαμπτες πτέρυγες, οι οποίες θα μπορούν να αντέχουν μεγάλα φορτία λόγω ακραίων συνθηκών ή ξαφνικών ριπών ανέμου χωρίς να υποφέρουν από κόπωση υλικών.

Η έρευνα εστιάζεται στο προσδιορισμό αυτών των συζεύξεων, για παράδειγμα σύζευξη κάμψης και συστροφής (bending-twist coupling), και στην μοντελοποίηση της ισοδύναμης δοκού, ώστε αυτή να τις λαμβάνει υπόψιν. Το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές και αρκετό υλικό μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά παρατήθονται οι εργασίες των Giavotto et al. [10], Hodges και των συναδέλφων του [30]

και [29], Branner et al. [7], Blasques [6], Kim, Hansen and Branner [16], Lago et al. [17], Chortis et al. [9].

Μια συγκριτική ανάλυση λογισμικών για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των cross-sections πτέρυγας από σύνθετα προηγμένα υλικά, αποτελεί η εργασία των Chen, Yu και Capellaro [8].

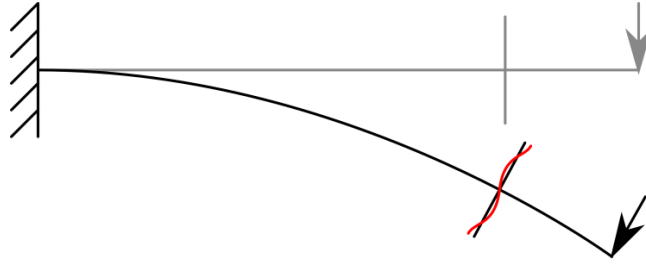


Σχήμα 3.1: Μοντελοποίηση Πτέρυγας ως Ισοδύναμη δοκό, από [7].

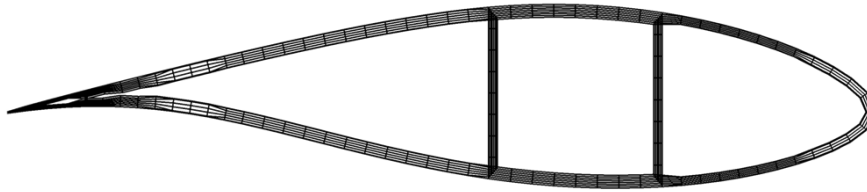
### 3.1 Generalized Timoshenko Model

Εδώ θα παρουσιαστεί συνοπτικά η βασική ιδέα που διέπει τις μεθόδους των προαναφερθέντων ερευνητών, καθώς και δύο κώδικες, τον VABS (*Variational Asymptotic Beam Sectional Analysis*) [29], και τον BECAS (*BEam Cross section Analysis Software*) [7] του DTU.

Το πρόβλημα της πτέρυγας επιλύεται βάσει ενός μοντέλου που αναφέρεται ως *generalized Timoshenko Model* (αλλά και ως *Dimensional Reduction* [17]), και αναπτύχθηκε από τον Hodges και τους συναδέλφους του [30], στο οποίο χρησιμοποιείται η θεωρία του Timoshenko αλλά τα κάθετα στον άξονα επίπεδα δεν παραμένουν επίπεδα, αλλά στρεβλώνονται. Έτσι το τρισδιάστατο ελαστικό πρόβλημα αναλύεται σε δύο αυτόνομα επιμέρους προβλήματα, τη μονοδιάστατη ανάλυση της πτέρυγας κατά μήκος του άξονά της, σύμφωνα με ένα μοντέλο δοκού, και τη επίλυση της στρέβλωσης (*warping*) στα κάθετα στον άξονα επίπεδα (cross-sections), με χρήση δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 3.2:** Η παραμόρφωση της πτέρυγας αναλύεται σε κάμψη της ισοδύναμης δοκού και με στρέβλωση των κάθετων στον άξονα επιπέδων.



**Σχήμα 3.3:** Δισδιάστατο πλέγμα για την επίλυση της στρέβλωσης [7].

Το μοντέλο της μονοδιάστατης δοκού, δεν ακολουθεί τη κλασική θεωρία του Timoshenko, αλλά με διάφορες τεχνικές που αναπτύσσονται από τους ερευνητές, προσπαθεί να λάβει υπόψη και τη σύζευξη των παραμορφώσεων σε διαφορετικούς άξονες. Αυτό μεταφράζεται στους όρους εκκεντρότητας και ανισοτροπίας, οι οποίοι εμφανίζονται στις μη διαγώνιες θέσεις του μητρώου δυσκαμψίας  $K$  της δοκού. Ο αρχικά διαγώνιος πίνακας  $K$ , λαμβάνοντας ως άξονα αναφοράς τον άξονα του κέντρου διάτμησης, μετατρέπεται σε ένα συμμετρικό full-populated πίνακα, ώστε να συμπεριληφθούν όλα τα couplings.

Στο κώδικα BECAS του DTU [7], ο προσδιορισμός του μητρώου δυσκαμψίας  $K$  γίνεται με εφαρμογή φορτίων διαδοχικά στους έξι άξονες, σύνθεση ενός μητρώου  $U$  του οποίου οι στήλες αντιστοιχούν στις διαφορετικές φορτίσεις και οι γραμμές στο βαθμούς ελευθερίας, και τέλος υπολογίζοντας τον  $K$  ως γινόμενο του πίνακα φορτίσεων  $F_{n \times 6}$  και του αντίστροφου του πίνακα παραμορφώσεων  $U_{6 \times n}^{-1}$  (3.1.1).

$$\begin{bmatrix} F_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -F_y \cdot d & 0 & M_x & 0 & 0 \\ -F_y \cdot d & 0 & 0 & 0 & M_y & 0 \\ 0 & -F_y \cdot d & 0 & 0 & 0 & M_z \end{bmatrix} = \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} \delta u_1 & \delta u_2 & \delta u_3 & \delta u_4 & \delta u_5 & \delta u_6 \\ \delta v_1 & \delta v_2 & \delta v_3 & \delta v_4 & \delta v_5 & \delta v_6 \\ \delta w_1 & \delta w_2 & \delta w_3 & \delta w_4 & \delta w_5 & \delta w_6 \\ \delta \theta_{x1} & \delta \theta_{x2} & \delta \theta_{x3} & \delta \theta_{x4} & \delta \theta_{x5} & \delta \theta_{x6} \\ \delta \theta_{y1} & \delta \theta_{y2} & \delta \theta_{y3} & \delta \theta_{y4} & \delta \theta_{y5} & \delta \theta_{y6} \\ \delta \theta_{z1} & \delta \theta_{z2} & \delta \theta_{z3} & \delta \theta_{z4} & \delta \theta_{z5} & \delta \theta_{z6} \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

Παράλληλα λύνεται το πρόβλημα της στρέβλωσης των εγκάρσιων επιπέδων σύμφωνα με τις εξισώσεις ισοροπίας του επιπέδου (βλ. 3.4), ομοίως για έξι μοναδιαία φορτία.



οπότε προκύπτει το μητρώο δυσκαμψίας του επιπέδου και άλλα χαρακτηριστικά της διατομής όπως το κέντρο διάτμησης, το ελαστικό κέντρο και ο ελαστικός άξονας.

$$\begin{cases} \mathbf{E}\mathbf{X} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = (\mathbf{C} - \mathbf{C}^T) \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} + \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial z} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{X} + \mathbf{A}\mathbf{Y} = -\mathbf{L}^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} + \mathbf{I}_6 \end{cases}$$

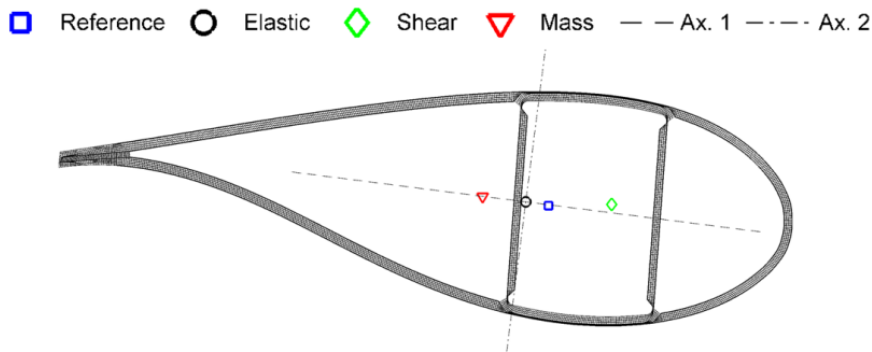
$$\begin{cases} \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} + \mathbf{R} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial z} = 0 \\ \mathbf{R}^T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial z} = \mathbf{T}_r^T \end{cases}$$

(α) Εξισώσεις ισορροπίας του επιπέδου για 6 μοναδιαία φορτία ( $\mathbf{I}_{6 \times 6}$ ).

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{C} & \mathbf{R} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{M} & \mathbf{L} \\ \mathbf{R}^T & \mathbf{L}^T & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial z} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix}$$

(β) Compliance matrix ώστε  $\mathbf{K} = \mathbf{F}^{-1}$ .

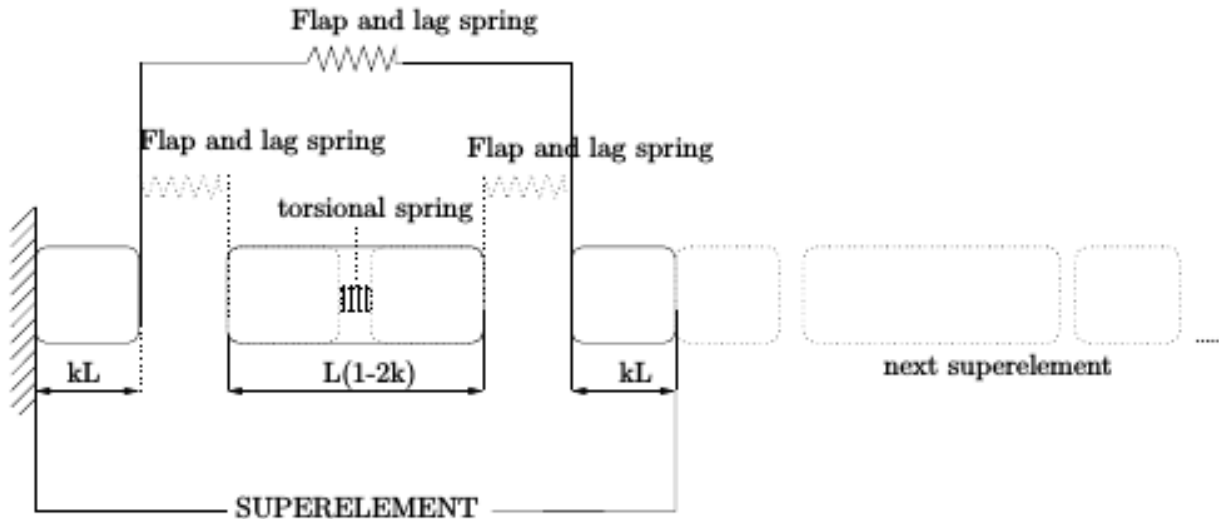
Σχήμα 3.4: Επίλυση της στρέβλωσης στο κώδικα BECAS [7].



Σχήμα 3.5: Τα χαρακτηριστικά της εγκάρσιας διατομής όπως αυτά υπολογίζονται από το κώδικα BECAS [7].

## 3.2 Superelements

Μια διαφορετική τεχνική χρησιμοποιείται από την J. Holierhoek στην εργασία της [12], όπου η πτέρυγα της ανεμογεννήτριας μοντελοποιείται από *Superelements*, υπερ-στοιχεία που αποτελούνται από 3 μέχρι 4 στοιχεία-στερεά σώματα, ανάλογα με το αν συνυπολογίζεται η στρέψη ή όχι. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με περιστροφικά ελατήρια (επιπλέον ένα στρεπτικό) και έχουν συνολικά 4 βαθμούς ελευθερίας (5 μαζί με τη στρέψη). Οι σταθερές ελατηρίου υπολογίζονται από τις εξισώσεις βέλους κάμψης και τη κλίση μιας ομοιόμορφης δοκού υπό καμπτικό φορτίο.



Σχήμα 3.6: Διακριτοποίηση πτέρυγας με χρήση Superelement κατά [12].

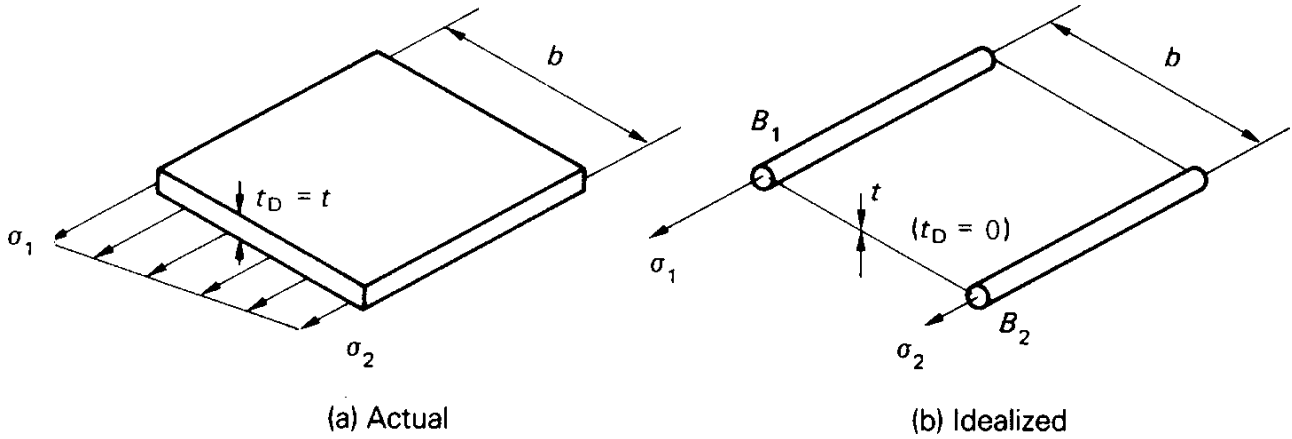
### 3.3 Δομική Εξιδανίκευση

Οι πτέρυγες των ανεμογεννητριών αποτελούνται από επιστρώσεις σύνθετων υλικών και διαμήκεις ενισχύσεις και κατασκευαστικά μοιάζουν με τις πτέρυγες και τις ατράκτους αεροπλάνων που αποτελούνται από στρώσεις υλικών και φύλλα μετάλλων, ενισχυμένα με εγκάρσια νεύρα και διαμήκεις δοκούς. Για την προκαταρκτική ανάλυση τέτοιων κατασκευών, στη βιβλιογραφία συναντούνται μέθοδοι δομικής εξιδανίκευσης (Structural Idealization) [20], οι οποίες βασίζονται σε κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, οδηγούν σε λιγότερο πολύπλοκες κατασκευές, στις οποίες η μηχανική ανάλυση είναι πιο εύκολη. Στην περίπτωση των ενισχυμένων πτερυγών, παρατηρώντας ότι η διακύμανση των ορθών τάσεων στις διατομές των ενισχύσεων είναι μικρή σε σχέση με τις επιστρώσεις, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτές είναι σταθερές. Οπότε μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις ενισχύσεις με στοιχεία συγκεντρωμένης επιφάνειας (*booms* κατά Megson [20]) που φέρουν σταθερές ορθές τάσεις και τις επιστρώσεις με φλοιό χωρίς πάχος που φέρει μόνο διάτμηση.

Η επιφάνεια των στοιχείων αυτών (*booms*), υπολογίζεται ως η ισοδύναμη για να φέρει τάσεις ίσες με τις τάσεις που φέρουν οι επιμέρους διατομές των επιστρώσεων και των ενισχύσεων. Για να απλοποιήσουμε το ένα πάνελ όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7, που φέρει τάσεις που κατανέμονται γραμμικά κατά το πλάτος, θεωρούμε ισορροπία ροπών προς ένα άκρο για να προσδιορίσουμε το αντίθετο στοιχείο. Έτσι προκύπτουν οι εξής επιφάνειες:

$$B_1 = \frac{t_D \cdot b}{6} \left( 2 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) \quad (3.3.1\alpha')$$

$$B_2 = \frac{t_D \cdot b}{6} \left( 2 + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \quad (3.3.1\beta')$$



Σχήμα 3.7: Δομική Εξιδανίκευση ενός πάνελ, από το βιβλίο του Megson [20].

