



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

---

**“ Μελέτη και βελτίωση ακρίβειας  
οπλικού συστήματος εγγύς προστασίας ”**

**ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ**

**ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΖΑΦΕΙΡΙΟΣ**

*Επιβλέπων : Καθηγητής Σταυρουλάκης Γεώργιος*

*1ο μέλος : Καθηγητής Αντωνιάδης Αριστομένης*

*2ο μέλος : Επίκουρος Καθηγητής Αλευράς Παναγιώτης*

**XANIA 2025**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα οπλικά συστήματα εγγύς προστασίας αποτελούν την τελευταία γραμμή αυτοματοποιημένης άμυνας που φέρουν τα πολεμικά πλοία για προστασία από εισερχόμενες εναέριες απειλές. Η υψηλή ταχυβολία που απαιτείται για την αντιμετώπιση των στόχων αέρος (3000 - 4500 βολές ανά λεπτό) επηρεάζει την δυνατότητα του όπλου να πλήττει στόχους με ακρίβεια και σε ικανή απόσταση, ώστε να εγγυηθεί η ακεραιότητα του πληρώματος που επανδρώνει την μονάδα επιφανείας. Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει το φάσμα συχνοτήτων που δημιουργείται κατά την διάρκεια της πυροδότησης και τον ρυθμό ταχυβολίας κατά την εμπλοκή σε έντονα επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Επίσης, διερευνάται η γεωμετρία του εξάκανου πυροβόλου όπλου, ώστε να διαπιστωθούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στην ταλάντωση της κάννης του πυροβόλου από την θέση ισορροπίας του και να προταθούν κατάλληλες προδιαγραφές που πρέπει να φέρει το σύστημα απόσβεσης κραδασμών για να περιοριστεί η διασπορά του πυρός με στόχο την βελτίωση της ακρίβειας του όπλου.





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>9</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>10</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>11</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>15</b>
1.1 Συστήματα εγγύς προστασίας .....	15
1.2 Διασπορά .....	16
1.3 Μηχανικές ιδιότητες υλικών .....	17
1.3.1 Πυκνότητα .....	17
1.3.2 Λόγος Poisson ( $\nu$ ) .....	17
1.3.3 Μέτρο Ελαστικότητας Young (Young's Modulus) .....	18
1.3.4 Μέτρο Young σε Γραμμικά Ελαστικά Υλικά.....	19
1.4 Θεωρία Πεπερασμένων στοιχείων (F.E.A) .....	20
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ (CAD).....</b>	<b>25</b>
2.1 Εισαγωγή .....	25
2.2 Λειτουργική Περιγραφή Υποσυστημάτων .....	26
2.2.1 Υποσύστημα στόχευσης .....	26
2.2.2 Υποσύστημα στήριξης.....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ (CAE) .....</b>	<b>36</b>
3.1 Συστήματα CAE .....	36
3.2 Υλικά υποσυστημάτων .....	37
3.2.1 Εποξική Ρητίνη (Epoxy) .....	37
3.2.2 Αλουμίνιο (Aluminium).....	38
3.2.3 Ατσάλι (Steel).....	39
3.3 Συνοριακές Συνθήκες.....	40
3.3.1 Σταθερή στήριξη έδρασης .....	40
3.3.2 Σημειακές μάζες .....	42
3.3.3 Υδραυλικοί αποσβεστήρες έδρασης .....	45
3.3.4 Έδρανα κύλισης .....	46
3.4 Τελικό μοντέλο υπολογιστικής ανάλυσης .....	49
3.4.1 Προσομοιωμένη γεωμετρία .....	49
3.4.2 Διακριτοποίηση .....	49
3.5 Άμεσος Επιλυτής MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Solver).....	50
3.6 IRAM - Sorensen (Implicit Restarted Arnoldi Method) .....	50

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....</b>	<b>51</b>
4.1 Μεθοδολογία εξαγωγής ιδιομορφών, ιδιοσυχνοτήτων .....	51
4.2 Ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες κατά γωνία στόχευσης .....	58
4.3 Ερμηνεία ιδιομορφών κατά Modal Effective Mass (MEM) .....	59
4.3.1 Γωνία στόχευσης 0° .....	60
4.3.2 Γωνία στόχευσης -25° .....	62
4.3.3 Γωνία στόχευσης +85° .....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ.....</b>	<b>66</b>
5.1 Γενικευμένη εξίσωση κίνησης αρμονικού ταλαντωτή.....	66
5.1.2 Απόκριση στο πεδίο συχνότητας .....	66
5.1.3 Συντελεστής Απόσβεσης Rayleigh.....	66
5.1.4 Μέθοδος Ιδιομορφών.....	68
5.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	69
5.2.1 Κρουστικά φορτία κατά γωνία στόχευσης .....	69
5.3 Αρμονική απόκριση σφικτήρα ρύγχους (3000 SPM) .....	73
5.3.1 Γωνία στόχευσης 0°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	74
5.3.2 Γωνία στόχευσης -25°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	75
5.3.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	76
5.4 Αρμονική απόκριση σφικτήρα ρύγχους (4500 SPM) .....	77
5.4.1 Γωνία στόχευσης 0°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	78
5.4.2 Γωνία στόχευσης -25°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	79
5.4.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....</b>	<b>81</b>
6.1 Σημεία παρέμβασης .....	81
6.2 Μοντελοποιημένη γεωμετρία ρύγχους συγκράτησης.....	82
6.3 Ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες βελτιωμένου μοντέλου .....	82
6.3.1 Γωνία στόχευσης 0°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες .....	83
6.3.2 Γωνία στόχευσης -25°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες .....	84
6.3.3 Γωνία στόχευσης +85°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες .....	85
6.4 Αρμονική απόκριση βελτιωμένου μοντέλου (3000 SPM) .....	86
6.4.1 Γωνία στόχευσης 0°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	87
6.4.2 Γωνία στόχευσης -25°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	88
6.4.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	89
6.5 Αρμονική απόκριση βελτιωμένου μοντέλου (4500 SPM) .....	90
6.5.1 Γωνία στόχευσης 0°, φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	91

6.5.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	92
6.5.3 Γωνία στόχευσης $+85^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων .....	93
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>94</b>
7.1 Σύγκριση αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου .....	94
7.1.1 Σύγκριση Ιδιοτιμών - ιδιοσυχνοτήτων .....	94
7.1.2 Σύγκριση αρμονικής απόκρισης (3000 SPM).....	95
7.1.3 Σύγκριση αρμονικής απόκρισης (4500 SPM).....	96
7.2 Συστάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	97
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>99</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>101</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>123</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ ΑΡΧΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ.....</b>	<b>159</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ .....</b>	<b>191</b>



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

A/A	Τίτλος Διαγράμματος	Σελίδα
Διάγραμμα 1.1	Στατιστική κατανομή διασποράς	16
Διάγραμμα 1.2	Τάση ( $\sigma$ ) - παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) γραμμικού ελαστικού υλικού	19
Διάγραμμα 4.1	Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων αρχικού μοντέλου	58
Διάγραμμα 5.1	Πλήρης μορφή μοντέλου απόσβεσης	67
Διάγραμμα 5.2	Ανάλυση δυνάμεων σε συνιστώσες	70
Διάγραμμα 5.3	Μοναδιαία διανύσματα	70
Διάγραμμα 5.4	Μονομετρικές συνιστώσες δύναμης F	71
Διάγραμμα 5.5	Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz	73
Διάγραμμα 5.6	Γωνία στόχευσης 0°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	74
Διάγραμμα 5.7	Γωνία στόχευσης -25°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	75
Διάγραμμα 5.8	Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	76
Διάγραμμα 5.9	Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz	77
Διάγραμμα 5.10	Γωνία στόχευσης 0°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	78
Διάγραμμα 5.11	Γωνία στόχευσης -25°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	79
Διάγραμμα 5.12	Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	80
Διάγραμμα 6.1	Βελτιωμένο μοντέλο. Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων	81
Διάγραμμα 6.2	Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz	86
Διάγραμμα 6.3	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης 0°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	87
Διάγραμμα 6.4	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης -25°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	88
Διάγραμμα 6.5	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz	89
Διάγραμμα 6.6	Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz	90
Διάγραμμα 6.7	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης 0°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	91
Διάγραμμα 6.8	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης -25°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	92

Διάγραμμα 6.9	Βελτιωμένο μοντέλο.Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz	93
Διάγραμμα 7.1	Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων κατά γωνία στόχευσης	94
Διάγραμμα 7.2	Σύγκριση εκτροπών αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου. Συχνότητα 50 Hz	95
Διάγραμμα 7.3	Σύγκριση εκτροπών αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου. Συχνότητα 75 Hz	96

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

A/A	Τίτλος Πίνακα	Σελίδα
Πίνακας 3.1	Μηχανικές ιδιότητες υλικών των εξαρτημάτων	37
Πίνακας 3.2	Μάζα, κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης 0°	42
Πίνακας 3.3	Μάζα, κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης -25°	43
Πίνακας 3.4	Μάζα, κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης +85°	44
Πίνακας 3.5	Δυσκαμψίες ένσφαιρου εδράνου κύλισης	47
Πίνακας 3.6	Δυσκαμψίες άσφαιρου εδράνου κύλισης	48
Πίνακας 4.1	MEM κατά γωνία και ιδιομορφή	59
Πίνακας 4.2	Γωνία στόχευσης 0°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	60
Πίνακας 4.3	Γωνία στόχευσης -25°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	62
Πίνακας 4.4	Γωνία στόχευσης +85°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	64
Πίνακας 5.1	Μέτρο δύναμης ανάκρουσης, ρυθμός βολής 3000 SPM	72
Πίνακας 5.2	Μέτρο δύναμης ανάκρουσης, ρυθμός βολής 4500 SPM	72
Πίνακας 5.3	Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συσχρότητα διέγερσης 50 Hz	73
Πίνακας 5.4	Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συσχρότητα διέγερσης 75 Hz	77
Πίνακας 6.1	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης 0°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	83
Πίνακας 6.2	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης -25°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	84
Πίνακας 6.3	Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης +85°, ιδιόμορφες, ιδιοσυχνότητες	85
Πίνακας 6.4	Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συσχρότητα διέγερσης 50 Hz	86
Πίνακας 6.5	Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συσχρότητα διέγερσης 75 Hz	90

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

A/A	Τίτλος Σχήματος	Σελίδα
Σχήμα 1.1	Προτεραιότητες εμπλοκής κατά αμυντική περίμετρο	15
Σχήμα 1.2	Εφελκυστική τάση - τρισδιάσταση παραμόρφωση	17
Σχήμα 1.3	Ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα	20
Σχήμα 1.4	Σχηματικές συναρτήσεις	21
Σχήμα 1.5	Παραμορφωμένη ράβδος	22
Σχήμα 1.6	Ράβδος με κόμβους	24
Σχήμα 2.1	Σύστημα εγγύς προστασίας PHALANX, ανατομία	25
Σχήμα 2.2	Στροφείο	26
Σχήμα 2.3	Άξονας στροφής	26
Σχήμα 2.4	Μοντελοποιημένο ένσφαιρο ρουλεμάν	27
Σχήμα 2.5	Μοντελοποιημένο άσφαιρο ρουλεμάν	27
Σχήμα 2.6	Μοντελοποιημένη κάννη μεταβλητού πάχους	28
Σχήμα 2.7	Μοντελοποιημένοι σφινγκήρες	28
Σχήμα 2.8	Συναρμολόγηση περιστρεφόμενων τμημάτων με έδρανα κύλισης	29
Σχήμα 2.9	Οριζόντια τομή περιβλήματος. Διακρίνονται οι υποδοχές των εδράνων κύλισης, καθώς τα στηρίγματα με τον κlobό συγκράτησης.	29
Σχήμα 2.10	Συναρμολόγηση περιστρεφόμενων τμημάτων με περίβλημα	30
Σχήμα 2.11	Κlobός συγκράτησης Πρόσοψη , πίσω όψη , πλάγια δεξιά όψη και διαγώνια όψη	30
Σχήμα 2.12	Σύστημα τροφοδοσίας	31
Σχήμα 2.13	RADAR εντοπισμού - ιχνυλάτησης	31
Σχήμα 2.14	Θόλος με σύστημα υπερύθρων εμπρόσθιας όψης	32
Σχήμα 2.15	Συναρμολόγηση υποσυστήματος στόχευσης. Το RADAR με ερυθρό χρώμα υποδγκνύει οτι βρίσκεται μέσα στον θόλο	32
Σχήμα 2.16	Μοντελοποιημένη κύρια βάση στήριξης	33
Σχήμα 2.17	Μοντελοποιημένη δομική βάση	33
Σχήμα 2.18	Μοντελοποιημένο συγκρότημα πομπού	34
Σχήμα 2.19	Μοντελοποιημένος θάλαμος ηλεκτρονικών	34
Σχήμα 2.20	Μοντελοποιημένο κατάστρομα	35

Σχήμα 2.21	Συναρμολόγηση υποσυστήματος στήριξης	35
Σχήμα 3.1	Θόλος RADAR εποξικής ρητίνης	37
Σχήμα 3.2	Τμήματα αλουμινίου	38
Σχήμα 3.3	Τμήματα χάλυβα	39
Σχήμα 3.4	Συνοριακές συνθήκες. Θεωρητική εφαρμογή (a) ημιπεπερασμένο μοντέλο πλάκας αλουμινίου και (b) κεραμική πλάκα με πλάκα αλουμινίου στο πίσω μέρος	40
Σχήμα 3.5	Επιφάνειας εφαρμογής συνοριακή συνθήκης σταθερής στήριξης	41
Σχήμα 3.6	Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης $0^\circ$	42
Σχήμα 3.7	Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης $-25^\circ$	43
Σχήμα 3.8	Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης $+85^\circ$	44
Σχήμα 3.9	Θεωρητική αναπαράσταση ορθοτροπικής ελαστικής στήριξης στην επιφάνεια A	45
Σχήμα 3.10	Υδραυλικοί αποσβεστήρες έδρασης ως ελαστικές στηρίξεις	46
Σχήμα 3.11	Διπλό ένσφαιρο έδρανο κύλισης σε τομή	46
Σχήμα 3.12	Άσφαιρο έδρανο κύλισης σε τομή	47
Σχήμα 3.13	Στροφείο με μοντελοποιημένα έδρανα κύλισης (a) και (b) σώματα κύλισης ως ελαστικές στηρίξεις, αντικατάσταση γεωμετρίας με ισοδύναμες αξονικές και ακτινικές δυσκαμψίες	48
Σχήμα 3.14	Διακριτοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο υπολογιστικής προσομοίωσης	49
Σχήμα 4.1	Γωνία στόχευσης $0^\circ$ , άξονες κατευθύνσεων	60
Σχήμα 4.2	Ιδιομορφή 21 - ιδιοσυχνότητα 51,4 Hz ( $\alpha$ ), ιδιομορφή 24 - ιδιοσυχνότητα 78,1 Hz ( $\beta$ )	61
Σχήμα 4.3	Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , άξονες κατευθύνσεων	62
Σχήμα 4.4	Ιδιομορφή 19 - ιδιοσυχνότητα 53,22 Hz ( $\alpha$ ), ιδιομορφή 21 - ιδιοσυχνότητα 72,77 Hz ( $\beta$ )	63
Σχήμα 4.5	Γωνία στόχευσης $+85^\circ$ , άξονες κατευθύνσεων	64
Σχήμα 4.6	Ιδιόμορφη 30 - ιδιοσυχνότητα 53,95 Hz ( $\alpha$ ), ιδιόμορφη 32 - ιδιοσυχνότητα 72,33 Hz ( $\beta$ )	65
Σχήμα 5.1	Γωνίες στόχευσης	69
Σχήμα 5.2	Σφικτήρας ρύγχους ως σημείο αναφοράς εκτροπών	73
Σχήμα 5.3	Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης $0^\circ$	74
Σχήμα 5.4	Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης $-25^\circ$	75



Σχήμα 5.5	Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης +85°	76
Σχήμα 5.6	Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης 0°	78
Σχήμα 5.7	Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης -25°	79
Σχήμα 5.8	Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης +85°	80
Σχήμα 6.1	Ενισχυμένο ρύγχος συγκράτησης	82
Σχήμα 6.2	Βελτιωμένο μοντέλο Ιδιομορφή 32 - ιδιοσυχνότητα 49,3 Hz (α), Ιδιομορφή 37 - ιδιοσυχνότητα 78,1 Hz (β)	83
Σχήμα 6.3	Βελτιωμένο μοντέλο Ιδιομορφή 23 - ιδιοσυχνότητα 49,2 Hz (α), ιδιομορφή 28 - ιδιοσυχνότητα Hz 78,13 (β)	84
Σχήμα 6.4	Βελτιωμένο μοντέλο Ιδιομορφή 34 - ιδιοσυχνότητα 49,7 Hz (α), ιδιομορφή 39 - ιδιοσυχνότητα 78,2 Hz (β)	85
Σχήμα 6.5	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης 0°	87
Σχήμα 6.6	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης -25°	88
Σχήμα 6.7	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης +85°	89
Σχήμα 6.8	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης 0°	91
Σχήμα 6.9	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης -25°	92
Σχήμα 6.10	Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης +85°	93

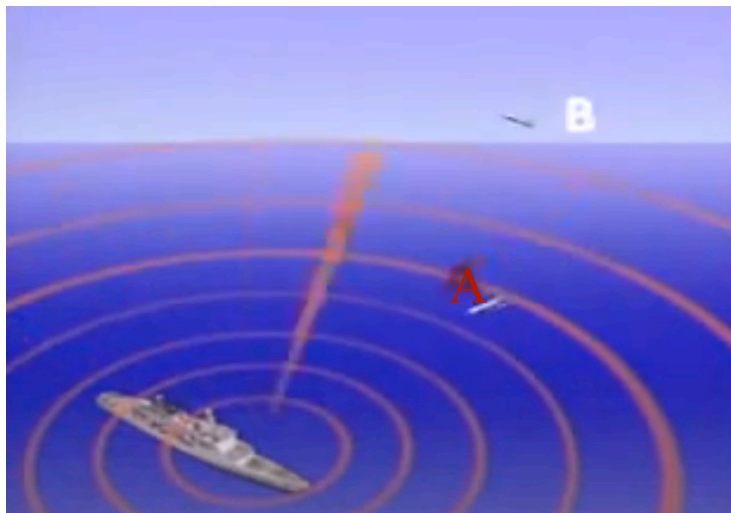


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Συστήματα εγγύς προστασίας

Τα συστήματα εγγύς προστασίας αποτελούν την τελευταία γραμμή άμυνας έναντι εισερχόμενων αεροπορικών απειλών, ιδιαίτερα κατά των πυραύλων επιφανείας. Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα εγγύς προστασίας, το PHALANX <sup>[12]</sup> αναπτύχθηκε από την General Dynamics τη δεκαετία του 1960 και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970. Το PHALANX είναι σχεδιασμένο να εντοπίζει, να παρακολουθεί και να εμπλέκεται αυτόματα με εισερχόμενες απειλές που διεισδύουν στην κύρια αμυντική περίμετρο ενός πλοίου.

Με τα χρόνια, το σύστημα έχει αναβαθμισθεί, ενισχύοντας τις δυνατότητές του για την αντιμετώπιση νέων και εξελισσόμενων απειλών. Παρά τις αναβαθμίσεις, κύριο ζήτημα του οπλικού συστήματος είναι η διατήρηση σταθερής ακρίβειας, ιδιαίτερα στον μετριάσμο της διασποράς, που επηρεάζει την ικανότητα του συστήματος να καταστρέφει αξιόπιστα στόχους που κινούνται γρήγορα σε διάφορες αποστάσεις.



**Σχήμα 1.1 :** Προτεραιότητες εμπλοκής κατά αμυντική περίμετρο

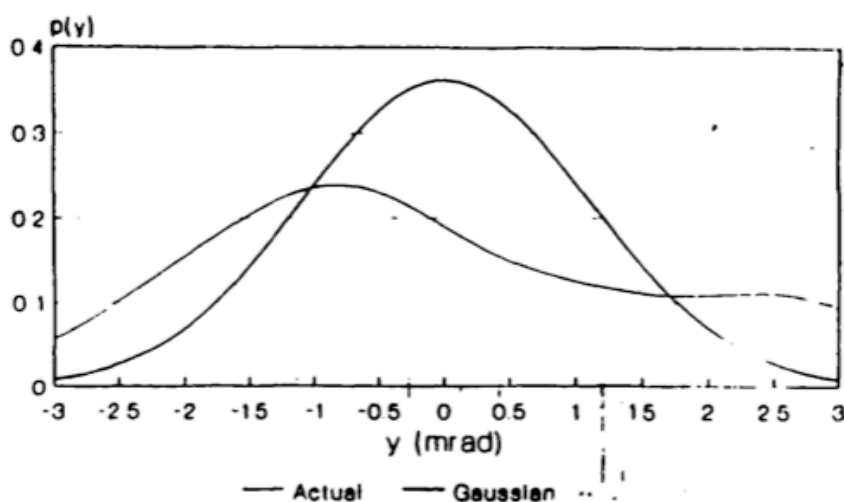
## 1.2 Διασπορά

Όλα τα οπλικά συστήματα εμφανίζουν διασπορά. Η διασπορά αποδίδεται κυρίως στην εγκάρσια μετατόπιση της κάννης που προκαλείται από τις δυνάμεις των εκλυόμενων προωθητικών αερίων και την κίνηση του ίδιου του βλήματος.

Διασπορά παρατηρείται τόσο στην κατακόρυφη όσο και στην πλάγια κατεύθυνση. Για πυρομαχικά μικρότερου διαμετρήματος, όπως το MK 149 των 20 mm, οι πλευρικές και κατακόρυφες μετατοπίσεις τείνουν να είναι ίσες. Η προκύπτουσα στατιστική κατανομή τείνει να παίρνει μορφή κανονικής κατανομής.

Τυπικά, η διασπορά μετράται ως προς την τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής. Η τιμή διασποράς αναφέρεται για 1  $\sigma$ , περίπου 39%. Η κανονική κατανομή είναι μια κατάλληλη προσέγγιση για την πραγματική κατανομή, αφού η διασπορά προκύπτει από πολλά μικρά τυχαία σφάλματα.

Ωστόσο, το διάγραμμα 1.1 δείχνει ότι η διασπορά του οπλικού συστήματος μπορεί να μην είναι ακολουθεί την κανονική κατανομή. Στο διάγραμμα 1.1 απεικονίζεται σύγκριση ενός παραδείγματος δεδομένων διασποράς από την HUGHES MISSILE [4] σε ταχυβολία 3.000 βολών ανά λεπτό, συγκριτικά με την κανονική κατανομή.



Διάγραμμα 1.1: Στατιστική κατανομή διασποράς

Για την διερεύνηση της διασποράς αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ολόκληρου του συστήματος και των στηριγμάτων του. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης και απεικόνισης ιδιομορφών. Αντικείμενο αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη του μοντέλου, σχεδιαστικές αποφάσεις, και προτάσεις βελτίωσης.

### 1.3 Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Κατά την ανάπτυξη του τρισδιάστατου μοντέλου και την προετοιμασία για αριθμητική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), κρίθηκε απαραίτητος ο ορισμός υλικών με ρεαλιστικές μηχανικές ιδιότητες. Σε όλες τις μοντελοποιημένες γεωμετρίες του μοντέλου εκχωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά και ισότροπα υλικά, δηλαδή υλικά των οποίων η μηχανική απόκριση είναι γραμμική ως προς την εφαρμοζόμενη τάση και ανεξάρτητη από τη κατεύθυνση της φόρτισης. Στην συνέχεια περιγράφονται βασικές έννοιες των ιδιοτήτων των υλικών που μοντελοποιήθηκαν.

#### 1.3.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα <sup>[9]</sup> ως φυσικό μέγεθος, εκφράζει τη μάζα ενός υλικού ανά μονάδα όγκου. Συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\rho$  ή με το λατινικό γράμμα  $d$ , μετράται ως χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο. Ο βασικός μαθηματικός τύπος της πυκνότητας είναι ο λόγος της μάζας ενός υλικού,  $m$ , προς τον όγκο,  $V$ , που την περιέχει:

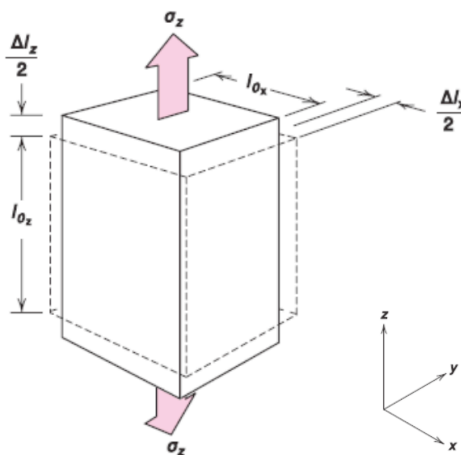
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

#### 1.3.2 Λόγος Poisson ( $\nu$ )

Κατά την άσκηση εφελκυστικής τάσης σε μεταλλικό δοκίμιο, η ελαστική επιμήκυνση και η αντίστοιχη παραμόρφωση  $\epsilon_z$  παρατηρούνται κατά την διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης ( $z$ ).

Αποτέλεσμα αυτής της επιμήκυνσης είναι η εμφάνιση συρρίκνωσης στις πλάγιες διευθύνσεις ( $x$  και  $y$ ) κάθετα στην εφαρμοζόμενη τάση.

Από αυτές τις συστολές μπορούν να προσδιορισθούν οι θλιπτικές παραμορφώσεις  $\epsilon_x$  και  $\epsilon_y$ .



Σχήμα 1.2 : Εφελκυστική τάση - τρισδιάσταση παραμόρφωση

$$\frac{\varepsilon_z}{2} = \frac{\Delta l_z/2}{I_0 z} \quad (1.2)$$

$$2 \frac{\varepsilon_x}{2} = \frac{\Delta l_x/2}{I_0 x} \quad (1.3)$$

Ο λόγος των πλάγιων παραμορφώσεων προς την αξονική παραμόρφωση ορίζει μία νέα παράμετρο, που ονομάζεται λόγος Poisson  $\nu$  [9] και ορίζεται σύμφωνα με την σχέση :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (1.4)$$

### 1.3.3 Μέτρο Ελαστικότητας Young (Young's Modulus)

Το μέτρο ελαστικότητας του Young [9] ή αλλιώς μέτρο ελαστικότητας είναι μια βασική μηχανική ιδιότητα των γραμμικά ελαστικών στερεών υλικών. Ορίζει τη σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης σε ένα στερεό υλικό :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.5)$$

- $E$  : μέτρο ελαστικότητας του υλικού (Young's Modulus),
- $\sigma$  : είναι η εφαρμοζόμενη τάση, και
- $\varepsilon$  : είναι η παραμόρφωση.

Το μέτρο Young έχει μονάδες πίεσης ή τάσης (π.χ. Pascal – Pa), καθώς η παραμόρφωση είναι αδιάστατη ποσότητα. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει το πηλίκο τάσης προς παραμόρφωση :

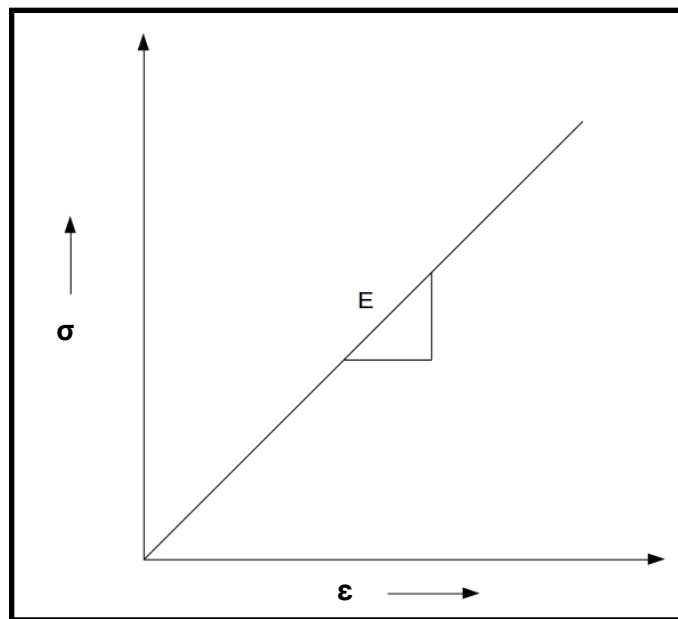
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.6)$$

Η φυσική ερμηνεία του μέτρου ελαστικότητας Young αποτελεί το μέτρο της ακαμψίας ενός υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο πιο δύσκολα παραμορφώνεται το υλικό υπό εξωτερικό φορτίο. Δεδομένου ότι η συνολική ακαμψία ενός αντικειμένου εξαρτάται επίσης από το σχήμα του, το μέτρο Young είναι μια ανεξάρτητη ιδιότητα από το σχήμα που χαρακτηρίζει μόνο το ίδιο το υλικό.

### 1.3.4 Μέτρο Young σε Γραμμικά Ελαστικά Υλικά

Ένα στερεό υλικό ονομάζεται ελαστικό [9] όταν μπορεί να επιστρέψει στη φυσική του μορφή μετά την απομάκρυνση των εξωτερικών φορτίσεων. Εάν κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης ο λόγος τάσης προς παραμόρφωση παραμένει σταθερός, τότε το μέτρο Young είναι επίσης σταθερό, και το υλικό χαρακτηρίζεται ως γραμμικά ελαστικό.

Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης ενός γραμμικά ελαστικού υλικού, στο οποίο η κλίση της ευθείας αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας του Young.



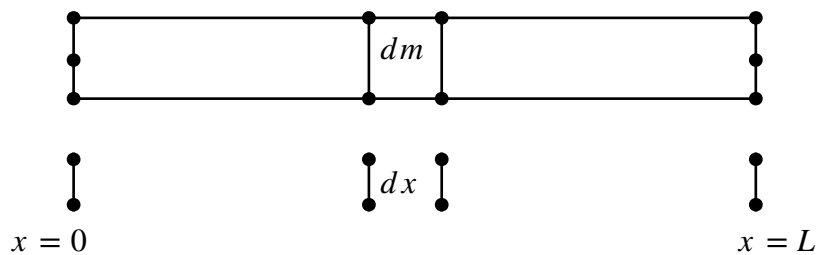
**Διάγραμμα 1.2 :** Τάση ( $\sigma$ ) - παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) γραμμικού ελαστικού υλικού

#### 1.4 Θεωρία Πεπερασμένων στοιχείων (F.E.A)

Προκειμένου να διερευνηθεί η διασπορά, εφαρμόστηκε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) [5],[6],[19]. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEA) [5],[6],[19] είναι μια αριθμητική μέθοδος για τη λήψη κατά προσέγγιση λύσεων σε μερικές διαφορικές εξισώσεις που προβλέπουν εκτοπίσματα και τις επιπτώσεις της τάσης σε μια κατασκευή. Η διαδικασία της μοντελοποίησης απαιτεί τη διακριτοποίηση μιας συνεχούς δομής σε ένα πλέγμα μικρών στοιχείων. Κάθε στοιχείο έχει ένα απλό γεωμετρικό σχήμα και πληροφορίες για τη διατύπωση των εξισώσεων με τη μορφή μητρώων μάζας και ακαμψίας. Οι άγνωστες γενικευμένες συντεταγμένες για κάθε στοιχείο είναι οι σχετικές κομβικές μετατοπίσεις τους. Μπορεί να οριστεί μια εξίσωση κίνησης για κάθε αντίστοιχο στοιχείο. Μια συγκεκριμένη λύση για κάθε στοιχείο ορίζεται ως προς τις επιμέρους κομβικές μετατοπίσεις. Η γενική λύση περιλαμβάνει το σύνολο εξισώσεων των στοιχείων της κατασκευής που μπορούν να λυθούν για όλα τα άγνωστα κομβικά εκτοπίσματα. Η υποδιαίρεση της κατασκευής και ο συνδυασμός των ξεχωριστών εξισώσεων για κάθε στοιχείο παρέχει μια λύση σε ολόκληρο το φυσικό σύστημα.

Οι κόμβοι διακριτοποιούνται σύμφωνα με έξι φυσικούς βαθμούς ελευθερίας. Κάθε κόμβος μπορεί να έχει έως και έξι βαθμούς ελευθερίας (μετατόπιση στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και τις αντίστοιχες περιστροφές τους). Ο βαθμός ελευθερίας ενός μοντέλου καθορίζει τον αριθμό των εξισώσεων κίνησης που πρέπει να διατυπώσει η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Κάθε βαθμός ελευθερίας έχει μία εξίσωση.

Για την καλύτερη κατανόηση της διατύπωσης ενός πεπερασμένου στοιχείου, παρέχεται απλό παράδειγμα δύο βαθμών ελευθερίας. Το Σχήμα 1.2 αντιπροσωπεύει μια ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα μήκους  $L$ , πυκνότητας μάζας  $\rho$  (μάζα / μήκος) και ακαμψίας ανάλογη με το γινόμενο  $E A$ , όπου  $E$  είναι ο συντελεστής ελαστικότητας και  $A$  το εμβαδόν διατομής.



Σχήμα 1.3 : Ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα

Η προσέγγιση θα είναι η διακριτοποίηση της απόκρισης της ράβδου ως προς τις τιμές των οριακών συνθηκών της. Για να προσδιοριστεί το εκτόπισμα, χρησιμοποιείται συνάρτηση θέσης ( $x$ ) και του χρόνου ( $t$ ),  $u = u(x, t)$ , κατά μήκος της ράβδου. Οι ακραίες τιμές ως  $u_1$  και  $u_2$  ορίζονται ως εξής :

$$u_1 = u(0, t) \quad (1.7)$$

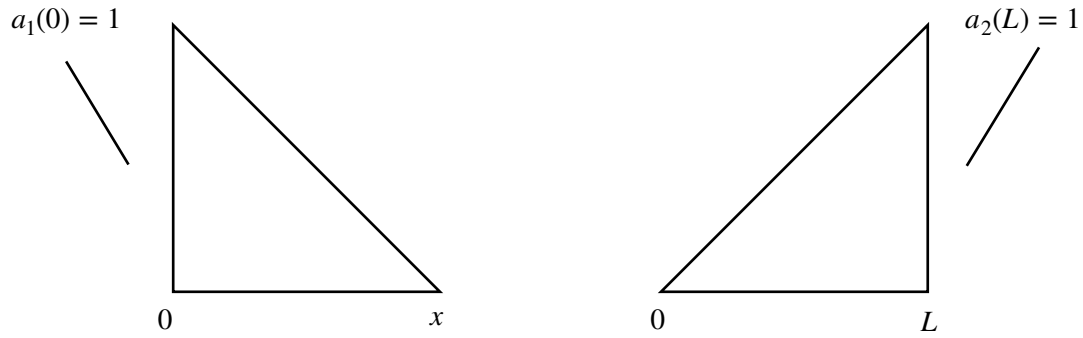
$$u_2 = u(L, t) \quad (1.8)$$



Οι συναρτήσεις  $a_1(x)$  και  $a_2(x)$  είναι γραμμικές, έτσι ώστε να ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$a_1(0) = 1 \quad , \quad a_2(0) = 0$$

$$a_1(L) = 0 \quad , \quad a_2(L) = 1$$



**Σχήμα 1.4 :** Σχηματικές συναρτήσεις

$$a_1(x) = 1 - \frac{x}{L} \tag{1.9}$$

$$a_2(x) = \frac{x}{L} \tag{1.10}$$

Η συνάρτηση εκτοπίσματος που προκύπτει για τη ράβδο είναι της μορφής :

$$u(x, t) = a_1(x)u_1(t) + a_2(x)u_2(t) \tag{1.11}$$

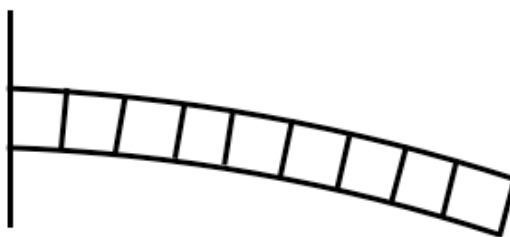
ή

$$u(x, t) = \begin{bmatrix} a_1(x) & a_2(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} \tag{1.12}$$

Τα αποτελέσματα των δύο συναρτήσεων επιτρέπουν την περιγραφή οποιασδήποτε απόκρισης του στοιχείου ράβδου χρησιμοποιώντας γραμμικούς συνδυασμούς των συναρτήσεων  $a_1(x)$  και  $a_2(x)$ . Το πρόβλημα έχει διακριτοποιηθεί με τη μεταβλητή  $q$  που ορίζεται στην εξίσωση (1.13).

$$\begin{Bmatrix} q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \tag{1.13}$$

Για παραμορφώσεις ράβδων που δεν έχουν γραμμικό σχήμα, το σχήμα 1.4 απεικονίζει μια δεύτερη μορφή κάμψης.



**Σχήμα 1.5 :** Παραμορφωμένη ράβδος

Η απόκριση μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα διαιρώντας τη ράβδο σε πολλά μικρά τμήματα έτσι ώστε ο γραμμικός συνδυασμός καθενός από αυτά τα μικρότερα τμήματα να αντιπροσωπεύει ακριβώς την απόκριση. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα διακριτοποίησης του στοιχείου, τόσο πιο ακριβής είναι η λύση.

Οι εξισώσεις κίνησης για τη ράβδο μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Lagrange. Είναι μια απλή μέθοδος για την ενσωμάτωση της προκύπτουσας κινητικής ενέργειας,  $K$ , και της ενέργειας παραμόρφωσης,  $V$ , για κάθε μεμονωμένο στοιχείο σε όλο το μήκος της ράβδου στις εξισώσεις (1.14) και (1.15). Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να αντικατασταθούν με την εξίσωση του Lagrange και να λυθούν για τις εξισώσεις κίνησης :

$$K = \frac{\gamma}{2} \int_0^L \left[ \dot{u}(x, t) \right]^2 dx \quad (1.14)$$

$$V = \frac{EA}{2} \int_0^L \left[ \frac{\delta u(x, t)}{\delta x} \right]^2 dx \quad (1.15)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (1.12) ως προς τον χρόνο :

$$\dot{u} = a_1(x)\dot{u}_1(t) + a_2(x)\dot{u}_2(t) \quad (1.16)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (7) ως προς την μετατόπιση ( $x$ ), και ορίζοντας την μεταβλητή  $\alpha'(x)$  ως την παράγωγο της  $\alpha(x)$  ως  $x$ , προκύπτει :

$$\frac{\delta u(x, t)}{\delta x} = a'_1(x)u_1(t) + a'_2(x)u_2(t) \quad (1.17)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.16) στην (1.14) και την εξίσωση (1.17) στην (1.15) :

$$K = \frac{\gamma}{2} \int_0^L \left[ a_1(x) \dot{u}_1(t) + a_2(x) \dot{u}_2(t) \right]^2 dx, \text{ και} \quad (1.18)$$

$$V = \frac{EA}{2} \int_0^L \left[ a'_1(x) u_1(t) + a'_2(x) u_2(t) \right]^2 dx \quad (1.19)$$

Ορίζοντας την συνάρτηση Lagrange  $L$ , ως :

$$L = K - V \quad (1.20)$$

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο Lagrange,

$$\frac{\delta}{\delta t} \left[ \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right] - \frac{\delta L}{\delta q_i} = Q_i \quad (1.21)$$

και (1.20), οι εξισώσεις κίνησης προκύπτουν. Στην εξίσωση (1.21) όπου  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , όπου  $n$  είναι το πλήθος των βαθμών ελευθερίας και ο όρος  $Q_i$  (έργο μη συντηρητικών δυνάμεων) είναι ίσως με 0.

Για εκτίμηση της εξίσωσης (1.21) χρειάζεται :

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{u}_1} = \frac{\delta K}{\delta \dot{u}_1} = \gamma \int_0^L \left[ a_1(x) \dot{u}_1(t) + a_2(x) \dot{u}_2(t) \right] a_1(x) dx \quad (1.22)$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{u}_2} = \frac{\delta K}{\delta \dot{u}_2} = \gamma \int_0^L \left[ a_1(x) \dot{u}_1(t) + a_2(x) \dot{u}_2(t) \right] a_2(x) dx \quad (1.23)$$

και

$$\frac{\delta L}{\delta u_1} = \frac{\delta V}{\delta u_1} = EA \int_0^L \left[ a'_1(x) u_1(t) + a'_2(x) u_2(t) \right] a'_1(x) dx \quad (1.24)$$

$$\frac{\delta L}{\delta u_2} = \frac{\delta V}{\delta u_2} = EA \int_0^L \left[ a'_1(x) u_1(t) + a'_2(x) u_2(t) \right] a'_2(x) dx \quad (1.25)$$

Τα μητρώα μάζας και ακαμψίας :

$$m_{ij} = \gamma \int_0^L a_i(x) a_j(x) dx \quad (1.26)$$

$$k_{ij} = EA \int_0^L [a'_i(x)a'_j(x) dx \quad (1.27)$$

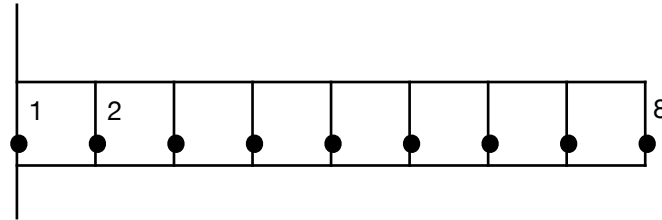
Ενσωματώνοντας τις εξισώσεις (1.22) και (1.23) στην (1.21) προκύπτουν οι εξισώσεις κινήσεις Lagrange που είναι ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα

$$\begin{bmatrix} m_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \end{Bmatrix} \quad (1.28)$$

και ο νόμος του Hooke :

$$\begin{bmatrix} k_{ij} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \end{Bmatrix} \quad (1.29)$$

Ως παράδειγμα συνολικών μητρώων μάζας και ακαμψίας το Σχήμα 1.5, φαίνεται ότι ο κόμβος 2 έχει συμβολή ακαμψίας από το στοιχείο 1 και το στοιχείο 2.



**Σχήμα 1.6 :** Ράβδος με κόμβους

Μέσω του γενικού πίνακα ακαμψίας,  $[K]$ , ορίζεται κάθε στοιχείο του πίνακα. Σε πολλές περιπτώσεις, ένα στοιχείο αποτελείται από τους συνδυασμούς πολλών μεμονωμένων συμβολών ακαμψίας στοιχείου.

$$[K] = \begin{bmatrix} [k_1] & \dots & \dots \\ \dots & [k_2] & \dots \\ \dots & \dots & [k_3] \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Για τον κόμβο 2,

$$K_{22} = k_{22}^1 + k_{11}^2 \quad (1.31)$$

Η γενική εξίσωση κίνησης που προκύπτει για εύρεση φυσικών ιδιοσυχνοτήτων :

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{X} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} X \end{Bmatrix} = 0 \quad (1.32)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ (CAD)

### 2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τη διαδικασία γεωμετρικής και λειτουργικής μοντελοποίησης του συστήματος εγγύς προστασίας PHALANX CIWS με τη χρήση του λογισμικού Siemens NX 12. Στόχος είναι η κατασκευή ενός κατάλληλου τρισδιάστατου μοντέλου με έμφαση στην αποτύπωση της γεωμετρίας και της δομικής αλληλεπίδρασης των κύριων υποσυστημάτων για προσομοίωση με χρήση Η/Υ (CAE).

Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει όλα τα βασικά υποσυστήματα: το περιστρεφόμενο σύστημα στόχευσης (ρότορας, κάννες, σφικτήρες), το σύστημα αισθητήρων (ραντάρ, θόλος, FLIR), τη δομική βάση στήριξης, καθώς και τα ηλεκτρονικά και μικροκυματικά συγκροτήματα που εδράζονται στο κατάστρωμα. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη γεωμετρική απλοποίηση όπου αυτό ήταν απαραίτητο, διατηρώντας ωστόσο την αναγκαία ακρίβεια για τη μηχανική προσομοίωση.

Το μοντέλο αναπτύχθηκε με γνώμονα τη μελλοντική εφαρμογή οριακών συνθηκών, ώστε να εξεταστεί η απόκριση του συστήματος υπό ρεαλιστικά φορτία. Η οργάνωση των εξαρτημάτων έγινε με λογική ιεραρχία, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη φυσική συναρμολόγηση όσο και τη λειτουργική συμβατότητα των επιμέρους τμημάτων.



1. RADAR ανίχνευσης
2. RADAR ιχθυάτησης
3. Πυροβόλο M61A1
4. Σύστημα τροφοδοσίας
5. Κύρια βάση στήριξης
6. Θάλαμος ηλεκτρονικών
7. Συγκρότημα πομπού

Σχήμα 2.1 : Σύστημα εγγύς προστασίας PHALANX, ανατομία <sup>[20]</sup>

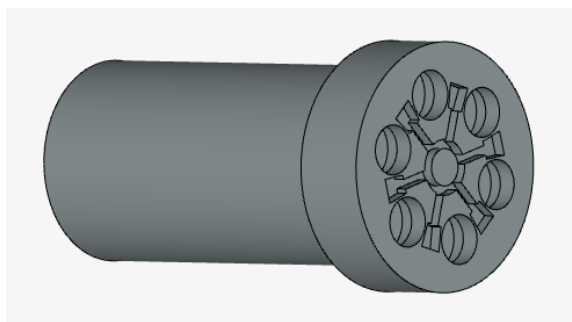
## 2.2 Λειτουργική Περιγραφή Υποσυστημάτων

Στις επόμενες παραγράφους δίνεται μια σύντομη περιγραφή των υποσυστημάτων που απαρτίζουν το σύστημα και επεξηγούνται οι αποφάσεις που παρθήκαν κατά την μοντελοποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων.

### 2.2.1 Υποσύστημα στόχευσης

#### Στροφείο (ρότορας)

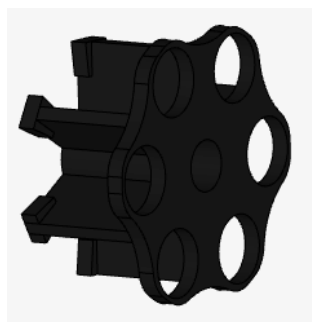
Ο ρότορας <sup>[1],[3],[4]</sup> είναι η κύρια μονάδα του όπλου. Περιστρέφεται σε δύο ταχύτητες. Με ρυθμό 3000 βολών ανά λεπτό (3000 SPM), περιστρέφεται με 500 στροφές ανά λεπτό (RPM) (8,3 Hz). Με ρυθμό βολών 4500 βολών ανά λεπτό (4500 SPM), περιστρέφεται στις 750 στροφές ανά λεπτό RPM (12,5 Hz). Η φορά περιστροφής είναι αριστερόστροφα. Ο ρότορας παίζει σημαντικό ρόλο ως οριακή συνθήκη για το εξάκαννο σύστημα, καθώς και οι έξι κάννες είναι κλειδωμένες στα κλείστρα του ρότορα. Ο ρότορας υποστηρίζεται ακτινικά από έδρανα κύλισης



Σχήμα 2.2 : Στροφείο

#### Άξονας στροφής

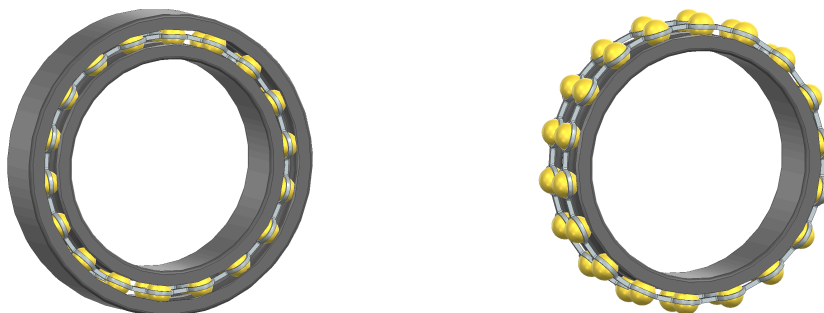
Ο άξονας στροφής <sup>[1],[3],[4]</sup> είναι συγκολλημένος στην μπροστινή όψη του ρότορα. Υποστηρίζει το πίσω άκρο των έξι καννών, επιτρέποντας την εύκολη ευθυγράμμισή τους με τα κλείστρα ρότορα.



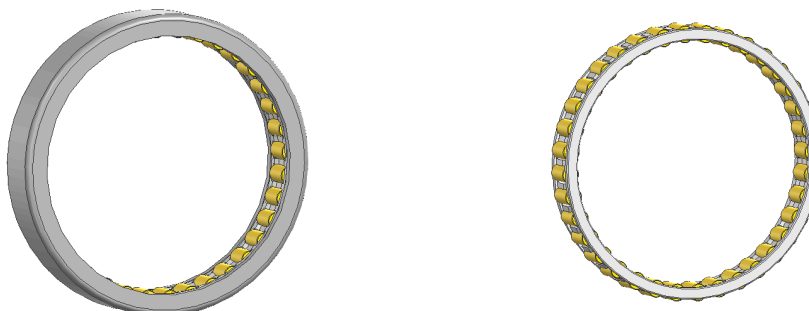
Σχήμα 2.3 : Άξονας στροφής

## Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν)

Η μπροστινή στήριξη του ρότορα [1],[3],[4] παρέχεται από διπλό ένσφαιρο έδρανο κύλισης το οποίο φέρει δύο ράγες των 18 σφαιρών, συνολικά υπάρχουν 36 σφαίρες. Η πίσω στήριξη του ρότορα παρέχεται από άσφαιρο έδρανο κύλισης 36 κυλίνδρων. Οι εξωτερικές ράγες και των δύο ρουλεμάν είναι πακτωμένες στις κατάλληλα διαμορφωμένες υποδοχές του περιβλήματος που περιγράφεται αργότερα.



