



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης



### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Τίτλος: Μελέτη αντοχής και καταπόνησης μικρών ανεμογεννητριών

Επιμέλεια: Σαριβουγιούκα Γεωργία, ΑΜ:2011010118

Επιβλέπων: Καθ. Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης

Χανιά, Νοέμβριος 2019

# **Περιεχόμενα**

**Ευχαριστίες**

**Περίληψη**

**Εισαγωγή**

**Κεφάλαιο 1-**Η κατάσταση των αιολικών πάρκων

1.1-Η κατάσταση στην Ελλάδα

1.2-Η κατάσταση στον κόσμο

**Κεφάλαιο 2-** Αιολικά Συστήματα

2.1- Δομή του Αιολικού Συστήματος

2.2-Λειτουργία του Αιολικού Συστήματος

2.3-Οφέλη των Αιολικών Συστημάτων

**Κεφάλαιο 3-** Ιδιομορφική ανάλυση

3.1- Ορισμοί

3.2-Μαθηματικό Υπόβαθρο πολύβαθμου δυναμικού συστήματος

**Κεφάλαιο 4-**Διαδικασία Μελέτης Συχνοτήτων και Δυναμικής Απόκρισης

4.1-Λογισμικό

4.2-Μοντέλο

4.3-Υλικά

4.4-Βήματα Ανάλυσης Ιδιοσυχνοτήτων

4.5-Βήματα Δυναμικής Ανάλυσης

**Κεφάλαιο 5-**Αποτελέσματα Μελέτης Ανάλυσης Συχνοτήτων και Δυναμικής Απόκρισης

5.1-Κατασκευή πλέγματος

5.2-Διαμόρφωση Α

5.3-Διαμόρφωση Β

**Συμπεράσματα**

**Βιβλιογραφία**

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης για την πολύτιμη βοήθειά του, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του Δρ Γεωργίου Ταϊρίδη, διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, αλλά και του υποψήφιου διδάκτορα κ. Παναγιώτη Κουτσιανίτη οι οποίοι ήταν πάντα διαθέσιμοι να με βοηθήσουν υπομονετικά και να με καθοδηγήσουν ώστε να ξεπεράσω όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα. Τους ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, καθώς την οικογένεια μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να αναδείξει την επιρροή των φυσικών δυναμικών χαρακτηριστικών (ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές) μιας κατασκευής στον σχεδιασμό της. Για τον σκοπό αυτό μελετάται μια τυπική ανεμογεννήτρια. Η μελέτη των χαρακτηριστικών αυτών είναι μείζονος σημασίας για το υπό εξέταση σύστημα (κατασκευή), καθώς και τα δυο είναι χρήσιμα για την κατασκευή ενός κατάλληλου συστήματος ελέγχου. Επίσης, οι ιδιοσυχνότητες μας πληροφορούν για τα σημεία μέγιστης απορρόφησης ενέργειας του συστήματός και ως εκ τούτου αποτελούν την πρώτη σημαντική ιδιότητα. Αντίστοιχα, οι ιδιομορφές μας πληροφορούν για τη συσχέτιση μεταξύ της παραμόρφωσης της κατασκευής και της κατανομής της διεγείρουσας δύναμης που αυτή δέχεται. Στην παρούσα εργασία, τα παραπάνω χαρακτηριστικά μελετώνται για τα φτερά της ανεμογεννήτριας, καθώς εκεί υπάρχει και η μεγαλύτερη συγκέντρωση δυνάμεων και συνεπώς η μεγαλύτερη καταπόνηση της κατασκευής. Η ανάλυση γίνεται με χρήση του προγράμματος SolidWorks.

## **Abstract**

This diploma thesis aims at highlighting the influence of the natural dynamic characteristics (eigenfrequencies and eigenmodes) on the design of a structure. For this purpose, a typical wind turbine is being studied. The study of these features is of major importance for the system under consideration, as both are useful for the construction of a suitable control system. Moreover, the eigenfrequencies provide information about the maximum energy absorption points of the system and therefore they are the first important property. Correspondingly, the correlation between the deformation of the structure and the distribution of the exciting force which receives is given by the eigenmodes. In the present study, the above features are studied for the blades of the wind turbine, as in this area there is a higher concentration of forces and stresses. The analysis is performed by using the SolidWorks software.

## Εισαγωγή

Η εκμετάλλευση του ανέμου ξεκίνησε πριν από χιλιάδες χρόνια. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι έκαναν την εμφάνισή τους στη μέση ανατολή γύρω στο 10<sup>ο</sup> αιώνα και από το 1940 άρχισαν οι πρώτες προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις αρχές της δεκαετίας του '70 με τη πρώτη πετρελαϊκή κρίση, δόθηκε μεγάλη σημασία στην αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα τη σταδιακή ανάπτυξη ενός αξιόπιστου και συνεπούς συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών, που λειτουργούσε βέβαια σαν στήριγμα. Με τη βοήθεια της έρευνας και της τεχνολογίας οι ανεμογεννήτριες ξεκίνησαν το 1980 από παροχή 50 KW και κατέληξαν 10 χρόνια αργότερα σε μετατροπείς ισχύος 500 έως 1000 KW. Με τη συνεχή βελτίωση των υλικών, της σχεδίασης της κατασκευής και του ηλεκτρικού ελέγχου, πάρα μεγάλων ανεμογεννητριών με υψηλό δυναμικό ανέμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με πολύ χαμηλό κόστος.

Ωστόσο, όλες οι κατασκευές υποφέρουν από βλάβες και φθορές, ορισμένες φορές μάλιστα πολύ σημαντικές, και φυσικά οι ανεμογεννήτριες δεν θα μπορούσαν να αποτελούν εξαίρεση. Τόσο ο πύργος, όσο και τα πτερύγια, οι σύνδεσμοι και πολλά άλλα μέρη των κατασκευών αυτών υποφέρουν από φαινόμενα κόπωσης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους και οι συνακόλουθες βλάβες επιβαρύνουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας της συνολικής εγκατάστασης. Για αυτόν το λόγο, αναζητούνται τρόποι πρόβλεψης τέτοιων πιθανών αστοχιών μέσω του κατάλληλου αρχικού σχεδιασμού. Ένα χρήσιμο εργαλείο σε αυτήν την κατεύθυνση, όπως θα δούμε παρακάτω αποτελεί και η ιδιομορφική ανάλυση, δηλαδή η ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών της κατασκευής.

## Κεφάλαιο 1

### Η κατάσταση των αιολικών πάρκων

#### 1.1 Η κατάσταση στη Ελλάδα

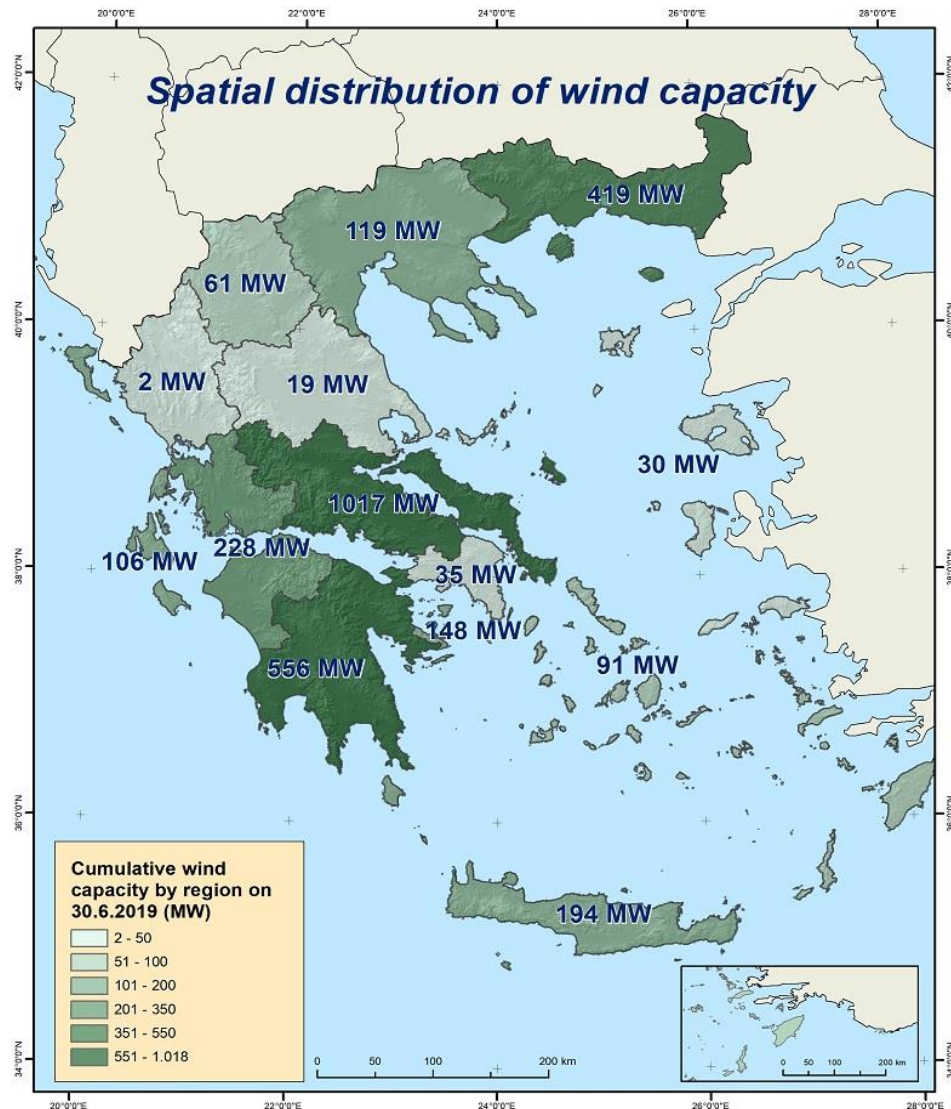
Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα εκτιμάται σε 11000 MW για ταχύτητες ανέμου πάνω από 6 m/s. Μέχρι το 2003 έχουν εγκατασταθεί στην Ελλάδα 37 MW από τη ΔΕΗ και 338 MW από άλλους φορείς. Στα Ελληνικά νησιά του Αιγαίου, την Κρήτη και την Ανατολική Στερεά Ελλάδα (με επίκεντρο την Εύβοια) με μέσες ταχύτητες ανέμου 6 έως 7 m/s, το κόστος παραγόμενης ενέργειας είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό και υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές της αιολικής ενέργειας. Η συνολική ισχύς των ανεμογεννητριών των έργων που έχουν προταθεί στα πλαίσια εθνικών αναπτυξιακών προγραμμάτων, για παράδειγμα το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας (ΕΠΕ) του Υπουργείου Ανάπτυξης και τη Ρυθμιστή Αρχή Ενέργειας (ΡΕΑ) είναι της τάξεως των 100 MW[1].

Η πρώτη εγκατάσταση ανεμογεννήτριας στην Ελλάδα έγινε από τη ΔΕΗ το 1983 στη Μύκονο. Το πρώτο ιδιωτικό πάρκο δημιουργήθηκε στη Κρήτη, συγκεκριμένα στο Μετόχι Σητείας και λειτουργεί από το 1988, με συνολική ισχύ 10,2 MW καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες 10.000 νοικοκυριών. Το αιολικό δυναμικό στα νησιά του Αιγαίου (με ταχύτητες ανέμου 8-11 m/s) και της Ανατολικής Πελοποννήσου (για παράδειγμα, μέση ταχύτητα ανέμου στη Λακωνία 9 m/s), της Εύβοιας (με μέση ταχύτητα ανέμου 8-9 m/s) και της Ανατολικής Αττικής (6 m/s) είναι ικανό να επιτρέψει τη μεγαλύτερη διείσδυση του τρόπου αυτού στη παραγωγή ενέργειας. Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.[7]

Περιοχή	Ταχύτητα (m/s)	Περιοχή	Ταχύτητα (m/s)	Περιοχή	Ταχύτητα (m/s)
Αθήνα	2,8	Κόνιτσα	-	Πύργος	2,3
Αλιάρτας	1,7	Κόρινθος	2,5	Ρέθυμνο	2,8
Αραξος	2,7	Κύθηρα	4,9	Ρόδος	4,3
Αργαστόλι	2,9	Λαμία	1,8	Σάμος	4,6
Άρτα	4,1	Λάρισα	1,2	Σέρρες	2,0
Ηράκλειο	3,5	Αθήνας	5,5	Σητεία	3,4
Θεσσαλονίκη	1,9	Μεθώνη	5,0	Σκύρος	5,6
Ιεράπετρα	3,8	Μήλος	4,8	Σούδα	2,9
Ιωάννινα	0,9	Μυτιλήνη	4,1	Σύρος	4,9
Καλαμάτα	1,5	Νάξος	6,4	Τυμπάσο	2,5
Κέρκυρα	1,7	Πάρος	3,4	Χανιά	2,4
Κομοτηνή	2,9	Πάτρα	2,1	Χίος	4,0

Σχήμα 1.1: Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στα 10m σε Ελληνικές περιοχές.

Ο χάρτης με την γεωγραφική κατανομή της αιολικής ισχύος κατά το Α' εξάμηνο του 2019 παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Χάρτης με την γεωγραφική κατανομή της αιολικής ισχύος κατά το Α' εξάμηνο του 2019[3].

## **1.2Η κατάσταση στον κόσμο**

Τη δεκαετία του 2000, η αιολική ενέργεια παρουσίασε τους υψηλότερους ρυθμούς ανάπτυξης σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Είναι εντυπωσιακό ότι μόνο το 2009 εγκαταστάθηκαν συνολικά 37,5 GW σε όλο τον κόσμο, φτάνοντας τα 158 GW, υπήρξε δηλαδή αύξηση 31% σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Μόνο το 2009, η συνολικά εγκαταστημένη ισχύς στην Ευρώπη έφτασε τα 76 GW εκ των οποίων τα 10 GW ήταν οι νέες εγκαταστάσεις, αύξηση δηλαδή 15% μέσα σε ένα έτος. Την ίδια χρονιά, στην Ευρωπαϊκή Ένωση η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 74.000 MW, στις ΗΠΑ 10 GW σύμφωνα με τα στοιχεία της AWEA (American Wind Energy Association)[5]. Τέλος η Κίνα κατέχει το 1/3 νέων αιολικών συστημάτων για το έτος 2009, προσπαθώντας να ενισχύσει περισσότερο την ανάπτυξή της, να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και να αξιοποιήσει το αιολικό της δυναμικό. Σύμφωνα με την EWEA (European Wind Energy Association)[6], για τη δεκαετία του 2020 εκτιμάται ρυθμός αύξησης 9,1% ,

εγκατάσταση 180 GW (δηλαδή 425 TWh), κόστος 101 δις. Ευρώ, δημιουργία 380.000 θέσεων εργασίας και περιορισμός εκπομπών ρύπων (236 εκατ. τόνους διοξειδίου του άνθρακα).

Σχεδόν μία δεκαετία αργότερα (μέχρι τα τέλη του 2018), η συνολική δυναμική των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών παγκοσμίως έφτασε τα 600 GW σύμφωνα με τη WWEA (World Wind Energy Association)[4]. Το 2017 προσδέθηκαν 52.552 MW με ρυθμό αύξησης 10,8% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, ενώ κατά το 2018 προστέθηκαν 53.900 MW , όμως με ρυθμό αύξησης νέων εγκαταστάσεων 9,8%. Οι ανεμογεννήτριες έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν το 6% της παγκόσμιας ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Κατά το 2018 οι αγορές στη Ευρώπη σημείωσαν πτώση, όμως παρατηρήθηκε έντονη ανάπτυξη σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, η Βραζιλία πολλές άλλες χώρες της Ασίας καθώς και ορισμένες αφρικανικές. Η Κίνα εγκατέστησε δυναμικότητα 25,9 GW και έτσι είναι η πρώτη χώρα με εγκατεστημένη αιολική ισχύ 221 GW. Τέλος, οι ΗΠΑ σημείωσε αύξηση από 6,7 GW (για το έτος 2017) σε 7,6 GW (για το έτος 2018), αύξηση που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην υποστήριξη της βιομηχανίας σε πολιτειακό και δημοτικό επίπεδο. Οι ΗΠΑ είναι η δεύτερη χώρα μετά τη Κίνα που ξεπερνά τα 100 GW εγκατεστημένης ισχύος.[3]



## **Κεφάλαιο 2**

### **Αιολικά συστήματα**

#### **2.1 Δομή Αιολικού Συστήματος**

Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα:

- Είναι άφθονος
- Είναι ανεξάντλητος
- Δεν μολύνει

Έχει όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα. Είναι μεταβλητός. Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της παραγόμενης ενέργειας απαιτείται ο συνδυασμός της με άλλες πηγές. Οι ανεπτυγμένες ανεμογεννήτριες είναι οριζοντίου άξονα και αποτελούνται από το πύργο στήριξης, τον ανεμοκινητήρα και την άτρακτο, μέσα στην οποία βρίσκονται ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης, η γεννήτρια και το σύστημα σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο. Υπάρχει, επίσης, σύστημα προσανατολισμού στην άτρακτο ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου. Επιπρόσθετα, έχουν κατασκευαστεί κατάλληλα συστήματα ελέγχου και μετατροπείς ισχύος, ώστε όταν η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται εκτός των επιθυμητών ορίων να υπάρχει αυτόματη εκκίνηση ή παύση της ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα 2.1 διακρίνονται τα εξής βασικά στοιχεία σε μια ανεμογεννήτρια:

- Η νασέλα, δηλαδή το κέλυφος που περικλείει όλα τα επιμέρους στοιχεία της ανεμογεννήτριας
- Ο δρομέας, δηλαδή το κινούμενο μέρος της ανεμογεννήτριας, που αποτελείται από τα πτερύγια, τη πλήμνη και τον άξονα
- Το κιβώτιο ταχυτήτων για το πολλαπλασιασμό των στροφών του άξονα
- Η γεννήτρια
- Ο έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων
- Ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου
- Το σύστημα πέδησης
- Το ανεμόμετρο
- Τα ηλεκτρονικά ισχύος με τα συστήματα ελέγχου
- Οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα φίλτρα
- Οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας (ηλεκτρονόμοι προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης παύσης κλπ)
- Ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης (όποτε υπάρχει)
- Ο Πύργος



Σχήμα 2.1: Δομή μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας. [2]

## **2.2 Λειτουργία του Αιολικού Συστήματος**

Αρχικά, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται από το δρομέα σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια, η οποία διοχετεύεται μέσω του άξονα στο ρότορα της γεννήτριας. Μεταξύ του δρομέα και της γεννήτριας παρεμβάλλεται το κιβώτιο ταχυτήτων, που πολλαπλασιάζει τις στροφές του άξονα χαμηλών στροφών. Στο ρότορα, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αποδίδεται στο δίκτυο. Συνήθως παρεμβάλλεται και ένας μετασχηματιστής ανύψωσης προσαρμογής της τάσης σε αυτή του δικτύου. Για την καλύτερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου τόσο για το μηχανικό όσο και το ηλεκτρικό τμήμα. Ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού περιστρέφει την άτρακτο και την έλικα, ώστε το επίπεδο περιστροφής να είναι συνεχώς κάθετο στη κατεύθυνση του ανέμου για να υπάρχει η μέγιστη εκμετάλλευση του ανέμου. Τα πτερύγια παράγουν υψηλές γυροσκοπικές ροπές κατά τον προσανατολισμό με αποτέλεσμα έντονο θόρυβο, υπερβαίνοντας τα τοπικά αποδεκτά όρια ηχορύπανσης. Ο έλεγχος της γωνίας βήματος πραγματοποιείται με ένα σερβομηχανισμό, ο οποίος αλλάζει τη γωνία των πτερυγίων, με σκοπό την ελεγχόμενη εκμετάλλευση της ισχύος σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο της ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου. Τέλος, διατάξεις αντιστάθμισης είναι απαραίτητες για τη διασφάλιση της ομαλής ζεύξης και απόζευξης του συστήματος.[1]

## **2.3 Οφέλη των Αιολικών Συστημάτων**

Με τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κατ' επέκταση των αιολικών συστημάτων στα σύγχρονα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν πολλαπλά οφέλη. Αρχικά, οι ΑΠΕ συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τις συμβατικές και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, είναι η μείωση εκπομπής των βασικών αερίων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ -διοξείδιο του άνθρακα,  $\text{CH}_4$ -μεθάνιο,  $\text{N}_2\text{O}$ -υποξείδιο του αζώτου,  $\text{HFC's}$ -χλωροφθοράνθρακες,  $\text{PFC's}$ -υπερφοριωμένες ενώσεις και  $\text{SF}_6$ -εξαφθοριούχο θείο). Επίσης, σημαντικό είναι η αποκέντρωση του συστήματος ενέργειας λόγω της γεωγραφικής του διασποράς. Πράγμα που προσφέρει ανάσα ανάπτυξης απομακρυσμένων περιοχών μέσω επενδύσεων. Επιπρόσθετα, έχουν χαμηλό κόστος και δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων (βενζίνη, πετρέλαιο κλπ). Τελευταίο και ίσως το πιο σημαντικό όφελος, είναι ότι οι ΑΠΕ ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και πρακτικά θεωρούνται ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, οι οργανικές ύλες, η ροή των ποταμών, ακόμα και τα οικιακά και γεωργικά απορρίμματα είναι πηγές που η παραγωγή τους είναι ανεξάντλητη.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **Ιδιομορφική ανάλυση**

#### **3.1 Ορισμοί**

Με τον όρο ιδιοσυχνότητα εννοείται η συχνότητα εκείνη κατά την οποία το σύστημα απορροφά τη μέγιστη ενέργεια. Το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού. Η ιδιοσυχνότητα συμβολίζεται με  $\omega$  και χαρακτηρίζει την ταλάντωση του συστήματος όταν σε αυτό ασκούνται μόνο συντηρητικές δυνάμεις, δηλαδή το έργο των δυνάμεων αυτών είναι μηδενικό. Η μονάδα μέτρησής της είναι rad/s. Οι ιδιοτιμές υπολογίζονται από τα μητρώα μάζας (M) και τα μητρώα δυσκαμψίας (K), με βάση τον τύπο (για μονοβάθμια συστήματα)  $\omega^2 = K/M$ .