Όπως φαίνεται, οι ισοδύναμες συγκεντρωμένες επιφάνειες εξαρτώνται από τη κατανομή των τάσεων και άρα από το είδος της φόρτισης. Οπότε διαφορετική εξιδανίκευση απαιτείται για προβλήματα καθαρής κάμψης και διαφορετική για καθαρό εφελκυσμό.

### 3.4 Structural Data Reduction

Τέλος για τον υπολογισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των εγκάρσιων διατομών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του *Structural Data Reduction* [28], η οποία έχει ομοιότητες με την τεχνική της εξιδανίκευσης των κατασκευών.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, στις κάθετες στον άξονα της πτέρυγας (εγκάρσιες) διατομές υπολογίζονται οι σταθμισμένες μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων τμημάτων που την αποτελούν (spar beam, στρώσεις σύνθετων υλικών) και οι ροπές αδρανείας. Η διατομή χωρίζεται σε  $N$  ευθύγραμμα τμήματα μήκους  $L_e$  κατά μήκος του περιγράμματος της αεροτομής και των εσωτερικών υποστηρικτικών δομών, και οι μηχανικές ιδιότητες ολοκληρώνονται κατά μήκος των τμημάτων αυτών, καταλήγοντας στις εξισώσεις (3.4.1).

Sectional material surface area

$$A = \sum_e^N A_e \quad (3.4.1\alpha')$$

Sectional averaged E-modulus

$$E = \frac{\sum_e^N E_e \cdot A_e}{A} \quad (3.4.1\beta')$$

Sectional averaged G-modulus

$$G = \frac{\sum_e^N G_e \cdot A_e}{A} \quad (3.4.1\gamma')$$

Mean linear density:

$$\rho = \sum_e^N \rho_e \cdot A_e \quad (3.4.1\delta')$$

Elastic center

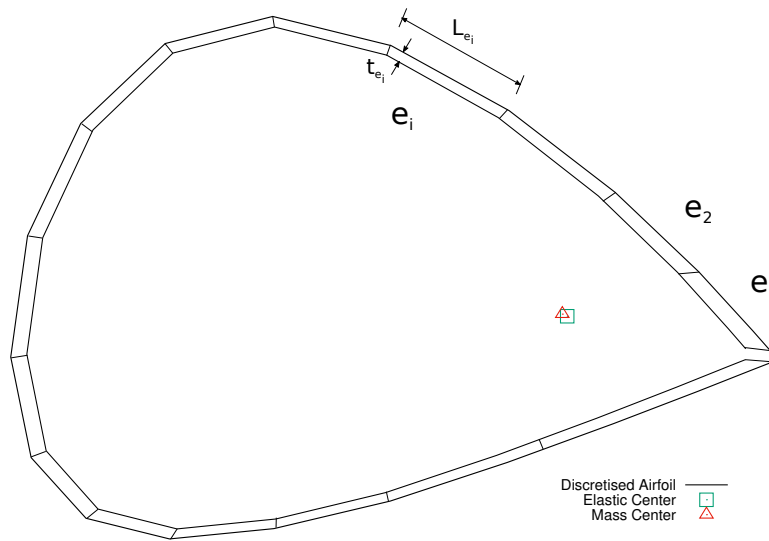
$$x_{el} = \frac{\sum_e^N E_e \cdot A_e \frac{x_{estart} + x_{eend}}{2}}{E \cdot A}, \quad y_{el} = \frac{\sum_e^N E_e \cdot A_e \frac{y_{estart} + y_{eend}}{2}}{E \cdot A} \quad (3.4.1\epsilon')$$

Elastic center

$$x_{cm} = \frac{\sum_e^N \rho_e \cdot A_e \frac{x_{estart} + x_{eend}}{2}}{\rho \cdot A}, \quad y_{cm} = \frac{\sum_e^N \rho_e \cdot A_e \frac{y_{estart} + y_{eend}}{2}}{\rho \cdot A} \quad (3.4.1\zeta')$$

Stiffness moments of inertia

$$I_x = \frac{\sum_e^N E_e \cdot A_e \cdot \frac{y_{estart}^2 + y_{estart} \cdot y_{eend} + y_{eend}^2}{3}}{E}, \quad I_y = \frac{\sum_e^N E_e \cdot A_e \cdot \frac{x_{estart}^2 + x_{estart} \cdot x_{eend} + x_{eend}^2}{3}}{E} \quad (3.4.1\zeta)$$



**Σχήμα 3.8:** Διατομή πτέρυγας διακριτοποιημένη με στοιχεία  $e_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  μήκους  $L_{e_i}$  και πάχους  $t_{e_i}$ , με το Ελαστικό κέντρο και κέντρο Βάρους υπολογισμένο κατά την μέθοδο *Structural Data Reduction*. Το εμβαδό που λαμβάνεται υπόψη στις εξισώσεις (3.4.1) υπολογίζεται ως  $A_{e_i} = L_{e_i} \times t_{e_i}$ .

Για τον υπολογισμό της σταθεράς συστροφής St. Venant  $I_t$ , σύμφωνα με τον ορισμό

$$I_t = \frac{M_t \cdot L}{\theta_t \cdot G}$$

όπου  $M_t$  η ροπή συστροφής,  $L$  το μήκος της δοκού,  $\theta_t$  η γωνία συστροφής και  $G$  το μέτρο διάτμησης, γίνεται χρήση της τεχνικής ανάλυσης της διατμητικής ροής σε λεπτότοιχες

κλειστές διατομές (βλ. και [20]).

Σύμφωνα με αυτή τη τεχνική, μια πολύπλοκη γεωμετρικά διατομή, όπως αυτή της πτέρυγας, χωρίζεται σε  $N$  κυψέλες, όπως στο σχήμα 3.9. Η διατμητική ροή αλλάζει μόνο αν αλλάξει η διατομή (γεωμετρία ή υλικό), οπότε προκύπτει ισορροπία της ροής στις διακλαδώσεις και στο πέρασμα από τη μία κυψέλη στην άλλη, που εκφράζεται με σχέσεις:

$$q_R = q_{R+1} + q_{R(R+1)}$$

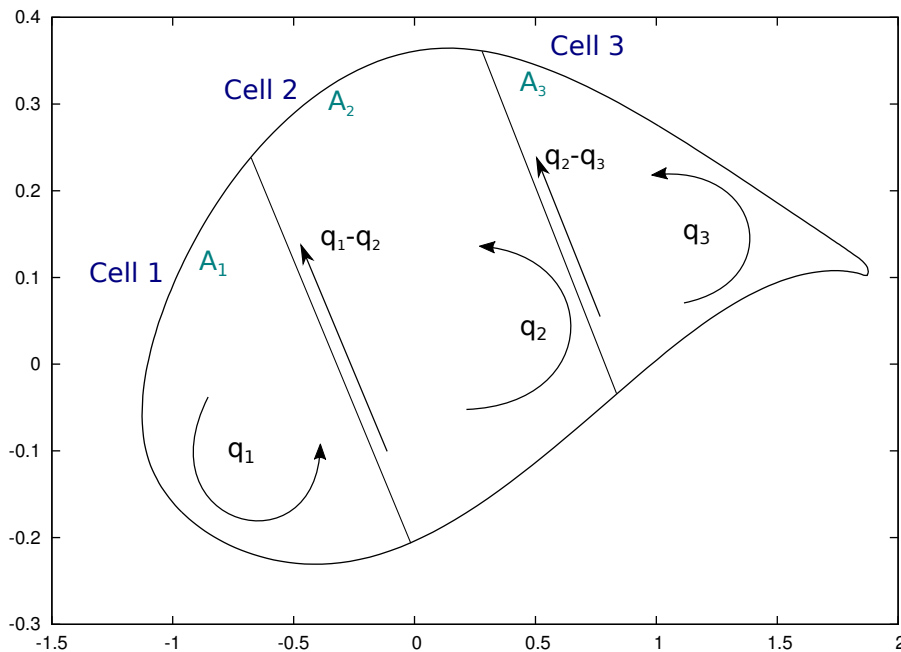
Για τη συνολική ροπή που φέρει η διατομή ισχύει η σχέση:

$$M_t = \sum_{R=1}^N 2 \cdot A_R \cdot q_R$$

Τέλος, για την κλίση της γωνίας συστροφής  $\theta_t$ , η οποία απαιτείται σταθερή σε όλες τις κυψέλες, ισχύει η σχέση:

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{2 \cdot A_R \cdot G_R} \oint q \frac{ds}{t}$$

Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες σχέσεις για όλες τις κυψέλες προκύπτει ένα ορθά τοποθετημένο σύστημα γραμμικών εξισώσεων με αγνώστους τις διατμητικές ροές  $q_R$  (ή και τη παράγωγο της γωνίας  $\theta_t$ ), το οποίο λύνουμε και στη συνέχεια προσδιορίζουμε από τις διατμητικές ροές τη γωνία συστροφής  $\theta_t$ , σταθερή για όλη τη διατομή, και στη συνέχεια από τον ορισμό της, την σταθερά συστροφής  $I_t$ .



**Σχήμα 3.9:** Λεπτότοιχη διατομή πτέρυγας, χωρισμένη σε 3 κυψέλες, που εσωκλείουν επιφάνεια εμβαδού  $A_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , με σταθερή διατμητική ροή, βάση για τον υπολογισμό της σταθεράς συστροφής  $I_t$ .

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την σταθερά  $I_t$ , μπορούμε να προσδιορίσουμε το κέντρο διάτμησης της διατομής, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς διατμητικά φορτία που εφαρμόζονται εκεί δεν παράγουν συστροφή. Για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης δοκού, η ιδιότητα αυτή μπορεί να είναι πολύτιμη καθώς η μοντελοποίηση μπορεί να είναι καλύτερη αν δεν εμφανίζεται συστροφή. Η μέθοδος που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.1 εφαρμόζεται αποτελεσματικότερα στο κέντρο διάτμησης για την εξάλειψη των συζεύξεων των παραμορφώσεων κατά τις διάφορες κατευθύνσεις.

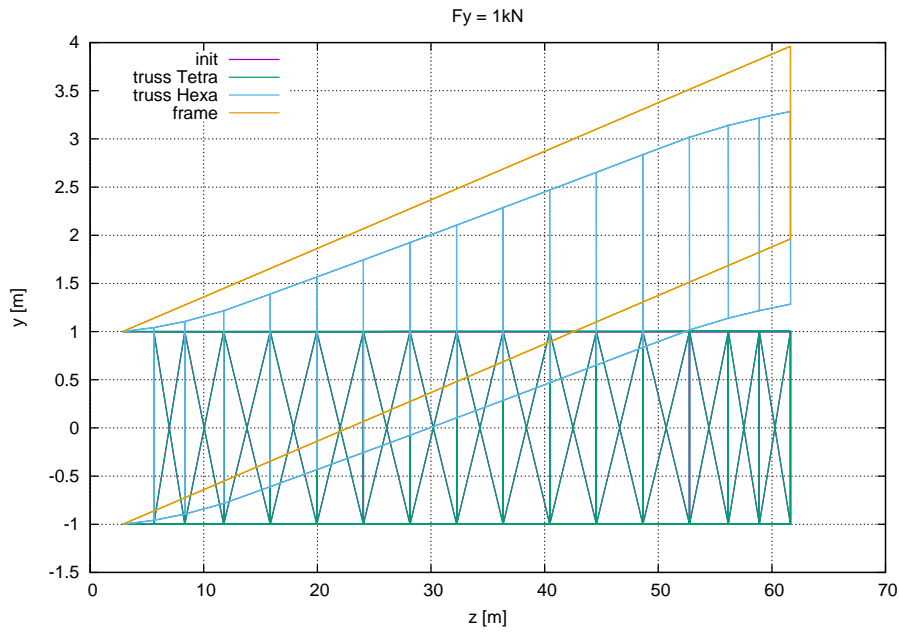
## Κεφάλαιο 4

# Εξαγωγή Ισοδύναμης Δοκού Δικτυώματος

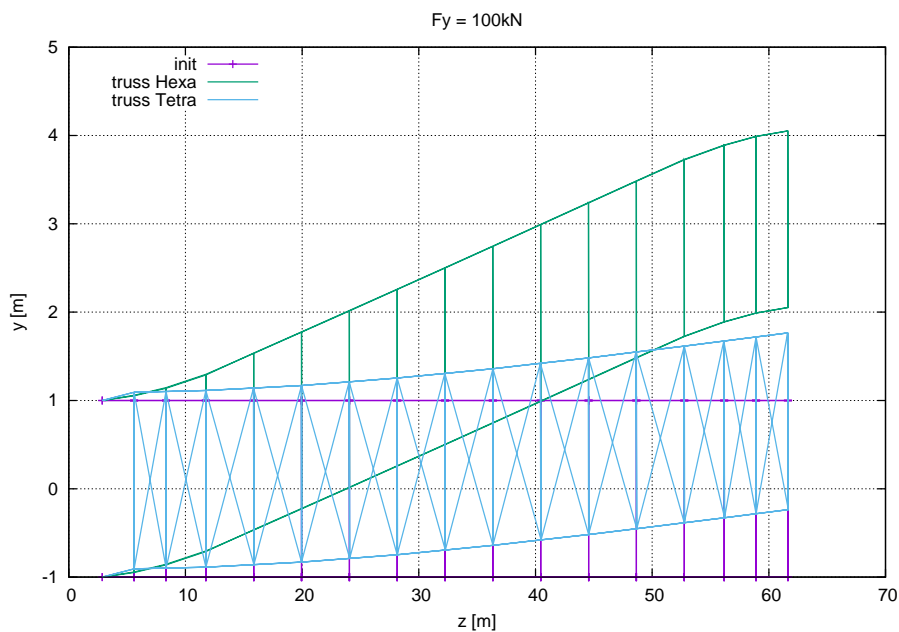
Ο ρόλος του δικτυώματος είναι η στατική υποστήριξη της πτέρυγας αλλά και η ενίσχυσή της ώστε να ανταποκρίνεται βέλτιστα στα αεροδυναμικά φορτία κατά τη λειτουργία της. Ακολουθώντας τις πεπατημένες μεθόδους αεροελαστικής ανάλυσης της πτέρυγας, όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, περιμένουμε οι κατανομές των μηχανικών ιδιοτήτων κατά μήκος της πτέρυγας να μην είναι λείες, δεδομένης της ασυνέχειας του υλικού.

Στοιχεία του δικτυώματος που δεν είναι ευθυγραμμισμένα με τον άξονα της πτέρυγας, επιβάλλουν κινηματικούς περιορισμούς και προσθέτουν στιβαρότητα, ώστε να μειώνουν τη παραμόρφωση του δικτυώματος κατά την κάμψη. Στοιχεία τοποθετημένα κάθετα στον άξονα, προσθέτουν συγκεντρωμένη στιβαρότητα, βελτιώνουν την απόκριση του δικτυώματος, αλλά η κατανομή του υλικού (και άρα και των μηχανικών ιδιοτήτων) κατά μήκος του άξονα, παρουσιάζει αιχμές και ασυνέχειες. Για τη καλύτερη μοντελοποίηση του δικτυώματος και της πτέρυγας βάσει ενός μοντέλου δοκού, η κατανομή του υλικού θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία και συνεχής.

Για να προσδιορίσουμε τη κατανομή της στιβαρότητας στην ισοδύναμη δοκό, μπορούμε να ανατρέξουμε σε άμεσες μεθόδους, όπως η εξιδανίκευση της κατασκευής και η structural data reduction, ή έμμεσες μεθόδους με όρους προσέγγισης καμπύλης της κατανομής, ή βελτιστοποίησης της κατασκευής ή προσδιορισμού της απόκρισης της κατασκευής σε διακριτές φορτίσεις.



Σχήμα 4.1: Σύγκριση της κάμψης πλαισίου (*Frame*), δικτυώματος μόνο με εγκάρσια (*truss Hexa*) και δικτυώματος με εγκάρσια και διαγώνια στοιχεία (*truss Tetra*). Το δικτύωμα με διαγώνια στοιχεία ουσιαστικά δεν παραμορφώνεται υπό φορτίο 1kN.