**Σχήμα 2.4 :** Μοντελοποιημένο ένσφαιρο ρουλεμάν



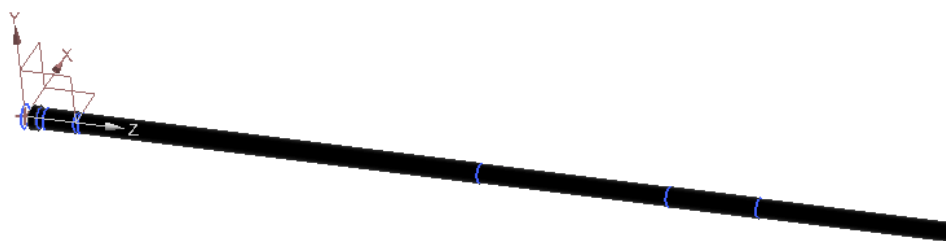
**Σχήμα 2.5 :** Μοντελοποιημένο άσφαιρο ρουλεμάν

## Κάννη

Το πυροβόλο διαθέτει έξι κάννες [1],[3],[4] που υποστηρίζονται από άξονα στροφής πακτωμένο στο στροφείο (ρότορα) . Κάθε κάννη έχει εσωτερική διάμετρο 20 mm και μεταβαλλόμενη εξωτερική διάμετρο. Η εξωτερική διάμετρος ποίκιλε σε κάθε τμήμα σύμφωνα με το πάχος της κάννης στο αντίστοιχο μήκος. Υπήρχαν οκτώ διαφορετικές διατομές δοκού που αντιπροσώπευαν τις διάφορες αλλαγές στο πάχος. Ο πίνακας 2.1 παραθέτει τις οκτώ διαφορετικές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν

Διατομή (mm)	Μήκος (mm)
50	31
40	15.7
45	65
40	10
42.5	864.45
40	410
42.5	195.054
40	415

**Πίνακας 2.1 :**  
Διαστάσεις κάννης μεταβλητού πάχους



**Σχήμα 2.6 :** Μοντελοποιημένη κάννη μεταβλητού πάχους

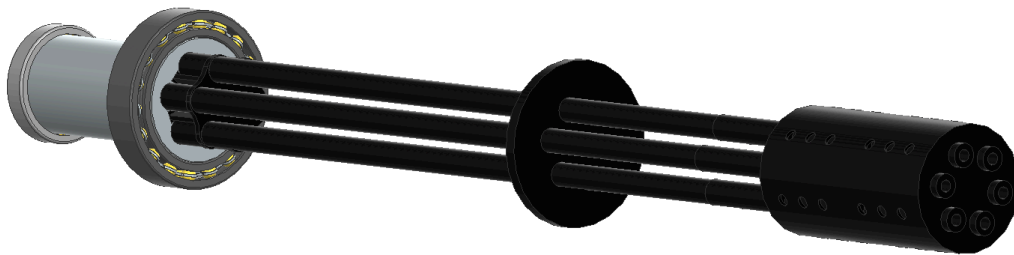
### Σφιγκτήρες

Υπάρχουν δύο σφιγκτήρες <sup>[1],[3],[4]</sup> με ξεχωριστή συμβολή στο εξάκανο σύστημα. Ένας σφιγκτήρας είναι τοποθετημένος στο μέσο του μήκους κάθε κάννης, ευθυγραμμίζοντας τις έξι κάννες με τα κλείστρα του ρότορα και ασφαλίζοντας τις έξι κάννες μεταξύ τους περιορίζοντας μεμονωμένες κίνησης κατά τις βολές. Επίσης, ένας σφιγκτήρας είναι τοποθετημένος στο ρύγχος των καννών περιορίζοντας τη διασπορά των βλημάτων.



**Σχήμα 2.7 :** Μοντελοποιημένοι σφιγκτήρες



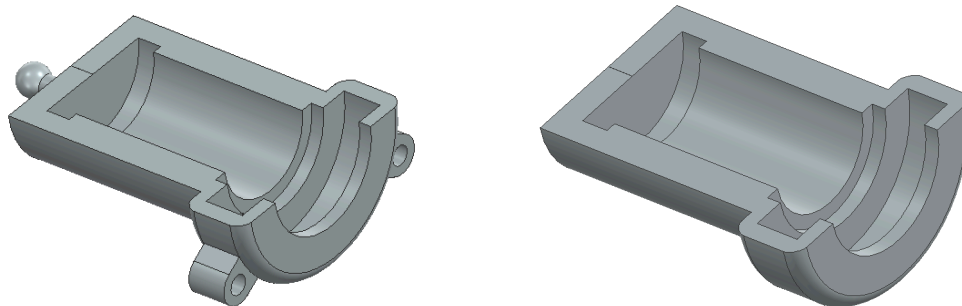


**Σχήμα 2.8 :**

Συναρμολόγηση περιστρεφόμενων τμημάτων με έδρανα κύλισης

### **Περίβλημα**

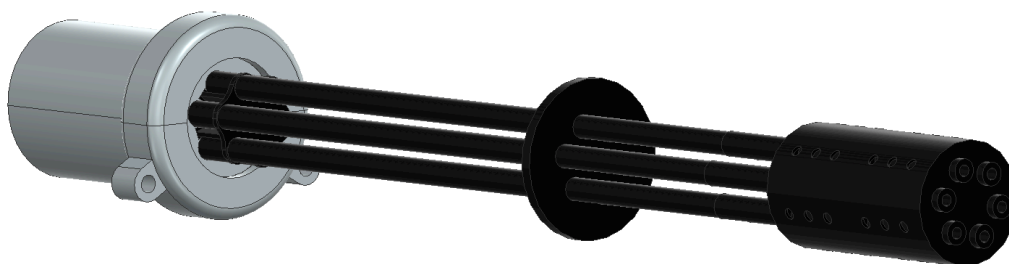
Το περίβλημα <sup>[1],[3],[4]</sup> αποτελείται από ένα άνω και κάτω τμήμα ενωμένα μεταξύ τους. Περικλείει τα έδρανα κύλισης και το στροφείο αποτελώντας τον συνδετικό κρίκο του συστήματος στόχευσης με τον κλοβό συγκράτησης. Ενώνεται με το τμήμα συγκράτησης ρύγχους με προσαρμογείς ανάκρουσης στο μπροστινό του μέρος καθώς και με ειδική υποδοχή στο πίσω μέρος του.



**Σχήμα 2.9 :**

Οριζόντια τομή περιβλήματος.

Διακρίνονται οι υποδοχές των εδράνων κύλισης, καθώς τα στηρίγματα με τον κλοβό συγκράτησης.

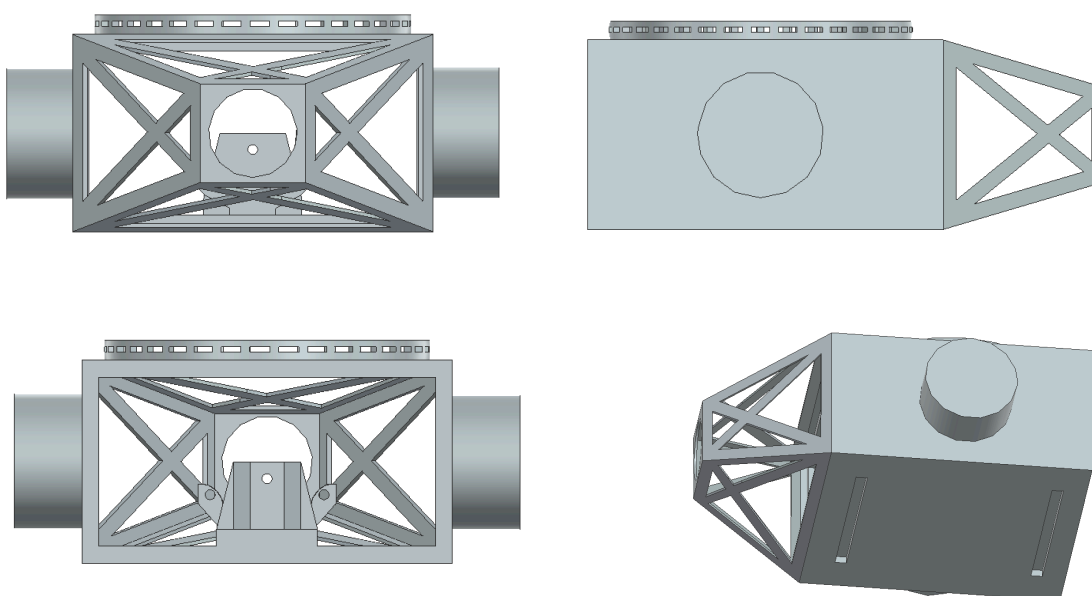


**Σχήμα 2.10 :**

Συναρμολόγηση περιστρεφόμενων τμημάτων με περίβλημα

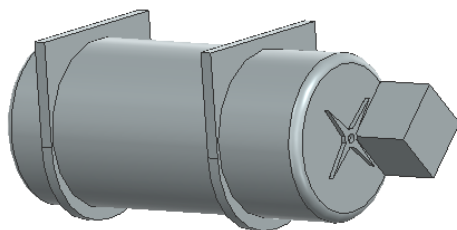
### **Κλοβός συγκράτησης, σύστημα τροφοδοσίας**

Ο κλοβός συγκράτησης <sup>[20]</sup> αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του υποσυστήματος στόχευσης. Διαθέτει υποδοχές με τις οποίες συνδέεται το περίβλημα με το στροφέιο πάνω στο οποίο είναι πακτωμένες οι κάννες και τα υπόλοιπα περιστρεφόμενα εξαρτήματα. Στην εμπρόσθια διατομή του κυλιέται κατά τις βολές, ο σφινγκτήρας που φέρουν οι κάννες στο μέσο του μήκους τους. Ο κλοβός συγκράτησης στηρίζεται πλευρικά με το υποσύστημα έδρασης, αποτελώντας ουσιαστικά τον συνδετικό κρίκο του υποσυστήματος στόχευσης με το υποσύστημα έδρασης. Στο κάτω μέρος του βρίσκεται το σύστημα τροφοδοσίας.



**Σχήμα 2.11 :**

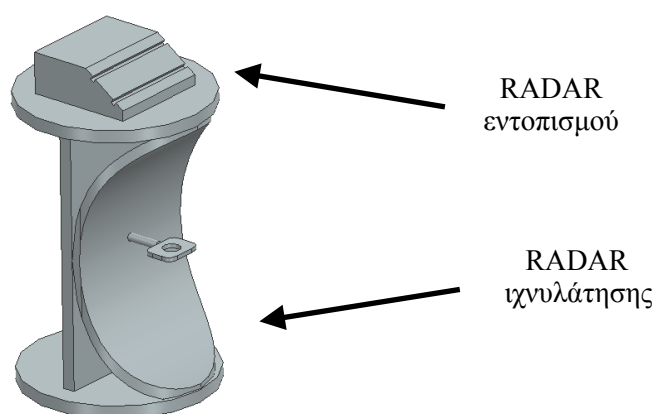
Κλοβός συγκράτησης Πρόσοψη , πίσω όψη , πλάγια δεξιά όψη και διαγώνια όψη



**Σχήμα 2.12 :** Σύστημα τροφοδοσίας

## **RADAR**

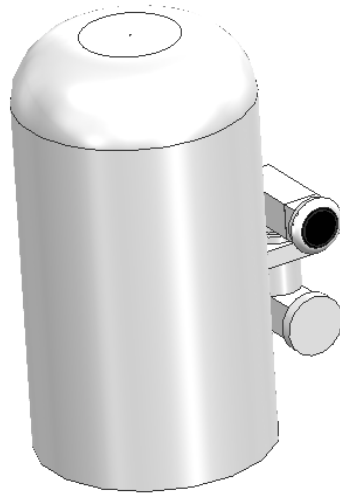
Το σύστημα διαθέτει ενσωματωμένο ραντάρ <sup>[12]</sup> με δυνατότητες τόσο εντοπισμού όσο και παρακολούθησης στόχων. Το ραντάρ εντοπισμού ανιχνεύει επερχόμενες απειλές, ενώ το ραντάρ ιχνυλάτησης κλειδώνει τον στόχο για ακριβή προσβολή. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει αυτόνομη και άμεση αντίδραση σε απειλές μικρής εμβέλειας, όπως πύραυλοι και αεροσκάφη. Αν και το radar εντοπισμού περιστρέφεται στην πραγματικότητα, στο μοντέλο για λόγους απλούστευσης είναι στατικό. Τα RADAR καλύπτονται από ειδικό θόλο και βρίσκονται πακτωμένα στον κlobό συγκράτησης του υποσυστήματος στόχευσης.



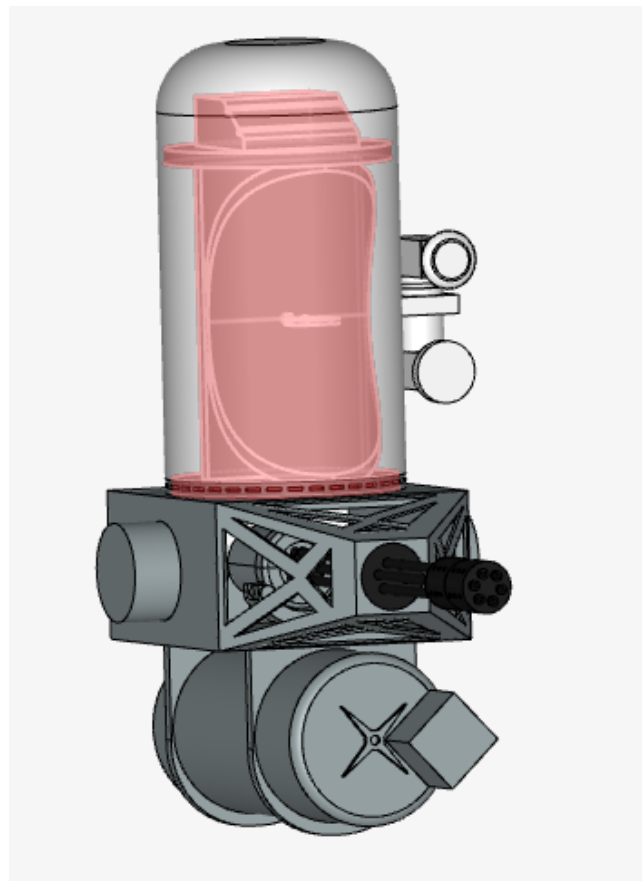
**Σχήμα 2.13 :** RADAR εντοπισμού - ιχνυλάτησης

## **Θόλος**

Ο θόλος <sup>[12]</sup> καλύπτει και προστατεύει τα ραντάρ από εξωτερικές συνθήκες. Είναι κατασκευασμένος από υλικό διαπερατό στα ραδιοκύματα, επιτρέποντας τη σωστή λειτουργία του ραντάρ χωρίς παρεμβολές. Ο σχεδιασμός του, συμβάλλει στη διατήρηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Ο θόλος εδράζεται επί του κlobού συγκράτησης του υποσυστήματος στόχευσης και μοντελοποιήθηκε με υποδοχή για το σύστημα υπερύθρων εμπρόσθιας όψης.



**Σχήμα 2.14 :** Θόλος με σύστημα υπερύθρων εμπρόσθιας όψης

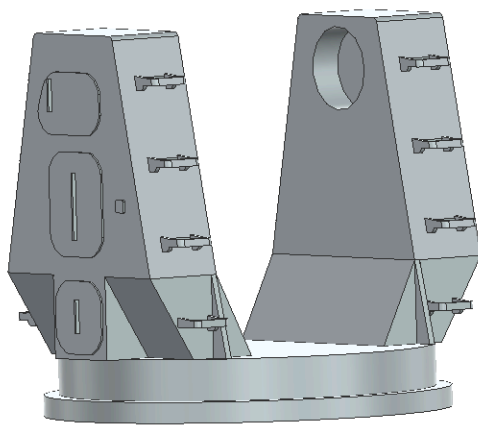


**Σχήμα 2.15 :** Συναρμολόγηση υποσυστήματος στόχευσης.  
Το RADAR με ερυθρό χρώμα υποδυκνύει ότι βρίσκεται μέσα στον θόλο

## 2.2.2 Υποσύστημα στήριξης

### Κύρια βάση στήριξης

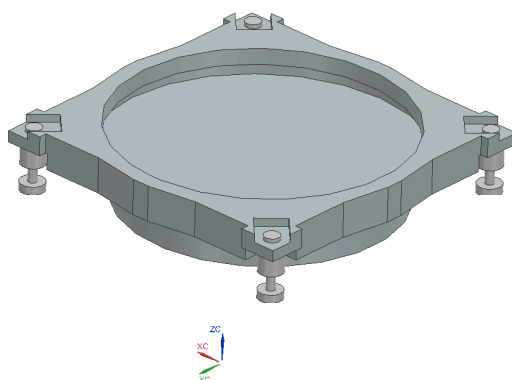
Η κύρια βάση στήριξης <sup>[12]</sup> του οπλικού συστήματος, παρέχει σταθερότητα, απορροφά τους κραδασμούς κατά τη βολή και επιτρέπει την στόχευση του όπλου υπό γωνία. Διαθέτει υποδοχές στις οποίες ενώνεται ο κλοβός συγκράτησης. Η κύρια βάση στα κατώτερα τμήματά της έχει κυκλικές διατομές ώστε να επιτρέπεται η στροφή σε εύρος γωνιών - 155 έως + 155 μοιρών.



Σχήμα 2.16: Μοντελοποιημένη κύρια βάση στήριξης

### Δομική βάση

Η δομική βάση <sup>[12]</sup> υποδέχεται την κύρια βάση στήριξης. Εξασφαλίζει τη σταθερή σύνδεση των υπόλοιπων τμημάτων του συστήματος με το κατάστρωμα. Είναι σχεδιασμένη με κυκλικές διατομές επιτρέποντας τις περιστροφές. Στις τέσσερις γωνίες της φέρει υποδοχές στις οποίες ενώνονται οι αποσβεστήρες κραδασμών.

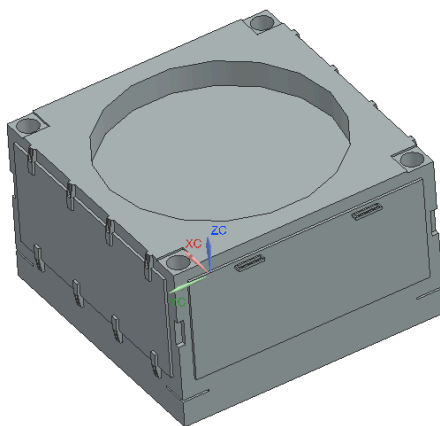


Σχήμα 2.17 : Μοντελοποιημένη δομική βάση

## Συγκρότημα πομποδέκτη

Το συγκρότημα πομποδέκτη <sup>[12]</sup> αποτελεί το χαμηλότερο τμήμα του συστήματος και φιλοξενεί κρίσιμα ηλεκτρονικά και ραδιοσυχνότητας κυκλώματα, υπεύθυνα για τη μετάδοση και λήψη μικροκυμάτων. Η γεωμετρία του μοντέλου έχει απλοποιηθεί, καθώς στην πραγματικότητα περιλαμβάνει πολλαπλά εσωτερικά υποσυστήματα που δεν είναι διαθέσιμα για ακριβή μοντελοποίηση λόγω περιορισμένης πληροφορίας.

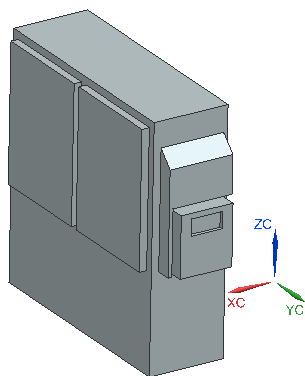
Στις τέσσερις γωνίες της επάνω επιφάνειας διακρίνονται οι υποδοχές για την προσαρμογή υδραυλικών αμορτισέρ, τα οποία αποσβένουν τους κραδασμούς και μεταφέρουν τα φορτία στην υποδομή στήριξης.



**Σχήμα 2.18 :** Μοντελοποιημένο συγκρότημα πομπού

## Θάλαμος ηλεκτρονικών

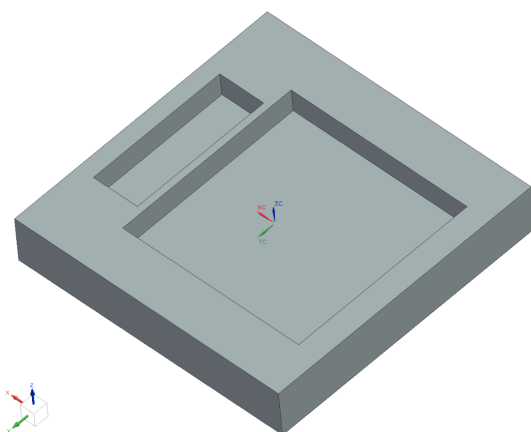
Ο θάλαμος ηλεκτρονικών <sup>[12],[20]</sup> στεγάζει κρίσιμα ηλεκτρονικά κυκλώματα και υποσυστήματα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων επεξεργαστών, συστημάτων ισχύος και επικοινωνίας. Τοποθετείται στο πίσω μέρος της κύριας βάσης και εξασφαλίζει προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες, κραδασμούς και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, υποστηρίζοντας τη συνολική λειτουργία του συστήματος.



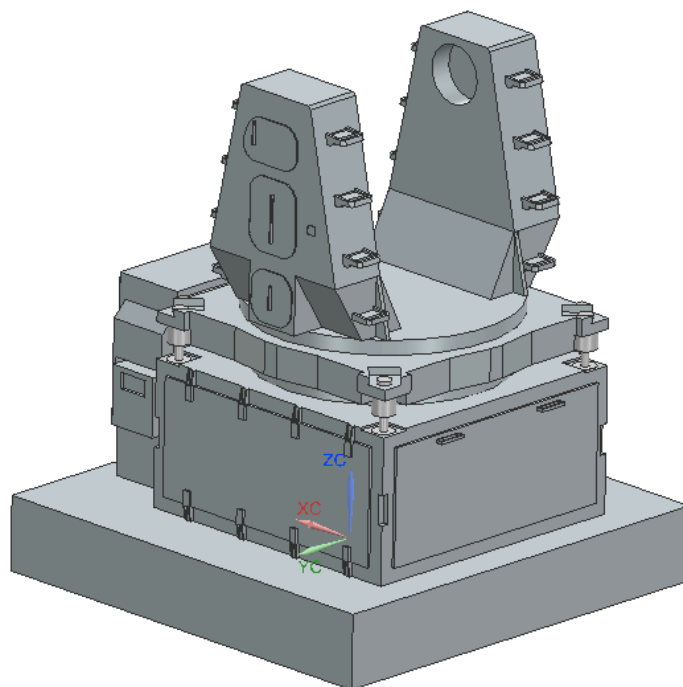
**Σχήμα 2.19 :** Μοντελοποιημένος θάλαμος ηλεκτρονικών

## Κατάστρωμα

Το κατάστρωμα του πλοίου αποτελεί τη βάση στήριξης <sup>[20]</sup>. Διαθέτει ειδικές υποδοχές για την ασφαλή τοποθέτηση - πάκτωση του θαλάμου ηλεκτρονικών και του συγκροτήματος πομπού. Είναι σχεδιασμένο να αντέχει υψηλά φορτία και δυναμικές καταπονήσεις από τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 2.20 : Μοντελοποιημένο κατάστρωμα



Σχήμα 2.21 : Συναρμολόγηση υποσυστήματος στήριξης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ (CAE)

### 3.1 Συστήματα CAE

Η ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει καταστήσει τα συστήματα μηχανικής ανάλυσης υποβοηθούμενης με Η/Υ (Computer-Aided Engineering – CAE) αναπόσπαστο εργαλείο στη σύγχρονη επιστημονική και βιομηχανική πράξη. Ο όρος CAE αναφέρεται σε ένα σύνολο μεθόδων και λογισμικών που επιτρέπουν την προσομοίωση, ανάλυση και βελτιστοποίηση φυσικών συστημάτων μέσω αριθμητικών μοντέλων, χωρίς την ανάγκη κατασκευής φυσικών πρωτοτύπων.

Τα συστήματα CAE περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως:

- Μηχανική Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) για την εκτίμηση τάσεων, παραμορφώσεων και ιδιοσυχνοτήτων,
- Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) για τη μελέτη ροής ρευστών και θερμικής μεταφοράς,
- Κινηματική και δυναμική ανάλυση πολυσώματων συστημάτων (Multibody Dynamics – MBD),
- Καθώς και εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού και ελέγχου.

Γενικά, κάθε υπολογιστική ανάλυση μηχανικής (Computer-Aided Engineering – CAE) περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

- Προεπεξεργασία (Pre-processing) – Ορισμός του μοντέλου και των περιβαλλοντικών παραγόντων που θα εφαρμοστούν σε αυτό (τυπικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αν και χρησιμοποιούνται επίσης οι μέθοδοι επιφανειών (facet), ογκοστοιχείων (voxel) και λεπτών φύλλων (thin sheet)).
- Επίλυση (Analysis solver) – Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος, που συνήθως πραγματοποιείται σε υπολογιστικά συστήματα υψηλής ισχύος.
- Μετα-επεξεργασία (Post-processing) – Ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω ειδικού λογισμικού.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με εργαλείο CAE έγινε ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος εγγύς προστασίας, και συγκεκριμένα για τη μελέτη της ευστάθειας και των κραδασμικών φαινομένων που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του ρότορα και των συστημάτων στήριξης. Μέσω της χρήσης του λογισμικού SimScale και της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο ικανό να προβλέψει τις ιδιοσυχνότητες και την αρμονική απόκριση του συστήματος υπό τις ιδιαίτερες συνθήκες φόρτισης του οπλικού συστήματος.



### 3.2 Υλικά υποσυστημάτων

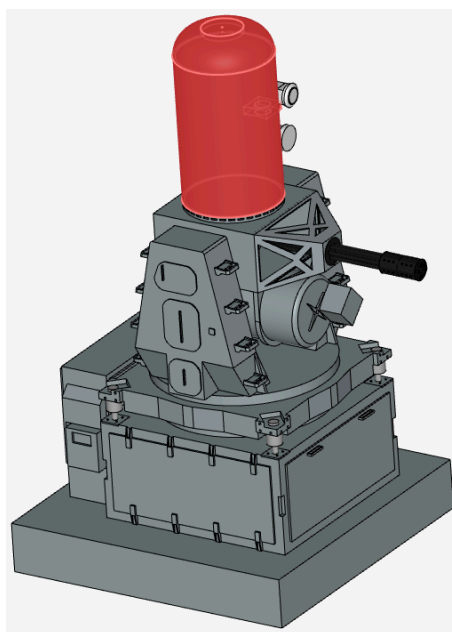
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κύριων υποσυστημάτων του μοντέλου. Η επιλογή των υλικών βασίστηκε σε τεχνικές αναφορές, δημοσιευμένες μελέτες και προσεγγίσεις με βάση την αναμενόμενη μηχανική συμπεριφορά, την πυκνότητα και την ανθεκτικότητα κάθε εξαρτήματος.

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) GPa	Λόγος Poisson ( $\nu$ )	Πυκνότητα ( $\rho$ ) $kg/m^3$
Αλουμίνιο	70	0,34	2700
Εποξική ρητίνη	2,5	0,3	1400
Χάλυβας	205	0,28	7870

**Πίνακας 3.1 :** Μηχανικές ιδιότητες υλικών των εξαρτημάτων

#### 3.2.1 Εποξική Ρητίνη (Epoxy)

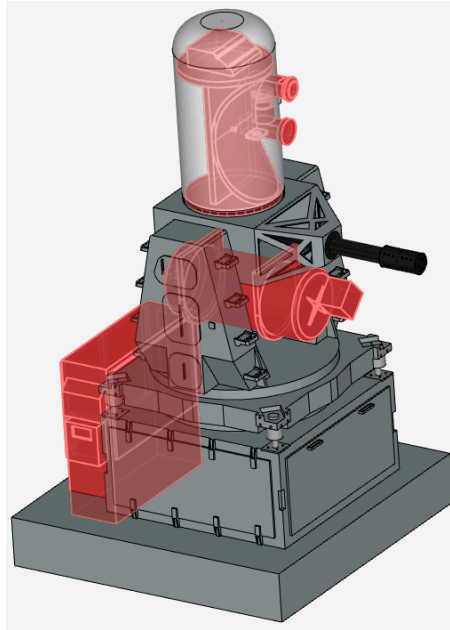
Η εποξική ρητίνη είναι θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές που προσφέρει υψηλή μηχανική αντοχή. Λόγω της ηλεκτρικής της μόνωσης και της διαπερατότητας στα ραδιοκύματα, χρησιμοποιείται σε θόλους ραντάρ (radomes), περιβλήματα αισθητήρων, καθώς και σε σύνθετες κατασκευές αεροναυπηγικής. Αντέχει σε θερμοκρασιακές μεταβολές και είναι ανθεκτική σε υγρασία και υπεριώδη ακτινοβολία.



**Σχήμα 3.1 :** Θόλος RADAR εποξικής ρητίνης

### 3.2.2 Αλουμίνιο (Aluminium)

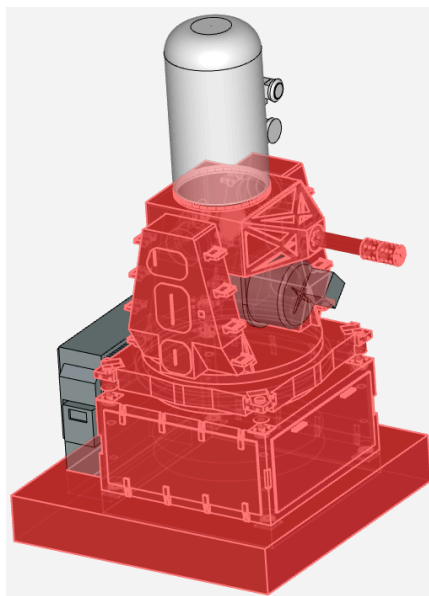
Το αλουμίνιο συνδυάζει χαμηλό βάρος, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, αντοχή στη διάβρωση και κατεργασιμότητα. Είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται μείωση βάρους χωρίς απώλεια δομικής ακεραιότητας, όπως ηλεκτρονικά κουτιά, καλύμματα αισθητήρων, αεροπορικές και ναυτικές κατασκευές. Συχνά επιλέγεται σε συνδυασμό με επιστρώσεις για βελτίωση της ανθεκτικότητας σε θαλάσσια περιβάλλοντα.



**Σχήμα 3.2 :** Τμήματα αλουμινίου

### 3.2.3 Ατσάλι (Steel)

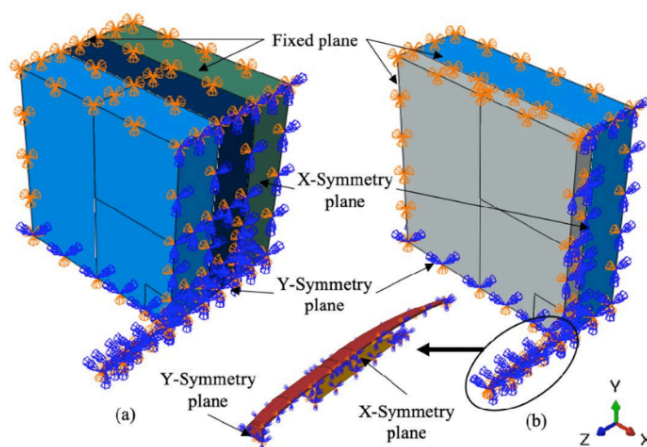
Ο χάλυβας αποτελεί το βασικό υλικό σε κατασκευές υψηλής αντοχής, καθώς προσφέρει μεγάλη ακαμψία, υψηλό όριο διαρροής και δυνατότητα απορρόφησης κραδασμών. Στην περίπτωση του PHALANX , χρησιμοποιείται για τη στήριξη των βαρέων και δυναμικά επιφορτισμένων εξαρτημάτων. Χρησιμοποιείται ευρέως σε οπικά συστήματα, βάσεις περιστροφής, πλαίσια απορρόφησης ανάκρουσης, καθώς και σε καταστρώματα πλοίων λόγω της στιβαρότητάς του και της δυνατότητας εύκολης συγκόλλησης και κατασκευής.



**Σχήμα 3.3 :** Τμήματα χάλυβα

### 3.3 Συνοριακές Συνθήκες

Στην αριθμητική προσομοίωση μηχανικών συστημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) καθορίζουν τη φυσική αλληλεπίδραση του μοντέλου με το περιβάλλον του. Αποτελούν απαραίτητο μέρος της διατύπωσης του προβλήματος, καθώς ορίζουν τα σημεία ή τις επιφάνειες όπου εφαρμόζονται περιορισμοί μετατόπισης (στατικές στηρίξεις), φορτία, ή κινηματικές επιβαρύνσεις. Οι συνοριακές συνθήκες είναι ουσιώδεις για τη στατική ευστάθεια του μοντέλου, την αποφυγή ανεπιθύμητων βαθμών ελευθερίας και την εξασφάλιση ρεαλιστικής απόκρισης. Η σωστή επιλογή και εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών επηρεάζει καθοριστικά την ακρίβεια και τη φυσική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 3.4 :** Συνοριακές συνθήκες. Θεωρητική εφαρμογή (a) ημιπεπερασμένο μοντέλο πλάκας αλουμινίου και (b) κεραμική πλάκα με πλάκα αλουμινίου στο πίσω μέρος

#### 3.3.1 Σταθερή στήριξη έδρασης

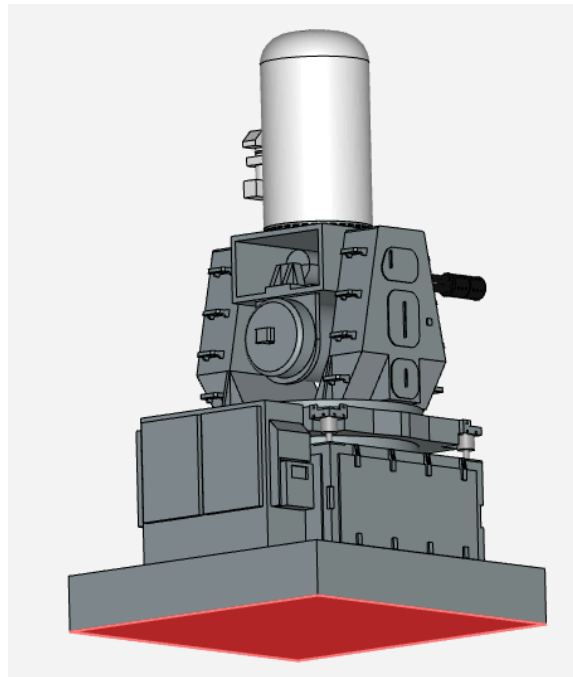
Το υπολογιστικό μοντέλο της διατριβής, όπως αυτό υλοποιείται στο περιβάλλον CAE, περιλαμβάνει την τοποθέτηση του συστήματος επάνω σε μία βάση (deck), η οποία προσομοιώνει το άκαμπτο κατάστρωμα του πλοίου. Προκειμένου να οριστεί ένα σαφές σημείο αναφοράς στο προσομοιωμένο σύστημα, εφαρμόζεται σταθερή στήριξη (Fixed Support) στην κάτω επιφάνεια της έδρασης. Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη επιβάλλει μηδενικές μετατοπίσεις και στροφές σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας των επιλεγμένων επιφανειών. Συγκεκριμένα, για κάθε κόμβο της περιοχής αυτής ισχύει:

$$\Delta_x = \Delta_y = \Delta_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0 \quad (3.1)$$

Η επιλογή αυτής της συνθήκης εδράζεται στις εξής παραδοχές:

- Το κατάστρωμα του πλοίου θεωρείται άκαμπτο σε σχέση με τις δυναμικές ταλαντώσεις του πυργίσκου και του οπλικού συστήματος,
- Η μεταφορά φορτίων και κραδασμών προς το πλοίο δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης

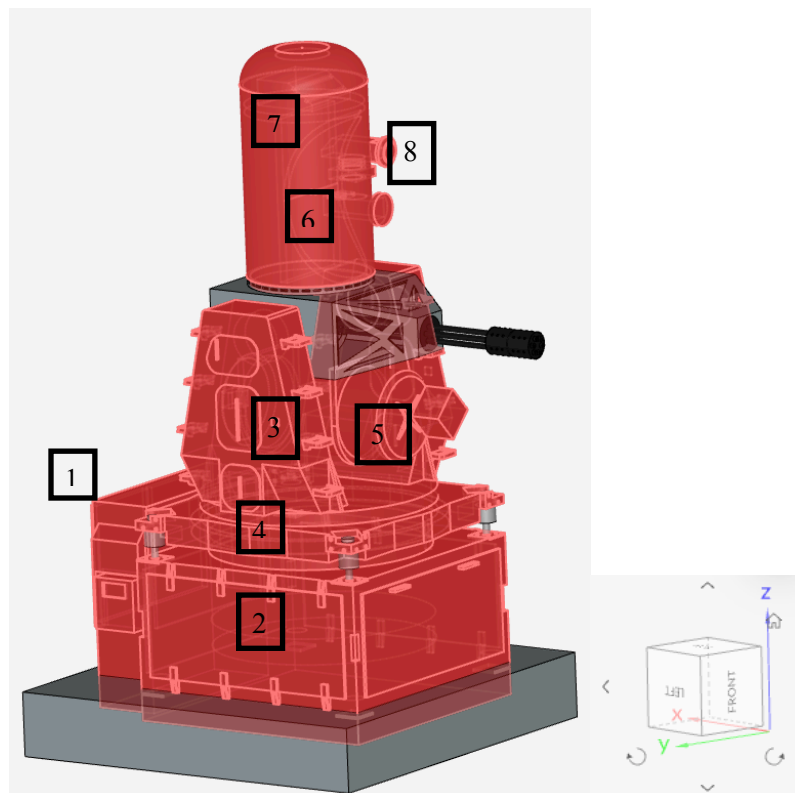
Η συγκεκριμένη συνθήκη εφαρμόζεται στη βάση του καταστρώματος, εξασφαλίζοντας έτσι φυσική συνέχεια φόρτισης και στατική ευστάθεια του μοντέλου. Επιπλέον, επιτρέπει την ελεύθερη ταλάντωση της ανώτερης δομής χωρίς εισαγωγή τεχνητών περιορισμών.



**Σχήμα 3.5 :** Επιφάνειας εφαρμογής συνοριακή συνθήκης σταθερής στήριξης

### 3.3.2 Σημειακές μάζες

Κατά την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου, ορισμένα δευτερεύοντα αλλά σημαντικής μάζας τμήματα, μοντελοποιήθηκαν ως σημειακές μάζες (point masses). Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη διατήρηση της συνολικής μάζας και αδρανειακής κατανομής του συστήματος χωρίς να επιβαρύνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας ή την υπολογιστική απαίτηση της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, για γωνία στόχευσης  $0^\circ$  ως σημειακές μάζες προσεγγίστηκαν τα εξής τμήματα :

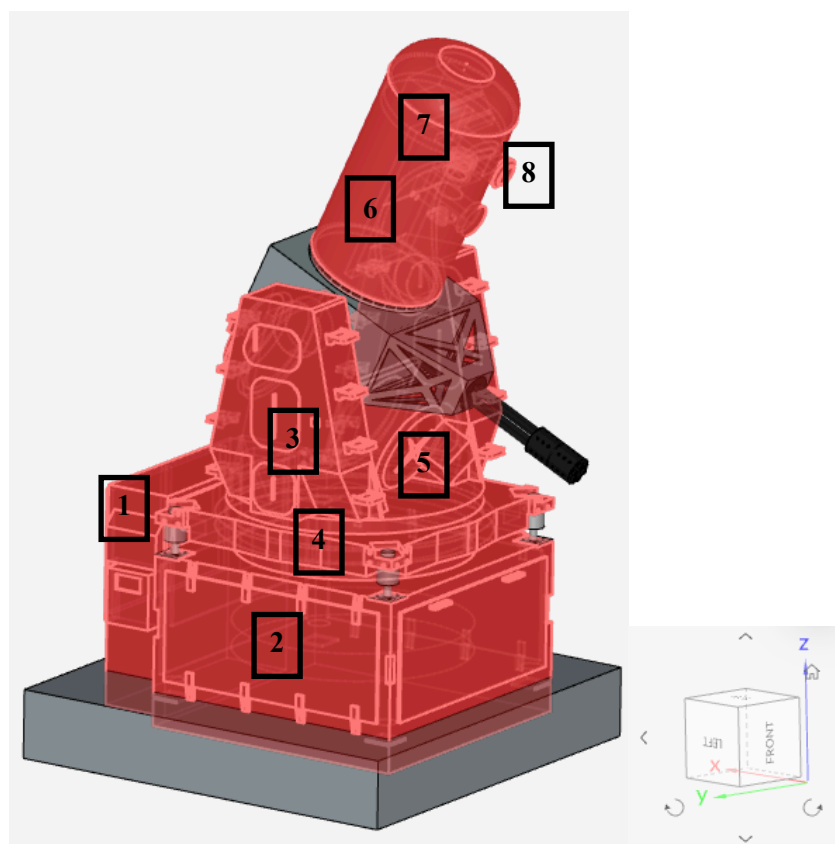


**Σχήμα 3.6 :** Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

Εξάρτημα		Κέντρο Βάρους		
	Μάζα (kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1000	1.077	-0.006862	0.8342
2	1800	-0.2501	0	0.4988
3 + 4	2500	-0.25	-0.000008606	1.829
5 *	150	-0.3721	-0.007499	2.333
6 *	300	-0.2759	-0.00008279	4.147
7 + 8 *	100	-0.2592	-0.1213	4.266

**Πίνακας 3.2 :** Μάζα , κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

Αντίστοιχα για γωνία στόχευσης  $-25^\circ$  , ακολούθως. Τα τμήματα υπό αριθμό 5 , 6 και το συσσωμάτωμα των μαζών 7 +8 λόγω κλίσης αλλάζουν κέντρο βάρους :

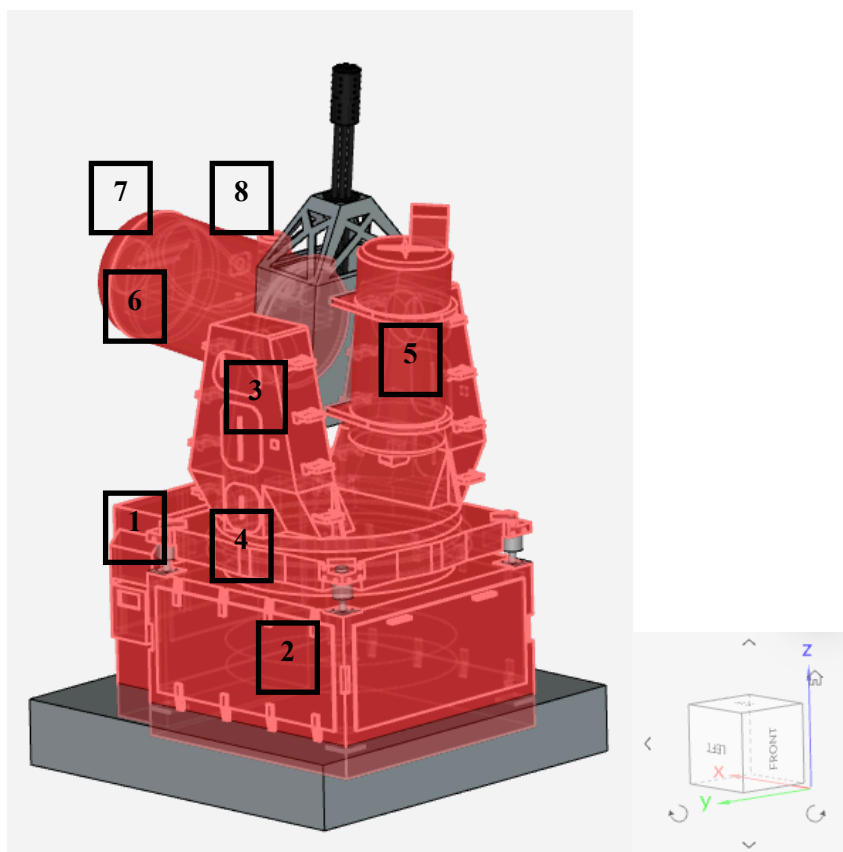


**Σχήμα 3.7 :** Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$

Εξάρτημα		Κέντρο Βάρους		
	Μάζα (kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1000	1.077	-0.006862	0.8342
2	1800	-0.2501	0	0.4988
3 + 4	2500	-0.25	-0.000008606	1.829
5 *	150	-0.07852	-0.007498	2.343
6 *	300	-0.7581	-0.00008284	4.028
7 + 8 *	100	-0.7932	-0.1213	4.143

**Πίνακας 3.3 :** Μάζα , κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$

Ομοίως για γωνία στόχευσης  $+85^\circ$  :



**Σχήμα 3.8 :** Τμήματα προσομοιωμένα ως σημειακές μάζες, γωνία στόχευσης  $+85^\circ$

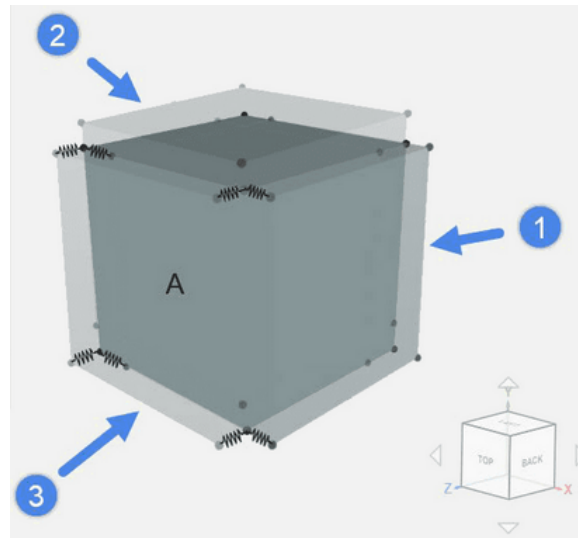
Εξάρτημα		Κέντρο Βάρους		
	Μάζα (kg)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1000	1.077	-0.006862	0.8342
2	1800	-0.2501	0	0.4988
3 + 4	2500	-0.25	-0.000008606	1.829
5 *	150	-0.9255	-0.007498	3.063
6 *	300	0.8901	-0.00008286	3.126
7 + 8 *	100	1.01	-0.1213	3.119

**Πίνακας 3.4 :** Μάζα , κέντρο βάρους σημειακών μαζών, γωνία στόχευσης  $+85^\circ$



### 3.3.3 Υδραυλικοί αποσβεστήρες έδρασης

Οι τέσσερις υδραυλικοί αποσβεστήρες που είναι τοποθετημένοι στη βάση μοντελοποιήθηκαν ως ορθοτροπικές ελαστικές στηρίξεις. Η επιλογή αυτή προκύπτει από την ανάγκη για υπολογιστική αποδοτικότητα, καθώς η ρεαλιστική αναπαράσταση της εσωτερικής ρευστοδυναμικής συμπεριφοράς των αποσβεστήρων (έμβολα, βαλβίδες, ροή υγρών) θα απαιτούσε υπερβολική λεπτομέρεια και σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους.



