



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης

**Δυναμική ανάλυση δομικών στοιχείων φτερού
ανεμογεννήτριας και μελέτη ενίσχυσης με χρήση
αυξητικών στοιχείων**

Κουτρούμπας Σπυρίδων

Επιβλέπων Καθηγητής:

Σταυρουλάκης Γεώργιος

Εξεταστική Επιτροπή:

Αντωνιάδης Αριστομένης

Μπιλάλης Νικόλαος

Χανιά 2015

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	5
2. Σχεδιαστικές Αρχές	7
2.1 Η αεροδυναμική του πτερυγίου	7
2.2 Το δομικό σύστημα του πτερυγίου	12
3. Υλικά του δομικού συστήματος	16
3.1 Ινώδη Σύνθετα	17
3.1.1 Fiberglass	17
3.1.2 Μέθοδος παρασκευής του σύνθετου υλικού	18
3.2 Τα προς μελέτη υλικά – Τα υλικά του πυρήνα.....	20
3.2.1 Αφρώδες πολυμερές.....	21
3.2.2 Αφρός Αλουμινίου.....	23
3.2.3 Αυξητικό υλικό με μικροδομή αστέρα	25
4. Κατασκευή του μοντέλου	27
4.1 Autodesk Inventor	27
4.2 Υλοποίηση	28
5. Προσομοίωση του μοντέλου	30
5.1 Comsol Multiphysics – Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	30
5.2 Η δυναμική ανάλυση της κατασκευής	32
6. Δυναμική ανάλυσης της κατασκευής.....	33
6.1 Η γεωμετρία της ανάλυσης.....	33
6.2 Ανάθεση υλικών	34
6.3 Ορισμός των αρχικών συνθηκών	35
6.4 Πλέγματοποίηση	37
6.5 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής.....	39
6.5.1 Αφρώδες Πολυμερές.....	40
6.5.2 Αφρός Αλουμινίου.....	46
6.5.3 Αυξητικό Υλικό	52
7. Συμπεράσματα	57
7.1 Συγκριτικό γράφημα πλάτους.....	57
7.2 Συγκριτικό γράφημα φάσης.....	59

7.3 Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα	61
Βιβλιογραφία	62
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	63
Π1 Αφρώδες Πολυμερές	63
Π2 Αφρός Αλουμινίου	73
Π3 Αυξητικό Υλικό.....	83

Περίληψη

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τα πλέον σύγχρονα και σύνθετα υλικά με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία τους. Ένας σημαντικός παράγοντας που οδηγεί στην αύξηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας είναι η ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας κατά την απόσβεση των κραδασμών και η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών κινείται σε αυτήν την κατεύθυνση. Τα σύνθετα υλικά μπορεί να πλησιάζουν τα θεωρητικά ιδεατά μηχανικά μεγέθη, κινούνται ωστόσο σε συμβατικά πλαίσια, σε αντίθεση με τα αυξητικά υλικά που επιτυγχάνουν αρνητικό λόγο Poisson,

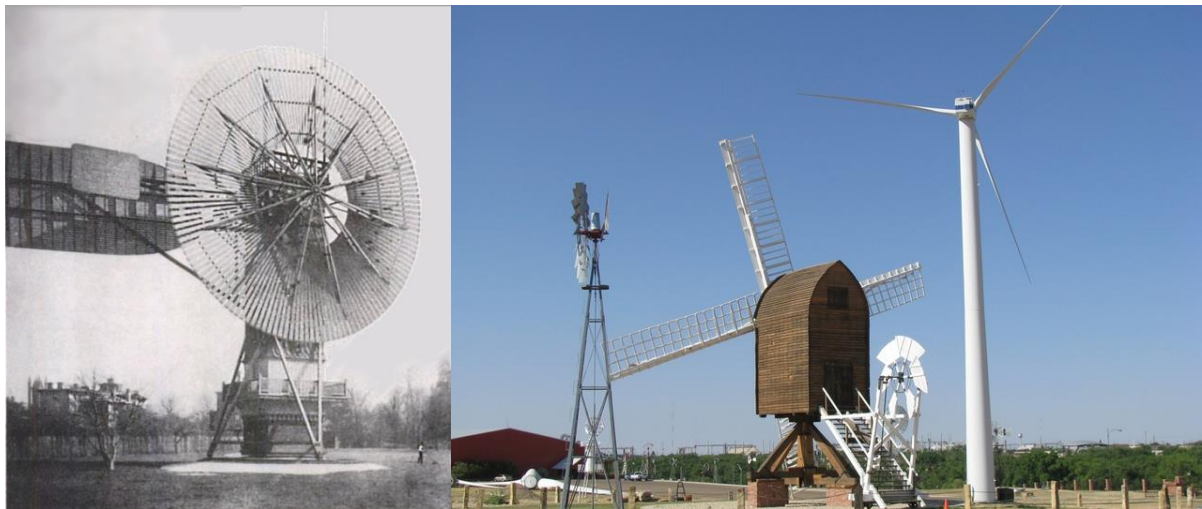
Σε αυτή την εργασία εξετάζεται δυναμικά το δομικό σύστημα φτερού ανεμογεννήτριας, το οποίο είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά (fiber glass, αφρός πολυμερών, sandwich materials) και εν συνεχεία η ενίσχυση των δοκών με αυξητικά υλικά και η συμπεριφορά του νέου συστήματος.

Το φτερό και τα δομικά του στοιχεία σχεδιάστηκαν στο AutoDesk Inventor , ενώ η δυναμική ανάλυση με τη χρήση Πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος Comsol Multiphysics

1. Εισαγωγή

Η ανάγκη για σύγχρονες και ήπιες μορφές ενέργειας, με φιλικές στο περιβάλλον επιδράσεις, έχει δημιουργήσει πολλές σύγχρονες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας τα αέναα αποθέματα των φυσικών πόρων, όπως η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με την χρήση φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Παράλληλα η τεχνολογική πρόοδος και η διαρκής έρευνα έχει μετεξελίξει αρχαίες μεθόδους παραγωγής, με την χρήση νέων υλικών και τεχνολογιών. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί η αιολική ενέργεια και η εκμετάλλευση της.

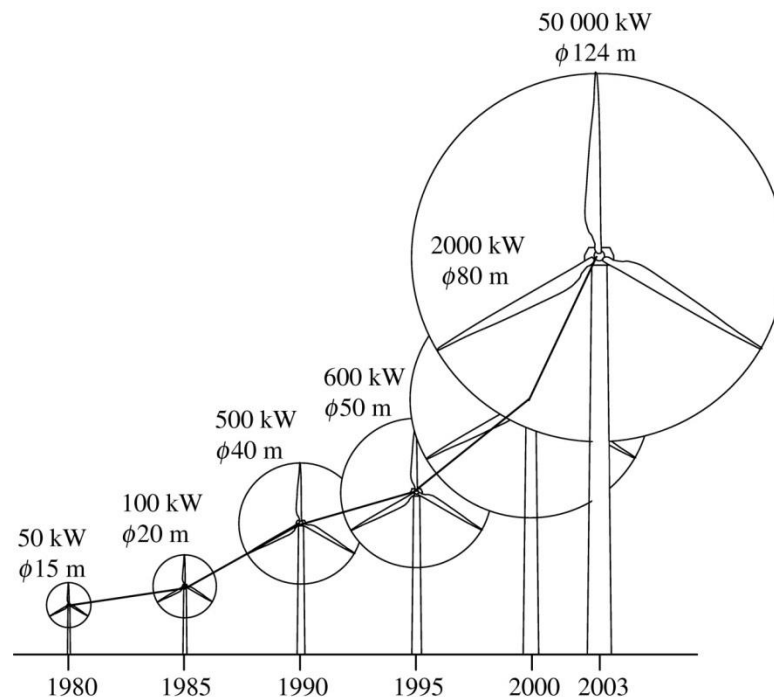
Η πρώτη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι αρκετά αρχαία και χρονολογείται από την ανακάλυψη των πανιών για την ναυσιπλοΐα. Στην παραγωγή η χρήση της γίνεται με τους ανεμόμυλους για την παραγωγή αλευριού από σιτηρά. Η Βιομηχανική Επανάσταση και η τεχνολογική πρόοδος που σημειώθηκε οδήγησε στην αναζήτηση νέων προσφορών της αιολικής ενέργειας στην ανθρώπινη παραγωγή. Η πρώτη κατασκευή ανεμογεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταγράφεται το 1887 στην Σκωτία από τον καθηγητή James Blyth. Το ύψος της έφτανε τα 10 m και χρησιμοποιούνταν για την φόρτιση συσσωρευτών. Η διαρκής ανακάλυψη νέων τεχνολογιών, η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση της παραγωγής επέφερε στην ανθρώπινη δραστηριότητα νέες δυνατότητες αξιοποίησης και μετασχηματισμού της φύσης. Σε αντιπαράθεση παρατίθενται η πρώτη ανεμογεννήτρια και η εξέλιξη τους σε διπλανή φωτογραφία.



Εικόνα 1.1 Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών

Η εξέλιξη της παραγωγής, επέφερε νέες δυνατότητες στην κατεργασία και παραγωγή υλικών, ώστε τα πειραματικά μεγέθη να μπορέσουν να εφαρμοστούν στην πράξη και να υπερνικηθούν οι περιορισμοί των πρώιμων ανεμογεννητριών. Η ανάγκη για υλικά που συνδυάζαν την υψηλή αντοχή με το ελαφρύ βάρος και την αποδοτικότερη απορρόφηση των φορτίσεων, από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα

είναι γεγονός. Αποτέλεσμα είναι η κατασκευή ανεμογεννητριών με ύψος πύργου άνω των 200m και ακτίνα ρότορα άνω των 100m, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2



Εικόνα 1.2 Εξέλιξη του ρότορα των ανεμογεννητριών

Όπως διαφαίνεται από την παραπάνω εικόνα, η εφαρμογή νέων τεχνολογιών έχει δραστική επίδραση στην απόδοση των ανεμογεννητριών. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να ερευνήσει ένα σημαντικό παράγοντα στην απόδοση και λειτουργία των ανεμογεννητριών, την λειτουργία του δομικού συστήματος του φτερού του ρότορα της ανεμογεννήτριας και την συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση – απόσβεση των ταλαντώσεων.

Για τον σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο φτερού ανεμογεννήτριας και με την επίδραση αρμονικού φορτίου, συγκρίνονται τρεις περιπτώσεις χρήσεων υλικών, ως προς την απόσβεση των ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα αφρώδες πολυμερές (υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες), ένα αφρό αλουμινίου (σύγχρονο υλικό υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιείται στην αεροδιαστημική) και ένα αυξητικό υλικό (υλικό με αρνητικό λόγο Poisson). Η δυνατότητα κάθε υλικού να απορροφήσει την επίδραση του αρμονικού φορτίου Ασυγκρίνεται αναλυτικά με πίνακες και διαγράμματα του πλάτους και της φάσης ως προς την συχνότητα. Για την εγκυρότητα της αντοχής της κατασκευής ως προς την φόρτιση σε κάθε περίπτωση παρατίθενται αναλυτικά οι γραφικές απεικονίσεις των παραμορφώσεων

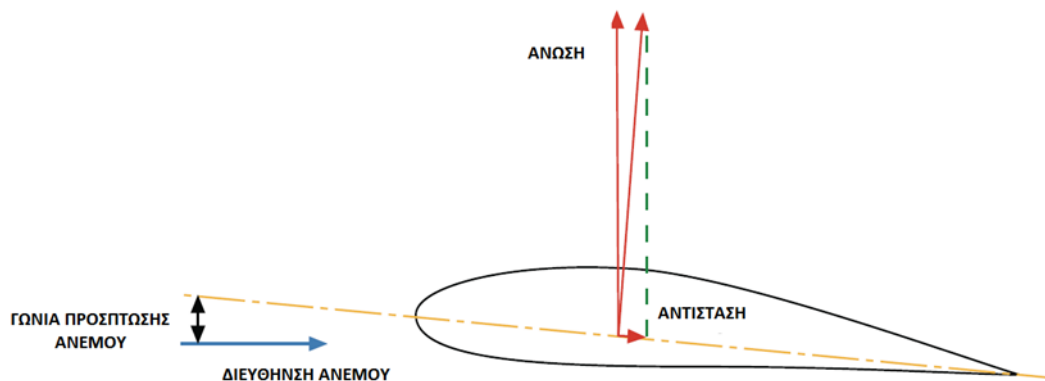
Η υλοποίηση των προσομοιώσεων γίνεται με την κατασκευή του μοντέλου στο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης Autodesk Inventor και εν συνεχεία το μοντέλο

εισάγεται στο Comsol για την λεπτομερή ανάλυση και προσομοίωση του στις ιδιαίτερες συνθήκες.

2. Σχεδιαστικές Αρχές

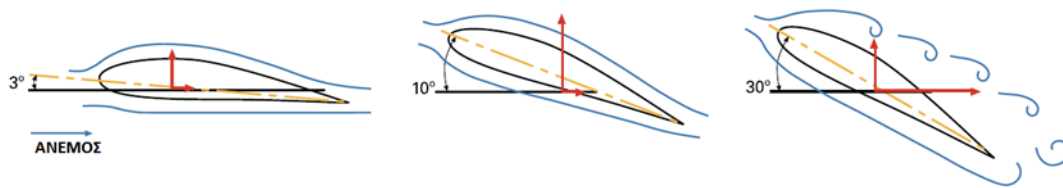
2.1 Η αεροδυναμική του πτερυγίου

Η αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας έχει ως στόχο την πρόσληψη της ενέργειας του ανέμου. Ο τρόπος με τον οποίον “αιχμαλοτίζουν” την ενέργεια του ανέμου και προκαλούν την περιτροπή του άξονα τους είναι παρόμοιος με των φτερών των αεροπλάνων. Η κυρτή πλευρά του πτερυγίου του δρομέα δημιουργεί χαμηλές πιέσεις, ενώ από την αντίθετη πλευρά υψηλής πίεσης άνεμος προκαλεί την άνωση του φτερού, η οποία μεταφράζεται με την δύναμη κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 2.1 Προφίλ αεροτομής φτερού και ανάλυση δυνάμεων

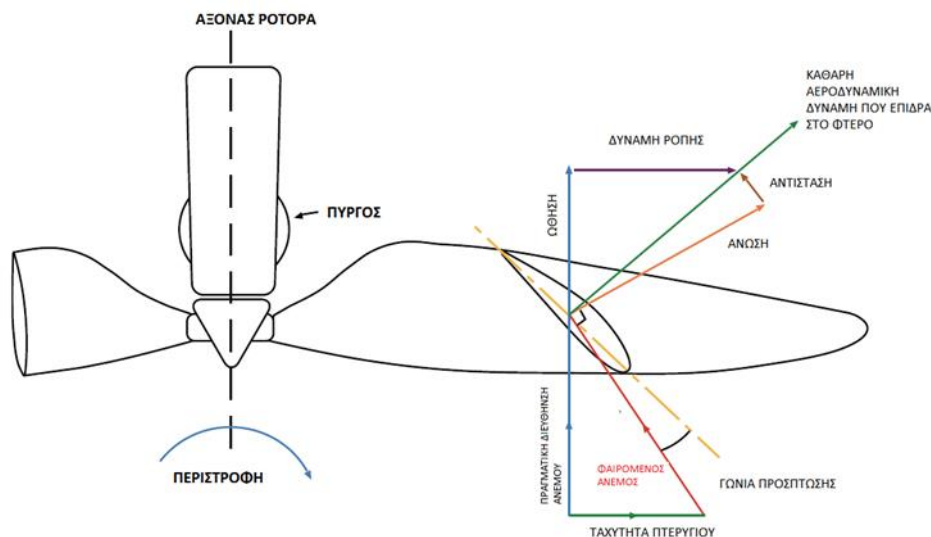
Η δύναμη της άνωσης μεγαλώνει καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης μέχρις ένα βέλτιστο σημείο, πέρα από το οποίο αρχίζει και μειώνεται ξανά και για πολύ μεγάλες τιμές, το πτερύγιο ακινητοποιείται. Υπάρχει οπότε μια βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης για την εξαγωγή μέγιστης άνωσης



Εικόνα 2.2 Σχέση γωνίας – άνωσης

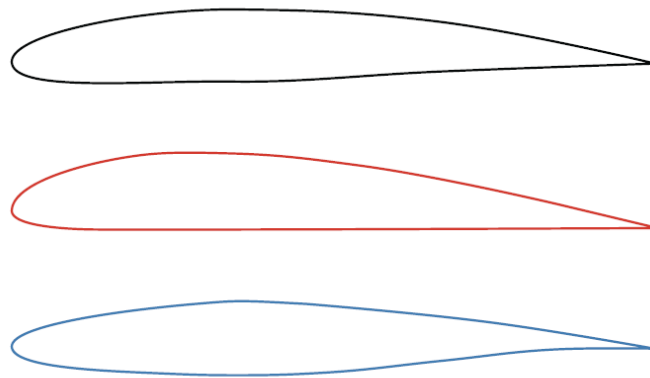
Υπάρχει ωστόσο και ο περιορισμός της αντίστασης στο πως δύναται να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή άνωση. Όπως φαίνεται και από την μεταβολή των γωνιών, σε άρτια σχεδιασμένες αεροτομές και για αύξηση της γωνία πρόσπτωσης από ένα όριο και μετά, η αντίσταση αυξάνεται δραματικά. Οπότε στην βέλτιστη περίπτωση, λαμβάνουμε και τον λόγο άνωσης/αντίστασης και αυτή είναι λίγο πριν την γωνία που λαμβάνουμε την μέγιστη άνωση.

Η αντίσταση δεν παίζει ρόλο κατά την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας, στην θέση 0 και αυτό γιατί έχει την ίδια διεύθυνση με την διεύθυνση του ανέμου. Κατά την περιστροφή του φτερού όμως, αλλάζει η διεύθυνση του ανέμου σε σχέση με την νέα θέση του φτερού, άρα όσον αφορά το σύστημα φτερό, η διεύθυνση του ανέμου αλλάζει σε σχέση με την πραγματική και είναι γνωστή ως φερόμενος άνεμος. Η επίδραση που έχει ο φαινόμενος άνεμος είναι μεγάλη, καθώς περιστρέφει την γωνία της άνωσης και της αντίστασης διανυσματικά, με αποτέλεσμα την μείωση της άνωσης και την ενίσχυση της αντίστασης στην συνισταμένη δύναμη.



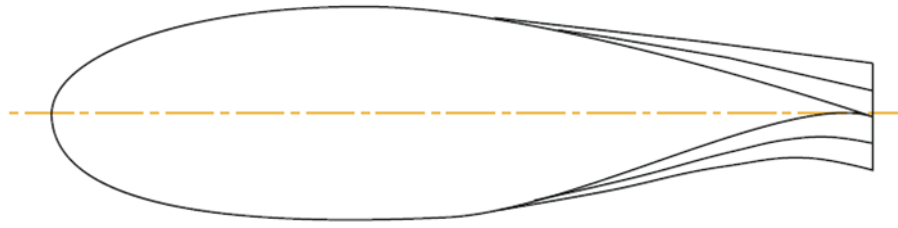
Εικόνα 2.3 Φαινόμενος άνεμος και ανάλυση διανυσμάτων στο φτερό

Σε γενικές γραμμές οι ανεμογεννήτριες έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σχεδιασμού με τα αεροπλάνα και τα φτερά τους. Οι αεροτομές τους βασίζονται σε μια πανομοιότυπη οικογένεια σχημάτων. Εν γένει η καλύτερη σχέση άνωσης/αντίστασης προκύπτει από αεροτομές σχετικά λεπτές, με το πάχος τους να είναι μόνο στο 10%-15% του μήκους της χορδής του .



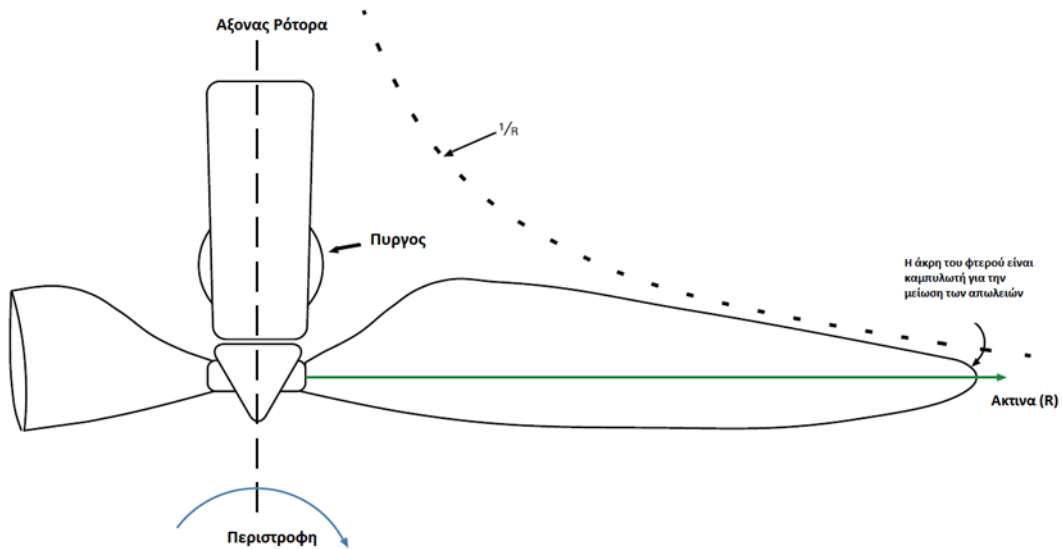
Εικόνα 2.4 Τυπική οικογένεια αεροτομών φτερών ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν όμως και οι κατασκευαστικές απαιτήσεις όπου η αεροτομή πρέπει να είναι παχύτερη του βέλτιστου αεροδυναμικού πάχους, ιδιαίτερα κοντά στην σύνδεση με τον άξονα περιστροφής. Σε αυτό το σημείο οι δυνάμεις κάμψης είναι μεγαλύτερες και υπάρχει απαίτηση για ενίσχυση της αεροτομής, που οδηγεί σε απόκλιση από το τυπικό βέλτιστο πάχος. Ευτυχώς, η αεροδυναμική απόκλιση σε αυτό το σημείο δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στην λειτουργία της, καθότι ο φαινόμενος άνεμος έχει μικρότερη ταχύτητα. Για την αύξηση του πάχους των αεροτομών κοντά στην σύνδεση με τον άξονα και για τον περιορισμό της δημιουργίας μιας “παχιάς” αεροτομής, συνήθως χρησιμοποιείται η τεχνική της flatback αεροτομής.



Εικόνα 2.5 Αεροτομή Flatback

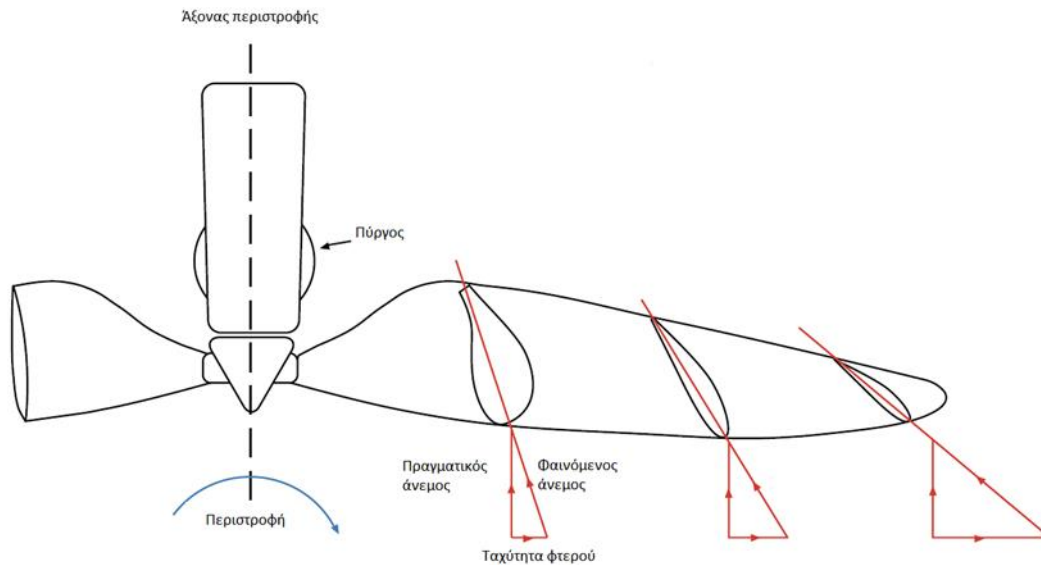
Ένα καλοσχεδιασμένο φτερό θα πρέπει να διασφαλίζει ότι ο αέρας δεν αφήνει ούτε τον αέρα να διαφύγει με πολύ μικρή ταχύτητα (προκαλώντας τύρβη), ούτε πολύ γρήγορα (που θα σήμαινε κακή λειτουργία και απώλειες ενέργειας), η ταχύτητα στο κάτω κάτω παίζει πολύ μεγάλο ρόλο σύμφωνα και με την αρχή του Betz. Επειδή το φτερό κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα στην άκρη απ' ότι στην βάση του, διασχίζει μεγαλύτερο όγκο αέρα απ' ότι η βάση, ως εκ τούτου θα πρέπει να εμφανίσει μεγαλύτερη άνωση, ώστε αντίστοιχα να επιβραδύνει τον διασχίζοντα την ανεμογεννήτρια άνεμο. Η άνωση αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας, οπότε μεγαλύτερες ταχύτητες συμβαδίζουν με αυτόν τον στόχο. Αυτό επιτρέπει στο φτερό να γίνεται στενότερο στην άκρη και να παράγει το αναμενόμενο αποτέλεσμα στην ταχύτητα του ανέμου. Σε ένα ιδανικό φτερό η χορδή της αεροτομής, σε σχέση με την ακτίνα της πτερωτής διατυπώνεται ως εξής: αν η χορδή είναι 2m σε 10m ακτίνα πτερωτής τότε θα πρέπει να είναι 10m χορδή σε 1m ακτίνας..



Εικόνα 2.6 : Κάτοψη ιδανικού φτερού

Στην πραγματικότητα όμως γραμμικές σχέσης ακτίνας – χορδής είναι αρκετά κοντά στο ιδεατό, με το πλεονέκτημα να είναι χαμηλότερο το κόστος κατασκευής και η κατασκευή αυτή κάθε αυτή να είναι πιο εύκολη.

Τέλος ο φαινόμενος άνεμος δεν προσπίπτει με την ίδια κλίση στο φτερό, αλλά υπάρχει διακύμανση από την βάση μέχρι την άκρη του φτερού. Η γωνία πρόσπτωσης του φαινόμενου ανέμου αυξάνεται κατά μήκος, με την μεγαλύτερη τιμή να βρίσκεται στην άκρη του φτερού. Ανάλογα με το μήκος του φτερού αυτή η διακύμανση αντιστοιχεί σε 10ο ~ 20ο απόκλιση .



Εικόνα 2.7 Περιστροφή αεροτομών κατά τον φερόμενο άνεμο

Το φαινόμενο αυτό, της περιστροφής των αεροτομών κατά τον άξονα του μήκους, ονομάζεται συστροφή των αεροτομών (blade twist) με σκοπό την ακολούθηση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου ώστε το αεροδυναμικό προφίλ κάθε αεροτομής να ακολουθεί αυτή την αλλαγή ώστε να είναι αποδοτική η σχεδίαση του στην μετατροπή της ενέργειας. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, για να αποφύγουν την πολυπλοκότητα της κατασκευής και κατά συνέπεια το υψηλό κατασκευαστικό κόστος, χρησιμοποιούν αισθητήρες που σε συνδυασμό με την πλαστικότητα των σύγχρονων συνθετικών υλικών αλλάζουν την κλίση των αεροτομών ανάλογο με τις συνθήκες.

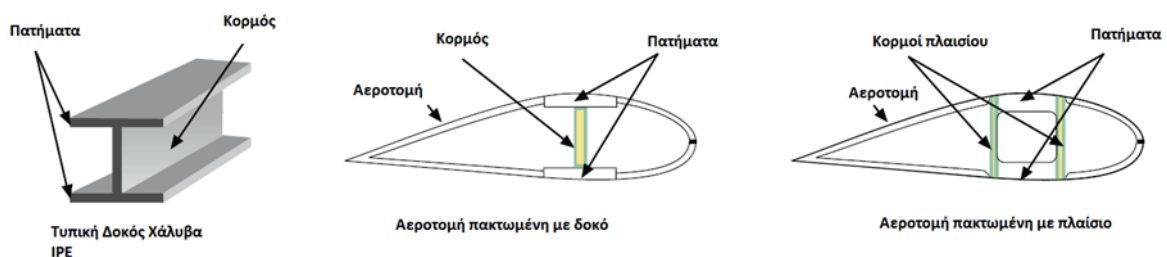
2.2 Το δομικό σύστημα του πτερυγίου

Η σχεδίαση της ανεμογεννήτριας γίνεται με έναν αρχικό συμβιβασμό μεταξύ των ιδεατών αεροδυναμικών στόχων και των κατασκευαστικών περιορισμών. Είναι ζωτικής σημασίας η διαδικασία της μελέτης και υλοποίησης της κατασκευής, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή των υλικών (και κατ' επέκταση το πόσο λεπτό θα είναι το φτερό), ο τρόπος κατασκευής και το κόστος κατασκευής. Στόχος λοιπόν είναι να συγκεραστούν όλοι οι περιορισμοί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε αποδεκτά οικονομοτεχνικά πλαίσια.

Το φτερό της ανεμογεννήτριας πέρα από τον ρόλο που επιτελεί στην παραγωγή ενέργειας δεν παύει να είναι μια δοκός. Η μια πλευρά της είναι πακτωμένη σε μια περιστρεφόμενη πλήμνη και δέχεται συνεχόμενα ριπές αέρα που προκαλούν φορτίσεις, οι οποίες με την σειρά τους προκαλούν παραμορφώσεις. Η άνωση, η δύναμη που ωθεί τα φτερά και την πλήμνη σε περιστροφή, βρίσκεται κατ αναλογία

μήκους στο φτερό, δηλαδή κοντά στην άκρη έχουμε πολύ μεγαλύτερη άνωση απ' ότι κοντά στην βάση, με αποτέλεσμα να προκαλεί κάμψη στο φτερό. Έτσι κοντά στην βάση του φτερού η ροπή κάμψης έχει τις μεγαλύτερες τιμές, ενώ στην άκρη του φτερού μηδενίζεται. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη κατασκευαστικά κοντά στην πάκτωση οι αεροτομές να είναι παχύτερες. Αυτό συμπίπτει με την αεροδυναμική σχεδίαση όπως προαναφέραμε, καθώς πλησιάζοντας στην άκρη του φτερού θα πρέπει οι αεροτομές να είναι λεπτότερες, όπου η αντίσταση είναι κρίσιμη καθώς το πλάτος της χορδής είναι μικρό.