Ιδιομορφή ή ιδιοδιάνυσμα εννοείται ο τρόπος ταλάντωσης του μηχανικού συστήματος. Είναι η έννοια κατά την οποία λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την παραμόρφωση και την μετατόπιση του συστήματος. Η ιδιομορφή συμβολίζεται με  $\varphi_i$  και υπολογίζεται από τον τύπο  $(-\omega^2 M + K)\varphi = 0$ , όπου M είναι το μητρώο μάζας, K είναι το μητρώο δυσκαμψίας,  $\omega$  είναι η ιδιοσυχνότητα και  $\varphi$  είναι οι ιδιομορφές.[8]

#### **3.2 Μαθηματικό Υπόβαθρο Πολυβάθμιων Δυναμικών Συστημάτων**

Οι εξισώσεις ισορροπίας (εξισώσεις κίνησης) ενός πολυβάθμιου δυναμικού συστήματος είναι δυνατόν να παρασταθούν με την μητρική γραφή, συγκεκριμένα ως:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F \quad (1)$$

Όπου:

- M: το μητρώο μάζας
- C: το μητρώο απόσβεσης
- K: το μητρώο δυσκαμψίας
- F: το διάνυσμα εξωτερικής δύναμης
- $x$ : το διάνυσμα μετατοπίσεων
- $\dot{x}$ : το διάνυσμα ταχυτήτων
- $\ddot{x}$ : το διάνυσμα επιταχύνσεων

Τα μητρώα μάζας M και δυσκαμψίας K είναι συμμετρικά. Το μητρώο απόσβεσης C είναι συμμετρικό εάν δεν εμπλέκονται γυροσκοπικά φαινόμενα ή άλλου είδους αλληλεπιδράσεις.

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη Βασική Εξίσωση Δυναμικού Συστήματος πολλών Βαθμών Ελευθερίας. Είναι σχετικά εύκολο να καταλήξουμε σε αυτή την συνοπτική μορφή, αξιοποιώντας την Ενεργειακή Αρχή Lagrange. Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση στην πλέον απλή περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης, προκύπτει:

$$F=0 \quad (2)$$

Η (1) γράφεται:

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = 0 \quad (3)$$

Το εξεταζόμενο πολυβάθμιο δυναμικό σύστημα διαθέτει μηδενική απόσβεση, δηλαδή:

$$C=0 \quad (4)$$

Επομένως η εξίσωση (1) λόγω των (3),(4) γίνεται:

$$M \ddot{x} + Kx = 0 \quad (5)$$

Η παραδοχή ότι η απόσβεση είναι μηδενική (εξίσωση (4)) είναι συντηρητική, υπό την έννοια ότι η προκύπτουσα απόκριση του συστήματος θα είναι δυσμενέστερη της πραγματικότητας, όπου πάντα υπάρχει απόσβεση έστω και μικρή.

Η εξίσωση (4) περιγράφει το δυναμικό σύστημα και αποτελεί συνοπτική μορφή της παρακάτω εξίσωσης

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Η παραπάνω εξίσωση (6) περιγράφει ένα σύστημα δυο εξισώσεων με αγνώστους τις ανεξάρτητες κινηματικές μεταβλητές  $x_1$  και  $x_2$  του συστήματος, καθώς και τις παραγώγους αυτών. Για την πρώτη εξίσωση του συστήματος υποθέτουμε μία λύση:

$$x_1(t) = \Phi_1 \cos(\omega t) \quad (7)$$

Και για τη δεύτερη εξίσωση εξίσου υποθέτουμε μία λύση:

$$x_2(t) = \Phi_2 \cos(\omega t) \quad (8)$$

Όπου:

- $x_1$ : η απόκριση της μάζας  $m_1$
- $x_2$ : η απόκριση της μάζας  $m_2$
- $\Phi_1$ : το πλάτος της συγκεκριμένης απόκρισης

- $\Phi_2$ : το πλάτος της συγκεκριμένης απόκρισης
- $\omega$ : η συχνότητα ταλάντωσης του συστήματος (υποθέτουμε ότι είναι ίδια και στις δυο αποκρίσεις)

Η επιλογή της συγκεκριμένης μορφής απόκρισης δεν είναι τυχαία, καθώς διαισθητικά αντιλαμβανόμαστε ότι όταν απομακρύνουμε τις δυο μάζες από τη θέση ισορροπίας, τότε θα εκτελέσουν κάποιο είδος ταλάντωσης. Οι εξισώσεις (7) και (8) περιγράφουν μία τέτοια κίνηση. Οι παραπάνω εξισώσεις σε μητρική μορφή γράφονται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{Bmatrix} \cos(\omega t) \leftrightarrow x(t) = \Phi \cos(\omega t) \quad (9)$$

Όπου:

- $x(t)$ : το διάνυσμα των αποκρίσεων του συστήματος
- $\Phi$ : το διάνυσμα των πλατών των αποκρίσεων
- $\omega$ : η φυσική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) του συστήματος

Επομένως, από τις εξισώσεις (9) και (5) προκύπτει:

$$-\omega^2 M \Phi \cos(\omega t) + K \Phi \cos(\omega t) = 0 \quad (10)$$

$$\Leftrightarrow (-\omega^2 M + K) \Phi \cos(\omega t) = 0 \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow (-\omega^2 M + K) \Phi = 0 \quad (12)$$

Καθώς το χρονικά σταθερό τμήμα της (11) πρέπει να είναι μηδενικό, δηλαδή πρέπει να ισχύει για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , προκύπτει η (12). Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση (6) μπορεί να γραφεί ως και περιγράφει ένα ομογενές σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_1 + (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & -\omega^2 m_2 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Από τη Γραμμική Άλγεβρα, γνωρίζουμε ότι όταν οι εξισώσεις είναι γραμμικώς εξαρτημένες τότε υπάρχει μη-μηδενική λύση και η ορίζουσα του συστήματος είναι μηδενική.

Δηλαδή:

$$\det(-\omega^2 M + K) = 0 \quad (14)$$

Θεωρείται ότι  $\lambda = \omega^2$  και ισοδύναμα προκύπτει

$$\det(-\lambda M + K) = 0 \quad (15)$$

Με βάση την εξίσωση (13) έχουμε:

$$\det \begin{bmatrix} -\lambda m_1 + (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & -\lambda m_2 + k_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

Επιδύοντας την παραπάνω εξίσωση έχω

$$\begin{aligned} & (-\lambda m_1 + (k_1 + k_2))(-\lambda m_2 + k_2) - (-k_2)(-k_2) = 0 \\ & \Leftrightarrow \lambda^2 m_1 m_2 - \lambda m_1 k_2 - \lambda m_2 (k_1 + k_2) + k_2 (k_1 + k_2) - k_2^2 = 0 \\ & \Leftrightarrow \lambda^2 m_1 m_2 - \lambda (m_1 k_2 + m_2 (k_1 + k_2)) + k_2 (k_1 + k_2) - k_2^2 \\ & \Leftrightarrow \lambda^2 + \lambda \left( -\frac{(m_1 k_2 + m_2 (k_1 + k_2))}{m_1 m_2} \right) + \left( \frac{k_2 (k_1 + k_2) - k_2^2}{m_1 m_2} \right) = 0 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \lambda^2 + A_1 \lambda + A_2 = 0 \quad (17)$$

Η παραπάνω εξίσωση, από τη θεωρία της Γραμμικής Αλγεβρας καλείται ‘χαρακτηριστικό πολυώνυμο’ και οι ρίζες του ‘ιδιοτιμές’. Στο δυναμικό σύστημα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (Βαθμοί Ελευθερίας) είναι δύο, άρα το πολυώνυμο είναι δευτέρου βαθμού και έχει δύο ρίζες. Τα μητρώα μάζας Μ και δυσκαμψίας Κ είναι συμμετρικά, θετικά ημι-ορισμένα και αποδεικνύεται ότι τέτοια μητρώα έχουν μη αρνητικές ιδιοτιμές

$$\lambda_i \geq 0$$

Επομένως, στο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό πολυώνυμο προκύπτουν οι ιδιοτιμές

$$\omega_1^2 = \lambda_1 \quad \text{και} \quad \omega_2^2 = \lambda_2$$

Η ανάγκη για μη-μηδενικές λύσεις της εξίσωσης (12) οδηγεί και στην ανάγκη μηδενισμού της ορίζουσας του αντιστοιχού συστήματος (εξίσωση (15)). Επομένως, ένα δυναμικό σύστημα με Ν βαθμούς ελευθερίας, θα έχει Ν ιδιοτιμές (λ) και Ν ιδιοσυχνότητες (ω), οι οποίες όταν αντικατασταθούν στις εξισώσεις θα δώσουν Ν-λύσεις (Φ).[9]

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **Διαδικασία Μελέτης Συχνοτήτων και Δυναμικής Απόκρισης**

Η παρούσα εργασία αφορά στη μελέτη και ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων μιας μικρής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, 3 πτερύγων.

#### **4.1 Λογισμικό**

Το λογισμικό σχεδιασμού και ανάλυσης που χρησιμοποιήσαμε για την μελέτη της ανεμογεννήτριας είναι το SolidWorks 2018, SP3.0 της εταιρείας Dassault Systèmes.

#### **4.2 Μοντέλο**

Το αρχικό τρισδιάστατο μοντέλο λήφθηκε από την ιστοσελίδα <https://grabcad.com/library/wind-turbine-13> [10] σε αρχεία μορφότυπου SLDASM και STEP (Εικ. 4.1, 4.2).

Η κατασκευή αποτελείται από 3 επιμέρους κομμάτια: τον πύργο στήριξης, την άτρακτο/μειωτήρα και την πτερωτή με τις ακόλουθες διαστάσεις.

2 . 09m

Φ2 . 82m

Φ0 . 20m



Εικόνα 4.1 Πρόοψη του μοντέλου ανεμογεννήτριας.





Εικόνα 4.2 Απόψεις του μοντέλου ανεμογεννήτριας.

### 4.3 Υλικά

Η μελέτη επικεντρώνεται στην σύγκριση συμπεριφοράς στο πεδίο των συχνοτήτων δύο διαφορετικών διαμορφώσεων της ανεμογεννήτριας όσον αφορά στα υλικά των κομματιών της. Συγκεκριμένα, για τον πύργο στήριξης και την άτρακτο θα μελετήσουμε δύο τύπους χάλυβα (AISI 316 / AISI 4340) ενώ για τα πτερύγια δύο τύπους σύνθετων υλικών (Υαλοίνες-εποξική ρητίνη / Ανθρακοίνες-εποξική ρητίνη) σε μίγμα 60% ίνες – 40% ρητίνη. Συγκεκριμένα, οι διαμορφώσεις υλικών είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1. Διαμορφώσεις υλικών

Διαμόρφωση	Πύργος Στήριξης	Άτρακτος	Πτερύγια
A	AISI 316	AISI 316	ΥΑΛΟΙΝΑ - ΡΗΤΙΝΗ (60/40)
B	AISI 4340	AISI 4340	ΑΝΘΡΑΚΟΙΝΑ - ΡΗΤΙΝΗ (60/40)

Οι μηχανικές ιδιότητες των τύπων χάλυβα που απαιτούνται για την ανάλυση συχνοτήτων δίνονται στον Πιν.4.2 και έχουν ληφθεί από την βιβλιοθήκη υλικών του λογισμικού.

Πίνακας 4.2. Τυπικές μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιούμενων τύπων χάλυβα.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	AISI 316	AISI 4340	MON.
Elastic Modulus	$1.929999974 \times 10^{11}$	$2.05 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.27	0.32	N/A
Mass Density	8000.000133	7850	kg/m <sup>3</sup>

Όσον αφορά στα δύο σύνθετα υλικά, δεν υπάρχουν έτοιμα προς χρήση στην βιβλιοθήκη του λογισμικού, οπότε οι μηχανικές τους ιδιότητες θα υπολογιστούν με βάση των κανόνα μιγμάτων, σύμφωνα με τις επιμέρους τυπικές τιμές ιδιοτήτων των υαλοινών, ανθρακοινών και εποξικής ρητίνης (βλ. Πιν. 4.3).

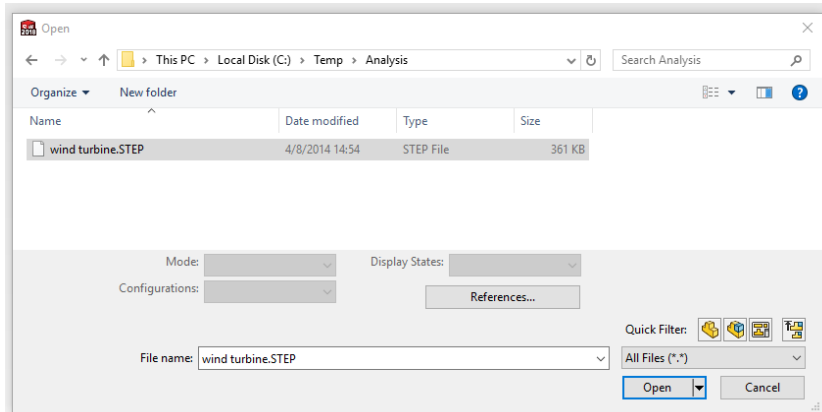
Πίνακας 4.3 Τυπικές μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιούμενων υαλοινών, ανθρακοινών, εποξ. ρητίνης και των αντίστοιχων σύνθετων υλικών.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΥΑΛΟΙΝΑ (E-Glass)	ΑΝΘΡΑΚΟΙΝΑ	ΕΠΟΞΙΚΗ ΡΥΤΙΝΗ	ΥΑΛΟΙΝΑ - ΡΥΤΙΝΗ (60/40)	ΑΝΘΡΑΚΟΙΝΑ - ΡΥΤΙΝΗ (60/40)	MON.
Elastic Modulus	$8.0 \times 10^{10}$	$3.5 \times 10^{11}$	$2.415 \times 10^9$	$4.90 \times 10^{10}$	$2.11 \times 10^{11}$	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.22	0.30	0.35	0.27	0.32	N/A
Mass Density	2540	1770	1100	1964	1502	kg/m <sup>3</sup>

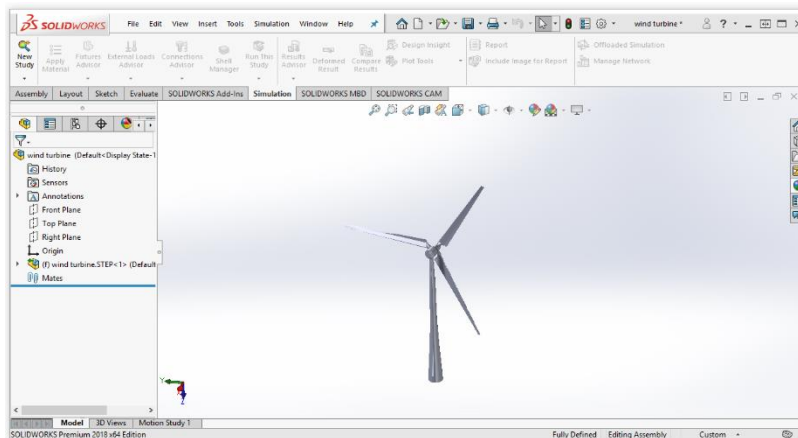
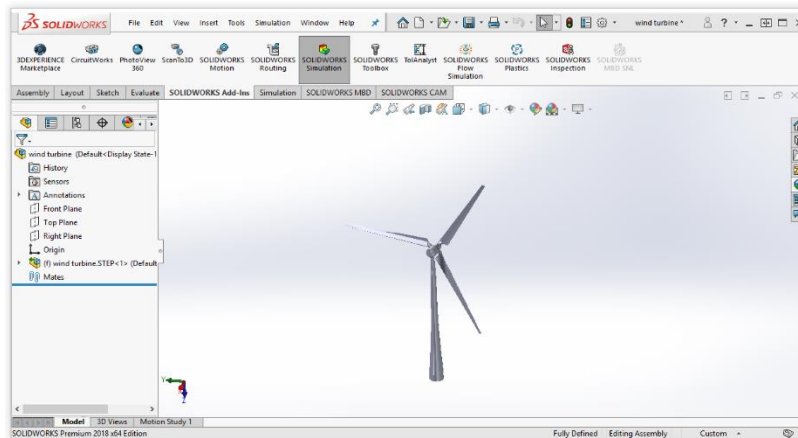
## 4.4 Βήματα Ανάλυσης Ιδιοσυχνοτήτων

Προκειμένου να εκπονήσουμε την ανάλυση συχνοτήτων στο λογισμικό, ακολουθούμε τα επόμενα βήματα:

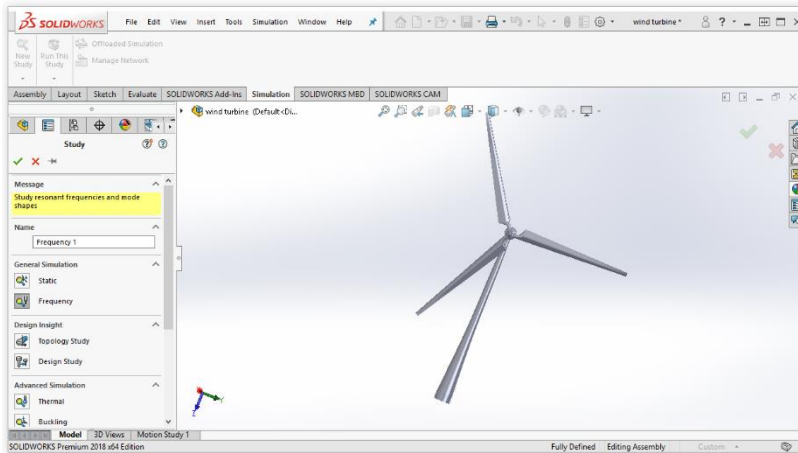
1. Φορτώνουμε στο λογισμικό SOLIDWORKS το αρχείο «wind turbine.STEP» το οποίο είναι σε μορφότυπο step.