**Σχήμα 3.9 :** Θεωρητική αναπαράσταση ορθοτροπικής ελαστικής στήριξης στην επιφάνεια A

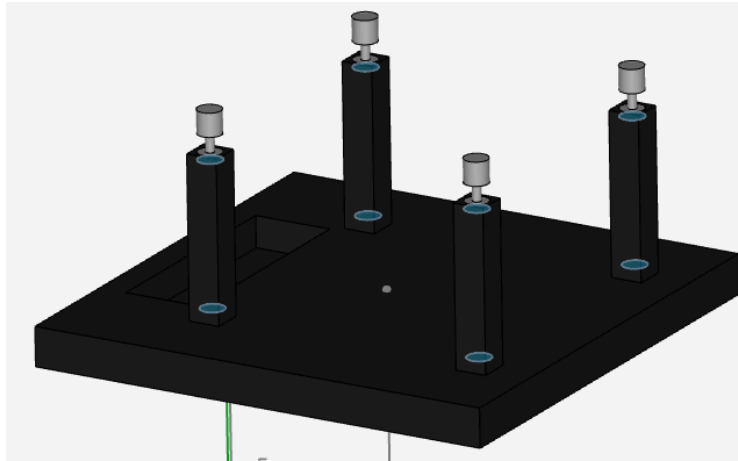
Η συνολική μάζα της ανωδομής του συστήματος εκτιμήθηκε στα 5.234 kg, βάσει των υλικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου. Με στόχο τον περιορισμό της επιτάχυνσης σε μέγιστο όριο των 12G <sup>[11],[21]</sup>, όπως ορίζεται σε τεχνικές προδιαγραφές ναυτικών εφαρμογών, υπολογίστηκε η συνολική κατακόρυφη δύναμη ανάκρουσης:

$$F_{max} = m a = 616.000N \quad (3.2)$$

Υποθέτοντας μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα των ίσο με  $d = 0.02m$ , η συνολική απαιτούμενη δυσκαμψία του συστήματος στην κατακόρυφη κατεύθυνση προσδιορίστηκε ως:

$$K_z = \frac{F_{max}}{d} = 3.08 \times 10^7 N/m \quad (3.3)$$

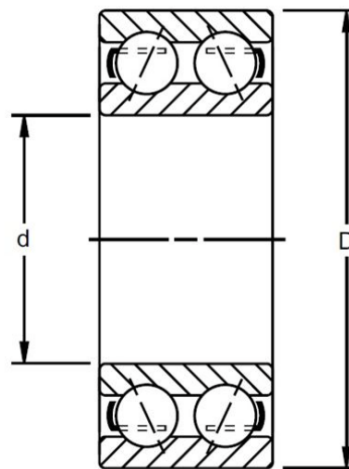
Η τιμή αυτή κατενεμήθει ισομερώς στους τέσσερις αποσβεστήρες. Οι δυσκαμψίες στις πλευρικές κατευθύνσεις X και Y ορίστηκαν ως  $K_x = K_y = 4.0 \times 10^8 N/m$  ανά αποσβεστήρα τεχνητά υψηλές για αποφυγή πλευρικών μετατοπίσεων.



**Σχήμα 3.10 :** Υδραυλικοί αποσβεστήρες έδρασης ως ελαστικές στηρίξεις

### 3.3.4 Έδρανα κύλισης

Η εμπρόσθια στήριξη του ρότορα επιτυγχάνεται μέσω ενός διπλού ένσφαιρου ρουλεμάν, το οποίο φέρει δύο σειρές των 18 σφαιρών καθεμιάς, συνολικά 36 σφαίρες διαμέτρου 20 mm. Το ρουλεμάν τοποθετείται μεταξύ εσωτερικού δακτυλίου διαμέτρου  $d = 200mm$  και εξωτερικού δακτυλίου διαμέτρου  $D = 280mm$ .



**Σχήμα 3.11 :** Διπλό ένσφαιρο έδρανο κύλισης σε τομή [7],[10]

Για λόγους υπολογιστικού κόστους, αποφεύχθηκε η γεωμετρική προσομοίωση των επιμέρους σφαιρών και αντ' αυτής υιοθετήθηκε η προσέγγιση ορθοτροπικής ελαστικής στήριξης. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ανεξάρτητη δυσκαμψία σε κάθε άξονα (X, Y, Z), αντικατοπτρίζοντας τη μηχανική λειτουργία του ρουλεμάν, το οποίο προσφέρει σημαντική στήριξη κυρίως σε ακτινικές κατευθύνσεις. Η εισαγωγή τεχνητά υψηλής αξονικής δυσκαμψίας στον άξονα Z ( $1.0 \times 10^9$  N/m) αποτρέπει κίνηση ελεύθερου σώματος.

Η υπολογιζόμενη ακτινική δυσκαμψία βασίστηκε στη θεωρία επαφής κατά Hertz <sup>[10],[23]</sup> , η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά δύο ελαστικών σωμάτων σε κυρτή επαφή. Για μία μεμονωμένη σφαίρα υπό προφόρτιση και παραμόρφωση επαφής , η δυσκαμψία υπολογίζεται ως:

$$k_b = \frac{3}{2} \frac{F_b}{\delta_b} \quad (3.4)$$

Υπό την παραδοχή προφόρτισης  $F_b = 200N$  και παραμόρφωση επαφής  $\delta_b = 20\mu m$ , η ακτινική δυσκαμψία κάθε σφαίρας αντιστοιχεί σε  $k_b = 1,5 \times 10^7 N/m$

Συνεπώς, η συνολική ακτινική δυσκαμψία του ρουλεμάν προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την ακαμψία κάθε σφαίρας με το πλήθος των σωμάτων κύλισης :

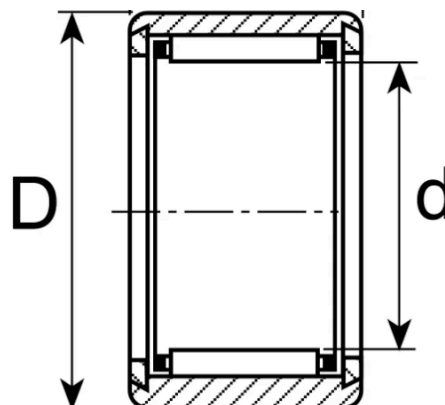
$$K_{radial} = 36k_b = 5,4 \times 10^8 N/m \quad (3.5)$$

Η παραδοχή της προφόρτισης  $F_b = 200N$  βασίζεται σε προσεγγίσεις τεχνικών μελετών, καθώς και σε εμπειρικά δεδομένα από προσομοιώσεις βαρύφορτων ρουλεμάν.

Κατεύθυνση	Δυσκαμψία (N/m)
$K_x$ (αξονική)	$10^9$
$K_y$ (ακτινική)	$5,4 \cdot 10^8$
$K_z$ (ακτινική)	$5,4 \cdot 10^8$

**Πίνακας 3.5 :** Δυσκαμψίες ένσφαιρου εδράνου κύλισης

Η οπίσθια στήριξη του ρότορα προσεγγίστηκε μέσω ενός ρουλεμάν κυλινδρικού τύπου το οποίο αποτελείται από 36 κυλίνδρους, ακτίνας  $R = 6mm$  και μήκους  $L = 2cm$ . Οι κύλινδροι εφάπτονται με δακτύλιο εξωτερικής διαμέτρου  $D = 19cm$  και με την πίσω διατομή του στροφείου (ρότορα) διαμέτρου  $d = 16cm$  ενώ η ύπαρξη διαχωριστικού σώματος κύλισης αποτρέπει την αμοιβαία επαφή των κυλίνδρων.



**Σχήμα 3.12 :** Άσφαιρο έδρανο κύλισης σε τομή <sup>[7],[10]</sup>

Για τη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου ρουλεμάν υιοθετήθηκε η προσέγγιση ορθοτροπικής ελαστικής στήριξης (orthotropic elastic support), όπως και στο εμπρόσθιο ρουλεμάν, ώστε να αποδοθεί με ρεαλισμό η διαφοροποίηση δυσκαμψίας σε ακτινικές και αξονικές κατευθύνσεις. Η αριθμητική παραδοχή βασίζεται στη θεωρία επαφής κατά Hertz για την περίπτωση γραμμικής επαφής κυλίνδρου με επίπεδο. Η δυσκαμψία επαφής για έναν κύλινδρο υπολογίζεται ως:

$$K_r = \frac{\frac{E}{1-\nu^2} L}{\pi R} \quad (3.6)$$

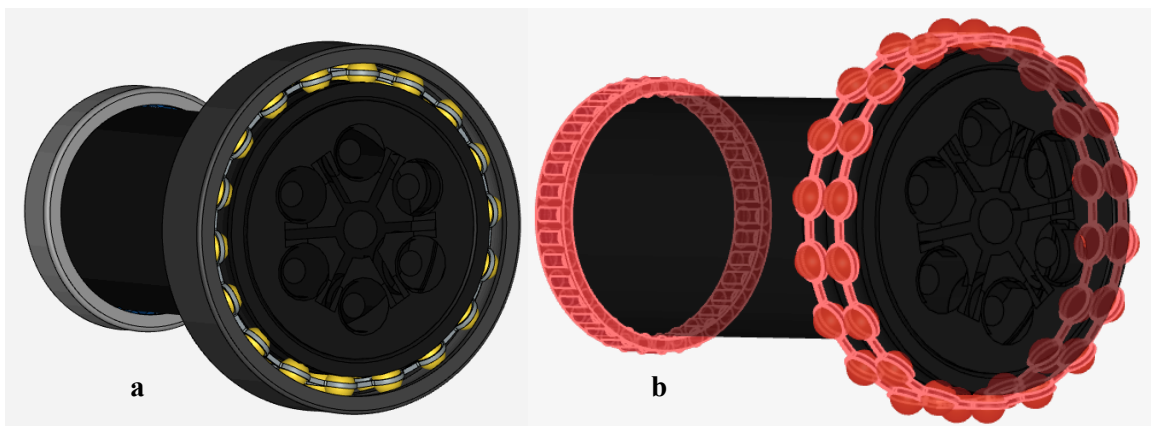
Όπου  $E = 210 GPa$  και  $\nu = 3$ , οπότε και η επιμέρους δυσκαμψία ανά κύλινδρο προκύπτει  $k_r = 2,55 \times 10^{11} N/m$ , και επομένως η συνολική δυσκαμψία του ρουλεμάν είναι :

$$K_{radial} = 36k_r = 9,17 \times 10^{12} N/m \quad (3.7)$$

Η αξονική δυσκαμψία,  $K_x$  ορίστηκε σε  $10^9 N/m$ , για λόγους αριθμητικής σταθερότητας, καθώς οι κύλινδροι δεν φέρουν ουσιαστική αξονική φόρτιση. Η συγκεκριμένη παραδοχή αποσκοπεί στην αποτροπή κίνησης ελεύθερου σώματος.

Κατεύθυνση	Δυσκαμψία (N/m)
$K_x$ (αξονική)	$10^9$
$K_y$ (ακτινική)	$9,17 \cdot 10^{12}$
$K_z$ (ακτινική)	$9,17 \cdot 10^{12}$

**Πίνακας 3.6 :** Δυσκαμψίες άσφαιρου εδράνου κύλισης



**Σχήμα 3.13 :** Στροφείο με μοντελοποιημένα έδρανα κύλισης (a) και (b) σώματα κύλισης ως ελαστικές στήριξεις, αντικατάσταση ξεωμετρίας με ισοδύναμες αξονικές και ακτινικές δυσκαμψίες

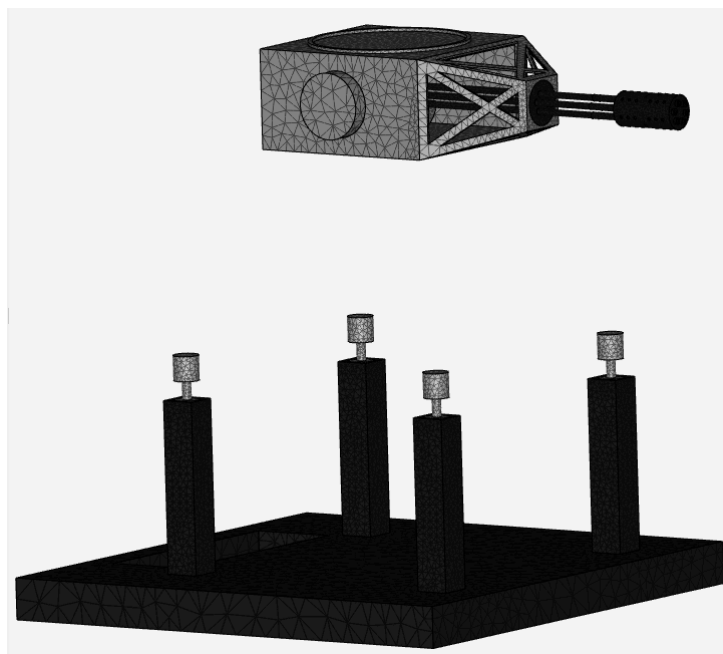
### 3.4 Τελικό μοντέλο υπολογιστικής ανάλυσης

#### 3.4.1 Προσομοιωμένη γεωμετρία

Τα εξαρτήματα που δεν μοντελοποιήθηκαν ως σημειακές μάζες, όπως τα περιβλήματα, το στροφείο, ο άξονας στήριξης, ο κλωβός συγκράτησης, οι κάννες, τμήματα εδράνων κύλισης και οι σφιγκτήρες, έχουν ενοποιηθεί σε ενιαίο στερεό σώμα, για λόγους απλούστευσης. Η ίδια προσέγγιση απλοποίησης εφαρμόστηκε και στη βάση του συστήματος. Αντί για πλήρη αναπαράσταση όλων των τμημάτων της πλατφόρμας στήριξης, διατηρήθηκαν μοντελοποιημένα μόνο το κατάστρωμα του πλοίου και τα επιλεγμένα τμήματα στα οποία συνδέονται οι υδραυλικοί αποσβεστήρες.

#### 3.4.2 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με χρήση του τυπικού αλγορίθμου δεύτερης τάξης (2nd order Standard algorithm), ο οποίος επιτρέπει την αποδοτικότερη αποτύπωση των καμπυλωμένων επιφανειών και των τοπικών παραμορφώσεων. Η επιλογή της αυτόματης δόμησης (Automatic sizing) με τιμή λεπτομέρειας (Fineness) στο επίπεδο 10 (Fine) διασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στην περιγραφή της γεωμετρίας του συστήματος. Ο τελικός όγκος του πλέγματος περιελάμβανε 133.070 τετραεδρικά στοιχεία και 238.410 κόμβους. Η συνολική προσομοίωση διεκπεραιώθηκε με χρονική απαίτηση 5 λεπτών και υπολογιστική κατανάλωση 0.18 core-hours, γεγονός που αποδεικνύει την επιτυχία της μεθόδου διακριτοποίησης σε συνδυασμό με την απλοποιημένη γεωμετρία του μοντέλου.



**Σχήμα 3.14 :** Διακριτοποιημένο γεωμετρικό μοντέλο υπολογιστικής προσομοίωσης

### 3.5 Άμεσος Επιλυτής MUMPS (Multifrontal Massively Parallel Solver)

Ο MUMPS <sup>[15]</sup> είναι άμεσος επιλυτής γραμμικών συστημάτων τύπου:

$$[A]x = [b] \quad (3.8)$$

χρησιμοποιείται για την επίλυση συστημάτων μεγάλου μεγέθους, ιδίως συμμετρικών και αραιών πινάκων, όπως αυτοί που προκύπτουν κατά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ο αλγόριθμος MUMPS χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία πολλαπλών μετώπων (multifrontal method), η οποία αναλύει τον πίνακα σε μικρότερα υποσυστήματα και τα λύνει παραλληλισμένα. Στον παρόντα υπολογισμό, ο MUMPS χρησιμοποιείται για την επίλυση του συστήματος κατά την αναζήτηση ιδιοσυχνοτήτων.

### 3.6 IRAM - Sorensen (Implicitly Restarted Arnoldi Method)

Η IRAM (Implicitly Restarted Arnoldi Method) <sup>[16]</sup> είναι μια εξειδικευμένη επαναληπτική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων ιδιοτιμών τύπου:

$$[K]\phi = \lambda[M]\phi \quad (3.9)$$

Η μέθοδος εφαρμόζεται για γενικευμένα ιδιοτιμικά προβλήματα με μη συμμετρικούς πίνακες (ή και συμμετρικούς), στοχεύει στην εξαγωγή λίγων ιδιοτιμών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 4.1 Μεθοδολογία εξαγωγής ιδιομορφών, ιδιοσυχνοτήτων

Η εξαγωγή ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος της ιδιοτιμής για ένα ολόκληρο σύστημα <sup>[19]</sup>. Οι ιδιομορφές είναι μοτίβα κίνησης στα οποία όλα τα σημεία ενός δυναμικού συστήματος ταλαντώνονται ημιτονοειδώς και την ίδια συσχρότητα και σταθερή σχετική φάση<sup>[14]</sup>. Ένα σύστημα  $n$  βαθμών ελευθερίας έχει  $n$  φυσικές ιδιοσυχνότητες και για κάθε φυσική ιδιοσυχνότητα αντιστοιχεί μία ιδιομορφή. Τα τετράγωνα των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές συντεταγμένων των ιδιομορφών είναι οι ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα, αντίστοιχα.

Έστω ένα στοιχείο από τη διακριτή ράβδο του Κεφαλαίου 1. Κάθε στοιχείο έχει δύο κόμβους και δύο βαθμούς ελευθερίας. Οι προκύπτοντες πίνακες ακαμψίας και μάζας είναι  $2 \times 2$ . Η προκύπτουσα εξίσωση κίνησης για ελεύθερη ταλάντωση είναι η εξής :

$$\left[ \mathbf{M} \right] \left\{ \ddot{\mathbf{X}} \right\} + \left[ \mathbf{K} \right] \left\{ \mathbf{X} \right\} = 0 \quad (4.1)$$

Έστω μητρώο εκτοπισμάτων των κόμβων  $\mathbf{x}(t)$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix},$$

τότε η λύση είναι της μορφής :

$$\left\{ \mathbf{x}(t) \right\} = C \boldsymbol{\varphi}(x) e^{i\omega t},$$

Όπου,

$C$  : είναι μιγαδική σταθερά

$\boldsymbol{\varphi}$  : είναι χωρικό διάνυσμα και

$\omega$  : κυκλική ιδιοσυχνότητα

Παραγωγίζοντας και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.1), προκύπτει :

$$\left[ -\omega^2 \left[ \mathbf{M} \right] \left\{ \boldsymbol{\varphi} \right\} + \left[ \mathbf{K} \right] \left\{ \boldsymbol{\varphi} \right\} \right] C e^{i\omega t} = 0 \quad (4.2)$$

Το προκύπτον σύνολο γραμμικών ομοιογενών εξισώσεων έχει λύσεις, εάν η ορίζουσα των συντελεστών είναι μηδέν. Οι τιμές του  $\omega$  που ικανοποιούν αυτήν την συνθήκη είναι οι ιδιοτιμές του προβλήματος. Αντίστοιχα σε κάθε ιδιοτιμή υπάρχει τουλάχιστον ένα ιδιοδιάνυσμα. Η ορίζουσα είναι :

$$Det\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} \end{bmatrix}\right) = 0 \quad (4.3)$$

και το αποτέλεσμα είναι ένα πολυώνυμο συναρτήσει του  $\omega$ . Η λύση του προβλήματος της ιδιοτιμής βρίσκεται από τις ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης

$$\left(\begin{bmatrix} \mathbf{K} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} \end{bmatrix}\right) = 0 \quad (4.4)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, εφόσον υπάρχουν δύο βαθμοί ελευθερίας, θα υπάρχουν δύο ιδιοτιμές. Για να προσδιοριστούν τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα, οι ιδιοτιμές αντικαθίστανται μία κάθε φορά στην εξίσωση (4.5) :

$$\left(-\omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} \end{bmatrix}\right) \left\{ \varphi \right\} = 0 \quad (4.5)$$

Τα ιδιοδιανύσματα που προκύπτουν είναι ένα αντίστοιχο σύνολο εξισώσεων μεταξύ των άγνωστων τιμών  $\varphi_i$ . Τα ιδιοδιανύσματα περιγράφουν τα σχήματα των ιδιομορφών που αντιστοιχούν στις φυσικές ιδιοσυχνότητες. Για την πρώτη ιδιομορφή  $\omega_1$  το αποτέλεσμα :

$$\frac{x_2}{x_1} = \varphi_1^1$$

αντίστοιχα, για τη δεύτερη ιδιομορφή  $\omega_2$  το αποτέλεσμα

$$\frac{x_2}{x_1} = \varphi_1^2$$

Το διάνυσμα ιδιομορφών  $\varphi$  τυπικά κανονικοποιείται σε σχέση με τη συνιστώσα μέγιστης μετατόπισης στο διάνυσμα. Για παράδειγμα, αν  $x_1 = 1$ , τα προκύπτοντα ιδιοδιανύσματα είναι

$$\varphi^1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varphi^1 \end{Bmatrix}, \quad \varphi^2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ \varphi^2 \end{Bmatrix},$$



Υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι κανονικοποίησης. Για παράδειγμα, τα διανύσματα θα μπορούσαν να κανονικοποιηθούν έτσι ώστε η προκύπτουσα μάζα να είναι ίση με ένα.

$$\varphi_i^T [\mathbf{M}] \varphi_j = 1, \text{ για } i = j$$

όπου  $\varphi_i^T$  είναι ο ανάστροφος του πίνακα  $\varphi$ . Ο αντίστροφος ενός πίνακα ορίζεται ως

$$A_{ij}^T = A_{ji}$$

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των ιδιοδιανυσμάτων είναι ότι είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Υπάρχουν δύο μητρώα ορθογωνικότητας. Το ένα περιλαμβάνει τον πίνακα μάζας  $[\mathbf{M}]$ , το άλλο τον πίνακα ακαμψίας  $[\mathbf{K}]$ . Οι σχέσεις αναπτύσσονται εύκολα ξεκινώντας από την εξίσωση (4.5) και το γεγονός ότι τα  $[\mathbf{M}]$  και  $[\mathbf{K}]$  είναι πραγματικοί συμμετρικοί πίνακες και είναι ίσοι με τους αναστρώφους τους. Έστω δύο διαφορετικές ιδιομορφές  $i$  και  $j$ , που συμβολίζονται στα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματά τους ως εκθέτες. Η αντικατάσταση καθενός από αυτά ένα κάθε φορά στην εξίσωση (4.5) έχει ως αποτέλεσμα :

$$[\mathbf{K}] \left\{ \varphi^i \right\} = \omega_i^2 [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} \quad (4.6)$$

$$[\mathbf{K}] \left\{ \varphi^j \right\} = \omega_j^2 [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^j \right\} \quad (4.7)$$

Πολλαπλασιάζοντας την (4.6) με την αναστροφή του  $\left\{ \varphi^i \right\}$  και την (4.7) με τη αναστροφή του  $\left\{ \varphi^j \right\}$  δίνει

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{K}] \left\{ \varphi^i \right\} = \omega_i^2 [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} \left\{ \varphi^j \right\}^T \quad (4.8)$$

$$\left\{ \varphi^i \right\}^T [\mathbf{K}] \left\{ \varphi^j \right\} = \omega_j^2 [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^j \right\} \left\{ \varphi^i \right\}^T \quad (4.9)$$

Αναδιατάσσοντας αυτά, προκύπτει

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{K}] \left\{ \varphi^i \right\} = \omega_i^2 \left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} \quad (4.10)$$

$$\left\{ \varphi^i \right\}^T [\mathbf{K}] \left\{ \varphi^j \right\} = \omega_j^2 \left\{ \varphi^i \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^j \right\} \quad (4.11)$$

Αφαιρώντας την (4.9) από την (4.8) , προκύπτει

$$0 = (\omega_i^2 - \omega_j^2) \left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} \quad (4.12)$$

Εάν  $\omega_i^2 \neq \omega_j^2$  , τότε  $i \neq j$  και προκύπτει

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} = 0 \quad (4.13)$$

Θεωρώντας δύο ιδιομορφές  $i = 2$  και  $j = 1$  , προκύπτει

$$\begin{bmatrix} \varphi_1^1 & \varphi_2^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_2^2 \\ \varphi_2^2 \end{Bmatrix} = 0$$

Η πρώτη ιδιομορφή είναι ορθογώνια σε κάθε άλλη ιδιομορφή. Τα ιδιοδιανύσματα είναι διανύσματα βάσης που αντιπροσωπεύουν μια δυναμική κατάσταση του συστήματος. Οι δύο προϋποθέσεις για την ορθογωνικότητα συνοψίζονται ως εξής:

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} = 0 \text{ για } i \neq j , \text{ και} \quad (4.14)$$

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{M}] \left\{ \varphi^i \right\} = M \text{ για } i = j \quad (4.14a)$$

Ομοίως, ισχύουν τα παρακάτω

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T [\mathbf{K}] \left\{ \varphi^i \right\} = 0 \text{ για } i \neq j , \text{ και} \quad (4.15)$$

$$\left\{ \varphi^j \right\}^T \left[ \mathbf{M} \right] \left\{ \varphi^i \right\} = K \text{ για } i = j \quad (4.15\alpha)$$

Όπου :

$M$  : η μάζα ιδιομορφής

$K$  : η ακαμψία ιδιομορφής

Οι σχέσεις ορθογωνικότητας είναι θεμελιώδεις για την αποσύνδεση των εξισώσεων κίνησης. Θεωρώντας ολόκληρο το στοιχείο συνεχούς ράβδου ως σύστημα, οι εξισώσεις κίνησης που προκύπτουν συζεύγνυνται. Στην περίπτωση της συνεχούς ράβδου, το σύστημα θεωρείται ότι είναι συζευγμένο στατικά. Ο πίνακας ακαμψίας  $[\mathbf{K}]$  είναι μη διαγώνιος. Για να αποσυνδεθούν αυτές οι εξισώσεις κίνησης, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ένας γραμμικός μετασχηματισμός. Ο μετασχηματισμός περιλαμβάνει τη δημιουργία μητρώου  $[\Phi]$  ο οποίος είναι ένας τετραγωνικός πίνακας, στον οποίο οι στήλες αντιστοιχούν στα ιδιοδιανύσματα του συστήματος. Για ένα σύστημα με  $n$  βαθμούς ελευθερίας

$$[\Phi] = \left[ \left\{ \varphi \right\}_1 \dots \left\{ \varphi \right\}_n \right]$$

Η αποσύνδεση των εξισώσεων κίνησης ως προς της ιδιομορφές απλοποιεί την ανάλυση ενός συστήματος πολλαπλών βαθμών ελευθερίας. Η επίλυση του προβλήματος της ιδιοτιμής για ελεύθερη ταλάντωση, έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση φυσικών ιδιομορφών και φυσικών ιδιοσυχνοτήτων. Οι ιδιοτιμές είναι ανάλογες με τις φυσικές συχνότητες  $f_i$ .

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$$

Όπου  $\omega_i^2$  είναι η ιδιοτιμή και ισούται με :

$$\omega_i^2 = \frac{K_i}{M_i}$$

Οι αντίστοιχες ιδιοτιμές είναι τα ιδιοδιανύσματα.

Ξεκινώντας με την εξίσωση ελεύθερης ταλάντωσης

$$[\mathbf{M}] \left\{ \ddot{\mathbf{X}} \right\} + [\mathbf{K}] \left\{ \mathbf{X} \right\} = 0 \quad (4.16)$$

έχει λύση της μορφής

$$\left\{ \mathbf{X} \right\} = [\Phi] \left\{ \mathbf{q} \right\} \quad (4.17)$$

όπου  $\left\{ q \right\}$  είναι ένας ημιτονοειδής χρονικός όρος.

Για μια ελαστική ιδιομορφή  $q$  έχει τη μορφή

$$q = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

Για ιδιομορφή στερεού σώματος, το  $q$  έχει τη μορφή πολωνύμου. Ο όρος  $\omega$  είναι η τετραγωνική ρίζα της ιδιοτιμής. Λαμβάνοντας τις κατάλληλες παραγώγους της εξίσωσης (4.17) και αντικαθιστώντας στην (4.16) προκύπτει

$$[\mathbf{M}][\Phi]\left\{\ddot{\mathbf{q}}\right\} + [\mathbf{K}][\Phi]\left\{\mathbf{q}\right\} = 0 \quad (4.18)$$

Πολλαπλασιάζοντας με τον ανάστροφο  $[\Phi]^T$ , προκύπτει :

$$[\Phi]^T[\mathbf{M}][\Phi]\left\{\ddot{\mathbf{q}}\right\} + [\Phi]^T[\mathbf{K}][\Phi]\left\{\mathbf{q}\right\} = 0 \quad (4.19)$$

Το αποτέλεσμα είναι οι παρακάτω διαγώνιοι πίνακες

$$[\Phi]^T[\mathbf{M}][\Phi] = \begin{bmatrix} M_i & 0 \\ 0 & M_j \end{bmatrix} = [\mathbf{M}]$$

ο διαγώνιος πίνακας της μάζας, και ο διαγώνιος πίνακας της ακαμψίας :

$$[\Phi]^T[\mathbf{K}][\Phi] = \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_j \end{bmatrix} = [\mathbf{K}]$$

Το αποτέλεσμα είναι ένα σετ ελεύθερων κανονικών διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξης

$$[\mathbf{M}]\left\{\ddot{\mathbf{q}}\right\} + [\mathbf{K}]\left\{\mathbf{q}\right\} = 0 \quad (4.20)$$

Η εξίσωση που αντιπροσωπεύει την  $i$  σειρά είναι συνηθισμένη διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης,

$$M_{ii}\ddot{q}_i + K_i q_i = 0 \quad (4.21)$$

Πολλαπλασιάζοντας με  $\frac{1}{M_{ii}}$ , προκύπτει :

$$\ddot{q}_i + \frac{K_i}{M_{ii}} q_i = 0 \text{ , και} \quad (4.22)$$

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i = 0 \quad (4.23)$$

Το αποτέλεσμα είναι μια εξίσωση κίνησης για έναν απλό αρμονικό ταλαντωτή ενός βαθμού ελευθερίας με γωνιακή συχνότητα  $\omega_i$ . Η προκύπτουσα φυσική συχνότητα  $f$ :

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega_i^2} \quad (4.24)$$

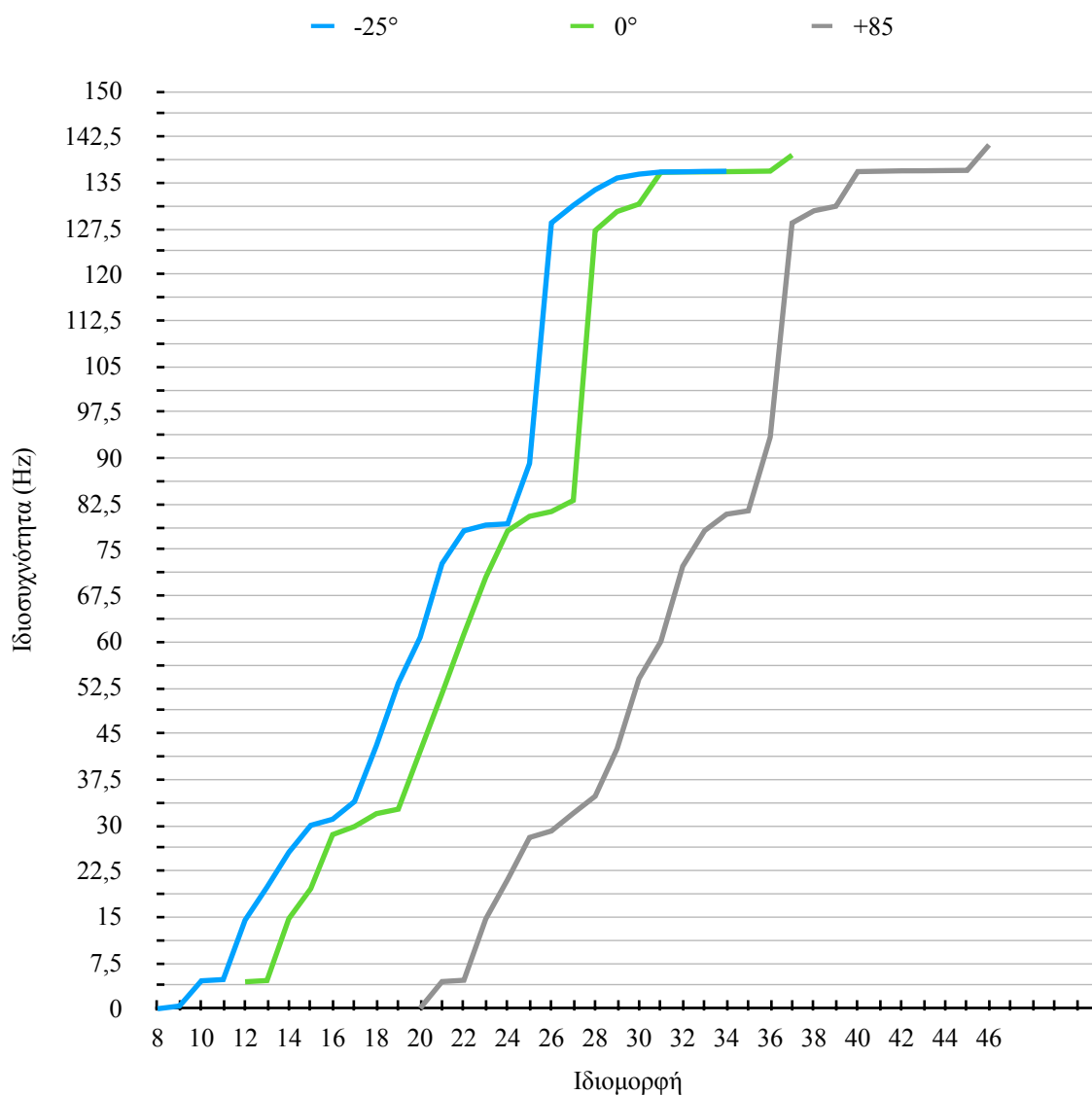
Η σχετική στήλη του μητρώου  $[\mathbf{M}]$  είναι το αντίστοιχο σχήμα ιδιομορφής. Για ένα σύστημα  $n$  βαθμών ελευθερίας υπάρχουν  $n$  τέτοιες εξισώσεις. Από αυτό προκύπτει ότι η αδιάκοπη ελεύθερη δόνηση ενός συστήματος  $n$  βαθμών ελευθερίας μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = [\Phi] \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix},$$

όπου  $x_i$  είναι γενικευμένες συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δονητική κίνηση.

## 4.2 Ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες κατά γωνία στόχευσης

Στο παρόν στάδιο της ανάλυσης, εξετάζονται οι ιδιοσυχνότητες και οι αντίστοιχες ιδιομορφές του συστήματος υπό τρεις διαφορετικές γωνίες στόχευσης:  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$  και  $+85^\circ$ , οι οποίες όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικές θέσεις βολής του συστήματος. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε σε ιδιομορφές με ιδιοσυχνότητες πλησίον των 50 Hz και 75 Hz, (περίπου  $\pm 10\%$  απόκλιση) καθώς αντιστοιχούν στους ρυθμούς βολής των 3000SPM και 4500SPM με την διέγερση των οποίων ενδέχεται να προκύψει συντονισμός και, κατ' επέκταση, αύξηση της διασποράς. Συμπερασματικά, όπως προκύπτει από το διάγραμμα 4.1 η κατώτερη γωνία στόχευσης ( $-25^\circ$ ) κρίνεται ως η πιο δυναμικά ασταθής. Η ανάπτυξη της αριστερότερα από τις υπόλοιπες γωνίες δηλώνει ότι η δομή εισέρχεται νωρίτερα σε κρίσιμη συχνοτική συμπεριφορά. Η γωνία στόχευσης  $0^\circ$  εμφανίζει σχεδόν ίδια συμπεριφορά με την γωνία  $-25^\circ$ , ενώ η γωνία  $+85^\circ$  παρουσιάζει την υψηλότερη ακαμψία. Στην επόμενη παράγραφο ερμηνεύονται οι περισσότερες κρίσιμες ιδιομορφές.



**Διάγραμμα 4.1 :** Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων αρχικού μοντέλου

#### 4.3 Ερμηνεία ιδιομορφών κατά Modal Effective Mass (MEM)

Κατά την ανάλυση ιδιομορφών, η έννοια (Modal Effective Mass, MEM) αποτελεί μέγεθος για την αποτίμηση της δυναμικής σημασίας κάθε ιδιομορφής ως προς μία δεδομένη κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, δείκτης MEM υπολογίζεται ως η ισοδύναμη μάζα που συμμετέχει ενεργά σε μία συγκεκριμένη ιδιομορφή, εκφράζοντας το ποσοστό της συνολικής δομικής μάζας που κινητοποιείται κατά μήκος ενός εκ των αξόνων X, Y ή Z. Η μαθηματική του έκφραση προκύπτει από τη σύζευξη του ιδιοδιανύσματος με τον πίνακα μάζας του συστήματος και ένα διάνυσμα κατεύθυνσης.

Η ύπαρξη υψηλών τιμών MEM σε μία ιδιομορφή καταδεικνύει ότι η συγκεκριμένη ιδιομορφή έχει άμεση επίδραση στην απόκριση του συστήματος όταν αυτό διεγείρεται σε αντίστοιχη κατεύθυνση. Αντιθέτως, MEM κοντά στο μηδέν συνεπάγεται ότι η ιδιομορφή είναι αδρανής. Στις ιδιομορφές που αναλύθηκαν, υψηλό MEM κατά τον άξονα Z αξιολογούνται ως κρίσιμες για την κατακόρυφη διασπορά του πυρός, ενώ ιδιομορφές με σημαντικό MEM κατά Y ή X συσχετίζονται αντίστοιχα με πλευρική απόκλιση ή βύθιση/ανύψωση της κάννης. Η ένταξη της ανάλυσης MEM στη διαδικασία επιλογής κρίσιμων ιδιομορφών επιτρέπει τη θεμελιωμένη εστίαση μόνο σε εκείνες τις μορφές που είναι πιθανότερο να διεγερθούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

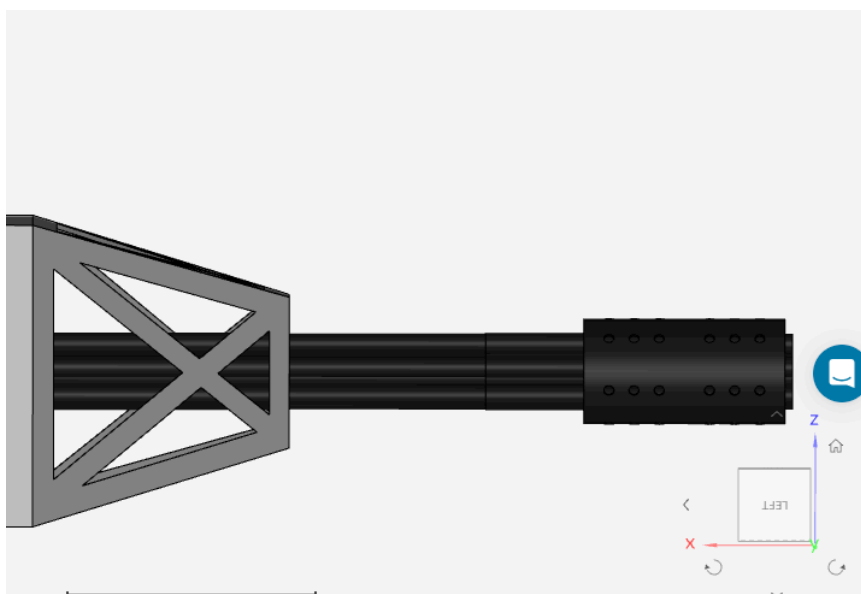
Στον πίνακα 4.4 συγκεντρωτικά, οι ιδιομορφές 21(-25°) και 32 (+85°) είναι οι δυναμικά πιο κρίσιμες, με πολύ υψηλό Modal Effective Mass στον άξονα Y. Όλες οι κρίσιμες ιδιομορφές είναι κοντά στην συχνότητα 75 Hz, δηλαδή τον ρυθμό βολής 4.500 SPM, που είναι και ο ταχύτερος ρυθμός λειτουργίας.

Γωνία $\alpha$	Ιδιομορφή	Modal Effective Mass (MEM) (kg)		
		X	Y	Z
0°	21	0,03	30,20	0,26
0°	24	0,00	0,00	0,18
-25°	19	4,34	111,20	0,23
-25°	21	0,14	<b>988,50</b>	0,26
+85°	30	0,75	25,00	0,30
+85°	32	0,42	<b>1029,80</b>	0,01

**Πίνακας 4.1 :** MEM κατά γωνία και ιδιομορφή

#### 4.3.1 Γωνία στόχευσης 0°

Κατά τη γωνία στόχευσης 0°, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 υπάρχει ευθυγράμμιση με τον άξονα X. Επομένως, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζουν οι εκτροπές κατά τους άξονες Y και Z. Κατά τον άξονα Y (πλευρικά) οι εγκάρσιες ταλαντώσεις προκαλούν εκτροπή προς τα δεξιά ή αριστερά συμβάλλοντας σε πλευρική διασπορά. Κατά τον άξονα Z (κατακόρυφα) οι μετατοπίσεις της κάννης δύνανται να μεταβάλλουν τη γωνία βολής ως προς το κάθετο επίπεδο, επηρεάζοντας έτσι την κατακόρυφη διασπορά των βολών. Στον πίνακα 1 παρατίθενται οι ποιό κρίσιμες ιδιομορφές με τις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητές τους και αναλύονται σχηματικά οι ιδιομορφές 21 και 24 ως εγγύτερες στις συχνότητες λειτουργίας.

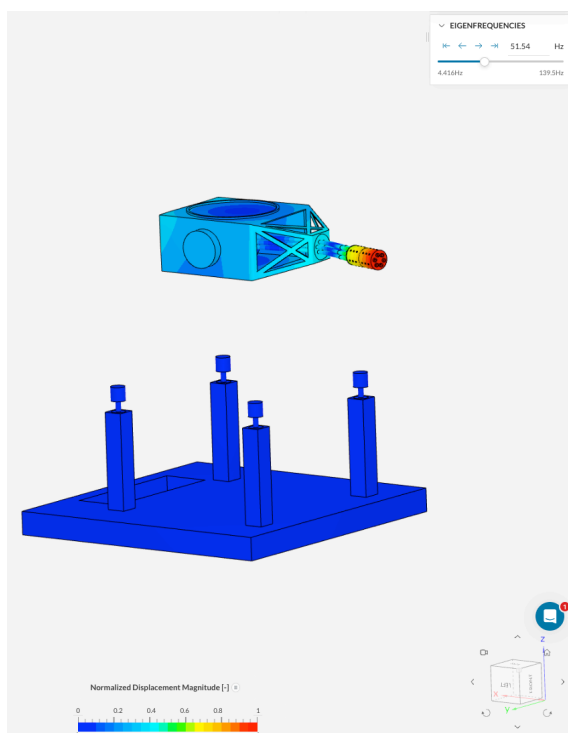


**Σχήμα 4.1 :** Γωνία στόχευσης 0°, άξονες κατευθύνσεων

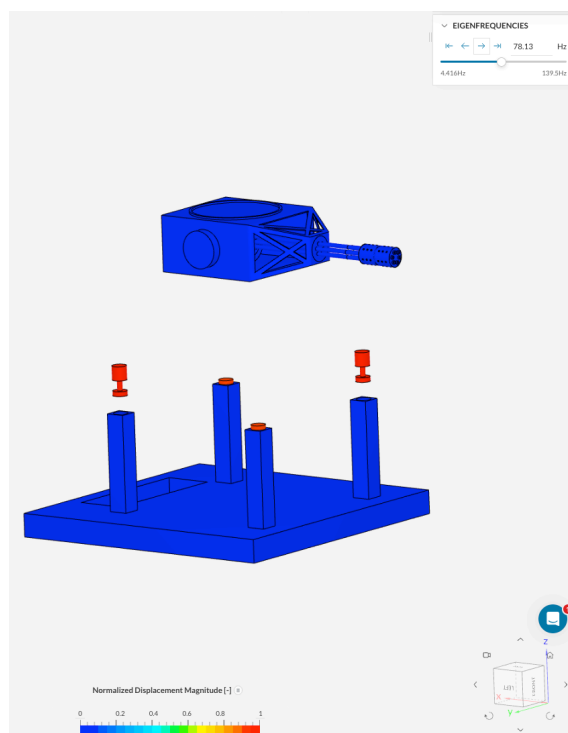
Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
20	42,1
21	51,5
22	61,3
23	70,5
24	78,1
26	81,3

**Πίνακας 4.2 :** Γωνία στόχευσης 0°, ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες





(α)



(β)

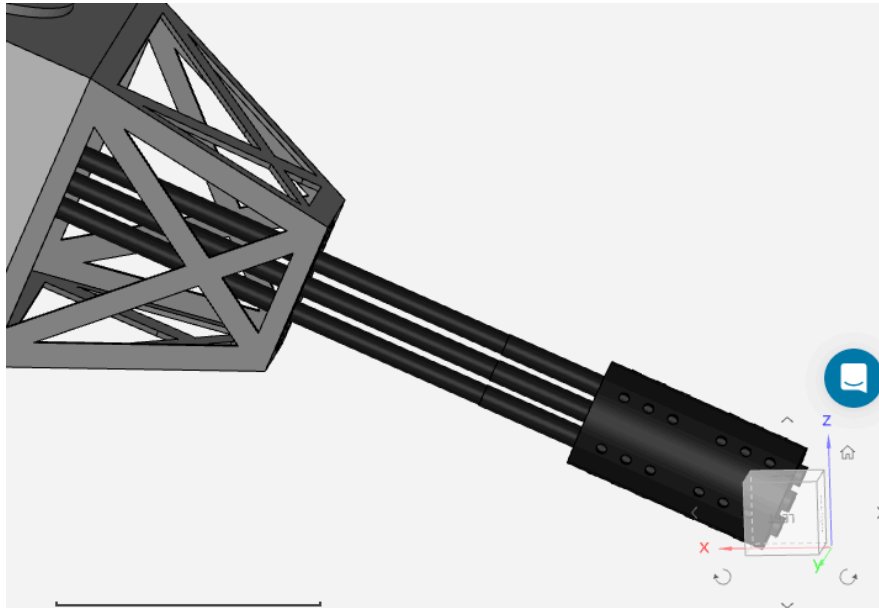
**Σχήμα 4.2 :**

Ιδιομορφή 21 - ιδιοσυχνότητα 51,4 Hz (α), ιδιομορφή 24 - ιδιοσυχνότητα 78,1 Hz

Η ιδιομορφή 21 (51,54 Hz), παρότι διαθέτει χαμηλό Modal Effective Mass κατά X,Y,Z (Πίνακας 4.1) παρουσιάζει έντονη τοπική απόκριση στην κάννη, με χαρακτηριστικά μορφής λυγισμού, κοντά στη συχνότητα των 50 Hz. Η ιδιομορφή 24 (78,1 Hz) περιλαμβάνει χαμηλά Modal Effective Mass σε όλους τους άξονες. Το σύστημα απόσβεσης κραδασμών κατανοείται εντονότερα. Επιπλέον, περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.2 και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ιδιομορφών οι ιδιομορφές 20 (42,1 Hz), 22 (61,25 Hz), 23 (70,53 Hz), 24 (78,13 Hz) και 26 (81,27 Hz).

#### 4.3.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$

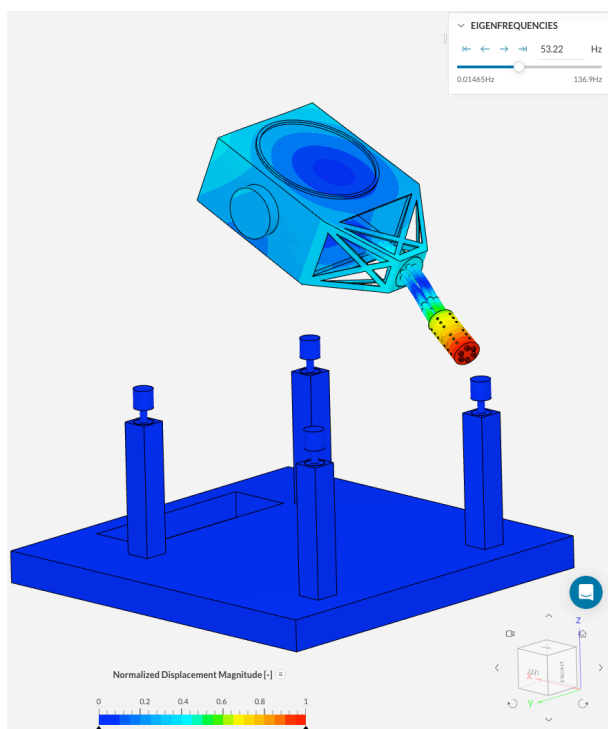
Στη γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ , (σχήμα 4.2) η κάννη του συστήματος βρίσκεται σε καθοδική κλίση, με αποτέλεσμα η κατεύθυνση βολής να μην ευθυγραμμίζεται πλήρως με κάποιον από τους βασικούς άξονες του συστήματος συντεταγμένων. Ως εκ τούτου, και οι τρεις άξονες X, Y και Z επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά και, κατ' επέκταση, τη διασπορά. Οι μετατοπίσεις κατά X και Z σχετίζονται με εγκάρσια εκτροπή, ενώ οι μετατοπίσεις κατά Y συμμετέχουν σε πλευρικές εκτροπές.