Το εσωτερικό των αεροτομών θα μπορούσε ιδεατά να είναι συμπαγές και το ιδανικό πάχος τους σε κάθε σημείο να υπολογιζόταν από την ροπή κάμψης. Στο άκρο όπου πακτώνεται με την πλήμνη το φτερό υπόκειται σε συμπίεση, ενώ στην άκρη του σε εφελκυσμό. Στο μεσοδιάστημα όμως (μέσο του φτερού) το υλικό δεν υπόκειται ούτε σε θλίψη ούτε σε εφελκυσμό, οπότε προς χάριν οικονομίας η αεροτομή είναι κούφια. Θα μπορούσε ιδεατά να αποτελείται η αεροτομή από δυο ελάσματα άναντι και κάταντι της φοράς του ανέμου, αυτή η κατασκευή δεν θα λειτουργούσε όμως για δύο λόγους. Αφενός μεν αεροδυναμικά χρειάζεται ένα συνεχές σχήμα για να είναι αεροδυναμικά αποδοτικό, αφετέρου δε, αν όντως η αεροτομή αποτελούνταν από δυο ελάσματα μη πακτωμένα μεταξύ τους, τότε αυτά θα εμφάνιζαν σχετική ολίσθηση και θα συμπεριφερόταν σαν δυο ξεχωριστά πολύ λεπτά φτερά. Οπότε για να λειτουργήσει σωστά η κατασκευή είναι απαραίτητη η πάκτωση των δυο ελασμάτων που διαμορφώνουν την αεροτομή. Ο τρόπος με τον οποίον γίνεται αυτό είναι είτε με την χρήση δοκού είτε με την χρήση πλαισίου.



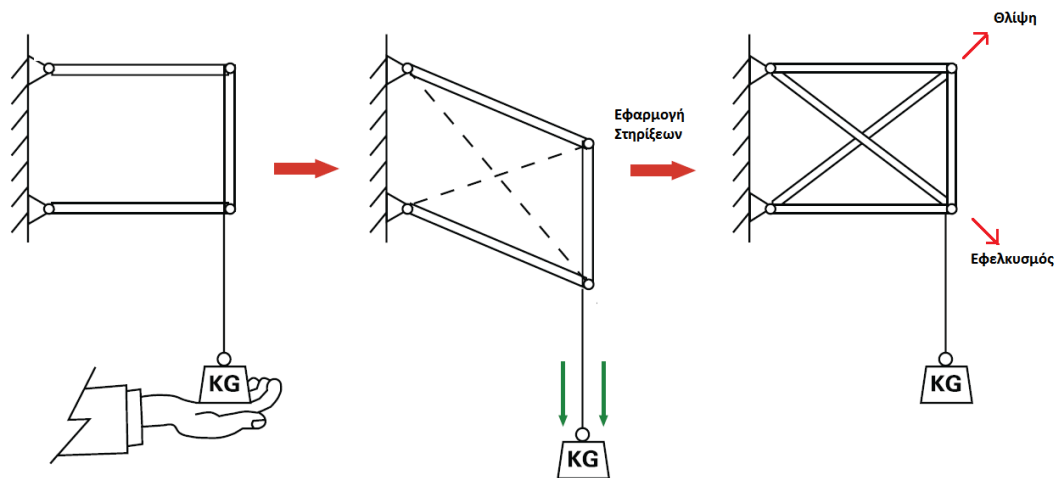
Εικόνα 2.8 Πάκτωση των αεροτομών

Η πάκτωση αυτή επιτυγχάνεται συνήθως με δυο μεθόδους κατασκευής, είτε τα πατήματα αποτελούν μέρος της αεροτομής και ενώνονται ξεχωριστά από τον κορμό, είτε τα πατήματα και ο κορμός αποτελούν ξεχωριστό κομμάτι και κολλούνται στην αεροτομή.

Σημαντικό κομμάτι στην κατασκευή αποτελεί η κατάλληλη επιλογή υλικού ώστε το τελικό αποτέλεσμα να πληροί τις προϋποθέσεις για τις οποίες κατασκευάστηκε. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες τα φτερά κατασκευάζονται από Ινοπλισμένο Πλαστικό

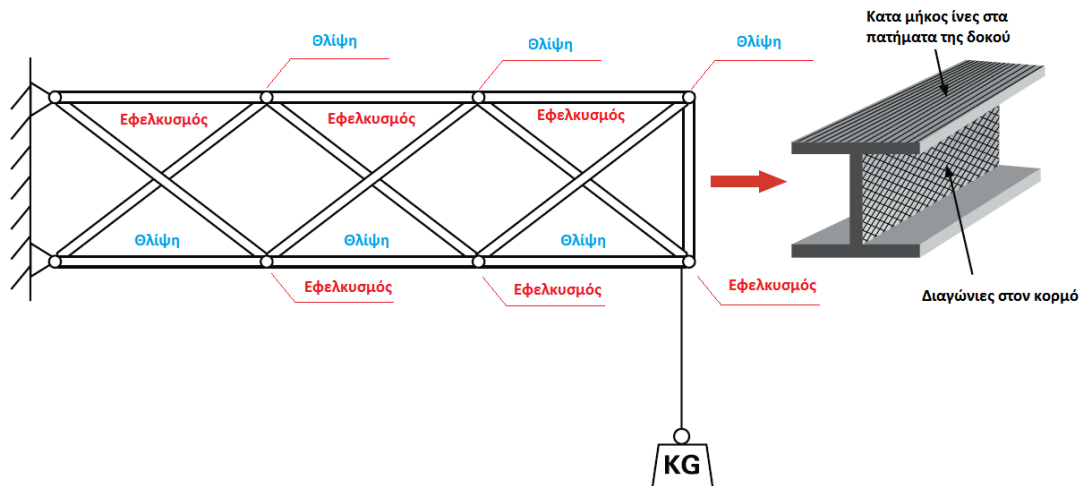
(Fibre-reinforced Plastics, FRP) και οι δοκοί στήριξης με σύνθετο υλικό τύπου Sandwich (ινώδες υλικό στα εξωτερικά τοιχώματα – υψηλής απόδοσης αφρώδες υλικό πυρήνα), όπου προσδίδει στην κατασκευή ανώτερη αντοχή σε σύγκριση με προηγούμενως χρησιμοποιούμενα υλικά όπως ξύλο ή μέταλλο.

Η σημασία των ινωδών υλικών στην αντοχή της σύνθετης δοκού είναι μεγάλη. Προκειμένω να επιτευχθούν τα επιθυμητά μηχανικά χαρακτηριστικά, οι ίνες ενισχύουν την κατασκευή με τον εξής τρόπο. Στα πατήματα οι ίνες απλώνονται κατά μήκος, ενώ στον κορμό διαγώνια με γωνία 45ο ανά κατεύθυνση. Ο τρόπος ενίσχυσης οφείλεται στην κατανομή των φορτίσεων στο πλαίσιο και στις παραμορφώσεις που υπόκειται αυτό. Ας υποθέσουμε ένα πλαίσιο από τρεις μπάρες που πακτώνονται με πείρους στις άκρες τους όπως δείχνει η Εικόνα 2.9



Εικόνα 2.9 Φόρτιση πλαισίου και παραμόρφωση

Αυτή η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί με την χρήση περισσότερων πλαισίων εν σειρά,2 αλλά πάντα πρέπει να γίνεται με την χρήση των δυο διαγώνιων στηριγμάτων (η μια δοκός υπόκειται σε εφελκυσμό και η άλλη σε θλίψη), ώστε να διατηρήσουν την ακαμψία του δικτύου. Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργούν οι ίνες στην δοκό του φτερού.



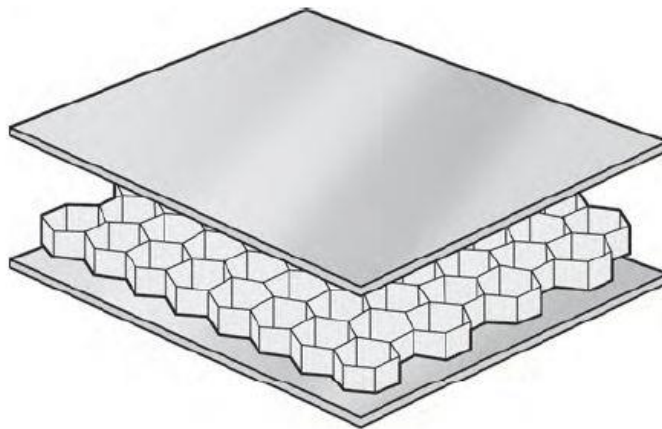
Εικόνα 2.10 Μορφολογία ενίσχυσης της δοκού

Για την κατασκευή λοιπόν της δοκού χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικών ειδών ινώδη υλικά ως δομικά στοιχεία. Στα πατήματα για την επίτευξη των αξονικών ινών χρησιμοποιούνται μονοαξονικά δομικά στοιχεία (unidirectional fabrics), ενώ στον κορμό διαξονικά δομικά στοιχεία (biaxial fabrics). Στις κάθετες δοκούς και για την καλύτερη δυνατή απόσβεση των αρμονικών φορτίων, όπως αναφέρεται παραπάνω, επιλέγεται η χρήση σύνθετων υλικών τύπου sandwich, τα οποία φέρουν εξωτερικά ινώδη υλικά και στο εσωτερικό ένα υλικό πυρήνα με τα απαραίτητα συμπληρωματικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Στο μοντέλο που θα αναλυθεί, επιλέγεται η πιο συνηθισμένη κατασκευαστική λύση. Αυτή της σύνθετης δοκού πλαισίου με την χρήση ινωδών υλικών στα πατήματα και σύνθετες κάθετες δοκούς με την χρήση υλικού τύπου sandwich. Εν συνεχεία αναλύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προς ανάλυση υλικών.

3. Υλικά του δομικού συστήματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε τους σχεδιαστικούς κανόνες – περιορισμούς που επιβάλλουν την γεωμετρία του φτερού καθώς και τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιεί το δομικό σύστημα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται από το προς δοκιμή μοντέλο, ως προς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Όλα τα υλικά όμως έχουν ένα κοινό. Είναι σύνθετα. Η σημασία των σύνθετων υλικών στις σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές είναι μεγάλη, καθώς αποτελούν υλικά που στοχευμένα έχουν δημιουργηθεί για να καλύψουν τεχνολογικές ανάγκες, συνδυάζοντας τα ιδανικά στοιχεία των επιμέρους υλικών σε κάθε εφαρμογή. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε λόγος για τα ινώδη σύνθετα υλικά. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά και ο λόγος που επιλέγονται δυο από αυτά, πολυμερή ριτίνη με ίνες υαλού (Glass Fiber Epoxy στα τοιχώματα του υλικού τύπου sandwich) και ινοπλαστικό με ίνες υαλού (E-GRP στα πατήματα της σύνθετης δοκού). Εκτενέστερα όμως θα αναφερθούν τα υλικά του πυρήνα του σύνθετου sandwich, με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους καθώς αποτελούν τους αποσβεστήρες των ταλαντώσεων και κατά συνέπεια το αντικείμενο της ανάλυσης.



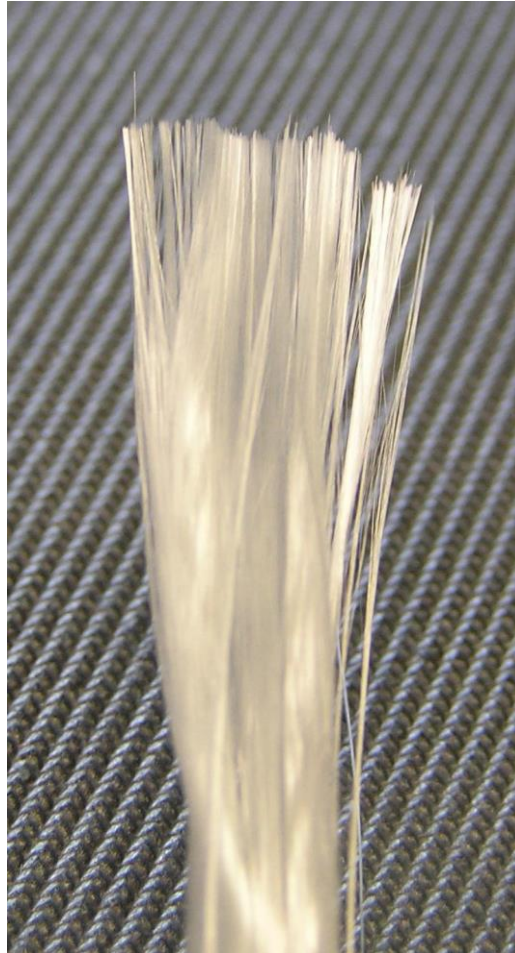
Εικόνα 3.1 Σύνθετο υλικό τύπου sandwich

3.1 Ινώδη Σύνθετα

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μια συνεχή μήτρα. Η μήτρα μπορεί να είναι είτε φυσικό υλικό, είτε τεχνητό. Οι ίνες έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό το πολύ μεγάλο λόγο μήκους/διαμέτρου και επίσης είναι πολύ πιο άκαμπτες και ανθεκτικές σε σχέση με την αντοχή τους στην συνήθη μορφή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ίνες υαλού. Τα συνηθισμένα φύλλα υαλού έχουν τάση θραύσεως μερικά MPa, σε αντίθεση με των ινών υαλού που φθάνει τα 7,0 GPa. Προφανές συμπέρασμα είναι ότι η γεωμετρία μιας ίνας παίζει καθοριστικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά της ως υλικό και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή των υλικών. Ωστόσο οι ίνες είναι πρακτικά άχρηστες αν δεν είναι τέλεια ενσωματωμένες σε μία μήτρα σε μορφή σύνθετου υλικού. Οι μήτρες προστατεύουν τις ίνες από το περιβάλλον, ενώ παράλληλα μεταφέρουν και τάσεις. Η πιο συνήθης εμπορική μορφή είναι εκείνη του πολυστρωτου σύνθετου υλικού, με την στρωμάτωση σε μορφή πολυστρωτου σύνθετου υλικού (laminated composite). Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούμε δυο τύπους ινώδους σύνθετου υλικού Fibergalss, μια ενισχυμένη εποξική ρητίνη για τα τοιχώματα της σύνθετης κάθετης δοκού και του E-GRP τύπου fiberglass. Τα υλικά αυτά αποτελούν συμπληρωματικά στοιχεία της κατασκευής και σε όλες τις προσομοιώσεις είναι αναλλοίωτα.

3.1.1 Fiberglass

Το FRP είναι συνήθως ενισχυμένο πολυμερές, με την χρήση ινών υαλού (fiberglass). Οι ίνες αυτές μπορεί να ποικίλουν σε μορφή καθότι αποτελούν μίγματα των SiO_2 (διοξείδιο του πυριτίου), Al_2O_3 (οξείδιο του αργιλίου ή αλουμίνα), B_2O_3 (τριοξείδιο του Βορίου), CaO (οξείδιο του ασβεστίου), ή MgO (οξείδιο του Μαγνησίου). Τα οξείδια αυτά σε μορφή σκόνης, αφού γίνουν μείγμα, με την σύσταση να ποικίλει ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες, θερμαίνεται στους 1300-ο C και ομογενοποιείται. Με την χρήση ειδικών μητρών μετέπειτα εξάγονται τα νήματα με κυμαινόμενη διάμετρο από 9 ως 17 μm .



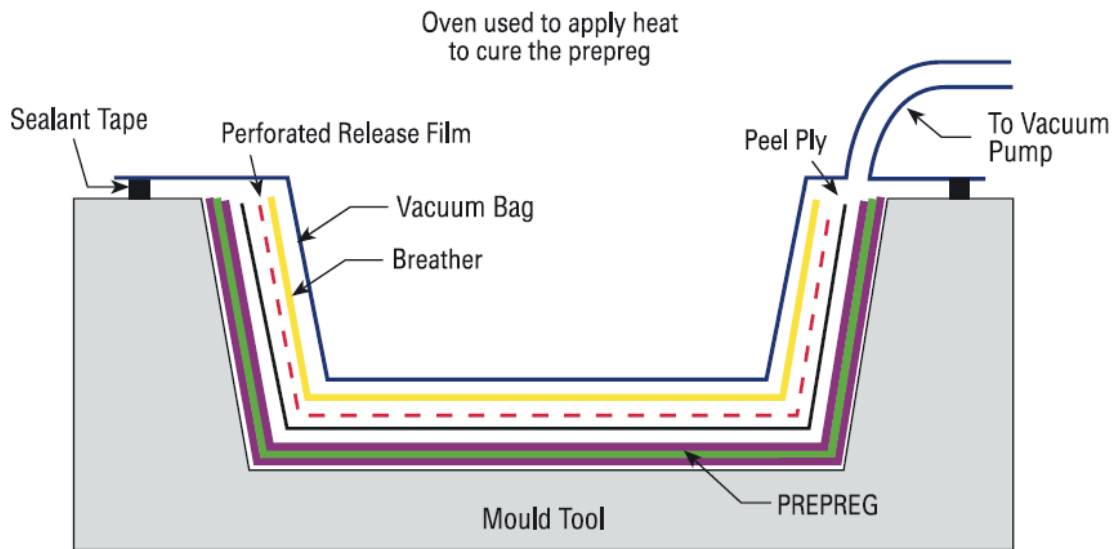
Εικόνα 3.2 Νήμα Fiberglass

Η ενίσχυση των πολυμερών γίνεται συνήθως με ιστώδη μορφή. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε 2 ειδών ενισχυμένα FRP υλικά. Στην περίπτωση του εξωτερικού υλικού των δοκών έχουμε μια εποξική ρητίνη ως υλικό μήτρας με διαγώνια διεύθυνση (45^0) ινών, ενώ στα πατήματα E-GRP με οριζόντια διεύθυνσή (0^0).

3.1.2 Μέθοδος παρασκευής του σύνθετου υλικού

Συνήθως τα υλικά αυτά παράγονται με την χρήση της τεχνικής χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (RTM) ή παραλλαγές τους. Στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών συνήθως ακολουθείται η ακόλουθη παραλλαγή. Η ρητίνη μεταφέρεται σε ασκό κενού με υποβοήθηση από το κενό. Οι στρώσεις της ξηρής ενίσχυσης, τοποθετείται σε στρώσεις σε ένα ανοικτό καλούπι. Στη συνέχεια κατασκευάζεται γύρω τους ο ασκός του κενού, με την τοποθέτηση στρώσεων αντικολλητικού φιλμ και κάποιο είδους ύφασμα που να επιτρέπει την κυκλοφορία του αέρα. Ακολουθεί τοποθέτηση με χρήση στεγανωτικής ταινίας ένα ανθεκτικό φύλλο πολυμερούς το οποίο και

μονώνεται από την ατμόσφαιρα. Μετά την στεγάνωση του συστήματος, η ρητίνη διοχετεύεται στο σύστημα των στρώσεων.

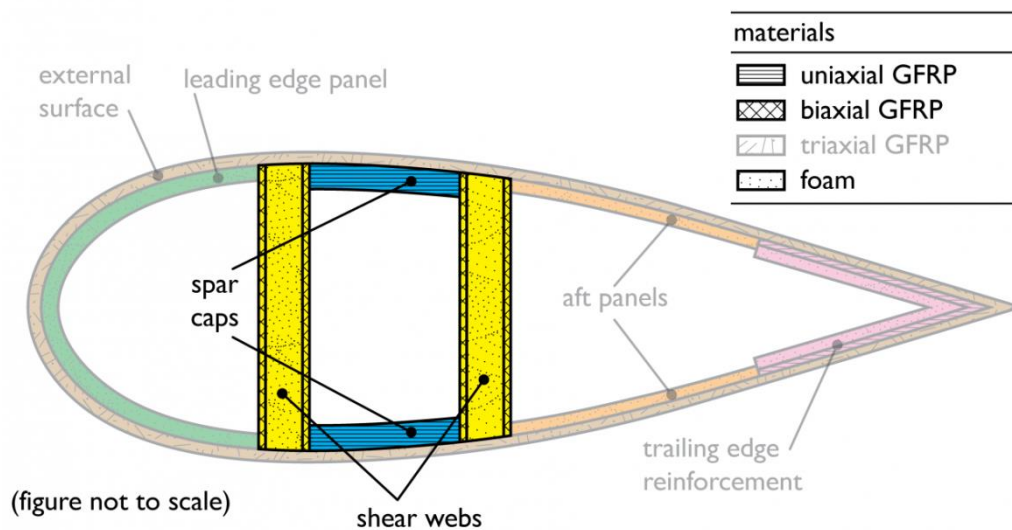


Εικόνα 3.3 Μέθοδος χύτευσης ρητίνης με κενό

Η ροή της ρητίνης υποβοηθάται και από το στρώμα διαπνοής, το οποίο επιτρέπει την κυκλοφορία της ρητίνης στα επιφανειακά στρώματα ενίσχυσης. Η άσκηση κενού από την αντλία κενού, βοηθά στην κυκλοφορία της ρητίνης με τα ταυτόχρονα απορρόφηση του πλεονάζοντος αέρα και των αέριων μονομερών, υπο-παραγώγων του πολυμερισμού.

3.2 Τα προς μελέτη υλικά – Τα υλικά του πυρήνα

Στο δομικό σύστημα του φτερού της ανεμογεννήτριας, έχει επιλεγεί ένα σύνθετο σύστημα πλαισίου, με σύνθετες κάθετες δοκούς (shear webs) και πατήματα (spar caps) από σύνθετο ινοπλισμένο πλαστικό (E-GRP). Η δομή του σύνθετου πλαισίου φαίνεται από την τομή της αεροτομής (εικόνα 3.3).

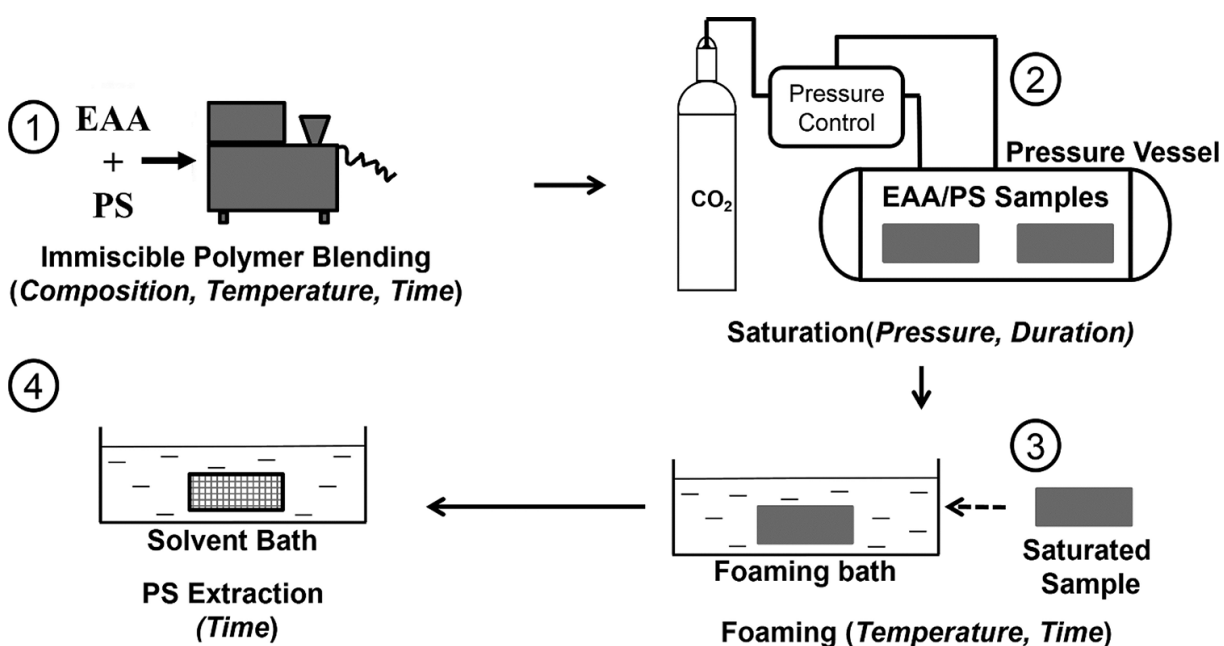


Εικόνα 3.4 Τομή της αεροτομής

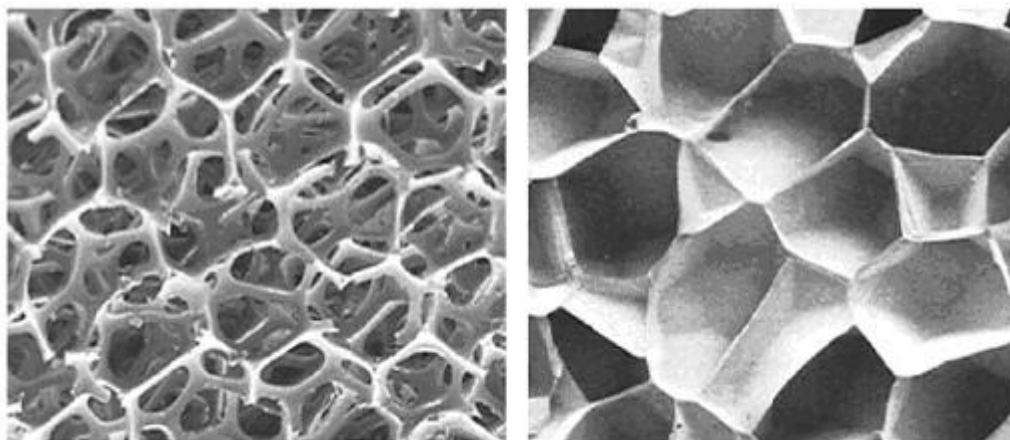
Όπως φαίνεται από την τομή, οι κάθετες δοκοί είναι τύπου sandwich. Δηλαδή είναι ένα σύνθετο υλικό, αποτελούμενο από 2 εξωτερικές στρώσεις ινοπλισμένου υλικού (face material) και ενός εσωτερικού αφρώδους υλικού (core material). Ο λόγος της σύνθεσης είναι διπλός. Αφενός μεν παραλαμβάνει τις φορτίσεις της κατασκευής, αφετέρου δε με την χρήση αφρώδους υλικού στον πυρήνα επιτυγχάνεται καλύτερη απορρόφηση των αρμονικών φορτίων και η απόσβεση του πλάτους που προκαλούν. Αυτά τα υλικά και η ιδιότητα της απόσβεσης είναι προς ανάλυση στην παρούσα διπλωματική. Θα συγκριθούν 3 διαφορετικά υλικά, ένας αφρός πολυμερούς, ένας αφρός αλουμινίου και ένας τύπος αυξητικού υλικού. Σε αυτό το εδάφιο αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία τους.

3.2.1 Αφρώδες πολυμερές

Πολλά πλαστικά μπορούν να διογκωθούν και να πάρουν την μορφή αφρού με την χρήση πρόσθετων διογκωτικών, με αποτέλεσμα την δημιουργία κυψελωτού πυρήνα και σκληρού περιβλήματος. Το νέο υλικό αυτό έχει υψηλή ειδική αντοχή (λόγος αντοχής – βάρους), γεγονός που το κάνει ιδανικό για δομικές κατασκευές, αφού προσφέρει υψηλή αντοχή χωρίς να προσθέτει βάρος στην κατασκευή. Η αφρώδης δομή του υλικού επιτυγχάνεται με την διάχυση αδρανούς αερίου μέσα στην ρευστή ρητίνη λίγο πριν την φάση της μορφοποίησης.

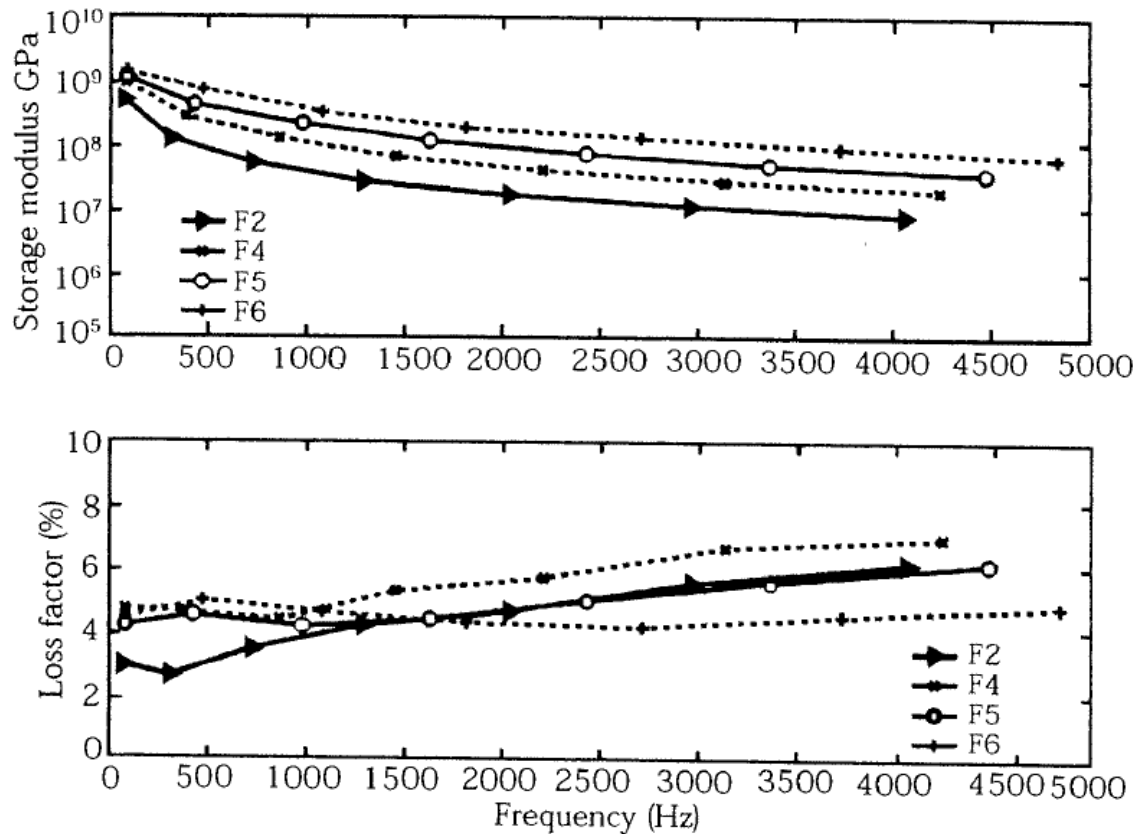


Εικόνα 3.5 Διαδικασία παραγωγής Αφρώδες Πολυμερούς



Εικόνα 3.6 Κυψέλη αφρώδους πολυμερούς

Σαν αντικείμενο ανάλυσης στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ένα αντιπροσωπευτικό αφρώδες πολυμερές της οικογένειας των πολυαιθυλενών. Έπειτα από σχετική μελέτη για την χρήση του και την λειτουργία του ως αποσβεστήρας ταλαντώσεων το συγκεκριμένο πολυμερές παρουσιάζει την συμπεριφορά που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (το υλικό F5).



Εικόνα 3.7 Η Δυναμική συμπεριφορά και η διακύμανση του αφρώδους πολυμερούς

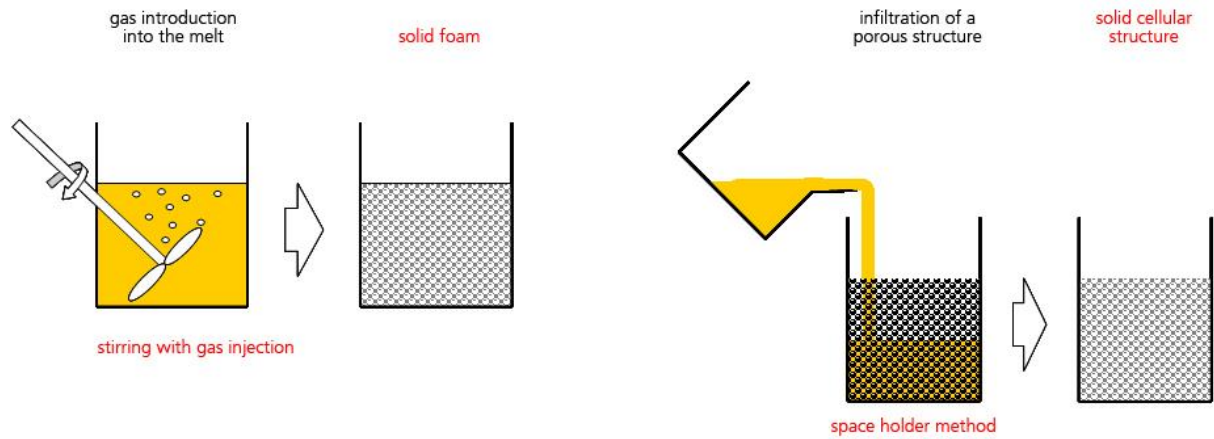
3.2.2 Αφρός Αλουμινίου

Μια ακόμα οικογένεια υλικών που διογκώνονται, με σκοπό την διατήρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους στον καλύτερο δυνατό βαθμό, σε συνδυασμό με την βελτίωση του βάρους τους για την χρήση τους σε κατασκευές, είναι και τα μεταλλα.