Σχήμα 4.2: Σύγκριση δικτυώματος μόνο με εγκάρσια (*truss Hexa*) και δικτυώματος με εγκάρσια και διαγώνια στοιχεία (*truss Tetra*), υπό φορτίο 100kN.

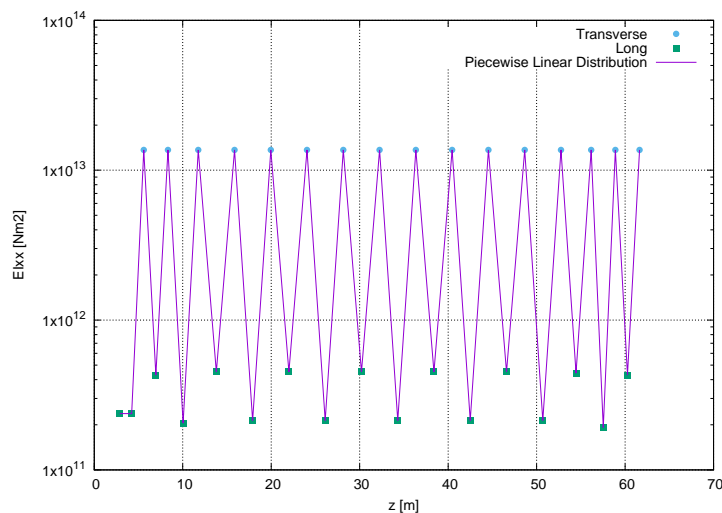


## 4.1 Άμεσος Προσδιορισμός

Σύμφωνα με αυτή τη προσέγγιση, υπολογίζουμε τις μηχανικές ιδιότητες σε διάφορες διατομές κατά μήκος του δικτυώματος και του άξονα της πτέρυγας, σαν να πρόκειται για συνεχές μέσο. Χρησιμοποιούμε τη τεχνική του *Structural Data Reduction* που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 3.4.

Επιλέγουμε το επίπεδο ανάλυσης, και λαμβάνουμε υπόψιν τις διατομές των στοιχείων που αυτό τέμνει για να εφαρμόσουμε τις εξισώσεις 3.4.1. Για τον προσδιορισμό της σταθεράς στρέψης  $It$  δεν χρησιμοποιείται η ανάλυση της διατμητικής ροής λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας, αλλά υπολογίζεται απ' ευθείας από τη σχέση  $It = \frac{M_t}{G \cdot \theta_t}$ , όπου η γωνία στρέψης εξάγεται ως η μέση γωνία στροφής των κόμβων των στοιχείων που τέμνει το επίπεδο σε σχέση με την αρχή των αξόνων επί του επιπέδου.

Αν ένα επίπεδο τέμνει μόνο διαμήκη στοιχεία, οι διατομές των στοιχείων είναι κυκλικοί δακτύλιοι, δεδομένου ότι τα στοιχεία είναι κυλινδρικές δοκοί, εμβαδού  $A_i = \pi \cdot r_i^2$ . Στην περίπτωση που το επίπεδο τέμνει κάποιο εγκάρσιο στοιχείο, η διατομή είναι παραλληλόγραμμο σχήματος εμβαδού  $A_i = 2 \cdot t_i \cdot L_i$ . Επειδή στη γενική περίπτωση  $L_i \gg r_i$ , το εμβαδόν της διατομής των εγκάρσιων στοιχείων είναι κατά πολύ μεγαλύτερο με αποτέλεσμα στο υπό εξέταση επίπεδο οι ισοδύναμες συγκεντρωμένες ιδιότητες να προκύπτουν τάξεις μεγαλύτερες από ότι στα επίπεδα που τέμνουν μόνο διαμήκη στοιχεία. Αυτές οι τιμές στιβαρότητας περιορίζονται στο πολύ μικρό πλάτος των εγκάρσιων στοιχείων, σε αντίθεση με τις τιμές που προκύπτουν στα διαμήκη στοιχεία που εκτείνονται γραμμικά καθ' όλο το μήκος αυτών των στοιχείων. Αυτή η συγκέντρωση υλικού και στιβαρότητας δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα και σε μία κατά τμήματα γραμμική κατανομή, εισάγει υπερακοντίσεις και σφάλματα.



Σχήμα 4.3: Η κατανομή της καμπτικής στιβαρότητας κατά μήκος του δικτυώματος, μέσω Structural Data Reduction, υπολογισμένη από τις εξισώσεις 3.4.1.

## 4.2 Έμμεσος Προσδιορισμός

Ο έμμεσος προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων της ισοδύναμης δοκού, η οποία κάτω από δεδομένη φόρτιση θα δίνει ίδια παραμόρφωση (βέλος κάμψης) με τον άξονα του δικτυώματος ή κάποια άλλη χαρακτηριστική ευθεία, μπορεί να γίνει με μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως είτε η μέθοδος Απότομης Καθόδου (Steepest Descent), είτε η μέθοδος των Ελάχιστων Τετραγώνων (Least Squares).

Ακολουθώντας τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method), το πρόβλημα ελαστικότητας για τη δοκό εκφράζεται από το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$K_{beam} \cdot \vec{u} = \vec{F}$$

Γνωρίζοντας τη παραμόρφωση  $\vec{u}_{target}$  του χαρακτηριστικού άξονα του δικτυώματος υπό δεδομένη φόρτιση  $\vec{F}_{ext}$ , καλούμαστε ουσιαστικά να προσδιορίσουμε το μητρώο δυσκαμψίας  $K_{eqbeam}$  της ισοδύναμης δοκού.

Στη περίπτωση των Ελαχίστων Τετραγώνων, ορίζουμε το διάνυσμα του υπολοίπου (residual)

$$\vec{R} = K(x_{prop}) \cdot \vec{u} - \vec{F}$$

και ζητάμε τις μηχανικές ιδιότητες

$$x_{prop} = [EA_1, GI_{t1}, EI_{x1}, EI_{y1}, \dots, EA_N, GI_{tN}, EI_{xN}, EI_{yN}]$$

εκείνες που μηδενίζουν (ή το ελαχιστοποιούν) το τετράγωνο του residual:

$$S = \frac{1}{2} \vec{R}^T \cdot \vec{R}$$

Έτσι εφαρμόζουμε μία επαναληπτική μέθοδο που ξεκινώντας από ένα αρχικό διάνυσμα (είτε από υπόθεση είτε άλλη κατανομή κοντά στη κατανομή στόχο), σε κάθε βήμα υπολογίζει το μητρώο δυσκαμψίας  $K_i = K(\vec{x}_i)$  και το residual και ανανεώνει το διάνυσμα, μέχρις ότου επέλθει σύγκλιση.

Στη πράξη φάνηκε πως αυτή η τεχνική δεν πετύχαινε ικανοποιητική σύγκλιση, οπότε διερευνήθηκε ο εναλλακτικός ορισμός του residual ως

$$\vec{R} = u_{target} - \vec{U}_i$$

όπου  $\vec{U}_i$  το διάνυσμα των παραμορφώσεων που προκύπτουν από την ευθεία λύση του προβλήματος  $K(\vec{x}_i) \cdot \vec{U}_i = \vec{F}$  σε κάθε βήμα.

Τέλος, αν αντί για τις τιμές των ιδιοτήτων σε κάθε κόμβο, θεωρήσουμε πολυώνυμα που περιγράφουν τις κατανομές της κάθε ιδιότητας κατά μήκος της δοκού, παραδείγματος χάριν τρίτου βαθμού  $P_{EI_x}(z) = \alpha \cdot z^3 + \beta \cdot z^2 + \gamma \cdot z + \delta$ , μειώνονται οι μεταβλητές του προβλήματος και βελτιώνεται το αποτέλεσμα της μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων.

Στην επόμενη παράγραφο ακολουθεί μία συγκριτική ανάλυση των προσεγγίσεων αυτών και η πορεία επαλήθευσης της μεθόδου εξαγωγής της Ισοδύναμης Δοκού δικτυώματος.

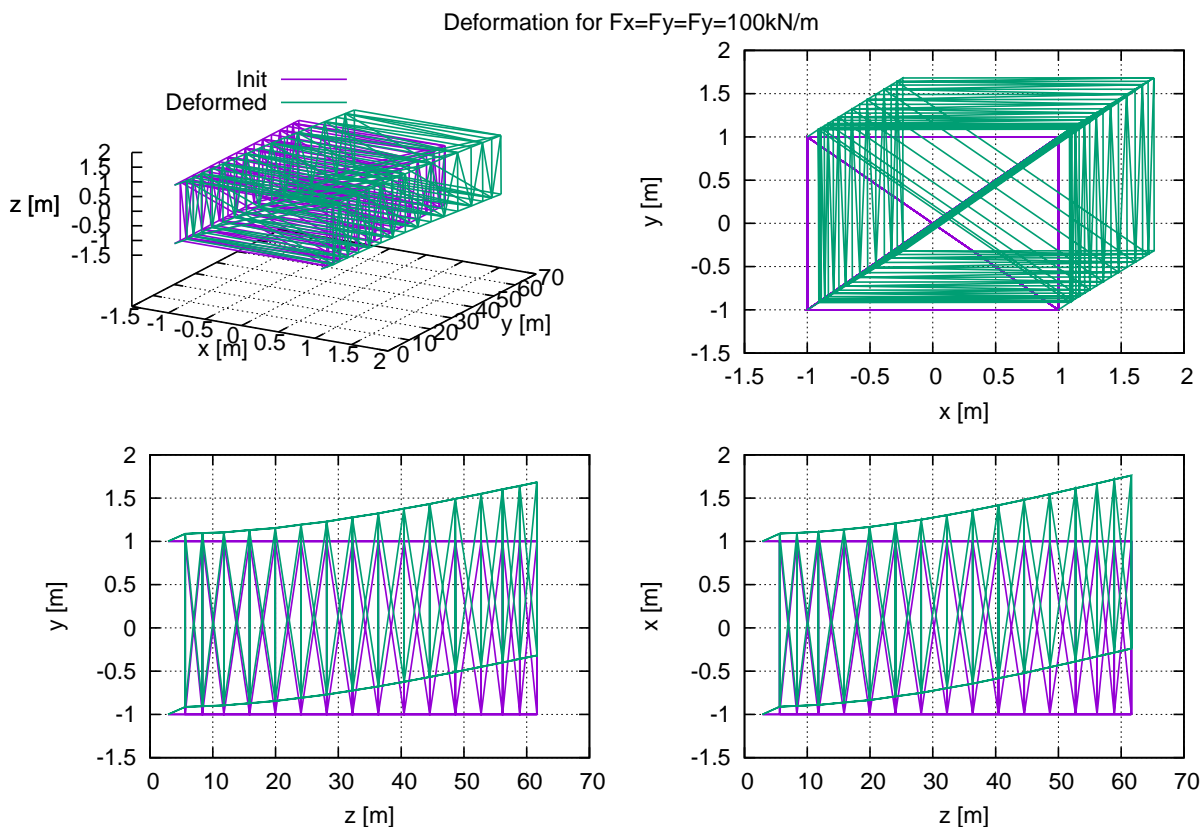
### 4.3 Εξαγωγή Ισοδύναμης Δοκού Τυπικού Ορθογωνικού Δικτυώματος

Για την διερεύνηση της εξαγωγής της *Ισοδύναμης Δοκού* εξετάζουμε ένα απλό τετραγωνικό δικτύωμα αποτελούμενο από τυπικά στοιχεία (δοκούς) που σχηματίζουν τετράεδρα, το πλέον σταθερό και στατικά ορισμένο τρισδιάστατο δικτύωμα.

Τα στοιχεία του υπό εξέταση δικτυώματος έχουν όλα τις ίδιες γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες δίνονται στο πίνακα 4.1. Η συνολική κατασκευή φορτίζεται στα διαμήκη στοιχεία μεταξύ των δύο τελευταίων εγκάρσιων επιπέδων ( $z = 58.9m$  και  $z = 61.633m$ ) με κατανεμημένες δυνάμεις  $100kN/m$  και στους τρεις άξονες, οπότε η συνολική εξωτερική δύναμη είναι  $F_x = F_y = F_z = 2448.1kN$ . Η παραμορφωμένη κατασκευή φαίνεται στην εικόνα 4.4.

Diameter [m]	Thickness [m]	Density [kg/m]	E [GPa]	G [GPa]
0.06	0.03	7850.	2.10e4	7.89e3

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες ράβδων δικτυώματος.

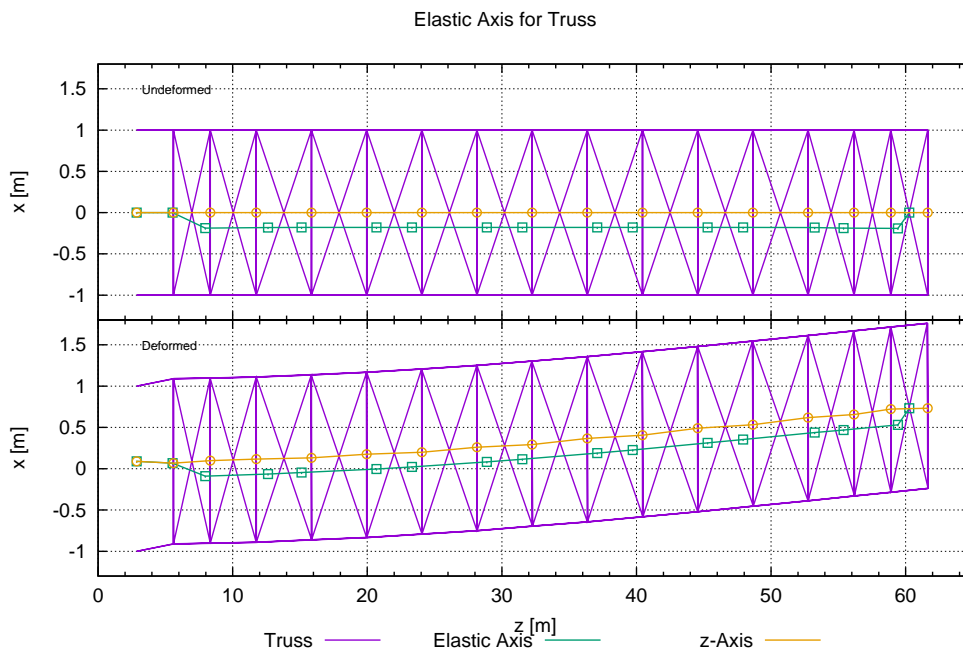


Σχήμα 4.4: Η παραμόρφωση του ορθογωνικού δικτυώματος υπό φορτίο  $q_x = q_y = q_z = 100kN/m$  εφαρμοσμένο στα στοιχεία ανάμεσα στα δύο τελευταία επίπεδα ( $z=58.9m$  και  $z=61.633m$ ).

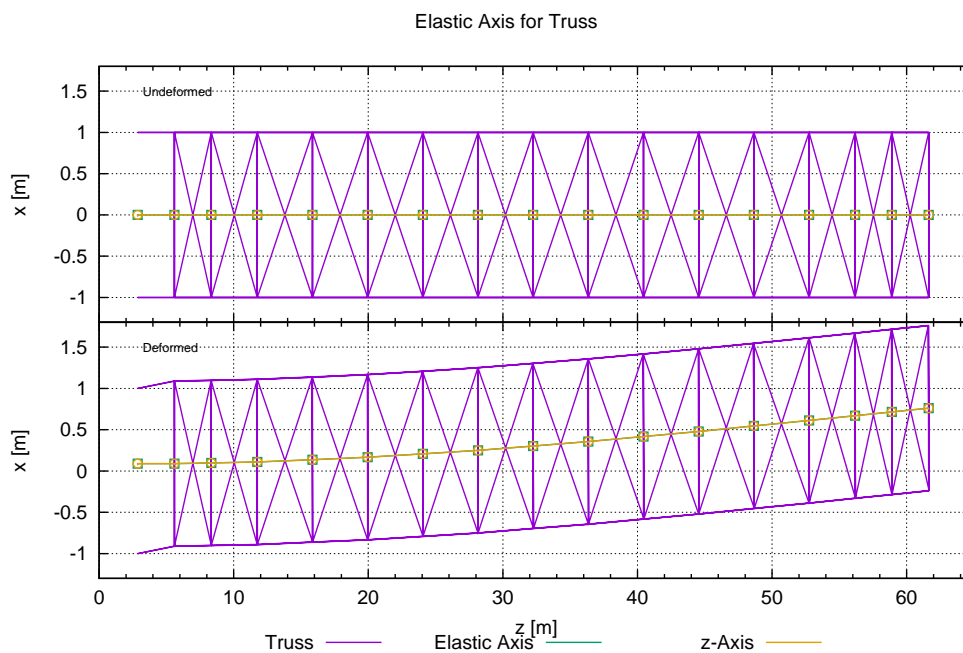
### 4.3.1 Άμεσος Προσδιορισμός

Εφαρμόζοντας τη τεχνική του Structural Data Reduction εξάγουμε μία χαρακτηριστική ευθεία (*reference axis*), που μπορεί να είναι είτε ο ελαστικός άξονας της κατασκευής είτε ο άξονας Oz είτε η γεωμετρική μέση γραμμή, και αντιπροσωπεύει την απαραμόρφωτη και την παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα εγκάρσια ή μόνο τα διαμήκη στοιχεία, εξάγουμε μία ισοδύναμη δοκό που αν της εφαρμοστεί ισοδύναμη φόρτιση με τη συνολική φόρτιση του δικτυώματος, θα έπρεπε να παραμορφώνεται όπως η χαρακτηριστική ευθεία.