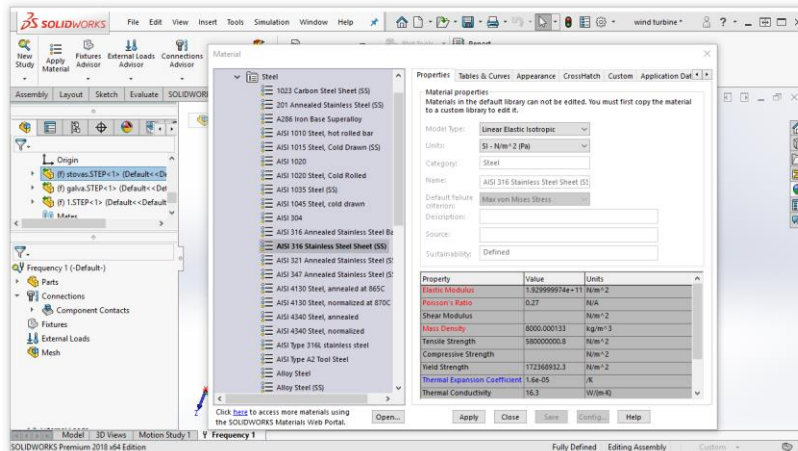
2. Στην καρτέλα «SOLIDWORKS Add-Ins» ενεργοποίηση του SOLIDWORKS Simulation Add-in ώστε να εμφανιστεί η καρτέλα «Simulation» από την οποία επιλέγουμε «New Study»



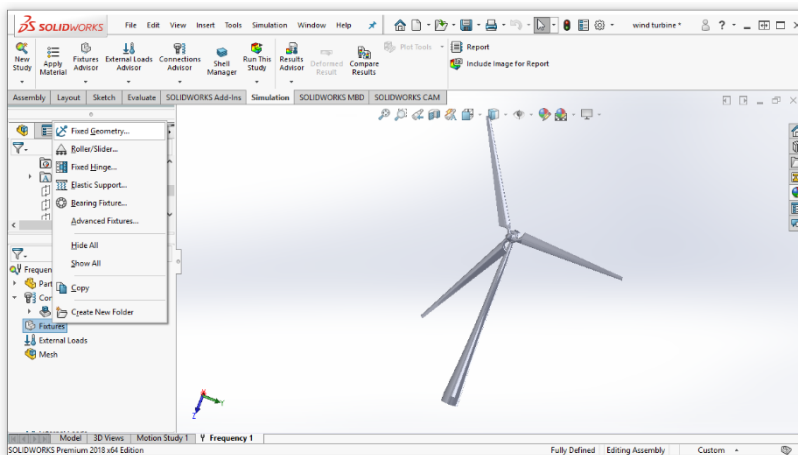
3. Από τις διαθέσιμες αναλύσεις επιλέγουμε «Frequency».

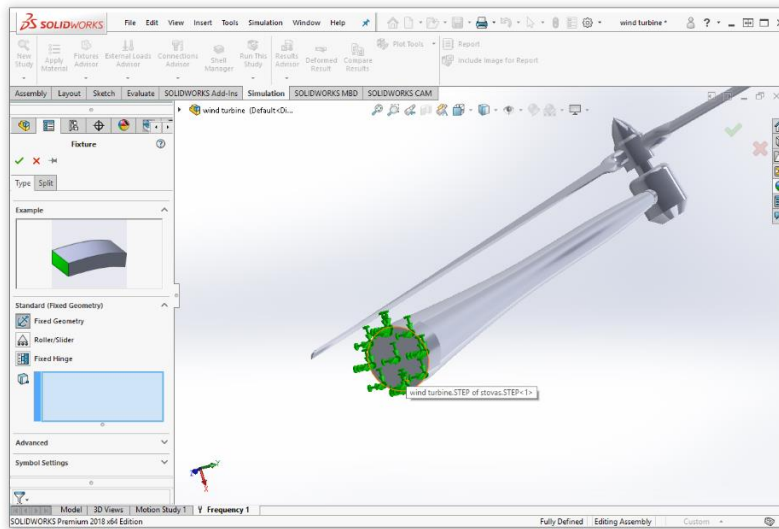


4. Ορισμός υλικού σε κάθε κομμάτι, επιλέγοντάς το από το παράθυρο πλοήγησης και μετά πατώντας στο κουμπί «Apply Material».

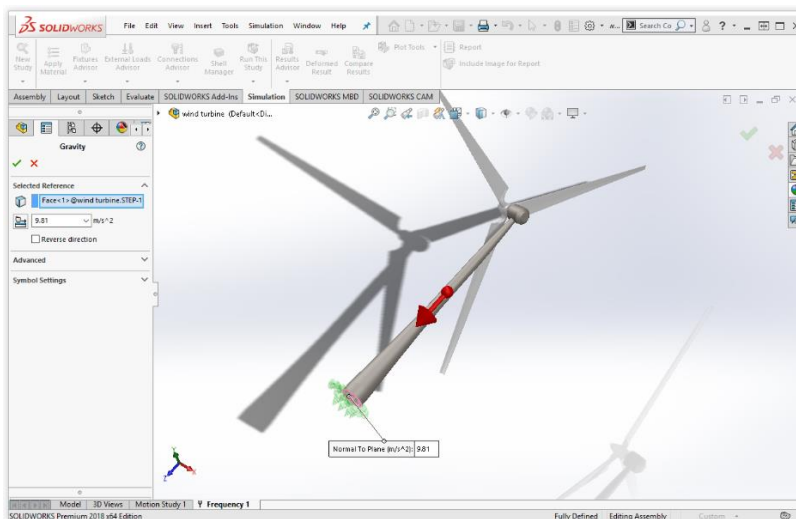
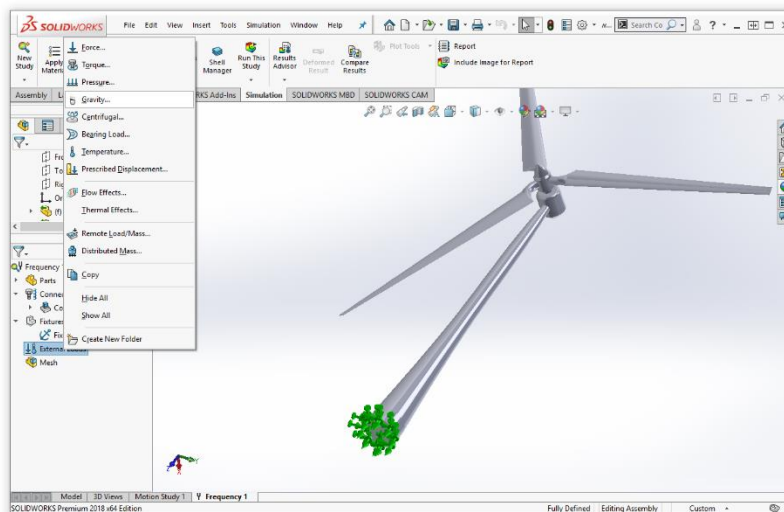


5. Ορισμός των θεμελιώσεων, κάνοντας δεξί κλικ στο «Fixtures» στο παράθυρο πλοήγησης, επιλέγοντας το «Fixed Geometry» και κατόπιν επιλέγοντας την βάση της ανεμογεννήτριας.

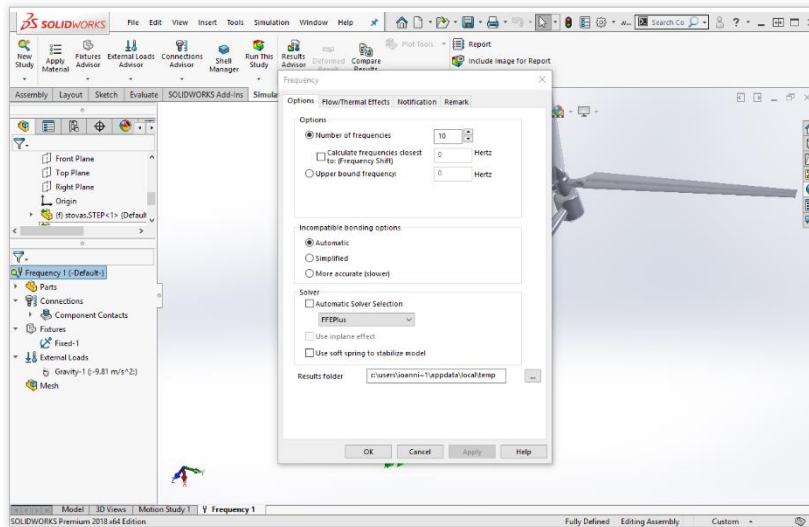




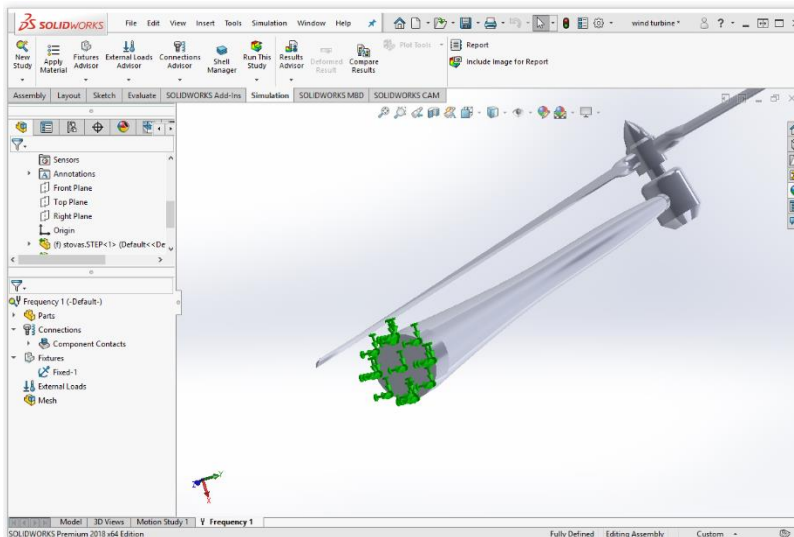
6. Ορισμός της βαρυτικής δύναμης, κάνοντας δεξί κλικ στο «External Loads» στο παράθυρο πλοήγησης, επιλέγοντας το «Gravity» και κατόπιν επιλέγοντας την βάση της ανεμογεννήτριας.



7. Ορισμός του πλήθους των απαιτούμενων ιδιοσυχνοτήτων / ιδιομορφών, κάνοντας κλικ στο «Frequency» >> «Properties» στο παράθυρο πλοήγησης.



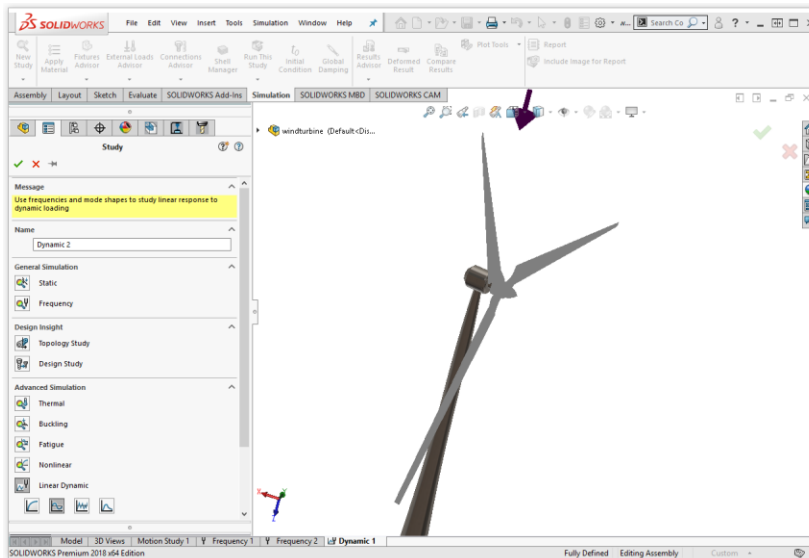
8. Εκτέλεση της ανάλυσης κάνοντας κλικ στο «Run This Study». Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην οθόνη ενώ τα επιπλέον διαγράμματα μπορούν να παραχθούν κάνοντας κλικ στο «Frequency» και επιλέγοντας το ζητούμενο στοιχείο. Το λογισμικό παράγει πρώτα αυτόματα το πλέγμα, του οποίου οι παράμετροι μπορούν να τροποποιηθούν μέσω του «Mesh» στο παράθυρο πλοήγησης.



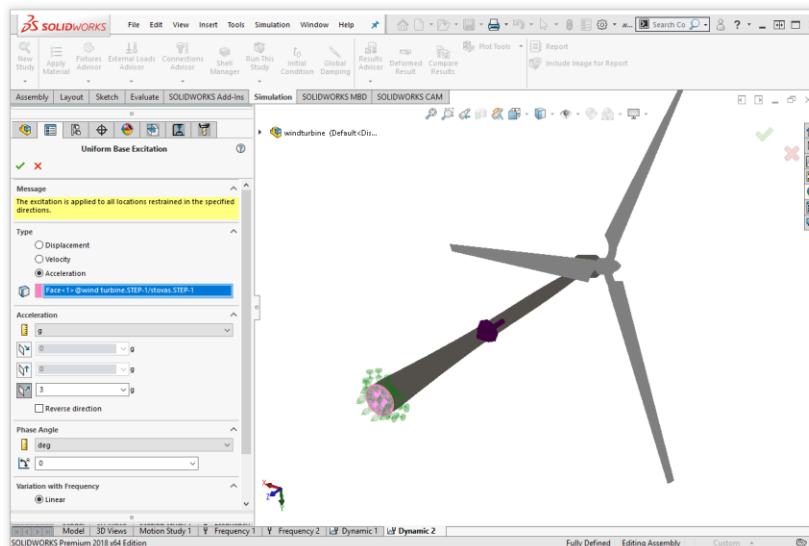
## 4.5 Βήματα Δυναμικής Απόκρισης

Προκειμένου να εκπονήσουμε την δυναμική ανάλυση στο λογισμικό, ακολουθούμε τα παρόμοια βήματα με την ανάλυση συχνοτήτων:

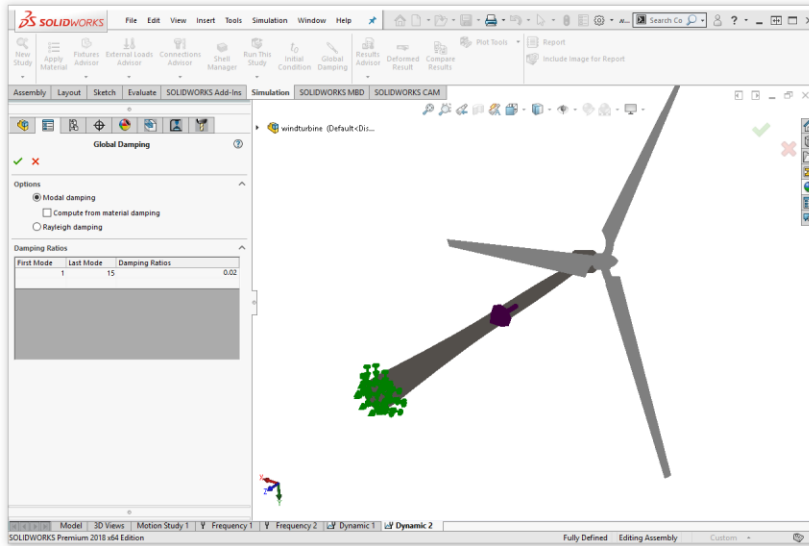
1. Από την καρτέλα «Simulation» οποία επιλέγουμε «New Study» και από τις διαθέσιμες αναλύσεις επιλέγουμε «Linear Dynamic» και μετά το «Harmonic».



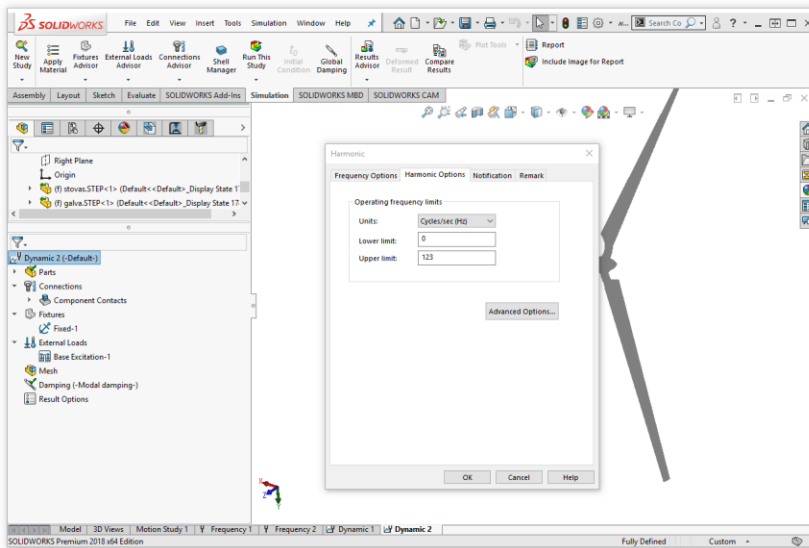
2. Ορισμός υλικών των κομματιών και θεμελιώσεων όπως ανωτέρω.
3. Ορισμός εξωτερικών φορτίων, κάνοντας δεξί κλικ στο «External Loads» και επιλέγοντας το «Uniform Base Excitation» και το «Acceleration» ως τύπο και μετά επιλέγοντας την βάση του πύργου και θέτοντας την τιμή επιτάχυνσης στους άξονες που μας ενδιαφέρουν.



4. Ορισμός απόσβεσης υλικού, κάνοντας δεξί κλικ στο «Damping (-Modal damping-)» και επιλέγοντας το «Edit/Define...» και θέτοντας καθολική τιμή για όλα τα modes.



5. Ορισμός του διαστήματος σάρωσης συχνοτήτων, κάνοντας δεξί κλικ στο «Dynamic», επιλέγοντας «Properties» και ορίζοντας στην καρτέλα «Harmonic Options» τα όρια συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν.



6. Εκτέλεση της ανάλυσης κάνοντας κλικ στο «Run This Study». Τα διαγράμματα μπορούν να παραχθούν κάνοντας κλικ στο «Results» και επιλέγοντας το ζητούμενο στοιχείο.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **Αποτελέσματα Μελέτης Ανάλυσης Συχνοτήτων και Δυναμικής Απόκρισης**

Ακολουθώντας τα βήματα του Κεφ. 4 για τις δύο διαφορετικές διαμορφώσεις υλικών, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

#### **5.1 Κατασκευή πλέγματος**

Το πλέγμα κατασκευάστηκε με στερεά στοιχεία από το λογισμικό και οι λεπτομέρειές του δίνονται στον Πιν. 5.1. Στην Εικ. 5.1 δίνεται μια άποψη του τελικού πλέγματος της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση συχνοτήτων, ενώ στην Εικ. 5.2 δίνεται ο αύξων αριθμών κάποιων κόμβων των οποίων την απόκριση θα εξετάσουμε παρακάτω.