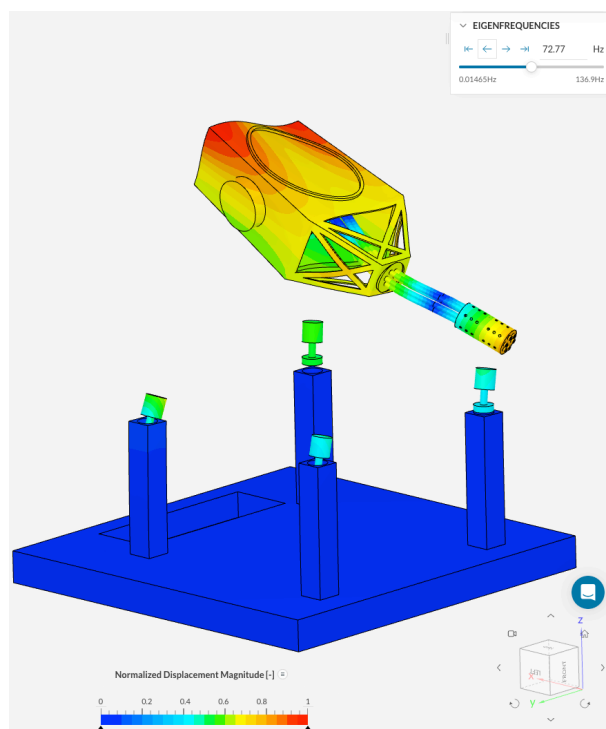
**Σχήμα 4.3 :** Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ , άξονες κατευθύνσεων

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
18	43,02
19	53,22
20	60,71
21	72,77
22	78,14
23	79,07
24	79,27

**Πίνακας 4.3 :** Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ , ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες



(α)



(β)

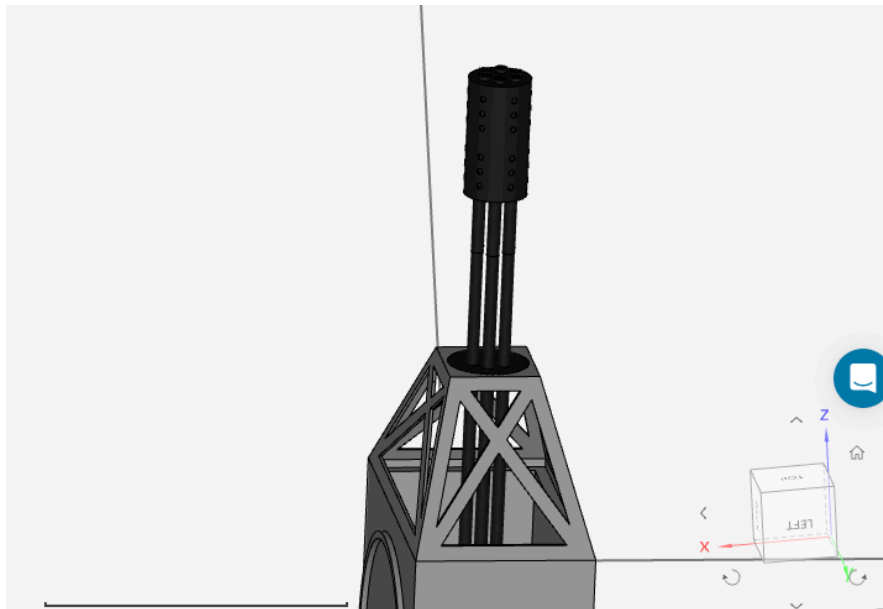
**Σχήμα 4.4 :**

Ιδιομορφή 19 - ιδιοσυχνότητα 53,22 Hz (α), ιδιομορφή 21 - ιδιοσυχνότητα 72,77 Hz (β)

Η ιδιομορφή 19 (53,22 Hz), εμφανίζει χαρακτηριστική παραμόρφωση με ισχυρή μετατόπιση της κάννης, ιδιαίτερα κατά Y και Z. Η ιδιομορφή 21 (72,77 Hz), παρουσιάζει σημαντικό MEM κατά Y (988,5 kg), υποδηλώνοντας έντονη πλευρική απόκριση. Οι ιδιομορφές 18 (43,02 Hz) και 20 (60,71 Hz) διατηρούν τοπικές μέγιστες εκτροπές στις περιοχές κάννης, σχετική εγγύτητα στις περιοχές διέγερσης, με τη μορφή 20 να εμφανίζει υψηλό MEM κατά Z (818,4 kg), δηλώνοντας σύνθετη δυναμική συμμετοχή. Οι ιδιομορφές 22, 23 και 24 παρακολουθούνται ως δευτερεύοντες παράγοντες διασποράς.

#### 4.3.3 Γωνία στόχευσης +85°

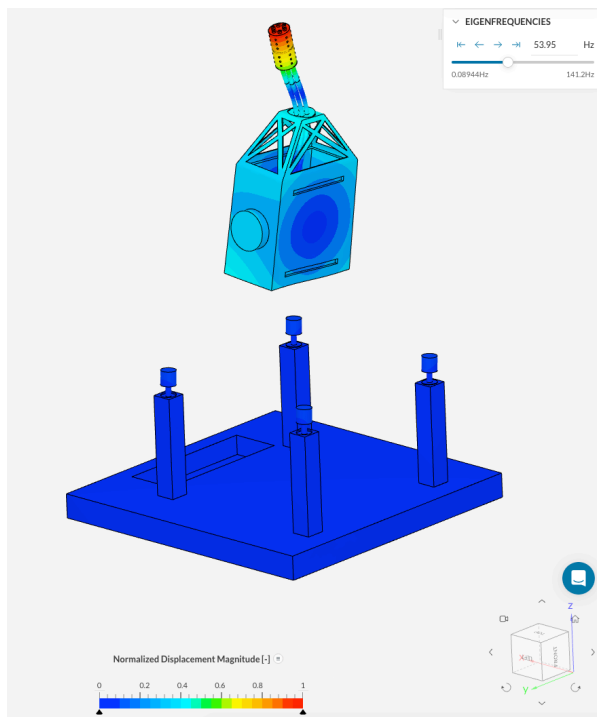
Στη γωνία στόχευσης +85°, (σχήμα 4.3) το σύστημα προσανατολίζεται σχεδόν κατακόρυφα με τον άξονα Z. Και οι τρεις άξονες X, Y και Z συμβάλουν στην διασπορά, με κύριο ρόλο τους άξονες X και Y με πλευρικές εκτροπές.



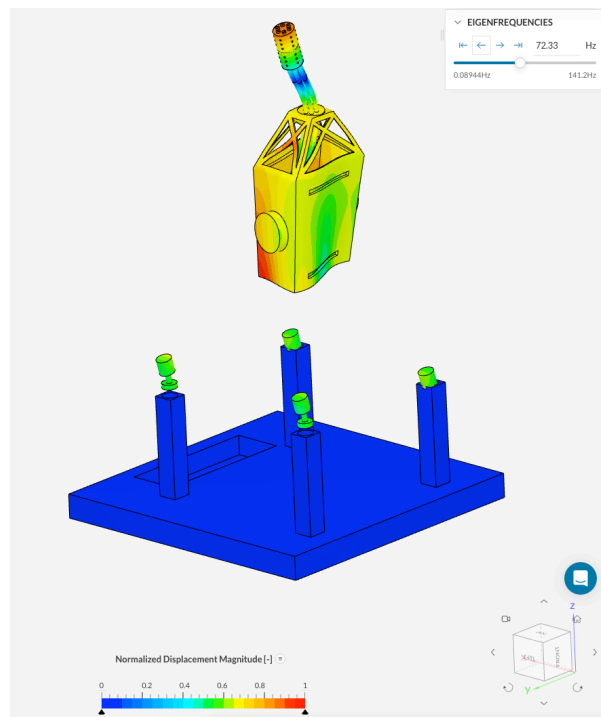
**Σχήμα 4.5 :** Γωνία στόχευσης +85°, άξονες διεύθυνσεως

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
29	42,51
30	53,95
31	60,03
32	72,33
33	78,15
34	80,84
35	81,40

**Πίνακας 4.4 :** Γωνία στόχευσης +85°, ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες



(α)



(β)

**Σχήμα 4.6 :**

Ιδιόμορφη 30 - ιδιοσυχνότητα 53,95 Hz (α), ιδιόμορφη 32 - ιδιοσυχνότητα 72,33 Hz (β)

Η ιδιομορφή 30 (53,95 Hz) εμφανίζει έντονη εκτροπή στην κατεύθυνση Y, όπως αποτυπώνεται και από το  $MEM-Y = 25,0 \text{ kg}$  το οποίο κατανέμεται σχεδόν εξολοκλήρου στις άκρες της κάνης, ενώ η εκτροπή στους άλλους δύο άξονες είναι περιορισμένη ( $MEM-X = 0,75 \text{ kg}$ ,  $MEM-Z = 0,30 \text{ kg}$ ). Η ιδιομορφή 32 (72,33 Hz) εμφανίζει ακόμη μεγαλύτερο  $MEM-Y = 1029,8 \text{ kg}$ , που όμως κατανέμεται και σε άλλες περιοχές της δομής οι οποίες δεν έχουν πρωταρχικό ρόλο στην ακρίβεια στόχευσης. Επιπλέον, καταγράφηκαν οι ιδιομορφές 29, 31, 33, 34 και 35, με συχνότητες από 42,51 έως 81,40 Hz, οι οποίες εντοπίζονται εντός της ζώνης διέγερσης. Από αυτές, οι ιδιομορφές 29 και 31 είναι οι πιο κρίσιμες με παρόμοια έντονη εκτροπή κάθε κάνης, οι υπόλοιπες ιδιομορφές επιδεικνύουν ήπια κινηματική απόκριση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

### 5.1 Γενικευμένη εξίσωση κίνησης αρμονικού ταλαντωτή

Η ανάλυση αρμονικής απόκρισης [5],[6],[8],[19] επιτρέπει την εκτίμηση της συμπεριφοράς του υπό περιοδικά φορτία, όπως αυτά που προκύπτουν από τα επαναλαμβανόμενα κρουστικά φορτία στα οποία υφίσταται η κατασκευή κατά τις βολές. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιοτιμών η αρμονική απόκριση προσδιορίζει ταλαντωτικά χαρακτηριστικά του συστήματος όταν διεγείρεται σε συγκεκριμένες συχνότητες.

Η βασική εξίσωση κίνησης ενός γραμμικού μηχανικού συστήματος με πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας είναι:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (5.1)$$

όπου:

- $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : Μητρώο μάζας
- $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : Μητρώο απόσβεσης ( για λόγους απλούστευσης θεωρείται 0)
- $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ : Μητρώο ακαμψίας
- $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ : Διάνυσμα εκτοπίσματος
- $\mathbf{F}(t) \in \mathbb{R}^n$ : Διάνυσμα εξωτερικού φορτίου

#### 5.1.2 Απόκριση στο πεδίο συχνότητας

Για αρμονική διέγερση, το εξωτερικό φορτίο [5],[6],[8],[19] έχει τη μορφή:

$$\mathbf{F}(t) = \vec{\mathbf{F}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.2)$$

Η λύση του συστήματος είναι επίσης αρμονική [5],[6],[8],[19]:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.3)$$

#### 5.1.3 Συντελεστής Απόσβεσης Rayleigh

Το μοντέλο απόσβεσης Rayleigh [22] προσεγγίζει τον συντελεστή απόσβεσης ως γραμμικό συνδυασμό μάζας και ακαμψίας :

$$c = a k + \beta m \quad (5.4)$$

Όπου  $a$ , η απόσβεση μάζας και όπου  $\beta$  η απόσβεση ακαμψίας.

Αντικαθιστώντας στην γενικευμένη εξίσωση κίνησης, διαιρώντας με το μητρώο  $\mathbf{M}$  και δεδομένης της φυσικής γωνιακής συχνότητας  $\omega_n$  και του συντελεστή απόσβεσης  $\zeta$  προκύπτει

$$\ddot{x}(t) + \frac{\mathbf{C}}{\mathbf{M}} \dot{x}(t) + \frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}} x(t) = \frac{\mathbf{F}(t)}{\mathbf{M}} \quad (5.5)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = \frac{\mathbf{F}(t)}{\mathbf{M}} \quad (5.6)$$

Όπου :

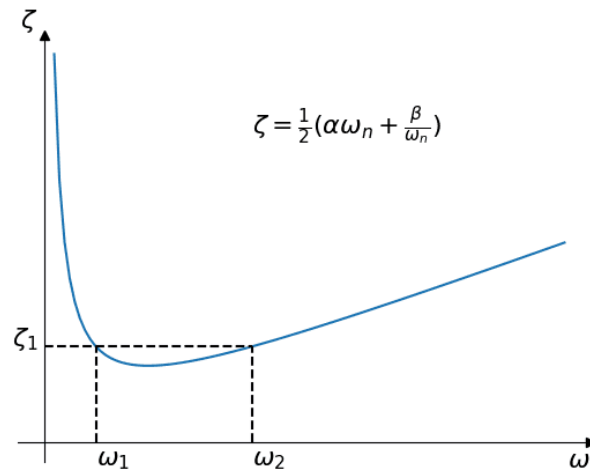
$$\omega_n^2 = \frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}} \quad (5.7)$$

και

$$\zeta = \frac{c}{c_{critic}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (5.8)$$

Ο συντελεστής Rayleigh με τον συντελεστή απόσβεσης, συσχετίζεται ως :

$$\zeta = \frac{1}{2m\omega_n}(ak + \beta m) \quad (5.9)$$



**Διάγραμμα 5.1 :** Πλήρης μορφή μοντέλου απόσβεσης

#### 5.1.4 Μέθοδος Ιδιομορφών

Οι εξισώσεις ιδιομορφών είναι της μορφής :

$$\ddot{z}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{z}_i + \omega_i^2 z_i = p_i \sin \omega t \quad (5.10)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Οι εξισώσεις είναι μη συζευγμένες. Η λύση ως προς  $z$  :

$$z_i(t) = \frac{\frac{p_i}{\omega_i^2}}{\sqrt{(1 - \eta_i^2)^2 + (2\zeta_i\eta_i)^2}} \sin(\omega t - \theta_i) \quad (5.11)$$

Όπου

$$\begin{cases} \theta_i = \arctan \frac{2\zeta_i\eta_i}{1 - \eta_i^2} \\ \eta_i = \frac{\omega}{\omega_i} \\ \zeta_i = \frac{c_i}{c_c} = \frac{c_i}{2m\omega_i} \end{cases} \quad (5.12)$$

Με  $\theta_i$  γωνιακή φάση και  $\zeta_i$  συντελεστής απόσβεσης.

Αντικαθιστώντας στην αρχική εξίσωση και παραλείποντας την απόσβεση, προκύπτει η φασματική εξίσωση:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = \overline{\mathbf{F}} \quad (5.13)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης επιτρέπει την εξαγωγή του πλάτους της απόκρισης  $A$ .



## 5.2 Συνοριακές Συνθήκες

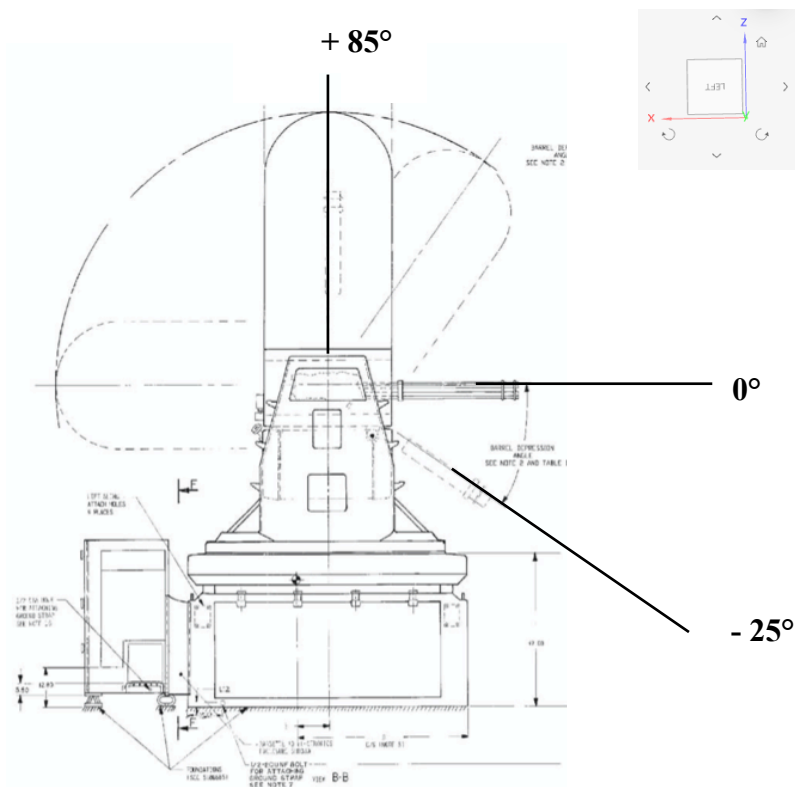
### 5.2.1 Κρουστικά φορτία κατά γωνία στόχευσης

Η λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες στηρίζεται στη δυνατότητα ταχείας εναλλαγής γωνίας στόχευσης του, τόσο σε κάθετο όσο και σε οριζόντιο επίπεδο. Οι μεταβολές της γωνίας στόχευσης επηρεάζουν τον προσανατολισμό της μάζας και την κατεύθυνση εφαρμογής των περιοδικών κρουστικών φορτίων.

Συγκεκριμένα :

- $0^\circ$  : Η θέση ισορροπίας, κατά την οποία το σύστημα στοχεύει παράλληλα προς την επιφάνεια της θάλασσας, (άξονας X).
- $-25^\circ$  : Στην χαμηλότερη γωνία στόχευσης, υπάρχει αρνητική κλίση ως προς τους άξονες XZ.
- $+85^\circ$  : Στην μέγιστη γωνία ανύψωσης, με στόχευση σχεδόν κάθετα προς τα πάνω. Ασκούνται μεγάλες κατακόρυφες δυνάμεις λόγω της σχεδόν κατακόρυφης κατεύθυνσης ανάκρουση, γωνιακή απόκλιση υπάρχει στους άξονες.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σχεδιαστικά το επιχειρησιακό εύρος γωνιών του συστήματος, όπως αυτό προκύπτει από επίσημο σχεδιάγραμμα των εξωτερικών διαστάσεων και περιοχών στόχευσης σύμφωνα με τεχνικό εγχειρίδιο [18].



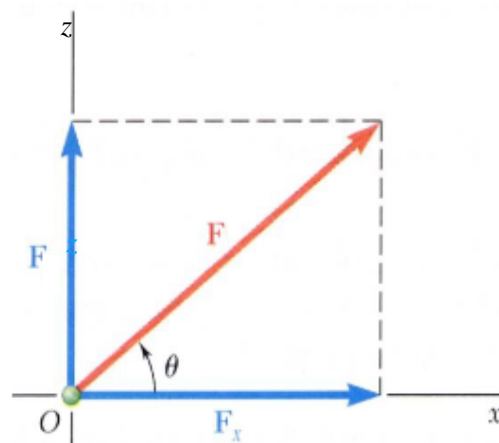
Σχήμα 5.1 : Γωνίες στόχευσης

Η εφαρμογή των κρουστικών φορτίων στο μοντελοποιημένο σύστημα γίνεται στο τέλος της κάθε μίας από τις έξι συνολικά κάνες στο σημείο πρόσδεσης με τον ρότορα, για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής της δύναμης που εφαρμόζεται στην κάθε κάννη, ελήφθησαν υπόψη τα πραγματικά κινηματικά χαρακτηριστικά του πυρομαχικού τύπου MK149 των 20 mm, με μάζα 220–225 g και ταχύτητα εξόδου περίπου 1200 m/s [13].

Σε όλες τις περιπτώσεις στόχευσης η κλίση αφορά το σύστημα συντεταγμένων XZ και εφόσον το σύστημα μελετάται στον τρισδιάστατο χώρο, τότε η συνισταμένη δύναμη κατά το άξονα Y είναι μηδενική σε όλες τις περιπτώσεις.

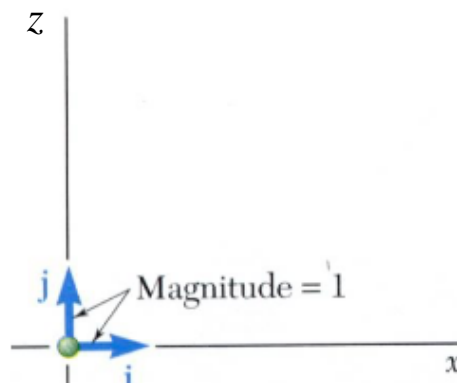
Κάθε δύναμη μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες  $\vec{F}_x, \vec{F}_z$ , που να είναι κάθετες μεταξύ τους. Οι εν λόγω συνιστώσες, ονομάζονται ορθογώνιες συνιστώσες [17]. Ισχύει φυσικά :

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_z \quad (5.5)$$



**Διάγραμμα 5.2 :** Ανάλυση δυνάμεων σε συνιστώσες

Τα διανύσματα  $\vec{i}$  και  $\vec{j}$  που είναι παράλληλα με τους άξονες x και z αντίστοιχα έχουν μέτρο 1 (μονάδα) και λέγονται μοναδιαία διανύσματα [17].



**Διάγραμμα 5.3 :** Μοναδιαία διανύσματα

Οποιοδήποτε διάνυσμα, άρα και οι ορθογώνιες συνιστώσες, μπορεί να γραφεί ως γινόμενο ενός αριθμού επί το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος της κατεύθυνσής του <sup>[17]</sup>

$$\vec{F}_x = F_x \vec{i} \quad (5.6)$$

$$\vec{F}_z = F_z \vec{j} \quad (5.7)$$

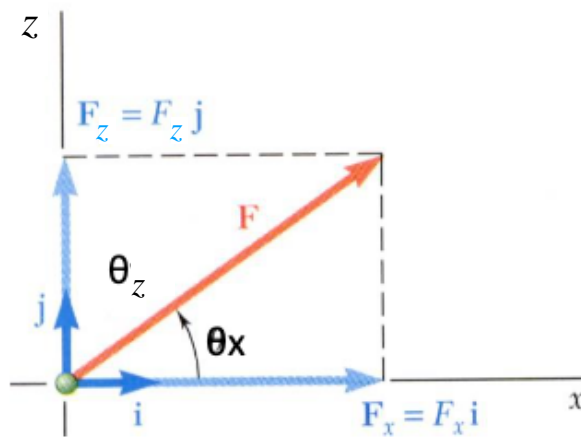
Οπότε :

$$F_x = F \cos(\theta) \quad (5.8)$$

$$F_z = F \sin(\theta) \quad (5.9)$$

Και

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_z \vec{j} \quad (5.10)$$



**Διάγραμμα 5.4 :** Μονομετρικές συνιστώσες δύναμης F

Σύμφωνα με πληροφορίες από τον κατασκευαστή (General Dynamics) <sup>[2]</sup>, η δύναμη ανάκρουσης είναι ίση με 2133 lbf ( $\approx 9,48$  kN) για ρυθμό πυροδότησης 4000 βολών/λεπτό (SPM), και 3200 lbf ( $\approx 14,23$  kN) για 6000 SPM. Η δύναμη αυτή αντιπροσωπεύει μέση δύναμη που δρα στο σύστημα κατά τη διάρκεια συνεχούς πυροδότησης. Δεδομένου ότι εξετάζονται δύο σενάρια λειτουργίας του συστήματος στις 3000 και 4500 SPM, εφαρμόστηκε αναλογική γραμμική προσαρμογή στις τιμές του κατασκευαστή για να εκτιμηθεί η αντίστοιχη μέση δύναμη ανάκρουσης.

Συγκεκριμένα, για 3000 SPM η δύναμη υπολογίστηκε ως :

$$F_{3000} = 9,48 \frac{3000}{4000} = 7,11 \text{ kN}$$

Αντίστοιχα για 4500 SPM :

$$F_{4500} = 14,23 \frac{4500}{6000} = 10,67 \text{ kN}$$

Για κάθε γωνία βολής  $\theta$ , η συνολική δύναμη ανάκρουσης  $\vec{F}$  αναλύεται στις κατευθύνσεις x και z σύμφωνα με τις (5.8), (5.9) και (5.10). Το μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης  $\vec{u}$  για κάθε γωνία στόχευσης :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Επομένως, για γωνία στόχευσης  $0^\circ$  :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(0) \\ \cos(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Αντίστοιχα, για γωνία στόχευσης  $-25^\circ$  :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(-25) \\ \cos(-25) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0,423 \\ 0,906 \end{bmatrix}$$

Τέλος, για γωνία στόχευσης  $+85^\circ$  :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(85) \\ \cos(85) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,996 \\ 0,087 \end{bmatrix}$$

Στους παρακάτω πίνακες (5.1) και (5.2), συγκεντρωτικά οι τιμές των δυνάμεων

Γωνία στόχευσης $\theta$	$\cos(\theta)$	$\sin(\theta)$	$F_x (N)$	$F_z (N)$
$0^\circ$	1	0	7.110	0
$-25^\circ$	0,906	-0,423	6.441,66	-3.007,53
$+85^\circ$	0,087	0,996	618,57	7.081,56

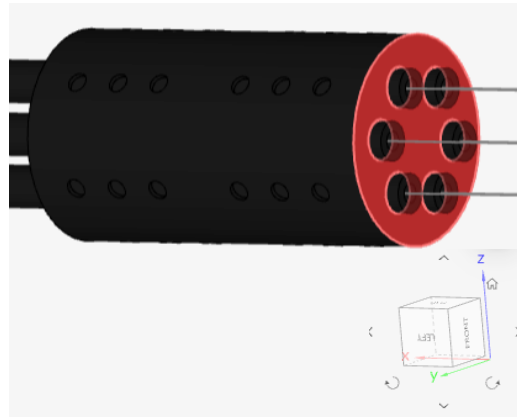
**Πίνακας 5.1 :** Μέτρο δύναμης ανάκρουσης, ρυθμός βολής 3000 SPM

Γωνία στόχευσης $\theta$	$\cos(\theta)$	$\sin(\theta)$	$F_x (N)$	$F_z (N)$
$0^\circ$	1	0	10.670	0
$-25^\circ$	0,906	-0,423	9.667,02	-4.513,41
$+85^\circ$	0,087	0,996	928,29	10.627,32

**Πίνακας 5.2 :** Μέτρο δύναμης ανάκρουσης, ρυθμός βολής 4500 SPM

### 5.3 Αρμονική απόκριση σφιγκτήρα ρύγχους (3000 SPM)

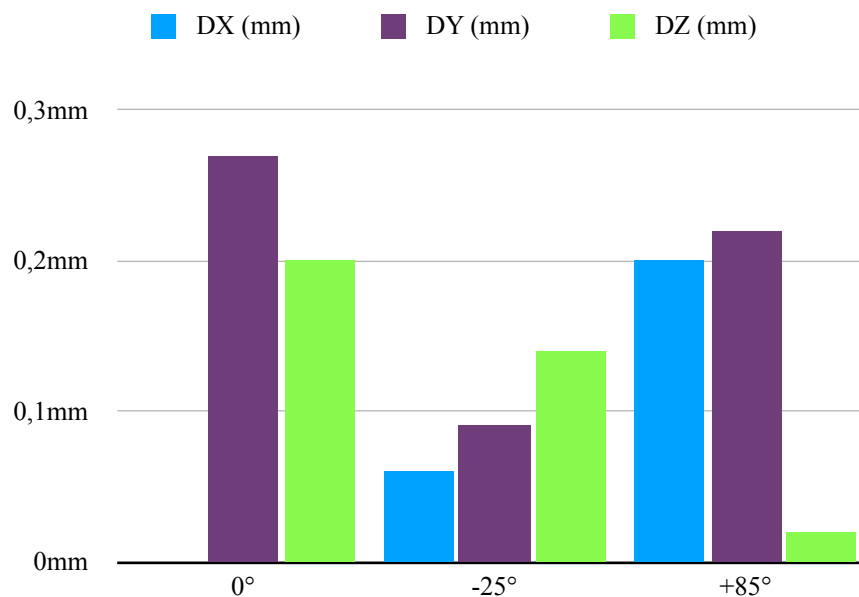
Για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, ως σημείο αναφοράς ορίστηκε το κέντρο του σφιγκτήρα ρύγχους. Καταγράφηκαν οι μέγιστες μετατοπίσεις στους τρεις άξονες (X, Y, Z), για τρεις διαφορετικές γωνίες στόχευσης:  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $+85^\circ$  για διάστημα συχνοτήτων 40 - 60 Hz. Η γωνία στόχευσης  $+85^\circ$  εμφανίζει τις μεγαλύτερες εκτροπές.



**Σχήμα 5.2 :** Σφιγκτήρας ρύγχους ως σημείο αναφοράς εκτροπών

Γωνία στόχευσης	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
$0^\circ$	$\sim 0$	0,27	0,2
$-25^\circ$	0,06	0,09	0,14
$+85^\circ$	0,20	0,22	0,02

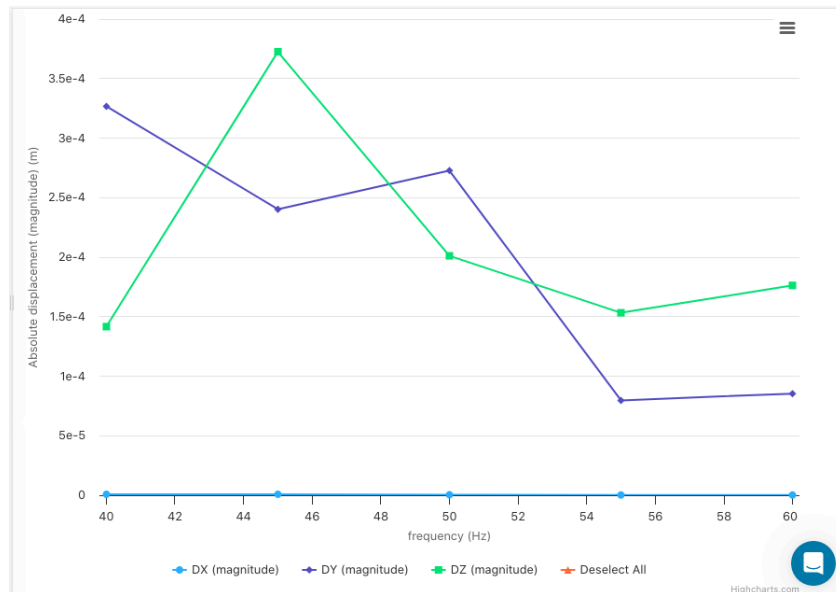
**Πίνακας 5.3 :** Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συχνότητα διέγερσης 50 Hz



**Διάγραμμα 5.5 :**

Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz

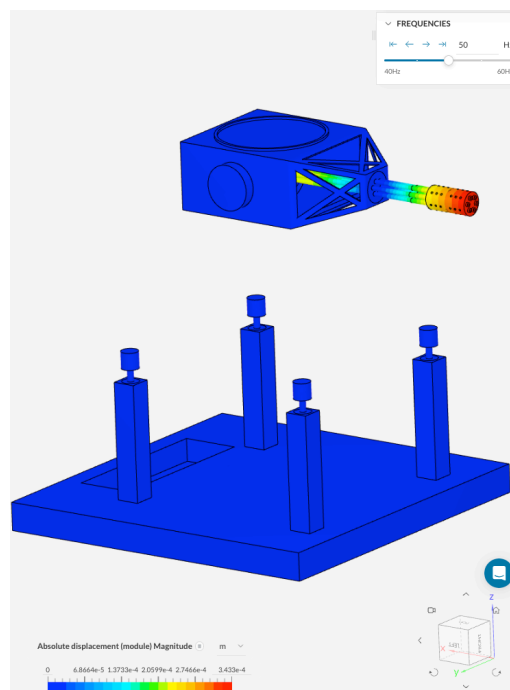
### 5.3.1 Γωνία στόχευσης $0^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 5.6 :**

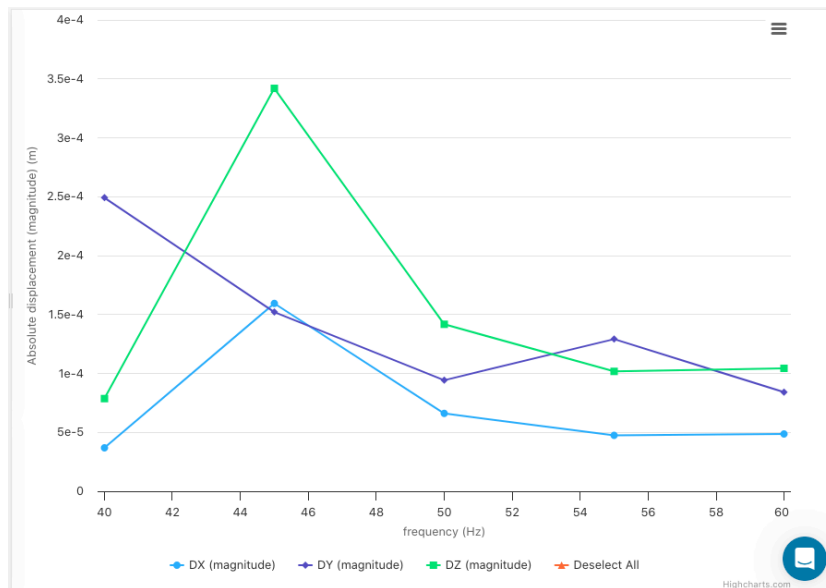
Γωνία στόχευσης  $0^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Οι κύριες μετατοπίσεις καταγράφονται στον άξονα Z, με μέγιστο 0,37 mm στα 45 Hz. Στην συχνότητα των 50 Hz η μέγιστη εκτροπή σημειώνεται στον άξονα Y περίπου 0,27 mm ακολουθεί η εκτροπή 0,20 mm στον άξονα Z η μετατόπιση στον άξονα X είναι αμελητέα.



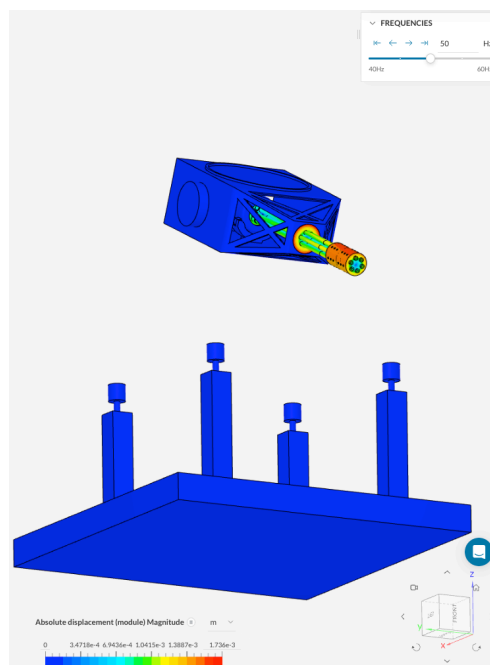
**Σχήμα 5.3 :** Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

### 5.3.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



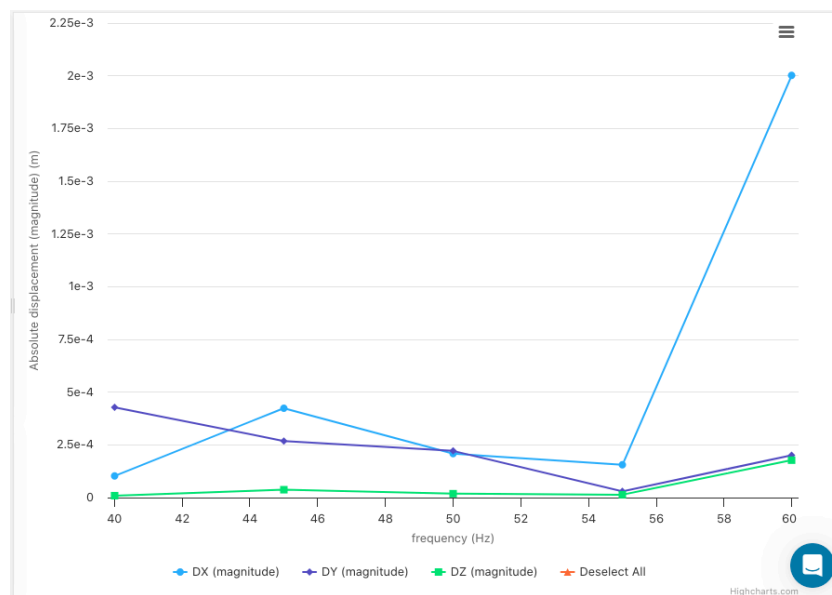
**Διάγραμμα 5.7 :** Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται πάλι στον άξονα Z ( $\sim 0.34$  mm) στα 45 Hz. Στην συχνότητα των 50 Hz η μέγιστη εκτροπή σημειώνεται στον άξονα Z περίπου 0,14 mm, ακολουθεί εκτροπή 0,09 mm στον άξονα Y και 0,06 mm στον άξονα X.



**Σχήμα 5.4 :** Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$

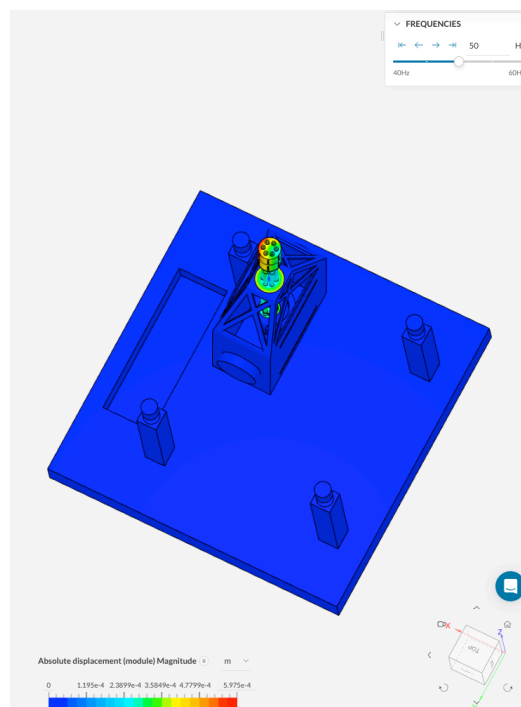
### 5.3.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 5.8 :**

Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Στην κατακόρυφη στόχευση, οι εκτροπές κατά την κατεύθυνση του άξονα X κυριαρχούν, με εκτροπή 2 mm στα 60 Hz. Στην συχνότητα των 50 Hz, οι εκτροπές κατά τον άξονα X και Y είναι ίσες περίπου 0,2 mm, η εκτροπή στον άξονα Z είναι σχεδόν μηδενική.



**Σχήμα 5.5 :** Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης +85°

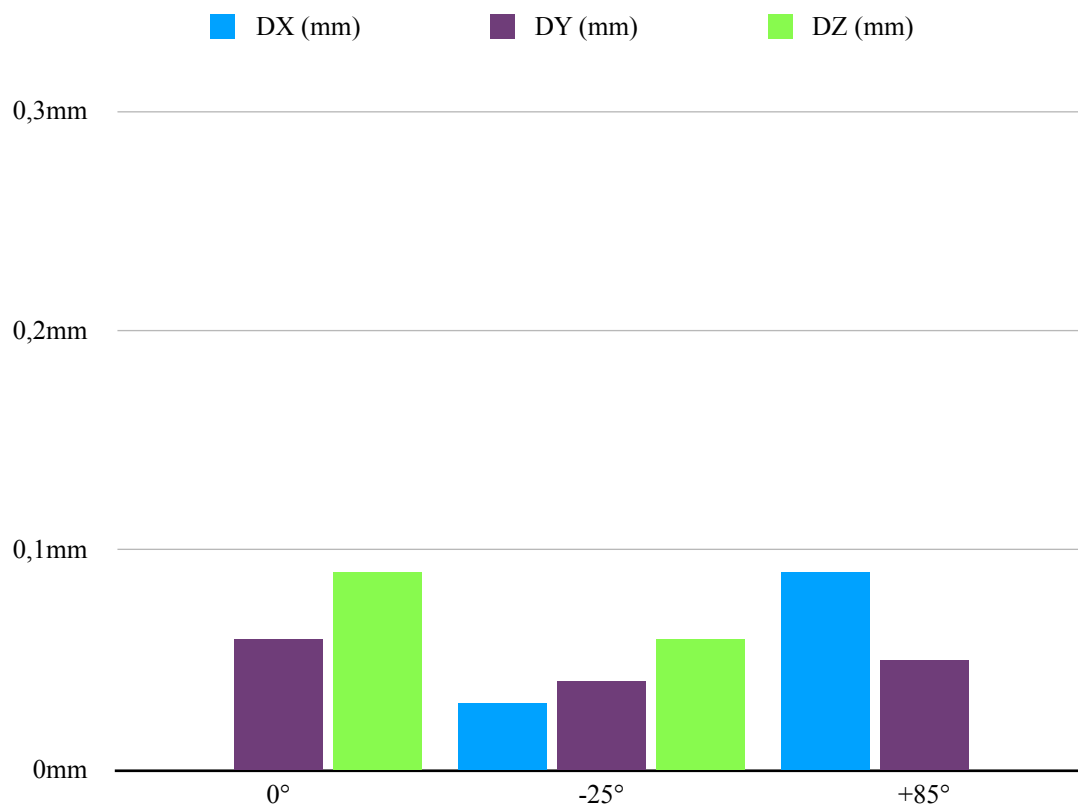


#### 5.4 Αρμονική απόκριση σφικτήρα ρύγχους (4500 SPM)

Το Διάγραμμα 5.8 συνοψίζει τις εκτροπές του σφικτήρα ρύγχους στις τρεις κύριες κατευθύνσεις (X, Y, Z) για γωνίες στόχευσης  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$  και  $+85^\circ$ , υπό συνθήκες περιοδικής διέγερσης σε ρυθμό πυροδότησης 4500 SPM. Συνολικά, τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι οι στοχεύσεις στις γωνίες  $0$  και  $+85^\circ$  έχουν παρόμοια συμπεριφορά υψηλών εκτροπών.

Γωνία στόχευσης	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
$0^\circ$	$\sim 0$	0,06	0,09
$-25^\circ$	0,03	0,04	0,06
$+85^\circ$	0,09	0,05	$\sim 0$

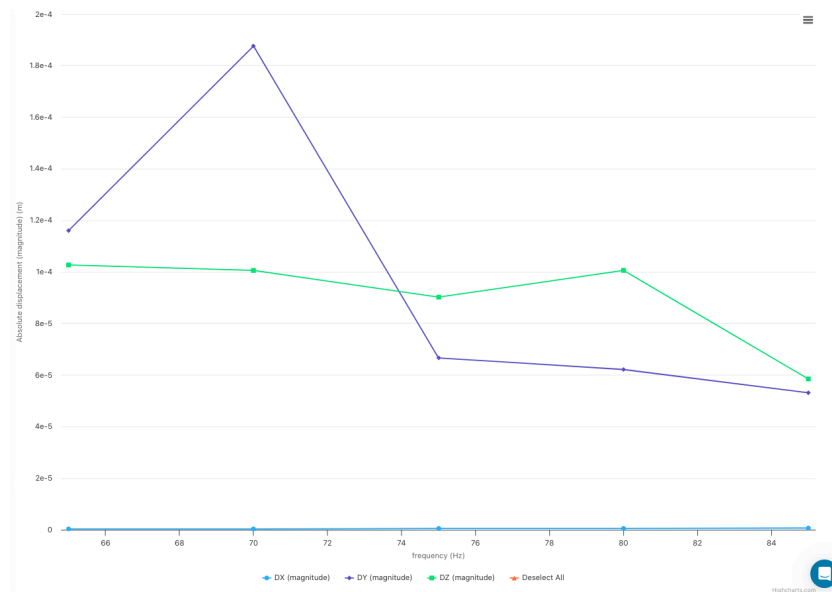
**Πίνακας 5.4 :** Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συχνότητα διέγερσης 75 Hz



**Διάγραμμα 5.9 :**

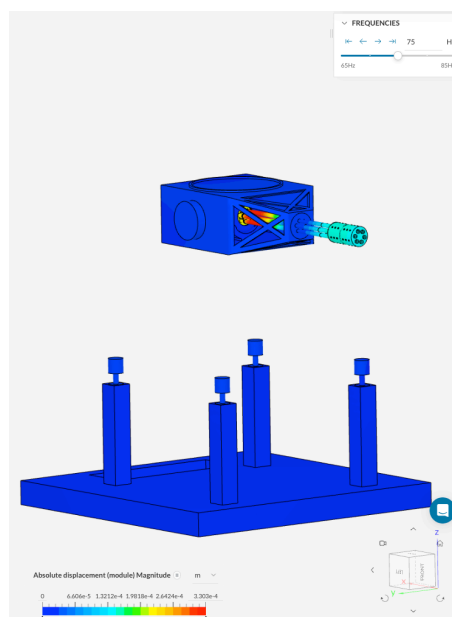
Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz

#### 5.4.1 Γωνία στόχευσης $0^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



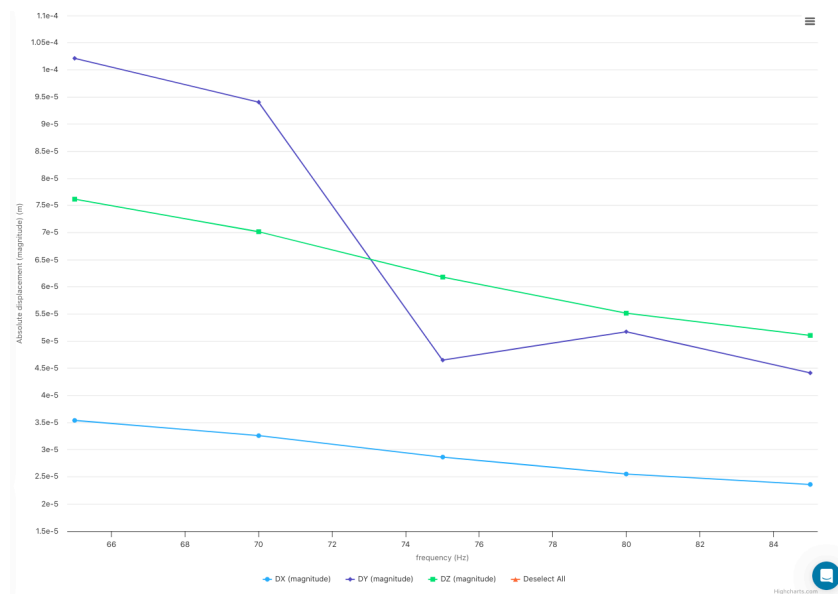
**Διάγραμμα 5.10 :** Γωνία στόχευσης  $0^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Y εμφανίζει τοπικό μέγιστο στα 70 Hz, φτάνοντας περίπου τα 0,85 mm. Στην συχνότητα των 75 Hz, μεγαλύτερη εκτροπή παρατηρείται κατά τον άξονα Z 0,09 mm, η εκτροπή στον άξονα Y είναι 0,06 mm, η εκτροπή στον άξονα X είναι σχεδόν μηδενική.



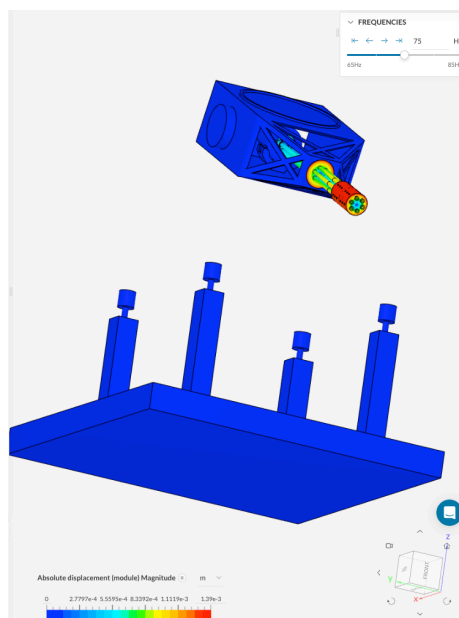
**Σχήμα 5.6 :** Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

#### 5.4.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



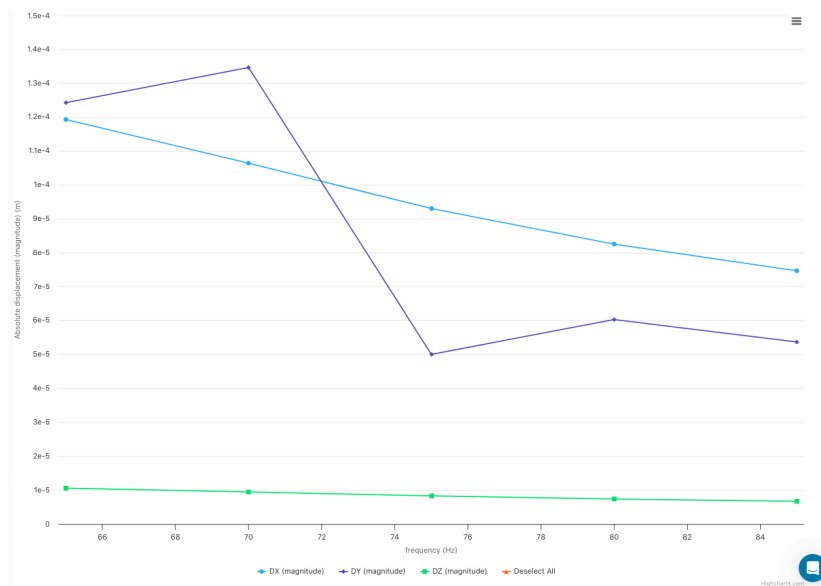
**Διάγραμμα 5.11 :** Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

Η μέγιστη εκτροπή παρατηρείται στον άξονα Y περίπου 0,105 mm στη χαμηλότερη συχνότητα των 65 Hz. Στην συχνότητα των 75 Hz, μεγαλύτερη εκτροπή παρατηρείται κατά τον άξονα Y 0,04 mm, η εκτροπή στον άξονα Z είναι 0,06 mm, η εκτροπή στον άξονα X είναι 0,03 mm.