Ο ελαστικός άξονας, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις 3.4.1, είναι ευαίσθητος σε ασυμμετρίες. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα 4.5 4.6, αν και οι κόμβοι του δικτυώματος είναι συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς τον άξονα Oz, οπότε ο ελαστικός άξονας θα έπρεπε να συμπίπτει με τον άξονα Oz, στη περίπτωση που λαμβάνουμε υπ' όψιν μόνο τα διαμήκη στοιχεία, τα διαγώνια στοιχεία μετατοπίζουν τον ελαστικό άξονα σε σχέση με τον άξονα Oz.



Σχήμα 4.5: Εξαγωγή ελαστικού άξονα για το απαραμόρφωτο και παραμορφωμένο δικτύωμα, λαμβάνοντας υπ' όψιν διαμήκη στοιχεία.



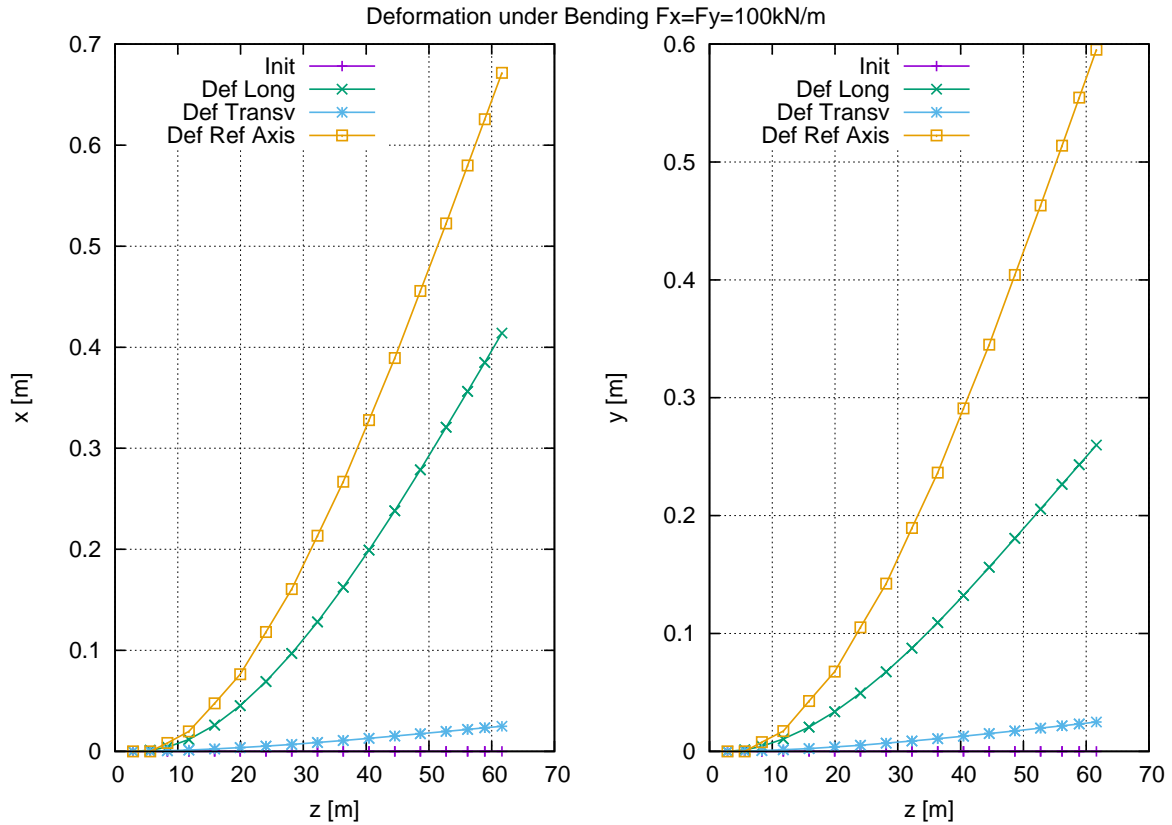
**Σχήμα 4.6:** Εξαγωγή ελαστικού άξονα για το अपαραμόρφωτο και παραμορφωμένο δικτύωμα, λαμβάνοντας υπ' όψιν εγκάρσια στοιχεία.

Στη περίπτωση μόνο των εγκάρσιων στοιχείων η ισοδύναμη δοκός προκύπτει πολύ στιβαρή και το σφάλμα αγγίζει τις δύο τάξεις μεγέθους, ενώ στην περίπτωση των διαμήκων στοιχείων προσεγγίζεται η παραμορφωμένη κατάσταση αλλά το σφάλμα παραμένει σημαντικό. Στα σχήματα 4.10 4.11 φαίνονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες για τις δύο προαναφερθείσες ισοδύναμες δοκούς <sup>1</sup> και το σχήμα 4.8 παρουσιάζει τα βέλη κάμψης κατά τους άξονες των  $y$  και  $x$  των δοκών συγκριτικά με την παραμόρφωση του ελαστικού άξονα του δικτυώματος, για την καλύτερη κατανόηση των ελλείψεων της προσέγγισης.

Για να βελτιώσουμε αυτή τη προσέγγιση της ισοδύναμης δοκού λαμβάνοντας υπ' όψιν τόσο τα εγκάρσια όσο και τα διαμήκη στοιχεία, πολλαπλασιάζουμε τους όρους των αθροισμάτων στις εξισώσεις 3.4.1 με ένα βάρος που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο, το οποίο υπολογίζεται ως το μήκος του στοιχείου στη διεύθυνση του άξονα αναφοράς προς το μήκος της περιοχής την οποία μελετάμε. Με αυτό το τρόπο, κάθε στοιχείο συνεισφέρει αναλογικά όχι μόνο του εμβαδού της διατομής του αλλά και του μήκους του, οπότε οι μηχανικές ιδιότητες των διαμήκων στοιχείων, που εκτείνονται σε μεγαλύτερο μήκος, συνεισφέρουν περισσότερο από τις αντίστοιχες των εγκάρσιων, οι οποίες περιορίζονται σε ένα σημείο.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9, για να προσδιορίσουμε το σημείο του ελαστικού άξονα

<sup>1</sup>Οι δοκοί αναλύονται σε σύνθετη καταπόνηση (εφελκυσμό, κάμψη, στρέψη) βάσει της θεωρίας Euler-Bernoulli, δηλαδή δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η διάτμηση και οι διατομές παραμένουν κάθετες στο ελαστικό άξονα.



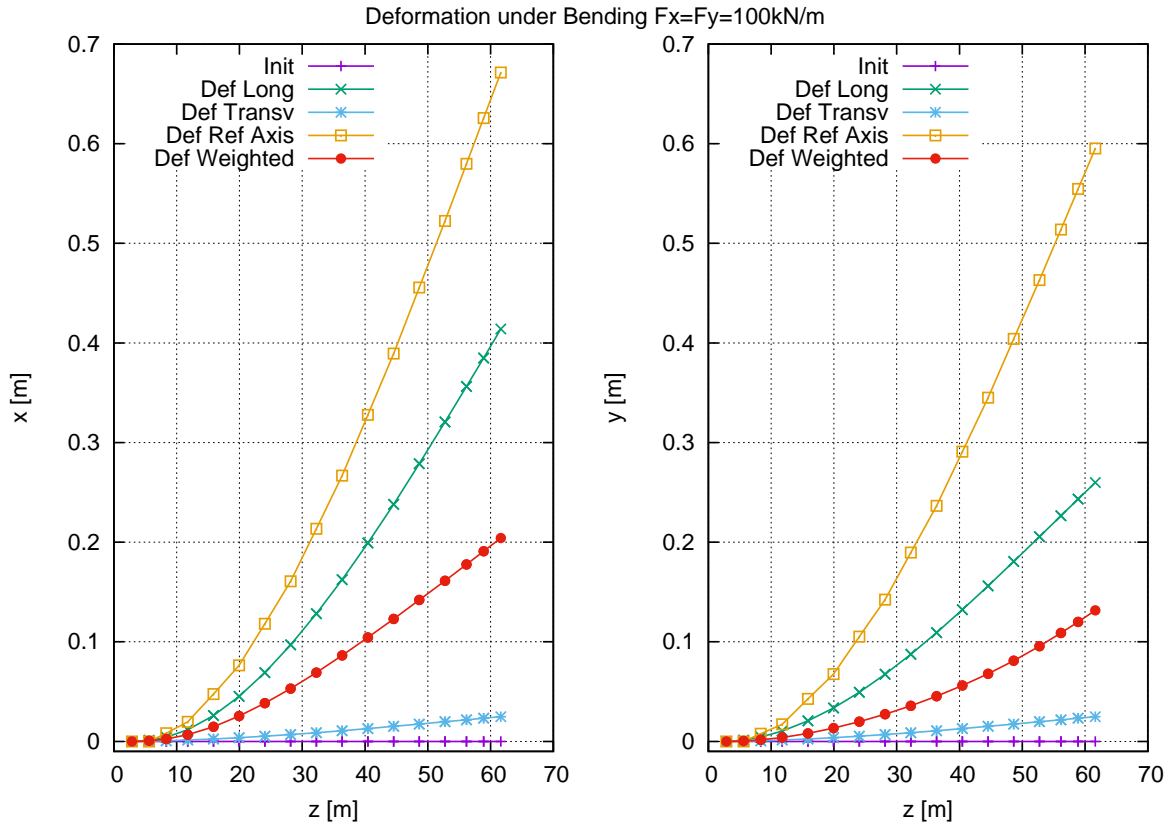
Σχήμα 4.7: Σύγκριση βέλους κάμψης άξονα δικτυώματος ('Ref. Axis') και δοκού με μηχανικές ιδιότητες από Structural Data Reduction με διαμήκη ('Long') και εγκάρσια ('Transv') στοιχεία.

α μεταξύ των επιπέδων  $z_0 = 30.2m$  και  $z_1 = 34.35m$ , προσδιορίζουμε τα σημεία  $p_i$   $i = 1, 2, \dots$  στα οποία τέμνουν τα επίπεδα τα διαμήκη και διαγώνια στοιχεία του δικτυώματος, και θέτουμε ως βάρος σε αυτά το λόγο του μήκους  $L'_e$ , από το σημείο τομής μέχρι τον κόμβο του στοιχείου, προς το  $dz = z_1 - z_0$  και στα εγκάρσια το λόγο πλάτους τους  $t$  προς το  $dz$ . Επειδή τα στοιχεία είναι κυλινδρικής διατομής, κι όχι ορθογώνιας, ως πλάτος λαμβάνουμε την εξωτερική διάμετρό του  $d$ , οπότε εισάγουμε σφάλμα, που λόγο του μεγέθους του προβλήματος μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

$$w_e = \frac{L'_e}{dz} \quad \text{if long element} \quad (4.3.1\alpha')$$

$$w_e = \frac{t}{dz} \quad \text{if transverse element} \quad (4.3.1\beta')$$

Η ισοδύναμη δοκός που προκύπτει δεν παρουσιάζει βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά από τις προηγούμενες, καθώς εμφανίζει μεγαλύτερη απόκλιση από το παραμορφωμένο άξονα του δικτυώματος από τη δοκό που προκύπτει μόνο από τα διαμήκη στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.

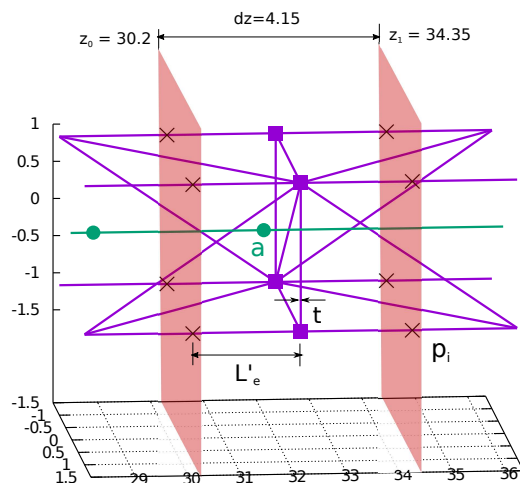


Σχήμα 4.8: Σύγκριση βέλους κάμψης άξονα δικτυώματος ('Ref. Axis'), δοκού με μηχανικές ιδιότητες από Structural Data Reduction με διαμήκη ('Long'), εγκάρσια ('Transv') και σταθμισμένα ('Weighted') στοιχεία.

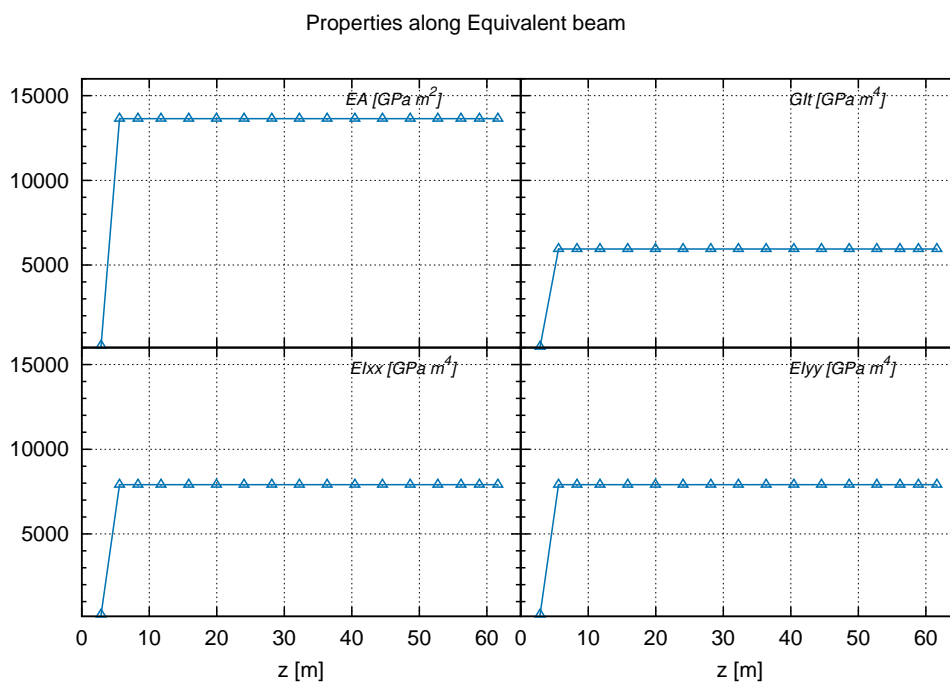
### 4.3.2 Έμμεσος Προσδιορισμός

Για την έμμεση εξαγωγή της ισοδύναμης δοκού, πρέπει η κατασκευή να φορτιστεί καθ' όλους τους βαθμούς ελευθερίας, γεγονός που σημαίνει ότι για την εμφάνιση συστροφής, λόγω της συμμετρίας του δικτυώματος, πρέπει να εφαρμόσουμε στη μία πλευρά μικρότερη ή αντίθετη δύναμη κατά τον άξονα Oy ή Ox. Έτσι εφαρμόζουμε στην δεξιά πλευρά τη μισή δύναμη κατά Oy, δηλαδή  $Fy = 50kN/m$ , οπότε αναπτύσσεται ροπή  $M_z = M_t = -273.30kNm$ .