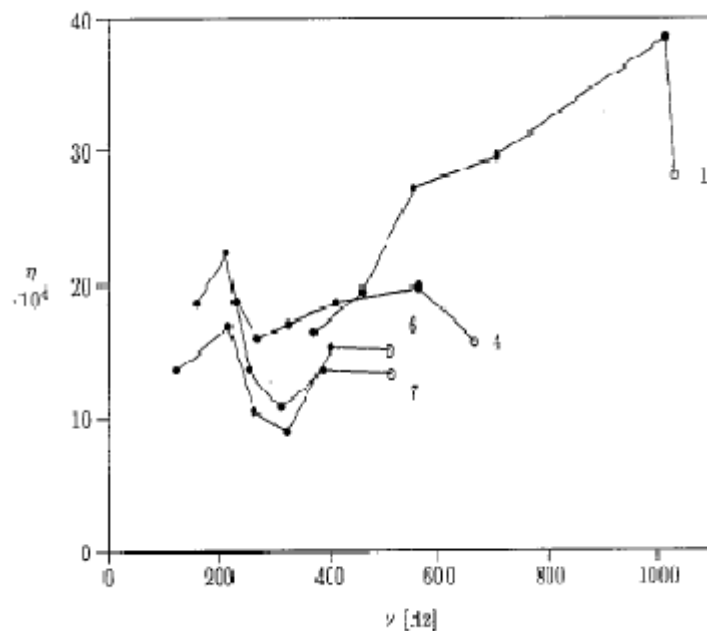
Εικόνα 3.8 Αφρός αλουμινίου

Η παραγωγή του αφρού του αλουμινίου μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Ο ένας είναι εφάμιλλος με αυτόν του αφρώδους πολυμερούς, Κράμα αλουμινίου προσμίγεται με διογκωτικό αέριο. Ένας άλλος τρόπος είναι η περίχυση του κράματος σε μια πορώδη μήτρα και στην συνέχεια η αφαίρεση του αφρού.



Εικόνα 3.9 Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής

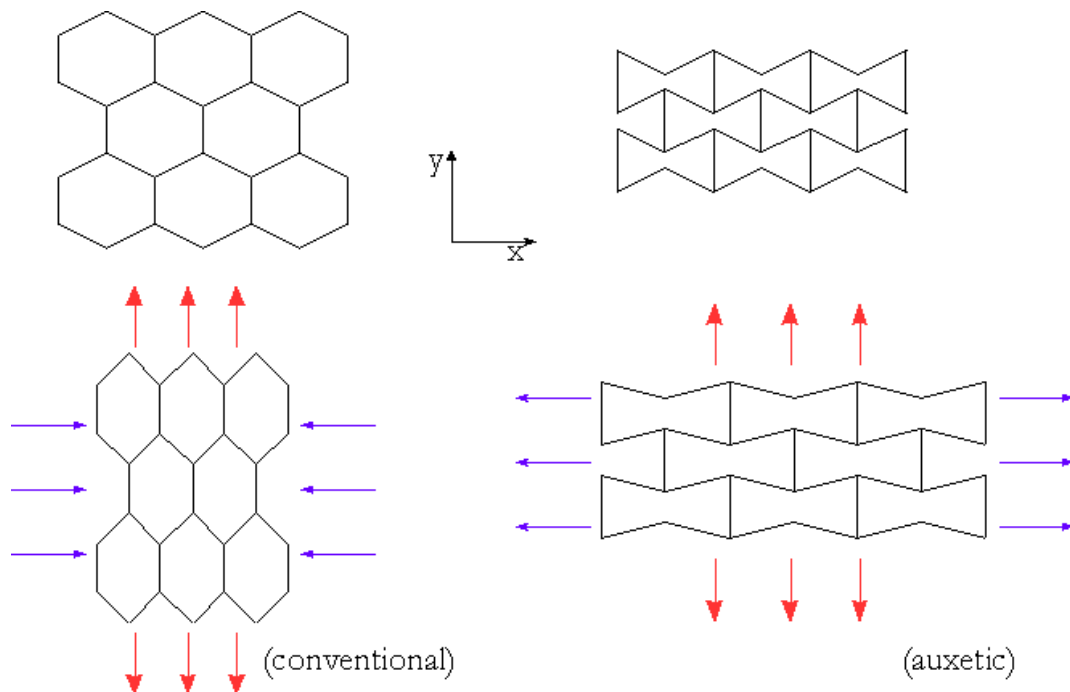
Ένα μεγάλο πλεονέκτημα του αφρού αλουμινίου είναι ότι έχουν πολύ μικρό συντελεστή απωλειών και επίσης ως υλικό είναι ομοιογενές. Στα αρνητικά συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος παραγωγής, το οποίο περιορίζει την χρήση του σε υψηλής απόδοσης εφαρμογές. Παρακάτω παρατίθεται ένα αντίστοιχο διάγραμμα του συντελεστή απωλειών του αφρώδους αλουμινίου για χρήση ως υλικού πυρήνα σε εφαρμογές σύνθετου υλικού τύπου sandwich.



Εικόνα 3.10 Συντελεστής απωλειών αφρού αλουμινίου

3.2.3 Αυξητικό υλικό με μικροδομή αστέρα

Σαν τελική δοκιμή υλικού για την απόσβεση αρμονικού φορτίου θα χρησιμοποιήσουμε ένα αυξητικό υλικό με μικρο-δομή αστέρα. Τα προηγούμενα υλικά είναι σχετικά συμβατικά, με την έννοια ότι κινούνται στις θετικές τιμές του λόγου Poisson. Αυξητικό είναι το υλικό που επιτυγχάνει αρνητικές τιμές του λόγου Poisson. Ως αποτέλεσμα είναι να επιδεικνύει αντίθετες συμπεριφορές από τις αναμενόμενες κατά την φόρτιση. Δηλαδή κατά τον εφελκυσμό αυξάνει την διατομή του, εν αντιθέσει με την μείωση που προκύπτει στα υλικά με θετικό λόγο Poisson (εικόνα 3.11). Για τον λόγο αυτό λέγονται και αυξητικά.

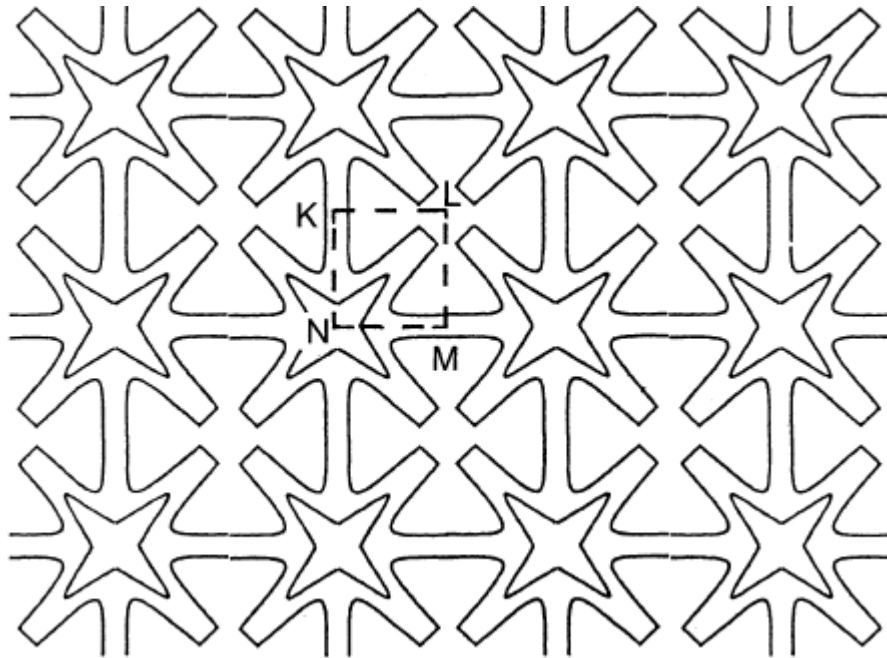


Εικόνα 3.11 Αυξητικά υλικά εν συγκρίσει με τα συμβατικά

Επειδή τα αυξητικά υλικά, πέραν της παραδοξότητας που εμφανίζουν κατά την φόρτιση, εμφανίζουν τα εξής μηχανικά χαρακτηριστικά :

- Αυξημένη διατμητική ακαμψία
- Αυξημένη αντοχή
- Αυξημένη σκληρότητα

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αυξητικών υλικών προκύπτουν από τις μη ομογενοποιημένες μικροδομές τους. Για την ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων εξαιτίας της ετεροδομής στην μικροκλίμακα χρησιμοποιούνται τεχνικές αριθμητής ομογενοποίησης.



Εικόνα 3.12 Η μικροδομή του αυξητικού υλικού

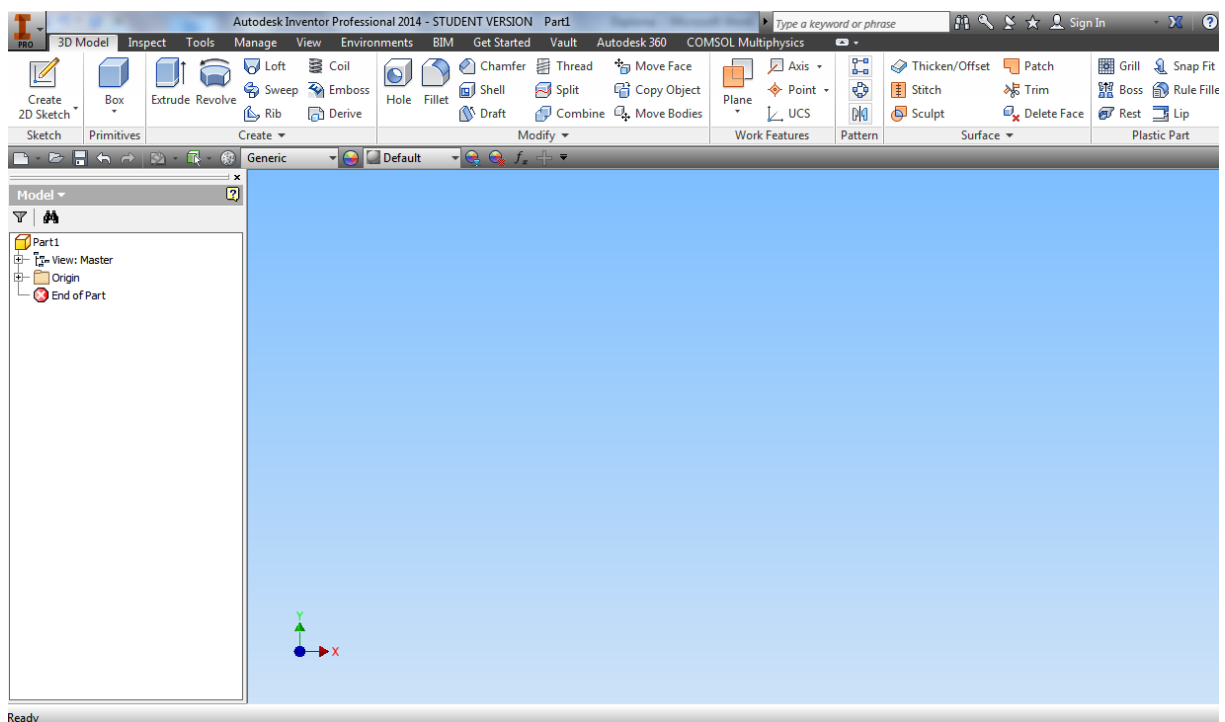
Για την επίτευξη της αυξητικής ιδιότητας, η μικροδομή πρέπει να έχει ιδιομορφία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζουμε την δημιουργία μιας μικροδομής τύπου αστέρα (εικόνα 3.12), με αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες με τα προηγούμενα υλικά. Σκοπός μας είναι να εξάγουμε πληροφορίες για το πώς τα αυξητικά χαρακτηριστικά που προσδίδει η ιδιαιτερότητα της μικρο-δομής, επιδρούν ως αποσβεστήρες κατά την απορρόφηση αρμονικών φορτίσεων.

4. Κατασκευή του μοντέλου

Αφού έχουν περιγραφεί οι σχεδιαστικές αρχές και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν από το τρισδιάστατο μοντέλο, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μέθοδος κατασκευής του φτερού της ανεμογεννήτριας. Το μοντέλο κατασκευάζεται στο σχεδιαστικό CAD λογισμικό Autodesk Inventor.

4.1 Autodesk Inventor

Το Autodesk Inventor είναι ένα από τα κορυφαία προγράμματα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD. Στην εργασία αυτή για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιείται η έκδοση 2014 (εικόνα 4.1)



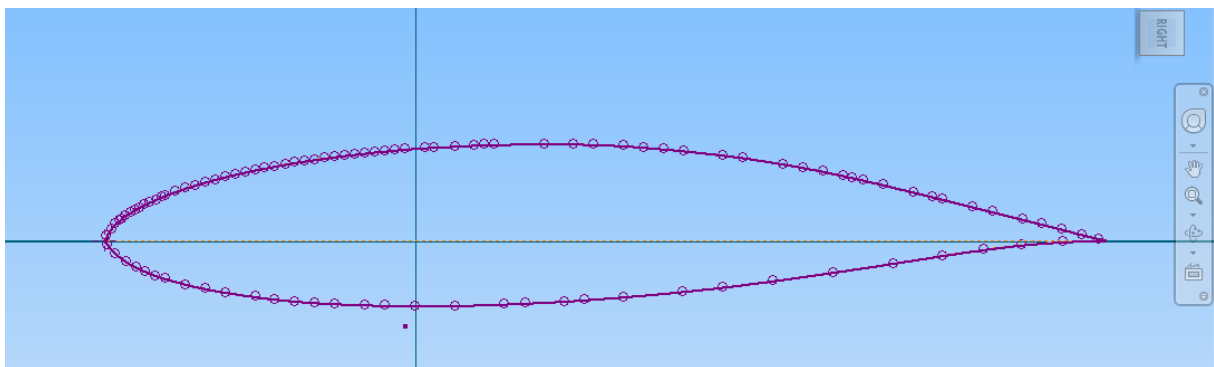
Εικόνα 4.1 Το περιβάλλον εργασίας του Autodesk 2014

Σαν πρόγραμμα χαρακτηρίζεται για το φιλικό για τον χρήστη περιβάλλοντος εργασίας και την ευκολία σχεδιασμού. Ο τύπος των αρχείων που δουλεύει είναι iprt για τα επιμέρους τμήματα και iam στις συναρμολογήσεις, ωστόσο δύναται η δυνατότητα να εξαχθούν τα αρχεία σε πιο γενικές μορφές CAD αρχείων. Εντάσσεται

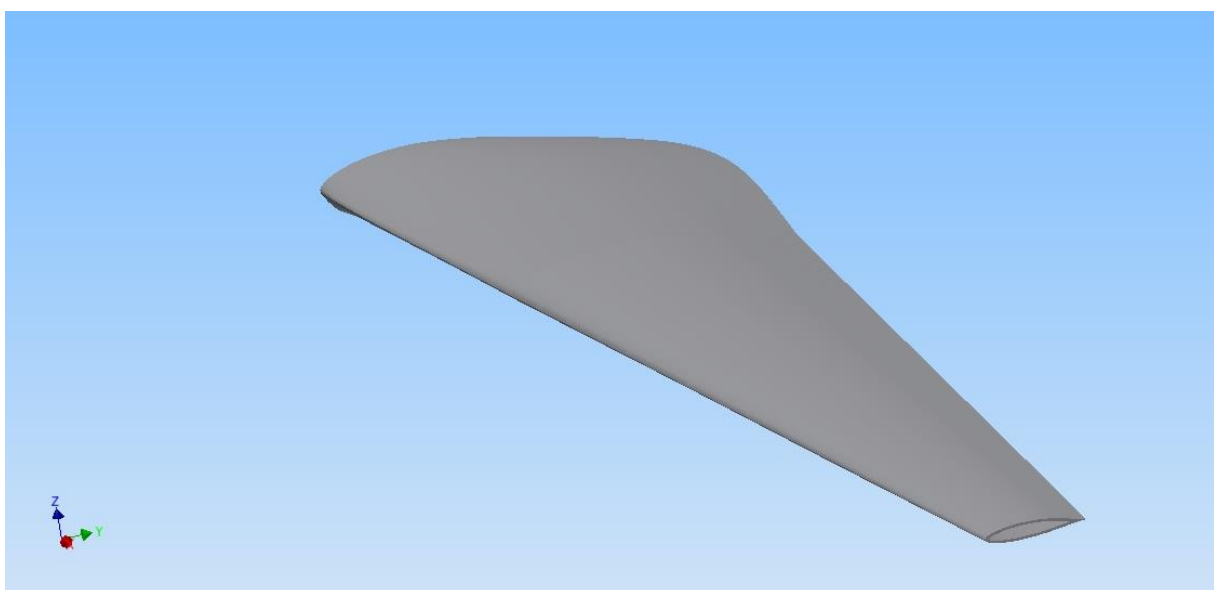
στο γενικότερο πλαίσιο των λογισμικών της Autodesk με πιο γνωστό το Autocad, έχοντας μεγάλη ικανότητα διεπαφής με την αντίστοιχη πλατφόρμα.

4.2 Υλοποίηση

Με βάση τις σχεδιαστικές αρχές που περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 υλοποιείται η κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου. Η κατασκευή γίνεται με την χρήση του Multibody Part, όπου ένα σύνθετο κομμάτι κατασκευής με πολλά διαφορετικά στερεά σώματα και πολύπλοκη γεωμετρία δύναται να κατασκευαστεί σχετικά απλά. Αρχικά σχεδιάζεται το κέλυφος και μετά το εσωτερικό δομικό σύστημα του φτερού. Σαν βάση σχεδίασης επιλέγεται μια αεροτομή τυπικής μορφής (εικόνα 4.2). Με απλές εντολές δημιουργείται το κέλυφος (εικόνα 4-3).

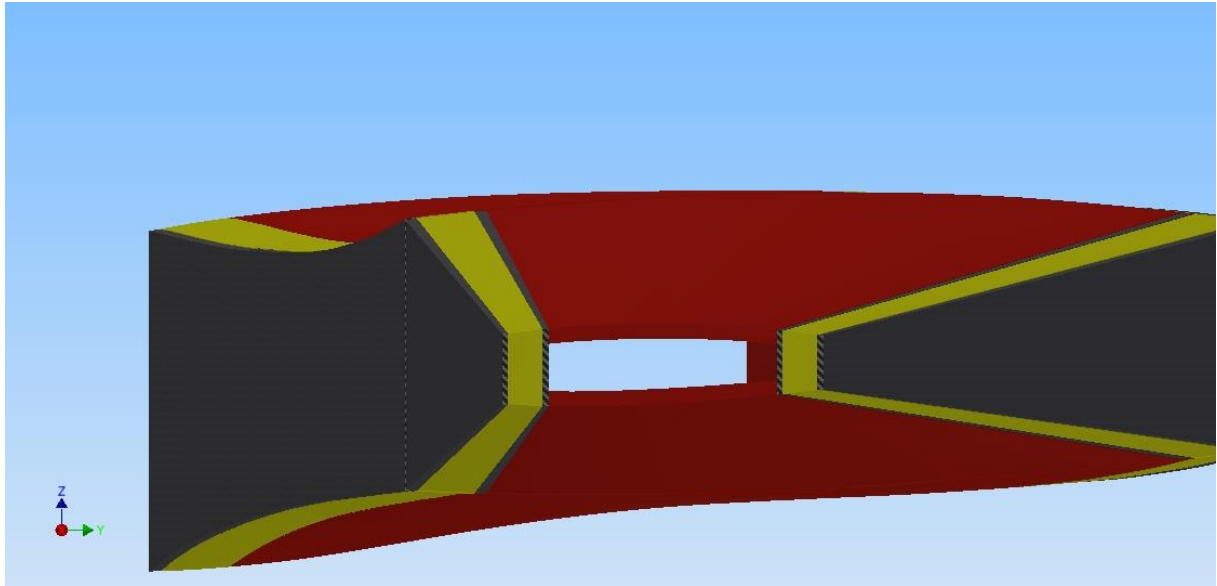


Εικόνα 4.2 Το περίγραμμα της αεροτομής του κελύφους



Εικόνα 4.3 Κέλυφος σε τυχαία όψη

Εν συνεχεία κατασκευάζεται με βάση την γεωμετρία του κελύφους το σύστημα στήριξης. Το δομικό πλαίσιο του φτερού της ανεμογεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 4.4 και αποτελείται από 3 υλικά.



Εικόνα 4.4 Προφίλ του δομικού συστήματος

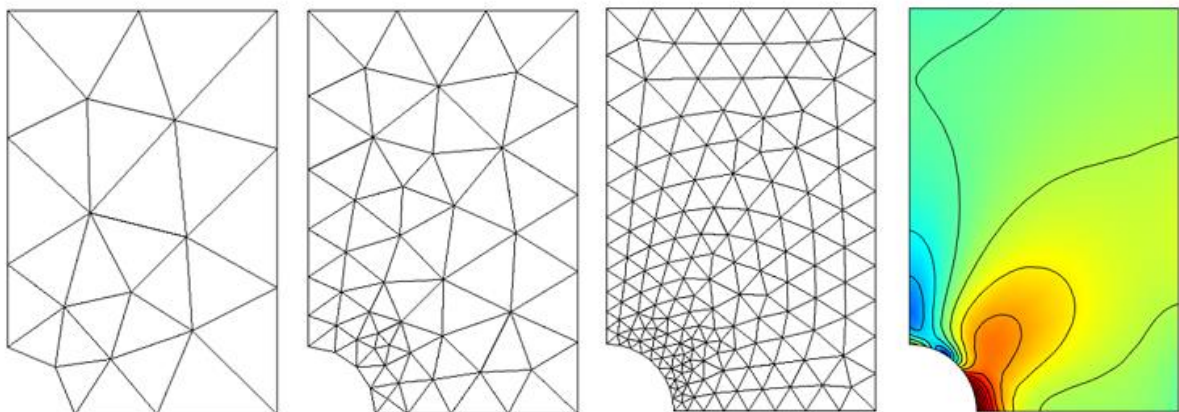
Από την παραπάνω φωτογραφία φαίνεται με διακριτούς χρωματισμούς τα επιμέρους υλικά. Με κόκκινο είναι το E-GRP υλικό των πατημάτων (spar caps), με το ανθρακί είναι το FRP υλικό που χρησιμοποιείται ως εξωτερικό υλικό στις σύνθετες κάθετες δοκούς (shear webs), ενώ με κίτρινο το υλικό πυρήνας στις σύνθετες δοκούς που θα έχει τρεις εκδοχές, αφρώδες πολυμερές, αφρό αλουμινίου και αυξητικό υλικό. Το κίτρινο χρωματισμένο υλικό αποτελεί τον αποσβεστήρα του συστήματος.

5. Προσομοίωση του μοντέλου

Αφού έχει κατασκευαστεί το μοντέλο στο Inventor, σειρά έχει η προσομοίωση του στις ιδιαίτερες συνθήκες που εξετάζεται και στην συνέχεια η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η προσομοίωση θα γίνει από το COMSOL και συγκεκριμένα την έκδοση 4.3b.

5.1 Comsol Multiphysics – Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Το λογισμικό μοντελοποίησης COMSOL είναι ένας επιλυτής προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων με προκαθορισμένες περιπτώσεις ευρέου φάσματος προβλημάτων της φυσικής. Ως γνωστόν η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική μέθοδος επίλυσης σύνθετων προβλημάτων που η αναλυτική λύση είναι είτε πολύ δύσκολη, είτε τα αποτελέσματα μπορεί να απέχουν από την πραγματική συμπεριφορά του εξεταζόμενου προβλήματος. Ως μέθοδος ανάλυσης, μια περίπλοκη περιοχή, η οποία ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στα στοιχεία αυτά θεωρούνται οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις και εκφράζονται σε όρους άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων.



Εικόνα 5.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος αυτή εξελίχθηκε από τις εξελίξεις στην δοκιμή ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Henrikoff παρουσίασε μια λύση των προβλημάτων ελαστικότητας με την χρήση της μεθόδου των δικτυωμάτων. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία εισάγεται για

πρώτη φορά το 1960 από τον Clough. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970, η μέθοδος χρησιμοποιείται για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του 1970 και η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων επεκτάθηκε και σε μη γραμμικά προβλήματα. Σήμερα, λογισμικά όπως το Comsol επιλύουν με την χρήση ΗΥ πολυσύνθετα και μεγάλου υπολογιστικού φόρτου προβλήματα, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των επεξεργαστών.

Το Comsol και ειδικά στην έκδοση 4.3b, περιλαμβάνει επιλυτές μεγάλου εύρους φυσικών προβλημάτων. Μερικοί από αυτούς αφορούν :

- Μηχανική των Στερεών
- Ηλεκτρισμού
- Χημείας
- Ακουστικής
- Λεπτών Φίλμ
- Πιεζοηλεκτρισμού
- Μοριακής ροής
- Ροής Ρευστών

Η σημασία του μεγάλου εύρους των επιλυτών έγκειται στο γεγονός ότι το σύνολο των ζητούμενων εξισώσεων που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος, είναι προκαθορισμένο από πριν και δεν χρειάζεται ο χρήστης να περιγράψει ο ίδιος τις εξισώσεις. Καινοτομίες υπάρχουν επίσης και στην σχεδίαση των προς ανάλυση μοντέλων, χωρίς ωστόσο να μπορεί άμεσα να ανταγωνιστεί στην λεπτομέρεια και την ακρίβεια προς το παρών τα σύγχρονα CAD λογισμικά.

Η μεθοδολογία της εργασίας με το Comsol έχει την ακόλουθη ροή και σε αυτήν την εργασία ακολουθήθηκε :

- Εισαγωγή γεωμετρίας από σύστημα CAD
- Καταχώρηση των δεδομένων των υλικών
- Διαμόρφωση των δεδομένων της επίλυσης, επιλογή επίλυσης
- Διαμόρφωση του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων
- Επίλυση και εξαγωγή αποτελεσμάτων

5.2 Η δυναμική ανάλυση της κατασκευής

Το αντικείμενο είναι η σύγκριση τριων υλικών ως προς την απόσβεση τους σε ένα σύνθετο σύστημα στήριξης δοκού φτερού ανεμογεννήτριας, με την μορφή του πλαισίου. Η δυναμική ανάλυση του μοντέλου θα γίνει με τον εξής τρόπο:

Επιβάλλεται στο σώμα ένα αρμονικό φορτίο με πλάτος

$$F_x = 500 \text{ kN}$$

Το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν την δυναμική ανάλυση που ακολουθεί

$$-\rho\omega^2 - \nabla\sigma = F_x e^{i\varphi} \quad (1)$$

$$\sigma = s \quad (2)$$

$$s - s_0 = C: (\varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_{inel}) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (4)$$

$$C = C(E, \nu) \quad (5)$$

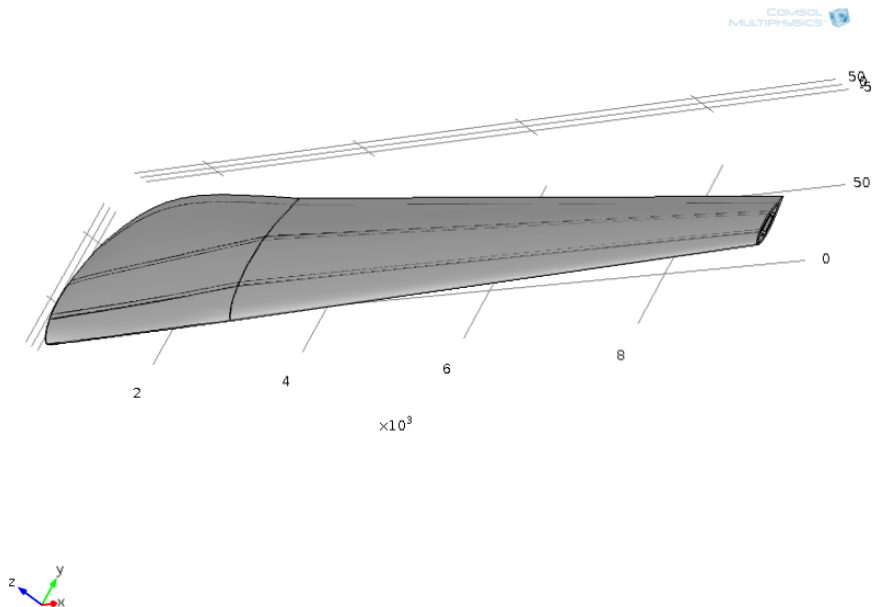
$$C \rightarrow (1 + j\eta_s)C \quad (6)$$

Η εξίσωση (1) περιγράφει το σύστημα υπό την επίδραση του αρμονικού φορτίου. Οι εξισώσεις (2), (3) αναφέρονται στην σχέση τάσης- παραμόρφωσης και η (4) στην σχέση παραμόρφωσης μετατόπισης. Ο τελεστής απόκρισης όπως φαίνεται στην εξίσωση (5) είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας E και του λόγου poisson και στην περίπτωση απόσβεσης και του συντελεστή απωλειών του υλικού.

6. Δυναμική ανάλυσης της κατασκευής

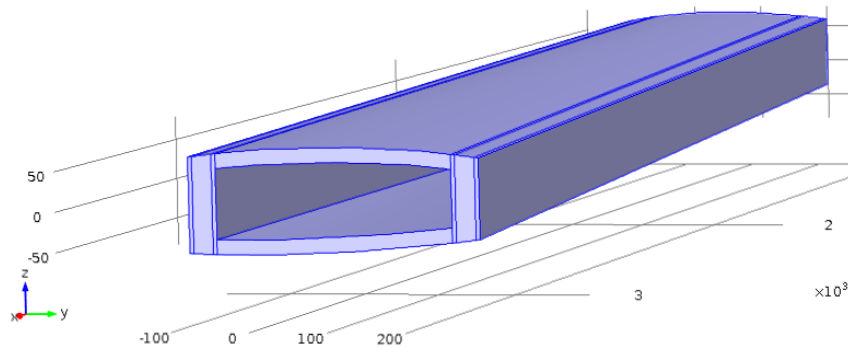
6.1 Η γεωμετρία της ανάλυσης

Το σχεδιασμένο στο Inventor μοντέλο, εισάγεται πλέον στο περιβάλλον του Comsol 4.3b με την χρήση του CAD Import Kernel. Το αποτέλεσμα της εισαγωγής φαίνεται στην εικόνα 6-1.