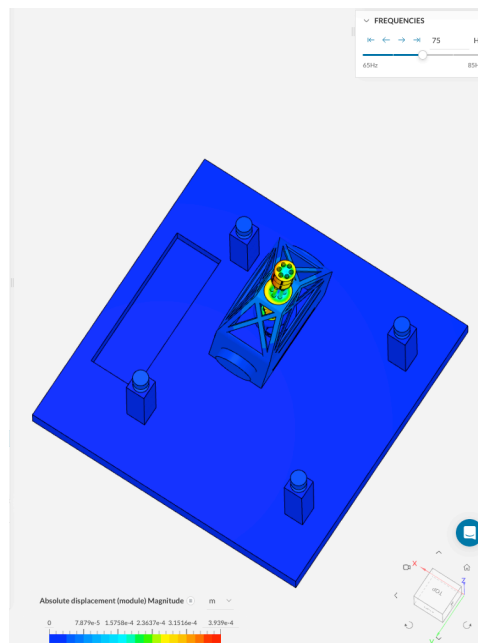
**Σχήμα 5.7 :** Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$

### 5.4.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 5.12 :** Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

Η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στον άξονα Y, φτάνοντας τα 0,135 mm στα 70 Hz, με φθίνουσα τάση στη συνέχεια. Στην συχνότητα των 75 Hz, μεγαλύτερη εκτροπή παρατηρείται κατά τον άξονα Y 0,05 mm, η εκτροπή στον άξονα X είναι 0,09 mm, η εκτροπή στον άξονα Z είναι αμελητέα.

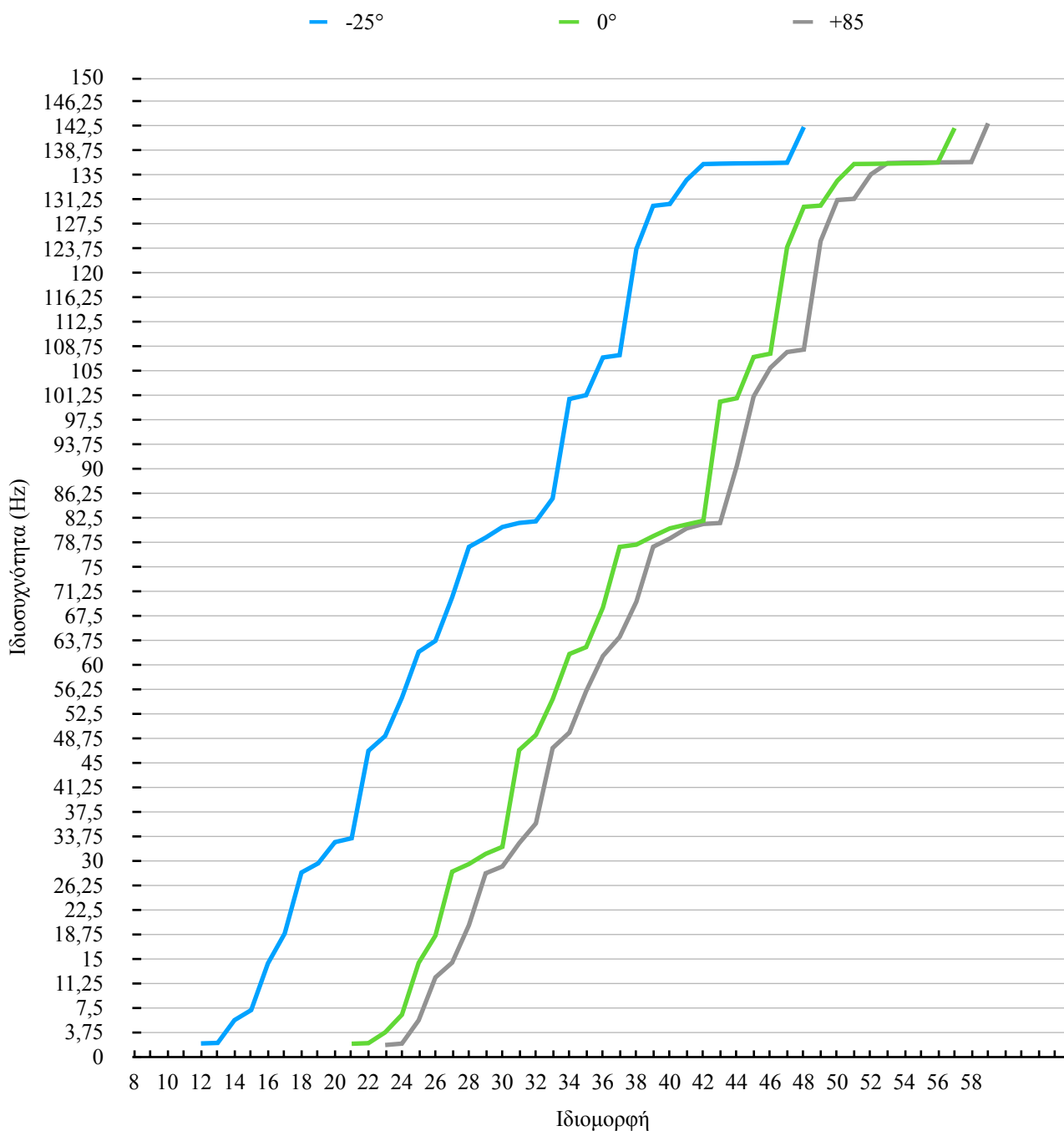


**Σχήμα 5.8 :** Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης +85°

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

### 6.1 Σημεία παρέμβασης

Για τον μετριασμό της διασποράς σχεδιάστηκε ένα βελτιωμένο μοντέλο του συστήματος στήριξης, με κύρια τροποποίηση τη γεωμετρία του ρύγχους συγκράτησης. Συγκεκριμένα, η αρχική μορφή του ρύγχους ανασχεδιάστηκε ώστε να αυξηθεί η ακαμψία του χωρίς σημαντική αύξηση της μάζας.



Διάγραμμα 6.1 :

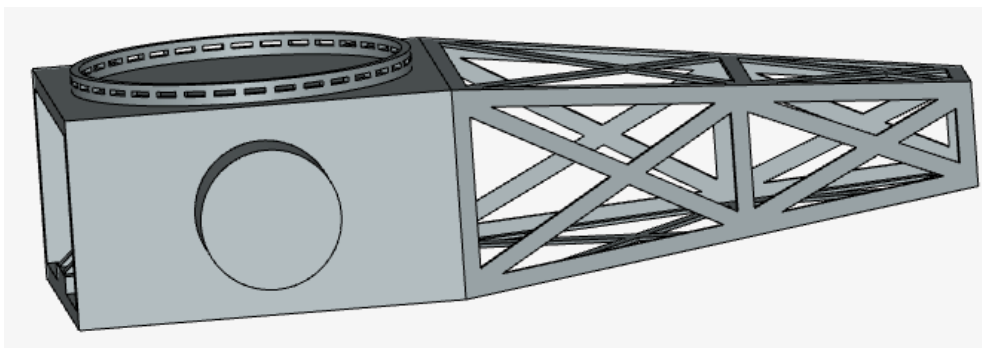
Βελτιωμένο μοντέλο. Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων

## 6.2 Μοντελοποιημένη γεωμετρία ρύγχους συγκράτησης

Το ρύγχος συγκράτησης αποτελεί κρίσιμο τμήμα του υποσυστήματος στόχευσης, καθώς μέσω αυτού μεταφέρονται οι δυνάμεις προς τα ρουλεμάν και, τελικώς, στη βάση στήριξης. Η αρχική του διαμόρφωση (Κεφάλαιο 2, υποπαράγραφος 2.2.1, εικόνα 2.11) περιλάμβανε απλή ενίσχυση με εγκάρσια και διαγώνια στοιχεία.

Ανασχεδιάστηκε το ρύγχος, με ενίσχυση των πλαϊνών τοιχωμάτων και εισαγωγή πρόσθετων δικτυωτών στοιχείων σε συμμετρική διάταξη. Το βελτιωμένο ρύγχος παρουσίασε ελαφρώς αυξημένο όγκο ( $0.2574 \text{ m}^3$  έναντι  $0.2501 \text{ m}^3$ ), με αντίστοιχη μεταβολή στη κατανομή μάζας, αλλά και σημαντικά υψηλότερη δομική σταθερότητα στο πρόσθιο τμήμα.

Η γεωμετρία σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου από χάλυβα με γραμμικές ελαστικές ιδιότητες όπως και το αρχικό ρύγχος.



**Σχήμα 6.1 :** Ενισχυμένο ρύγχος συγκράτησης

## 6.3 Ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες βελτιωμένου μοντέλου

Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.1, το βελτιωμένο μοντέλο του ρύγχους συγκράτησης επιφέρει αισθητή μετατόπιση των ιδιοσυχνοτήτων προς υψηλότερες τιμές για όλες τις γωνίες στόχευσης. Η μετατόπιση αυτή αποτελεί ένδειξη αυξημένης ακαμψίας και δομικής σταθερότητας, ιδιαίτερα στις κρίσιμες περιοχές της κάννης.

Συνολικά, η ενίσχυση της δομής του ρύγχους συνέβαλε στον περιορισμό των χαμηλών ιδιοσυχνοτήτων, αυξάνοντας την ενεργή μάζα των ιδιομορφών και μετατοπίζοντας τις κρίσιμες καταστάσεις εκτός της ζώνης διέγερσης. Το αποτέλεσμα αυτό προσδίδει στο σύστημα αυξημένη ικανότητα περιορισμού διασποράς, αυξάνοντας την επιχειρησιακή ακρίβεια και σταθερότητα του όπλου σε όλες τις γωνίες λειτουργίας.

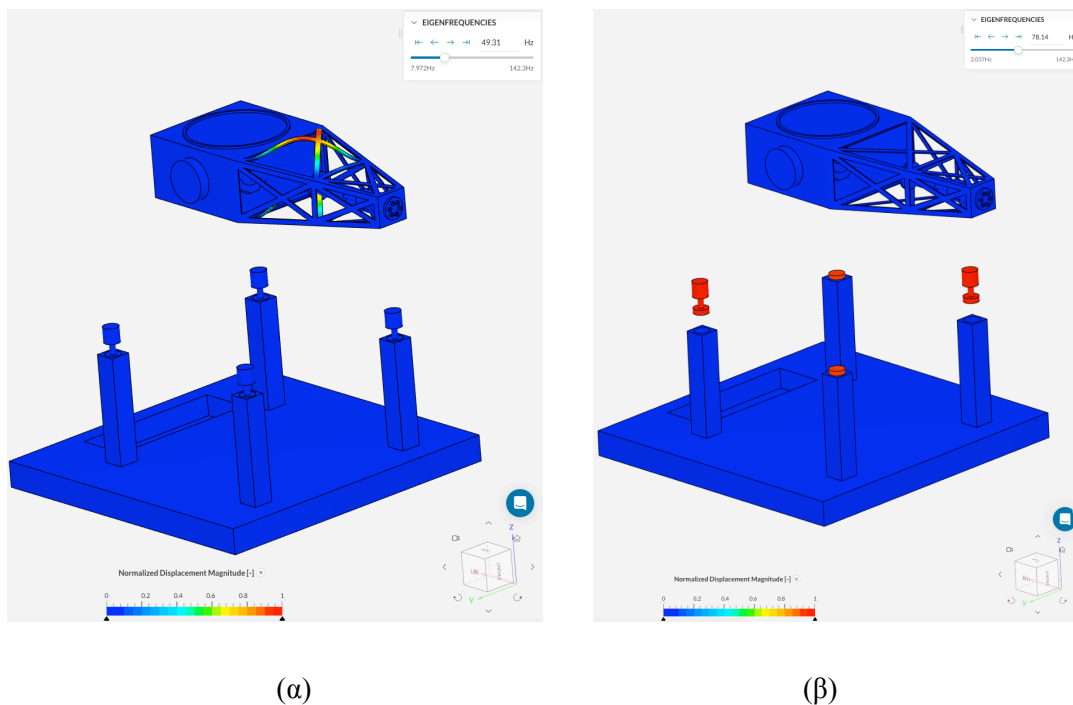
Η γωνία στόχευσης  $+85^\circ$  εξακολουθεί να είναι η δομικά σταθερότερη. Στο νέο μοντέλο η ιδιοσυχνοτική συμπεριφορά της γωνία στόχευσης  $0^\circ$ , τείνει να εξομοιώνεται με την γωνία  $+85^\circ$ . Η γωνία στόχευσης  $-25^\circ$  εξακολουθεί να είναι η περισσότερο ασταθής συγκριτικά με τις προηγούμενες και στο βελτιωμένο μοντέλο.

### 6.3.1 Γωνία στόχευσης 0°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
31	47,0	37	78,1
32	49,3	38	78,5
33	54,8	39	79,8
34	61,7	40	81,0
35	62,8	41	81,6
36	68,8	42	82,1

**Πίνακας 6.1 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης 0°, ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες



**Σχήμα 6.2 :** Βελτιωμένο μοντέλο

Ιδιομορφή 32 - ιδιοσυχνότητα 49,3 Hz (α), ιδιομορφή 37 - ιδιοσυχνότητα 78,1 Hz (β)

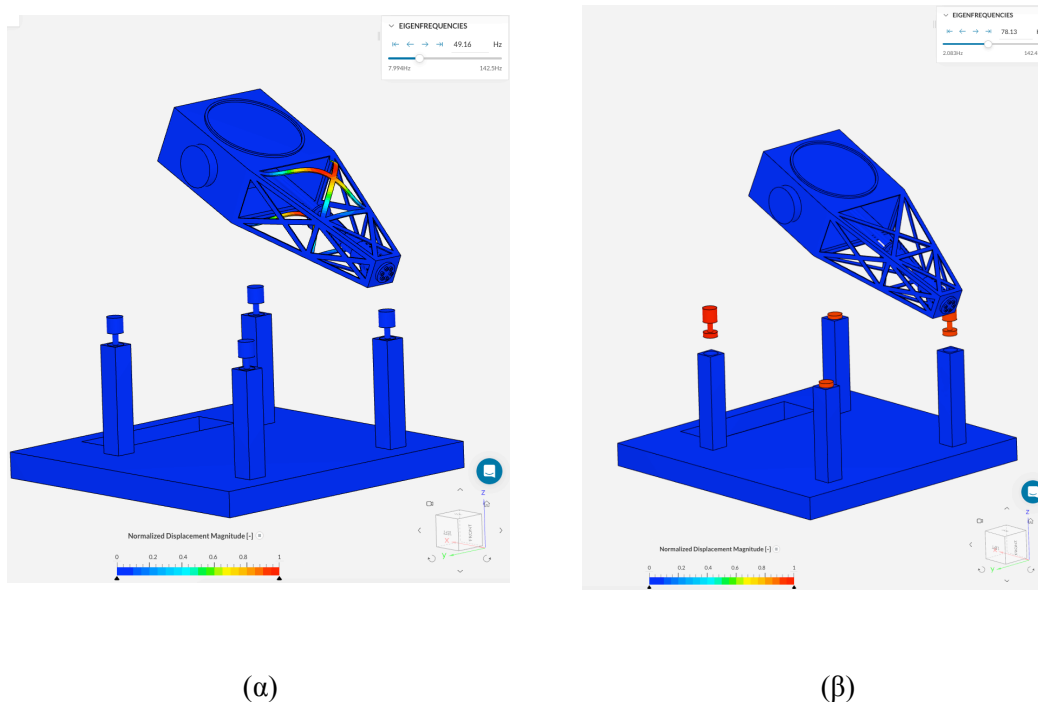
Η ιδιομορφή 32 (49,31 Hz) παρουσιάζει εντοπισμένη μορφή παραμόρφωσης στο ρύγχος συγκράτησης, με λύγισή του προς τα πάνω χωρίς να εμπλέκονται οι κάννες, γεγονός που υποδεικνύει περιορισμένη συμβολή στη διασπορά. Η ιδιομορφή 37 (78,1 Hz) εμφανίζει έντονη απόκριση κυρίως στο σύστημα απόσβεσης κραδασμών και λιγότερο στα σημεία κάθε κάννης. Και στις δύο ιδιομορφές ο δείκτης MEM εμφανίζει χαμηλές τιμές. (MEM-X = 34,687 kg, MEM-Y = 0,008 kg, MEM-Z = 35,51 kg) και (MEM-X = 0 kg, MEM-Y = 0 kg, MEM-Z = 0,11 kg) αντίστοιχα.

### 6.3.2 Γωνία στόχευσης -25°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφή.	Ιδιοσυχνότητες (Hz)	Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
22	46,9	28	78,1
23	49,2	29	79,6
24	55,0	30	81,2
25	62,1	31	81,8
26	63,7	32	82,1
27	70,4	33	85,6

**Πίνακας 6.2 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης -25°, ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες



(α)

(β)

**Σχήμα 6.3 :** Βελτιωμένο μοντέλο

Ιδιομορφή 23 - ιδιοσυχνότητα 49,2 Hz (α), ιδιομορφή 28 - ιδιοσυχνότητα Hz 78,13 (β)

Η ιδιομορφή 23 με ιδιοσυχνότητα 49,2 Hz εμφανίζει παραμόρφωση στο ενδιάμεσο τμήμα του ρύγχους, στη ζώνη κοντά στα 50 Hz, χωρίς να χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη. Η ιδιομορφή 268 με ιδιοσυχνότητα 78,1 Hz εμφανίζει έντονη απόκριση στο σύστημα απόσβεσης κραδασμών και λιγότερο στα σημεία κάθε κάννης που βρίσκονται κοντά στο στροφέιο. Και στις δύο ιδιομορφές ο δείκτης MEM εμφανίζει χαμηλές τιμές. (MEM-X = 64,51 kg, MEM-Y = 0,006 kg, MEM-Z = 11,42 kg) και (MEM-X = 0 kg, MEM-Y = 0 kg, MEM-Z = 0,007 kg) αντίστοιχα.

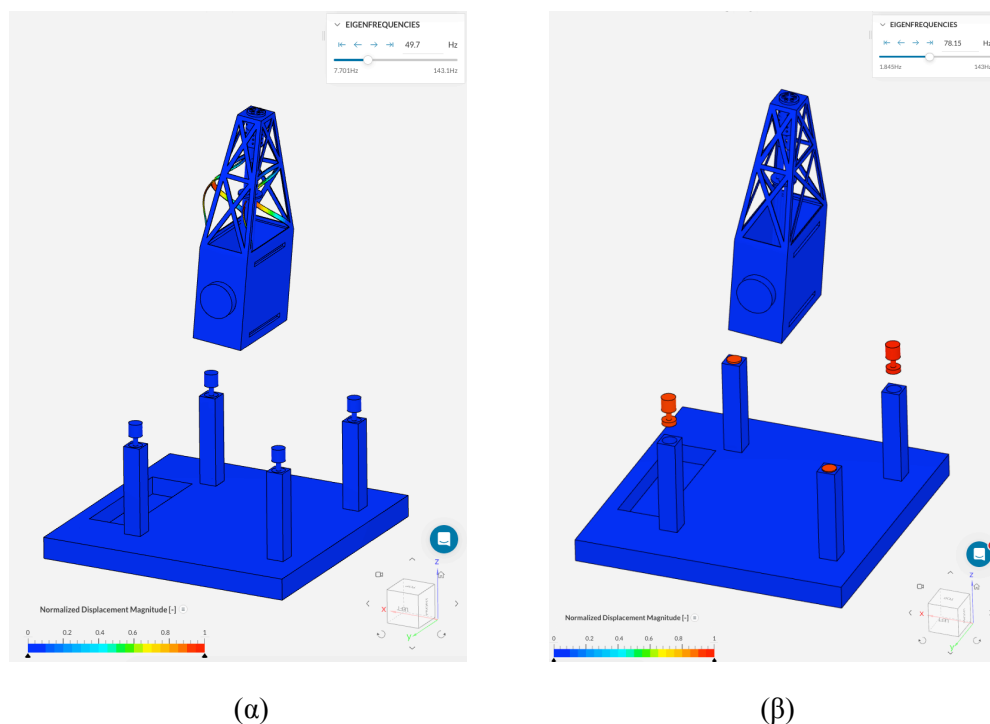


### 6.3.3 Γωνία στόχευσης +85°, ιδιομορφές - ιδιοσυχνότητες

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
33	47,3	39	78,2
34	49,7	40	79,4
35	56,0	41	81,0
36	61,4	42	81,6
37	64,3	43	81,8
38	69,7		

**Πίνακας 6.3 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης +85°, ιδιομορφές , ιδιοσυχνότητες



**Σχήμα 6.4 :** Βελτιωμένο μοντέλο

Ιδιομορφή 34 - ιδιοσυχνότητα 49,7 Hz (α), ιδιομορφή 39 - ιδιοσυχνότητα 78,2 Hz (β)

Η ιδιομορφή 34 με ιδιοσυχνότητα 49,7 Hz εμφανίζει παραμόρφωση στο ενδιάμεσο τμήμα του ρύγχους, στη ζώνη κοντά στα 50 Hz, χωρίς να χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη. Η ιδιομορφή 37 με ιδιοσυχνότητα 78,2 Hz εμφανίζει έντονη απόκριση στο σύστημα απόσβεσης κραδασμών και λιγότερο στα σημεία κάθε κάννης που βρίσκονται κοντά στο στροφείο. Και στις δύο ιδιομορφές ο δείκτης MEM εμφανίζει χαμηλές τιμές. (MEM-X = 49,14 kg, MEM-Y = 0,01 kg, MEM-Z = 20,46 kg) και (MEM-X = 0 kg, MEM-Y = 0 kg, MEM-Z = 0,06 kg) αντίστοιχα.

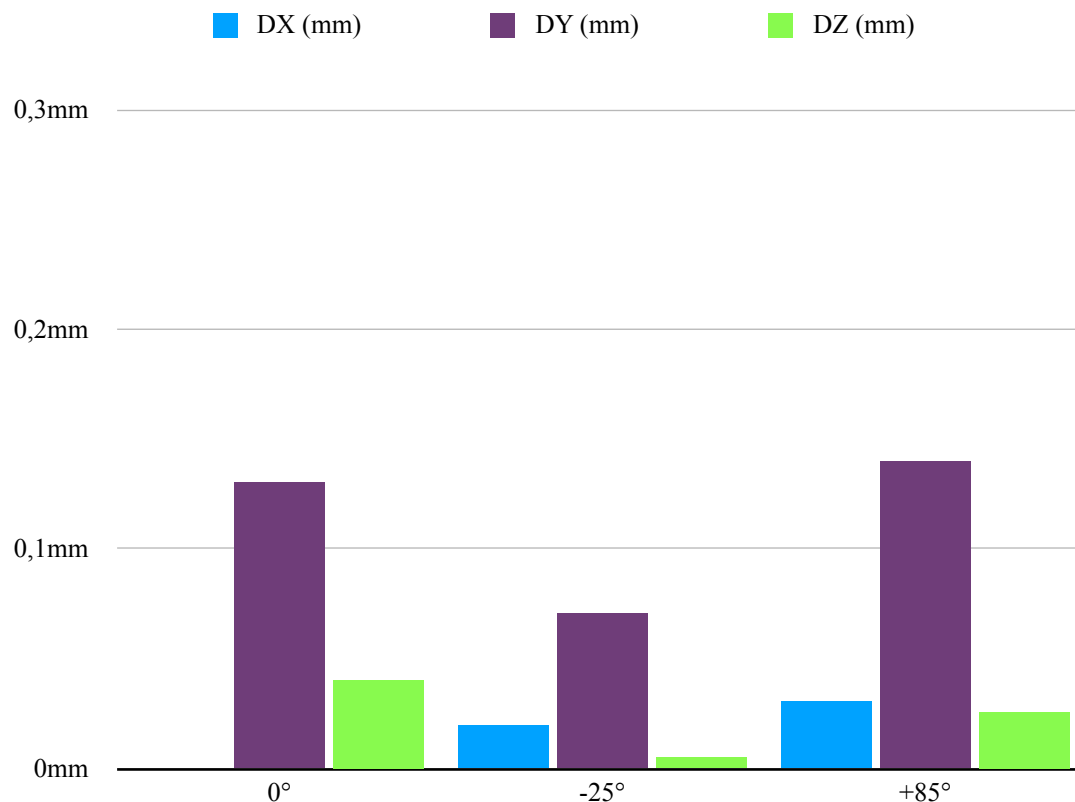
#### 6.4 Αρμονική απόκριση βελτιωμένου μοντέλου (3000 SPM)

Το Διάγραμμα 6.1 συνοψίζει τις εκτροπές του σφαιγκτήρα ρύγχους στις τρεις κύριες κατευθύνσεις (X, Y, Z) για γωνίες στόχευσης  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$  και  $+85^\circ$ , υπό συνθήκες περιοδικής διέγερσης σε ρυθμό πυροδότησης 3000 SPM. Η γωνία  $+85^\circ$  εμφανίζει τις μεγαλύτερες εκτροπές.

Γωνία στόχευσης	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
$0^\circ$	$\sim 0$	0,13	0,04
$-25^\circ$	0,02	0,07	0,005
$+85^\circ$	0,03	0,14	0,026

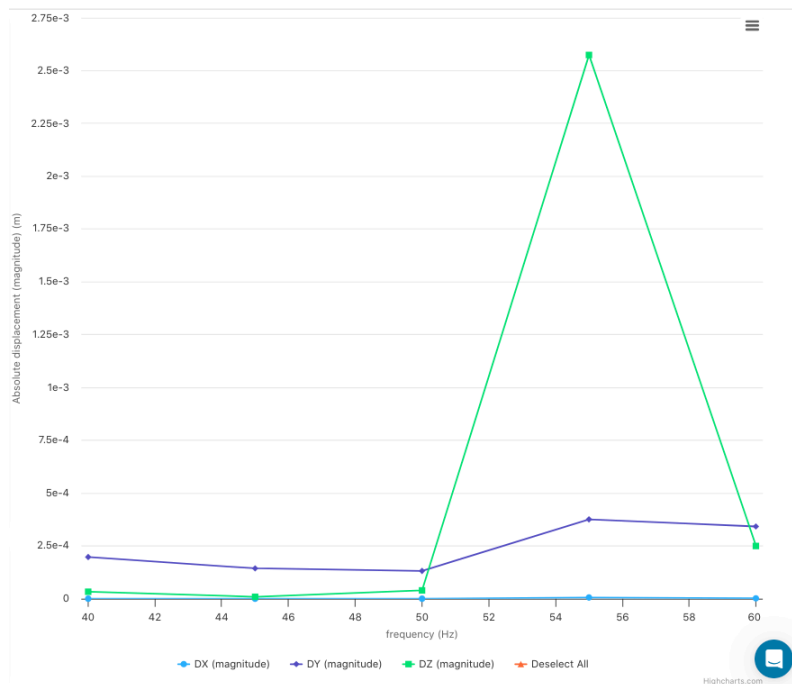
**Πίνακας 6.4 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συχνότητα διέγερσης 50 Hz



**Διάγραμμα 6.2 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz

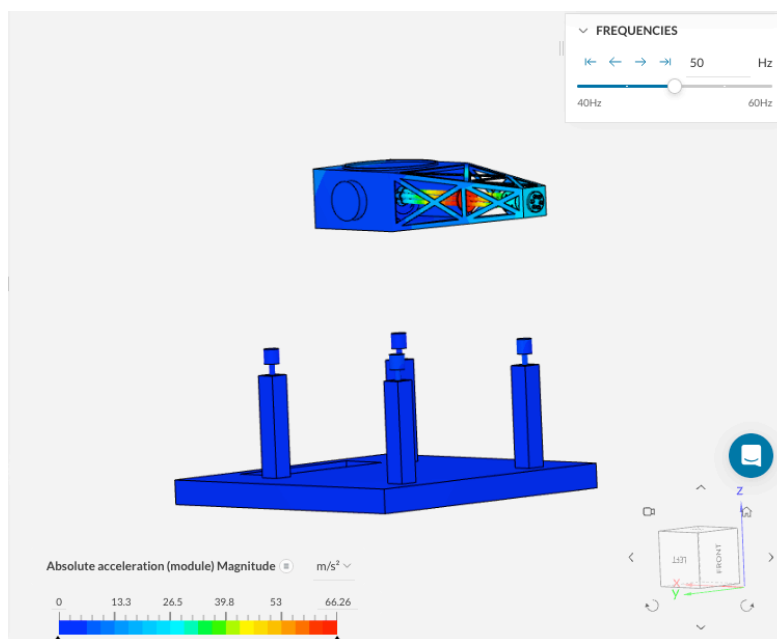
#### 6.4.1 Γωνία στόχευσης $0^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 6.3 :**

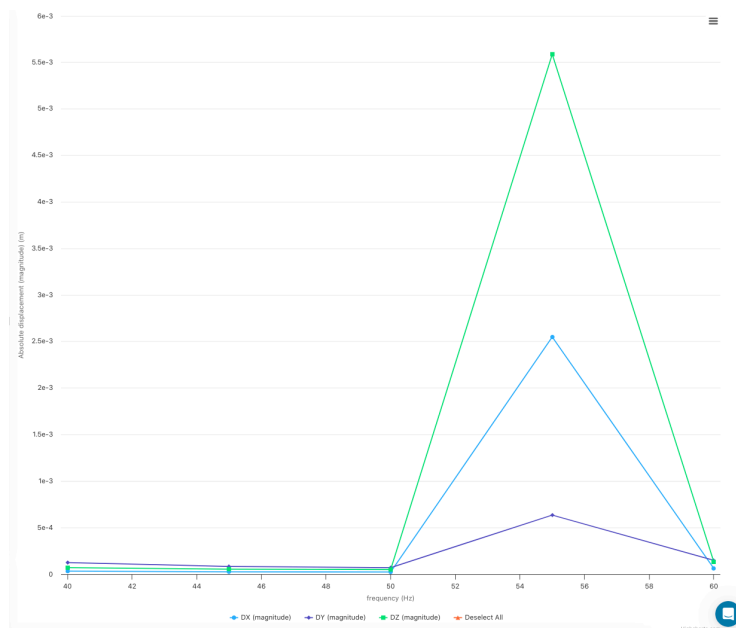
Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης  $0^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Z εμφανίζει μέγιστο στα 55 Hz, φτάνοντας περίπου τα 2,5 mm. Στην ίδια συχνότητα εμφανίζεται μέγιστη εκτροπή και στον άξονα Y (0,3mm). Στην συχνότητα των 50 Hz, οι εκτροπές στον άξονες Y και Z είναι 0,13 mm και 0,04 mm αντίστοιχα. Η εκτροπή στον άξονα X είναι αμελητέα σε όλο το εύρος συχνοτήτων.



**Σχήμα 6.5 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

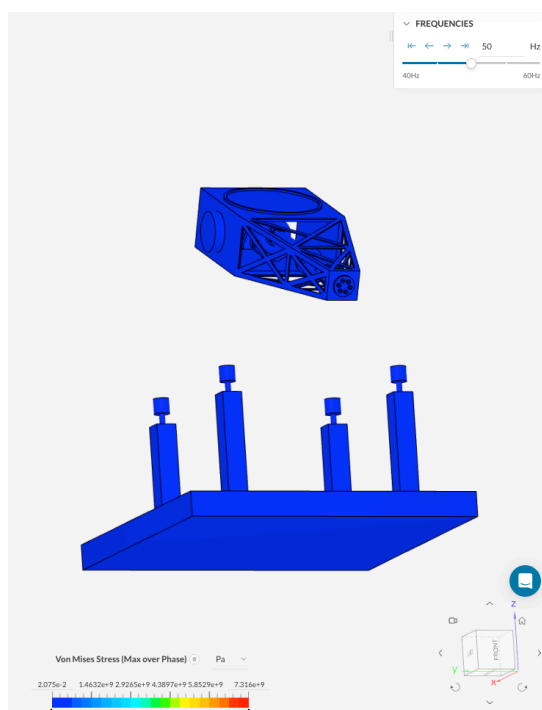
#### 6.4.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 6.4 :**

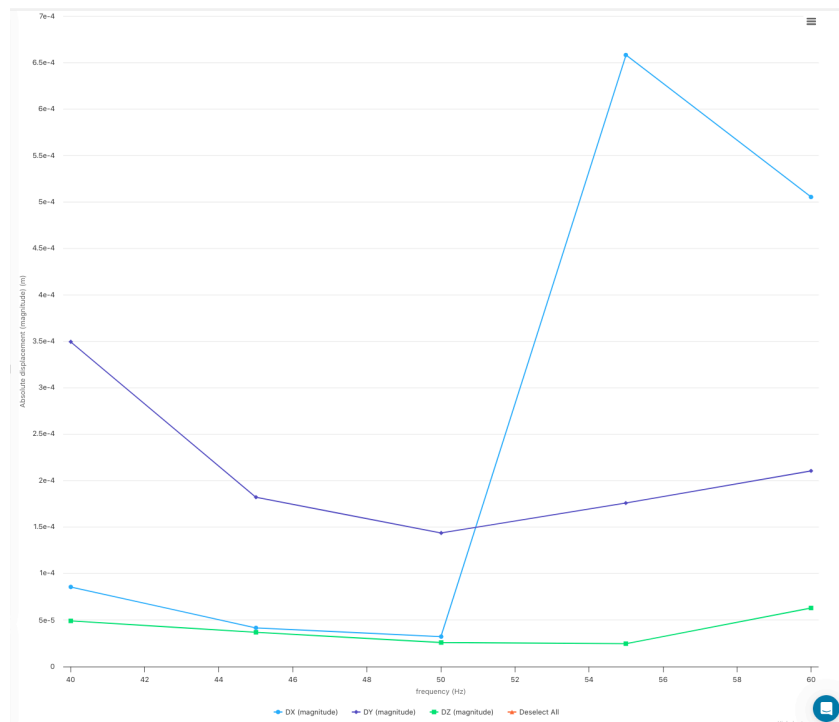
Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Y εμφανίζει τοπικό μέγιστο στα 55 Hz, φτάνοντας περίπου τα 0,63 mm. Στην συχνότητα των 50 Hz, οι εκτροπές στους άξονες X,Y,Z είναι 0,02 mm , 0,07 mm και 0,005 mm αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.6 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$

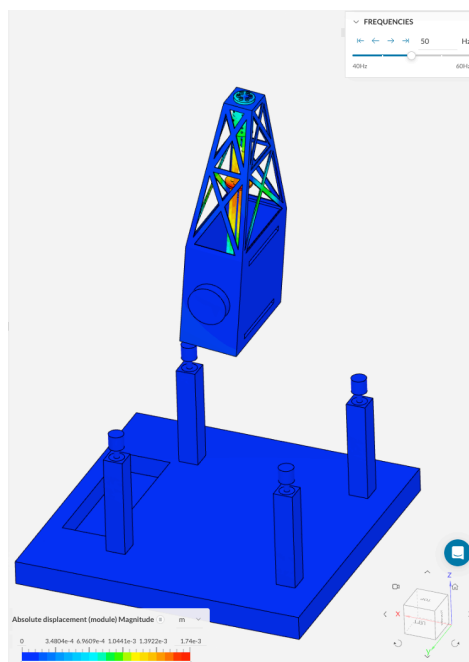
### 6.4.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 6.5 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης +85°. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 40 - 60 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση X εμφανίζει μέγιστο στα 55 Hz, φτάνοντας περίπου τα 0,65 mm. Στην συχνότητα των 50 Hz, οι εκτροπές στους άξονες X,Y,Z είναι 0,03 mm , 0,14 mm και 0,026 mm αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.7 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 50 Hz, γωνία στόχευσης +85°

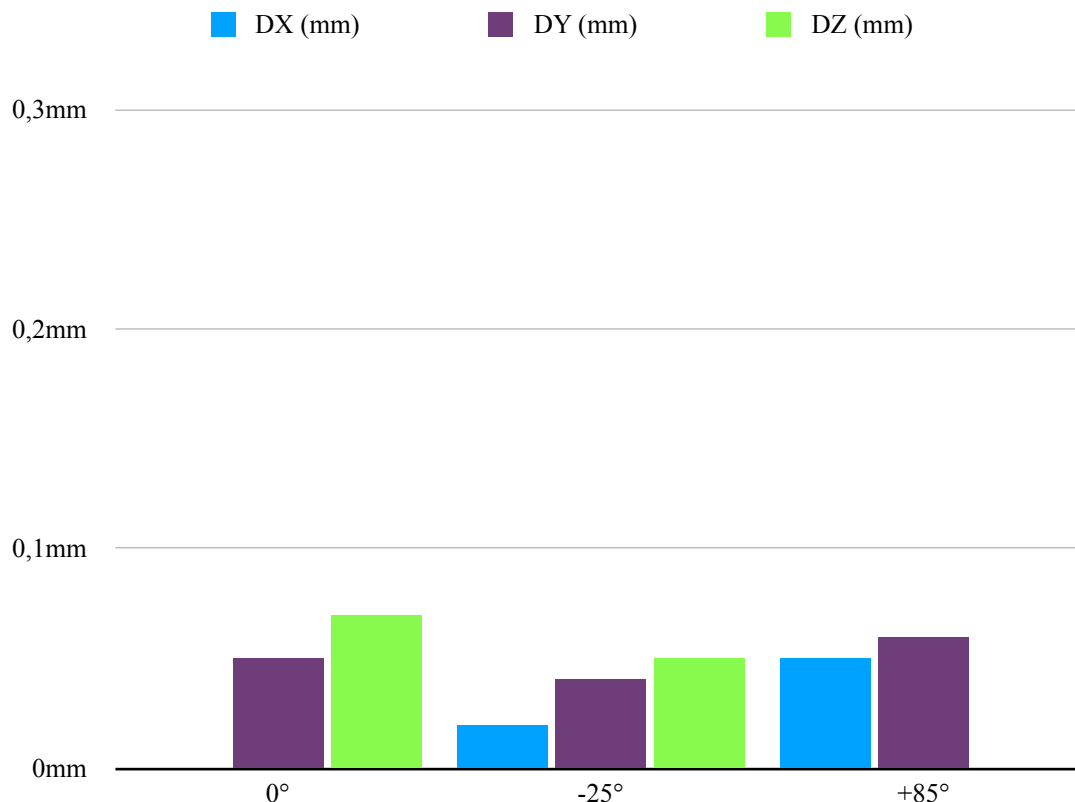
### 6.5 Αρμονική απόκριση βελτιωμένου μοντέλου (4500 SPM)

Το Διάγραμμα 6.2 συνοψίζει τις εκτροπές του σφικκτήρα ρύγχους στις τρεις κύριες κατευθύνσεις (X, Y, Z) για γωνίες στόχευσης  $0^\circ$ ,  $-25^\circ$  και  $+85^\circ$ , υπό συνθήκες περιοδικής διέγερσης σε ρυθμό πυροδότησης 4500 SPM. Συνολικά, τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι οι στοχεύσεις στις γωνίες  $0$  και  $+85^\circ$  έχουν παρόμοια συμπεριφορά υψηλών εκτροπών.

Γωνία στόχευσης	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)
$0^\circ$	$\sim 0$	0,05	0,07
$-25^\circ$	0,02	0,04	0,05
$+85^\circ$	0,05	0,06	$\sim 0$

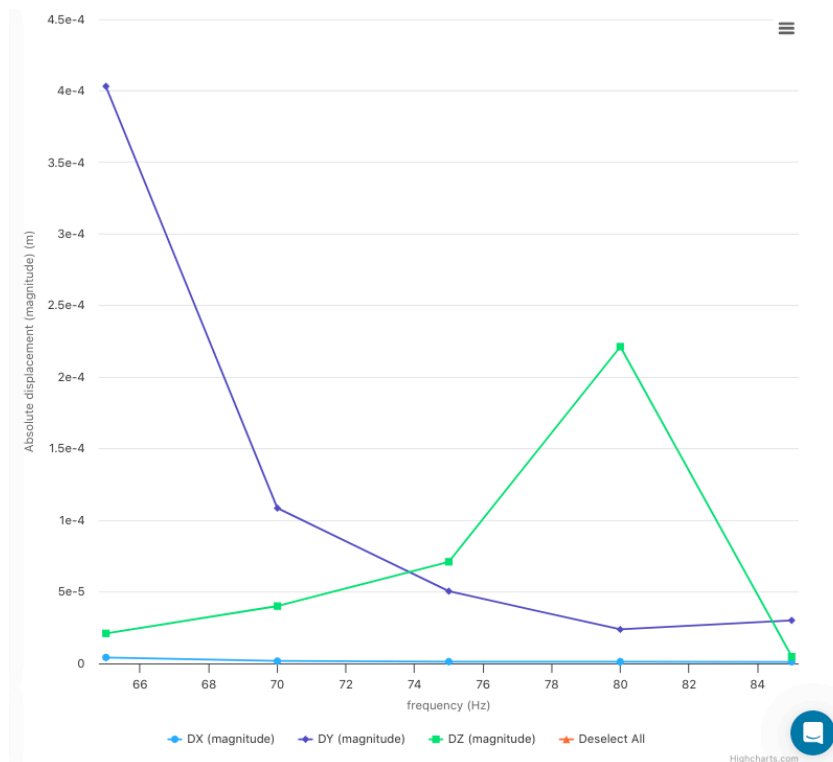
**Πίνακας 6.5 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές σε κατευθύνσεις X,Y,Z συχνότητα διέγερσης 75 Hz



**Διάγραμμα 6.6 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Εκτροπές κατά γωνία στόχευσης. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz

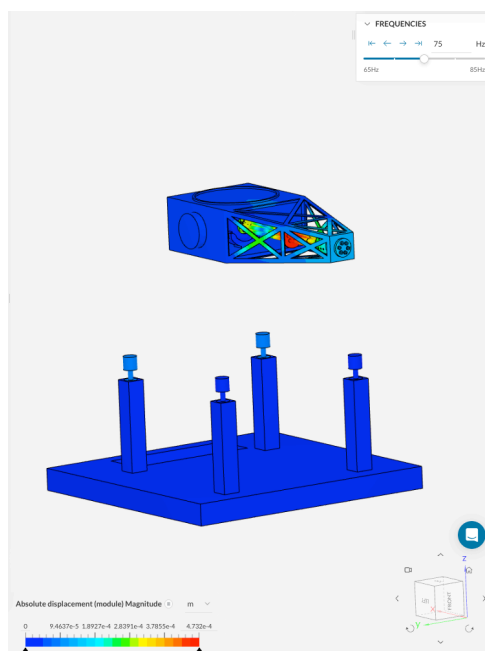
### 6.5.1 Γωνία στόχευσης $0^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 6.7 :**

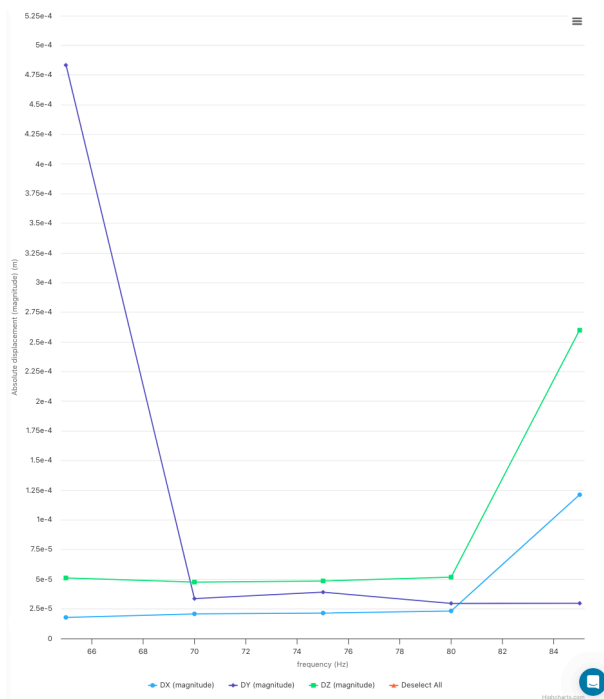
Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης  $0^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Y εμφανίζει μέγιστο στα 65 Hz, φτάνοντας περίπου τα 0,4 mm. Στην συχνότητα των 75 Hz, οι εκτροπές στους άξονες Y και Z είναι 0,005 mm και 0,007 mm αντίστοιχα. Η εκτροπή στον άξονα X είναι αμελητέα σε όλο το εύρος συχνοτήτων.



**Σχήμα 6.8 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης  $0^\circ$

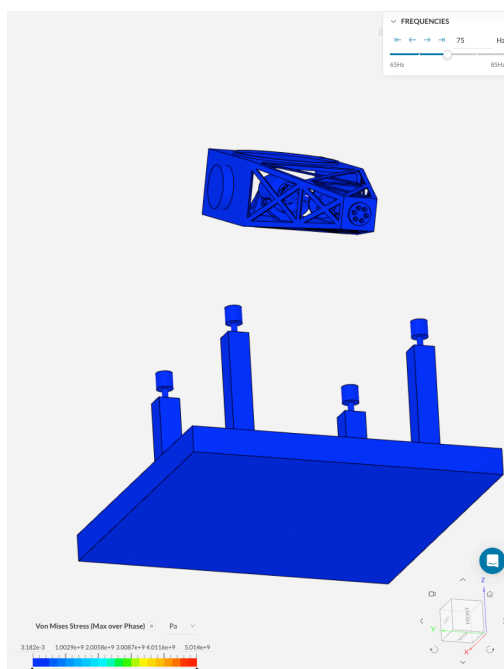
### 6.5.2 Γωνία στόχευσης $-25^\circ$ , φασματική απόκριση συχνοτήτων



**Διάγραμμα 6.8 :**

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης  $-25^\circ$ . Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

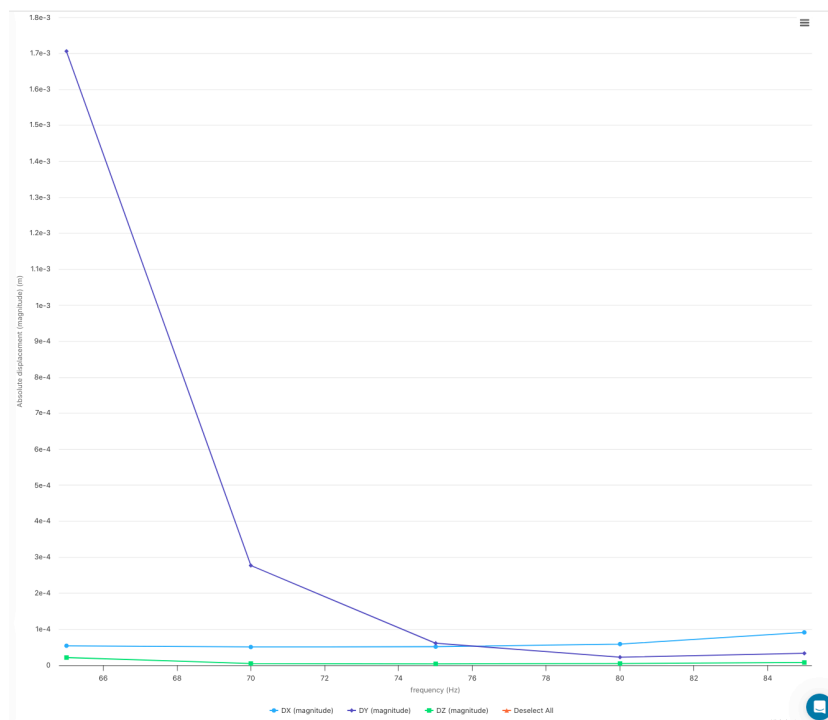
Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Y εμφανίζει μέγιστο στα 65 Hz, φτάνοντας περίπου τα 0,5 mm. Στην συχνότητα των 75 Hz, οι εκτροπές στους άξονες X,Y,Z είναι 0,02 mm , 0,04 mm και 0,05 mm αντίστοιχα.



**Σχήμα 6.9 :** Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης  $-25^\circ$



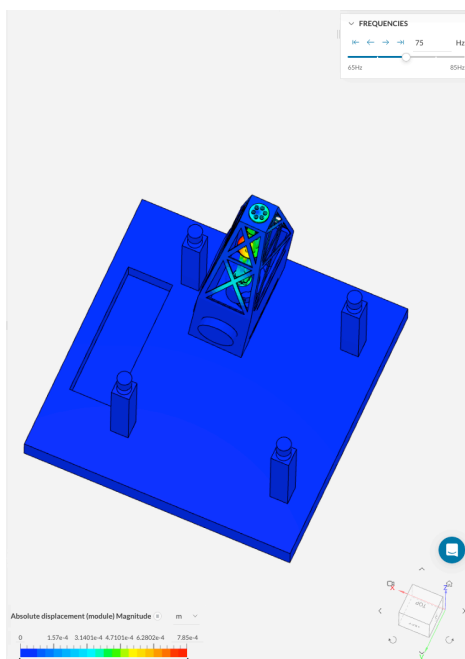
### 6.5.3 Γωνία στόχευσης +85°, φασματική απόκριση συχνοτήτων



Διάγραμμα 6.9 :

Βελτιωμένο μοντέλο. Γωνία στόχευσης +85 °. Αξονικές εκτροπές συχνοτήτων 65 - 85 Hz

Η εκτροπή κατά την κατεύθυνση Y εμφανίζει μέγιστο στα 65 Hz, φτάνοντας περίπου τα 1,7 mm. Στην συχνότητα των 75 Hz, οι εκτροπές στον άξονες X και Y είναι 0,05 mm , 0,006 mm αντίστοιχα. Η εκτροπή στον άξονα Z είναι αμελητέα.