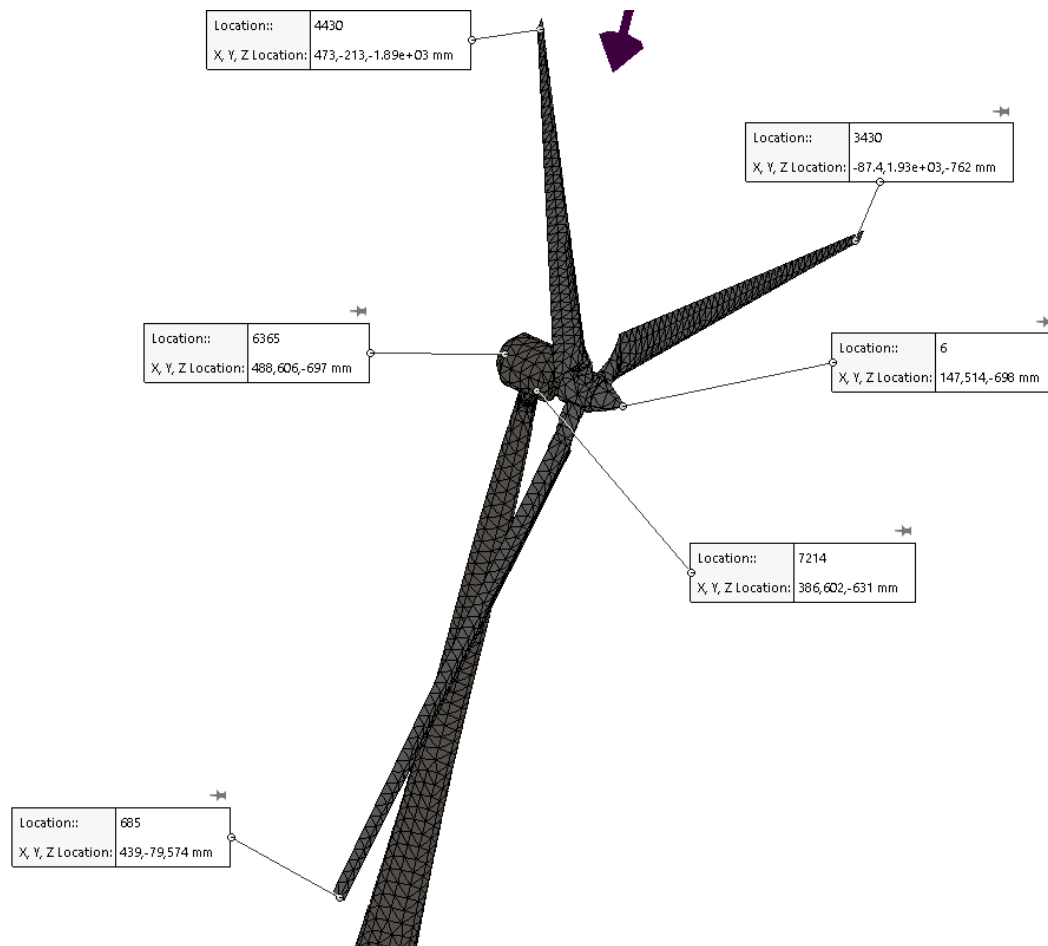


Εικόνα 5.1. Άποψη του τελικού πλέγματος της ανεμογεννήτριας



Πίνακας 5.1 Στοιχεία κατασκευής στερεού πλέγματος ανεμογεννήτριας.

Study name	Frequency 1 (-Default-)
<b>Mesh type</b>	Solid Mesh
<b>Mesher Used</b>	Standard mesh
<b>Automatic Transition</b>	Off
<b>Include Mesh Auto Loops</b>	Off
<b>Jacobian points</b>	4 points
<b>Element size</b>	31.604 mm
<b>Tolerance</b>	1.5802 mm
<b>Mesh quality</b>	High
<b>Total nodes</b>	16391
<b>Total elements</b>	9167
<b>Maximum Aspect Ratio</b>	24.11
<b>Percentage of elements with Aspect Ratio &lt; 3</b>	88.2
<b>Percentage of elements with Aspect Ratio &gt; 10</b>	0.207
<b>% of distorted elements (Jacobian)</b>	0
<b>Remesh failed parts with incompatible mesh</b>	Off
<b>Time to complete mesh(hh:mm:ss)</b>	00:00:05



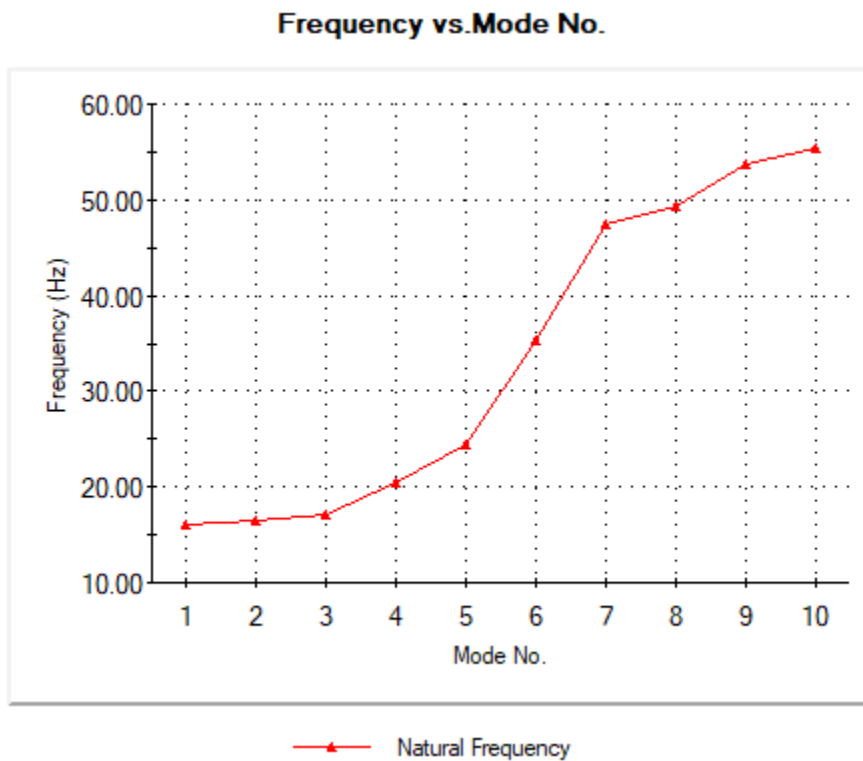
Εικόνα 5.2 Αντιστοίχιση των αριθμών κόμβων του πλέγματος σε σημεία της ανεμογεννήτριας.

## 5.2 Διαμόρφωση Α

Η ανάλυση συχνοτήτων παρήγαγε τα παρακάτω αποτελέσματα:

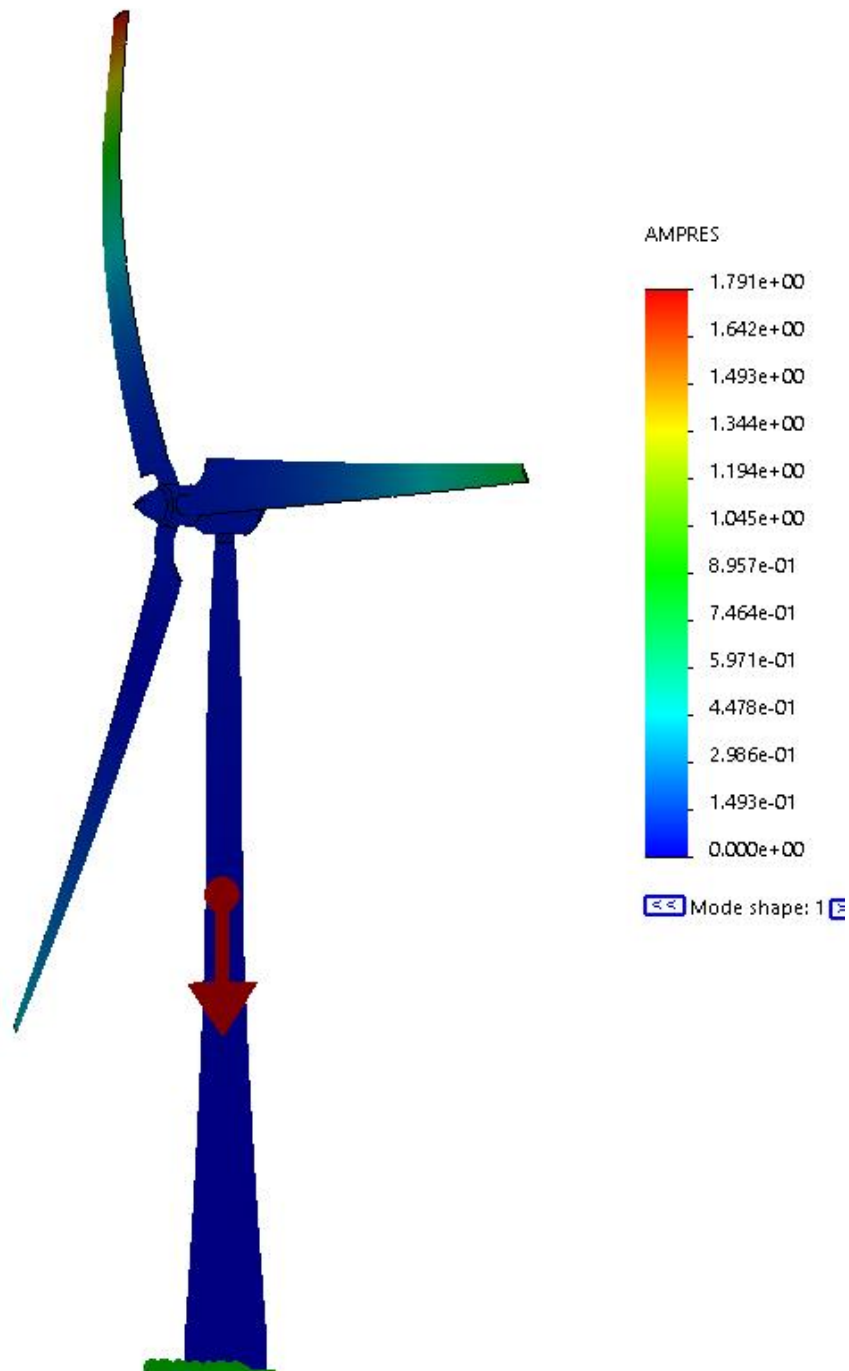
### Ιδιοσυχνότητες

Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	100.51	15.997	0.062512
2	103.71	16.506	0.060585
3	107.56	17.118	0.058418
4	128.34	20.427	0.048956
5	153.95	24.502	0.040813
6	221.95	35.324	0.028309
7	298.41	47.494	0.021056
8	310.4	49.402	0.020242
9	337.61	53.733	0.018611
10	347.66	55.331	0.018073

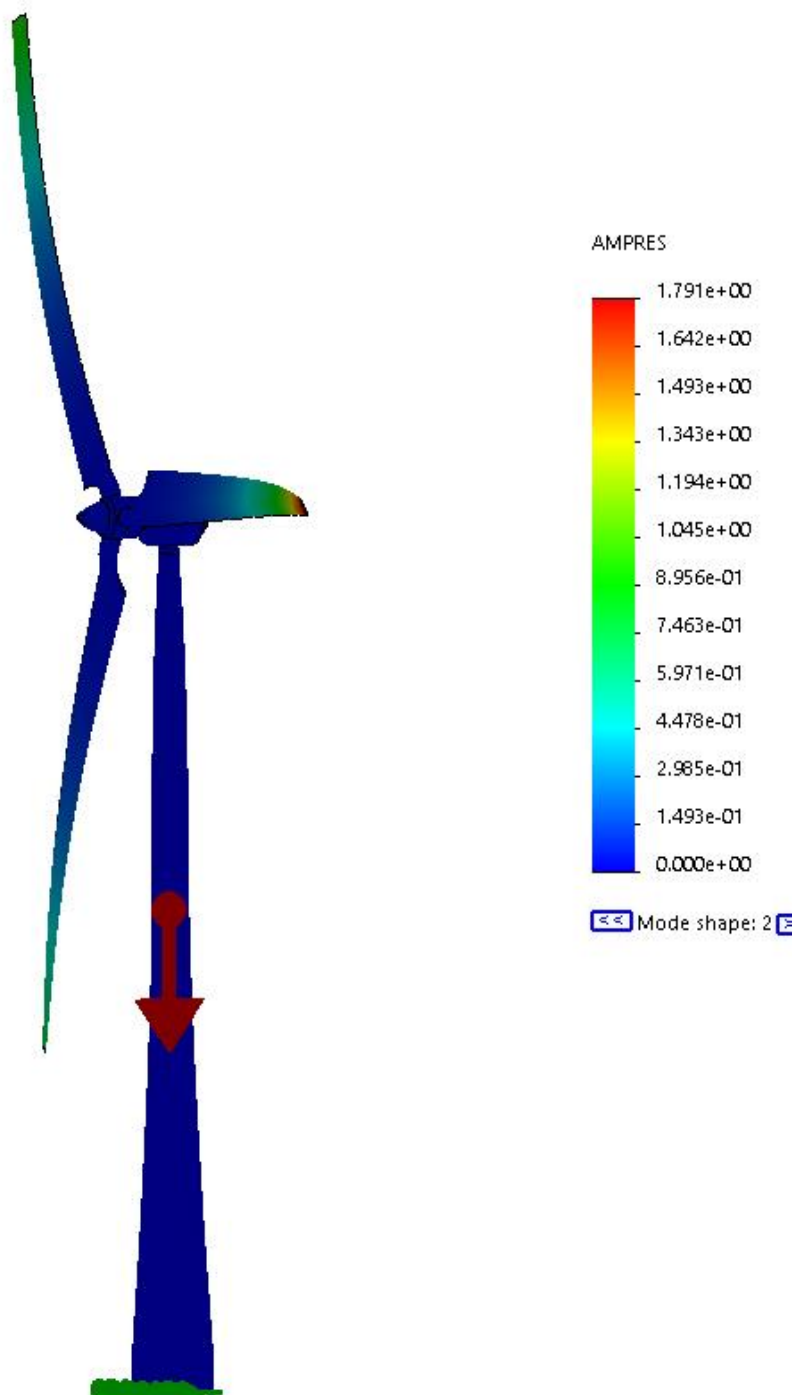


Εικόνα 5.3 Διάγραμμα Ιδιοσυχνοτήτων για τη Διαμόρφωση Α.

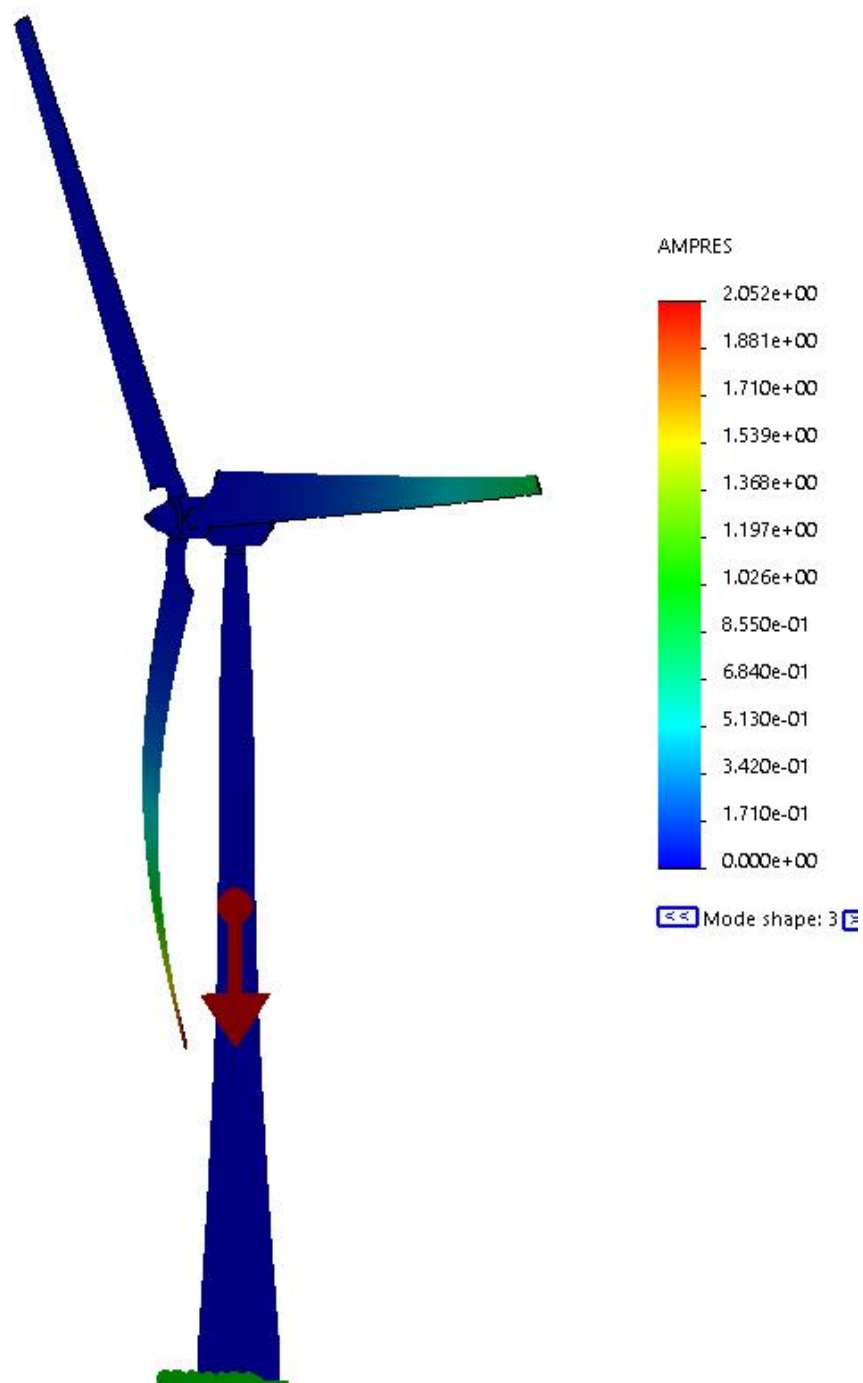
## Ιδιομορφές



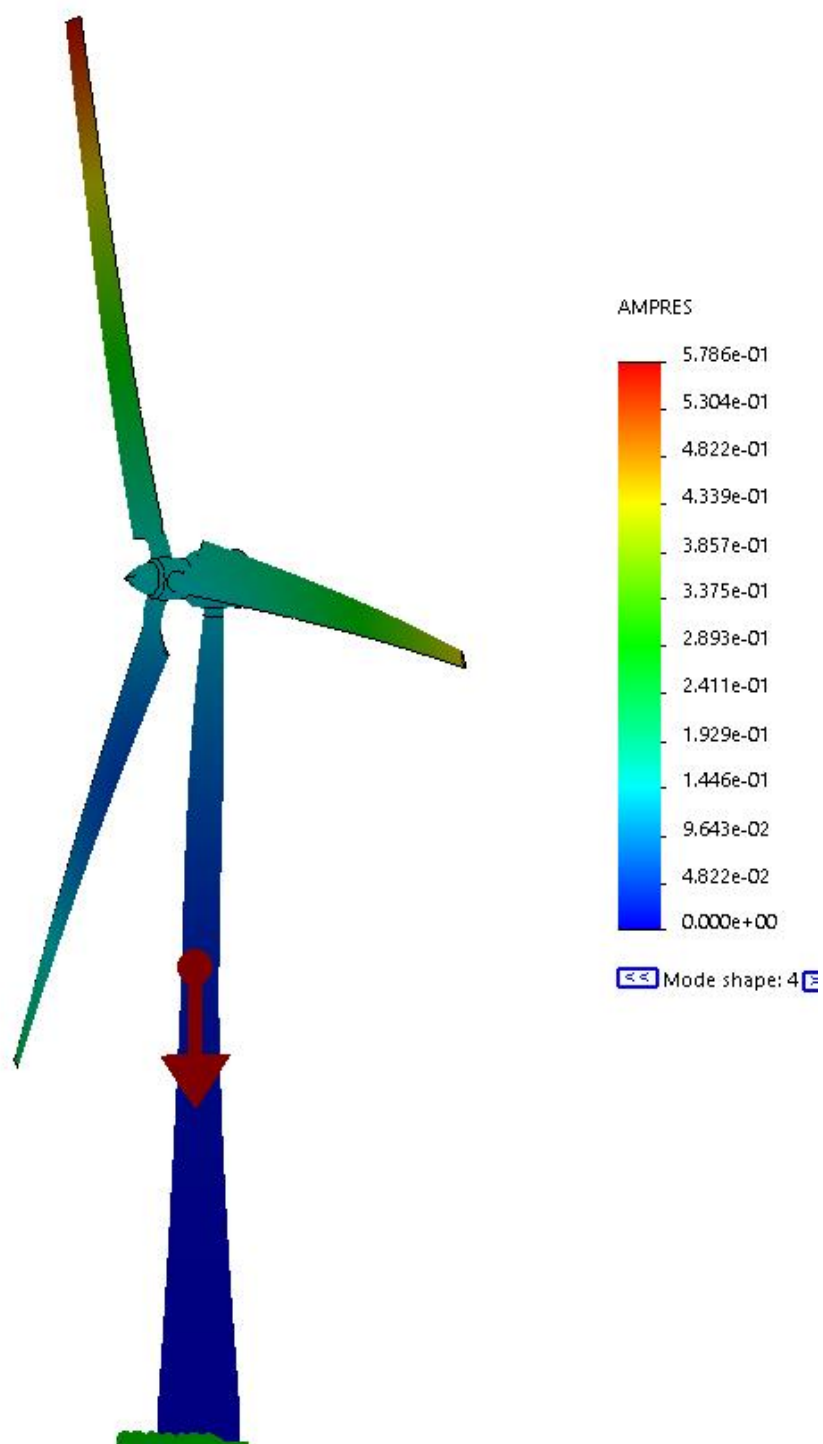
Εικόνα 5.4 Η πρώτη ιδιομορφή της ανεμογεννήτριας για την πρώτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη Διαμόρφωση Α.