Εικόνα 6.1 Το μοντέλο στο σύνολο του

Το σύνολο του μοντέλου περιλαμβάνει στοιχεία πολύ λεπτά που στην αναζήτηση της ιδιότητας των υλικών ως αποσβεστήρες ταλαντώσεων και στην μεταξύ τους σύγκριση, δεν έχει καμία επίδραση, πέραν από την αύξηση του φόρτου υπολογισμού εξαιτίας των πολλών πεπερασμένων στοιχείων που χρειάζεται να δημιουργηθούν για την μη δημιουργία ασαφειών στην γεωμετρία. Οπότε κρατούμε από το σύστημα της στήριξης το τμήμα βάσης (εικόνα 6-2). Το Comsol έχει αυτόματα ορίσει κάθε τμήμα ως στερεό και με τις πληροφορίες από το Inventor ορίζει τις μεταξύ τους σχέσεις.



Εικόνα 6.2 Το Δομικό Σύστημα της βάσης

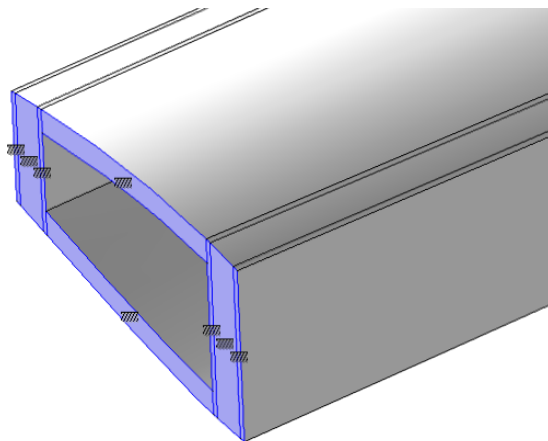
6.2 Ανάθεση υλικών

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι κάθε φορά 3. Συγκεκριμένα στις κάθετες δοκούς χρησιμοποιούμε σύνθετο υλικό τύπου sandwich όπου το εξωτερικό υλικό είναι σύνθετο ινώδες Glass Fiber και το εσωτερικό του θα έχει 3 εναλλακτικές εκδοχές όπου θα συγκριθεί η μεταξύ τους επίδοση. Αρχικά θα είναι από αφρό πολυμερών, εν συνεχεία τοποθετείται ως υλικό αφρώδες αλουμίνιο (DuoCell Aluminum Foam) που χρησιμοποιείται στις τελευταίες αεροδιαστημικές εφαρμογές και εμφανίζει λόγο Poisson πολύ κοντά στο 0 και εν συνεχεία αυξητικό υλικό με σχήμα αστέρα, με αρνητικό λόγο Poisson. Στα πατήματα (spar caps) το σύνθετο υλικό είναι ινώδες υαλοπλαστικό GRP. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα.

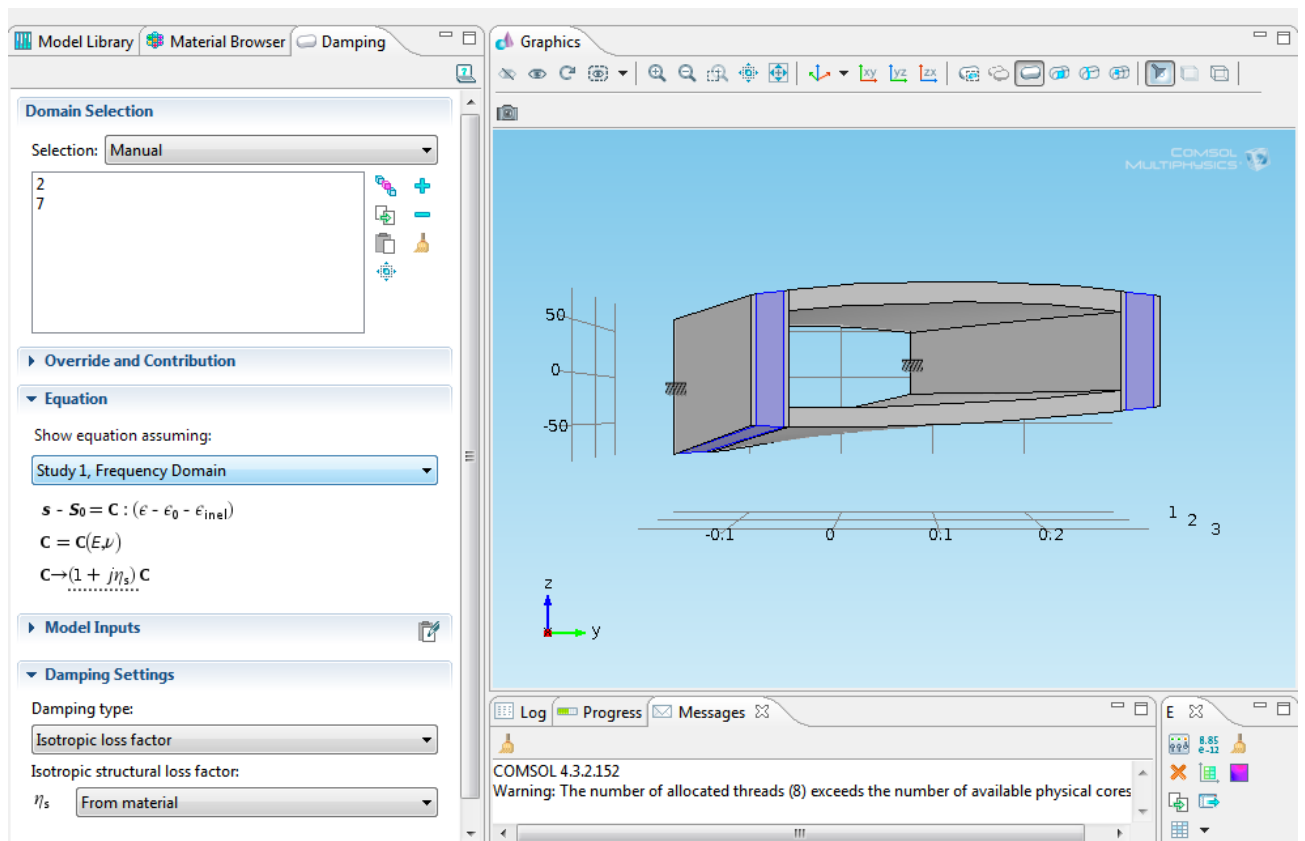
Πίνακας 1 Μηχανικών Ιδιοτήτων Υλικών				
Υλικό	E (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)	η
Glass Fiber Plastic	$70 \cdot 10^3$	0.259	$2,80 \cdot 10^3$	
Polymer Foam	$27 \cdot 10^3$	0,34	270	0,04
Aluminum Foam	$83 \cdot 10^3$	0,05	324	0,0001
Auxetic material with star shaped microstructure	$100 \cdot 10^3$	-0,35	270	0,02
E- GRP	2,3	0,25	2720	

6.3 Ορισμός των αρχικών συνθηκών

Η δυναμική ανάλυση της κατασκευής γίνεται με την χρήση του Frequency Domain Solver του Comsol Multiphysics 4.3b και θα γίνει με την επιβολή αρμονικού φορτίου στην κατασκευή. Οι αρχικές συνθήκες της κατασκευής καθώς και το μέγεθος του φορτίου, είναι κοινή παράμετρος για όλες τις προσομοιώσεις Αρχικά, η μία άκρη της σύνθετης δοκού είναι πακτωμένη (εικόνα 6-3). Επίσης ορίζονται τα τμήματα της δοκού που αποσβένουν το αρμονικό φορτίο(εικόνα 6-4)

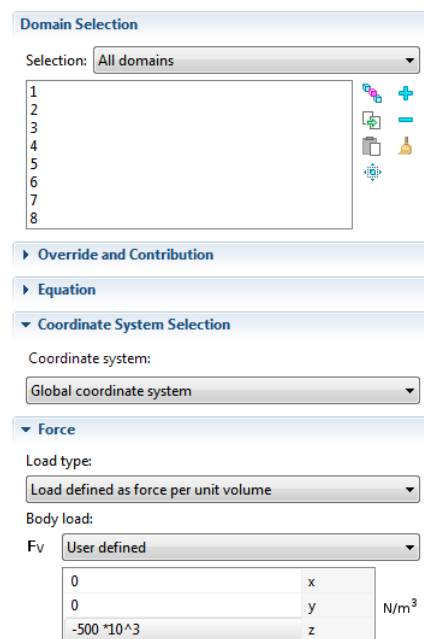


Εικόνα 6.3 Συνοριακές Συνθήκες δοκού – Πάκτωση



Εικόνα 6.4 Η απόσβεση ορίζεται στα εσωτερικά υλικά των κάθετων δοκών

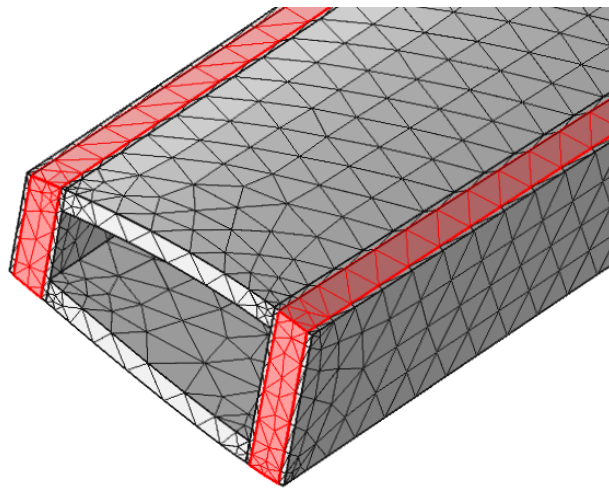
Εν συνεχεία το φορτίο υπόκειται σε ολική καταπόνηση (body load) αρμονικού φορτίου με μέτρο ίσο με 500 kN κατά τον άξονα z (εικόνα 4).



Εικόνα 6.5 Η φόρτιση της κατασκευής

6.4 Πλέγματοποίηση

Αφού έχουν ορισθεί οι αρχικές συνθήκες της ανάλυσης, προχωράμε στην δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής. Επειδή η κατασκευή είναι τρισδιάστατη επιλέγουμε σαν βασικό στοιχείο του πλέγματος τα τετράεδρα. Το ολικό πλέγμα της σύνθετης δοκού αποτελείται από 3 υπο-πλέγματα που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα στοιχεία της σύνθετης δοκού. Ειδικότερα στο πλέγμα που αντιστοιχεί στο εσωτερικό υλικό των κάθετων δοκών (εικόνα 6-6), επιλέγουμε *extremely fine* ως μέγεθος δημιουργίας πλέγματος. Σκοπός του μεγέθους αυτού είναι να έχουμε την καλύτερη ποιότητα των εξαγόμενων μεγεθών, καθότι όσο περισσότερα στοιχεία έχουμε, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά και φόρτο υπολογισμών.



Εικόνα 6.6 Εστίαση στο πλέγμα του υλικού - πυρήνα των κάθετων δοκών

Το αρχικό πλέγμα που δημιουργείται έχει τα παρακάτω στατιστικά στοιχεία

Complete meshElement type:

Tetrahedral elements: 13826
Pyramid elements: 0
Prism elements: 0
Hexahedral elements: 0
Triangular elements: 8970
Quadrilateral elements: 0
Edge elements: 1413
Vertex elements: 42

— Domain element statistics —

Number of elements: 13826
Minimum element quality: 5.038E-4
Average element quality: 0.4386
Element volume ratio: 0.001796
Mesh volume: 0.04764 m³
Maximum growth rate: 5.573
Average growth rate: 2.488

Για να αυξήσουμε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων θα κάνουμε ένα size refine στο πλέγμα του προς ανάλυση υλικού. Η επίδραση στην πυκνότητα του πλέγματος φαίνεται αντίστοιχα στα νέα στατιστικά δεδομένα.

Complete meshElement type:

Tetrahedral elements: 22996
Pyramid elements: 0
Prism elements: 0
Hexahedral elements: 0
Triangular elements: 10710
Quadrilateral elements: 0
Edge elements: 1480
Vertex elements: 42

— Domain element statistics —

Number of elements: 22996
Minimum element quality: 4.049E-4
Average element quality: 0.3662
Element volume ratio: 0.001032
Mesh volume: 0.04765 m³
Maximum growth rate: 7.508
Average growth rate: 2.144

6.5 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής

Ο τρόπος απόσβεσης από τα διάφορα υλικά γίνεται με την χρήση του Frequency Domain solver. Οι συχνότητες της επίλυσης έχουν το εύρος range (0;0.5;10), δηλαδή από το 0 ως το 10 με βήμα 0,5. Η επιλογή των χαμηλών συχνοτήτων γίνεται για να έχει ισχύ η παραδοχή ότι ο συντελεστής απωλειών η είναι σταθερός. Οι προσομοιώσεις θα επικεντρωθούν σε δυο σημεία ελέγχου στην ελεύθερη άκρη της σύνθετης δοκού (Εικόνα 6), που αντιστοιχούν στην άναντι και κάτωτι κάθετη δοκό του δομικού συστήματος. Συνεπώς θα εξαχθούν από 2 πίνακες αποτελεσμάτων για κάθε υλικό, με τα εξαγόμενα μεγέθη να είναι το πλάτος της ταλάντωσης των σημείων, η φάση και οι τάσεις Von Mises. Τα σημεία θα αναφέρονται πλέον ως Σημείο 1 (Άναντι Δοκός) και Σημείο 2 (Κάταντι Δοκός).

COMSOL
MULTIPHYSICS

Εικόνα 6.7 Τα σημεία ελέγχου της κατασκευής

6.5.1 Αφρώδες Πολυμερές

Τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα δυο σημεία ελέγχου παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες

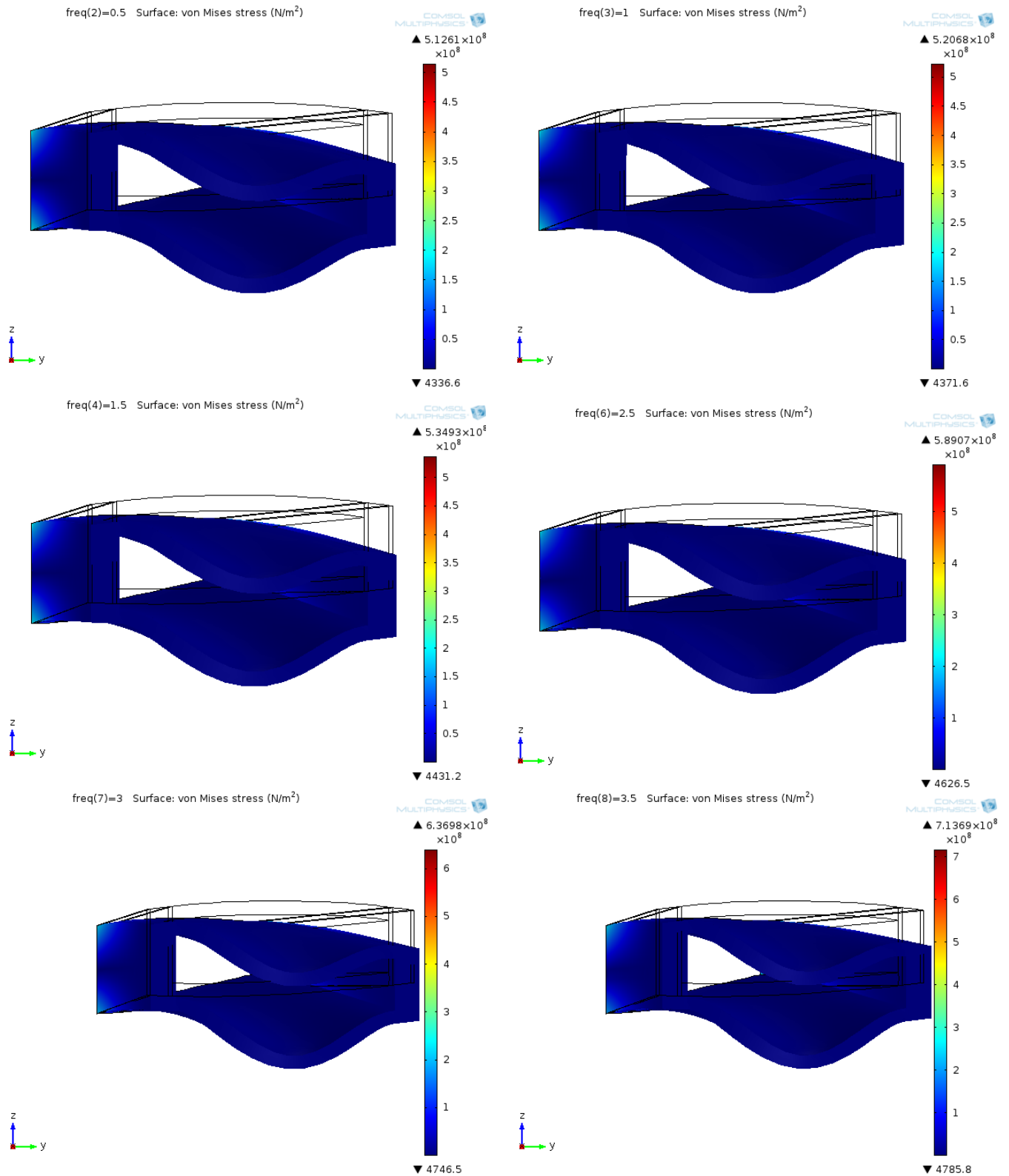
Σημείο 1

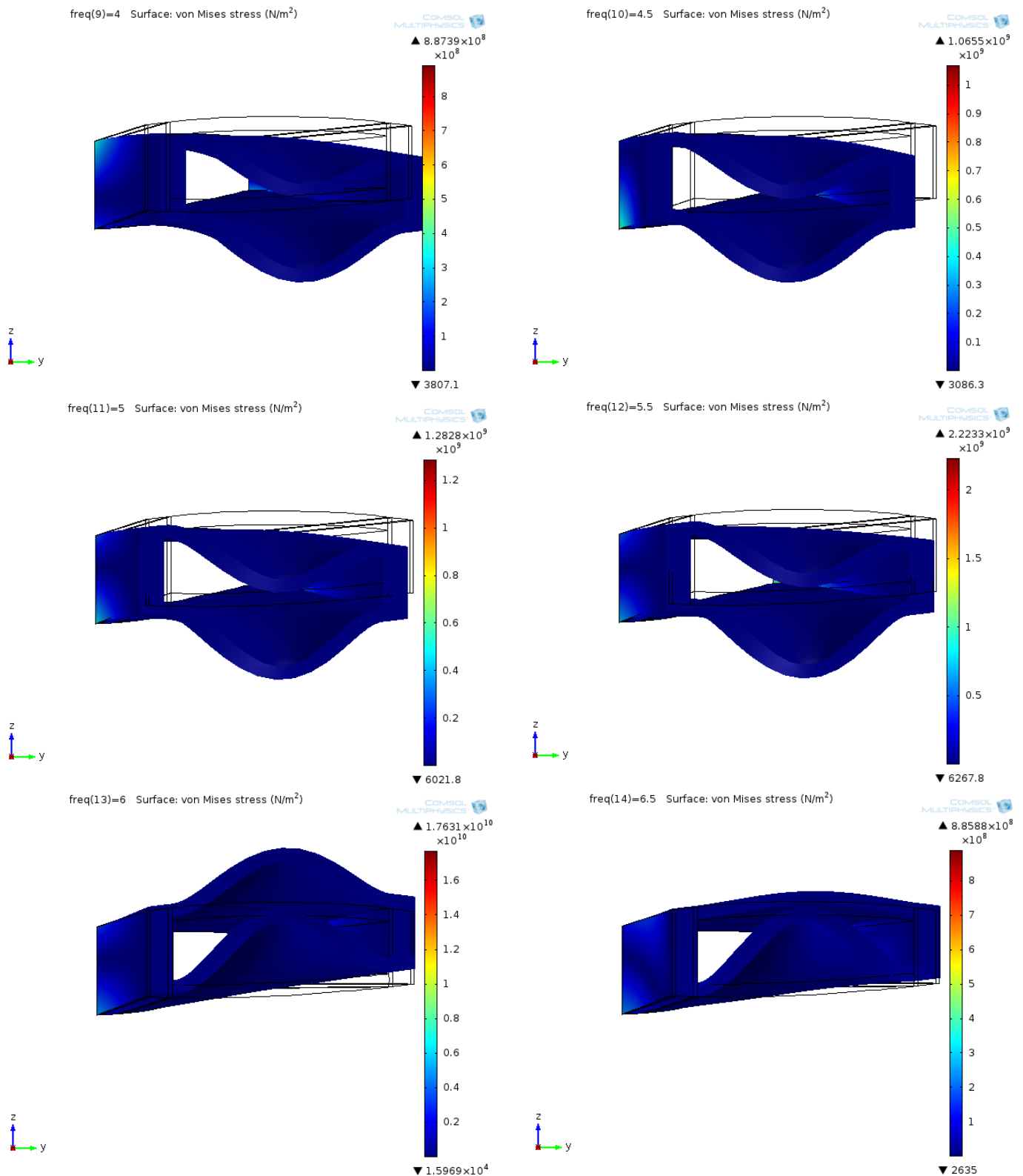
Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 1 Αφρώδες Πολυμερές			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,06810	178,97269	1,01E+08
0,5	0,06835	178,97041	1,02E+08
1	0,06915	178,96343	1,03E+08
1,5	0,07055	178,95133	1,04E+08
2	0,07268	178,93342	1,07E+08
2,5	0,07577	178,90918	1,10E+08
3	0,08022	178,88090	1,16E+08
3,5	0,08687	178,87773	1,28E+08
4	0,09824	179,70527	1,67E+08
4,5	0,10783	179,65433	2,07E+08
5	0,14298	178,29456	2,14E+08
5,5	0,24400	176,93786	3,42E+08
6	2,16395	31,13727	2,33E+09
6,5	0,09512	2,64645	9,96E+07
7	0,01907	176,32614	3,29E+07
7,5	0,05856	2,86540	7,05E+07
8	0,00491	177,97128	2,93E+07
8,5	0,03218	9,51912	1,70E+08
9	0,00889	179,17331	5,38E+07
9,5	0,01184	177,67905	3,34E+07
10	0,02044	175,34601	3,71E+07

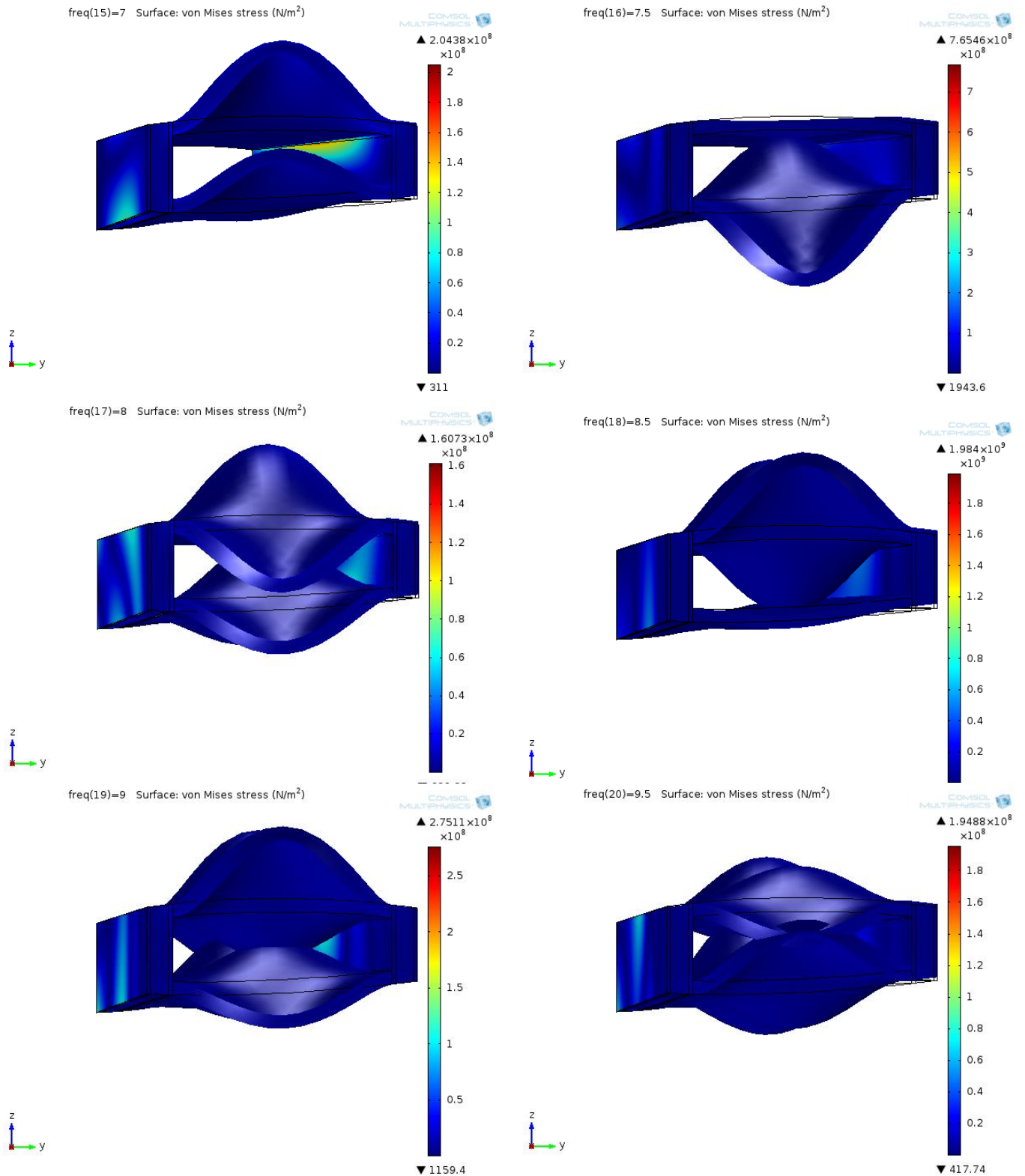
Σημείο 2

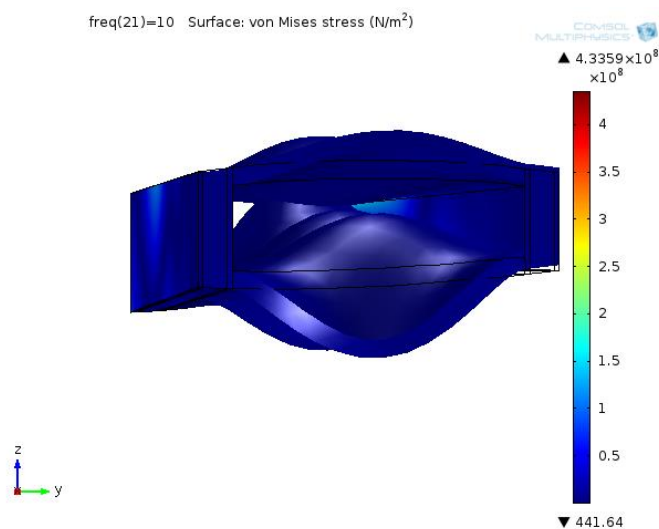
Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 2 Αφρώδες Πολυμερές			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,16329	178,91429	1,78E+08
0,5	0,16419	178,91056	1,79E+08
1	0,16698	178,89913	1,82E+08
1,5	0,17187	178,87921	1,87E+08
2	0,17934	178,84945	1,94E+08
2,5	0,19016	178,80792	2,05E+08
3	0,20575	178,75348	2,21E+08
3,5	0,22881	178,70034	2,47E+08
4	0,26638	179,12725	3,02E+08
4,5	0,31249	179,18029	3,33E+08
5	0,43369	177,95193	4,17E+08
5,5	0,79286	176,50317	7,31E+08
6	7,71607	30,51473	5,68E+09
6,5	0,38239	1,01991	2,89E+08
7	0,12273	359,99972	7,47E+07
7,5	0,29030	0,55143	2,52E+08
8	0,07806	359,99889	5,85E+07
8,5	0,55182	1,86050	6,79E+08
9	0,01066	179,01428	9,50E+07
9,5	0,06803	359,00088	5,73E+07
10	0,11950	358,81306	1,42E+08

Παρατηρούμε ότι και στα δύο σημεία εμφανίζεται μέγιστο πλάτος στη συχνότητα των 6 Hz. Παρακάτω θα παραθέσουμε τις εικόνες παραμόρφωσης της σύνθετης δοκού, για την επιλογή του αφρώδους υλικού. Όπως φαίνεται από την κατανομή Von Misses η κατασκευή δεν παρουσιάζει πρόβλημα με πλαστική παραμόρφωση.









6.5.2 Αφρός Αλουμινίου

Τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα δυο σημεία ελέγχου παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες

Σημείο 1

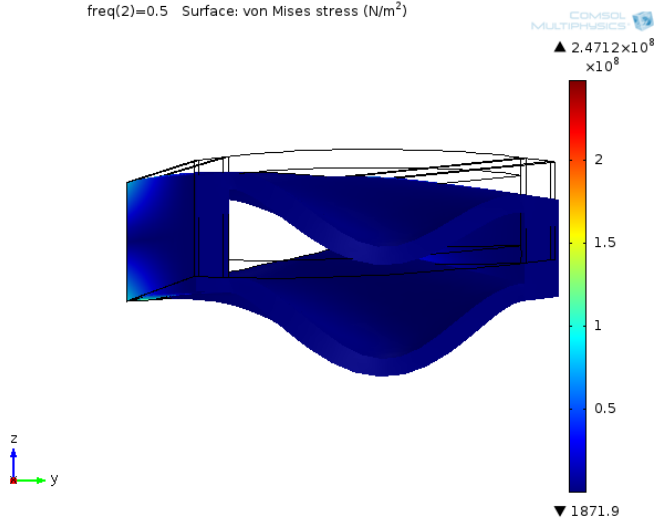
Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 1 Αφρός Αλουμινίου			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,03193	179,99552	1,35E+08
0,5	0,03201	179,99551	1,35E+08
1	0,03227	179,99550	1,36E+08
1,5	0,03271	179,99547	1,37E+08
2	0,03337	179,99543	1,39E+08
2,5	0,03430	179,99538	1,41E+08
3	0,03560	179,99530	1,44E+08
3,5	0,03741	179,99520	1,47E+08
4	0,04003	179,99506	1,62E+08
4,5	0,04420	179,99842	2,04E+08
5	0,04424	180,04637	5,92E+08
5,5	0,06076	179,99548	3,12E+08
6	0,09614	179,99220	4,35E+08
6,5	0,39036	0,02265	1,65E+09
7	0,02412	0,01703	9,31E+07
7,5	0,12584	0,00645	5,37E+08
8	0,00993	360,00000	5,35E+07
8,5	0,15441	179,98065	1,23E+09
9	0,00431	179,99550	9,03E+07
9,5	0,00154	359,99999	4,52E+07
10	0,00493	359,99999	8,43E+07

Σημείο 2

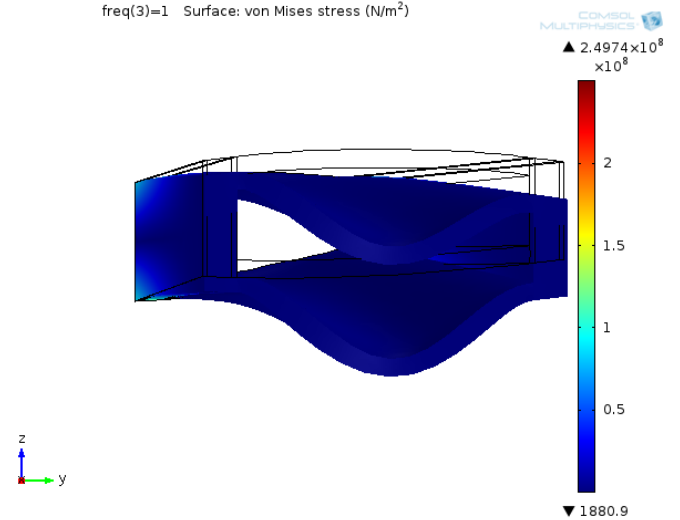
Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 2 Αφρός Αλουμινίου			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,07899	179,99564	2,47E+08
0,5	0,07928	179,99563	2,48E+08
1	0,08015	179,99561	2,50E+08
1,5	0,08166	179,99557	2,55E+08
2	0,08392	179,99550	2,62E+08
2,5	0,08711	179,99542	2,72E+08
3	0,09150	179,99532	2,86E+08
3,5	0,09761	179,99521	3,06E+08
4	0,10635	179,99510	3,38E+08
4,5	0,11980	179,99642	4,06E+08
5	0,12959	180,03819	8,11E+08
5,5	0,17749	179,99426	5,72E+08
6	0,29331	179,99154	8,68E+08
6,5	1,25707	0,02157	3,40E+09
7	0,09828	360,00000	1,85E+08
7,5	0,42906	0,00533	1,32E+09
8	0,05115	360,00000	1,16E+08
8,5	0,70653	179,97837	2,95E+09
9	0,00408	179,99568	1,58E+08
9,5	0,03115	359,99711	1,24E+08
10	0,05248	359,99661	2,61E+08

Στο δεύτερο υλικό το μέγιστο πλάτος εμφανίζεται στην συχνότητα των 6,5 Hz, με τα συνολικά μεγέθη μετατόπισης από την θέση ισορροπίας να είναι εμφανώς μικρότερα από το αφρώδες πολυμερές. Ακολουθεί η γραφική απεικόνιση των παραμορφώσεων του αφρού αλουμινίου. Όπως φαίνεται από την κατανομή Von Misses, η κατασκευή δεν παρουσιάζει πρόβλημα με πλαστική παραμόρφωση.