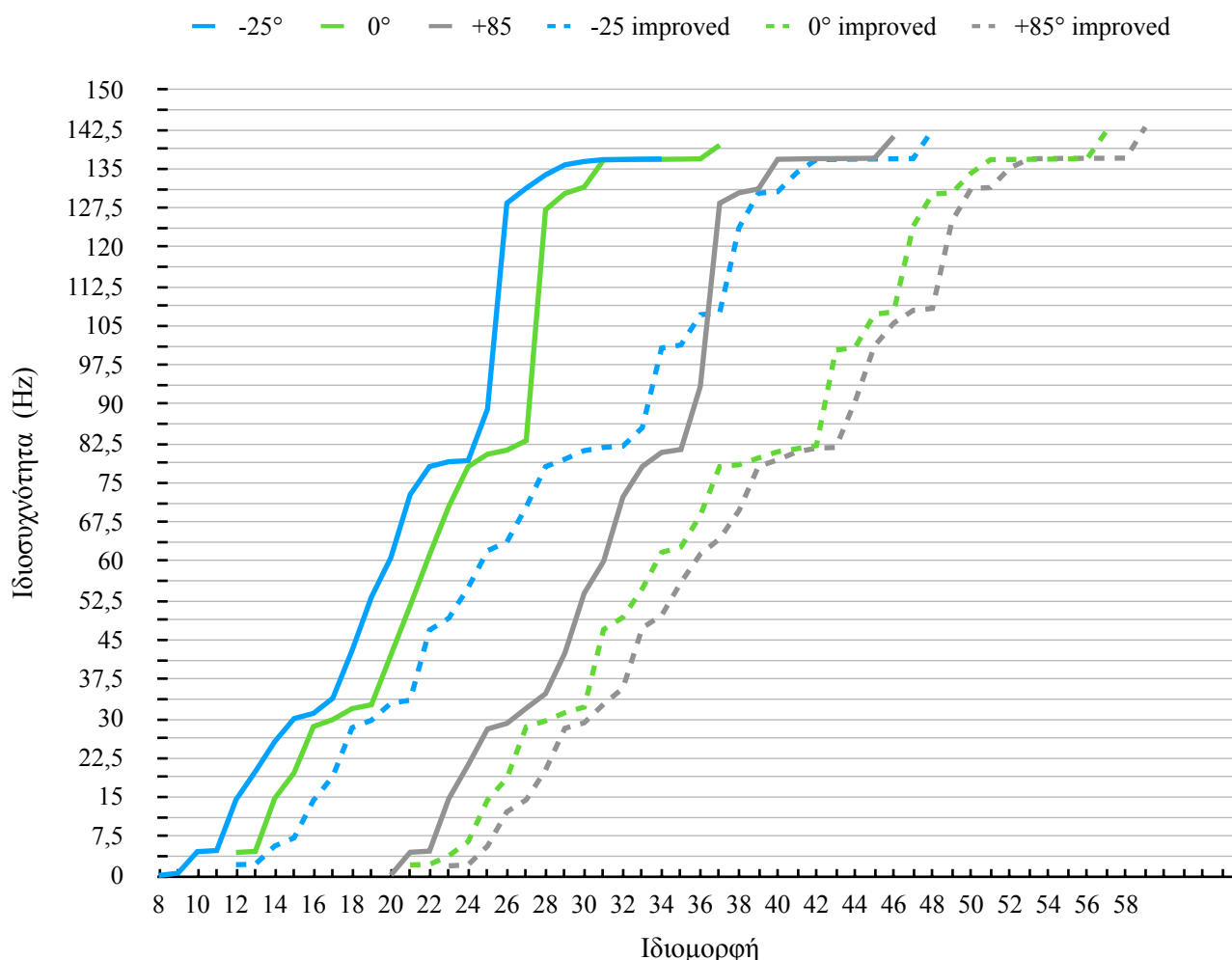
Σχήμα 6.10 : Βελτιωμένο μοντέλο. Συχνότητα διέγερσης 75 Hz, γωνία στόχευσης +85°

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Σύγκριση αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου

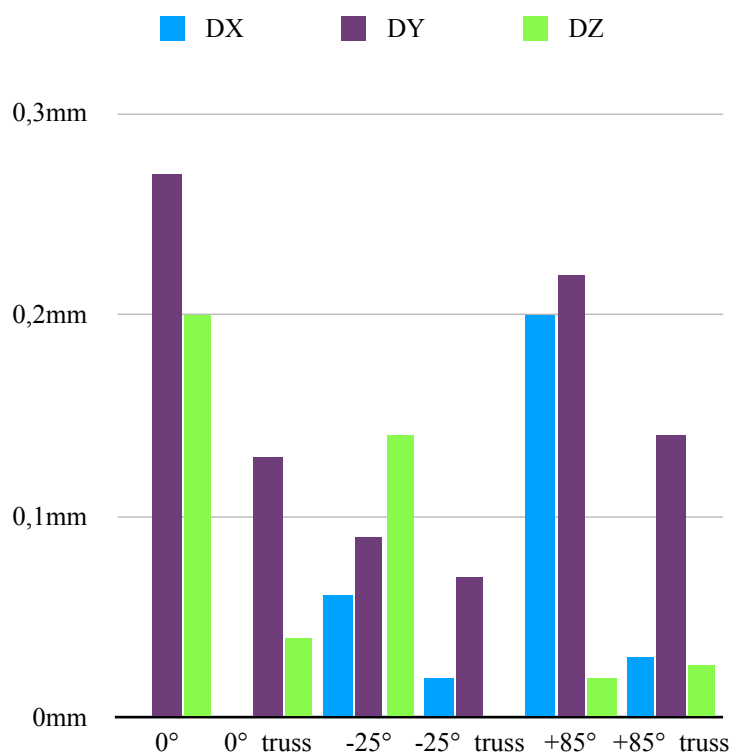
#### 7.1.1 Σύγκριση Ιδιοτιμών - ιδιοσυχνοτήτων

Σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο, παρατηρείται άνοδος των ιδιοσυχνοτήτων σε όλες τις ιδιομορφές ακόμα και σε εκείνες κοντά στις τιμές των 50 Hz και 75 Hz, στοιχείο που υποδεικνύει αυξημένη δυσκαμψία και βελτιωμένη απόκριση. Παρότι στο βελτιωμένο μοντέλο υφίστανται ιδιοσυχνότητες παραμένουν κοντά στην περιοχή ταχυβολίας, η μείωση του Modal Effective Mass σε όλους τους άξονες αποδυναμώνει τον ρόλο τους στη συνολική διασπορά. Η ανασχεδιασμένη μορφή του ρύγχους ενισχύει τη δυσκαμψία ειδικά στις περιοχές πλευρικής υποστήριξης και μεταθέτει σημαντικό μέρος των κραδασμών σε πιο εντοπισμένα δομικά μέρη, απομονώνοντας τις κάννες.



**Διάγραμμα 7.1 :** Συνολική σύγκριση ιδιομορφών - ιδιοσυχνοτήτων κατά γωνία στόχευσης

### 7.1.2 Σύγκριση αρμονικής απόκρισης (3000 SPM)



**Διάγραμμα 7.2 :** Σύγκριση εκτροπών αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου. Συχνότητα 50 Hz

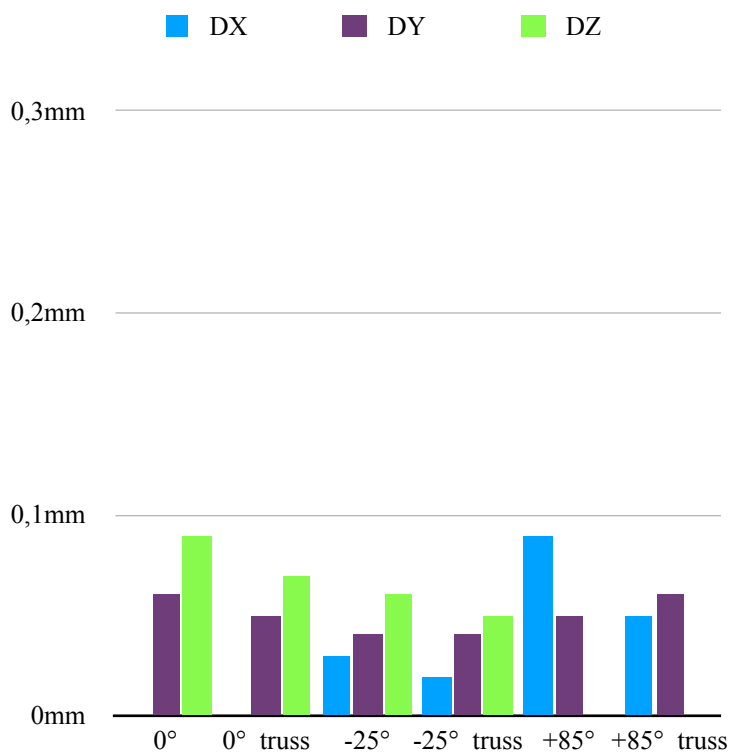
Το Διάγραμμα 7.2 παρουσιάζει τις μέγιστες εκτροπές στις κατευθύνσεις X, Y και Z για τις τρεις γωνίες στόχευσης ( $0^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $+85^\circ$ ), τόσο στο αρχικό μοντέλο, όσο και στο βελτιωμένο μοντέλο με προσθήκη ενισχυτικού δικτυώματος (truss). Όλες οι τιμές αντιστοιχούν σε μετατοπίσεις (σε mm) στη συχνότητα των 50 Hz.

Στη γωνία  $0^\circ$ , η βελτίωση είναι εμφανής κυρίως στους άξονες DY και DZ, όπου η μετατόπιση από 0,27 mm  $\rightarrow$  0,13 mm και 0,20 mm  $\rightarrow$  0,04 mm αντίστοιχα, αποδεικνύει τη σχεδόν 50% μείωση της ταλάντωσης. Η συνιστώσα X (ανάκρουση) παραμένει αμελητέα σε όλα τα σενάρια, όπως αναμενόταν για ευθυτενή στόχευση.

Για τη γωνία  $-25^\circ$ , το αρχικό μοντέλο εμφάνιζε σημαντική απόκλιση στον άξονα Z (0,14 mm) και μέτρια σε DX και DY. Στο βελτιωμένο μοντέλο, παρατηρείται μείωση σε όλους τους άξονες, με τη συνιστώσα X να πέφτει από ~0,06 mm σε κάτω από 0,02 mm και τη DY από 0,09 mm σε 0,053 mm. Η μετατόπιση κατά Z περιορίζεται περίπου στο 1/10 της αρχικής τιμής, αποδεικνύοντας την καταστολή κατακόρυφων ταλαντώσεων.

Η γωνία  $+85^\circ$ , η οποία είχε τη χειρότερη συμπεριφορά στο αρχικό μοντέλο (ιδιαίτερα σε  $DX \approx 0,20$  mm και  $DY \approx 0,22$  mm), παρουσιάζει θεαματική βελτίωση: η DX πέφτει κάτω από 0,05 mm και η DY μειώνεται περίπου στο 1/3, ενώ η DZ παραμένει πολύ χαμηλή και στις δύο περιπτώσεις.

### 7.1.3 Σύγκριση αρμονικής απόκρισης (4500 SPM)



**Διάγραμμα 7.3 :** Σύγκριση εκτροπών αρχικού - βελτιωμένου μοντέλου. Συχνότητα 75 Hz

Το Διάγραμμα 7.3 παρουσιάζει τις μέγιστες εκτροπές στις κατευθύνσεις X, Y και Z για τις τρεις γωνίες στόχευσης ( $0^\circ$ ,  $-25^\circ$ ,  $+85^\circ$ ), τόσο στο αρχικό μοντέλο, όσο και στο βελτιωμένο μοντέλο με προσθήκη ενισχυτικού δικτύματος (truss). Όλες οι τιμές αντιστοιχούν σε μετατοπίσεις (σε mm) στη συχνότητα των 75 Hz.

Στις γωνίες  $0^\circ$  και  $+85^\circ$ , παρατηρούνται σαφείς μειώσεις: στη γωνία  $+85^\circ$ , οι εκτροπές DY και DX μειώνονται σχεδόν κατά 50%, ενώ στη γωνία  $0^\circ$  οι τιμές παραμένουν πολύ χαμηλές και στις δύο περιπτώσεις — όπως αναμενόταν, δεδομένης της ευθυγράμμισης ανάκρουσης με τον άξονα X.

Η γωνία  $-25^\circ$  καταγράφει την πιο έντονη απόκριση στο αρχικό μοντέλο. Το ενισχυμένο ρύγχος συγκράτησης = βελτίωσε την απόκριση του συστήματος σε όλες τις περιπτώσεις.

## 7.2 Συστάσεις για περαιτέρω έρευνα

Το μοντέλο που αναλύθηκε αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για την κατανόηση της πολύπλοκης δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος. Ακολουθήθηκε ολόκληρος ο κύκλος προσομοίωσης, από τη μοντελοποίηση και συναρμολόγηση μέχρι την διακριτοποίηση του πεπερασμένου στοιχείου, και την προσομοίωση της δυναμικής απόκρισής του.

Δεν πραγματοποιήθηκε πλήρης γεωμετρική μοντελοποίηση των εδράνων κύλισης, καθώς κρίθηκε ότι κάτι τέτοιο θα επιβάρυνε σημαντικά υπολογιστική απαίτηση χωρίς ανάλογο όφελος σε πρώιμο στάδιο. Δεν υπήρχε επαρκής διαθέσιμη πληροφορία όσον αφορά τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τη διάρκεια ζωής των εδράνων κύλισης. Ενδεχομένως, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν εναλλακτικά ρουλεμάν στο μοντέλο, ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά τους. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή καθιστά απαραίτητη την άντηλη τεχνικών πληροφοριών από τεχνικά εγχειρίδια κατασκευαστών, προκειμένου να εκτιμηθούν ρεαλιστικές τιμές ακαμψίας (stiffness) που να ανταποκρίνονται στην πραγματική συμπεριφορά των εδράνων.

Στο πλαίσιο της μελέτης, η περιστροφική κίνηση του ρότορα και των έξι καννών δεν προσομοιώθηκε απευθείας λόγω της υπολογιστικής επιβάρυνσης και της μη γραμμικότητας που εισάγει. Αντ' αυτού, επιλέχθηκε η εφαρμογή αρμονικών φορτίσεων με διαφορετική γωνιακή φάση  $60^\circ$  ανά κάννη, ώστε να προσεγγιστεί η πραγματική χρονική διαφορά πυροδότησης.

Επιπλέον, λόγω των περιορισμών του σχεδιαστικού εργαλείου, τα εξαρτήματα μοντελοποιήθηκαν ως συμπαγή σώματα (solid bodies), ακόμη και σε περιπτώσεις όπου στη φυσική τους μορφή περιλαμβάνουν κοίλες ή λεπτότοιχες γεωμετρίες. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε υπερεκτίμηση της συνολικής μάζας του μοντέλου που ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια της δυναμικής απόκρισης. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η χρήση σημειακών μαζών (point masses) για τα εξαρτήματα που δεν είναι συμπαγή στην πραγματικότητα, ώστε να διατηρηθεί η κατανομή αδρανειακών χαρακτηριστικών χωρίς περιττή υπολογιστική επιβάρυνση, μια πλήρης και ακριβής μοντελοποίηση όλων των υποσυστημάτων θα επέτρεπε την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων ως προς τις παρενέργειες που ενδέχεται να επιφέρει η βελτίωση της διασποράς σε άλλες κρίσιμες δομικές περιοχές του οπλικού συστήματος.

Σημειώνεται ότι κατά την αρμονική ανάλυση, δεν εισήχθηκε τιμή αριθμητικού συντελεστή γραμμικής απόσβεσης, ο οποίος έτσι και αλλιώς θα ήταν χαμηλός εφόσον τα εξαρτήματα είναι από χάλυβα.

Επίσης, νέες τιμές ακαμψίας του συστήματος απόσβεσης κραδασμών πρέπει να ερευνηθούν καθώς το ανασχεδιασμένο ρύγχος αυξάνει την μάζα της ανωδομής.

Η προσέγγιση περιορισμού της διασποράς με εισαγωγή ενισχυμένου ρίγχους συγκράτησης σε γενικές γραμμές βελτίωσε τις εκτροπές μοντέλου στο φάσμα συσχυοτήτων ενδιαφέροντος.



---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. M61A1 GUN INSTALLATION (Chapter 6) [https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14313\\_ch6.pdf](https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14313_ch6.pdf)
2. M61A1/M61A1 20MM GATLING GUN, 08/2005
3. CORELATION OF EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT MODAL ANALYSIS OF THE PHALANX M61A1 CIWS, Naval Postgraduate School Monterey, California, Carlos S. Guzman, John C. Gaffe, 12/1995
4. NORMAL MODES OF VIBRATION OF THE PHALANX GUN, Naval Postgraduate School Monterey, California, John C. Peterschmidt, June 1993
5. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΩΝ Α.Κανάραχος - Ι.Αντωνιάδης, Αθήνα 1998
6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης, Μαρία Ε. Σταυρουλάκη, Αλίκη Δ. Μουράντοβα, Αποθετήριο Κάλλιπος, 2015
7. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ, Αντωνιάδης Αριστομένης, Έκδοση 4η , 2022
8. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος : ΜΠΔ 432 - Δυναμική, ταλαντώσεις και έλεγχος κατασκευών, Χρήστος Παναγιώτοπουλος, ακαδημαϊκό έτος 2017 - 2018
9. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος : ΜΠΔ 202 - Επιστήμη και τεχνολογία υλικών, Κονσολάκης Μιχαήλ, 23/10/2014
10. SKF bearings and mounted products, τεχνικό εγχειρίδιο, 08/2024
11. Shock Absorbers and Rate Controls, Enidine, 01/07/2020
12. Wikipedia the free encyclopedia, Phalanx CIWS, [https://en.wikipedia.org/wiki/Phalanx\\_CIWS](https://en.wikipedia.org/wiki/Phalanx_CIWS) ,10/06/2025
13. Wikipedia the free encyclopedia, M61A1 Vulcan, [https://en.wikipedia.org/wiki/M61\\_Vulcan](https://en.wikipedia.org/wiki/M61_Vulcan), 30/05/2025
14. Wikipedia the free encyclopedia, Normal Mode, [https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_mode](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_mode), 15/09/2024
15. Simscale Documentation, Multifrontal Massively Parallel Solver (MMPS), 13/03/2025
16. Simscale Documentation, IRAM - Sorensen (Implicitly Restarted Arnoldi Method) , 13/03/2025
17. Ανάλυση δύναμης σε ορθογώνιες συνιστώσες, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο <https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TM222/%CE%9C%CE%91%CE%98%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%94%CE%85%CE%BD%CE%AC%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CE%82%20%CE%83%CE%84%CE%BF%20%CE%B5%CE%80%CE%AF%CE%80%CE%B5%CE%B4%CE%BF%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CE%83%CE%84%CE%BF%CE%BD%20%CE%87%CE%8E%CE%81%CE%BF-%20%CE%A3%CE%85%CE%BD%CE%B9%CE%83%CE%84%CE%B1%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7%20-%20%CE%99%CE%83%CE%BF%CE%81%CE%81%CE%BF%CE%80%CE%AF%CE%B1%CE%94%CE%85%CE%BD%CE%AC%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CE%82%20-%20%CE%83%CE%85%CE%BD%CE%B9%CE%83%CE%84%CE%B1%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7%20-%20%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CE%85%CE%83%CE%B7.pdf>
18. CHAPTER 2 INTERFACES, INSTALLATION REQUIREMENTS AND DESIGN SPECIFICATIONS , 10/2022
19. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench, 2015

20. History and Technology - R2D2 with Attitude/ The Story of the Phalanx Close-In Weapons - NavWeaps, 30/10/2009, [http://www.navweaps.com/index\\_tech/tech-103.php](http://www.navweaps.com/index_tech/tech-103.php)
21. Enidine - Shipboard\_Brochure, 09/2023
22. Simscale Documentation, Rayleigh Damping, 13/03/2025 <https://www.simscale.com/knowledge-base/rayleigh-damping-coefficients/>
23. Contact Mechanics. Cambridge University Press. Johnson, K.L (1985)

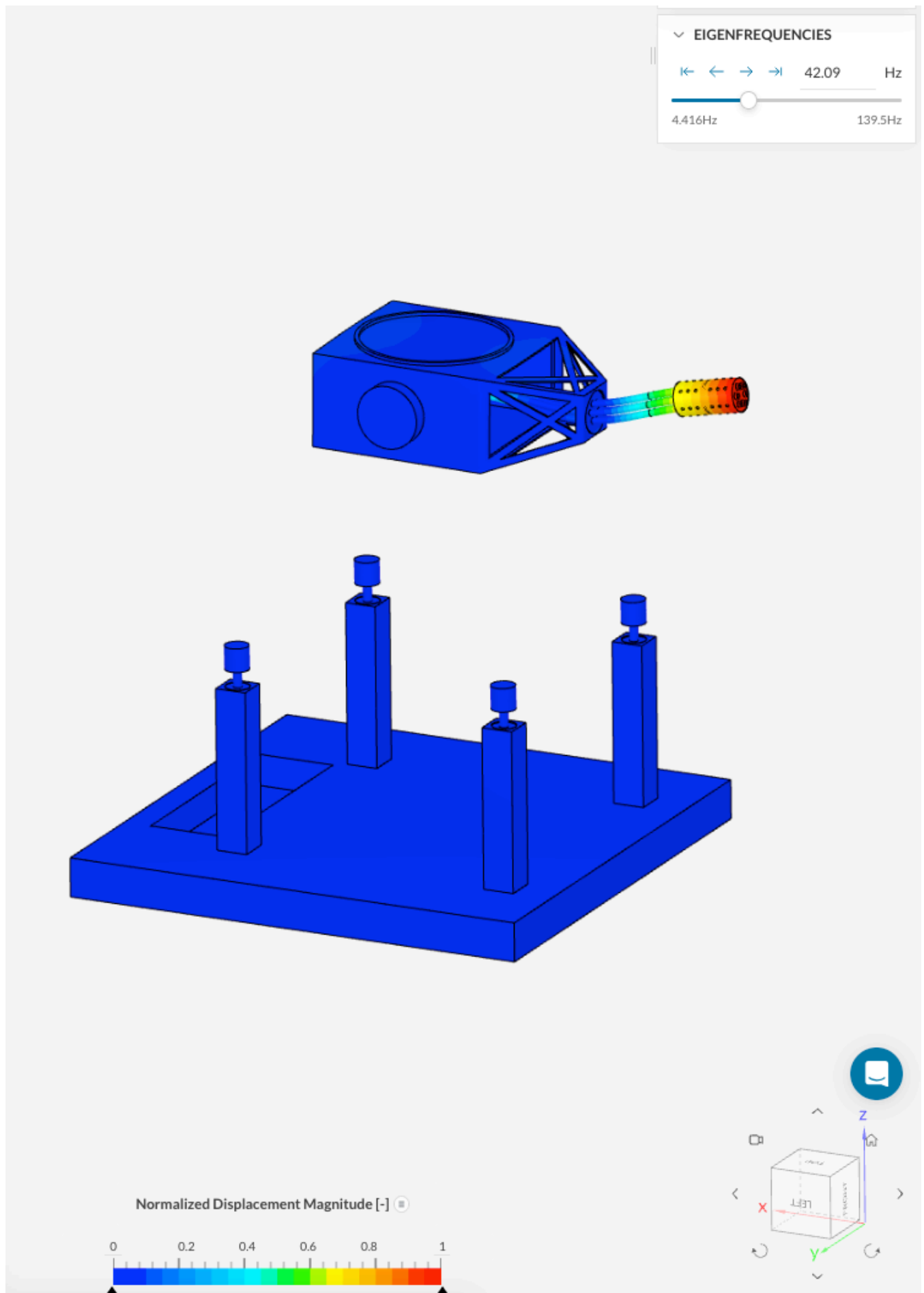


---

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

---

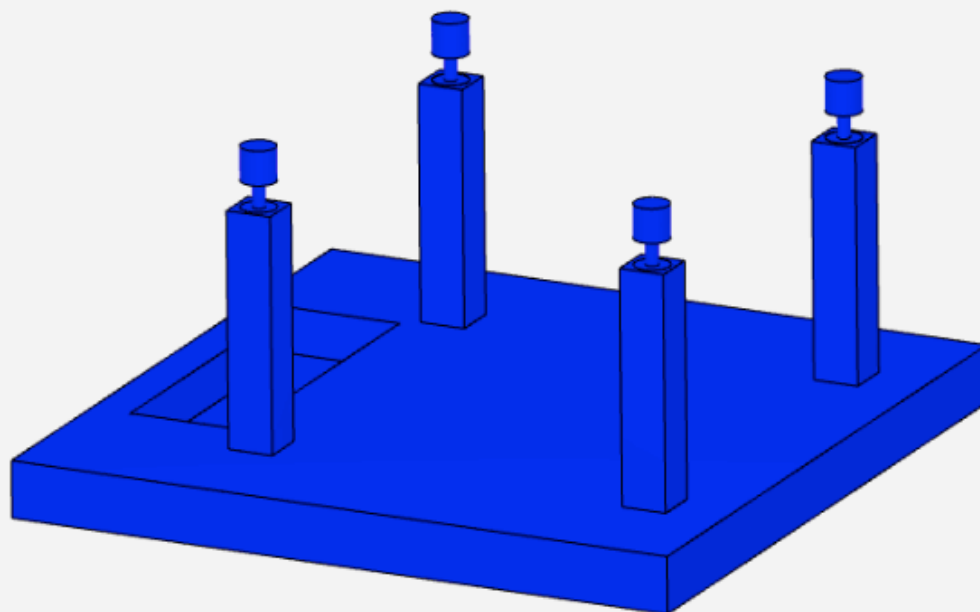
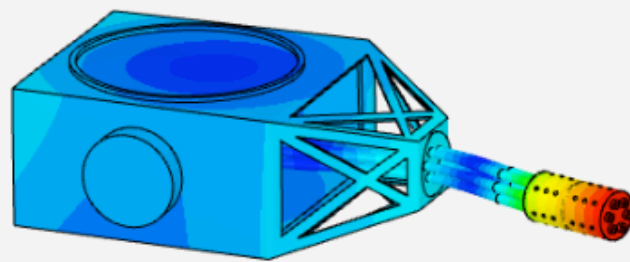




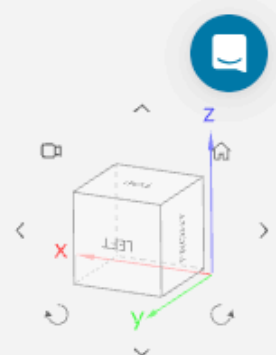
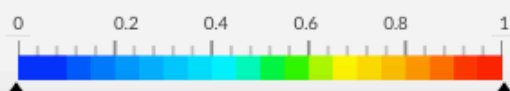
▼ EIGENFREQUENCIES

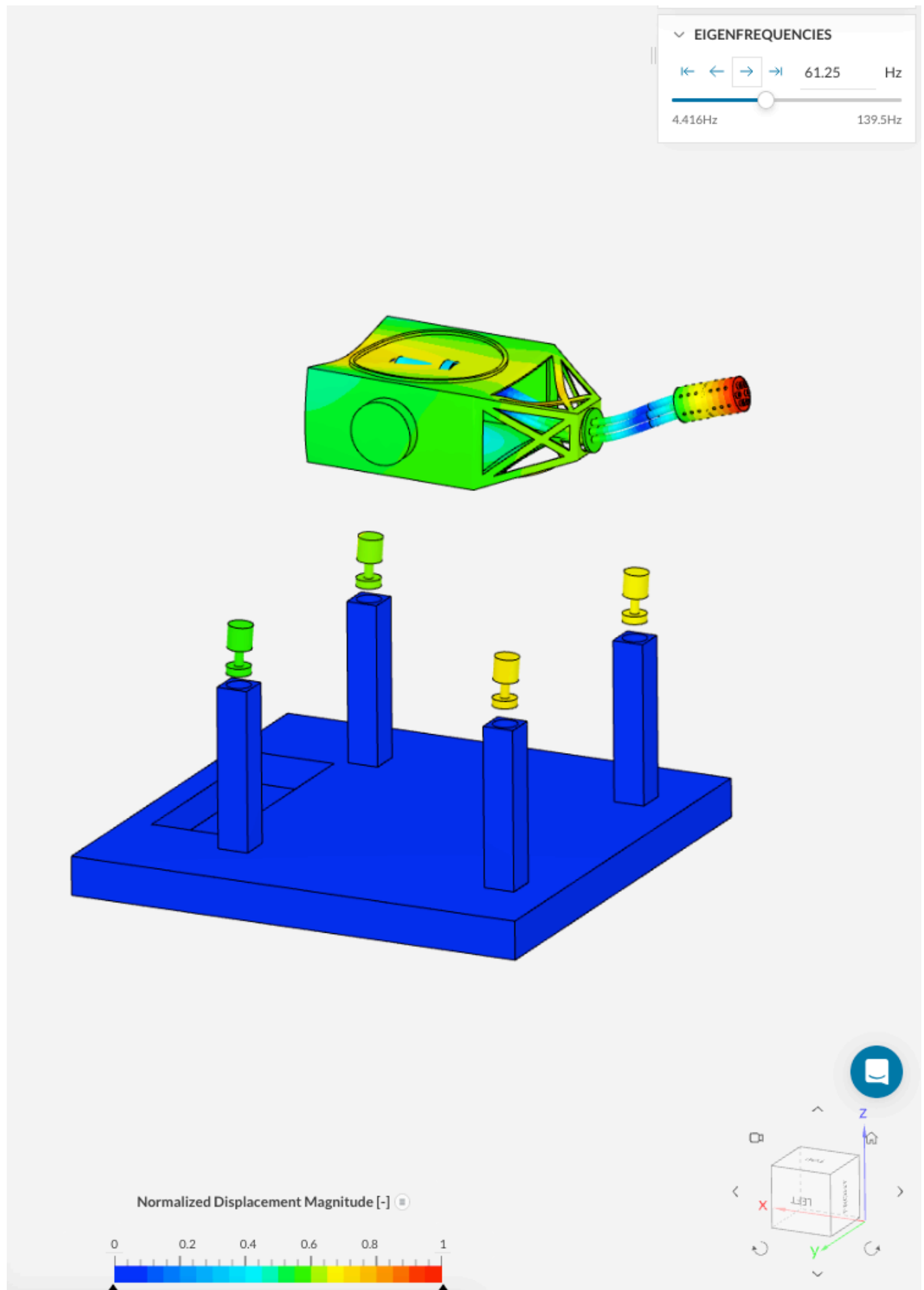
← → 51.54 Hz

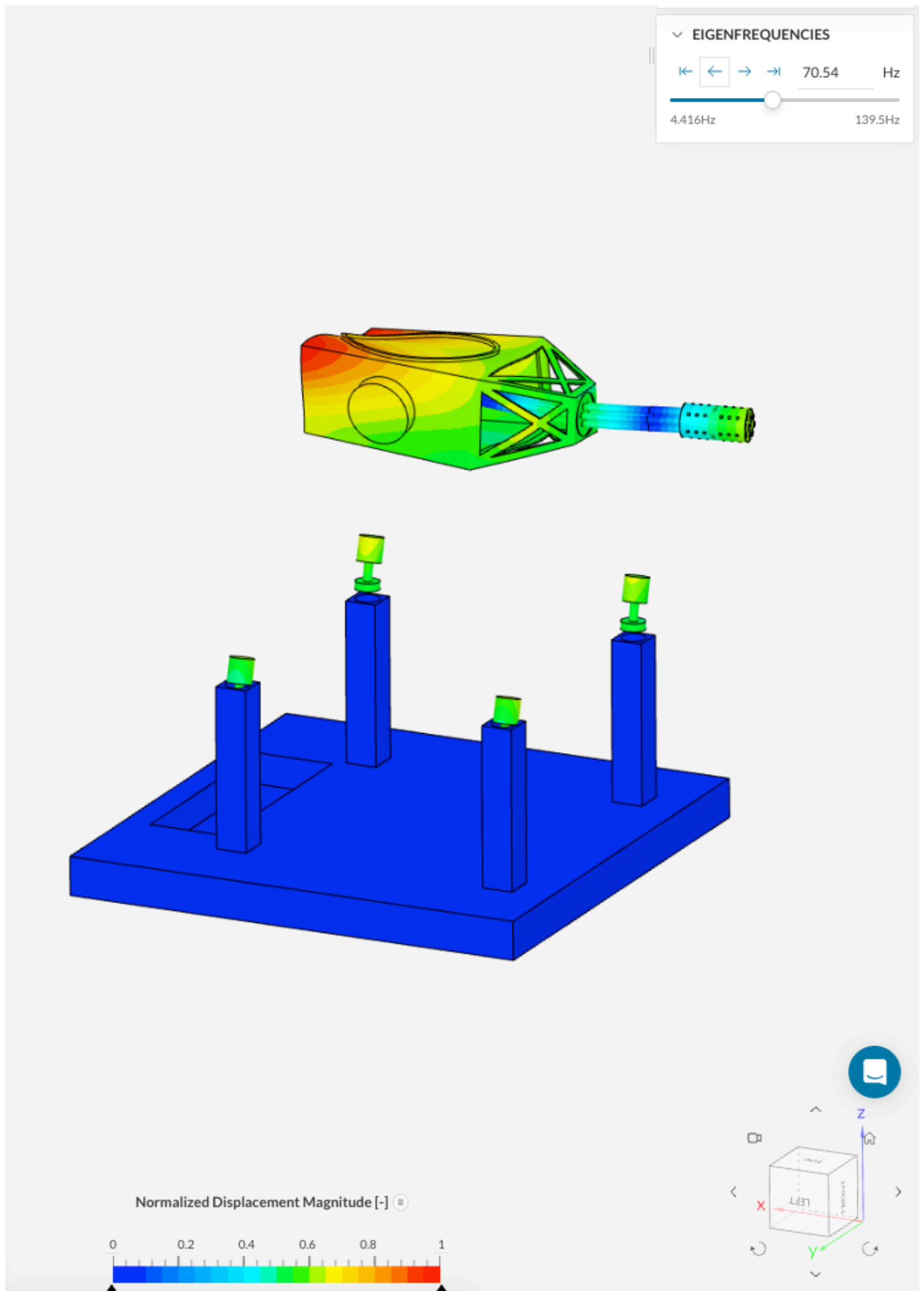
4.416Hz 139.5Hz

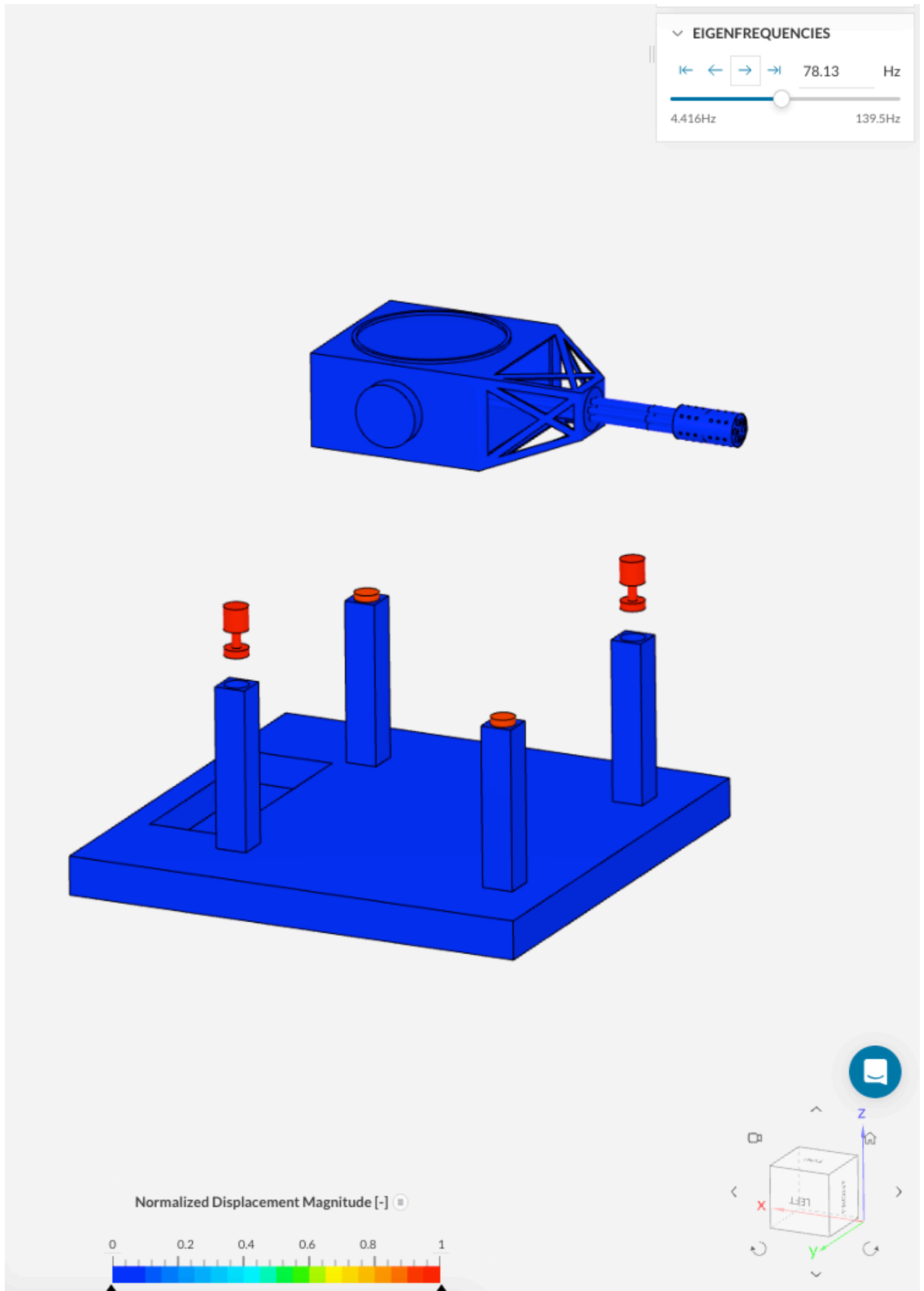


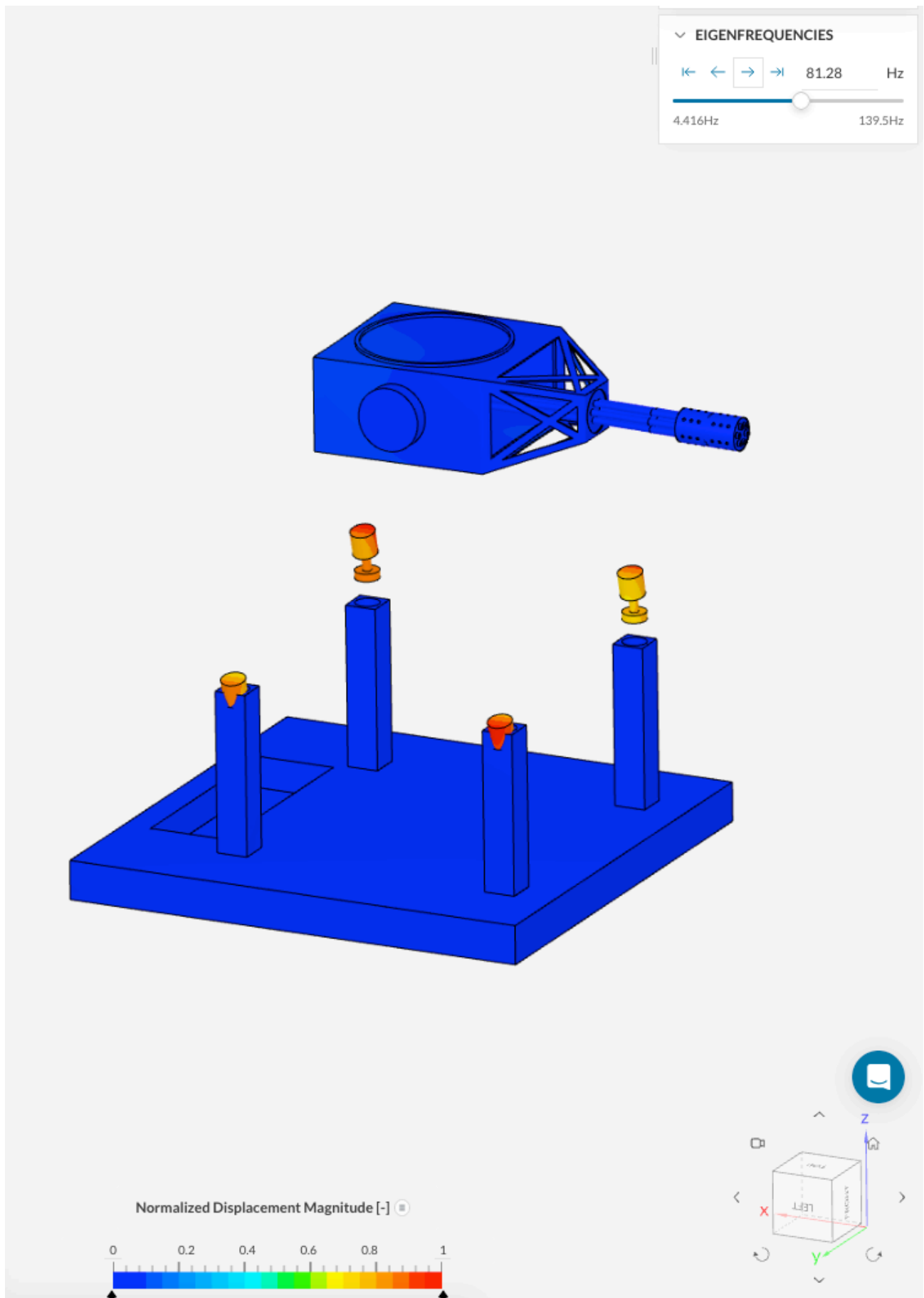
Normalized Displacement Magnitude [-]