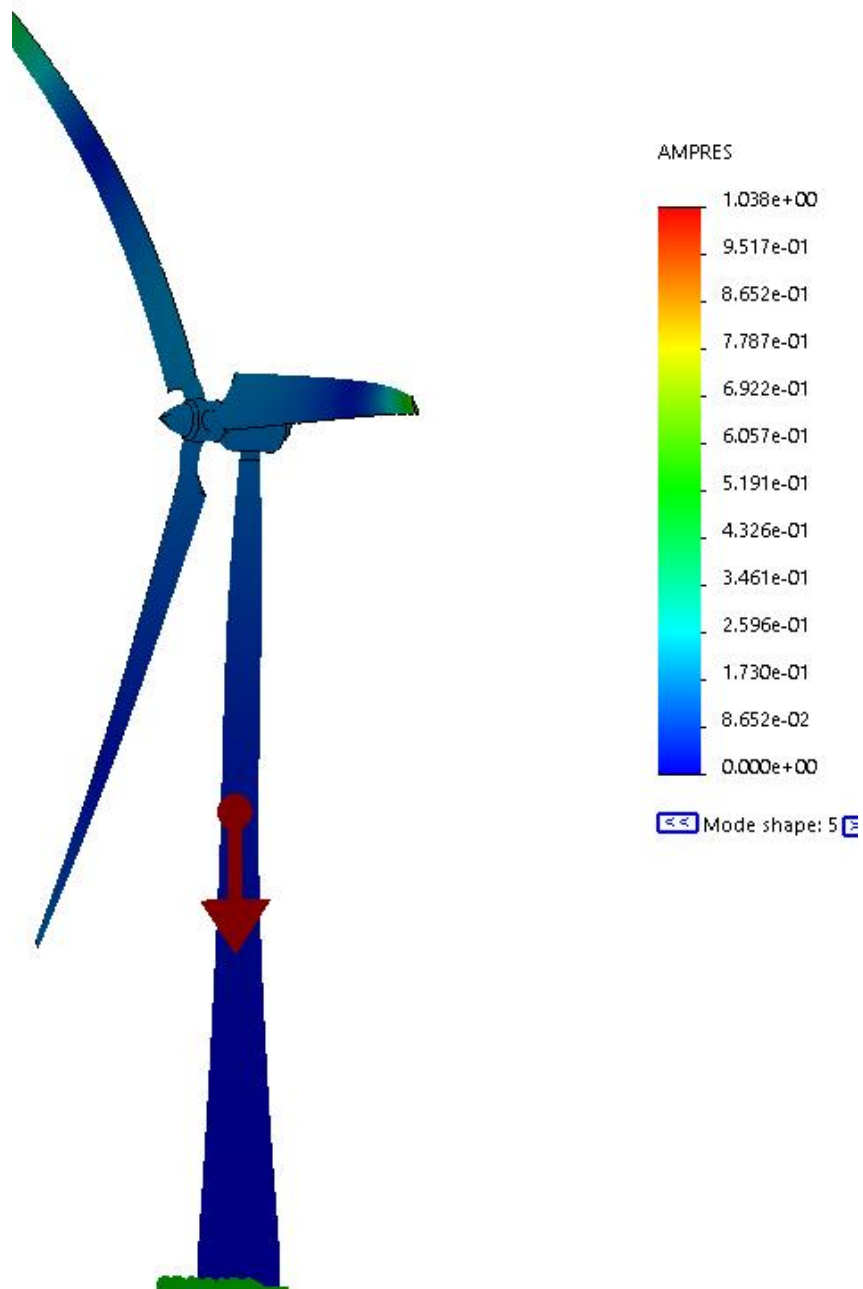
Εικόνα 5.5 Η δεύτερη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.



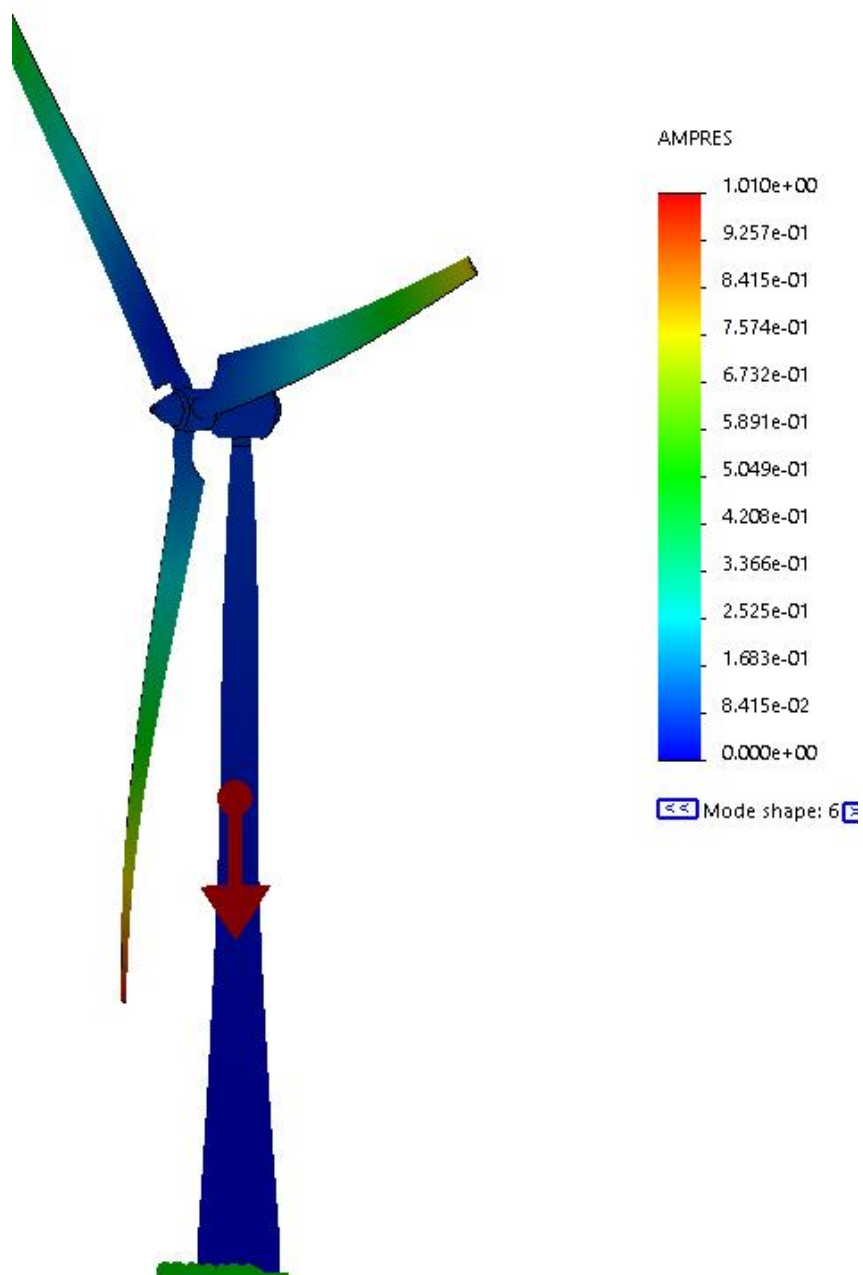
Εικόνα 5.6 Η τρίτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη τρίτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.



Εικόνα 5.7 Η τέταρτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την τέταρτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.

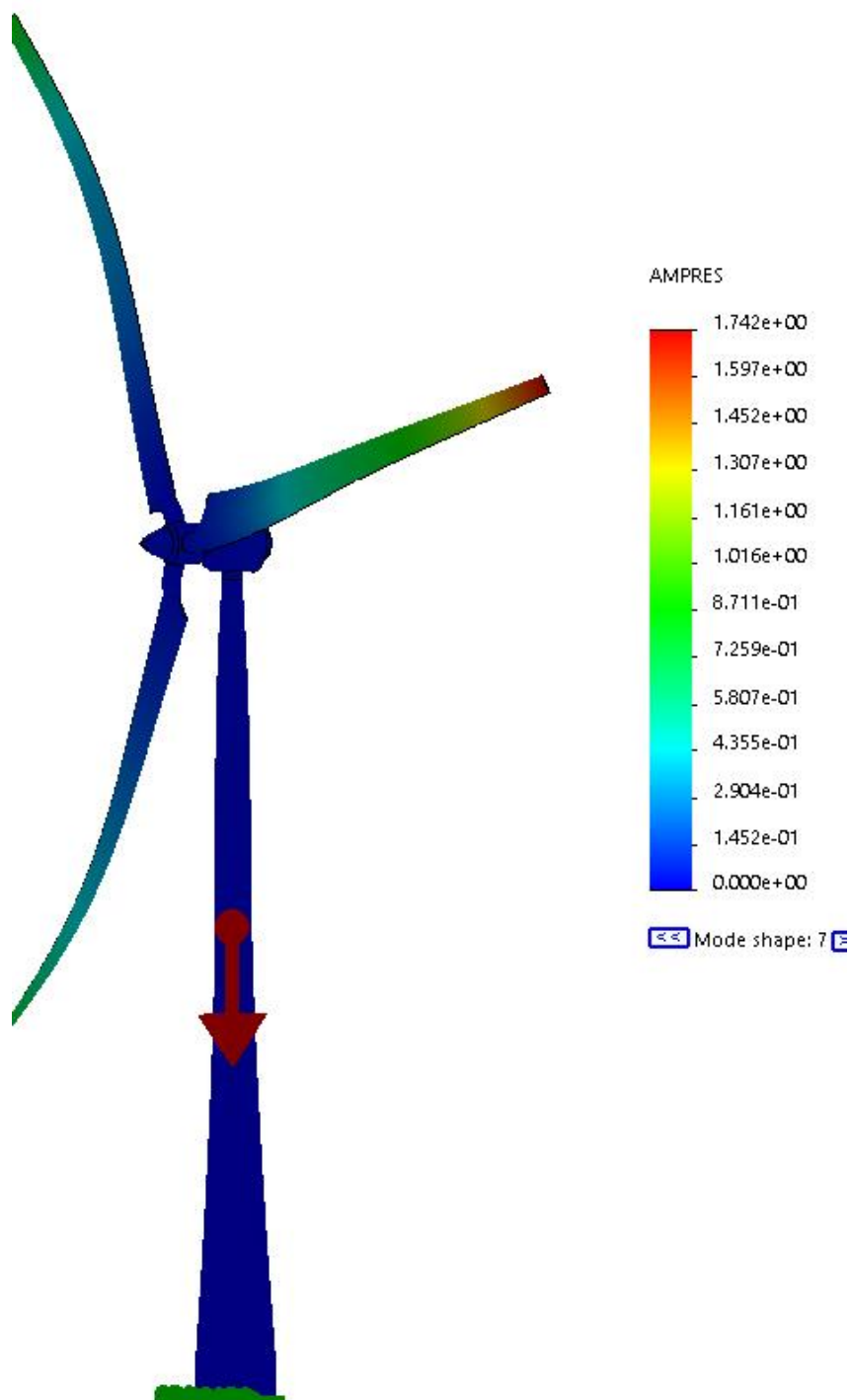


Εικόνα 5.8 Η πέμπτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την πέμπτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμορφωση Α.

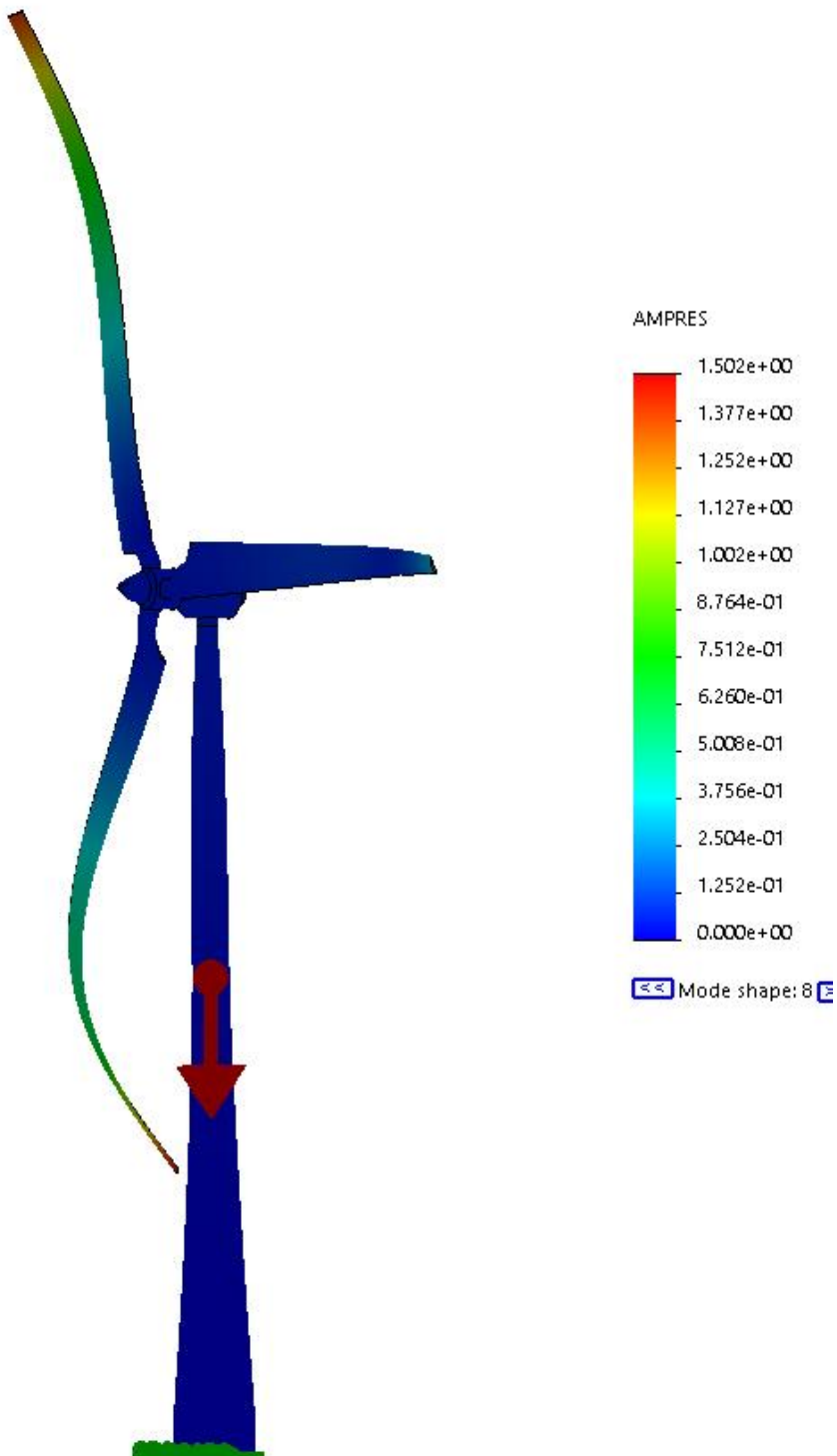


Εικόνα 5.9 Η έκτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την έκτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.