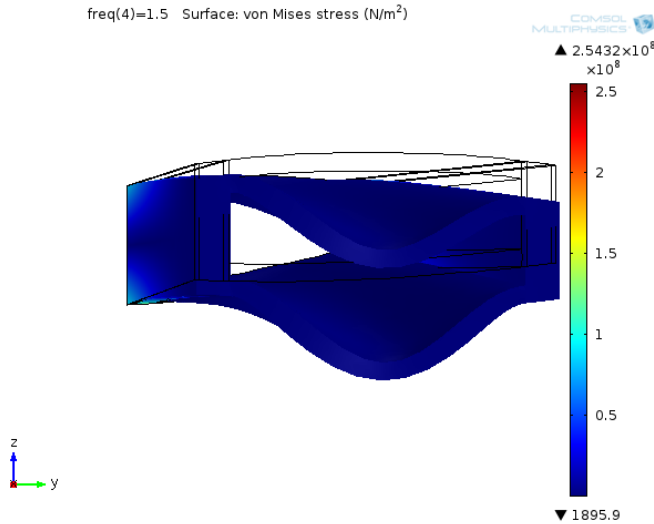
freq(2)=0.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



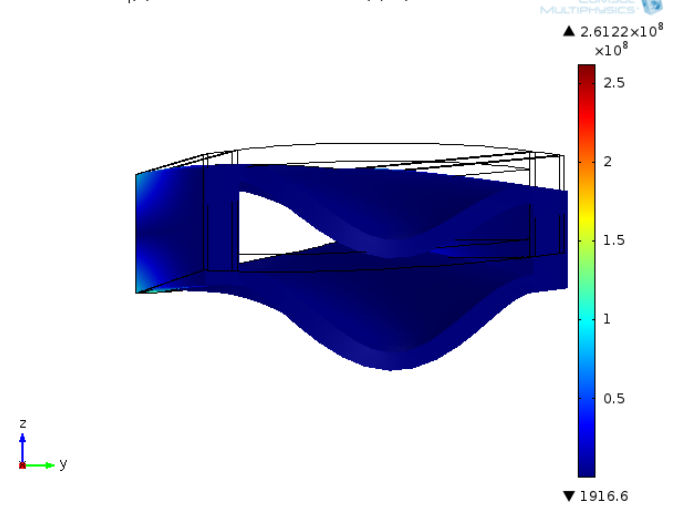
freq(3)=1 Surface: von Mises stress (N/m²)



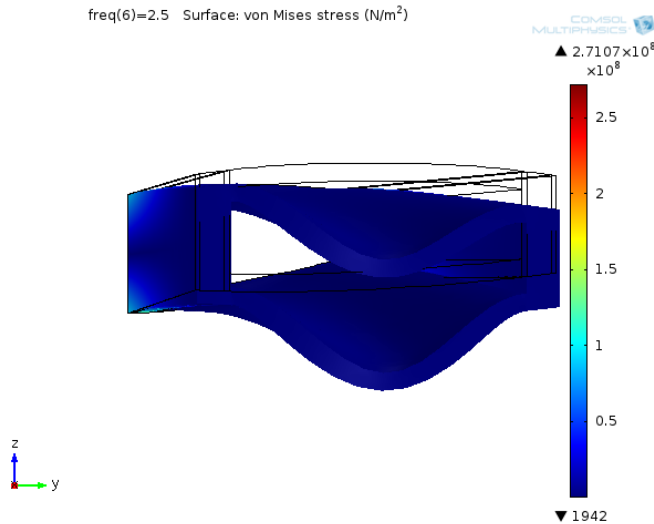
freq(4)=1.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



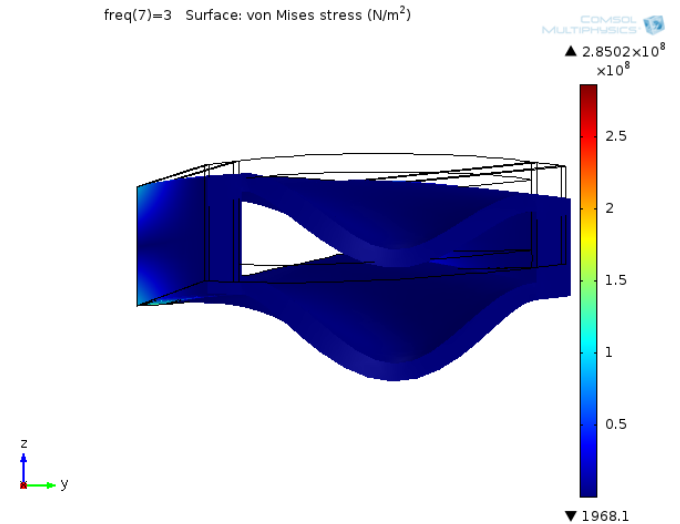
freq(5)=2 Surface: von Mises stress (N/m²)



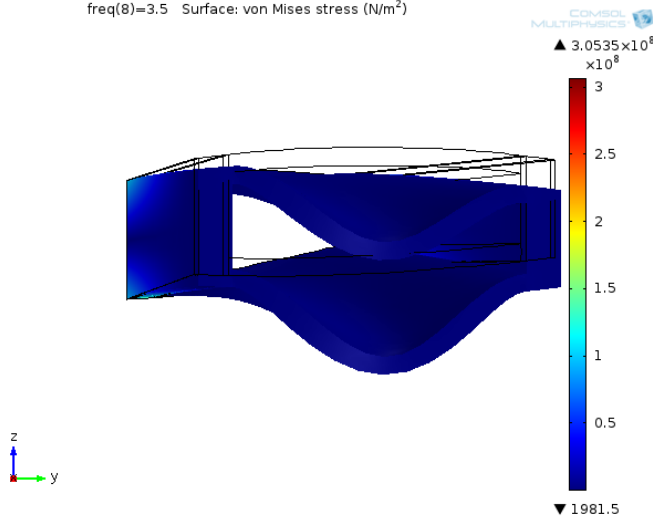
freq(6)=2.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



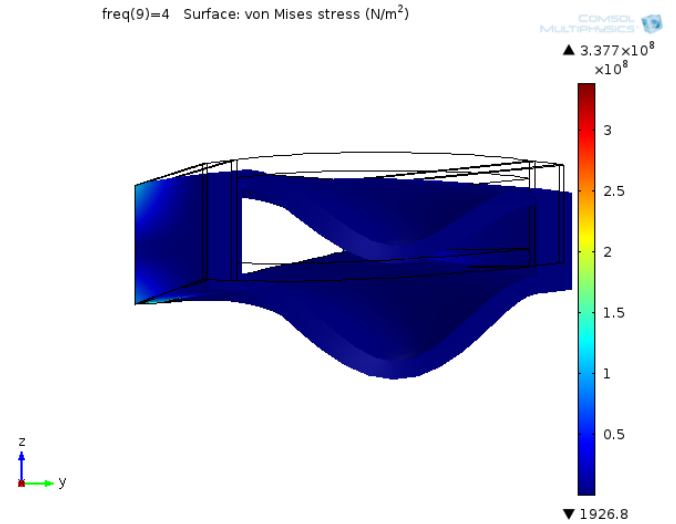
freq(7)=3 Surface: von Mises stress (N/m²)



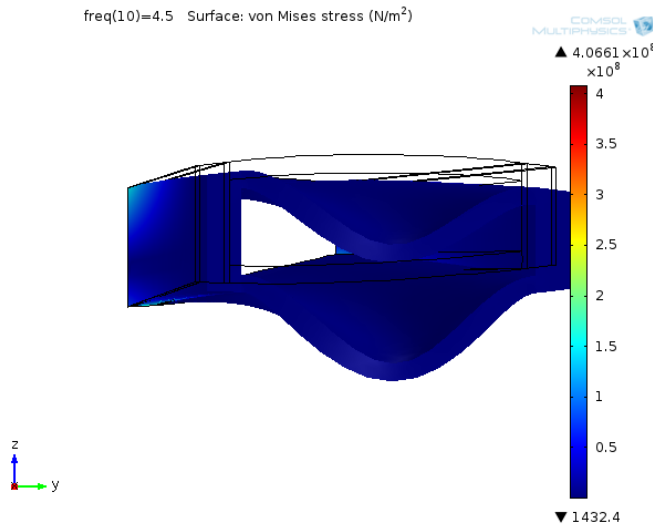
freq(8)=3.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



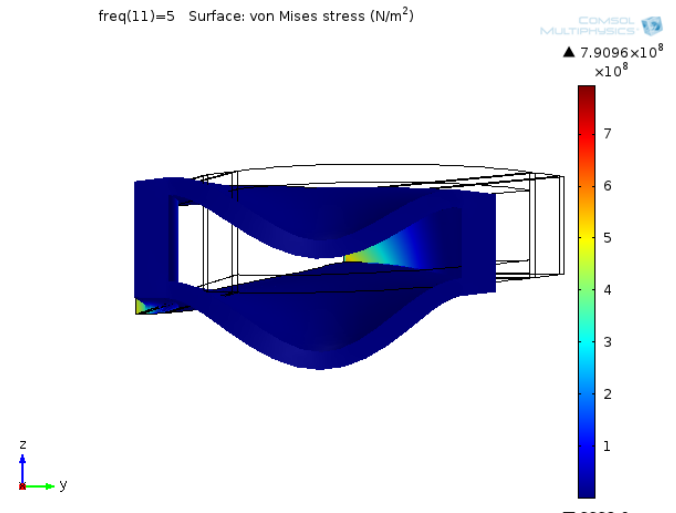
freq(9)=4 Surface: von Mises stress (N/m²)



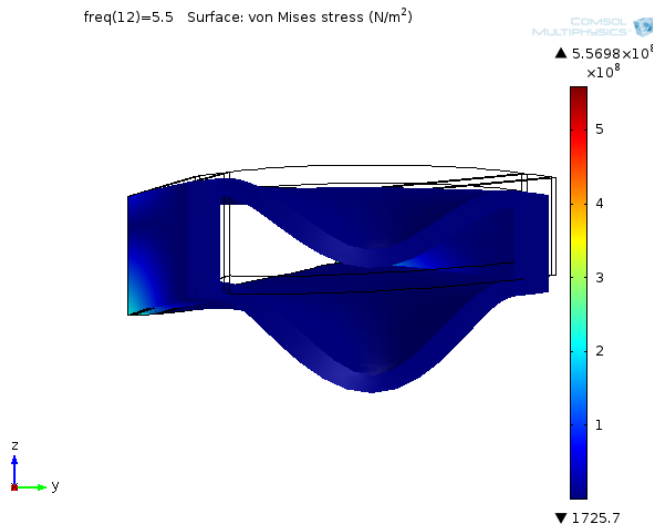
freq(10)=4.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



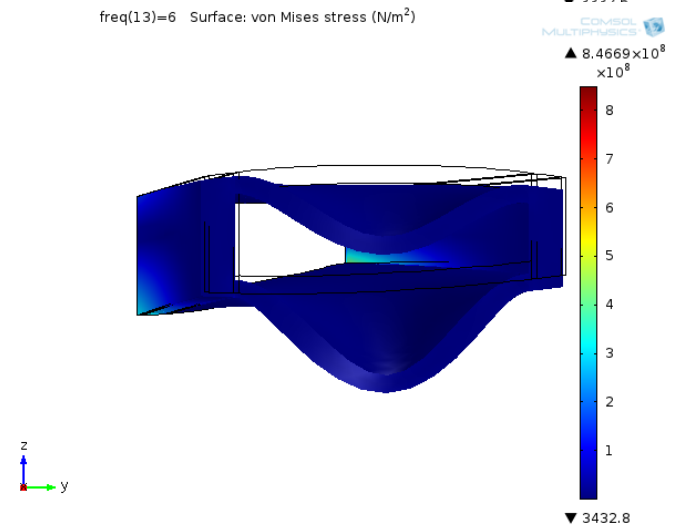
freq(11)=5 Surface: von Mises stress (N/m²)

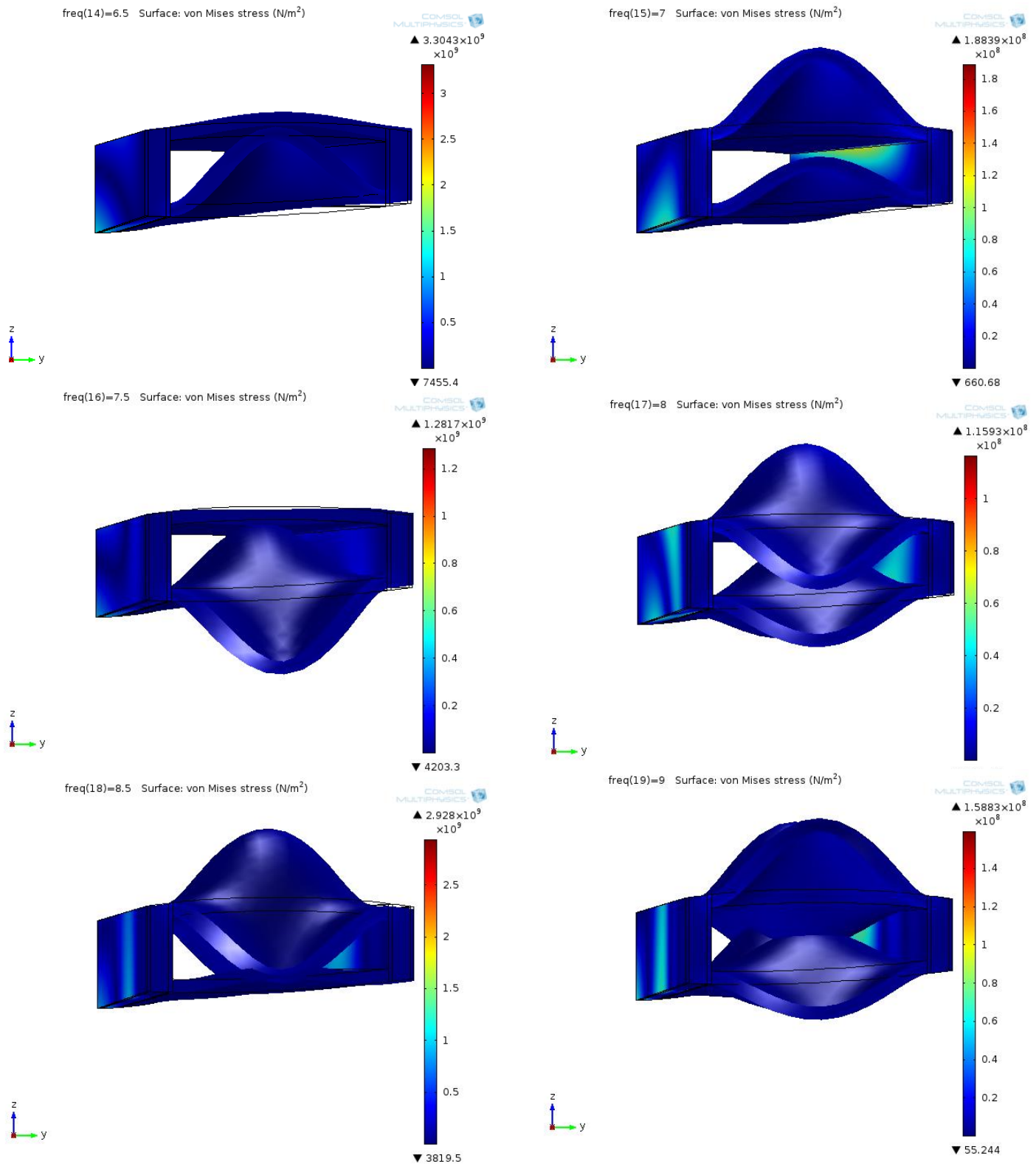


freq(12)=5.5 Surface: von Mises stress (N/m²)

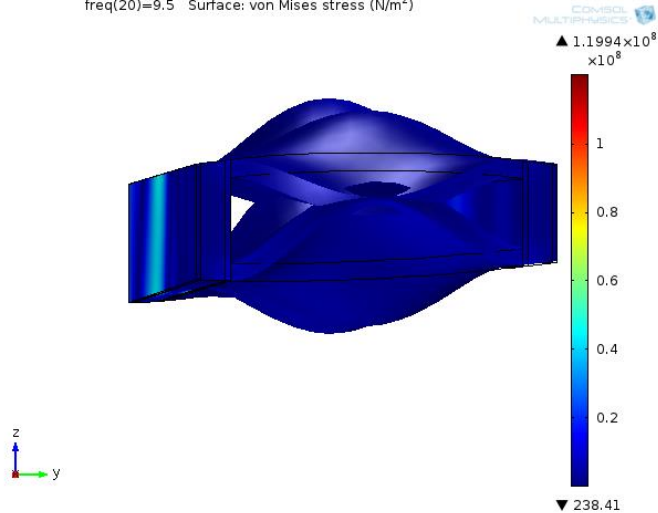


freq(13)=6 Surface: von Mises stress (N/m²)

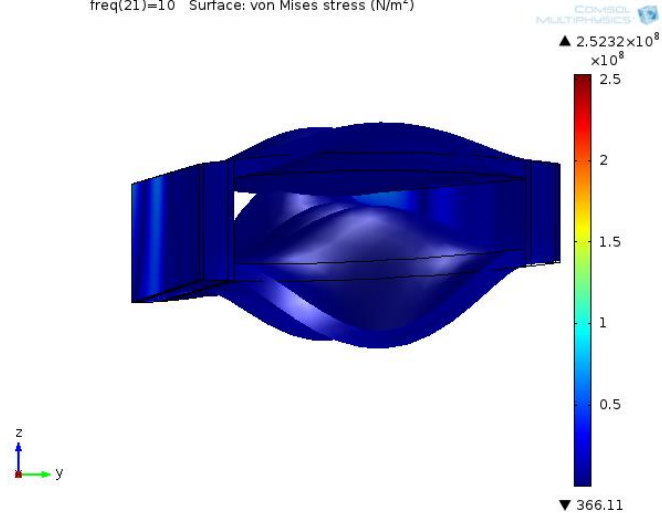




freq(20)=9.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



freq(21)=10 Surface: von Mises stress (N/m²)



6.5.3 Αυξητικό Υλικό

Τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα δυο σημεία ελέγχου παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες

Σημείο 1

Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 1 Αυξητικό Υλικό			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,02629	360,0	1,55E+08
0,5	0,02635	360,0	1,55E+08
1	0,02655	360,0	1,56E+08
1,5	0,02688	360,0	1,57E+08
2	0,02738	360,0	1,59E+08
2,5	0,02809	360,0	1,63E+08
3	0,02906	360,0	1,70E+08
3,5	0,03041	360,0	1,79E+08
4	0,03233	360,0	1,95E+08
4,5	0,03523	359,9	2,25E+08
5	0,04039	359,9	3,28E+08
5,5	0,04522	360,0	4,82E+08
6	0,06828	360,0	4,75E+08
6,5	3,95828	354,9	1,03E+10
7	0,02395	360,0	1,24E+08
7,5	0,17415	360,0	1,08E+09
8	0,00975	360,0	6,41E+07
8,5	0,07772	359,9	8,51E+08
9	0,00339	360,0	1,03E+08
9,5	0,00154	359,99999	4,52E+07
10	0,00493	359,99999	8,43E+07

Σημείο 2

Πίνακας αποτελεσμάτων Σημείο 2 Αυξητικο Υλικό			
Frequency (Hz)	Displacement amplitude, Z component (m)	Displacement phase, Z component (rad)	von Mises stress (N/m ²)
0	0,06565	360,0	3,04E+08
0,5	0,06586	360,0	3,05E+08
1	0,06652	360,0	3,08E+08
1,5	0,06766	360,0	3,13E+08
2	0,06936	360,0	3,21E+08
2,5	0,07175	360,0	3,32E+08
3	0,07502	360,0	3,47E+08
3,5	0,07954	360,0	3,68E+08
4	0,08591	359,9	4,00E+08
4,5	0,09538	360,0	4,54E+08
5	0,11139	360,0	5,93E+08
5,5	0,13204	360,0	7,91E+08
6	0,20494	359,9	9,31E+08
6,5	12,42956	354,4	2,06E+10
7	0,09290	360,0	2,71E+08
7,5	0,57005	360,0	2,62E+09
8	0,04586	360,0	1,38E+08
8,5	0,32212	359,8	2,05E+09
9	0,00298	360,0	1,85E+08
9,5	0,02627	360,0	1,59E+08
10	0,04421	359,6	3,25E+08

Παρατηρούμε μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του αυξητικού υλικού την μέγιστη μετατόπιση και στα 2 σημεία στην συχνότητα 6.5 Hz και συγκρινόμενα με τις υπόλοιπες τιμές, είναι πιθανό να έχει μεγάλη απορρόφηση ενέργειας λόγω συντονισμού.

Ακολουθούν οι εικόνες παραμόρφωσης του αυξητικού υλικού. Όπως φαίνεται από την κατανομή Von Misses η κατασκευή, δεν παρουσιάζει πρόβλημα με πλαστική παραμόρφωση.

freq(2)=0.5 Surface: von Mises stress (N/m²)

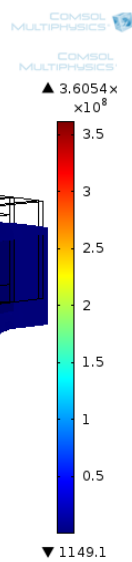
freq(8)=3.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



freq(10)=4.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



freq(12)=5.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



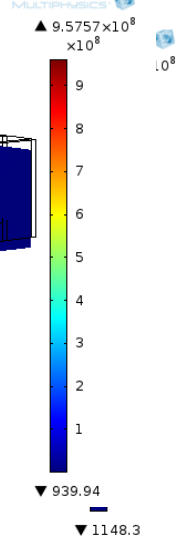
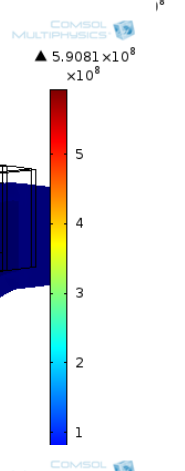
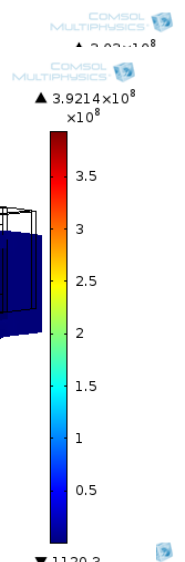
freq(3)=1 Surface: von Mises stress (N/m²)

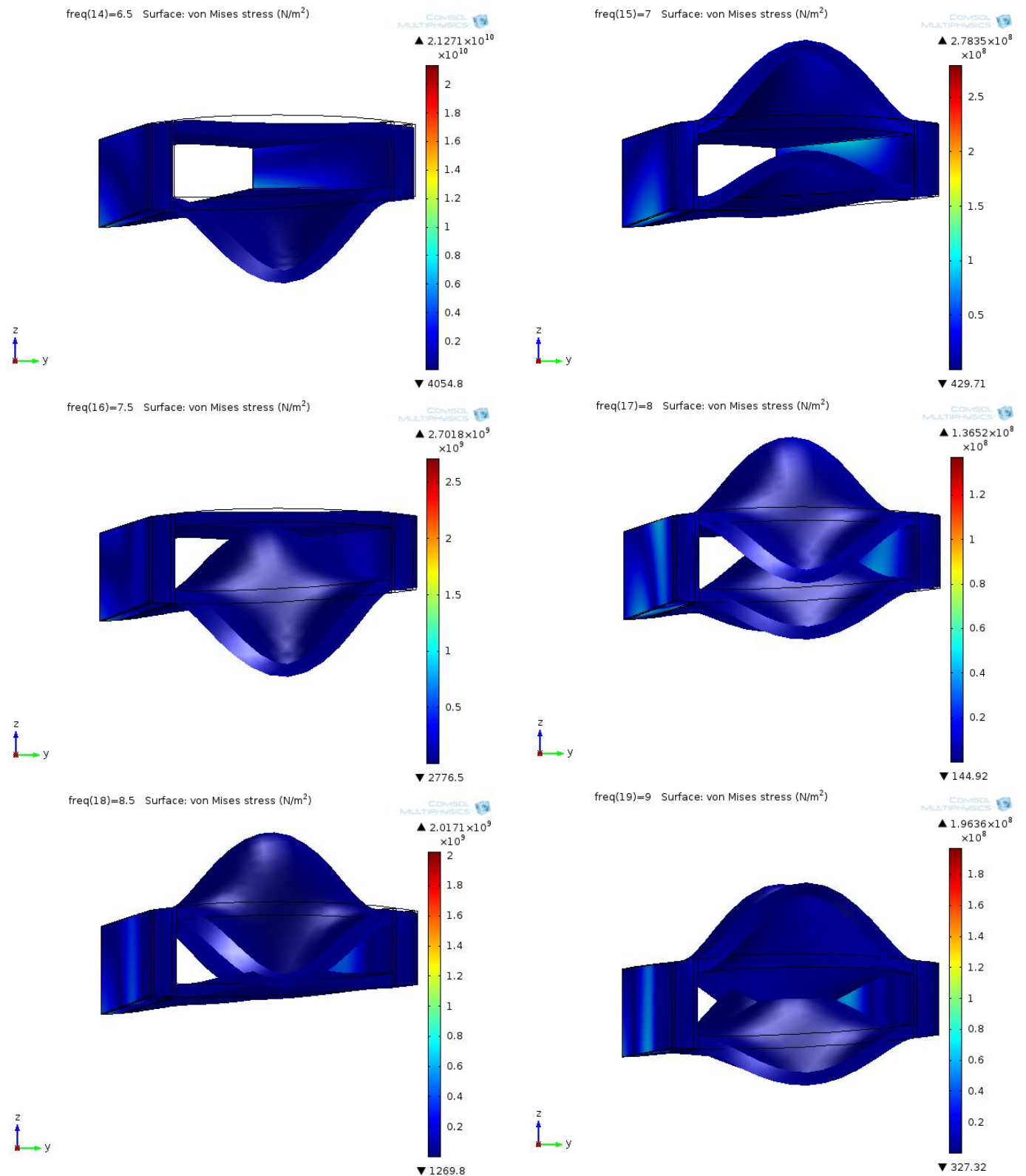
freq(9)=4 Surface: von Mises stress (N/m²)

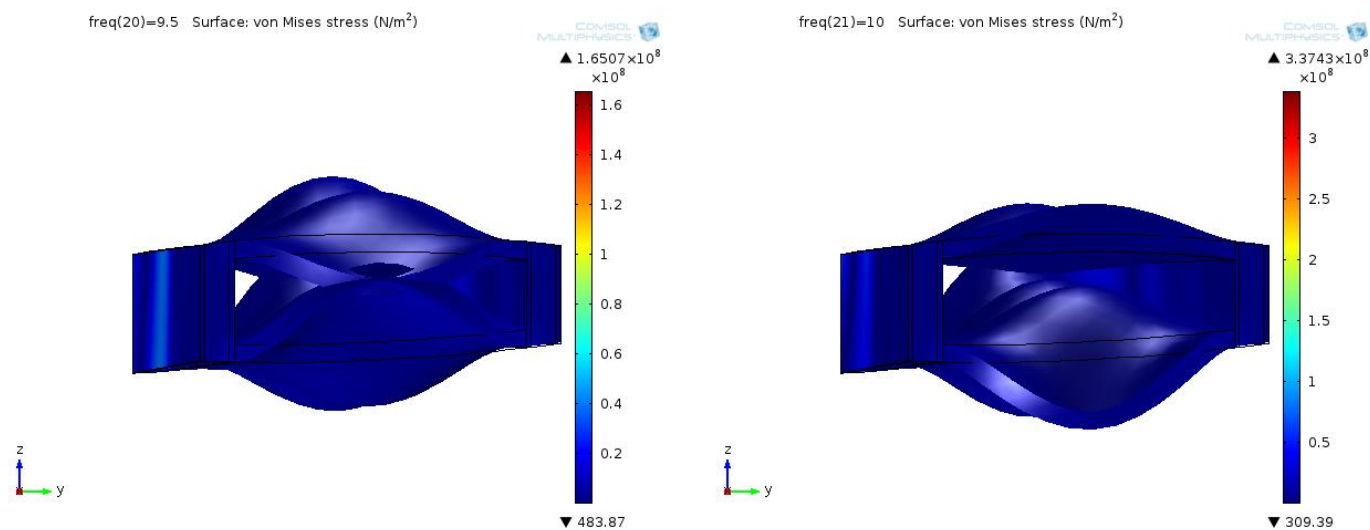


freq(11)=5 Surface: von Mises stress (N/m²)

freq(13)=6 Surface: von Mises stress (N/m²)