Η σύγκλιση της μεθόδου δεν είναι ικανοποιητική. Στην περίπτωση που ορίζεται το υπόλοιπο ως  $\vec{R} = K \cdot \vec{u}_e - \vec{F}_e$  ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει ποτέ, ενώ στη περίπτωση που οριστεί ως  $\vec{R} = \vec{u}_e - \vec{U}$ , η βέλτιστη τιμή του φτάνει τις μερικές δεκάδες. Επίσης, πιο ομαλά αποτελέσματα προκύπτουν όταν ως μεταβλητές επιλέγονται οι συντελεστές των κατανομών των μεγεθών  $(EA(z), GI_t(z), EI_x x(z), EI_y y(z))$  αντί για τις τιμές τους στους κόμβους των Πεπερασμένων Στοιχείων στα οποία διακριτοποιείται η δοκός. Στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρούνται ασυνέχειες και μή λείες κατανομές, καθώς και υπερακοντίσεις ενώ χαρακτηριστικό σφάλμα και των δύο προσεγγίσεων είναι οι αρνητικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες, βλ. εικόνες. Επίσης, παρατηρείται μεγάλη ευαισθησία

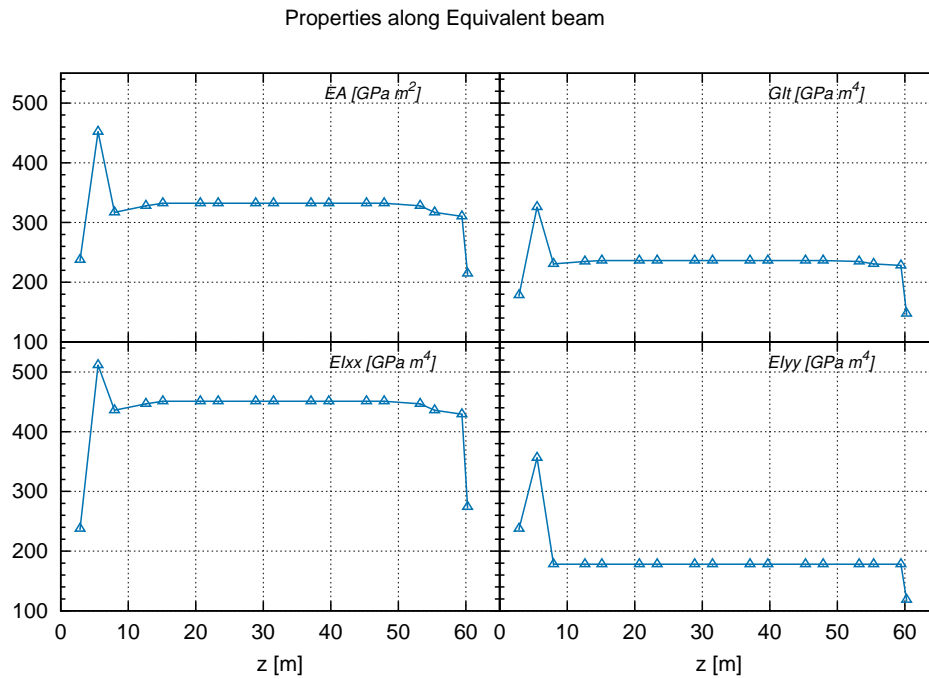


Σχήμα 4.9: Προσδιορισμός σημείου  $a$  του ελαστικού άξονα.

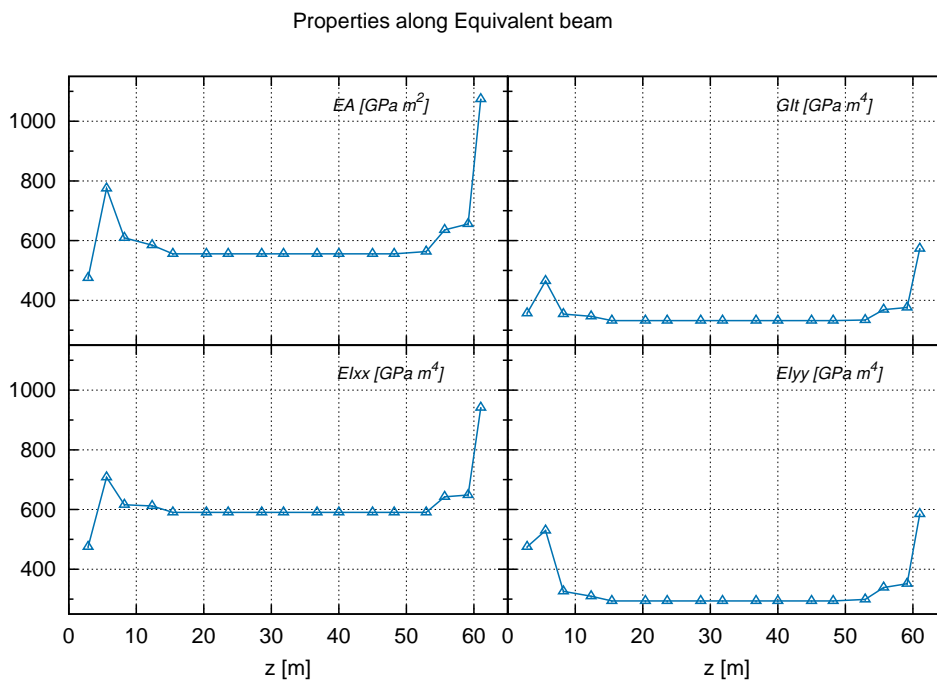


Σχήμα 4.10: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού που προκύπτει από Structural Data Reduction με εγκάρσια στοιχεία.



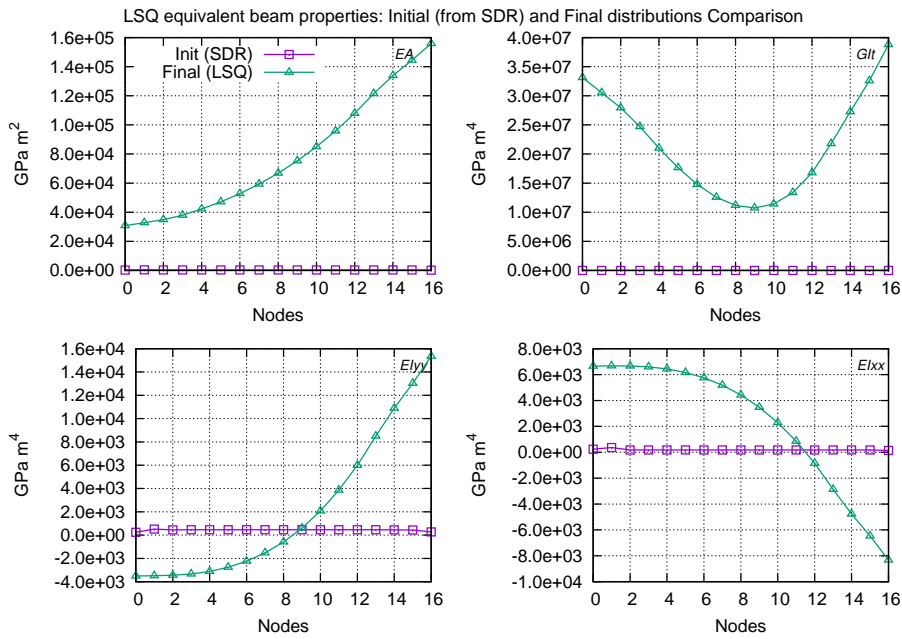


Σχήμα 4.11: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού που προκύπτει από Structural Data Reduction με διαμήκη στοιχεία.

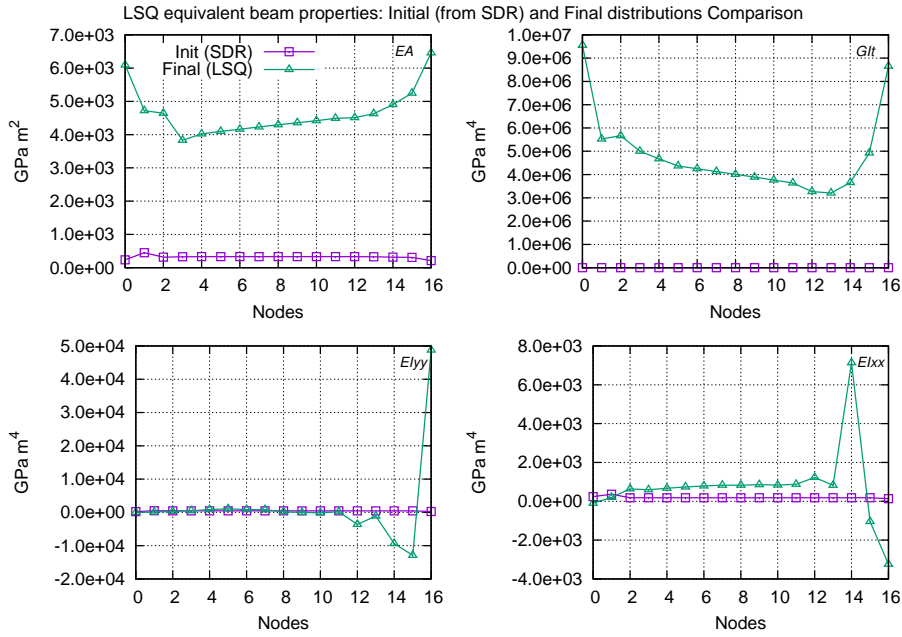


Σχήμα 4.12: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού που προκύπτει από Structural Data Reduction με σταθμισμένα διαμήκη και εγκάρσια στοιχεία.

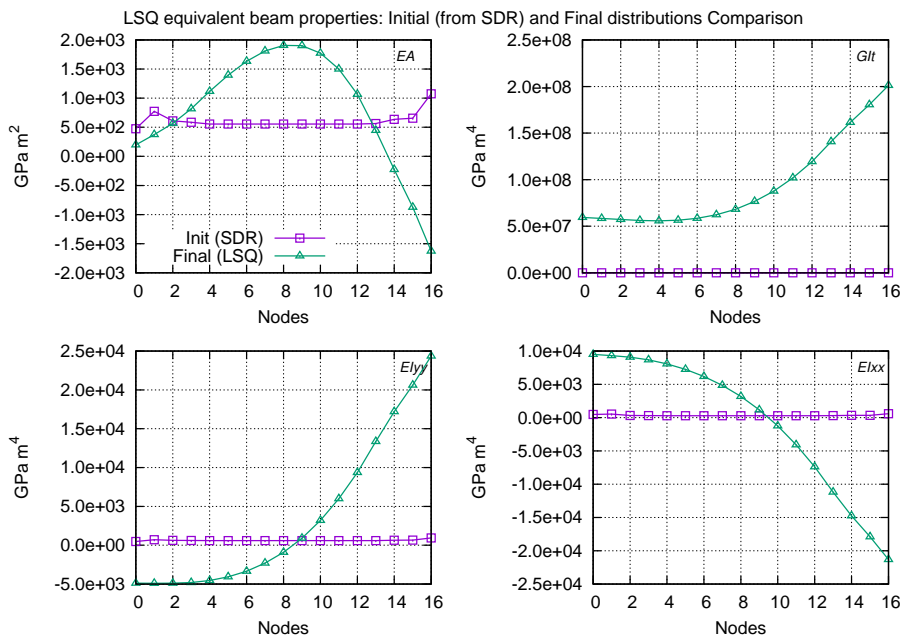
στις αρχικές τιμές των μεταβλητών, είτε των συντελεστών των πολυωνυμικών κατανομών είτε των απόλυτων τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων.



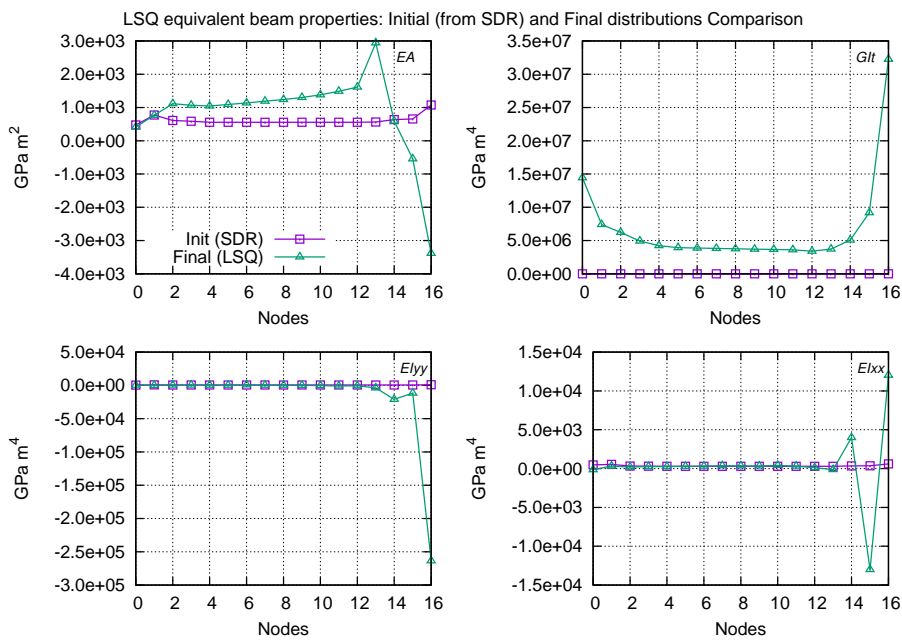
Σχήμα 4.13: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού όπως προκύπτουν με προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων με  $\vec{R} = \vec{u}_e - \vec{U}$  και μεταβλητές τους συντελεστές πολυωνυμικών κατανομών των μηχανικών ιδιοτήτων. Αρχική κατανομή από SDR διαμήκων στοιχείων.



Σχήμα 4.14: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού όπως προκύπτουν με προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων με  $\vec{R} = \vec{u}_e - \vec{U}$  και μεταβλητές τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων στους κόμβους. Αρχική κατανομή από SDR διαμήκων στοιχείων.



Σχήμα 4.15: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού όπως προκύπτουν με προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων με  $\vec{R} = \vec{u}_e - \vec{U}$  και μεταβλητές τους συντελεστές πολυωνυμικών κατανομών των μηχανικών ιδιοτήτων. Αρχική κατανομή από σταθμισμένο SDR διαμήκων και εγκάρσιων στοιχείων.



Σχήμα 4.16: Οι μηχανικές ιδιότητες της ισοδύναμης δοκού όπως προκύπτουν με προσέγγιση Ελαχίστων Τετραγώνων με  $\vec{R} = \vec{u}_e - \vec{U}$  και μεταβλητές τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων στους κόμβους. Αρχική κατανομή από σταθμισμένο SDR διαμήγων και εγκάρσιων στοιχείων.

## Κεφάλαιο 5

# Παραμετρική Ανάλυση Δικτυώματος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη παραμετρική ανάλυση του δικτύωματος για την πτέρυγα της ανεμογεννήτριας *NREL 5MW*. Σκοπός της ανάλυσης είναι η σύγκριση της δυναμικής και της στατικής απόκρισης του δικτύωματος και της ήδη υπάρχουσας πτέρυγας, ώστε να διαπιστωθεί αν η προτεινόμενη υποστηρικτική δομή για τις πτέρυγες ανεμογεννητριών είναι μια ρεαλιστική εναλλακτική.

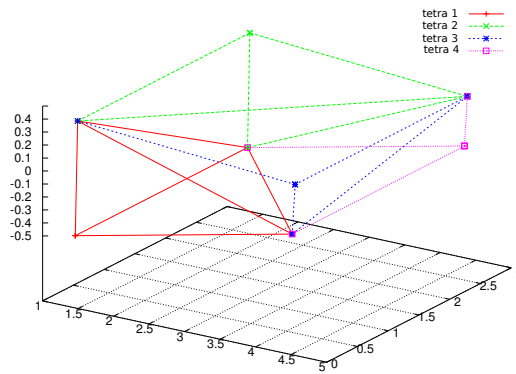
Βασικές παραμέτρους του δικτύωματος αποτελούν η δομή και η γεωμετρία του, το υλικό και οι διαστάσεις των στοιχείων του.