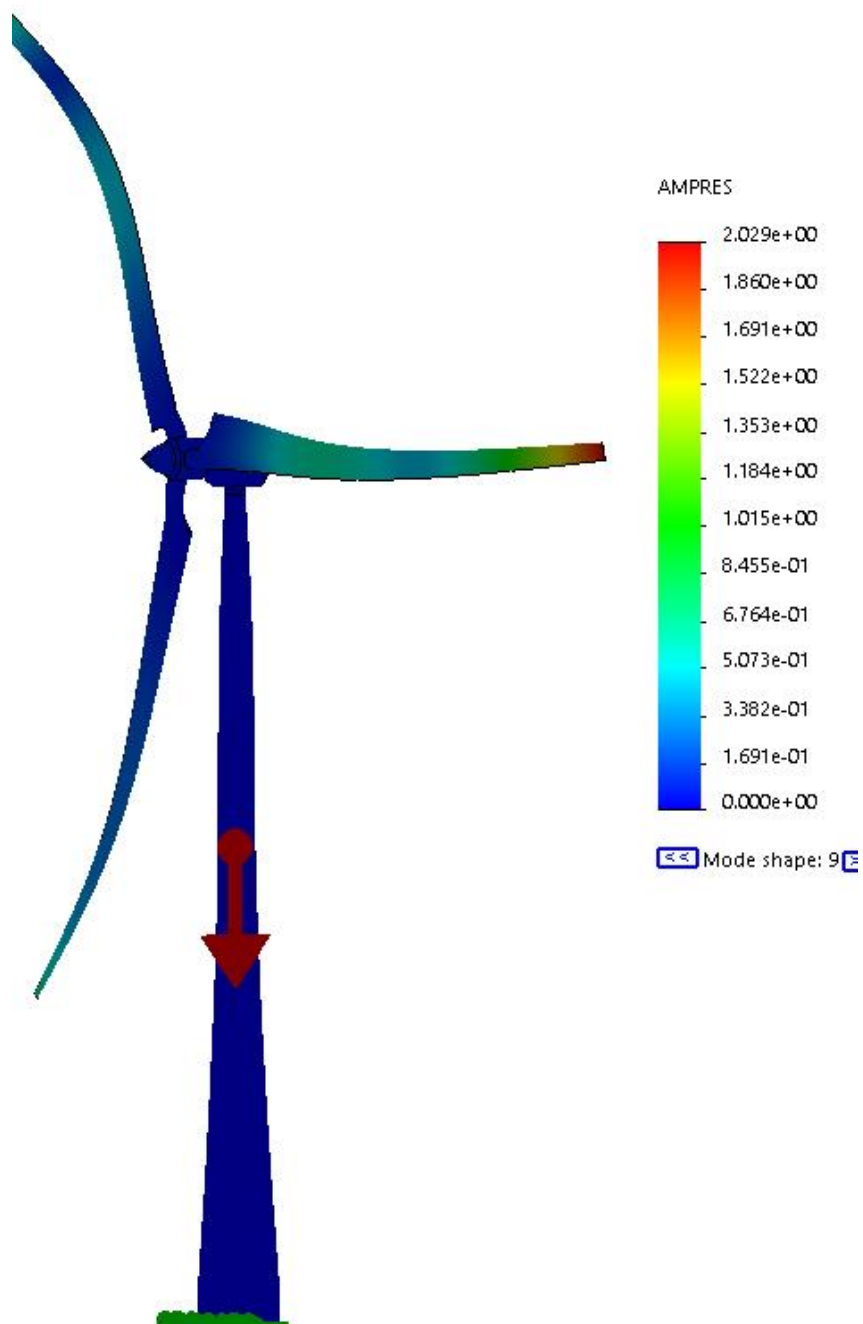




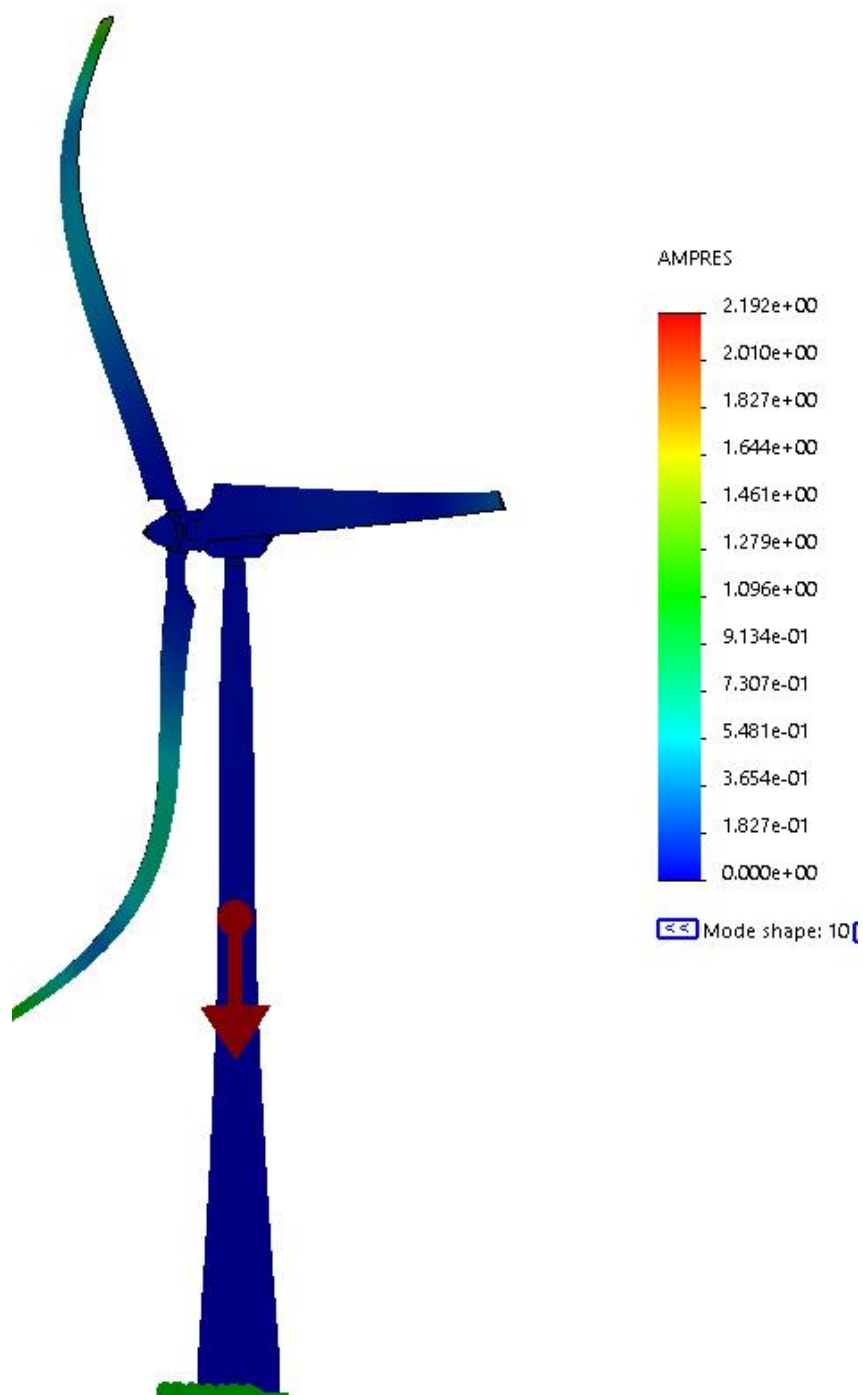
Εικόνα 5.10 Η έβδομη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την έβδομη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.



Εικόνα 5.11 Η όγδοη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την όγδοη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.



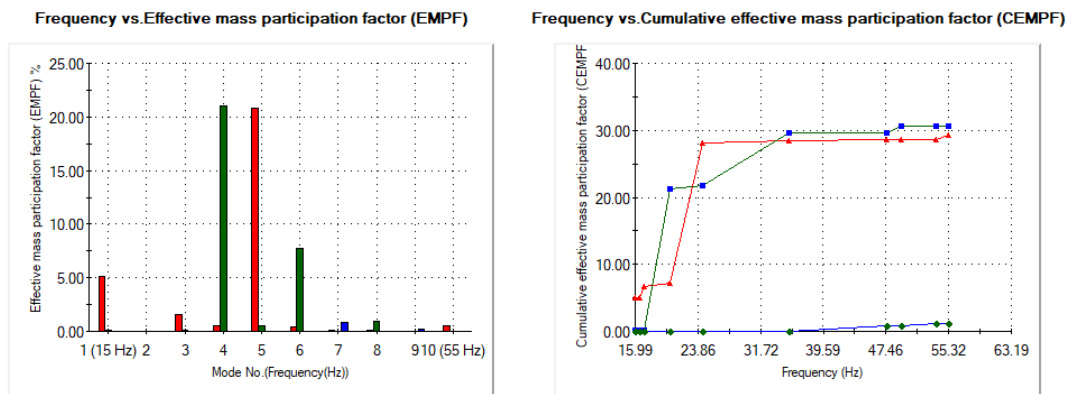
Εικόνα 5.12 Η ένατη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την ένατη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.



Εικόνα 5.13 Η δέκατη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη δέκατη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Α.

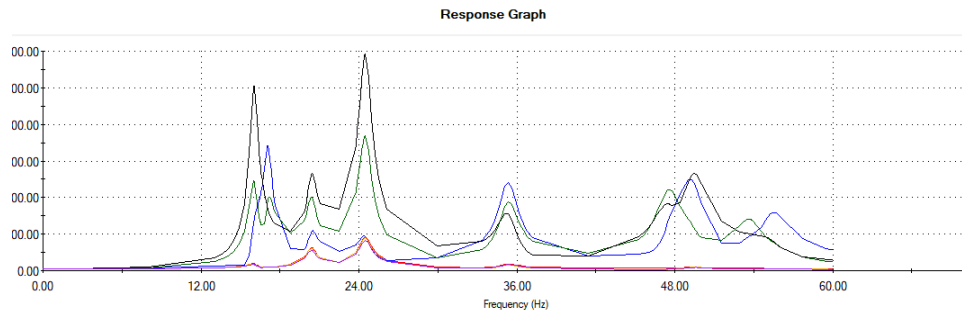
## Συντελεστής συμμετοχής μαζών

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	15.997	0.050904	0.0014411	6.0826e-05
2	16.506	1.2727e-06	0.00030978	4.0943e-05
3	17.118	0.016202	0.00068788	2.0101e-08
4	20.427	0.0052439	0.21029	1.4032e-06
5	24.502	0.20835	0.0056672	0.00031137
6	35.324	0.0038039	0.077305	4.9377e-07
7	47.494	0.0014352	0.00018296	0.0079596
8	49.402	0.0010783	0.0097182	0.00047863
9	53.733	5.5211e-06	3.3345e-05	0.0024384
10	55.331	0.0051049	0.00046234	2.655e-05
		Sum X = 0.29213	Sum Y = 0.3061	Sum Z = 0.011318

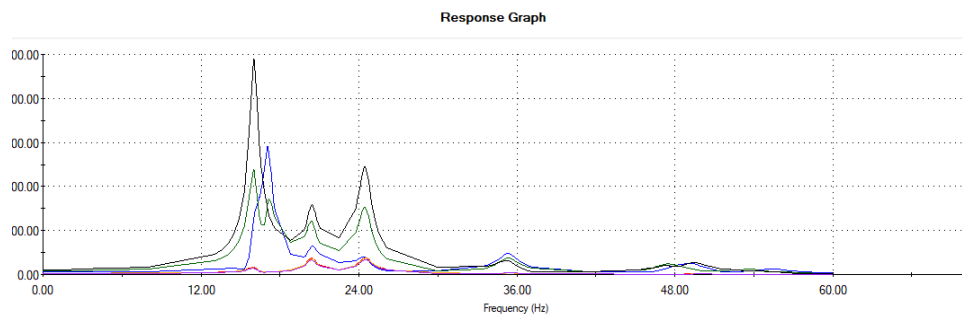


Εικόνα 5.14 Διαγράμματα Ιδιοσυχνοτήτων και Μαζών.

Η δυναμική ανάλυση έγινε με εξωτερική διέγερση 3g σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες στη βάση της ανεμογεννήτριας, για καθολικό λόγο απόσβεσης υλικών 0.02 και για φάσμα συχνοτήτων 0-60Hz. Τα διαγράμματα απόκρισης για τη επιτάχυνση και μετατόπιση των κόμβων της Εικ. 5.2 προκύπτουν:



Εικόνα 5.15 Διάγραμμα απόκρισης για την επιτάχυνση.



Εικόνα 5.16 Διάγραμμα απόκρισης για μετατόπιση των κόμβων.

Στα διαγράμματα παρατηρούμε ότι στους επιλεγμένους κόμβους εμφανίζεται συντονισμός διαφορετικής έντασης σε συχνότητες διέγερσης σχεδόν ίσες με όλες τις ιδιοσυχνότητες.

Ειδικότερα στους κόμβους ακροπερυγίων (#685, #3430, #4430) εμφανίζεται η μεγαλύτερη επιτάχυνση και μετατόπιση για τις πρώτες 5 ιδιοσυχνότητες, ενώ για τις επόμενες η μετατόπιση είναι μικρότερη.

Ο κόμβος στο κέντρο της βάσης των περύγων (#6) και οι κόμβοι στη βάση και στο πίσω μέρος της ατράκτου (#7214, #6365) εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά με τον εντονότερο συντονισμό στις συχνότητες 20.4Hz και 24.5Hz που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες 4 και 5, ακολουθούμενο από τον μικρότερης έντασης συντονισμό στην συχνότητα 35.4Hz που αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα 6. Στις υπόλοιπες συχνότητες, οι κόμβοι φαίνονται ανεπηρέαστοι από την συχνότητα διέγερσης.[11]

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων σε συνδυασμό με την κατανομή μάζας στους τρεις άξονες.

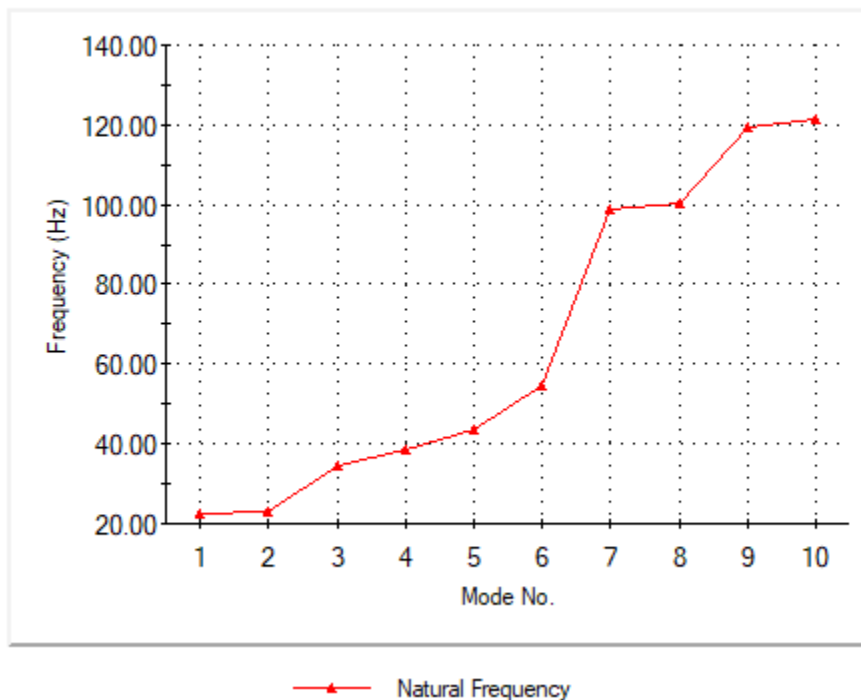
### 5.3 Διαμόρφωση Β

Η ανάλυση συχνοτήτων παρήγαγε τα παρακάτω αποτελέσματα:

#### Ιδιοσυχνότητες

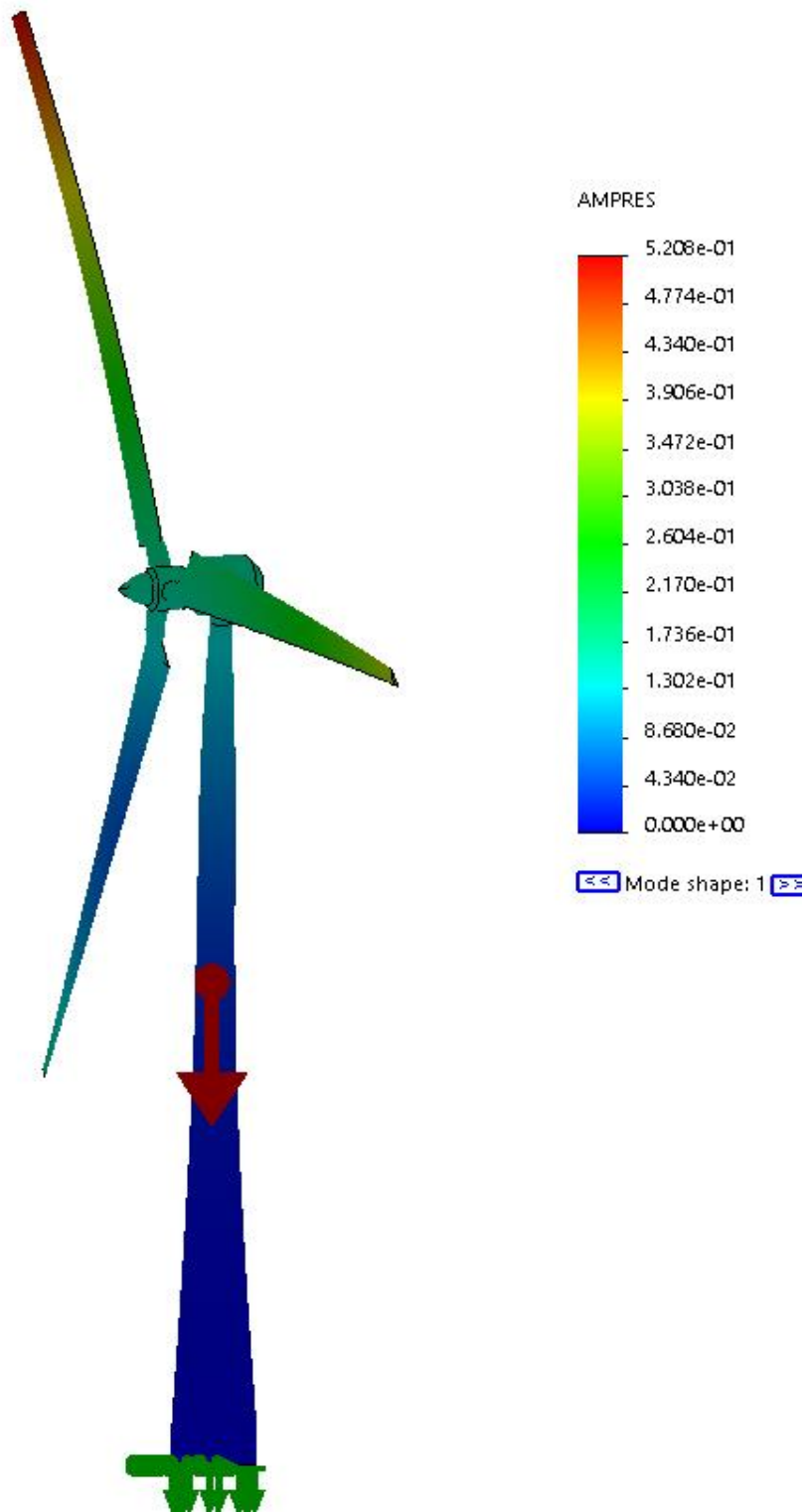
Mode No.	Frequency(Rad/sec)	Frequency(Hertz)	Period(Seconds)
1	142.58	22.693	0.044067
2	143.57	22.85	0.043765
3	218.56	34.785	0.028748
4	242.32	38.566	0.025929
5	272.89	43.432	0.023024
6	343.71	54.704	0.01828
7	621.64	98.937	0.010107
8	629.9	100.25	0.0099749
9	750.56	119.45	0.0083714
10	764.47	121.67	0.008219

**Frequency vs.Mode No.**



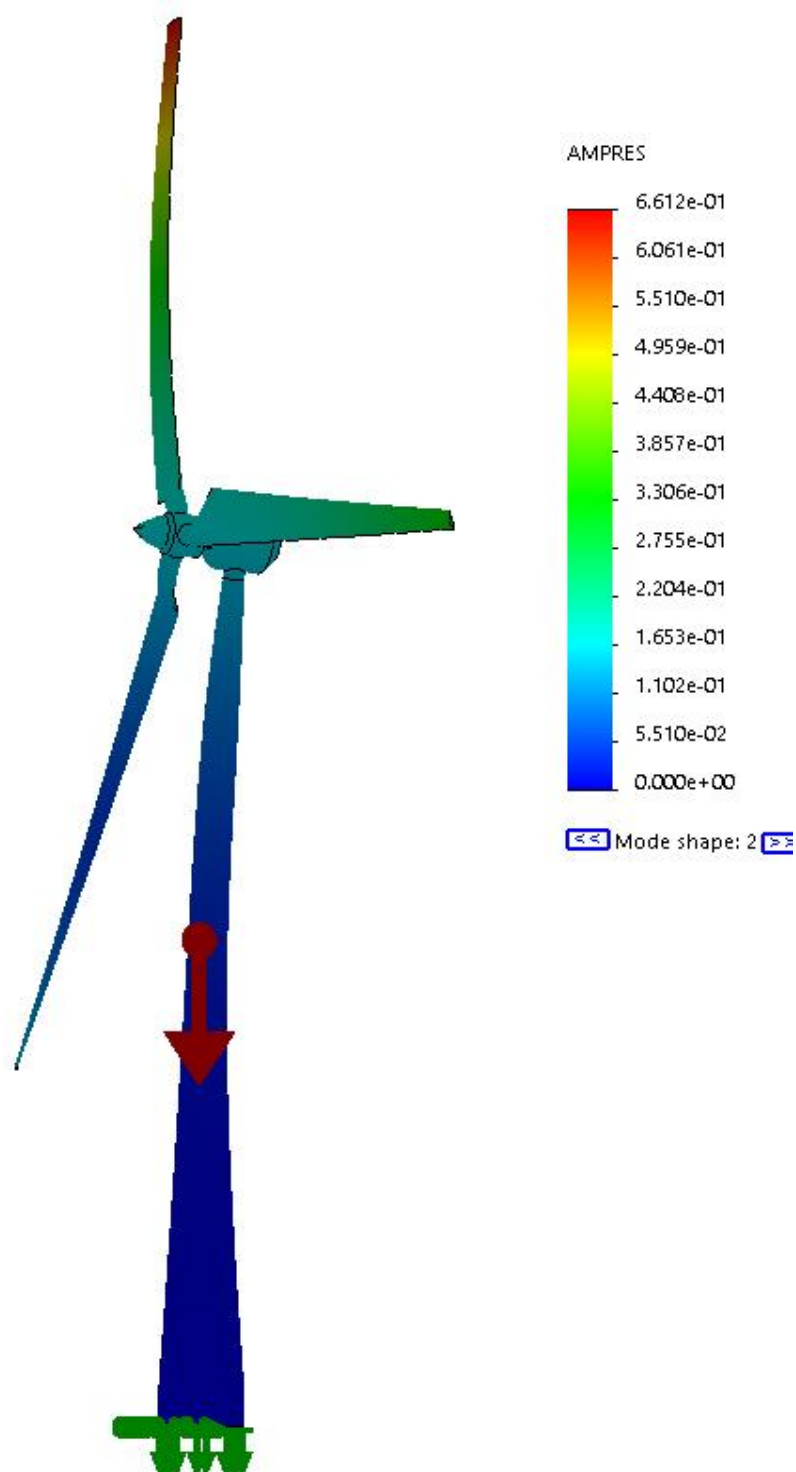
Εικόνα 5.17 Διάγραμμα Ιδιοσυχνοτήτων για τη Διαμόρφωση Β.