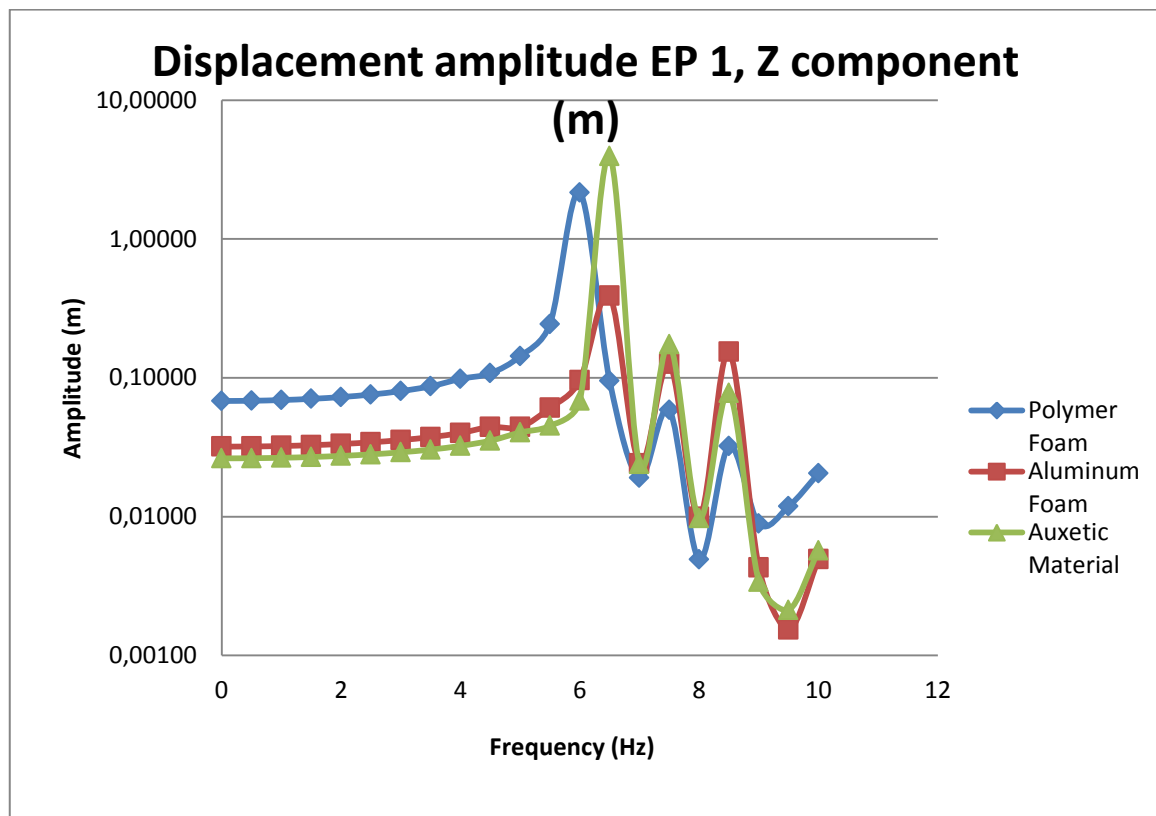


7. Συμπεράσματα

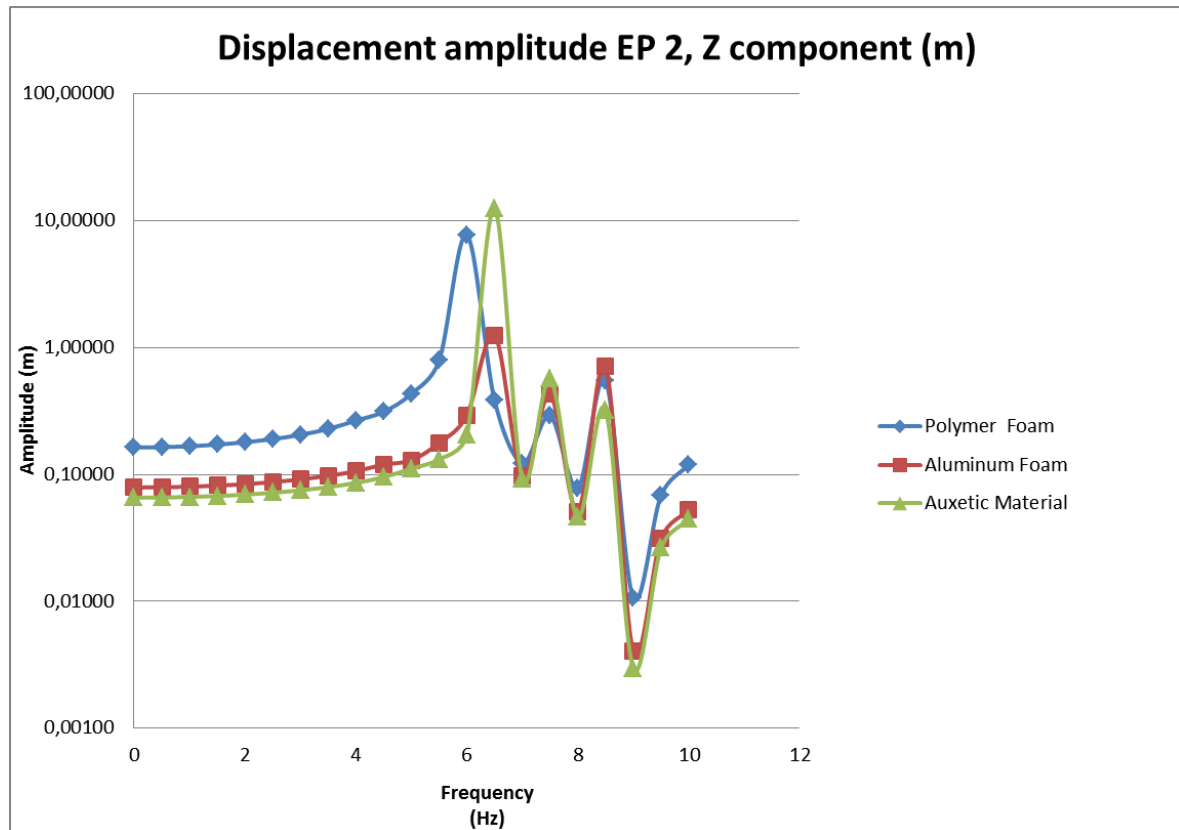
Σαν μια αρχική διατύπωση πριν την διεξαγωγή συμπερασμάτων, τα εξαγωγήματα αποτελέσματα αφορούν την επικέντρωση σε σχετικά χαμηλές συχνότητες ώστε ο συντελεστής απωλειών των υλικών να μην έχει μεγάλη απόκλιση από τον πραγματικό, καθώς είναι μεν ιδιαίτερο χαρακτηριστικό κάθε υλικού αλλά η επίδραση δε της συχνότητας αλλοιώνει το μέγεθος σημαντικά. Επίσης, βάσει βιβλιογραφίας, το αυξητικό υλικό θεωρείται ότι είναι φτιαγμένο με υλικά ινών τύπου εποξικής ρητίνης με ίνες υαλοπλαστικού που του προσδίδει αυτήν την αντοχή, ωστόσο σε σύγκριση με το Αφρό Αλουμινίου υστερεί όσο αναφορά τον συντελεστή απωλειών και τείνει σε εφάμιλλα με το αφρώδες πολυμερές.

7.1 Συγκριτικό γράφημα πλάτους

Τα πρώτα συγκριτικά γραφήματα αφορούν την διακύμανση του πλάτους των διαφόρων υλικών ανάλογα με την συχνότητα, στα 2 σημεία ελέγχου.



Εικόνα 7.1 Γράφημα Πλάτους – Συχνότητας για το σημείο 1

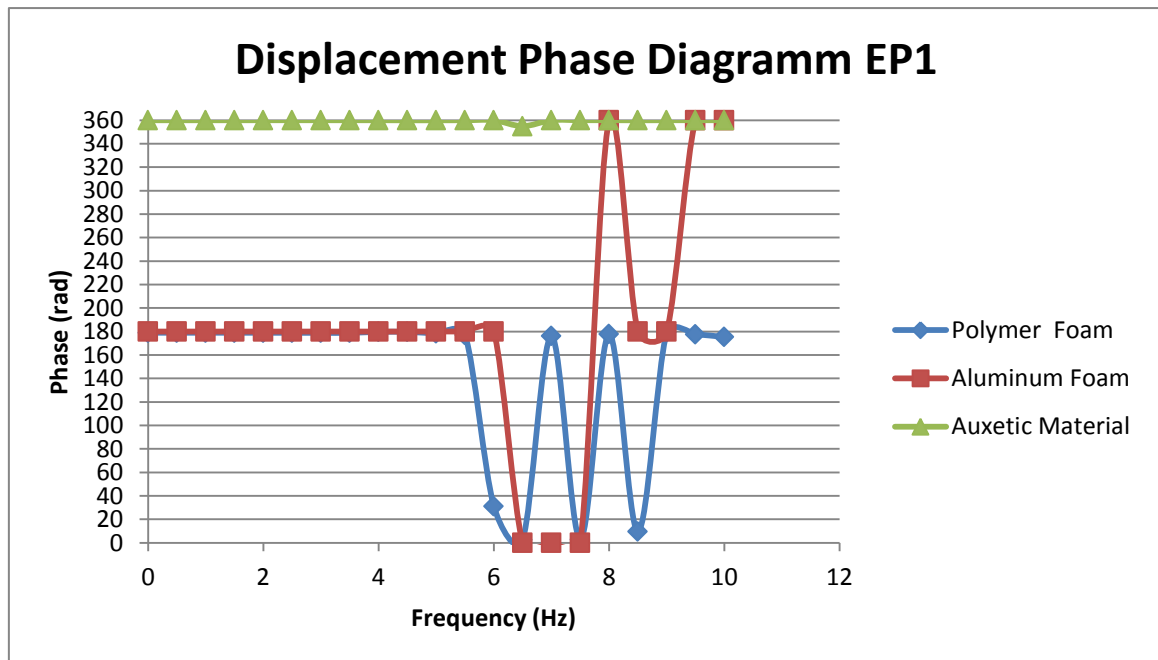


Εικόνα 7.2 Γράφημα Πλάτους – Συχνότητας για το Σημείο 2

Από τα διαγράμματα του πλάτους προκύπτει ότι και τα 3 υλικά εμφανίζουν ένα μέγιστο, με πολύ μεγαλύτερο μέγεθος από τα υπόλοιπα κοντά στα 6 Hz (6.5 Hz για το αυξητικό και για τον αφρό αλουμινίου) όπου εκεί η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας οφείλεται σε συντονισμό. Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι το αυξητικό υλικό έχει χαμηλότερη πλάτη από τα άλλα 2 υλικά εκτός από τον συντονισμό στα 6.5 Hz. Μάλιστα η τιμή είναι μεγαλύτερη από το υλικό του αφρού αλουμινίου, πιθανότατα χάρη στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που του προσδίδει η συμπεριφορά κατά την καταπόνηση ο αρνητικός λόγος Poisson. Επίσης μετά το σημείο συντονισμού και μέχρι τα 8.5 Hz υπάρχει μια ασυνέχεια μεταξύ σημείου 1 και 2. Ο λόγος βρίσκεται στην γεωμετρία του που οφείλεται στο αεροδυναμικό προφίλ της αεροτομής.

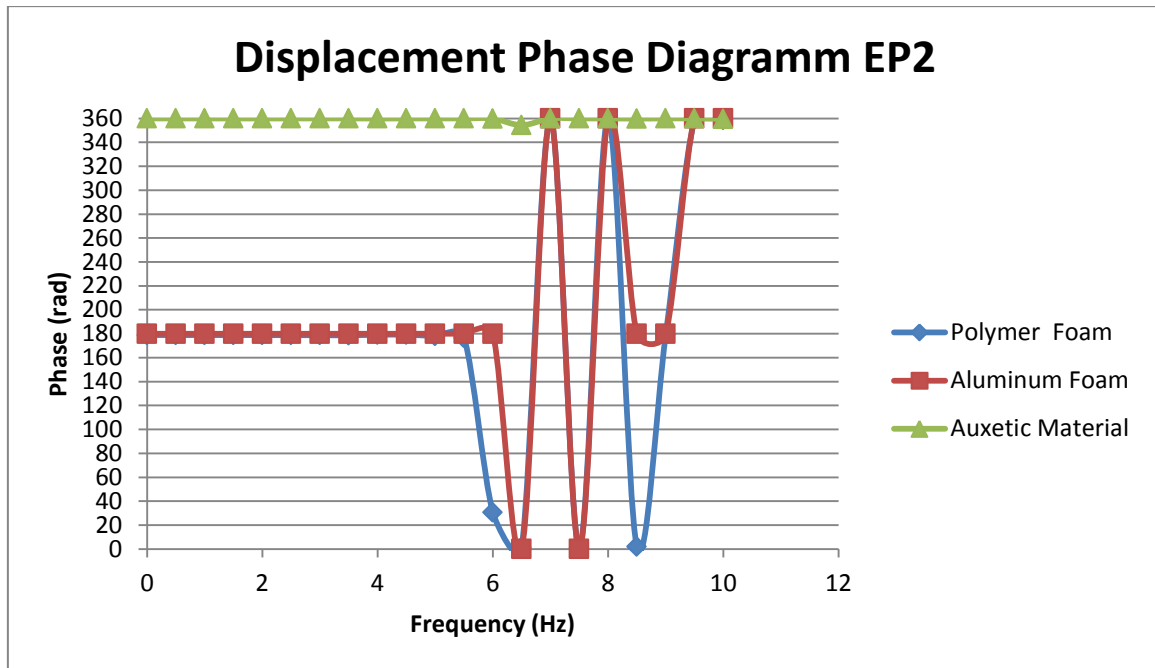
7.2 Συγκριτικό γράφημα φάσης

Ένα δεύτερο μέγεθος προς σύγκριση είναι η διαφορά φάσης του πλάτους των υλικών στις διάφορες συχνότητες του φορτίου. Σε αυτό το γράφημα παραθέτουμε τις φάσεις των υλικών για να εξαγάγουμε συμπεράσματα για την απόκριση τους στην φόρτιση.



Εικόνα 7.3 Γράφημα Διαφοράς Φάσεων των Υλικών Σημείο 1

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται η φάση πλάτους των υλικών στο σημείο ελέγχου 1, με το αυξητικό υλικό να είναι σταθερά στο 360 (ταύτιση με το 0). Ακολουθεί το αντίστοιχο γράφημα στο σημείο 2



Εικόνα 7.4 Γράφημα Διαφοράς Φάσεων των Υλικών Σημείο 2

Και στα δυο διαγράμματα βλέπουμε ότι το αυξητικό υλικό όχι μόνο έχει σταθερή φάση, αλλά σταθερό στα 360 rad. Αυτό συμπίπτει με το 0 μαθηματικά εξαιτίας του τριγωνομετρικού κύκλου, αλλά φυσικά, έχει εξήγηση η λύση στον αρνητικό λόγο Poisson και την συμπεριφορά του στις παραμορφώσεις. Στα υπόλοιπα δυο υλικά παρατηρούμε ότι μέχρι και την μέγιστη διέγερση έχουν φάση περίπου π (180 rad) μέχρι την στιγμή του συντονισμού τους. Γενικότερα από το διάγραμμα της διαφοράς φάσης των υλικών και σε συνδυασμό με τα διαγράμματα πλάτους συμπεραίνουμε ότι το αυξητικό υλικό έχει πολύ καλή απόκριση ως αποσβεστήρας των ταλαντώσεων, με τον αφρό του αλουμινίου να έρχεται δεύτερος σαν απόδοση. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις το αυξητικό υλικό εμφανίζει μεγαλύτερες τάσεις Von Mises, χωρίς ωστόσο η κατασκευή του δομικού συστήματος να αγγίζει επικίνδυνα όρια όπως φαίνεται στις απεικονίσεις του υλικού σε κάθε συχνότητα.

7.3 Συμπεράσματα – Μελλοντική έρευνα

Συνοψίζοντας τα 2 συγκριτικά γραφήματα μπορούμε να πούμε ότι την καλύτερη αποσβεστική συμπεριφορά την έχει το αυξητικό υλικό. Η ιδιομορφία που του προσδίδει η μικρο-δομή του έχει πολύ καλή ανταπόκριση στην απορρόφηση των εξαναγκασμένων ταλαντώσεων, προσφέροντας άμεση απόκριση στις φορτίσεις με το μικρότερα συνολικά πλάτος. Σε εξαίρεση, το σημείο συντονισμού στα 6.5 Hz δίνει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια, χωρίς επίπτωση στην ακεραιότητα της κατασκευής σύμφωνα με τα γραφήματα παραμόρφωσης που αναλυτικά παρατίθενται στο παράρτημα.

Τέλος μπορούμε να πούμε, σαν θέμα περαιτέρω έρευνας, θα μπορούσε να είναι η χρήση αυξητικού υλικού με τα χαρακτηριστικά του αφρού αλουμινίου, δηλαδή κατασκευή της σύνθετης δομής αστέρα με υλικά που να εμφανίζουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με τον αφρό αλουμινίου καθώς και η χρήση του συντελεστή απωλειών ως συνάρτηση της συχνότητας, ώστε να διεξαχθεί η ανάλυση σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, χωρίς αλλοίωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Επίσης η κατασκευή μιας εντοπισμένης ενίσχυσης σε μια δεδομένη συσκευή και η βελτιστοποίηση της θέσης της, θα μπορούσε επίσης να συνεισφέρει στην μελέτη απόδοσης των αυξητικών υλικών ως αποσβεστήρες.

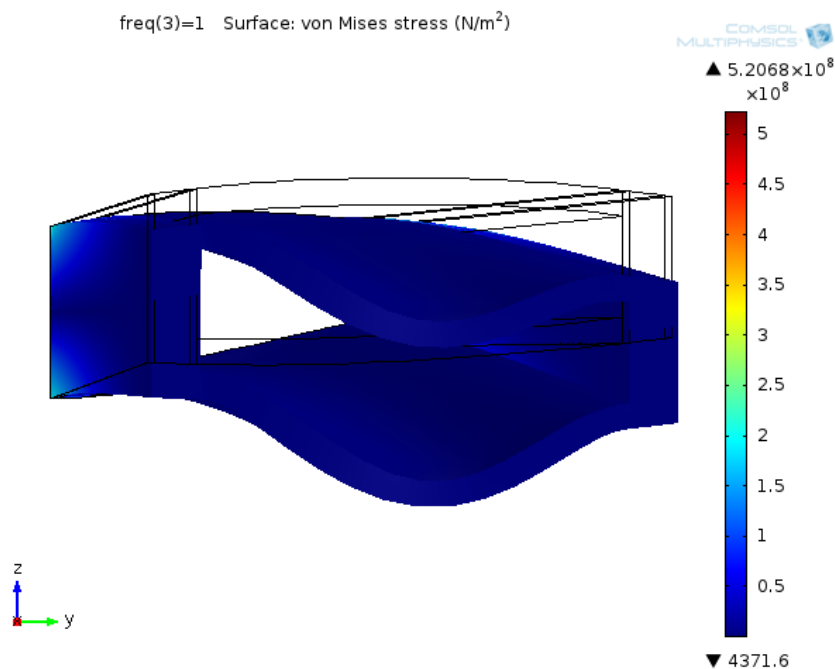
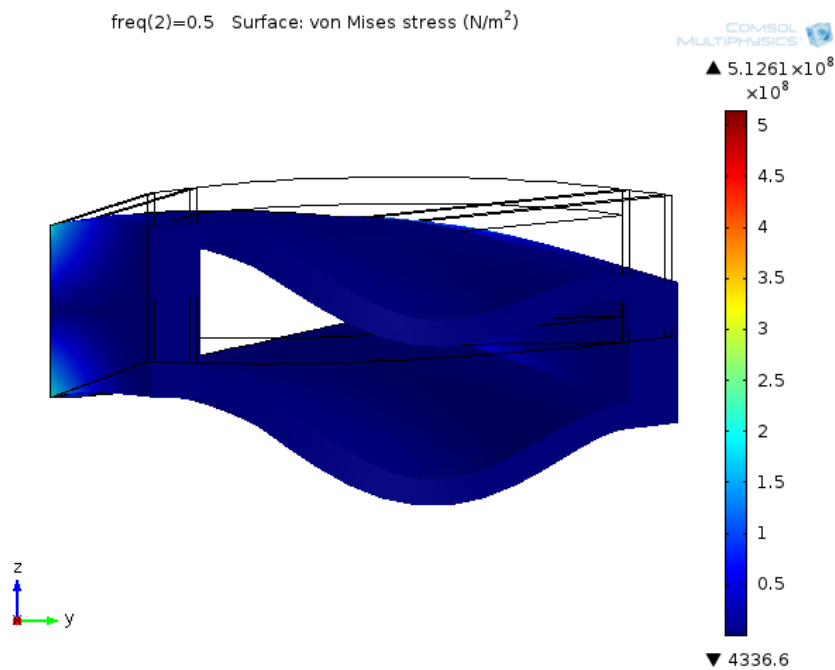
Βιβλιογραφία

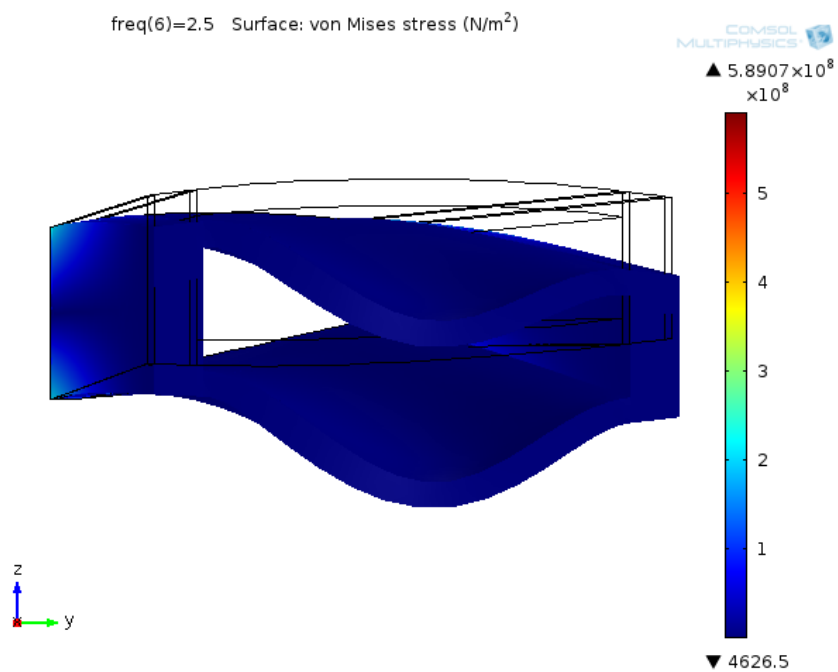
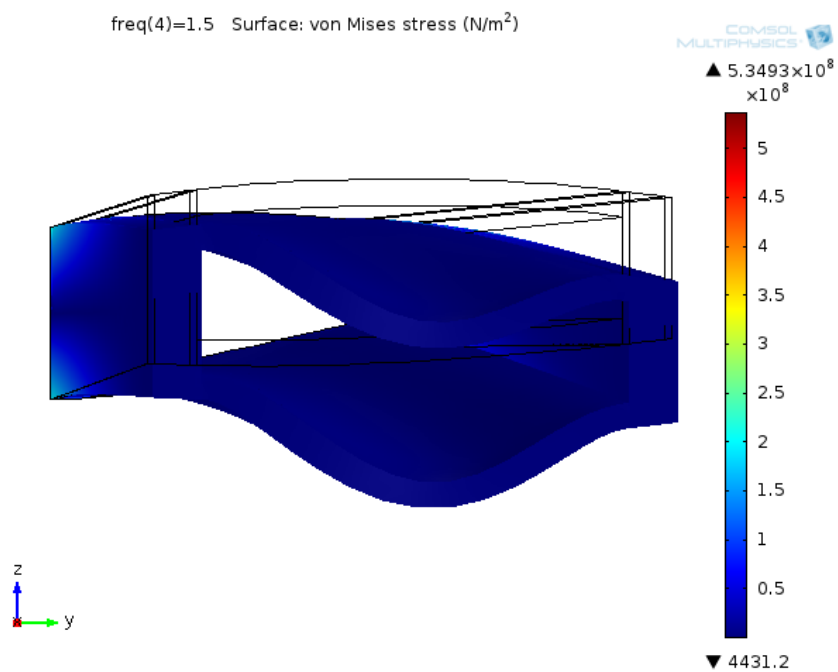
1. Stavroulakis G.E. Auxetic behaviour: Appearance and engineering applications, phys. stat. sol. (b) 242, No. 3, 710–720 (2005) / DOI 10.1002/pssb.200460388
2. P. S. Theocaris, G. E. Stavroulakis, and P. D. Panagiotopoulos, Acta Metall. Mater. 67, 274 (1997a)
3. F. Agnese, F. Scarpa : Macro-composites with star-shaped inclusions for vibration damping in wind turbine blades/ Composite Structures 108 (2014) 978–986
4. Schubel Peter J. Schubel and Crossley J. Richard Wind Turbine Blade Design Energies 2012, 5, 3425-3449; doi:10.3390/en5093425
5. Παπανικολάου Γιώργος, Μουζάκης Διονύσης, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007
6. Huang H. Y., Reinhall G. Per, Shen Y.I., Kumar Viplin, Use of Microcellular Foam Materials in Constrained Layer Damping Treatments, Cellular Polymers Vol 20, No2, 2001
7. Banhart J., Baumeister J., Weber M., Damping properties of aluminium foams, Materials Science and Engineering A205 (1996) 221-228, 1995
8. WE handbook
9. Chandrupatla R. T., Belegundu D. Ashok, Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς, εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2010
10. Κανάρχος Α., Αντωνιάδης Ι., Δυναμική των Μηχανών, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1998
11. Κανελλόπουλος Β. Δ., Αιολική Ενέργεια, εκδόσεις Ίων, 2008
12. Comsol User's Manual
13. www.wikipedia.org
14. www.matweb.com
15. www.researchgate.net

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

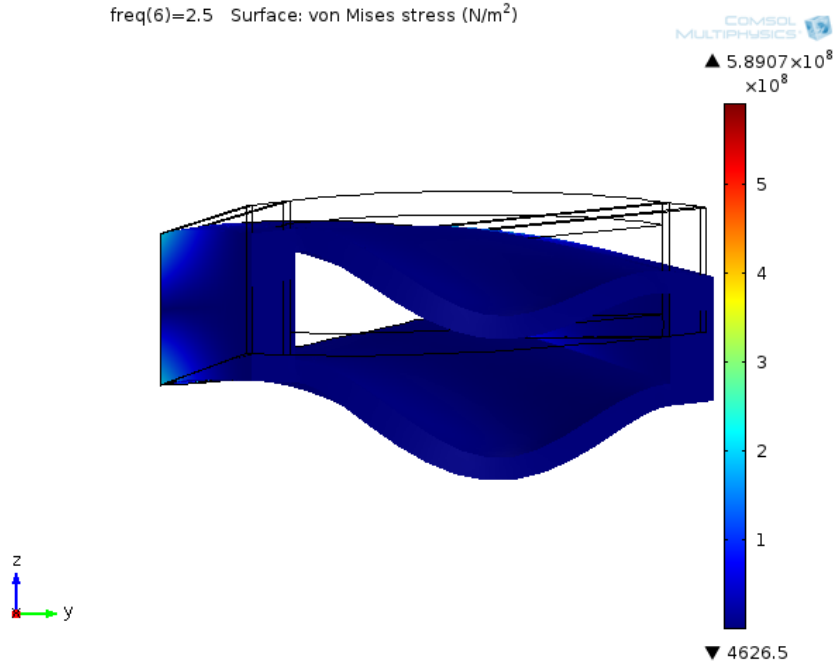
Εδώ παραθέτονται σε μεγαλύτερη ευκρίνεια οι παραμορφώσεις των υλικών στις διάφορες συχνότητες.

Π1 Αφρώδες Πολυμερές

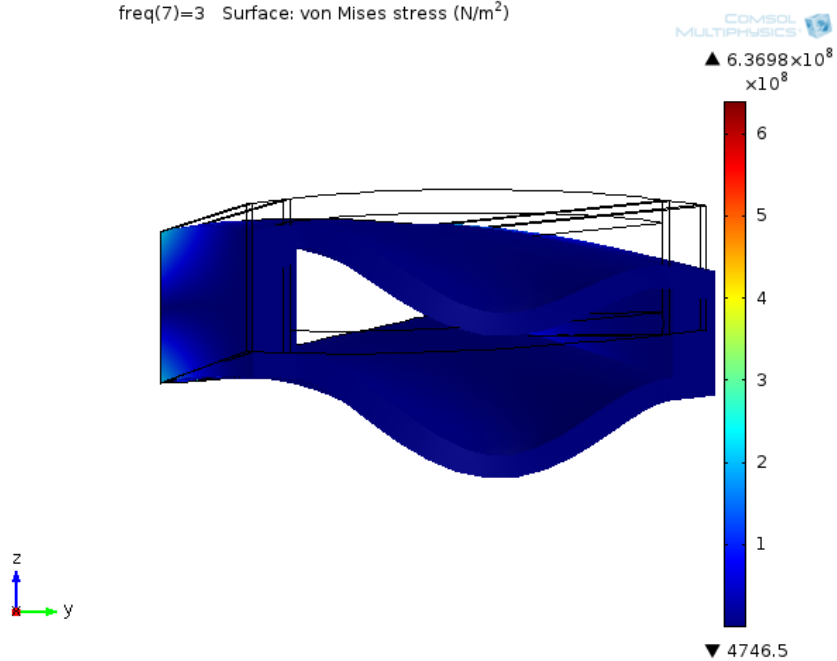




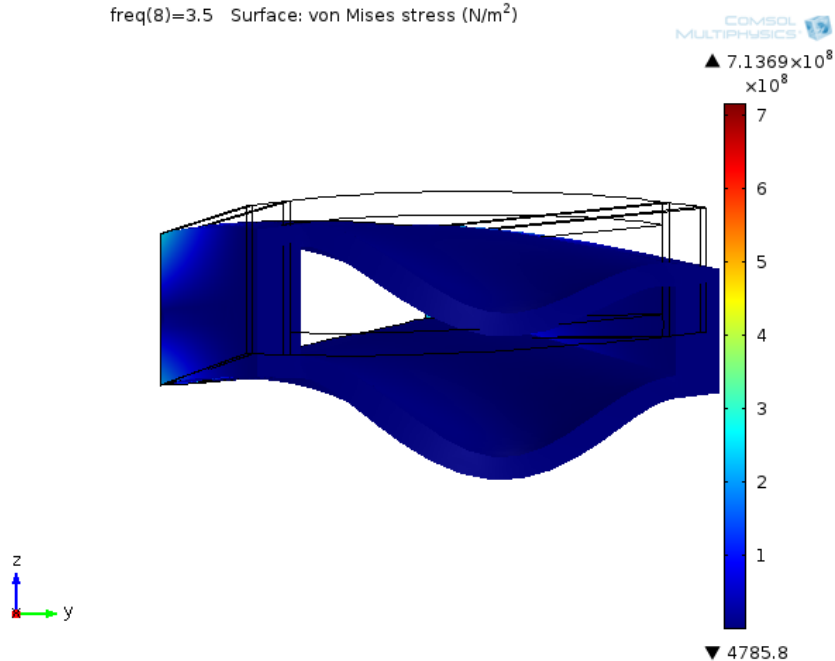
freq(6)=2.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



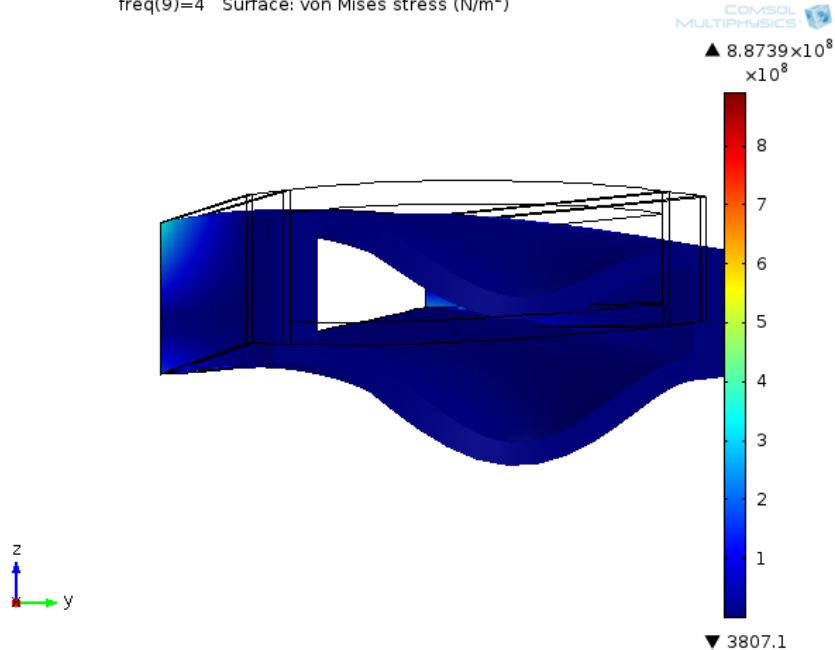
freq(7)=3 Surface: von Mises stress (N/m²)