Ενδιαφερόμαστε να διερευνήσουμε την επίδραση των παραμέτρων αυτών συγκρίνοντας τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές του δικτύωματος με αυτές της ήδη υπάρχουσας πτέρυγας, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι η δυναμική τους απόκριση δεν αποκλίνει, καθώς και τη στατική παραμόρφωση, υπό ίσο φορτίο, ώστε να επιβεβαιώσουμε ότι το δίκτυωμα μπορεί να παρακολουθήσει τη παραμόρφωση της πτέρυγας.

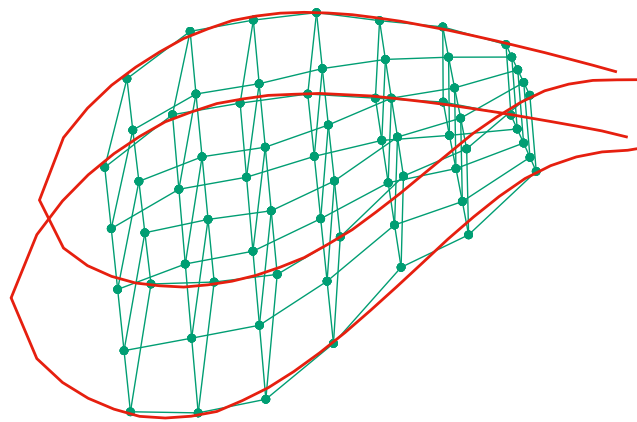
### 5.1 Δομή Δικτυώματος

Χαρακτηριστική δομική μονάδα του δικτύωματος επιλέχτηκε το τετράεδρο, καθώς είναι η πιο στέρεη τρισδιάστατη δομή και κατασκευάζεται από επιμέρους δοκούς ή σωλήνες, με όφελος το χαμηλό βάρος (λόγω της ελαχιστοποίησης του υλικού) και τη υψηλή στιβαρότητα.

Το δίκτυωμα εγγράφεται μέσα στις αεροτομές που συνθέτουν την πτέρυγα, βάσει ενός αλγορίθμου *mesh mapping* που συντάχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, ακολουθώντας τη τεχνική της παρεμβολής κατά Coons [23], η οποία παρεμβάλει ένα κανονικοποιημένο κάναβο στην επιθυμητή γεωμετρία. Ανάλογα με τα στοιχεία που επιλέξουμε να τοποθετήσουμε σε κάθε διεύθυνση (*Edgewise*, *Flapwise*, *Spanwise*) μπορούμε να ελέγξουμε την πυκνότητα και άρα την μηχανική συμπεριφορά (στιβαρότητα, εκκεντρότητα) της συνολικής κατασκευής και να τη ρυθμίσουμε ανάλογα με την εφαρμογή.



Σχήμα 5.1: Η βασική δομή του δικτύωματος, τέσσερα τετράεδρα σχηματίζουν ένα κύβο.



Σχήμα 5.2: Το δικτύωμα, αποτελούμενο από εξάεδρα, εγγράφεται στην αεροτομή βάσει της παρεμβολής Coons.

Τα επιμέρους μέλη εκλέγονται κυλινδρικές ράβδους με κενό, με βασικές παραμέτρους τη διάμετρο, το πάχος και το υλικό (πυκνότητα  $\rho$  [ $kg/m^3$ ], μέτρο ελαστικότητας Young's Modulus  $E$  [ $GPa$ ], μέτρο διάτμησης  $G$  [ $GPa$ ]).

Στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκαν διάμετροι [ $30cm, 20cm, 10cm$ ] και πάχη [ $10cm, 5cm, 3cm$ ], ενώ ως υλικά επιλέχθηκαν ένας συνήθης κατασκευαστικός χάλυβας, αλουμίνιο και ένα σύνθετο υλικό, των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες παρατίθενται στον επόμενο πίνακα 5.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση που διεξάγεται εδώ είναι προκαταρκτική οπότε τυχών ασυμφωνίες στις διαστάσεις των επιμέρους ράβδων και της πτέρυγας παραβλέπονται.

## 5.2 Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες

Αρχικά, ενδιαφερόμαστε να επιβεβαιώσουμε ότι οι ιδιομορφές του δικτύωματος αντιστοιχούν σε αυτές μίας δοκού, όπως μοντελοποιείται η πτέρυγα, και πιο συγκεκριμένα

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες ράβδων δικτυώματος.

Υλικό	Πυκνότητα [ $kg/m^3$ ]	Young's Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]
St A36	7850.	200	75
Al	2768.	73.1	69
E-glass Fibre	2550.	72	30

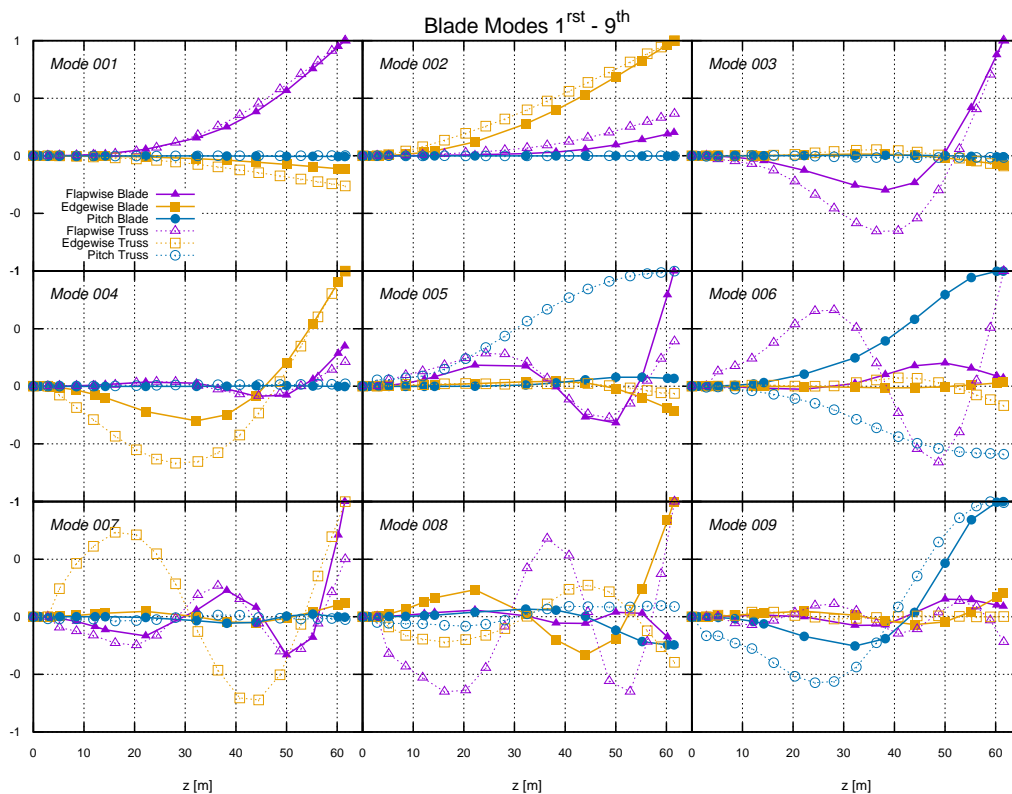
ενδιαφερόμαστε για τις ιδιομορφές κάμψης *Edgewise* και *Flapwise*, καθώς και για τη συστροφή (*Pitch*).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σειρά με την οποία εμφανίζονται οι ιδιομορφές, δηλαδή σε ποια συχνότητα εμφανίζεται η πρώτη στροφική ιδιομορφή, καθώς και οι συζεύξεις μεταξύ των κατευθύνσεων παραμόρφωσης, οι οποίες εκφράζονται από την σχέση των βελών κάμψης, κατά πόσο δηλαδή κάμπτεται η κατασκευή κατακόρυφα (*flapwise*) όταν κάμπτεται εγκάρσια (*edgewise*).

Στη συνέχεια ελέγχουμε αν οι ιδιοσυχνότητες είναι παραπλήσιες με αυτές της ήδη υπάρχουσας πτέρυγας, ώστε να καταλάβουμε αν διεγείρονται με τον ίδιο τρόπο, και αν μπορούν να αντέξουν την ίδια δυναμική καταπόνηση, η οποία στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών είναι καθοριστικός παράγοντας.

### 5.2.1 Σύγκριση Ιδιομορφών

Από τη σύγκριση των εννέα πρώτων ιδιομορφών (*Modes*), συμπεραίνουμε ότι πράγματι το δικτύωμα συνολικά συμπεριφέρεται σαν δοκός. Οι πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται με την ίδια σειρά όπως στη πτέρυγα, αλλά η πρώτη στροφική ιδιομορφή παρουσιάζεται σε χαμηλότερη συχνότητα από ότι στη πτέρυγα. Το εύρος και η καμπυλότητα των μορφών διαφέρει λίγο, αλλά επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του δικτυώματος, οπότε με σωστή ρύθμιση θα μπορούσαν να προσεγγίσουν πολύ καλά αυτές της πτέρυγας.



Σχήμα 5.3: Σύγκριση ιδιομορφών πτέρυγας (συνεχής γραμμή) και δικτυώματος (διακεκομμένη). Φαίνεται καλή προσέγγιση στις πρώτες ιδιομορφές, εμφάνιση πρώτης στροφικής σε χαμιλότερη συχνότητα για το δικτύωμα και διαφορά σε πλάτη και πρόσημα στις συζευγμένες παραμορφώσεις.

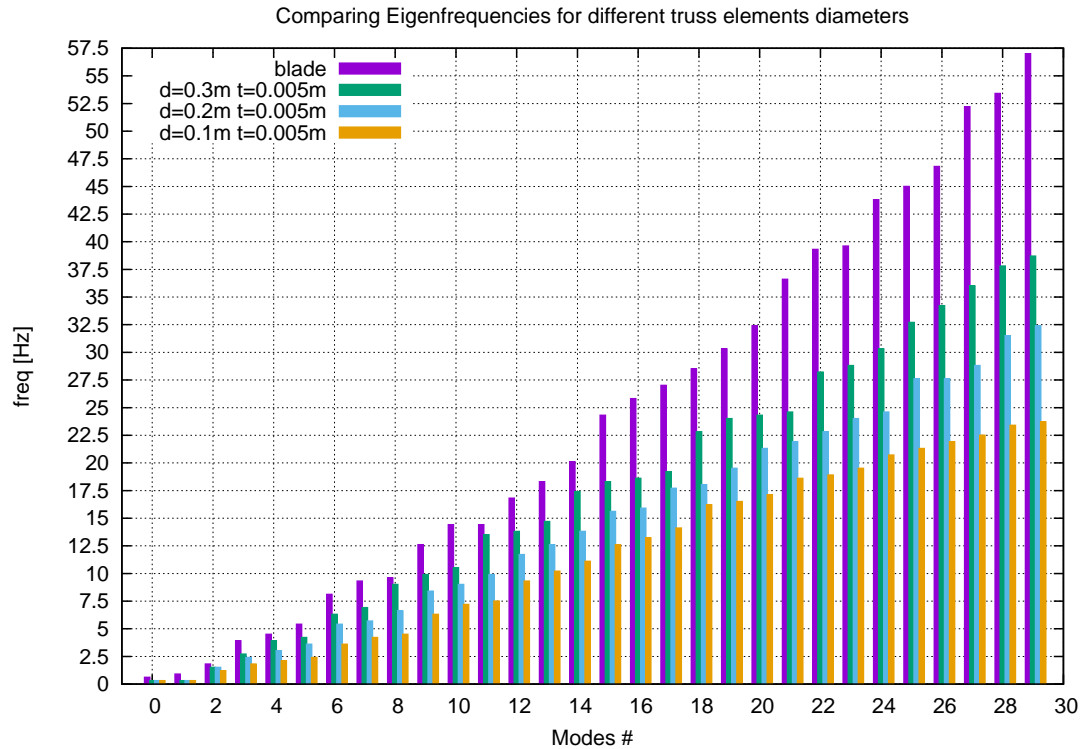
## 5.2.2 Σύγκριση Ιδιοσυχνοτήτων

Συγκρίνοντας τις 30 πρώτες ιδιοσυχνότητες είναι εμφανές ότι η πτέρυγα εμφανίζει πολύ υψηλές ιδιοσυχνότητες, τις οποίες τα υλικά που επιλέχτηκαν δεν τις φτάνουν. Η πτέρυγα παρουσιάζει πολύ υψηλό λόγο στιβαρότητας προς μάζα, ο οποίος αποτελεί σημαντική παράμετρο και καθοριστικό στόχο για τη σχεδίαση του δικτυώματος. Με κατάλληλη ρύθμιση της γεωμετρίας του δικτυώματος και των επιμέρους μελών και επιλέγοντας υλικά (ή συνδυασμό υλικών για διαφορετικά μέρη της κατασκευής) με μεγάλες τιμές ειδικού μέτρου ελαστικότητας ( $\frac{E [GPa]}{\rho [kg/m^3]}$ ), είναι δυνατό να μειώσουμε το βάρος και να αυξήσουμε την ελαστικότητα, και άρα τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής.

### Επίδραση Διαμέτρου

Όσο μικραίνει η διάμετρος της επιμέρους κυλινδρικής δοκού, διατηρώντας το πάχος σταθερό, μικραίνει τόσο η μάζα της όσο κι η δυσκαμψία της, καθώς το υλικό μεταφέρεται προς το κέντρο και μικραίνουν οι τιμές των ροπών αδρανείας. Ως αποτέλεσμα μειώνονται και οι ιδιοσυχνότητες.

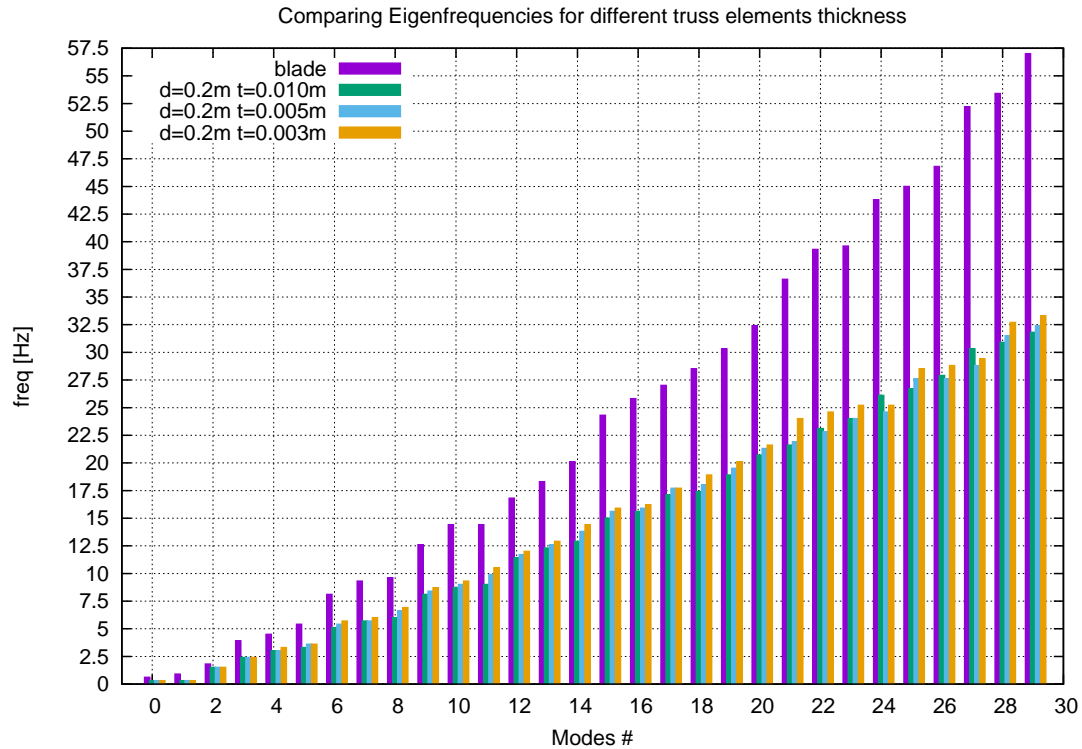




**Σχήμα 5.4:** Μειώνοντας τη διάμετρο των επιμέρους κυλινδρικών στοιχείων του δικτυώματος, με πάχος 5cm από χάλυβα, από 0.3m σε 0.1m (δοκάρι χωρίς κενό), μειώνονται οι ιδιοσυχνότητες.