## Ιδιομορφές

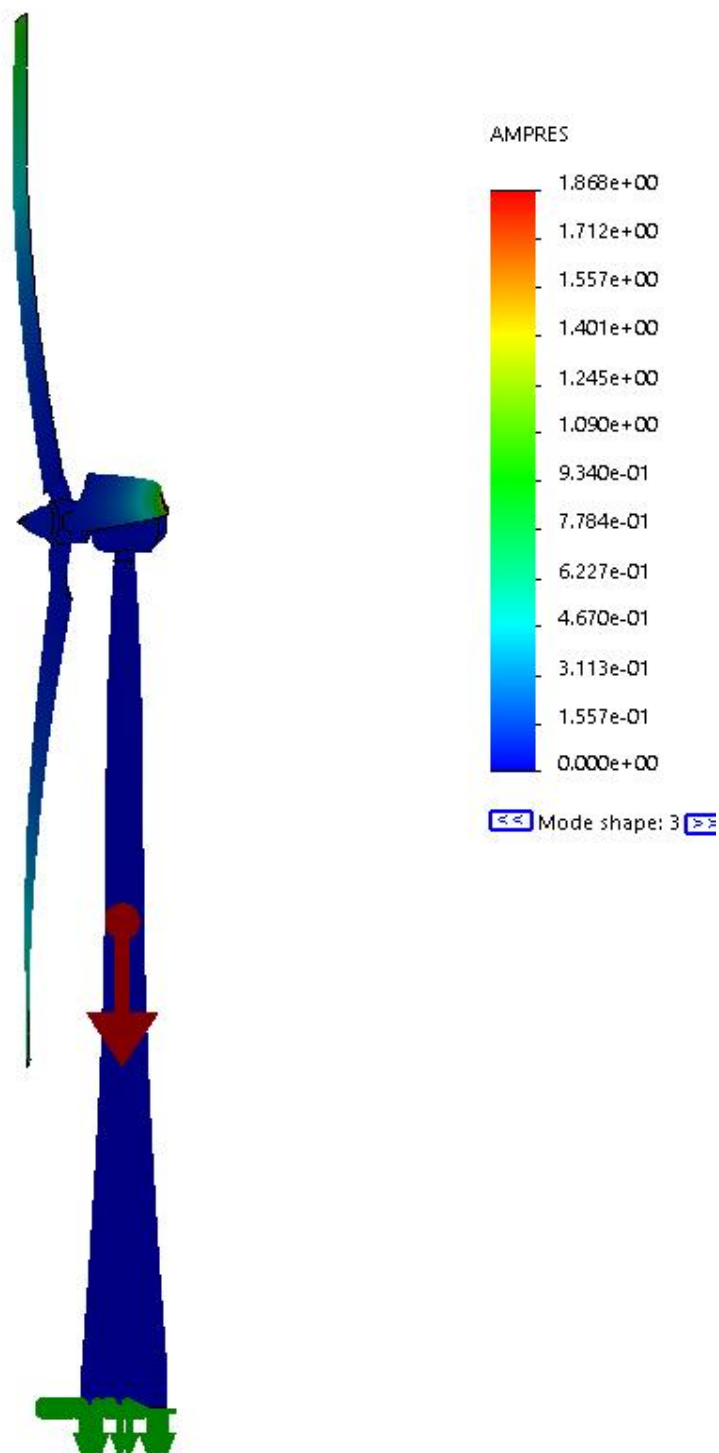


Εικόνα 5.18 Η πρώτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την πρώτη ιδιομορφή, με βάση τη διαμόρφωση Β.

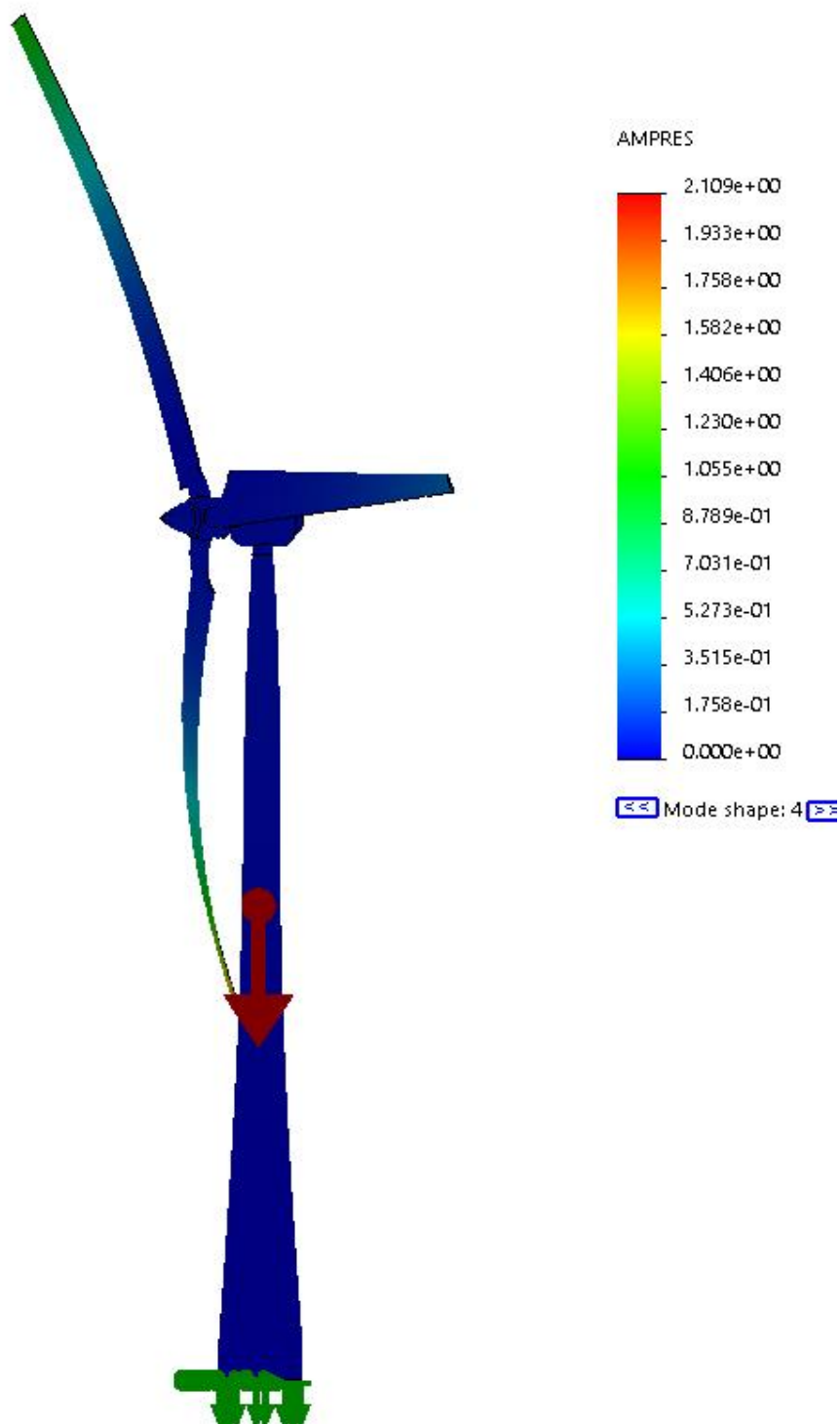




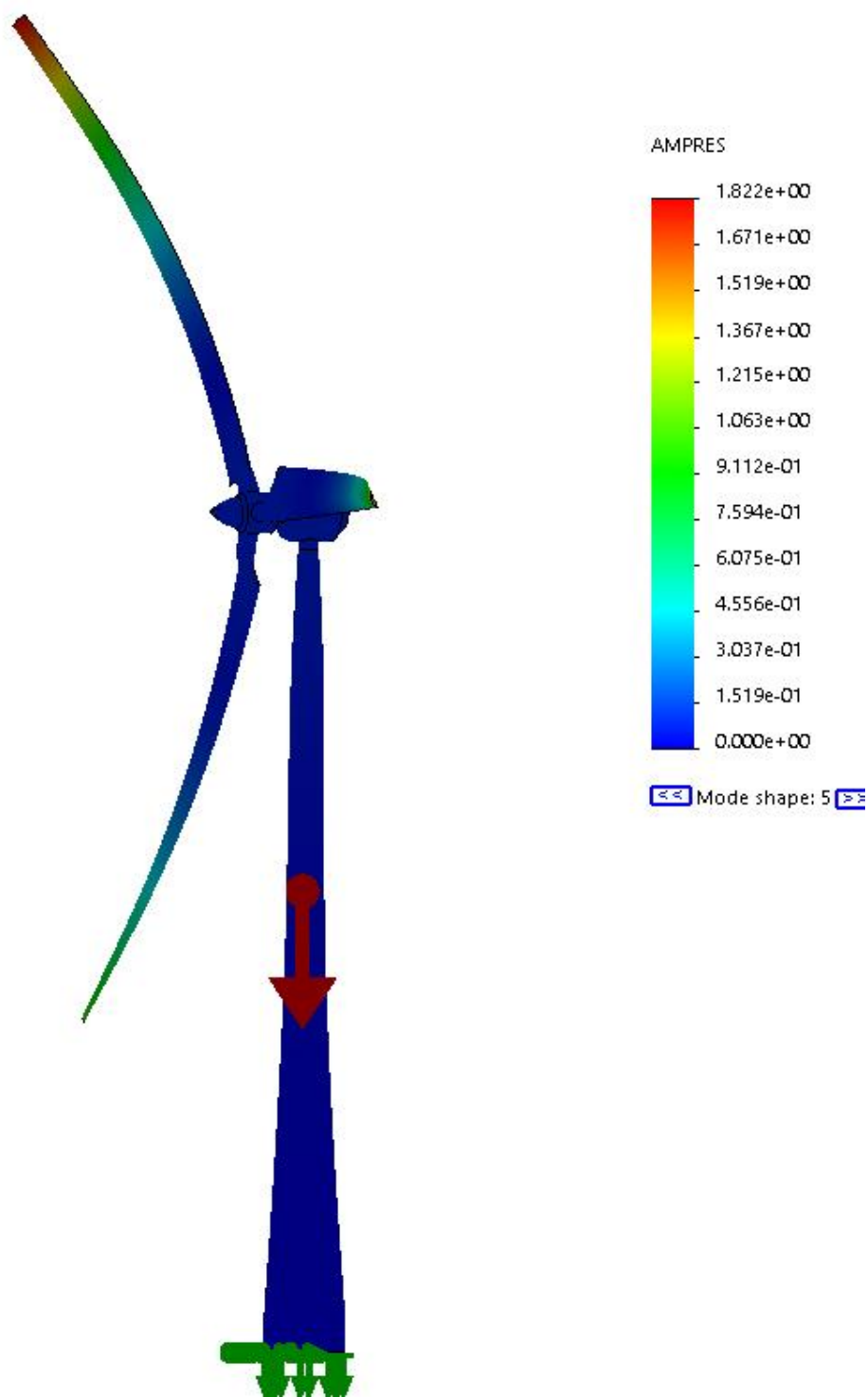
Εικόνα 5.19 Η δεύτερη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη δεύτερη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



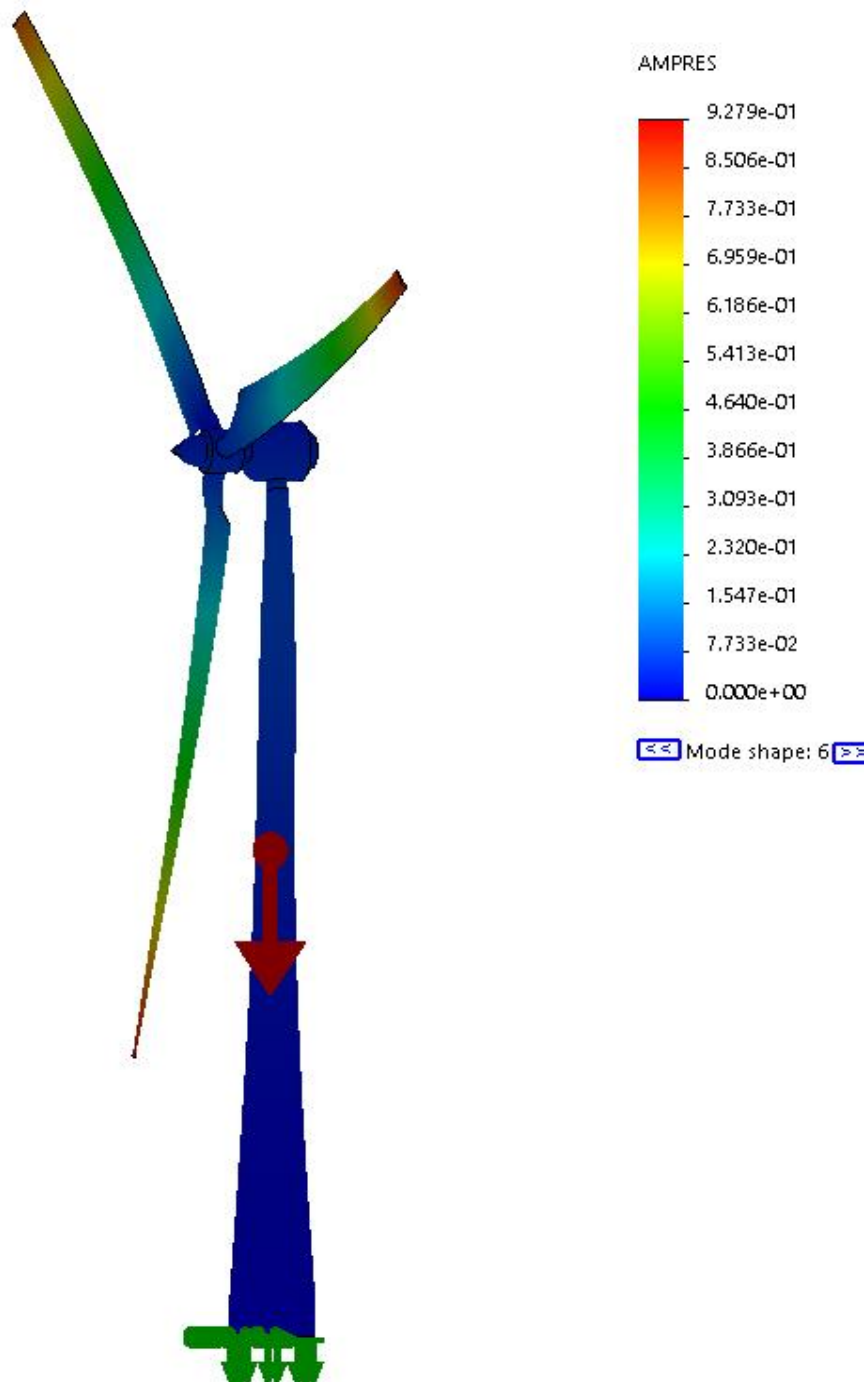
Εικόνα 5.20 Η τρίτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη τρίτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



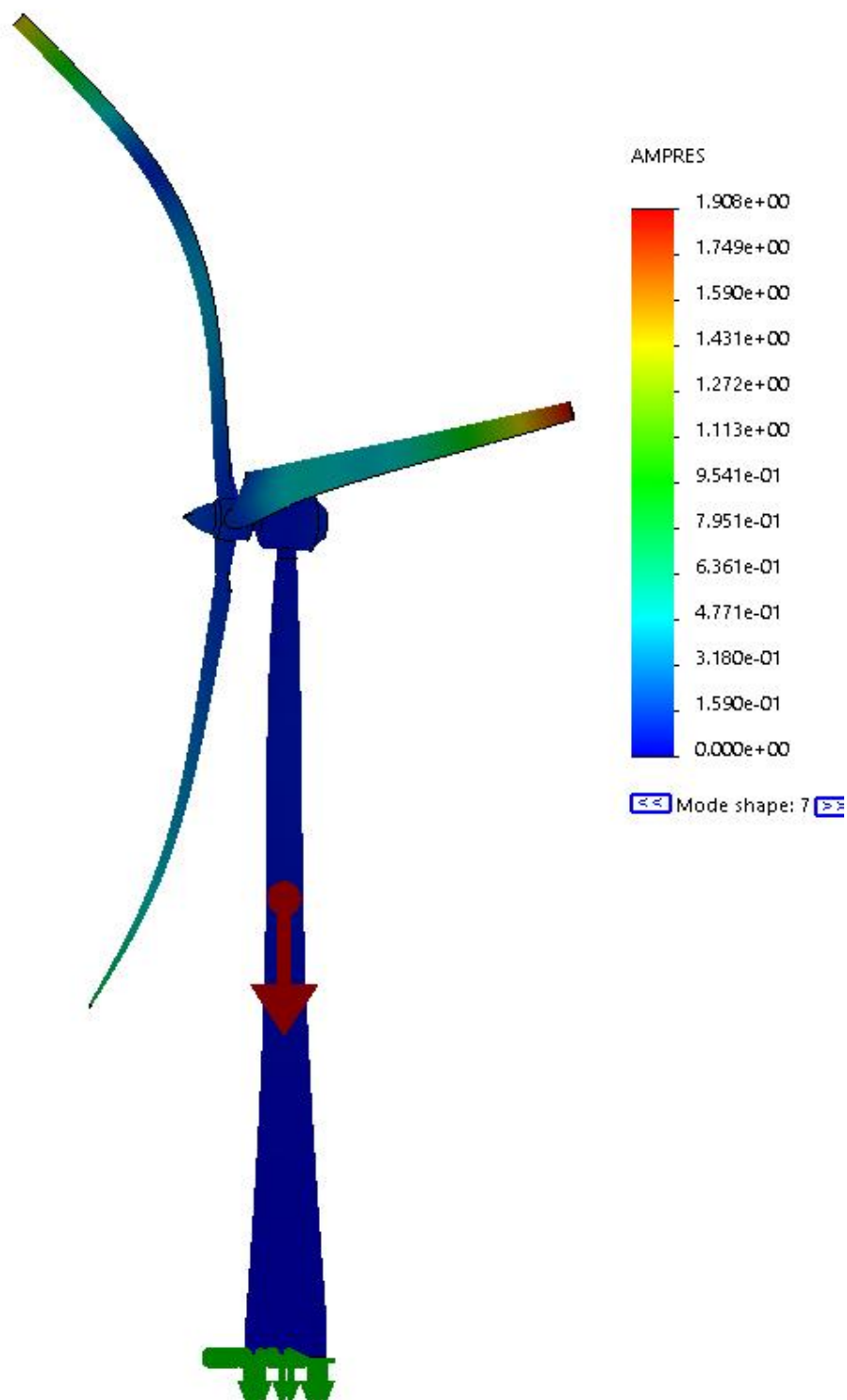
Εικόνα 5.21 Η τέταρτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την τέταρτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