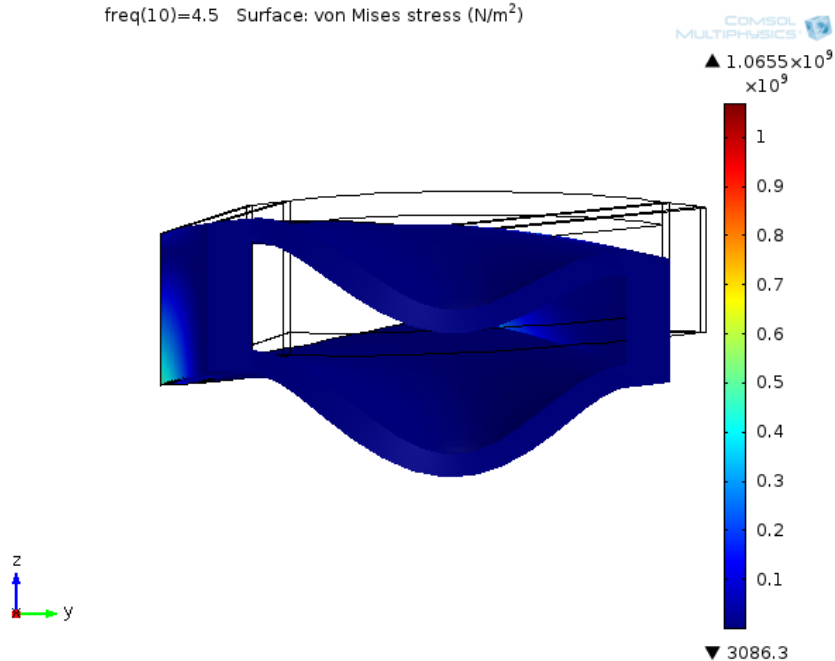
freq(8)=3.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



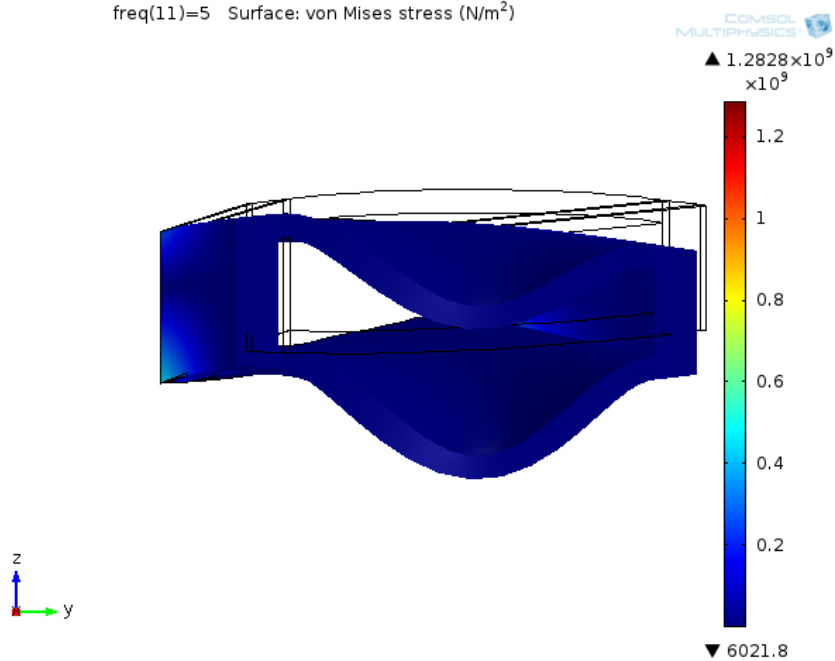
freq(9)=4 Surface: von Mises stress (N/m²)

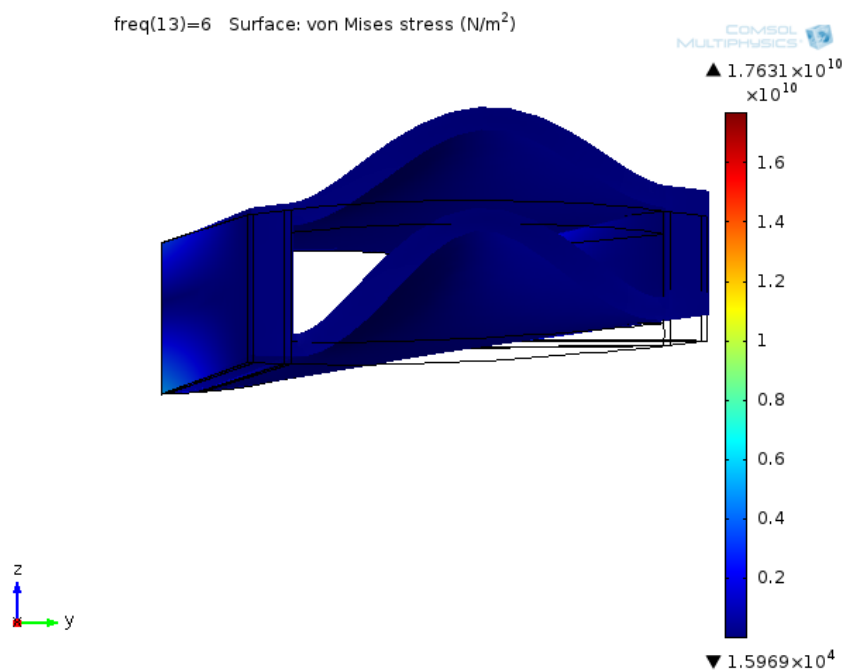
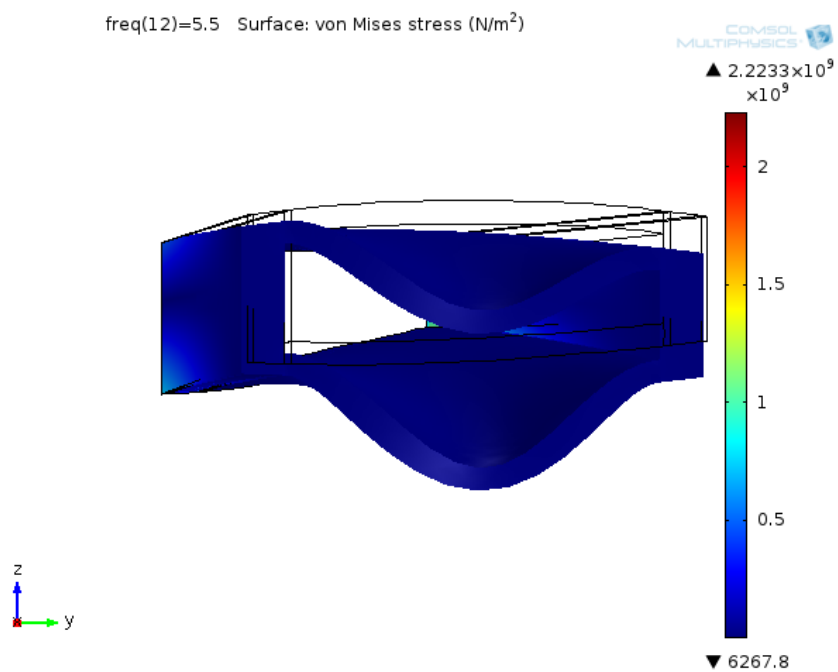


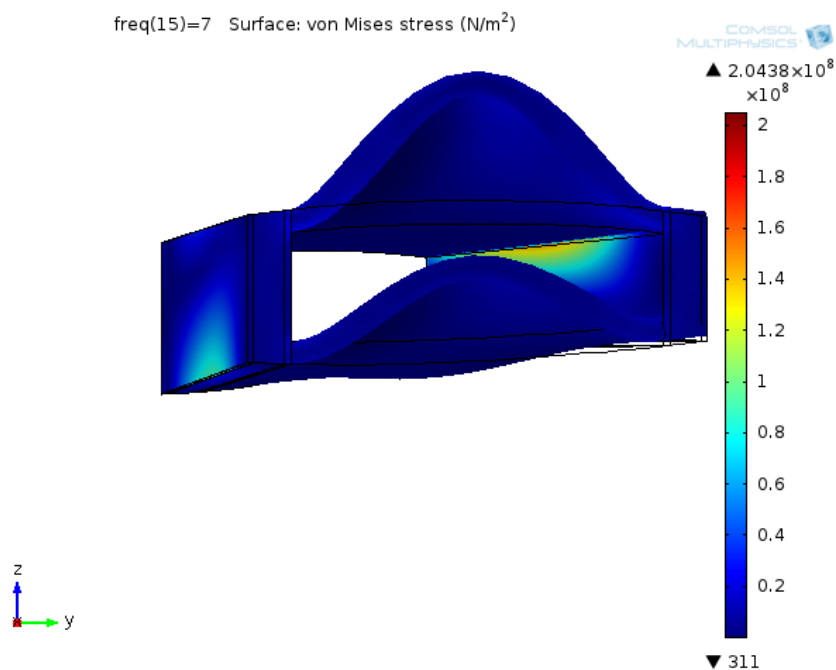
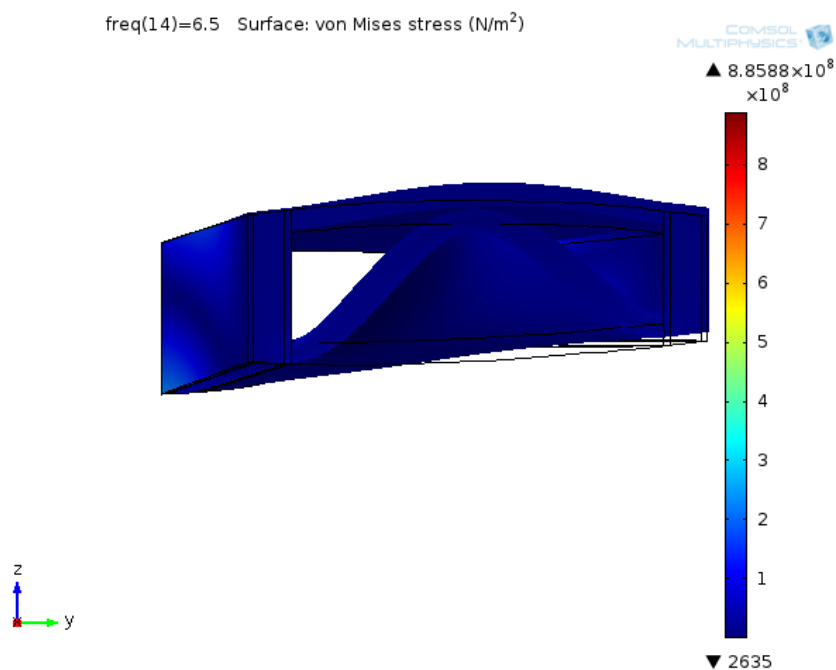
freq(10)=4.5 Surface: von Mises stress (N/m²)

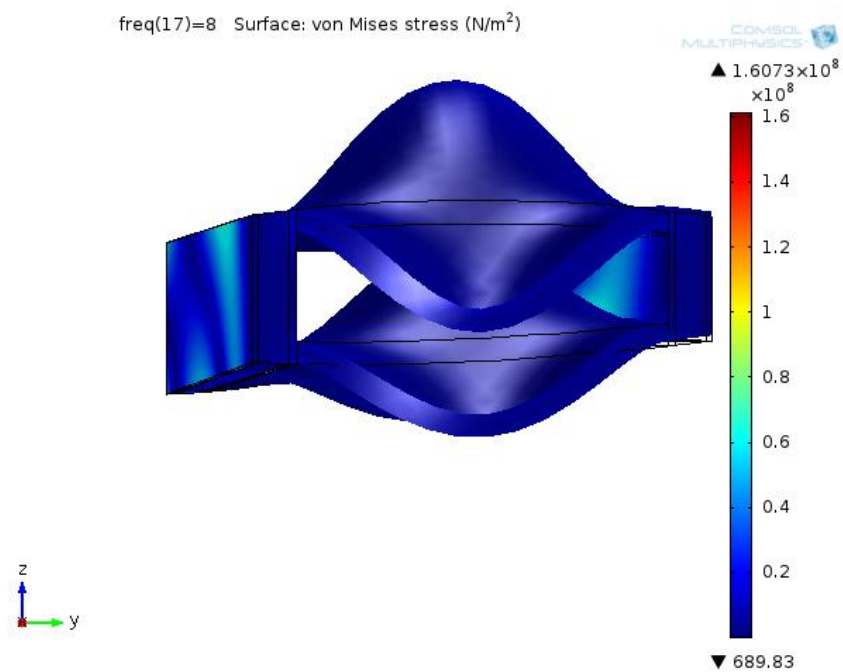
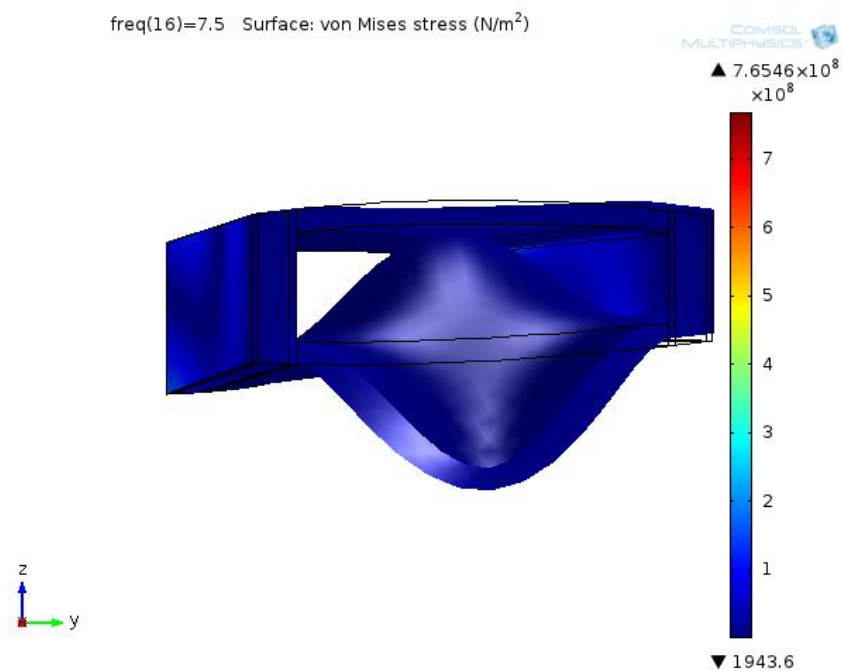


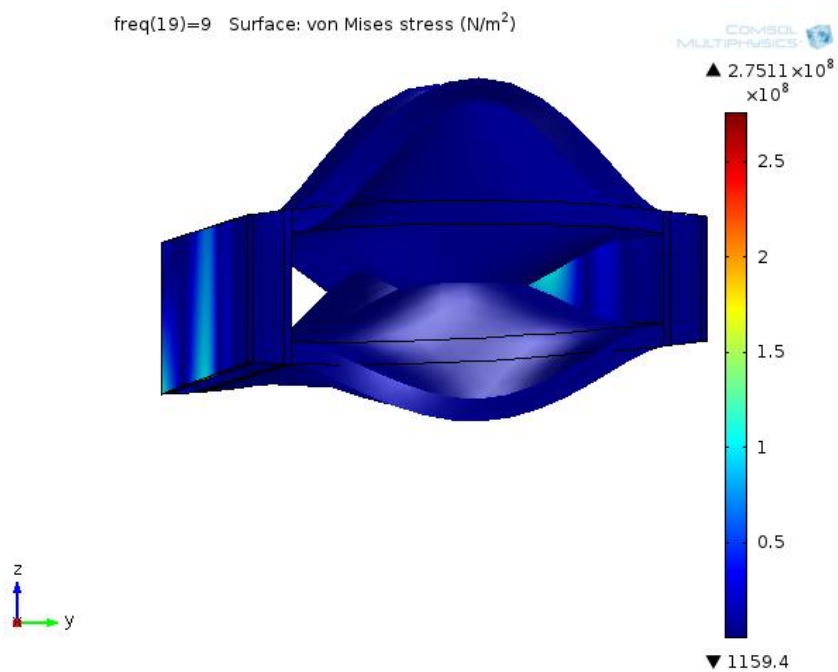
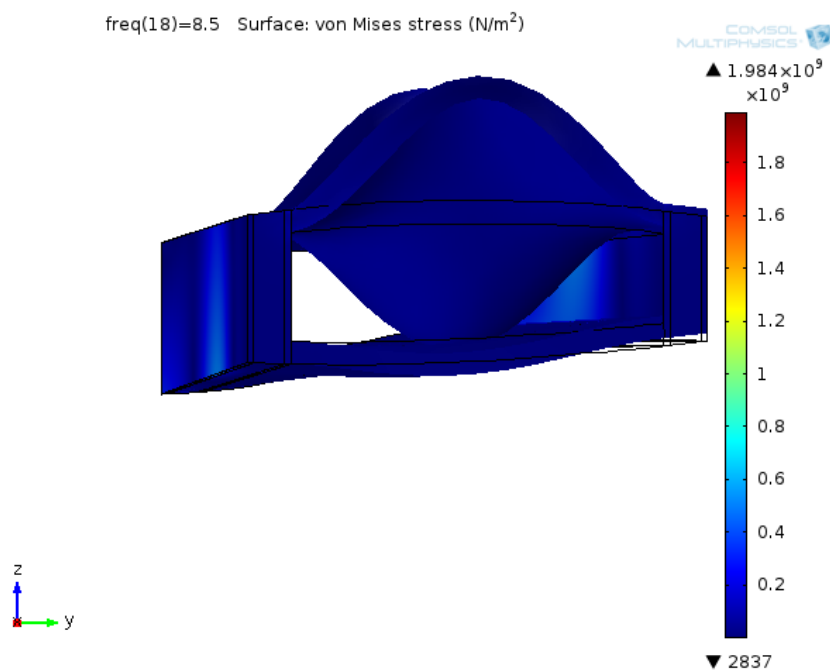
freq(11)=5 Surface: von Mises stress (N/m²)



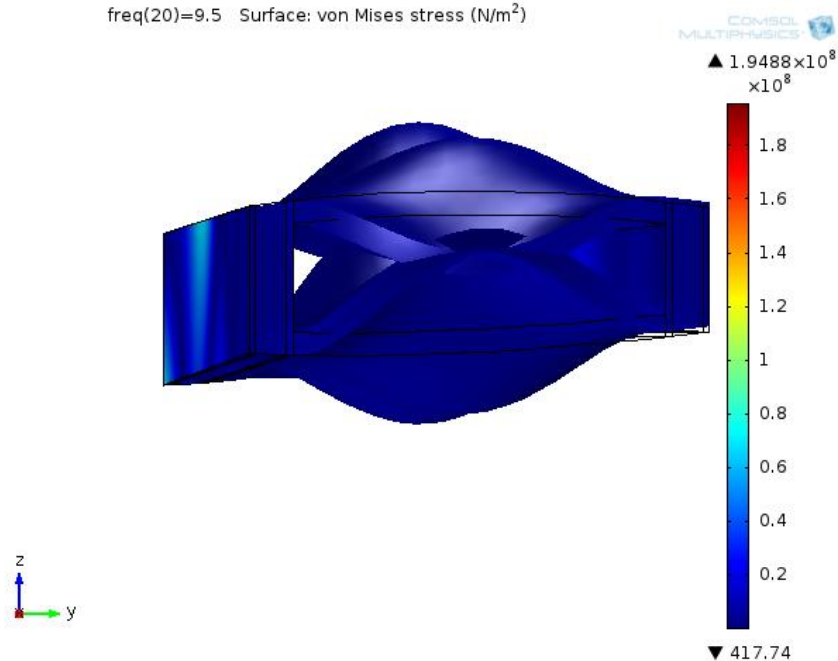




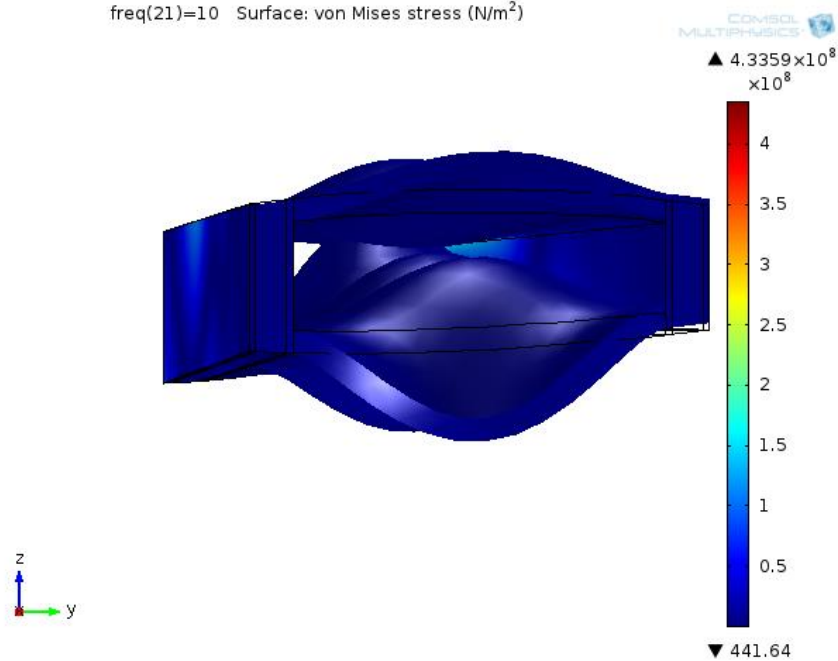




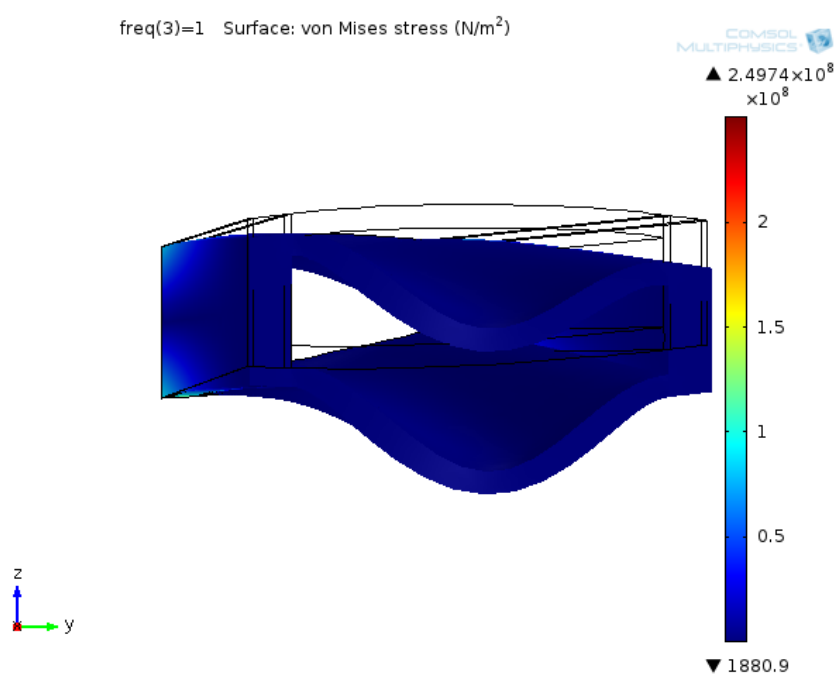
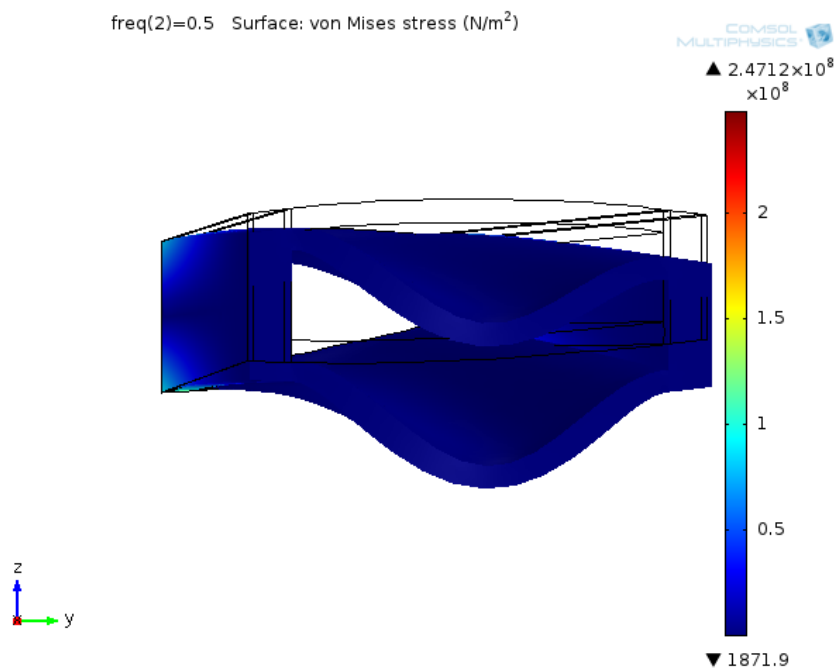
freq(20)=9.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



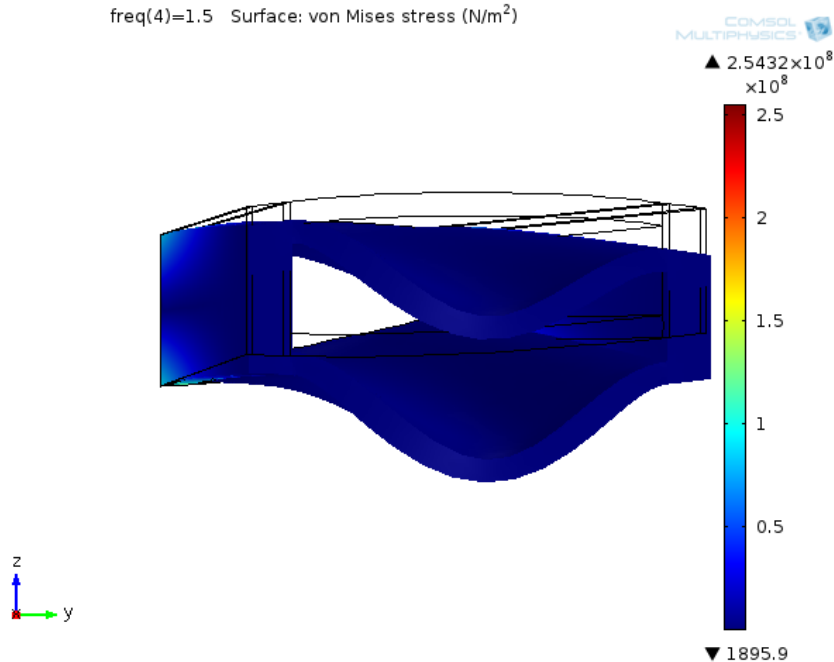
freq(21)=10 Surface: von Mises stress (N/m²)



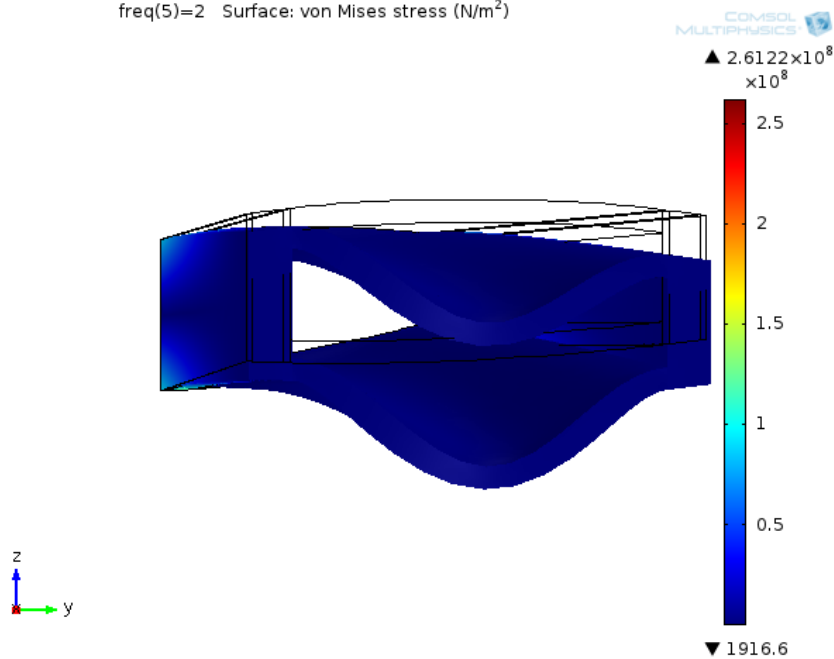
Π2 Αφρός Αλουμινίου



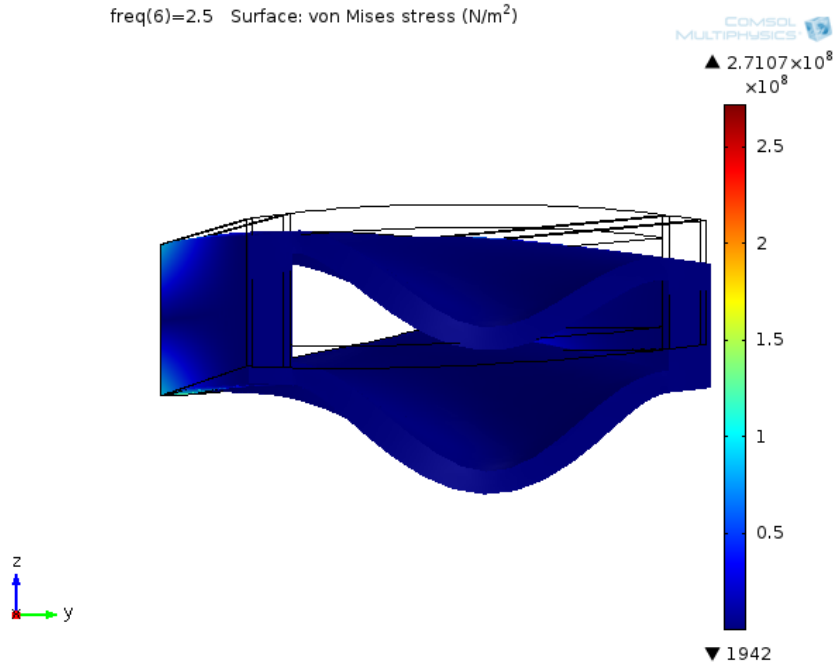
freq(4)=1.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