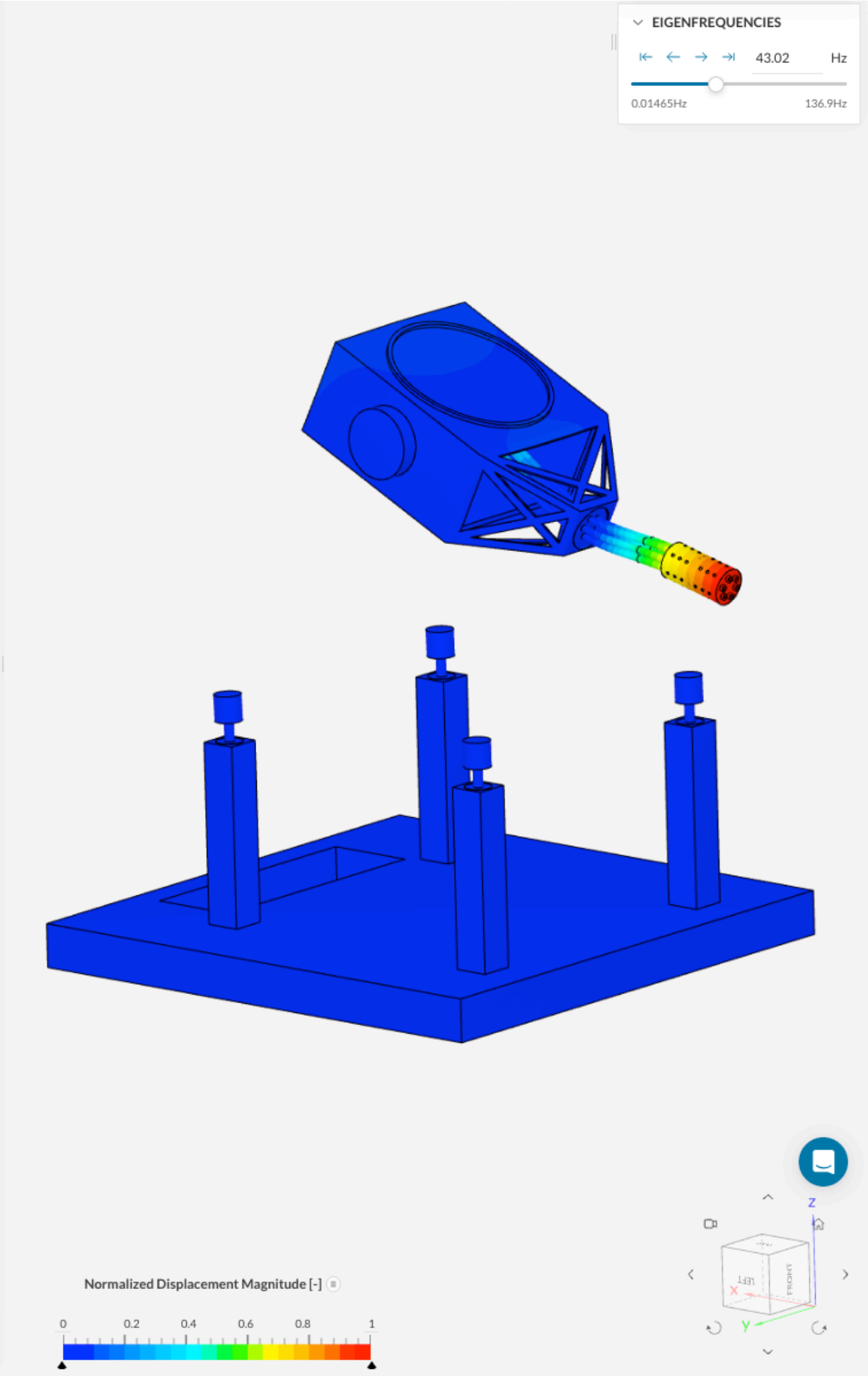




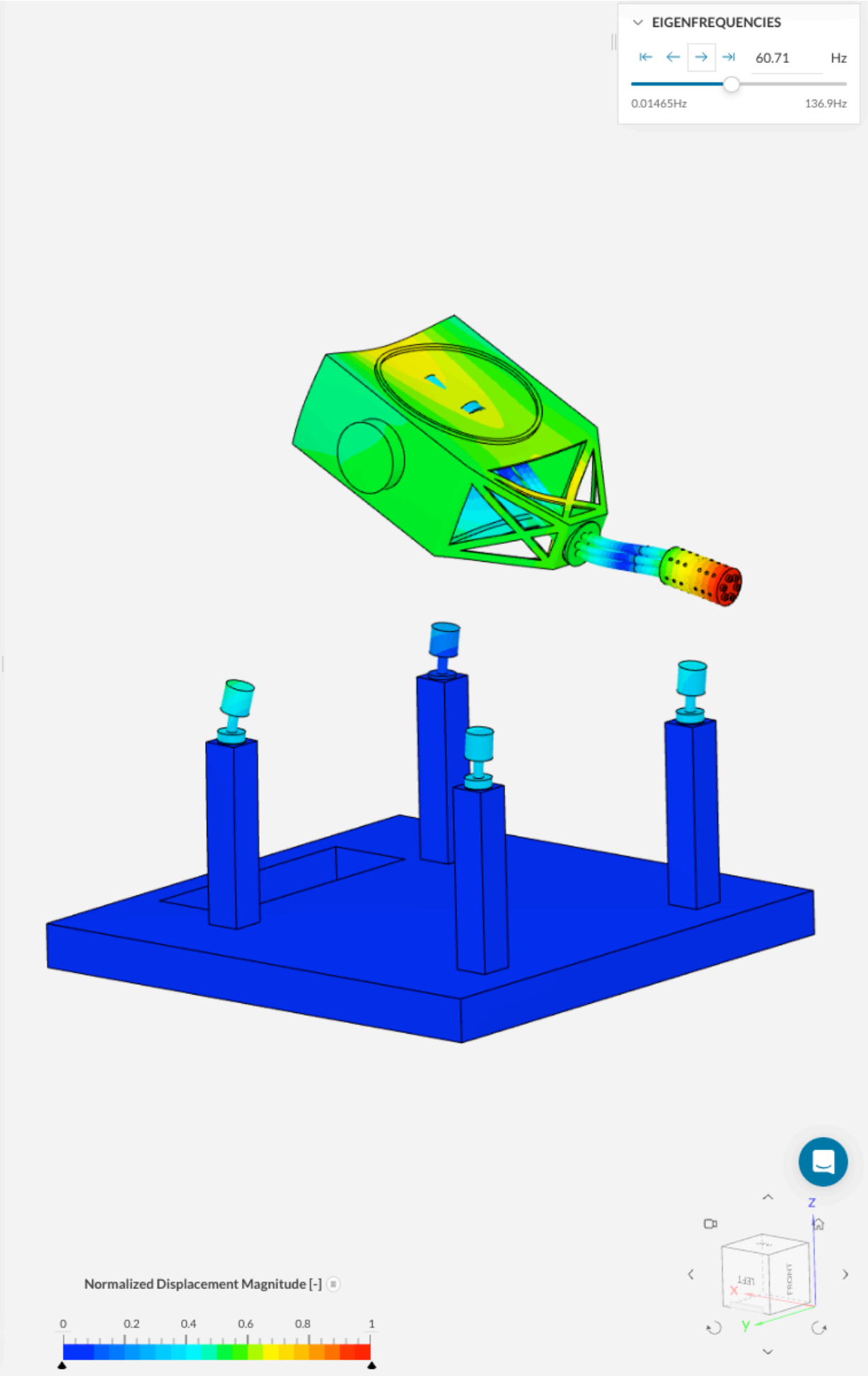


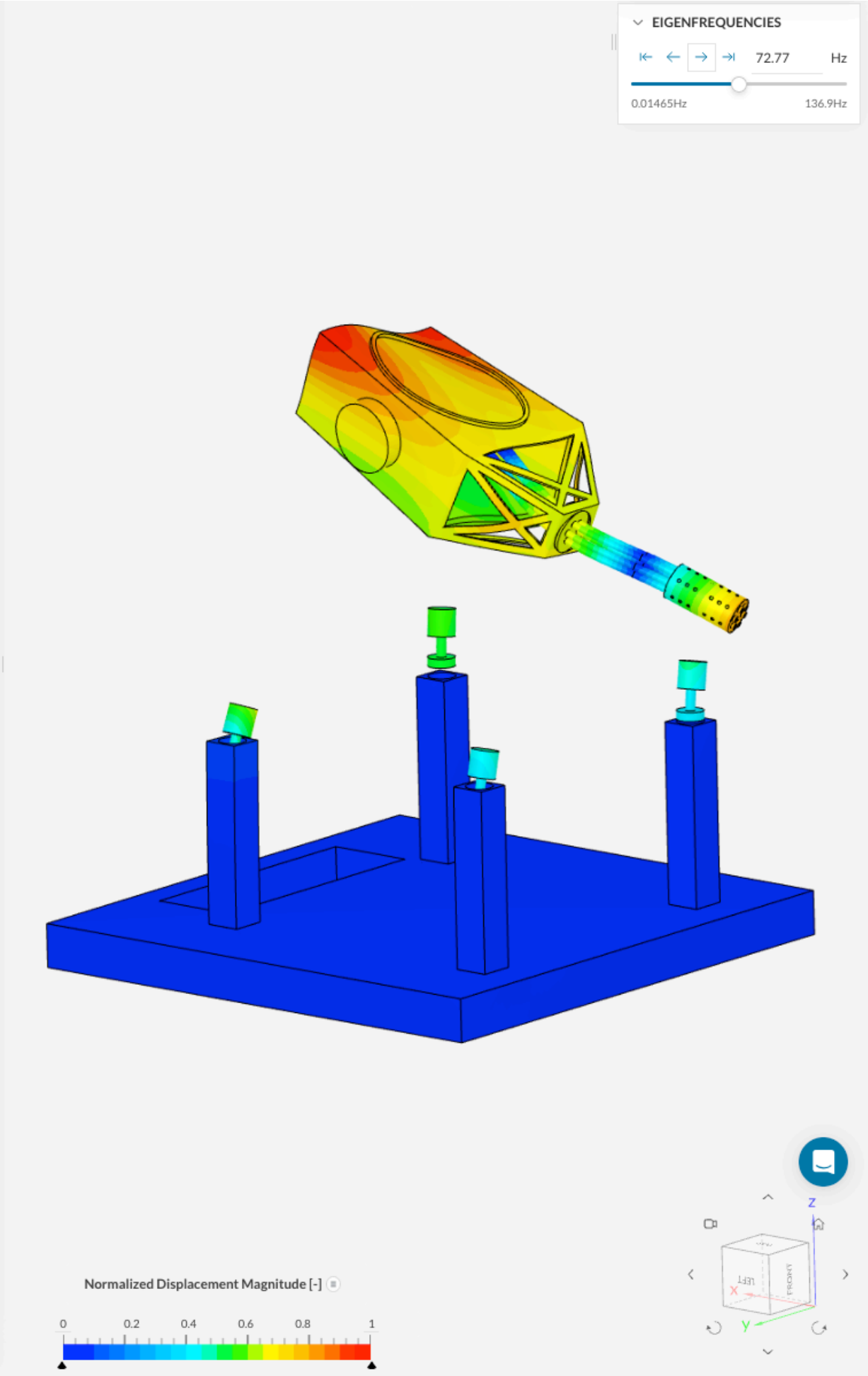


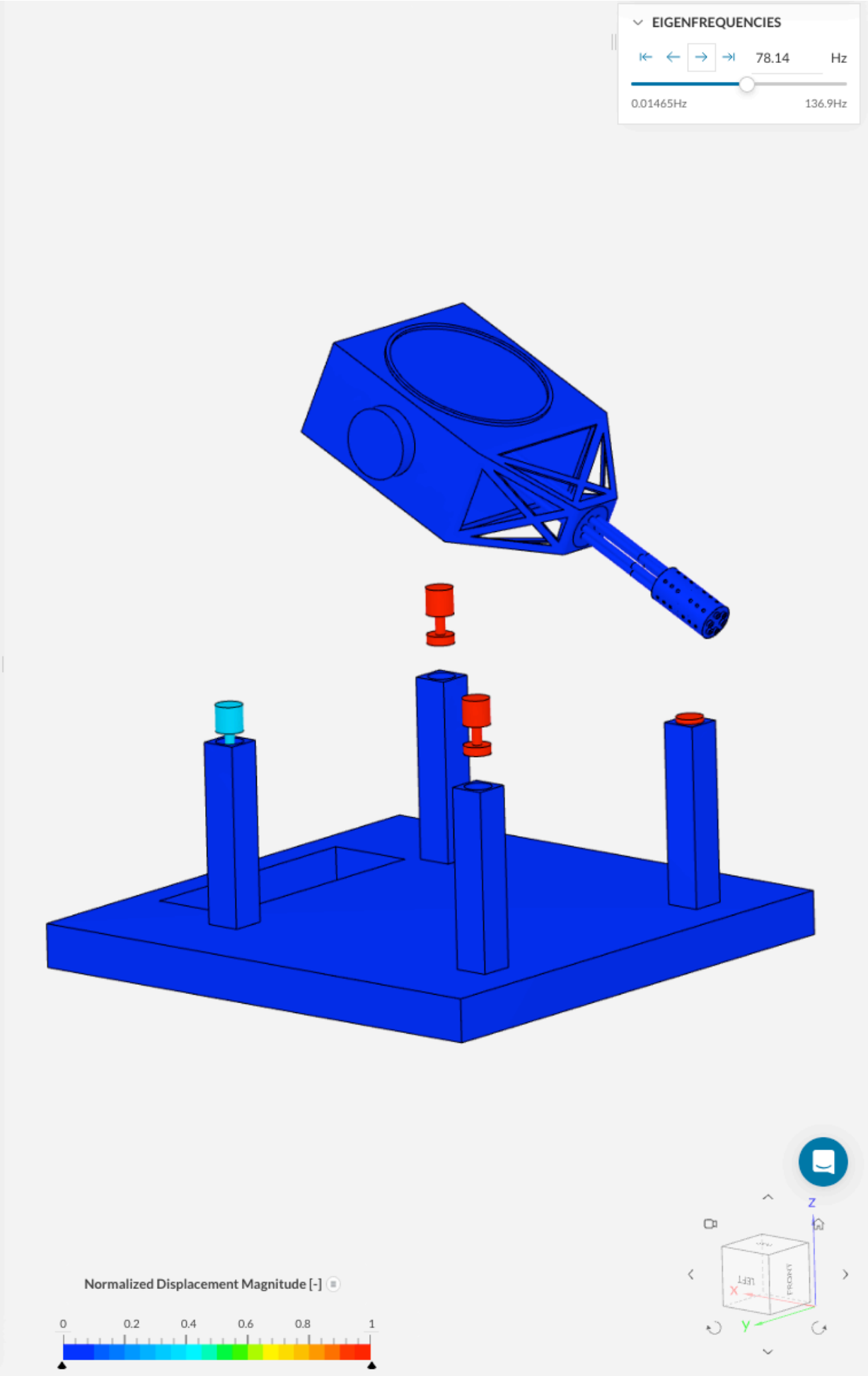


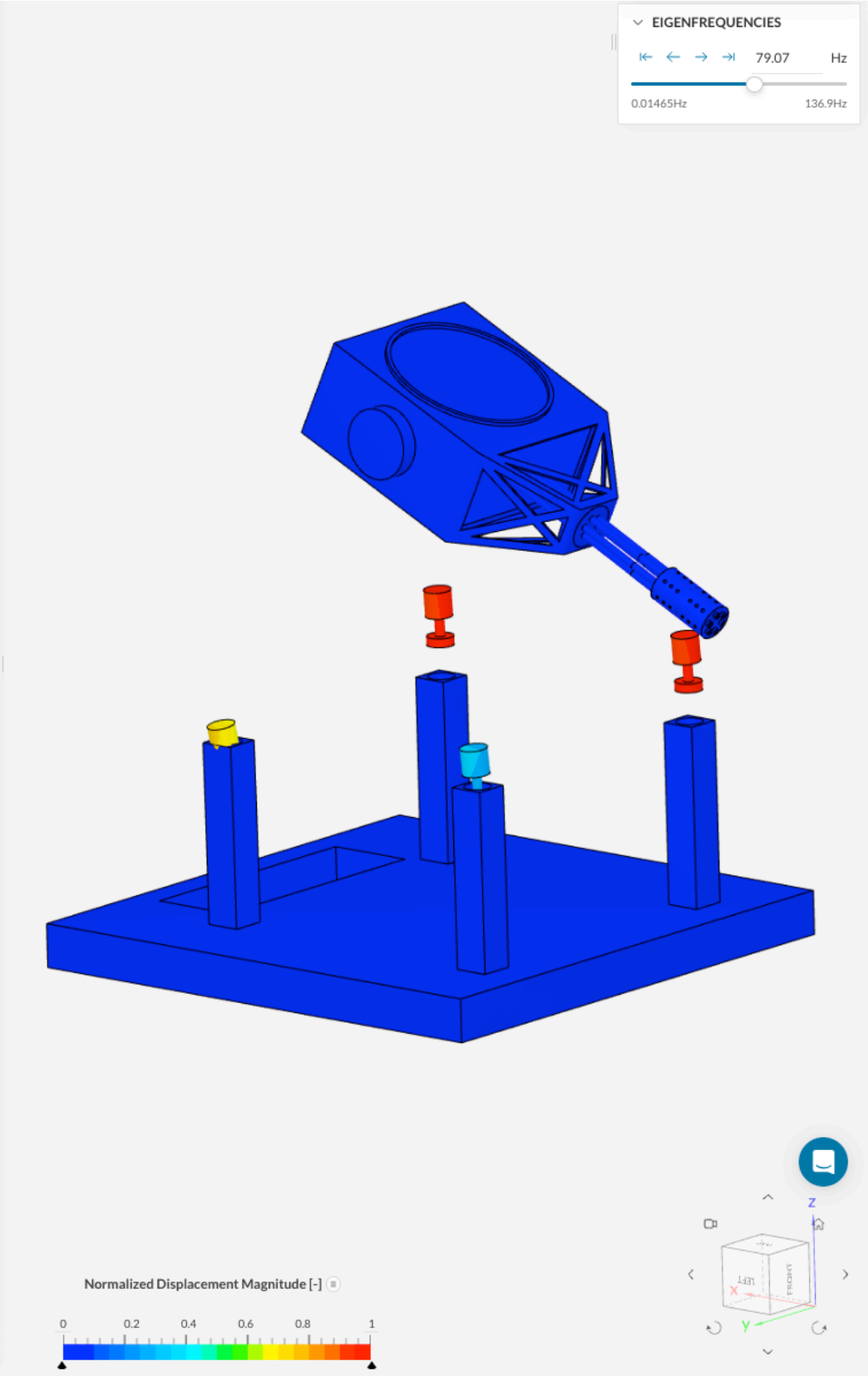


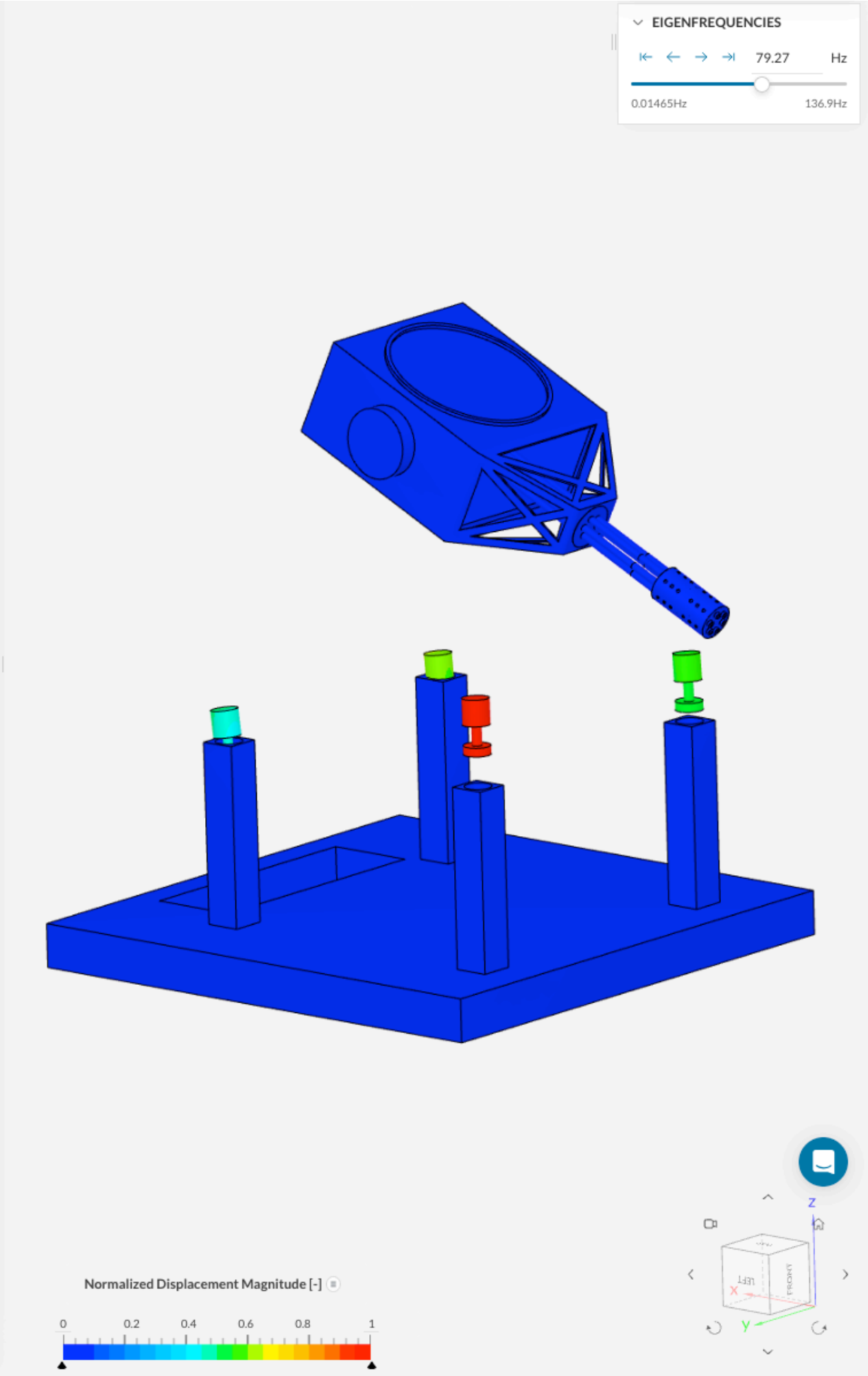


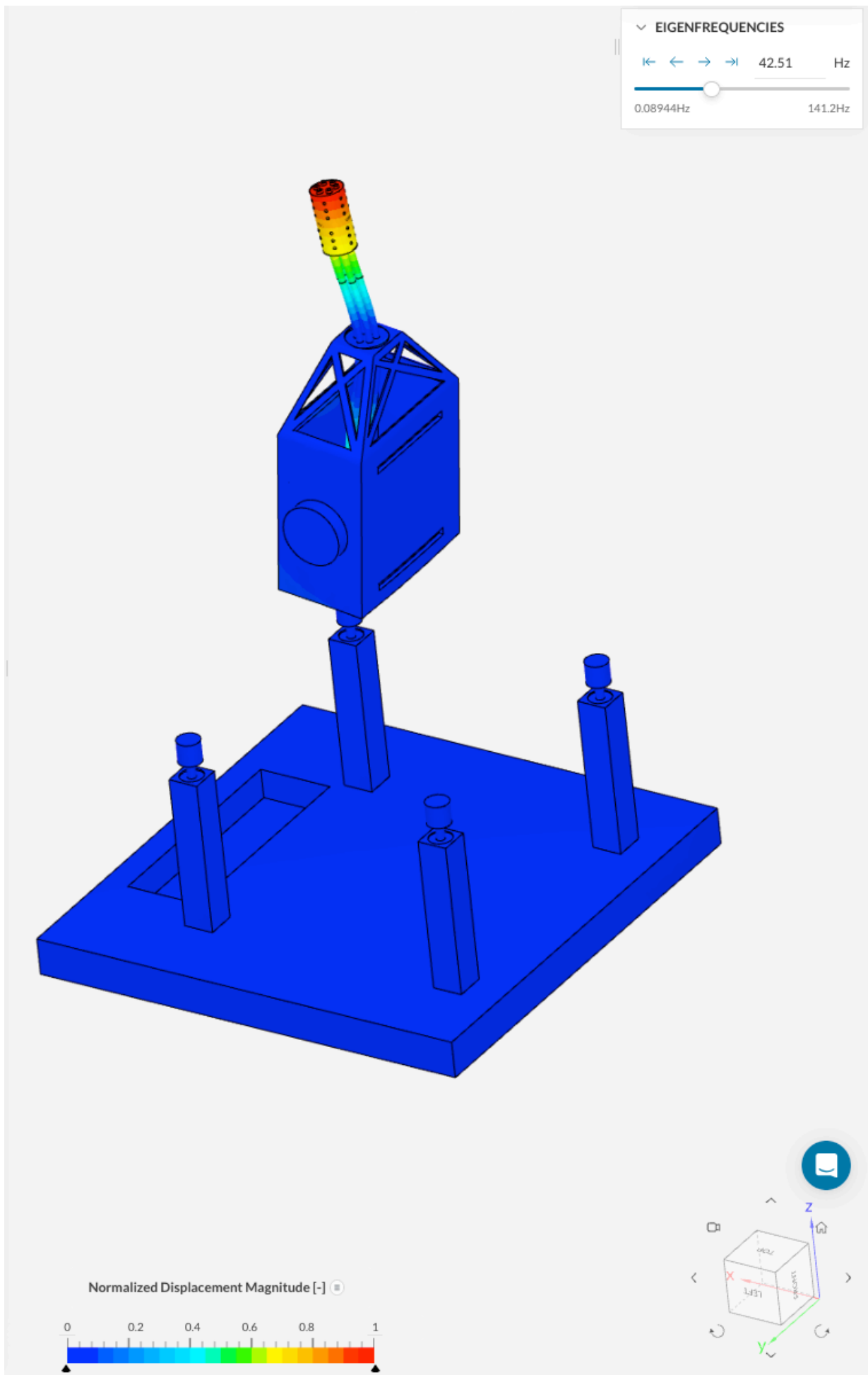




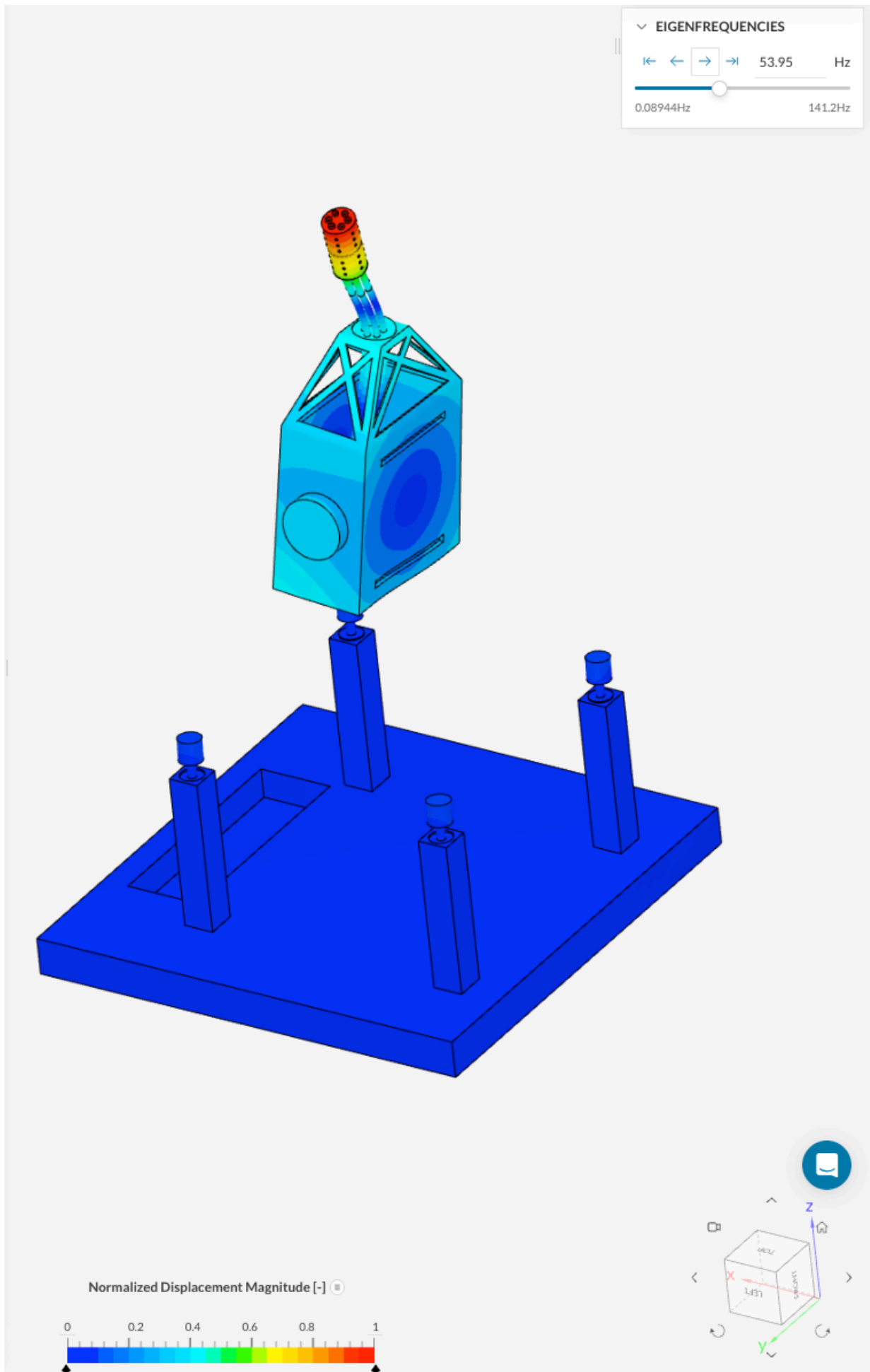


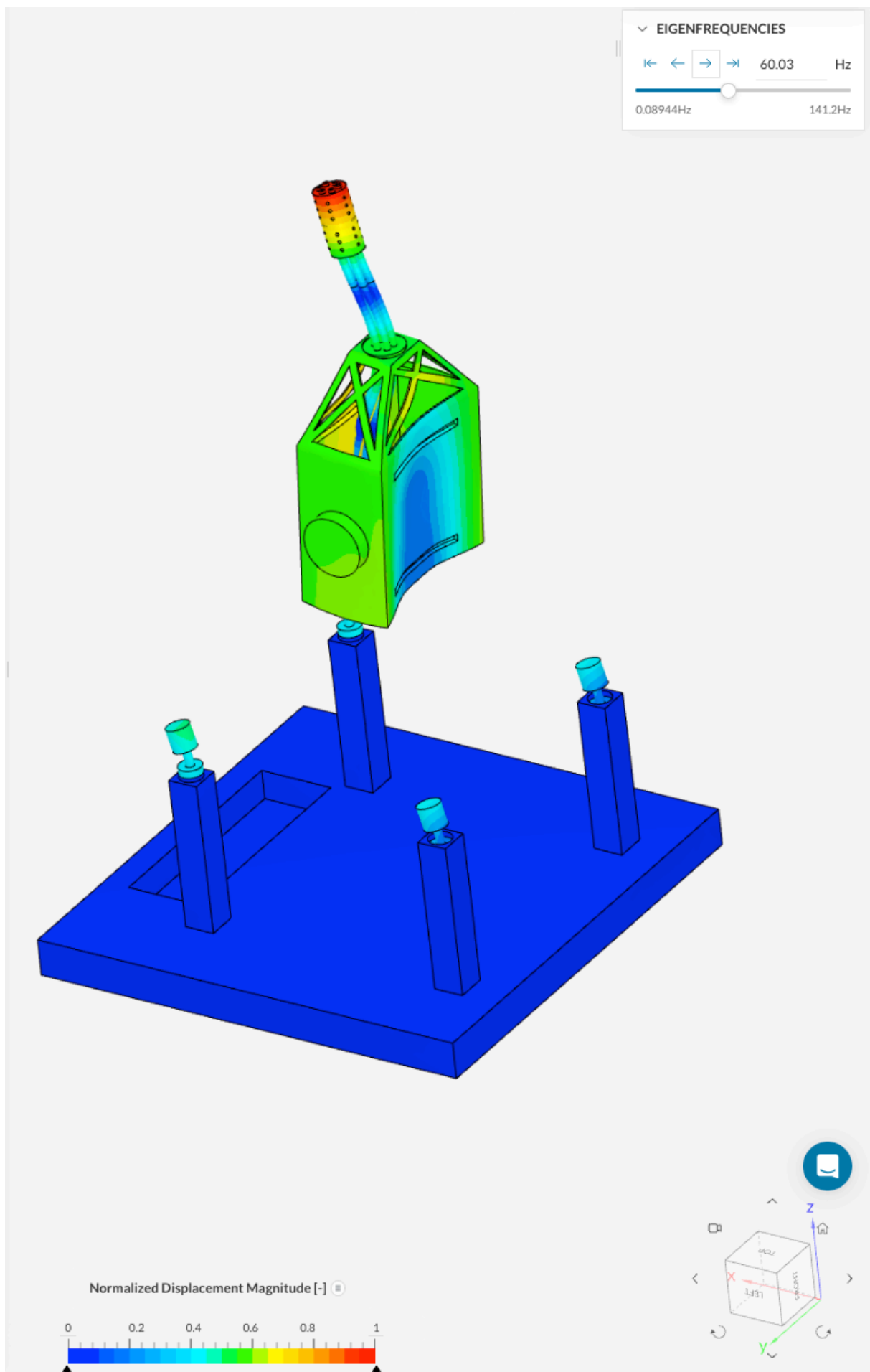


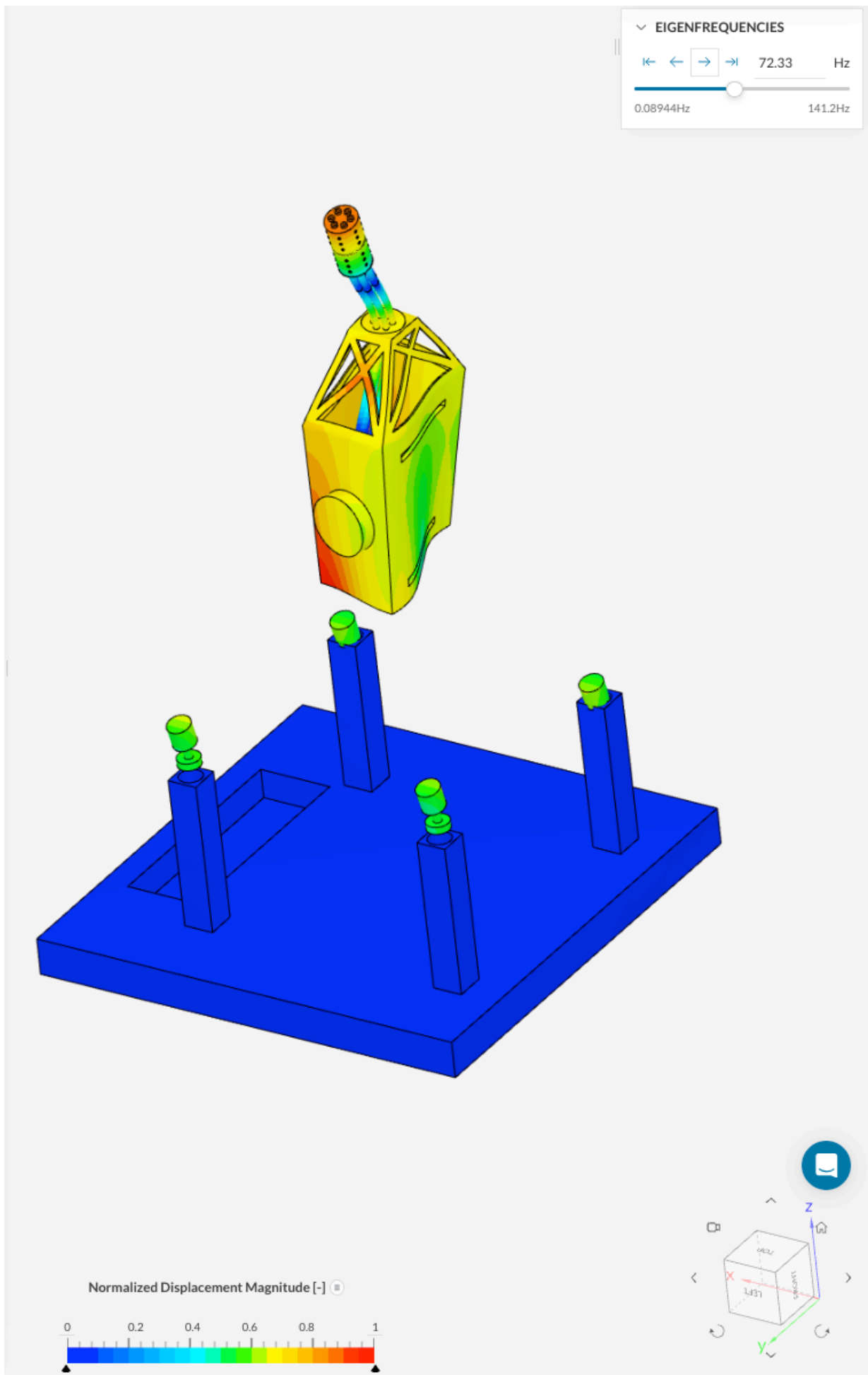


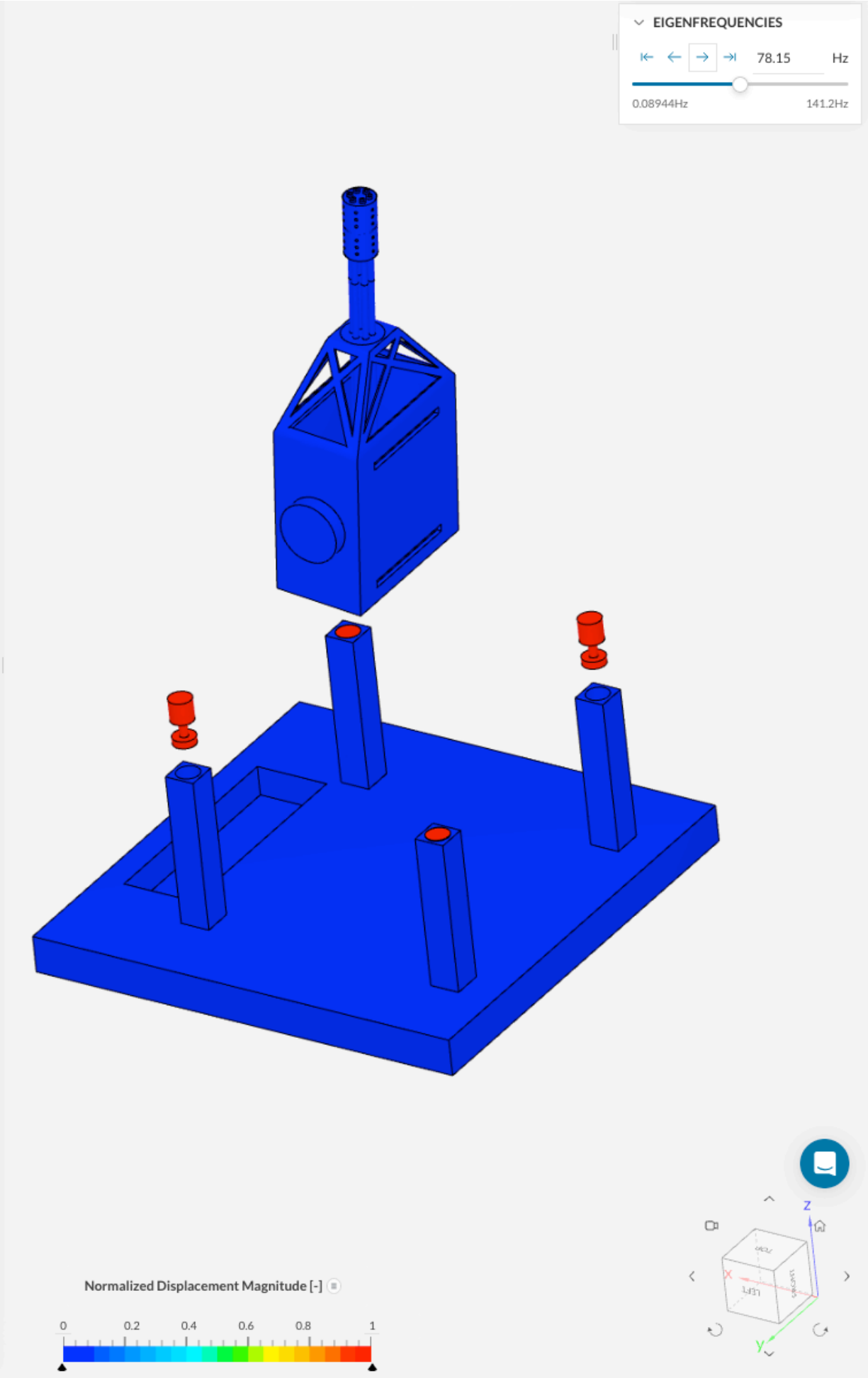


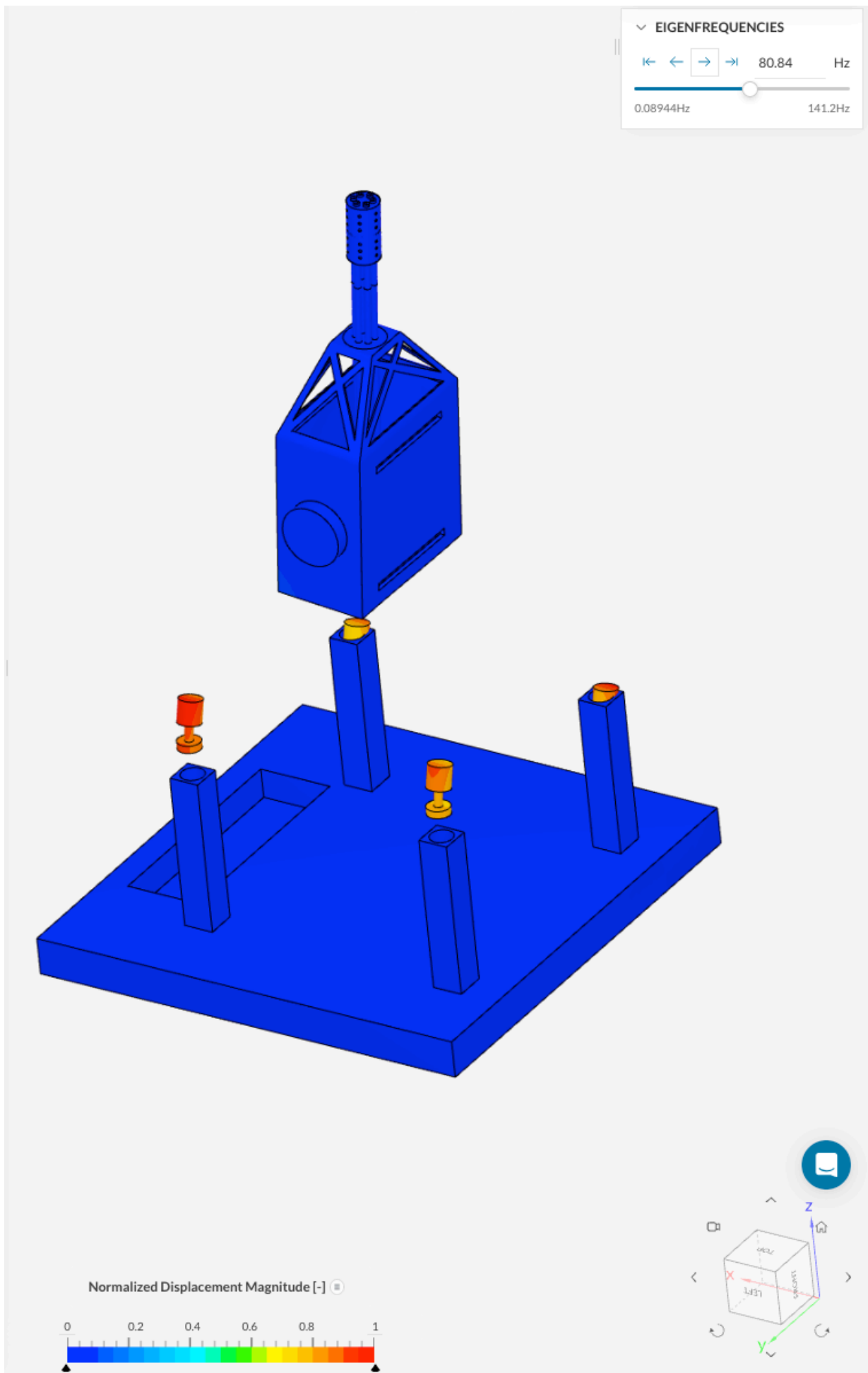


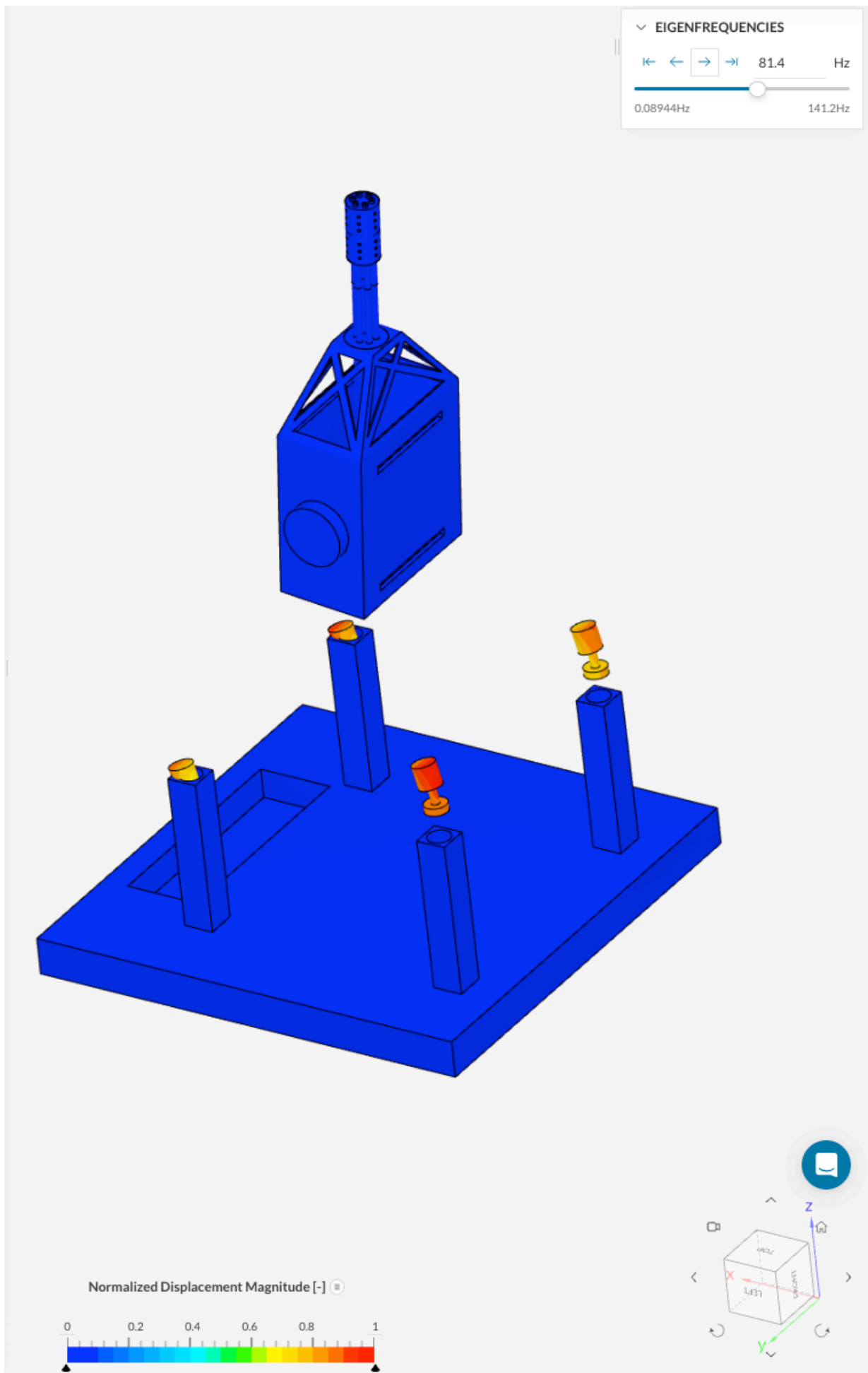












---

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Π ΙΔΙΟΜΟΡΦΕΣ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

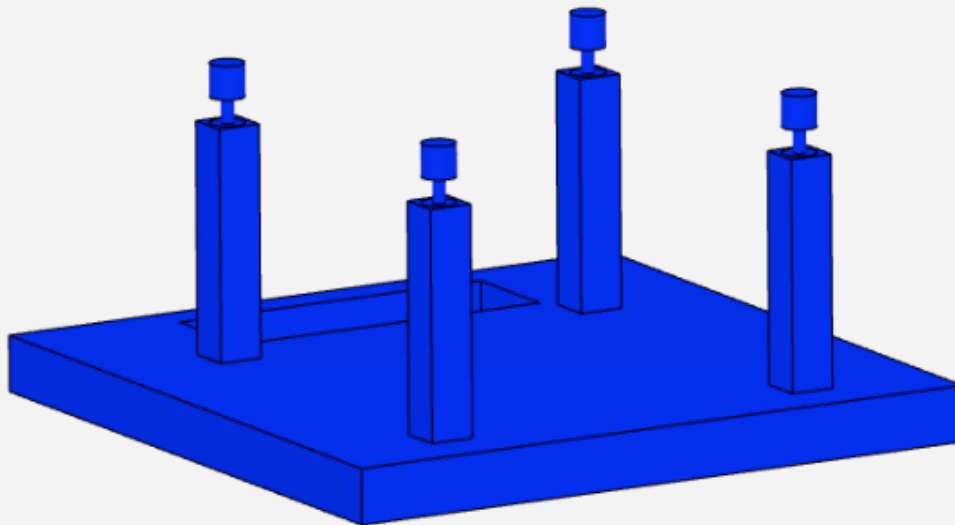
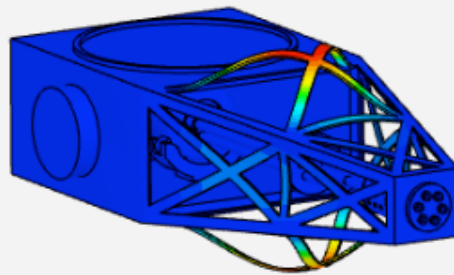
---



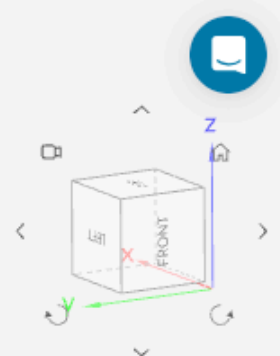
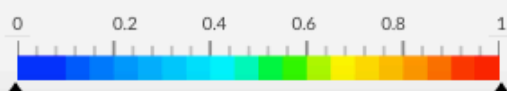


✓ EIGENFREQUENCIES

← → 47.01 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

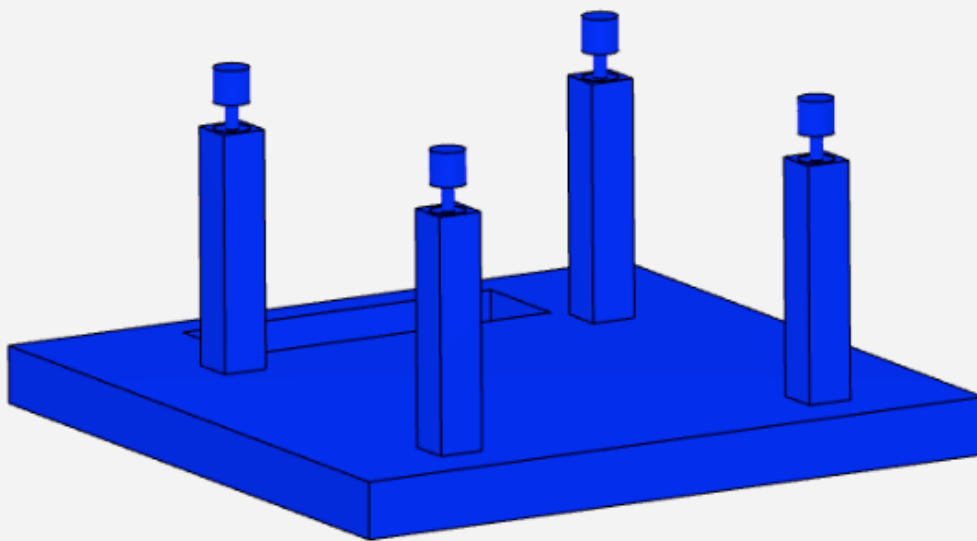
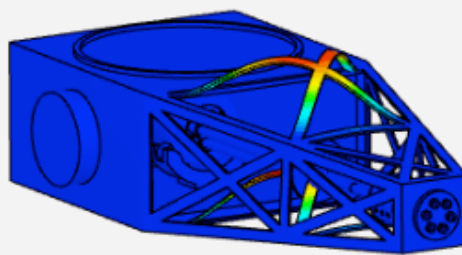


Normalized Displacement Magnitude [-]

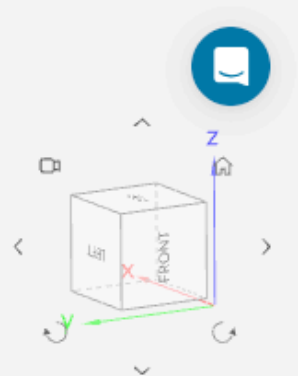
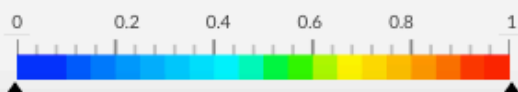


✓ EIGENFREQUENCIES

49.33 Hz  
2.037Hz 142.3Hz



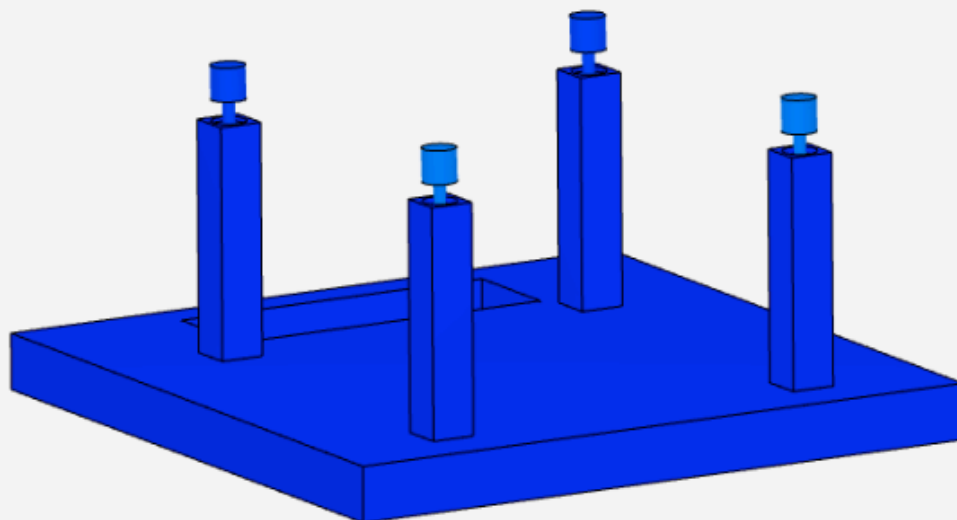
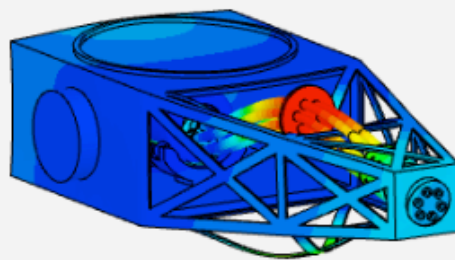
Normalized Displacement Magnitude [-]