### Επίδραση Πάχους

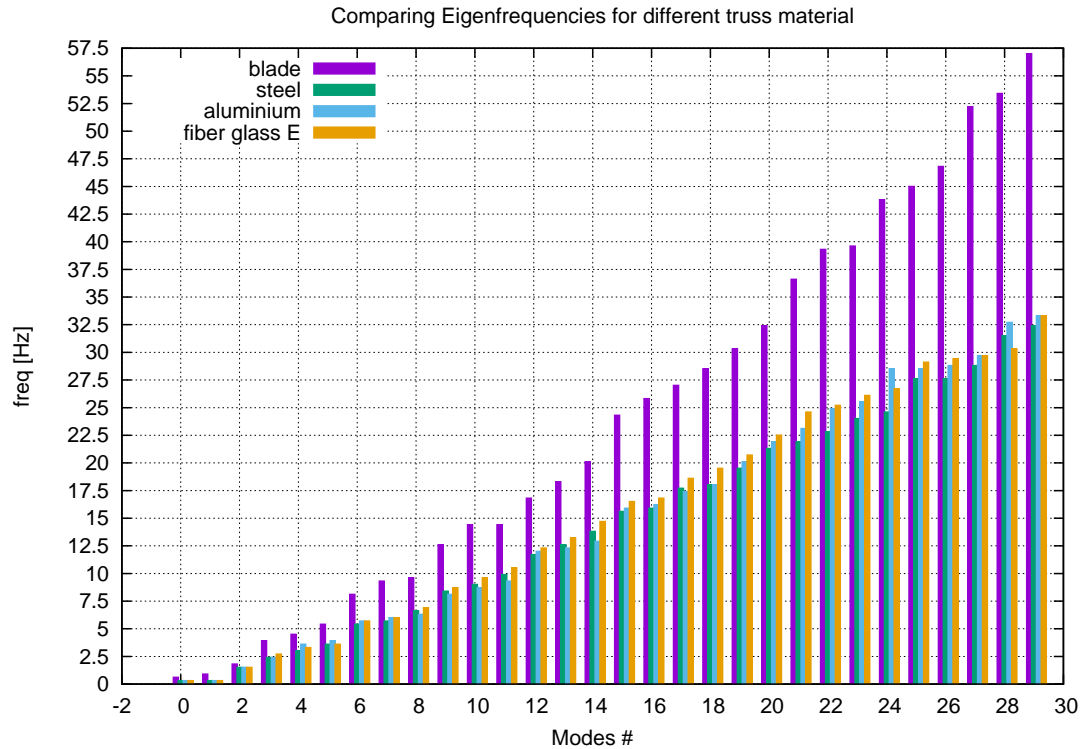
Διατηρώντας τη διάμετρο των επιμέρους μελών σταθερή, καθώς μειώνουμε το πάχος των, μειώνεται η επιφάνεια των διατομών τους και άρα η συνολική μάζα της κατασκευής, αλλά το υλικό μεταφέρεται μακρύτερα του άξονα της κυλινδρικής δοκού οπότε οι ροπές αδρανείας μεγαλώνουν. Ως συνέπεια μεγαλώνουν και οι ιδιοσυχνότητες.



**Σχήμα 5.5:** Μειώνοντας το πάχος των επιμέρους κυλινδρικών στοιχείων του δικτυώματος, με διάμετρο 20cm από χάλυβα, από 10cm σε 3cm (δοκάρι χωρίς κενό), αυξάνονται οι ιδιοσυχνότητες.

### Επίδραση Υλικού

Δοκιμάζοντας τρία διαφορετικά υλικά, κατασκευαστικό χάλυβα, αλουμίνιο και ένα πολυμερές, παρατηρούμε πως τα δύο τελευταία υλικά υπερτερούν του χάλυβα σε λόγο ελαστικότητας προς πυκνότητα, οπότε και παρουσιάζουν ελάχιστα ενισχυμένες ιδιοσυχνότητες.

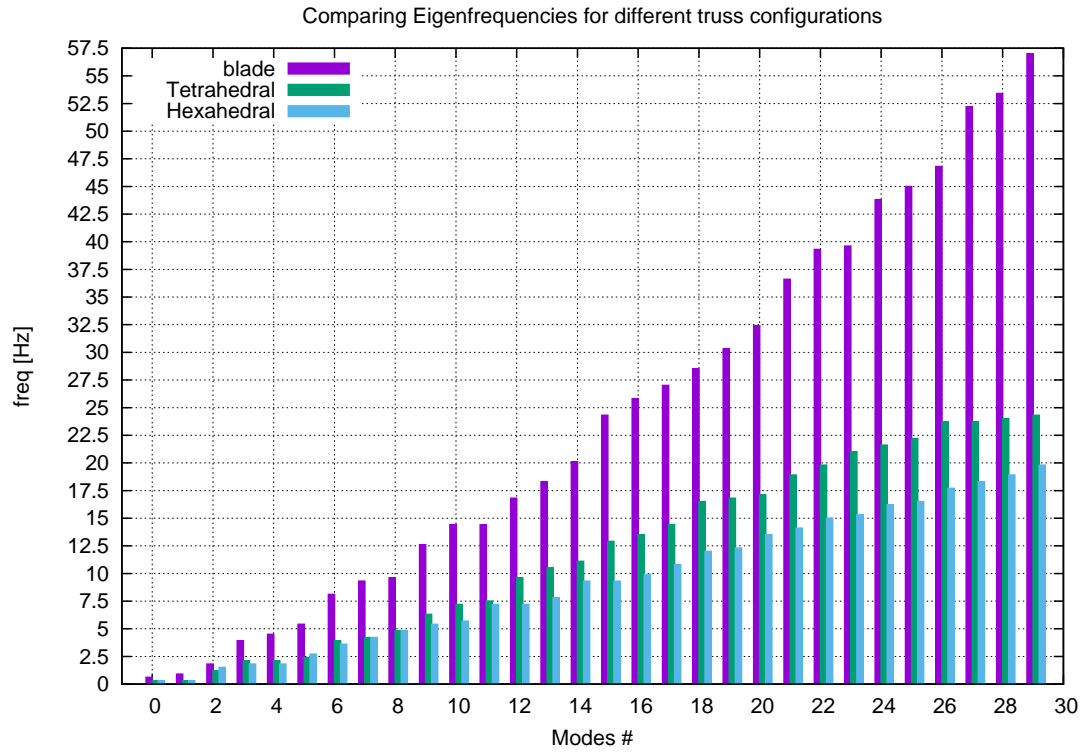


Σχήμα 5.6: Σύγκριση χάλυβα, αλουμινίου και σύνθετου υλικού, για συγκεκριμένο δικτύωμα με στοιχεία διαμέτρου 20cm και πάχους 5cm, δείχνει πως ο χάλυβας υστερεί λίγο σε ιδιοσυχνότητες.

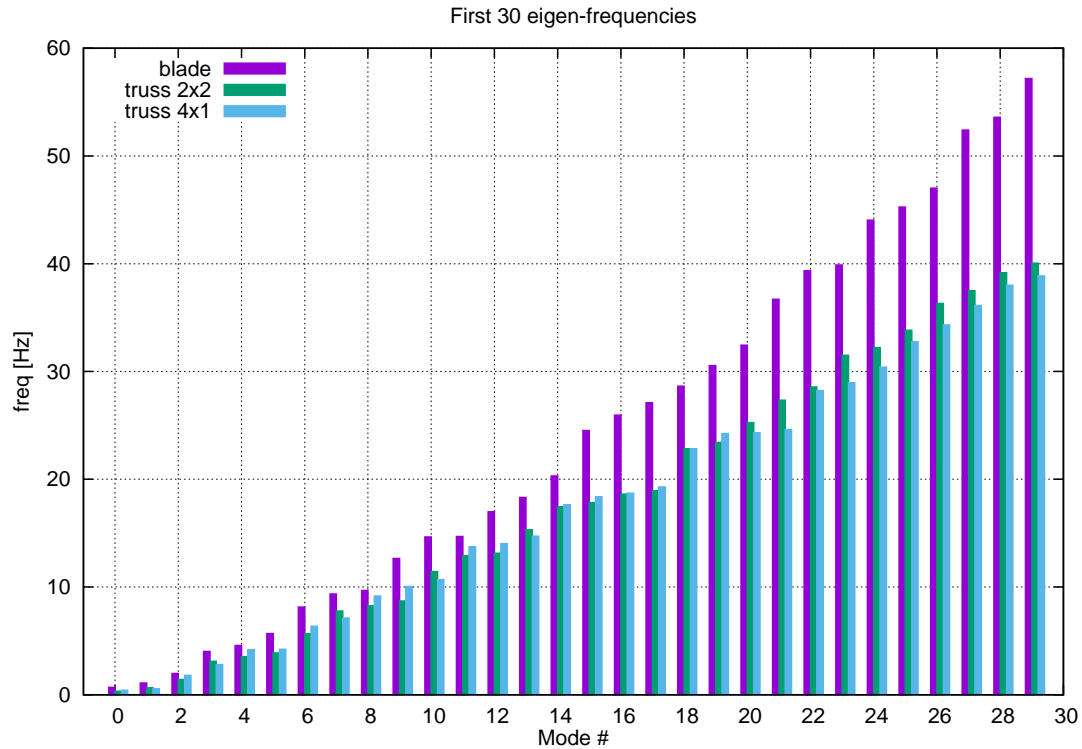
### Επίδραση της δομής

Η μορφή του δικτυώματος και η τοποθέτηση των επιμέρους μελών, αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής και πρέπει να αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης. Ανάλογα με το πως τοποθετούνται τα στελέχη του δικτυώματος και προς πια κατεύθυνση (flapwise ή edgewise) πυκνώνει το πλέγμα, αλλάζουν οι συμμετρίες της κατασκευής και οι επιδόσεις της κατασκευής στην αντίστοιχη φόρτιση.

Επίσης, όπως έχουμε ήδη δει, το δικτύωμα που αποτελείται από τετράεδρα υπερτερεί σε στιβαρότητα και παραμορφώνεται λιγότερο σε κάμψη σε σύγκριση με ένα δικτύωμα με βασική δομή τα εξάεδρα, λόγω των διαγώνιων μελών που συνδέουν τις διάφορες κατευθύνσεις και μεταφέρουν τα φορτία. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακριβώς για να επιτευχθεί η επιθυμητή σύζευξη παραμορφώσεων που απαιτείται στο σύγχρονο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση δικτυώματος τετράεδρων και εξάεδρων, με στοιχεία διαμέτρου 10cm και πάχους 3cm από χάλυβα, όπου φαίνεται η υπεροχή των τετράεδρων στις μεγάλες ιδιοσυχνότητες.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση δικτυώματος τετράεδρων σε διάταξη 4 edgewise επί 1 flapwise και  $2 \times 2$ , με στοιχεία διαμέτρου 20cm και πάχους 5cm από χάλυβα, όπου διαπιστώνεται ότι εμφανίζονται περιορισμένες διαφορές σε κάποιες ιδιοσυχνότητες, χωρίς κάποια διάταξη να υπερτερεί.

### 5.2.3 Στατική παραμόρφωση

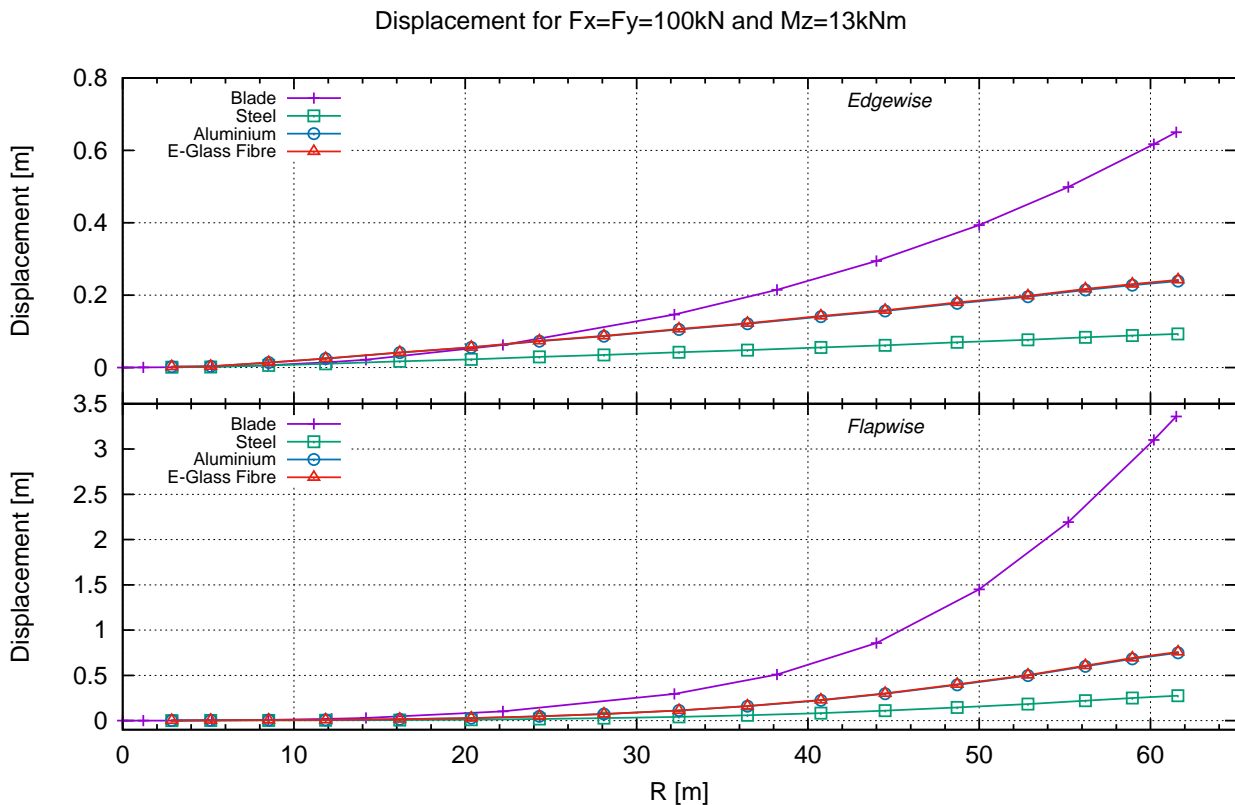
Εκτός από τη δυναμική συμπεριφορά μας ενδιαφέρει και η απόκριση του δικτυώματος στα φορτία που δέχεται η πτέρυγα της ανεμογεννήτριας.

Προς αυτή τη κατεύθυνση, συγκρίνουμε την παραμόρφωση δικτυωμάτων από χάλυβα, αλουμίνιο και σύνθετο υλικό, σε διάταξη 4 edgewise επί 1 flapwise, με στοιχεία διαμέτρου 20cm και πάχους 5cm, υπό ίδιο φορτίο στους τρεις άξονες  $O_x, O_y, O_z$ , ίσο με 100kN, με την παραμόρφωση της πτέρυγας του NREL 5MW, υπό το ίδιο φορτίο. Λόγω της γεωμετρίας του δικτυώματος, οι δυνάμεις αυτές όταν ασκούνται στα διαμήκη στοιχεία ανάμεσα στις δύο τελευταίες αεροτομές, παράγουν στροφική ροπή  $M_z = 13kNm$ , την οποία πρέπει να εφαρμόσουμε ως εξωτερική δύναμη στη πτέρυγα.

Όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα 5.9, η σχέση μεταξύ της παραμόρφωσης στη κατακόρυφη κατεύθυνση (flapwise), για το αλουμίνιο και το σύνθετο, και στην εγκάρσια κατεύθυνση (edgewise), είναι παρόμοια με της πτέρυγας, παρά το γεγονός ότι δεν προσεγγίζουν σε τιμές τις αντίστοιχες της πτέρυγας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις χαμηλές ιδιοσυχνότητες που παρουσιάζει το δικτύωμα με αυτά τα υλικά, δείχνει πως υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της απόκρισης της κατασκευής, συγκλίνοντας προς τις παραμορφώσεις της πτέρυγας, με κατάλληλη επιλογή διαμέτρων και κατανομή της

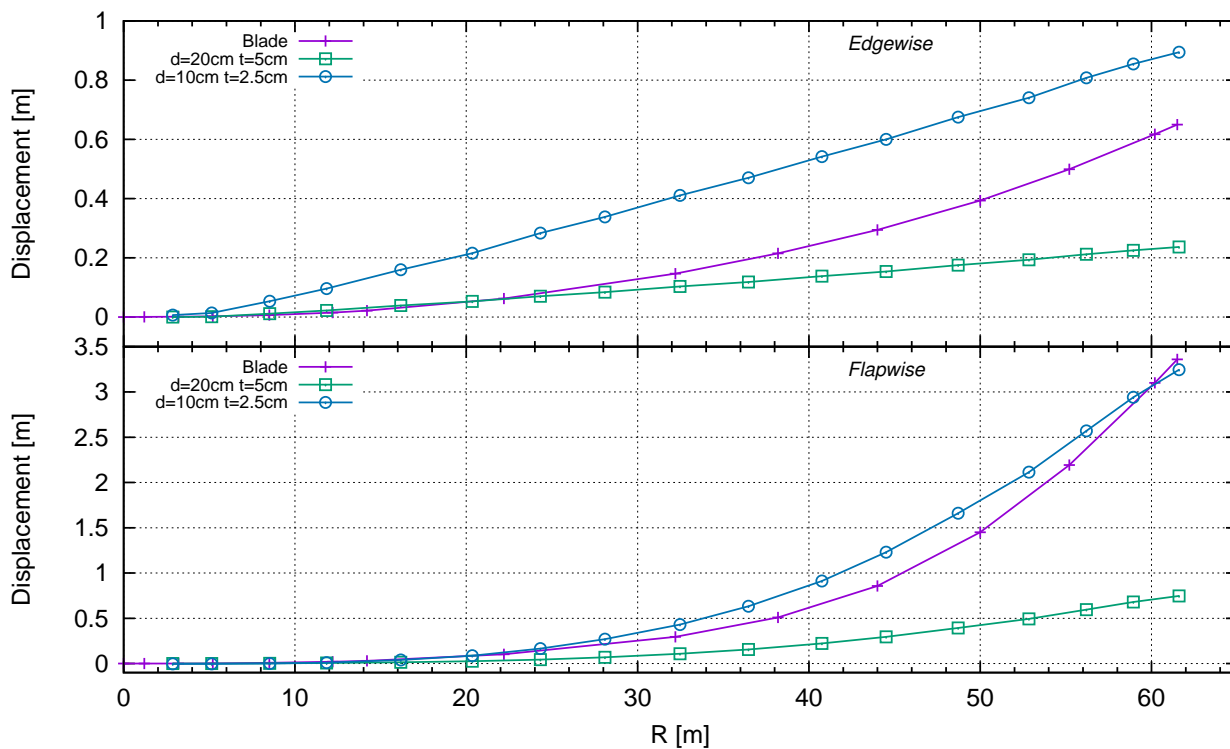
μάζας. Η κατασκευή από χάλυβα προκύπτει πολύ στιβαρή.

Επιβάλλοντας τα ίδια φορτία σε ένα δικτύωμα με την ίδια διάταξη ( $4 \times 1$ ) από αλουμίνιο, αλλά με διάμετρο στοιχείων 10cm και πάχος 2.5cm (διατηρώντας την αναλογία  $\frac{d}{t}$ ), προκύπτει παραμόρφωση που προσεγγίζει αρκετά εκείνη της πτέρυγας, ειδικά στη flapwise κατεύθυνση, σχήμα 5.10. Αυτό δείχνει την ευκολία με την οποία μπορούμε να ρυθμίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες του δικτυώματος ώστε να το προσαρμόσουμε στις ανάγκες μας.

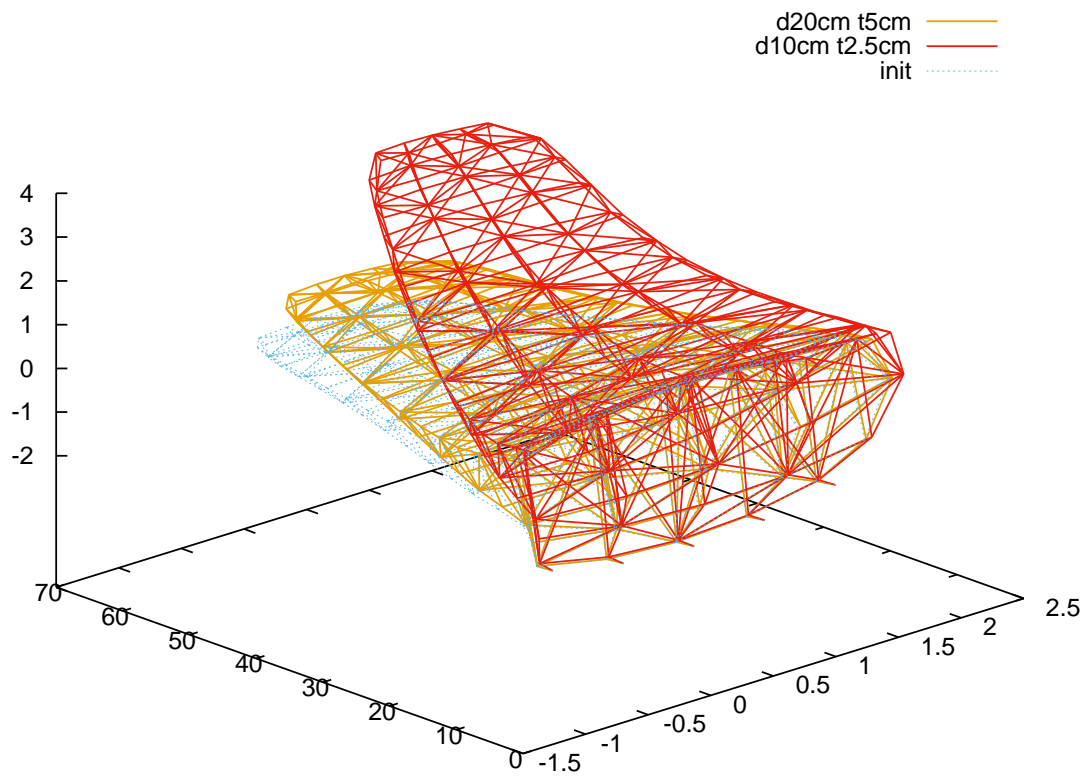


Σχήμα 5.9: Σύγκριση βέλους κάμψης πτέρυγας και δικτυώματος από χάλυβα, αλουμίνιο και σύνθετο υλικό, υπό την ίδια φόρτιση. Και στις δύο κατευθύνσεις (edgewise, flapwise) υπάρχει απόκλιση του βέλους κάμψης, ο λόγος μεταξύ τους όμως δείχνει τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Displacement for Blade and Aluminium Truss for  $F_x=F_y=100\text{kN}$  and  $M_z=13\text{kNm}$



Σχήμα 5.10: Σύγκριση παραμόρφωσης δικτυώματος αλουμινίου, σε διάταξη  $4 \times 1$ , με διαφορετικές διαμέτρους στοιχείων, με τη παραμόρφωση της πτέρυγας NREL 5MW.



Σχήμα 5.11: Σύγκριση παραμόρφωσης δικτυώματος αλουμινίου, σε διάταξη  $4 \times 1$ , με διαφορετικές διαμέτρους στοιχείων, υπό φορτίο  $F_x = F_y = 100kN$ .



# Κεφάλαιο 6

## Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την διερεύνηση της αντικατάστασης της εσωτερικής υποστηρικτικής δομής πτέρυγας ανεμογεννήτριας από ένα δικτύωμα, μέσω της μοντελοποίησης του δικτυώματος και της εξαγωγής μίας ισοδύναμης δοκού που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε αεροελαστικούς υπολογισμούς για το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.

Η εργασία επικεντρώθηκε στη μέθοδο προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων της ισοδύναμης δοκού, εφαρμόζοντας τεχνικές *Structural Data Reduction*, όπου υπολογίζονται απ' ευθείας από τη γεωμετρία του δικτυώματος αναλύοντας τομές της κατασκευής, και προσέγγισης μέσω Ελαχίστων Τετραγώνων, όπου υπολογίζονται έτσι ώστε η ισοδύναμη δοκός να δίνει τις ίδιες παραμορφώσεις με έναν άξονα αναφοράς του δικτυώματος (ελαστικός άξονας, άξονας των  $z$ , μέση γεωμετρική γραμμή), υπό ισοδύναμο φορτίο.

Και οι δύο τεχνικές απέτυχαν να δώσουν αποτελέσματα, με την μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων να μην λειτουργεί καθόλου και να δίνει μη αποδεκτές τιμές ιδιοτήτων, ενώ η μέθοδος *Structural Data Reduction* δίνει δοκούς περισσότερο στιβαρές από το αναμενόμενο.

Η απλότητα της μεθόδου *Structural Data Reduction*, η οποία κάνει χρήση θεμελιωδών σχέσεων της μηχανικής των παραμορφώσιμων στερεών, υποδεικνύει ότι μπορεί να υπάρχει περιθώριο βελτίωσης της τεχνικής. Επίσης ίσως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πιο αποτελεσματική μέθοδος βελτιστοποίησης.

Το δικτύωμα φάνηκε πως αποτελεί ρεαλιστική εναλλακτική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποστηρικτική δομή σε πτέρυγα ανεμογεννήτριας. Οι μηχανικές ιδιότητες του ρυθμίζονται εύκολα είτε μέσω της διάταξης των επιμέρους μελών του είτε με σωστή εκλογή των υλικών, και μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της ανεμογεννήτριας. Η βελτιστοποίηση του δικτυώματος δεν αποτελούσε αντικείμενο της παρούσας εργασίας, παραμένει λοιπόν θέμα διερεύνησης.

Επίσης, προς διερεύνηση παραμένει η χρήση του δικτυώματος για τον ενεργό ή παθητικό έλεγχο της πτέρυγας, είτε με τη αντικατάσταση συγκεκριμένων μελών του από γραμμικούς επενεργητές, είτε με τη κατάλληλη χρήση των υλικών.



# Βιβλιογραφία

- [1] M. Ruzzene A. Spadoni. Static aeroelastic response of chiral-core airfoils. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18, 2007.
- [2] Peter B Andersen, Mac Gaunaa, Christian Bak, and Thomas Buhl. Load alleviation on wind turbine blades using variable airfoil geometry (2d and 3d study). *Technical University of Denmark*, 2005.
- [3] D. Baker and M.I. Friswell. Determinate structures for wing camber control. *Smart Materials and Structures*, 18, 2009.
- [4] Thanasis K Barlas and GAM Van Kuik. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences*, 46(1):1–27, 2010.
- [5] Paolo Bettini, Alessandro Airoidi, Giuseppe Sala, Luca Di Landro, Massimo Ruzzene, and Alessandro Spadoni. Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process. *Composites Part B: Engineering*, 41(2):133–147, 2010.
- [6] José Pedro Blasques. Multi-material topology optimization of laminated composite beams with eigenfrequency constraints. *Composite Structures*, 111:45–55, 2014.
- [7] Kim Branner, José Pedro Albergaria Amaral Blasques, Taeseong Kim, Vladimir Fedorov, Peter Berring, Robert Bitsche, and Christian Berggreen. Anisotropic beam model for analysis and design of passive controlled wind turbine blades. Technical report, DTU Wind Energy, 2012.
- [8] Hui Chen, Wenbin Yu, and Mark Capellaro. A critical assessment of computer tools for calculating composite wind turbine blade properties. *Wind Energy*, 13(6):497–516, 2010.
- [9] Dimitris I Chortis, Dimitris S Varelis, and Dimitris A Saravanos. Prediction of material coupling effect on structural damping of composite beams and blades. *Composite Structures*, 94(5):1646–1655, 2012.
- [10] Vittorio Giavotto, Marco Borri, Paolo Mantegazza, G Ghiringhelli, V Carmaschi, GC Maffioli, and F Mussi. Anisotropic beam theory and applications. *Computers & Structures*, 16(1):403–413, 1983.
- [11] Hyeonu Heo, Jaehyung Ju, and Doo-Man Kim. Compliant cellular structures: Application to a passive morphing airfoil. *Composite Structures*, 106:560–569, 2013.

- [12] Jessica Gabrielle Holierhoek. *Aeroelasticity of large wind turbines*. PhD thesis, 2008.
- [13] Ugo Icardi and Laura Ferrero. Preliminary study of an adaptive wing with shape memory alloy torsion actuators. *Materials & Design*, 30(10):4200–4210, 2009.
- [14] A Karakalas, T Machairas, A Solomou, V Riziotis, and D Saravanos. Design and simulation of morphing airfoil sections with sma actuators for wind turbine rotors.
- [15] A Karakalas, T Machairas, A Solomou, V Riziotis, and D Saravanos. Development of sma actuated morphing airfoil for wind turbine load alleviation.
- [16] Taeseong Kim, Anders M Hansen, and Kim Branner. Development of an anisotropic beam finite element for composite wind turbine blades in multibody system. *Renewable Energy*, 59:172–183, 2013.
- [17] Lucas I Lago, Fernando L Ponta, and Alejandro D Otero. Analysis of alternative adaptive geometrical configurations for the nrel-5 mw wind turbine blade. *Renewable Energy*, 59:13–22, 2013.
- [18] D Manolas. *Development of simulation tools for the integrated analysis of offshore wind turbines*. PhD thesis, School of Mechanical Engineering, 2015.
- [19] D Manolas, V Riziotis, and S Voutsinas. Assessment of 3d aerodynamic effects on the behaviour of floating wind turbines. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 555, page 012067. IOP Publishing, 2014.
- [20] Thomas Henry Gordon Megson. *Aircraft structures for engineering students*. Elsevier, 2012.
- [21] Eduard Muljadi, K Pierce, and P Migliore. Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines. In *American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998*, volume 3, page 1710–1714. IEEE, 1998.
- [22] Wojciech Popko, Fabian Vorpahl, Adam Zuga, Martin Kohlmeier, Jason Jonkman, Amy Robertson, Torben J Larsen, Anders Yde, Kristian Sætertrø, Knut M Okstad, et al. Offshore code comparison collaboration continuation (oc4), phase 1-results of coupled simulations of an offshore wind turbine with jacket support structure. In *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.
- [23] Christopher Provatidis. *Ανάλυση Μηχανολογικών Κατασκευών - II Πρόχειρες Σημειώσεις*. 2004.
- [24] Deepak S Ramrakhyani, George A Lesieutre, Mary I Frecker, and Smita Bharti. Aircraft structural morphing using tendon-actuated compliant cellular trusses. *Journal of aircraft*, 42(6):1614–1620, 2005.
- [25] Amy Robertson, Jason Jonkman, Fabian Vorpahl, Wojciech Popko, Jacob Qvist, Lars Frøyd, Xiaohong Chen, José Azcona, Emre Uzunoglu, Carlos Guedes Soares, et al. Offshore code comparison collaboration continuation within iea wind task

- 30: Phase ii results regarding a floating semisubmersible wind system. In *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, page V09BT09A012–V09BT09A012. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [26] Alessandro Spadoni, Massimo Ruzzene, and Fabrizio Scarpa. Dynamic response of chiral truss-core assemblies. *Journal of intelligent material systems and structures*, 17(11):941–952, 2006.
- [27] A. Staino, B. Basu, and S.R.K. Nielsen. Actuator control of edgewise vibrations in wind turbine blades. *Journal of Sound and Vibration*, 331:1233–1256, 2012.
- [28] S. Voutsinas. *Μη μόνιμη Αεροδυναμική, Αεροελαστικότητα, Αεροακουστική Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*.
- [29] Wenbin Yu and Dewey H Hodges. Generalized timoshenko theory of the variational asymptotic beam sectional analysis. *Journal of the American Helicopter Society*, 50(1):46–55, 2005.
- [30] Wenbin Yu, Dewey H Hodges, Vitali Volovoi, and Carlos ES Cesnik. On timoshenko-like modeling of initially curved and twisted composite beams. *International Journal of Solids and Structures*, 39(19):5101–5121, 2002.