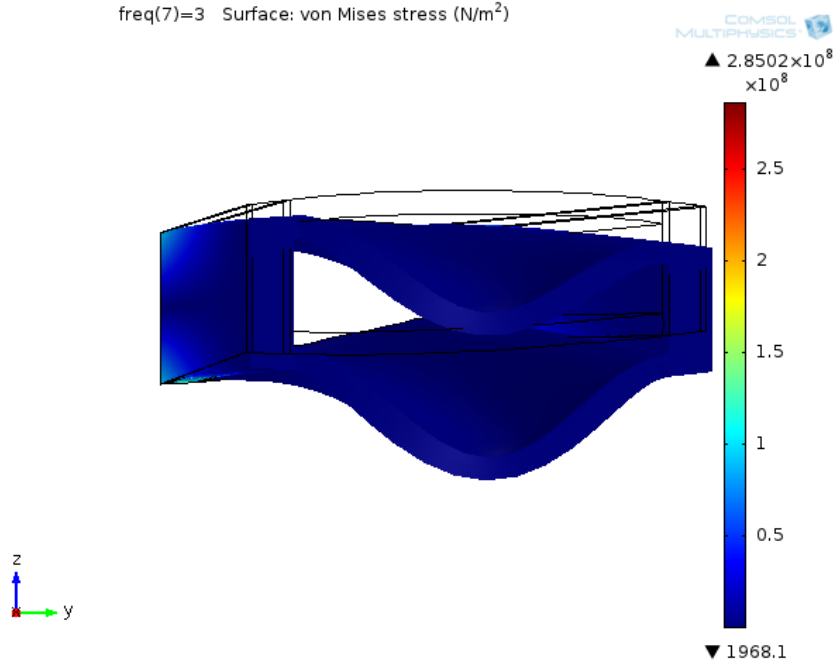
freq(5)=2 Surface: von Mises stress (N/m²)



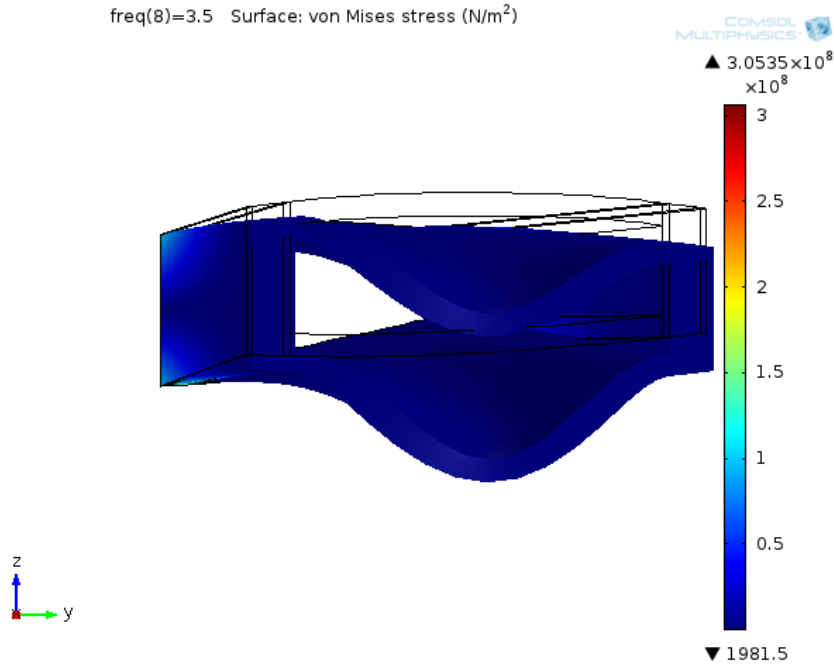
freq(6)=2.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



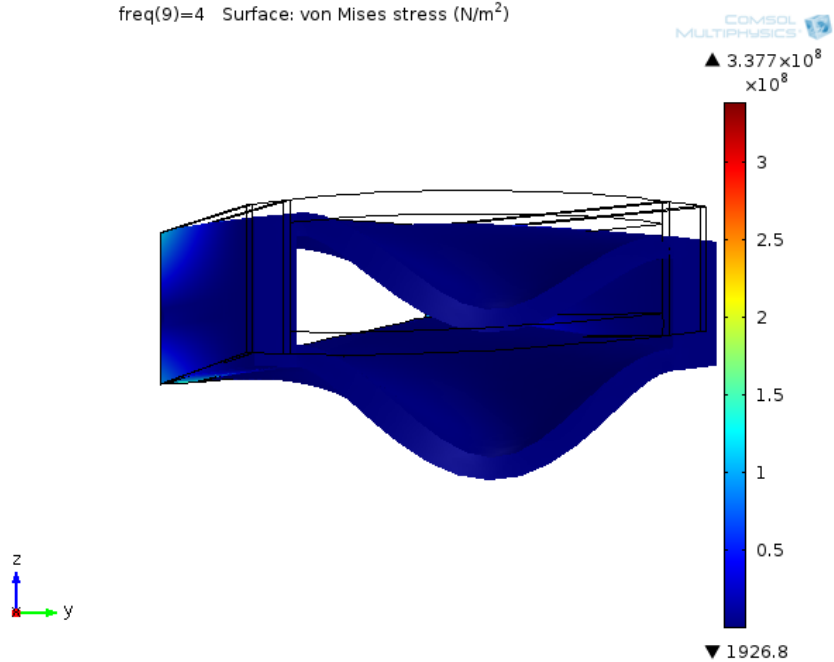
freq(7)=3 Surface: von Mises stress (N/m²)

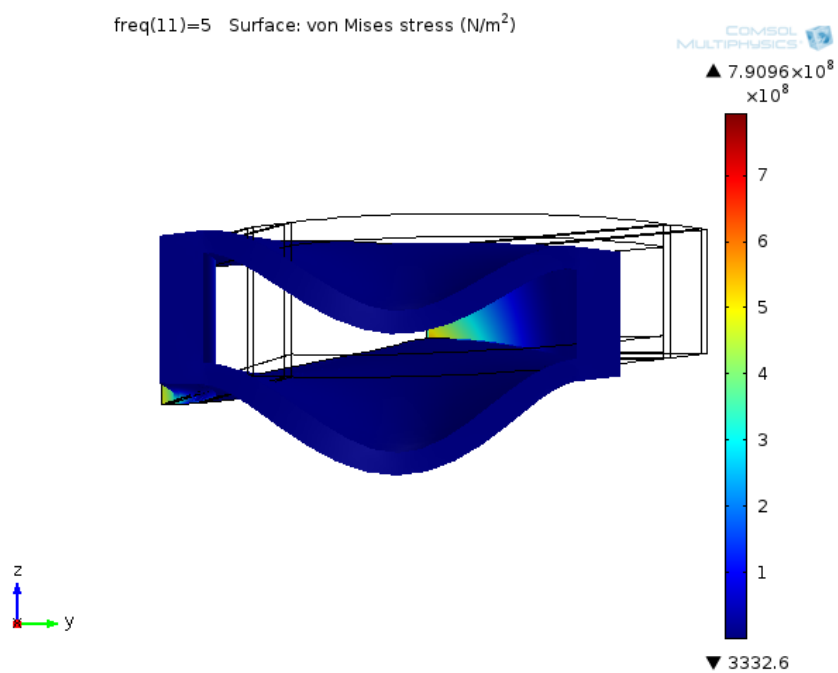
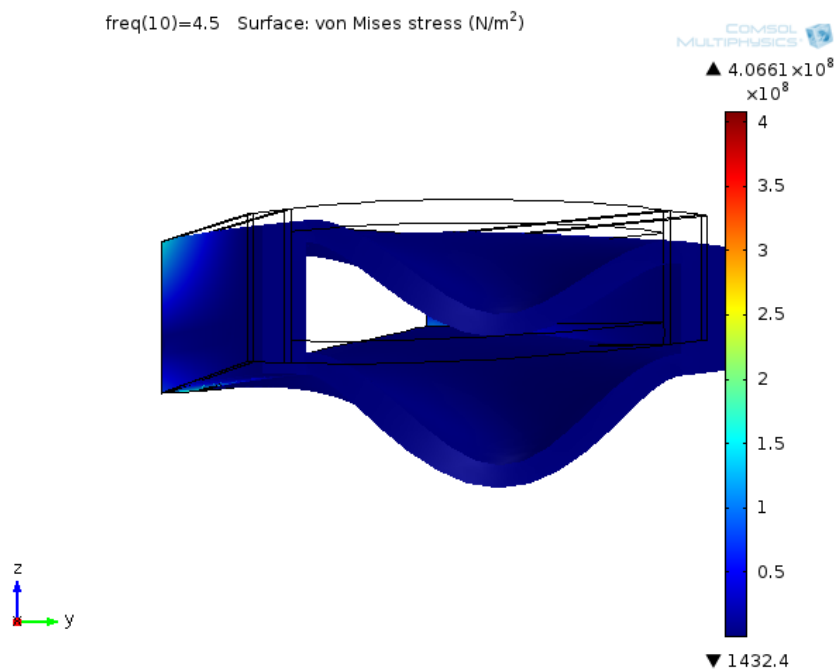


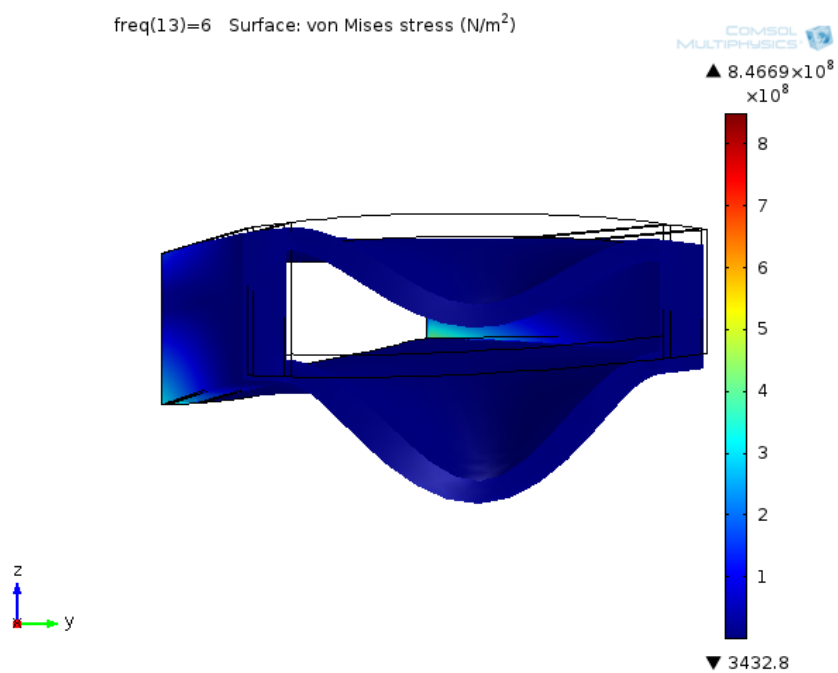
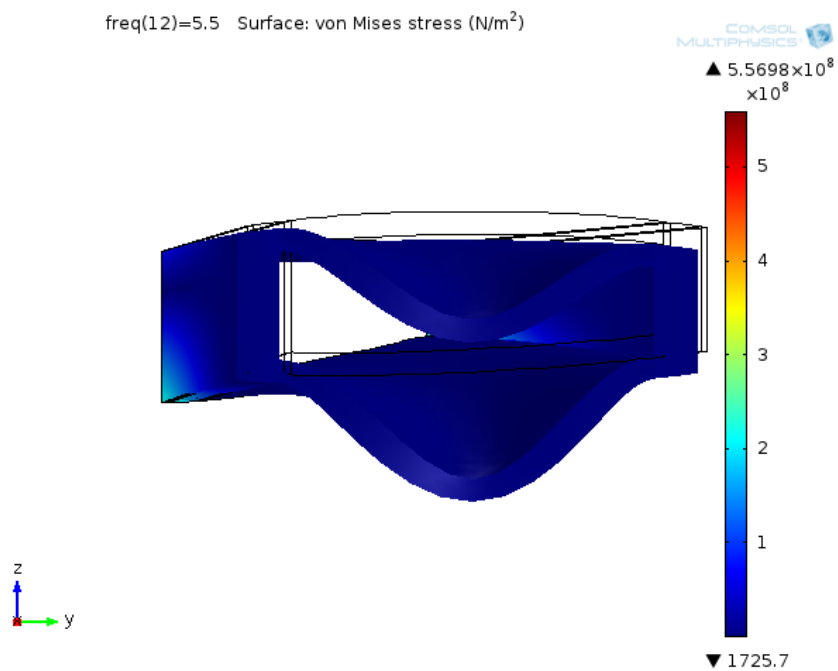
freq(8)=3.5 Surface: von Mises stress (N/m²)

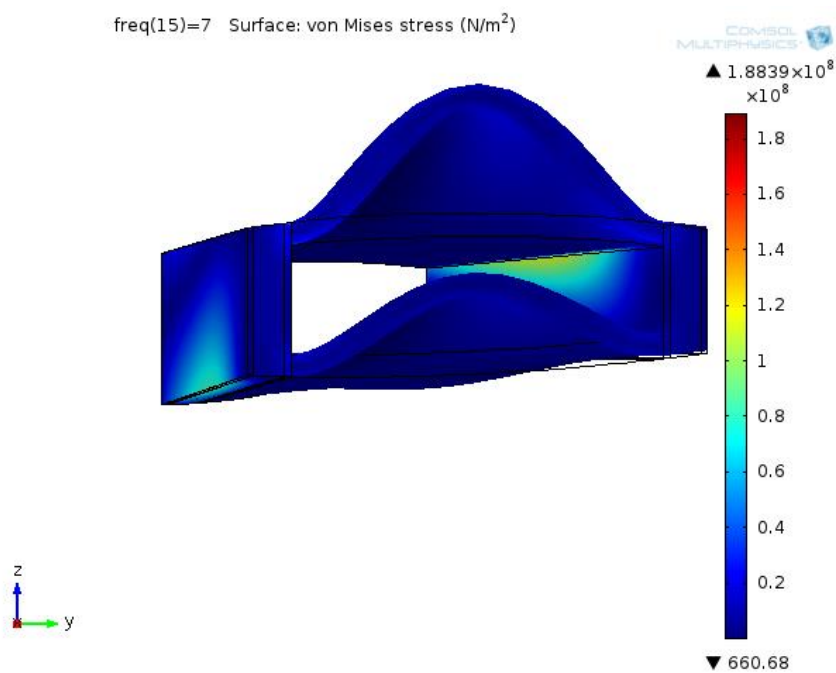
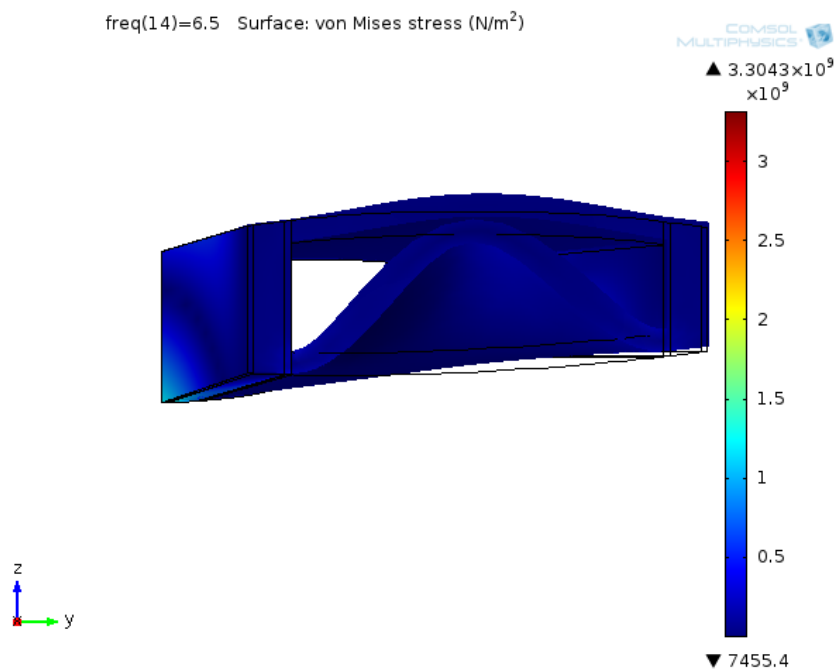


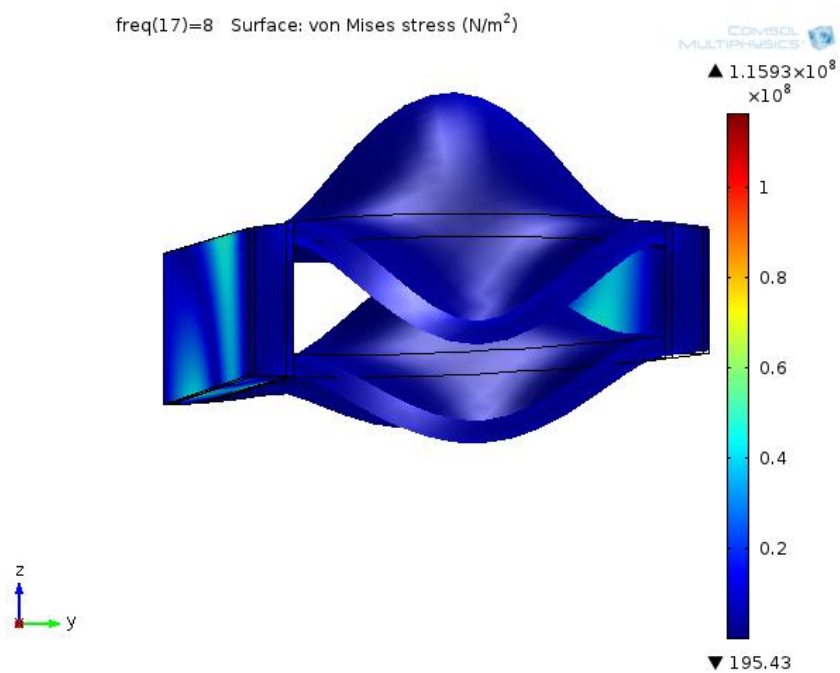
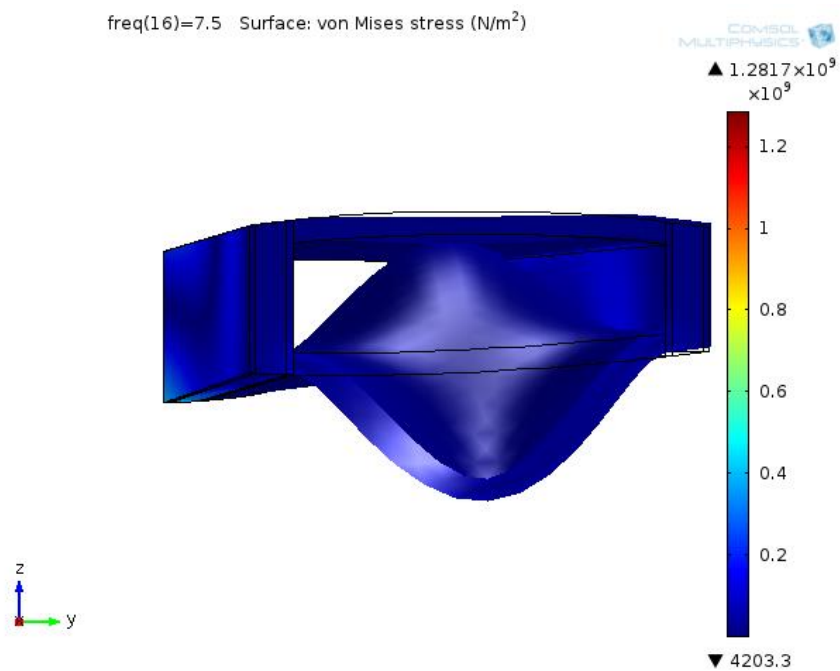
freq(9)=4 Surface: von Mises stress (N/m²)

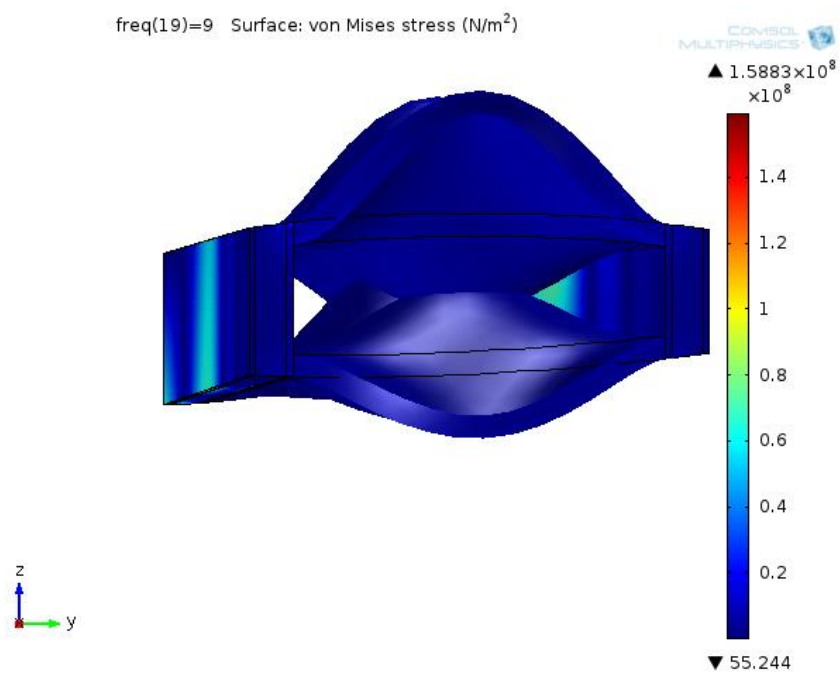
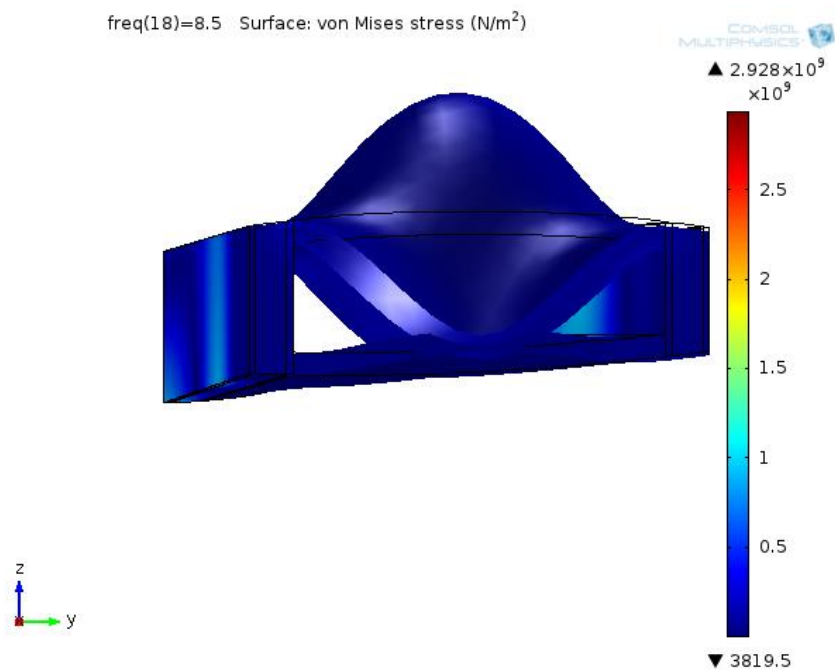


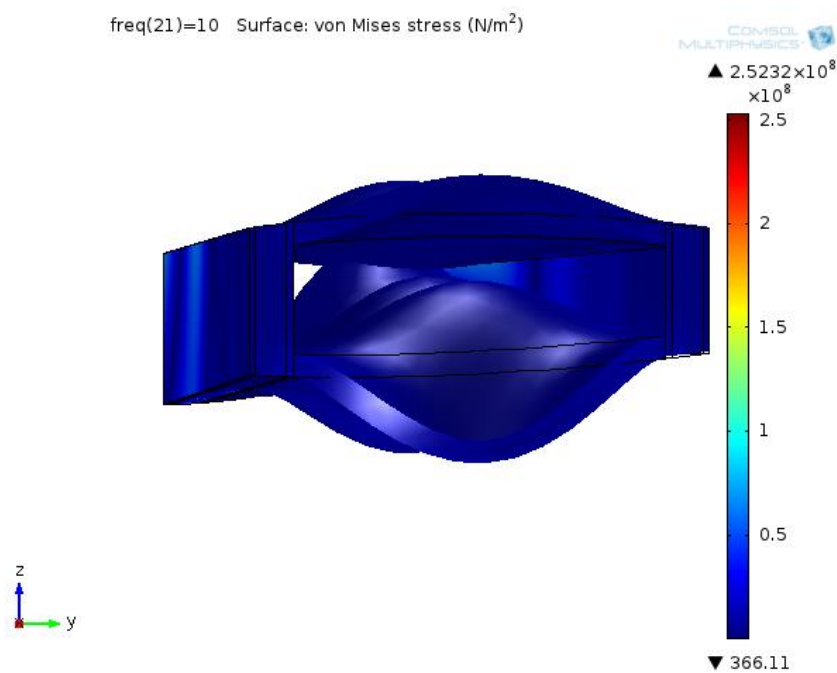
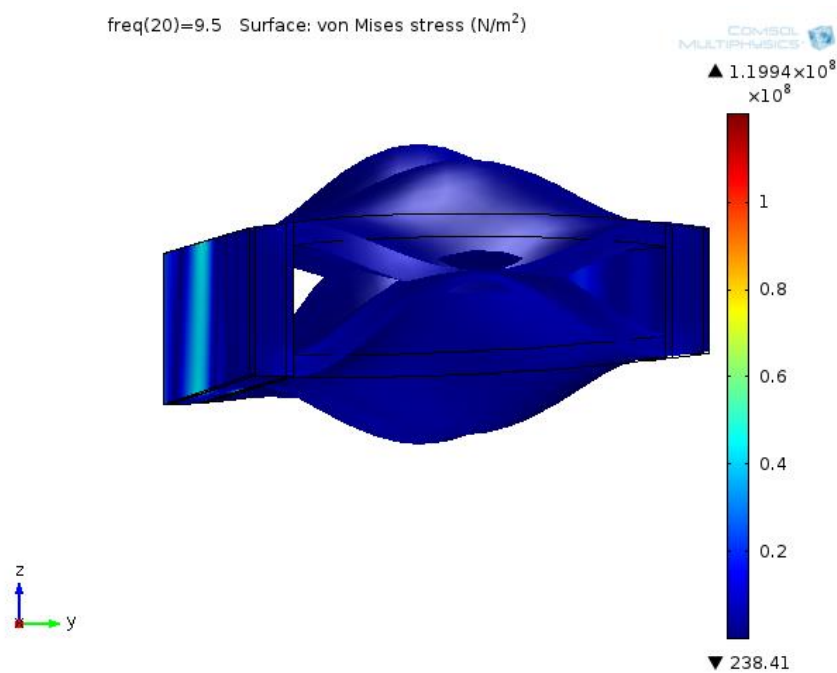




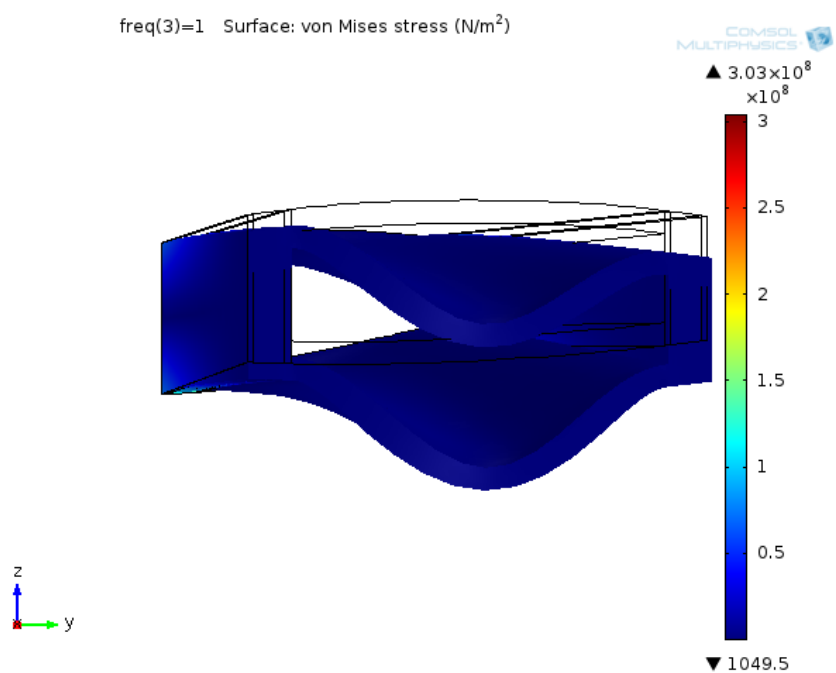
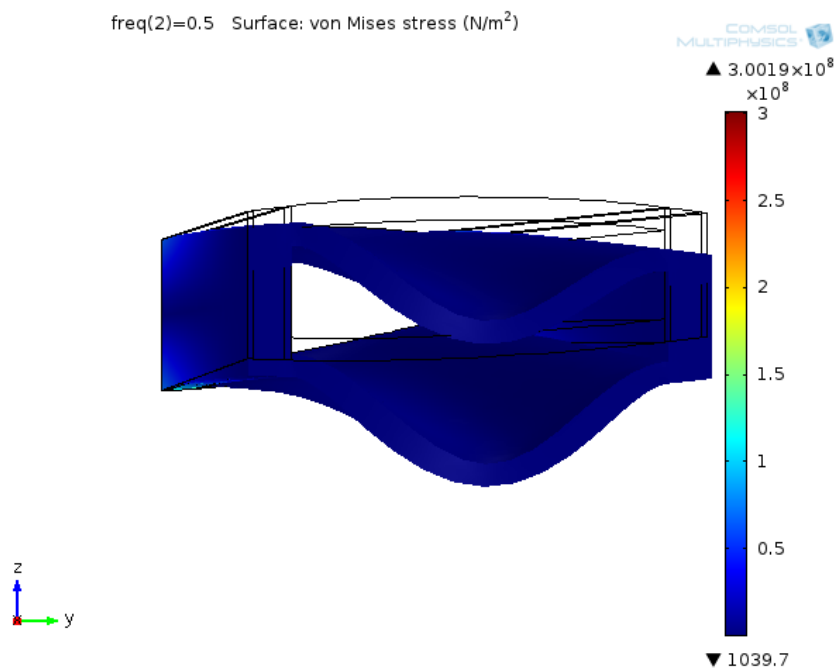




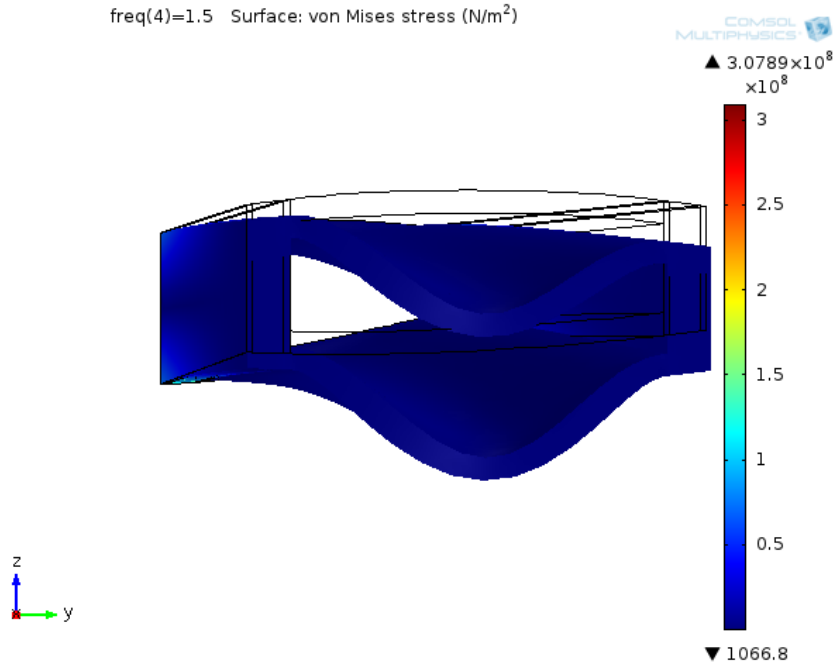




Π3 Αυξητικό Υλικό



freq(4)=1.5 Surface: von Mises stress (N/m²)



freq(5)=2 Surface: von Mises stress (N/m²)