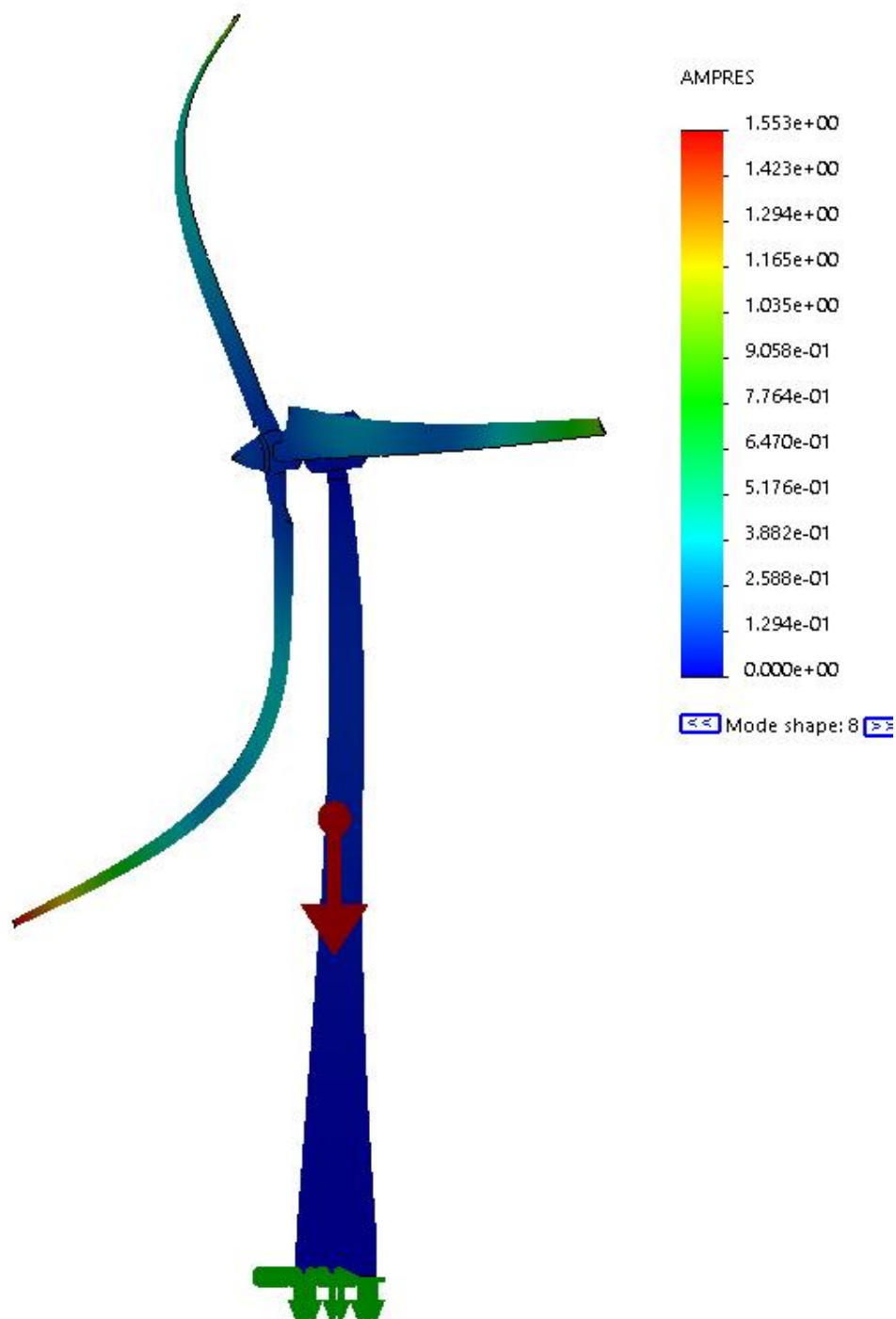
Εικόνα 5.22 Η πέμπτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την πέμπτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



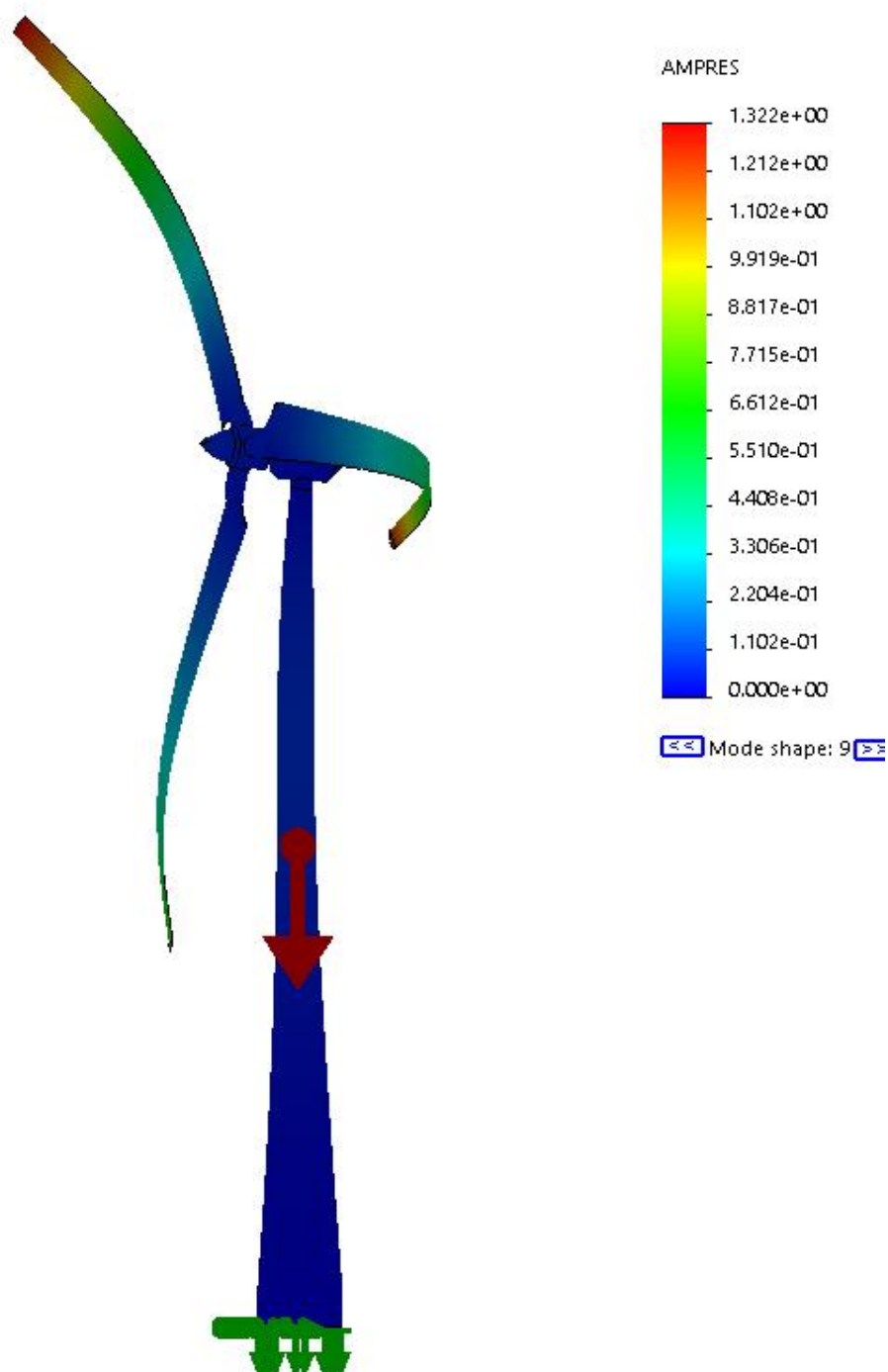
Εικόνα 5.23 Η έκτη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την έκτη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



Εικόνα 5.24 Η έβδομη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την έβδομη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.

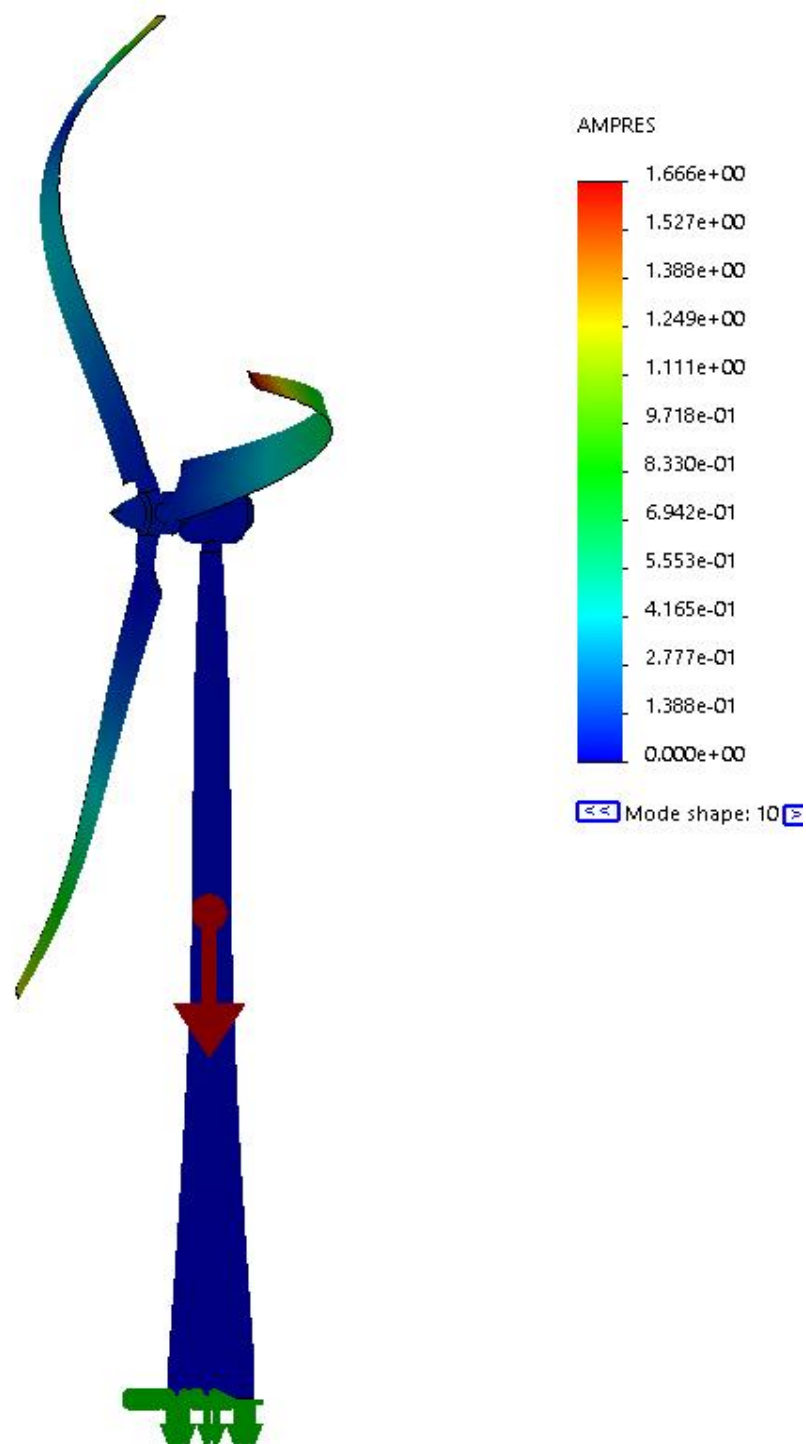


Εικόνα 5.25 Η όγδοη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την όγδοη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.



Εικόνα 5.26 Η ένατη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για την ένατη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμόρφωση Β.

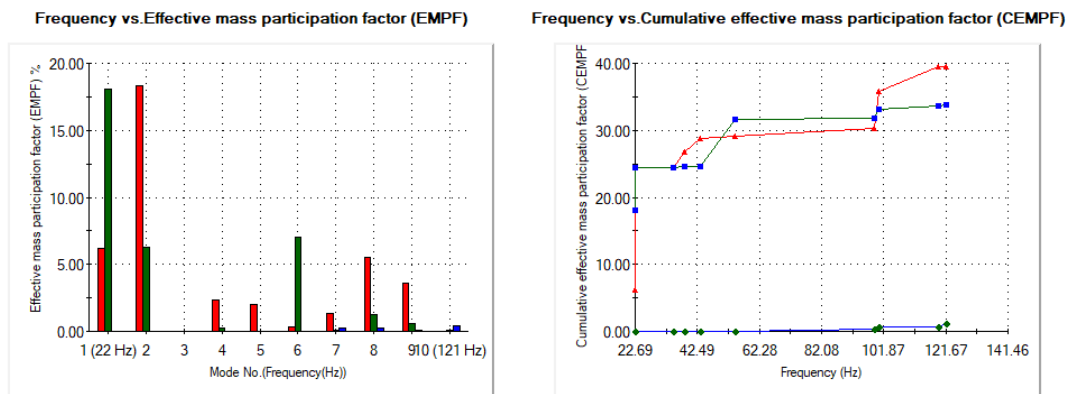




Εικόνα 5.27 Η δέκατη ιδιομορφή για την ανεμογεννήτρια για τη δέκατη ιδιοσυχνότητα, με βάση τη διαμορφωση Β.

## Συντελεστής συμμετοχής μαζών

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	22.693	0.061579	0.18048	1.367e-05
2	22.85	0.18289	0.06313	0.00019201
3	34.785	1.2843e-05	0.00031047	1.7179e-05
4	38.566	0.023039	0.0022325	4.1906e-05
5	43.432	0.019903	0.0001147	5.6371e-06
6	54.704	0.0031952	0.070612	1.2884e-07
7	98.937	0.013001	0.0011729	0.0028651
8	100.25	0.054955	0.012611	0.0027984
9	119.45	0.035706	0.0062322	0.00088989
10	121.67	6.7803e-05	0.0010797	0.0043317
		Sum X = 0.39434	Sum Y = 0.33798	Sum Z = 0.011156

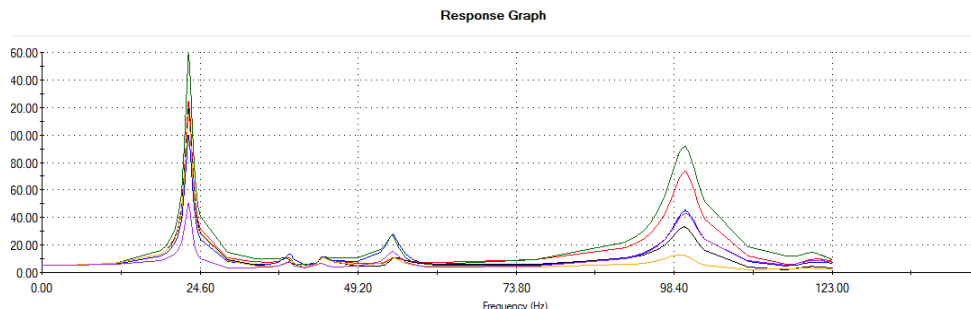


Εικόνα 5.28 Διαγράμματα Ιδιοσυχνοτήτων και Μαζών.

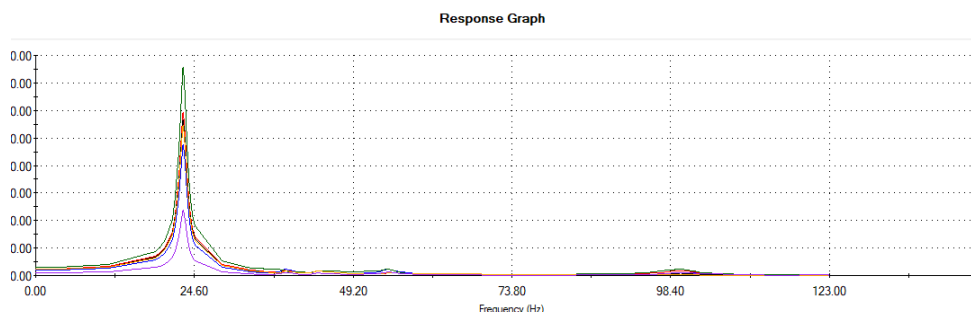
Σύμφωνα με το διάγραμμα Συντελεστή Συμμετοχής Μαζών, οι ιδιοσυχνότητες 1, 2, 4, 5, 8 και 9 ξεπερνάνε το 2% συνολικής μάζας και θεωρούνται σημαντικές ως προς την απόκριση της κατασκευής στην x- διεύθυνση. Αντίστοιχα, οι ιδιοσυχνότητες 1, 2 και 6 είναι σημαντικές ως προς την απόκριση της κατασκευής στην γ-διεύθυνση. Συνεπώς, οι 7 αυτές ιδιοσυχνότητες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Παρατηρούμε, όμως ότι ο Αθροιστικός Συντελεστής Συμμετοχής Μάζας υπολείπεται του 80% σε κάθε δεδομένη διεύθυνση και κυρίως κατά την διεύθυνση x και γ όπου αναμένεται η φόρτιση λειτουργίας. Συνεπώς, θα πρέπει η δυναμική ανάλυση να επεκταθεί σε περισσότερες από τις 10 ήδη υπολογισθείσες ιδιομορφές μέχρι του πλήθους εκείνου που θα διαμορφώσει τον ΑΣΣΜ σε ποσοστά 80-90%.[11]

Η δυναμική ανάλυση έγινε με εξωτερική διέγερση 3g σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες στη βάση της ανεμογεννήτριας, για καθολικό λόγο απόσβεσης υλικών 0.02 και για φάσμα συχνοτήτων 0-123Hz. Τα διαγράμματα απόκρισης για τη επιτάχυνση και μετατόπιση των κόμβων της Εικ. 5.2 προκύπτουν:



Εικόνα 5.29 Διάγραμμα απόκρισης για την επιτάχυνση.



Εικόνα 5.30 Διάγραμμα απόκρισης για τη μεταβολή των κόμβων.

Στα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρούμε ότι όλοι οι επιλεγμένοι κόμβοι εμφανίζουν παρόμοια απόκριση αλλά διαφορετικής έντασης σε όλο το φάσμα συχνοτήτων διέγερσης. Οι συχνότητες δε που παρουσιάζεται συντονισμός ανταποκρίνονται στις υπολογισμένες ιδιοσυχνότητες.

Ειδικότερα, εμφανίζεται έντονος συντονισμός σε όλους τους κόμβους στις συχνότητες διέγερσης 22.8Hz, 54.4Hz, 100.1Hz που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες 2, 6 και 8. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς σε αυτές τις συχνότητες υπάρχει και ο μεγαλύτερος συντελεστής συμμετοχής μάζας. Η μέγιστη μετατόπιση των κόμβων παρατηρείται για συχνότητα διέγερσης 22.8Hz ενώ στο υπόλοιπο φάσμα συχνοτήτων η μετατόπιση είναι ελάχιστη (<1mm) με εξαίρεση τις συχνότητες 54.4Hz και 100.1Hz όπου η μετατόπιση των ακροπερυγίων είναι της τάξης των 3mm. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται λόγω των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων (ακαμψία) των υλικών της διαμόρφωσης B, και κυρίως των ανθρακοινών έναντι των υαλοινών. Στα διαγράμματα είναι επίσης εμφανής ο μικρότερης έντασης συντονισμός της κατασκευής και στις συχνότητες διέγερσης 38.3Hz, 44.1Hz, 120.1Hz που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες 4, 5, 9 και 10.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων σε συνδυασμό με την κατανομή μάζας στους τρεις άξονες.

## **Συμπεράσματα**

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα πολύτιμο εργαλείο στη γρήγορη, έγκυρη και χαμηλού κόστος δυναμική ανάλυση κατασκευών. Ο μηχανικός μπορεί να υπολογίσει ήδη από την φάση αρχικού σχεδιασμού μιας κατασκευής τις ιδιοσυχνότητές της και να τις συγκρίνει με τις συχνότητες δυναμικής φόρτισης που αναμένεται να εμφανιστούν στην κατασκευή κατά την πραγματική λειτουργία της. Αυτό δίνει την δυνατότητα στον μηχανικό να προβεί σε διάφορες αλλαγές σχεδιασμού (π.χ. νευρώσεις, προσθαφαίρεση υλικού, αλλαγή υλικών, κ.α.) και να επανεξετάσει την νέα δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συντονισμού με καταστροφικά συνήθως αποτελέσματα.

Η δυνατότητα αυτή της αλλαγής υλικού επιδείχθηκε με την μελέτη απόκρισης μιας ανεμογεννήτριας με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις υλικών, όπου παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στις ιδιοσυχνότητες τους. Στη διαμόρφωση Β, όπου τα υλικά των κομματιών και ειδικότερα των πτερύγων ήταν μεγαλύτερης αντοχής, οι ιδιοσυχνότητες #3 έως #10 ήταν σχεδόν διπλάσιες από αυτές της διαμόρφωσης Α, γεγονός που καταδεικνύει την επίδραση που έχουν τα υλικά στην απόκριση μιας κατασκευής.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:**

1. Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ν. Βωβός Γ. Γιαννακόπουλος.
2. Wind Power in Power Systems, Thomas Ackermann.
3. ΕΛΑΤΑΕΝ [www.elataen.gr](http://www.elataen.gr)
4. World Wind Energy Association [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org)
5. American Wind Energy Association [www.awea.org](http://www.awea.org)
6. European Wind Energy Association [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
7. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
8. Σημειώσεις μαθήματος Δυναμική Μηχανών Ι, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών.
9. Δυναμική Μηχανών, Α.Καναράχος, Ι.Αντωνιάδης, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1998
10. <https://grabcad.com/library/wind-turbine--13>
11. DAMPING CROSS-REFERENCE