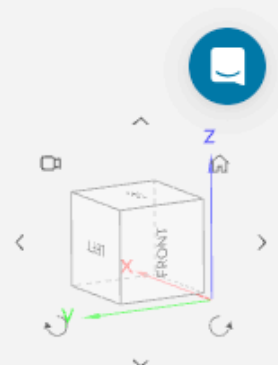
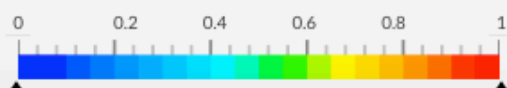
✓ EIGENFREQUENCIES

← ← → → 54.81 Hz

2.037Hz 142.3Hz



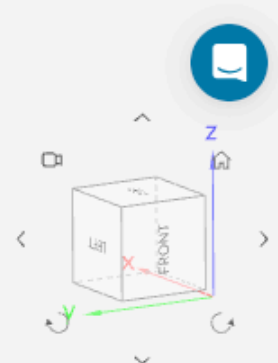
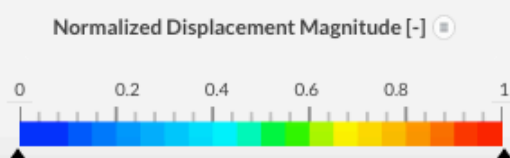
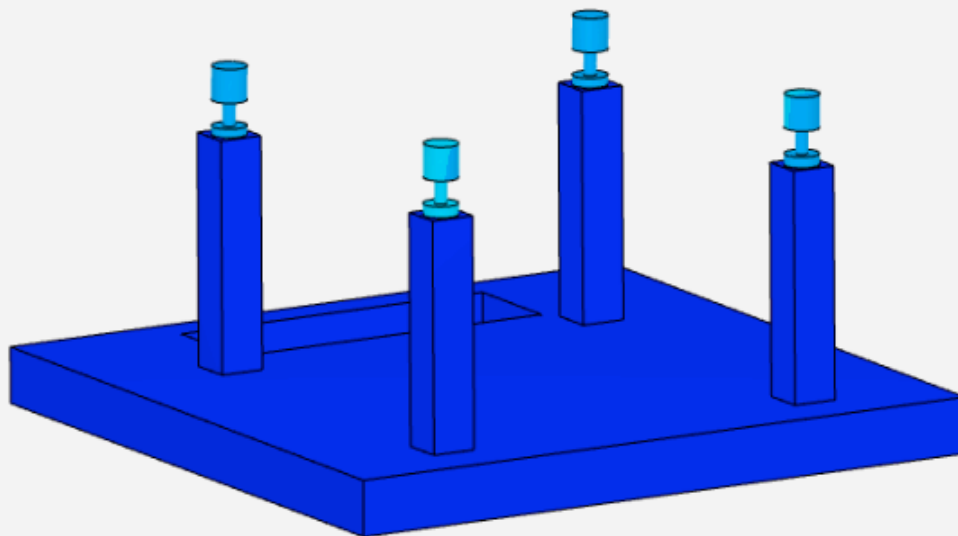
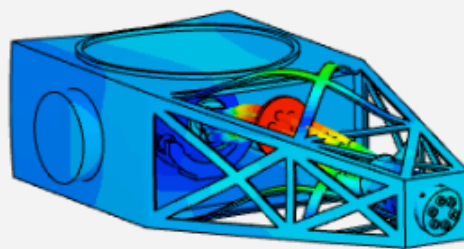
Normalized Displacement Magnitude [-]



✓ EIGENFREQUENCIES

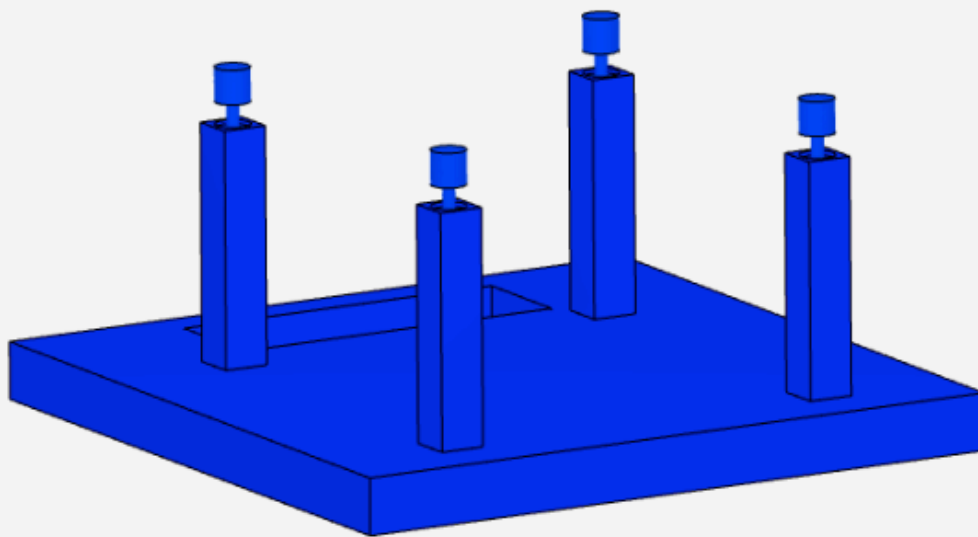
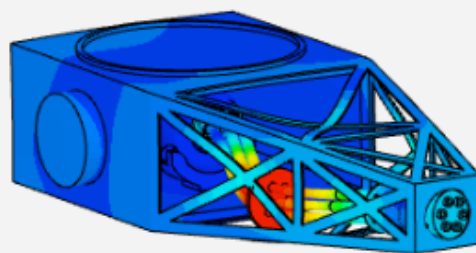
← ← → → 61.73 Hz

2.037Hz 142.3Hz

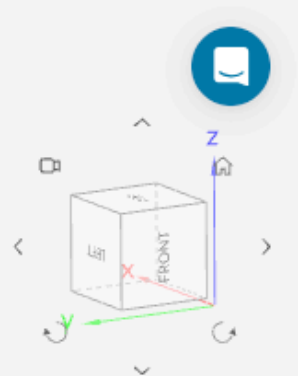
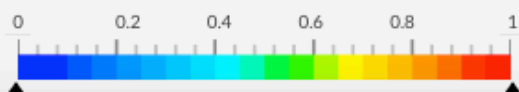


✓ EIGENFREQUENCIES

62.78 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

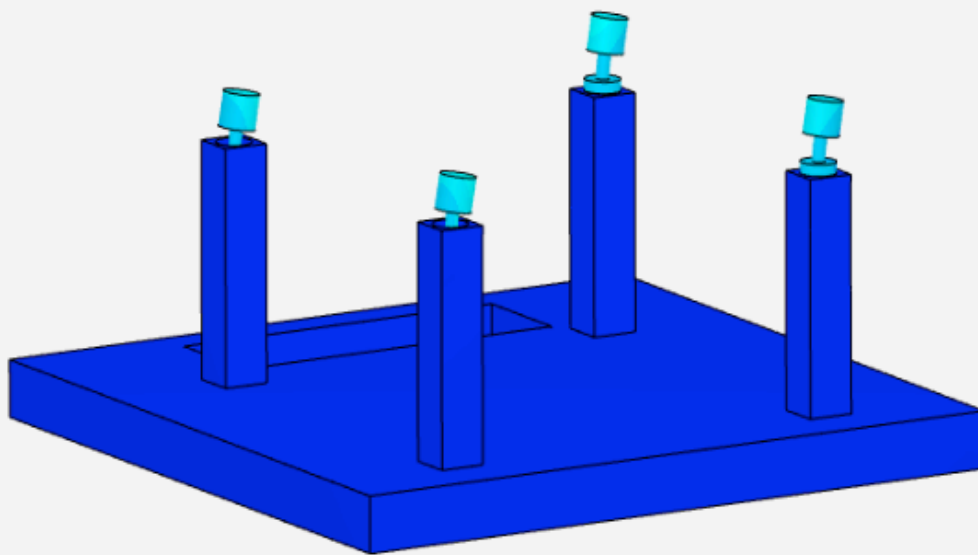
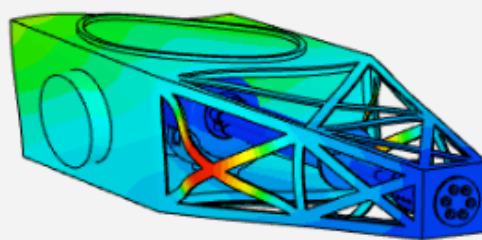


Normalized Displacement Magnitude [-]

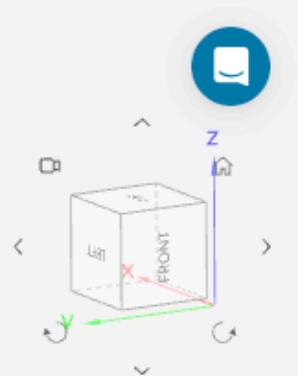
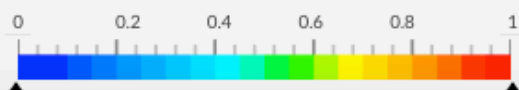


✓ EIGENFREQUENCIES

68.83 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

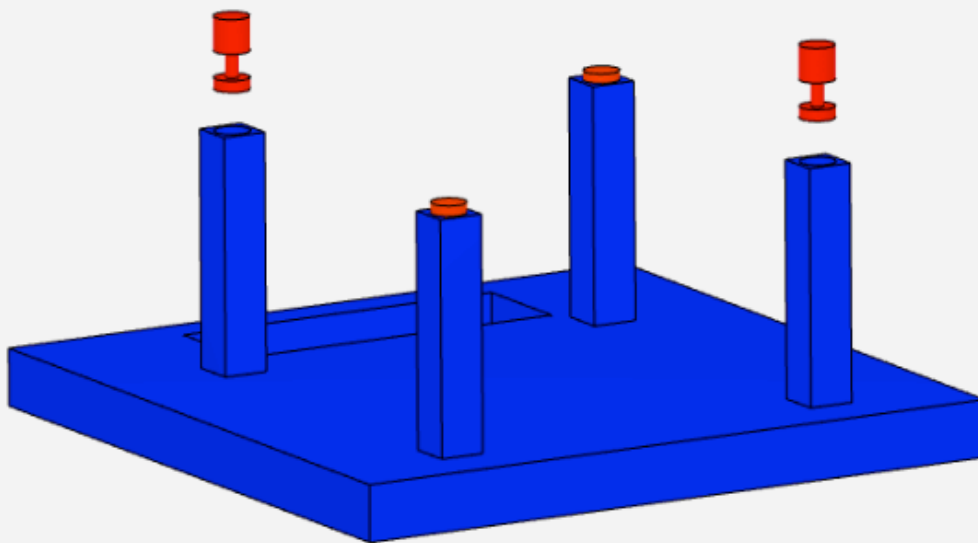
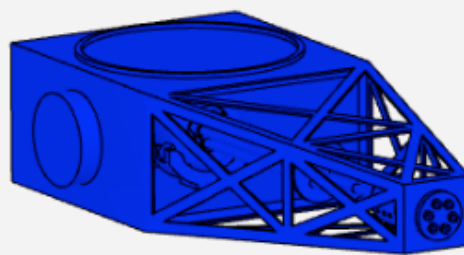


Normalized Displacement Magnitude [-]

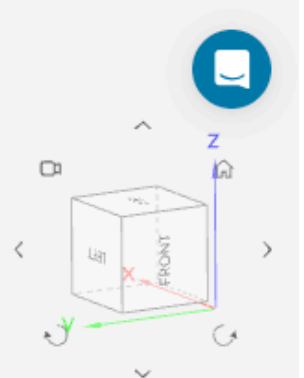
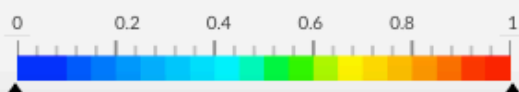


✓ EIGENFREQUENCIES

78.14 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

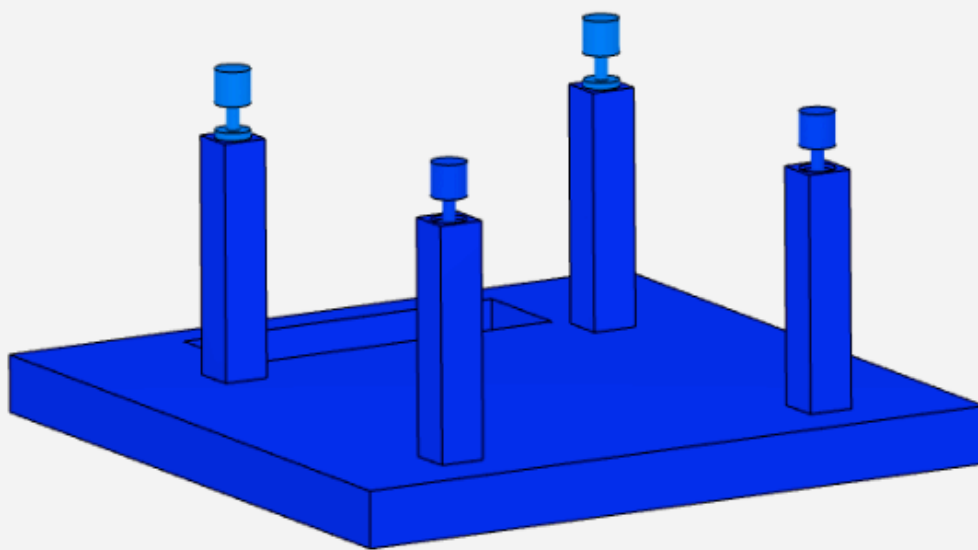
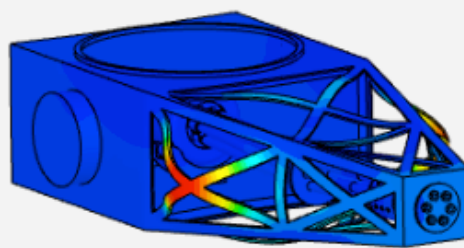


Normalized Displacement Magnitude [-]

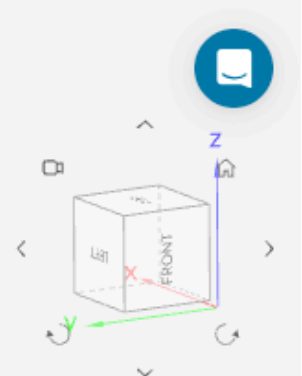
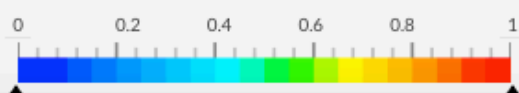


✓ EIGENFREQUENCIES

78.48 Hz  
2.037Hz 142.3Hz



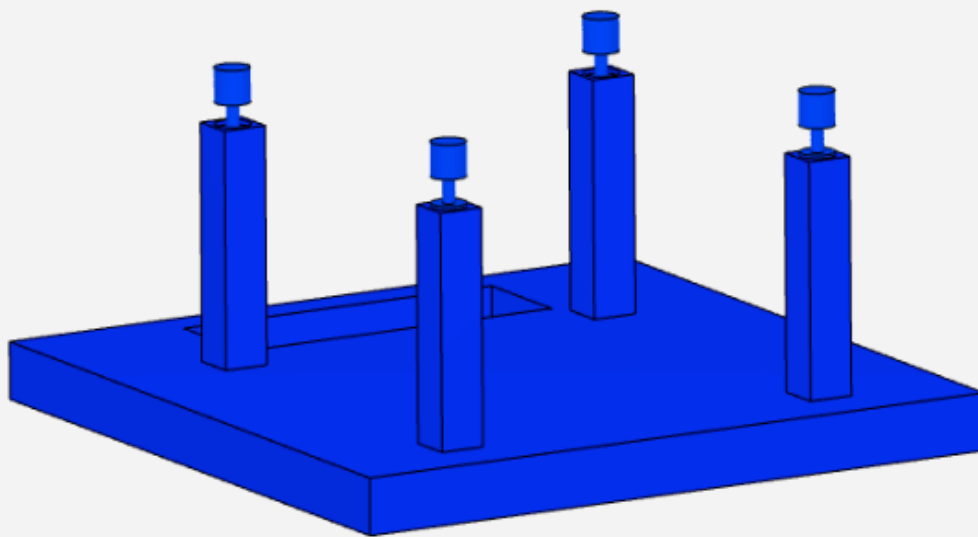
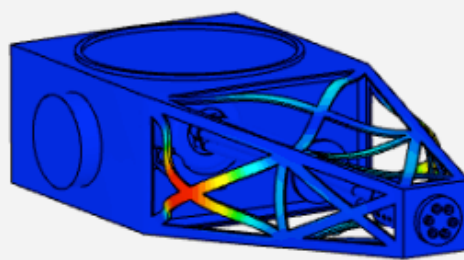
Normalized Displacement Magnitude [-]



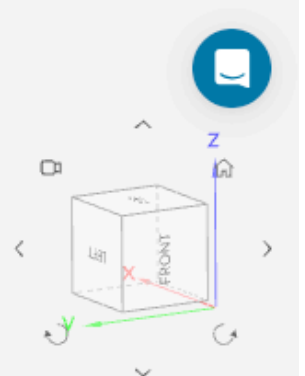
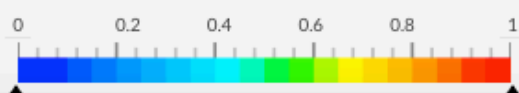


✓ EIGENFREQUENCIES

79.78 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

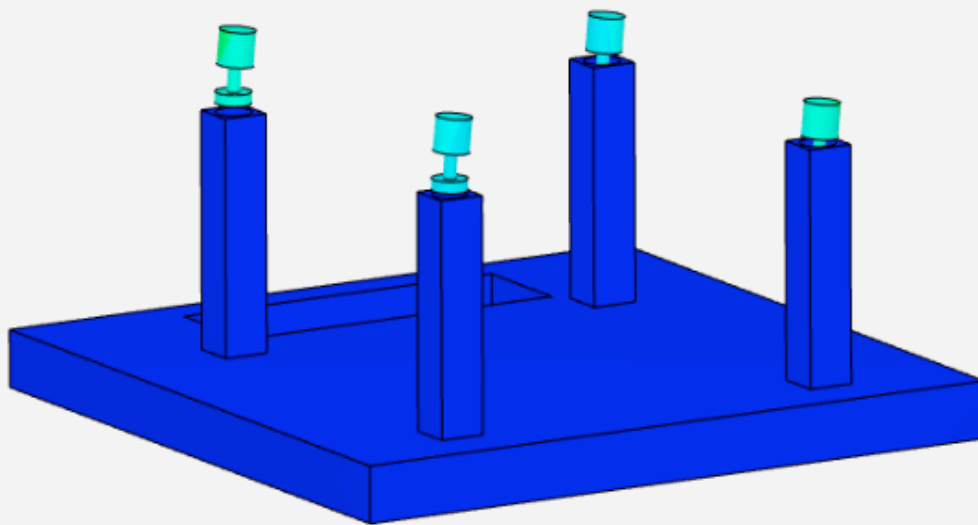
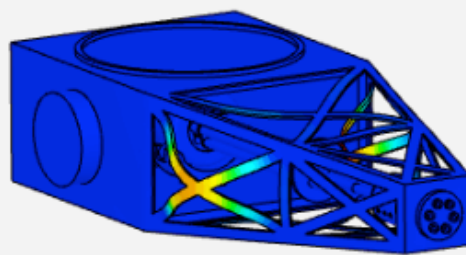


Normalized Displacement Magnitude [-]

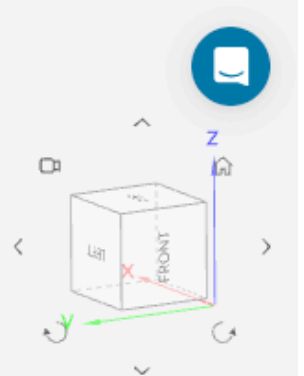
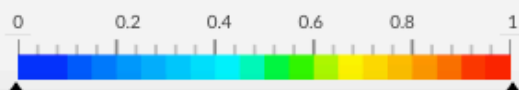


✓ EIGENFREQUENCIES

80.97 Hz  
2.037Hz 142.3Hz

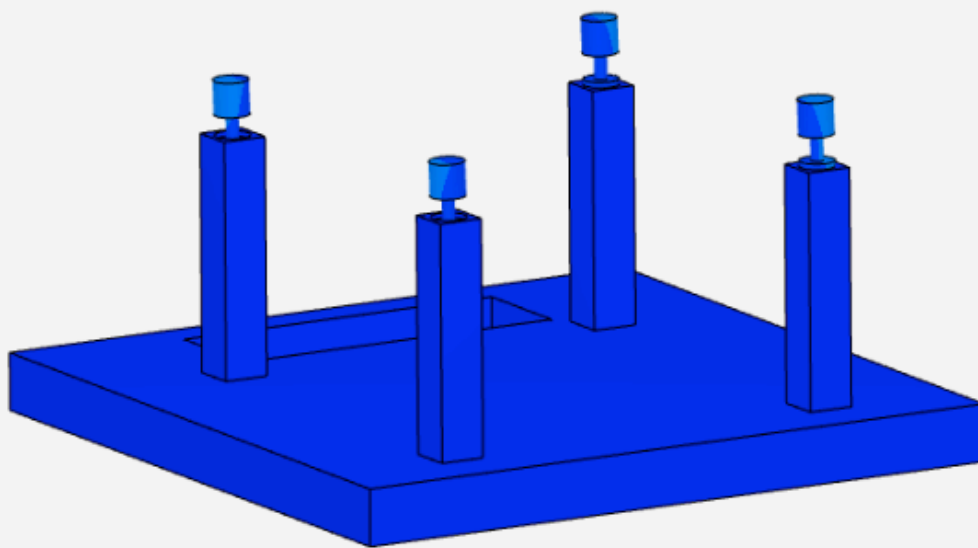
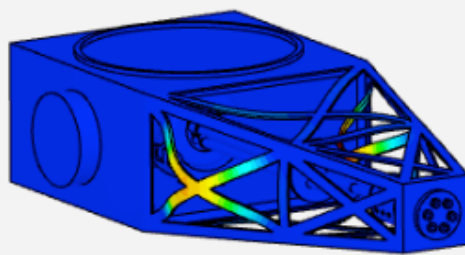


Normalized Displacement Magnitude [-]

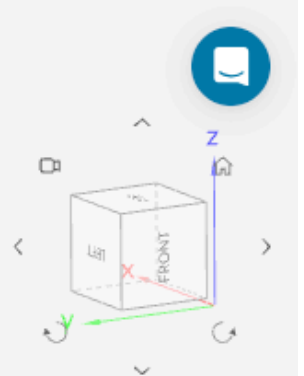
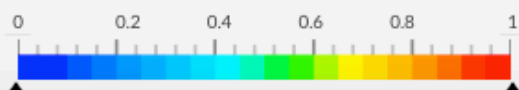


✓ EIGENFREQUENCIES

81.57 Hz  
2.037Hz 142.3Hz



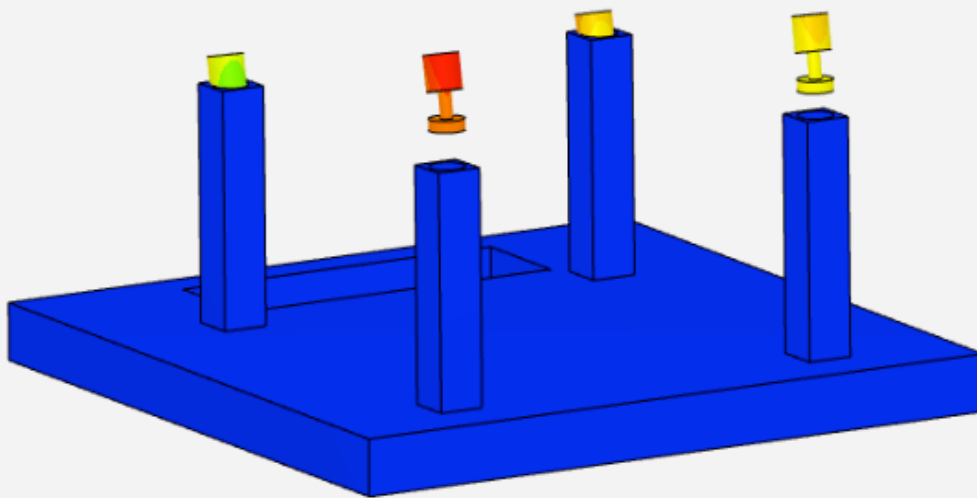
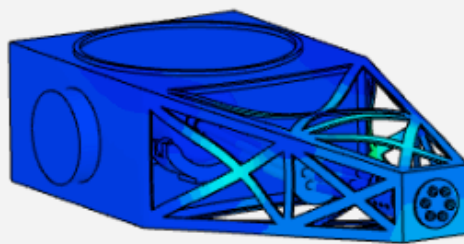
Normalized Displacement Magnitude [-]



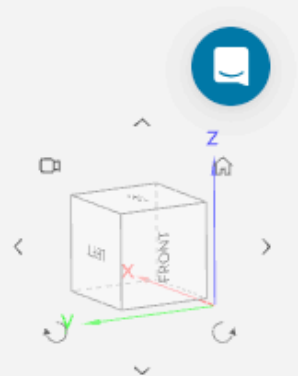
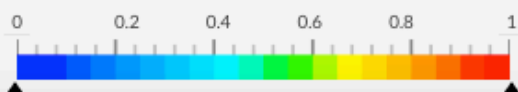
✓ EIGENFREQUENCIES

82.14 Hz

2.037Hz 142.3Hz



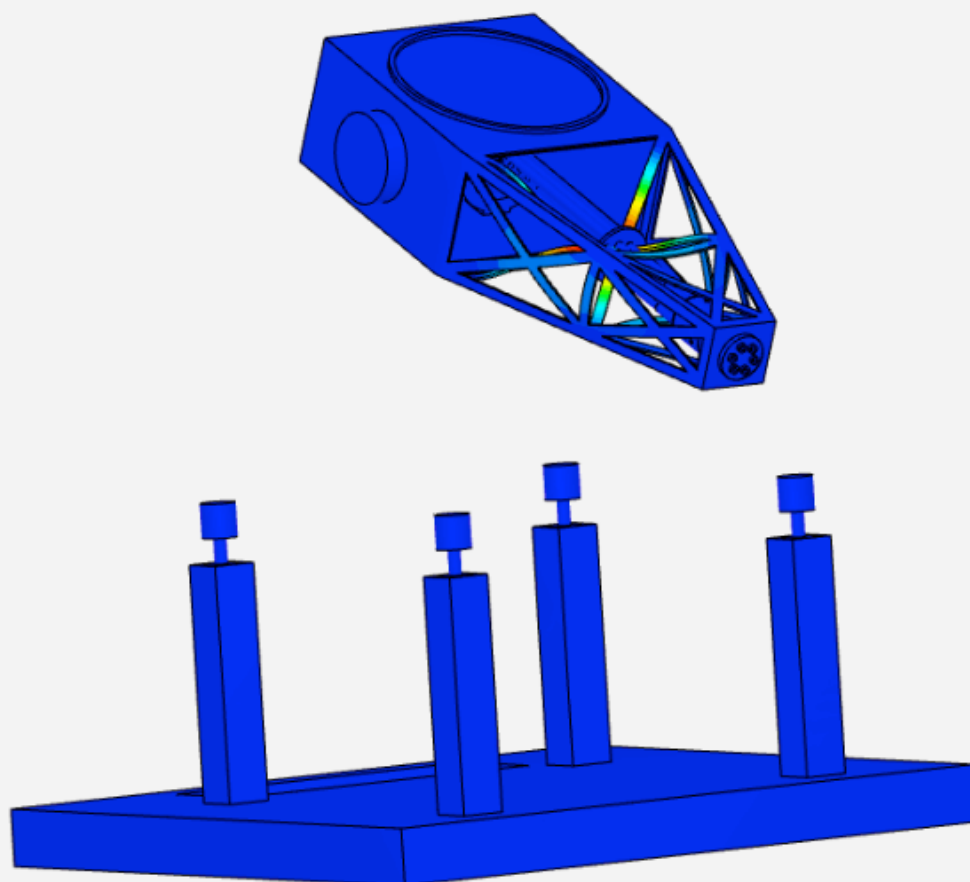
Normalized Displacement Magnitude [-]



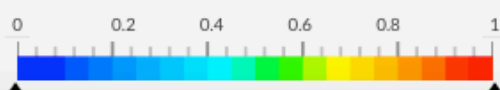
✓ EIGENFREQUENCIES

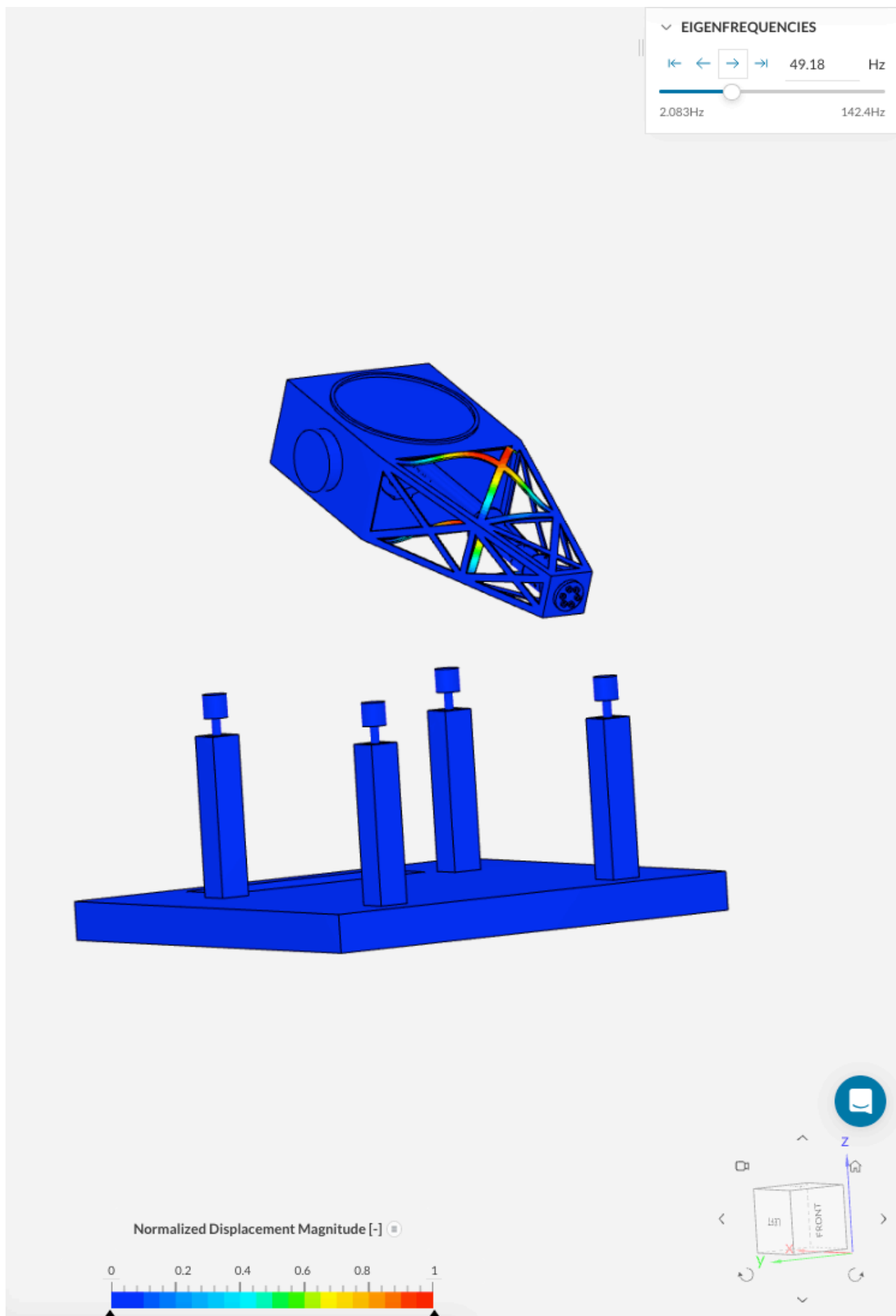
46.9 Hz

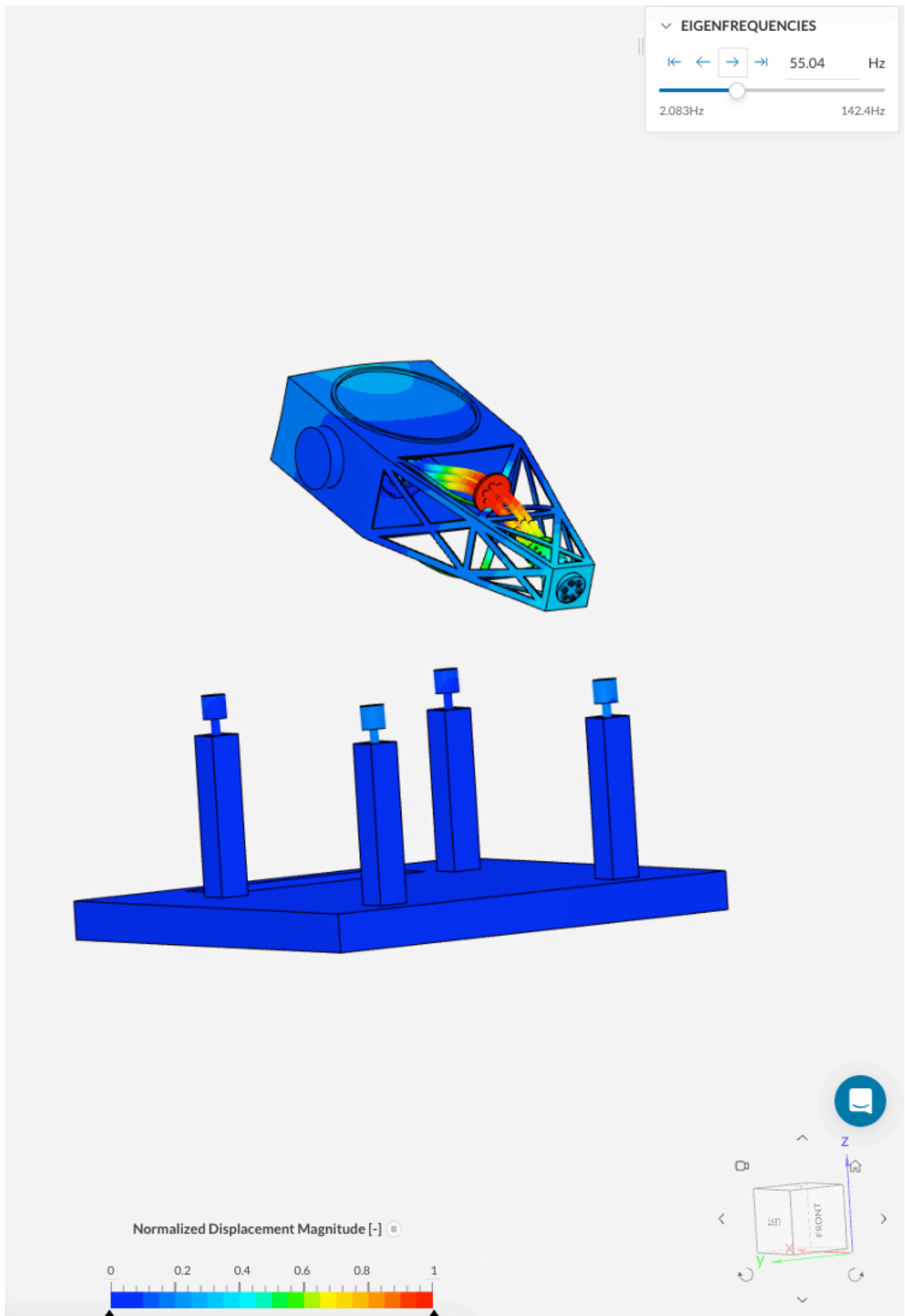
2.083Hz 142.4Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]



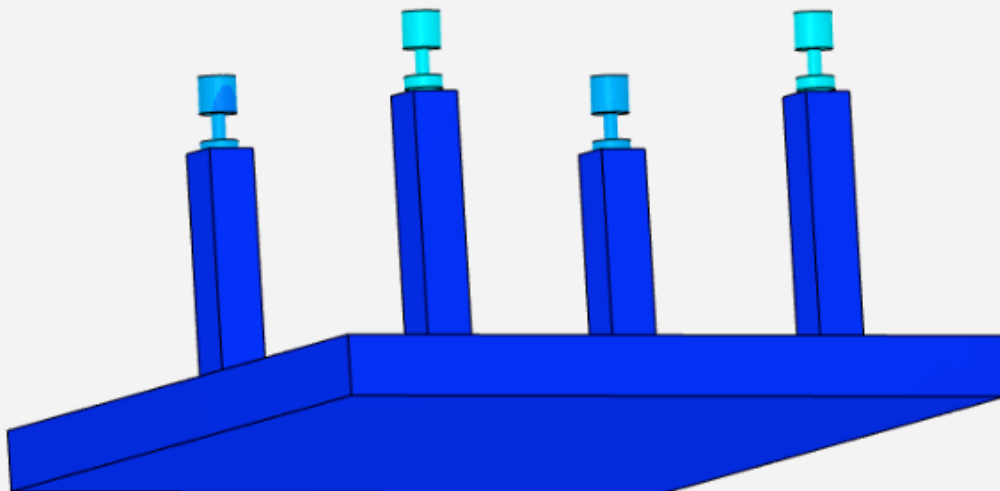
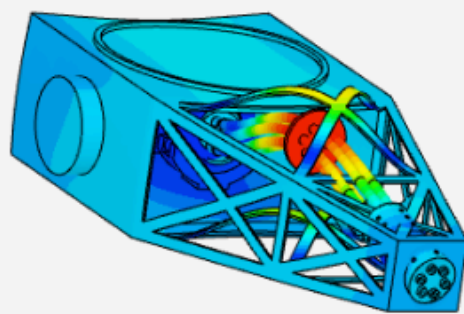




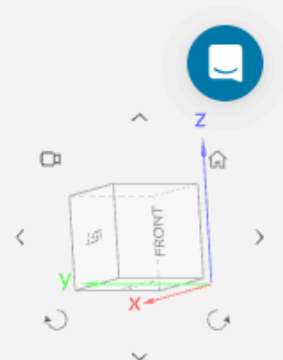
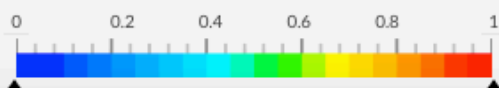
▼ EIGENFREQUENCIES

62.06 Hz

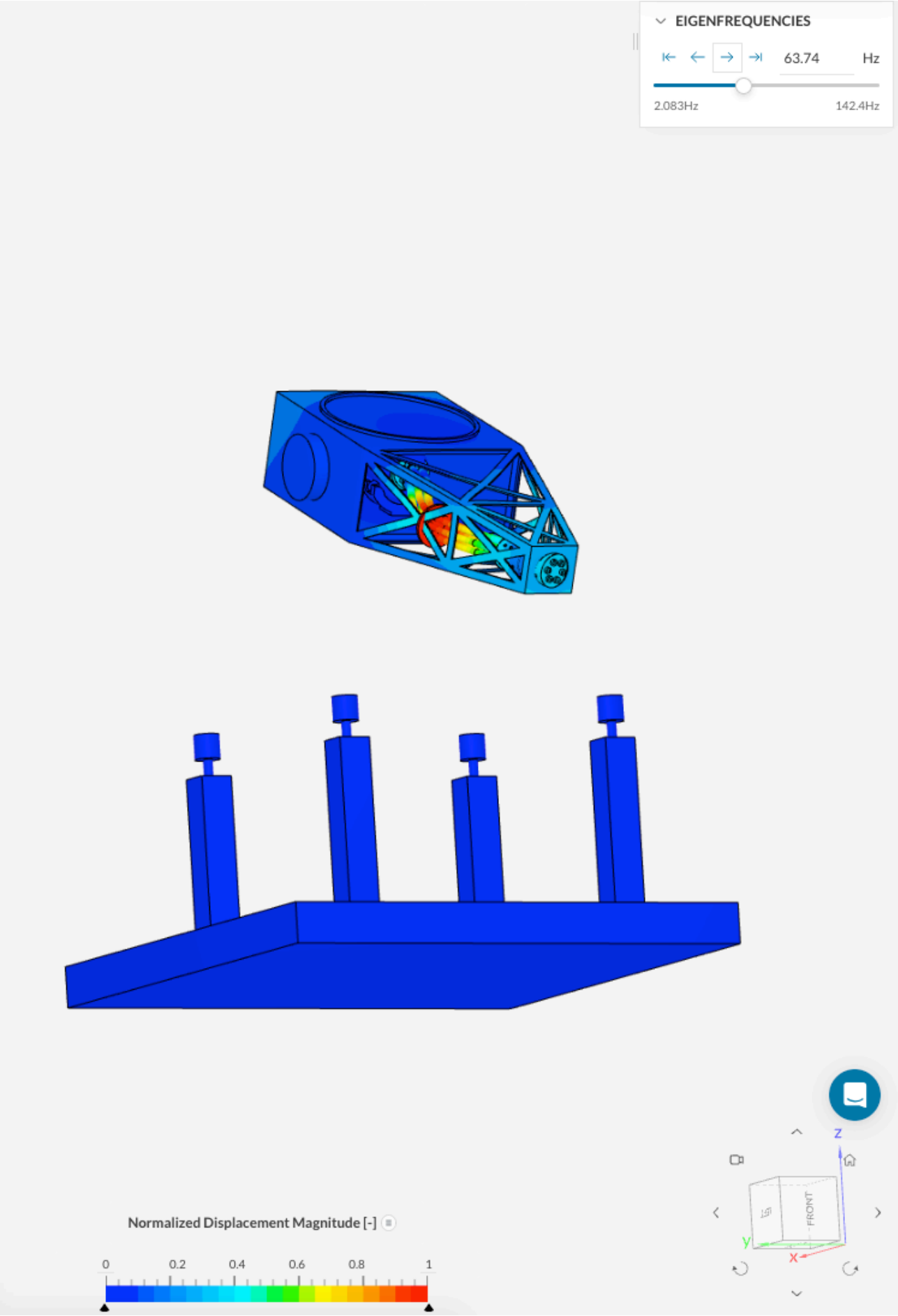
2.083Hz 142.4Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]





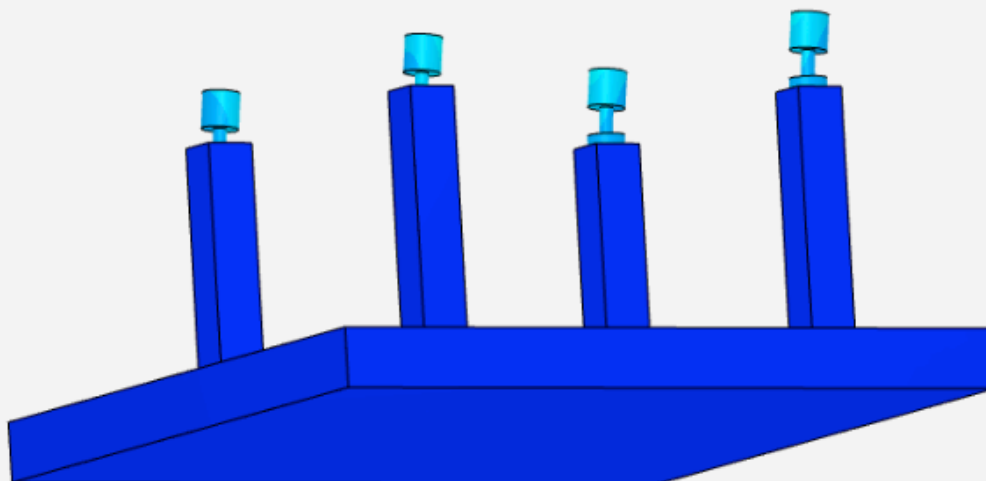
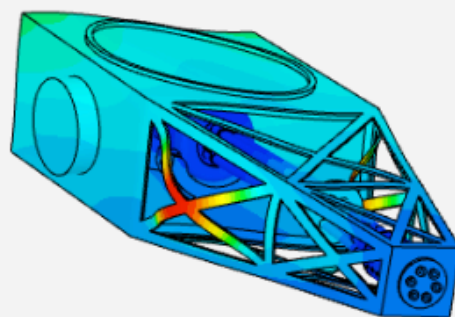


✓ EIGENFREQUENCIES

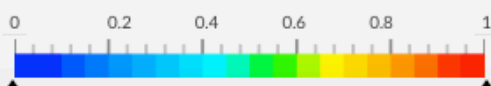
70.42 Hz

2.083Hz

142.4Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]

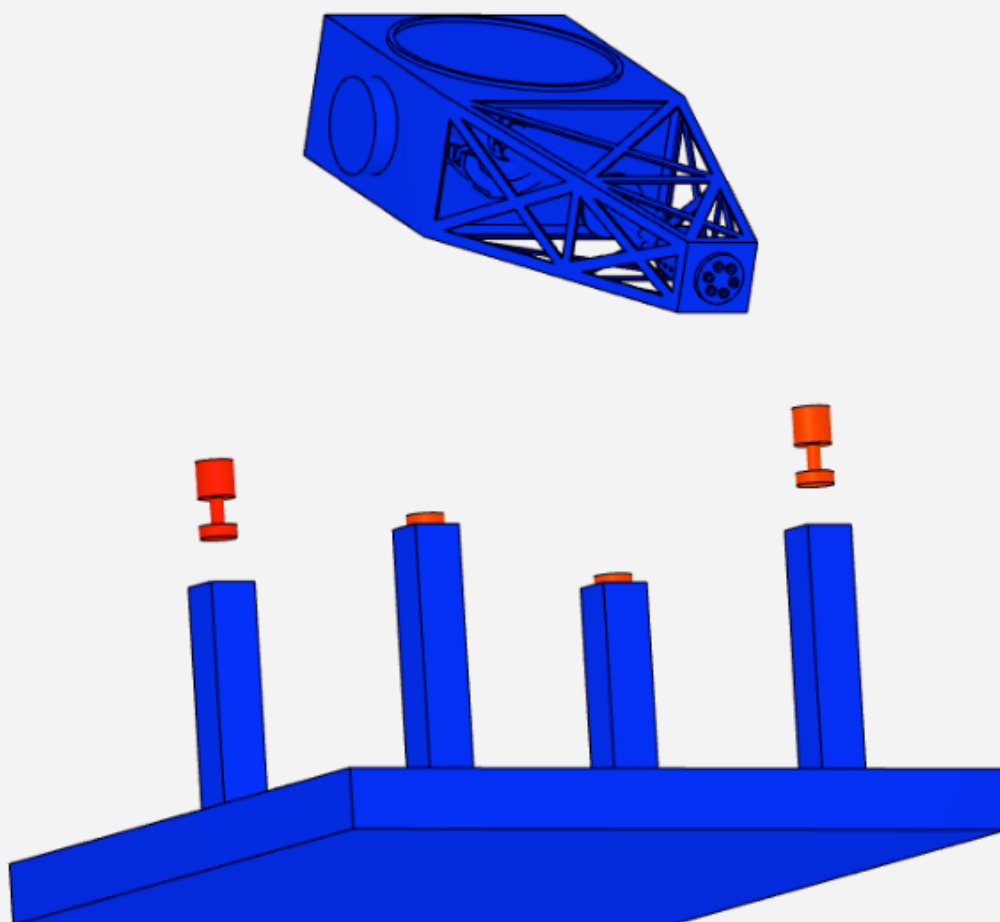


✓ EIGENFREQUENCIES

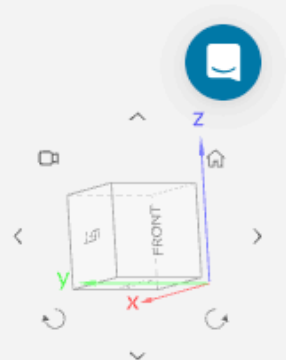
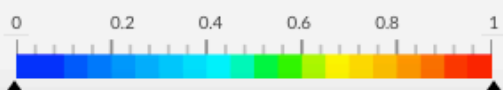
← → 78.13 Hz

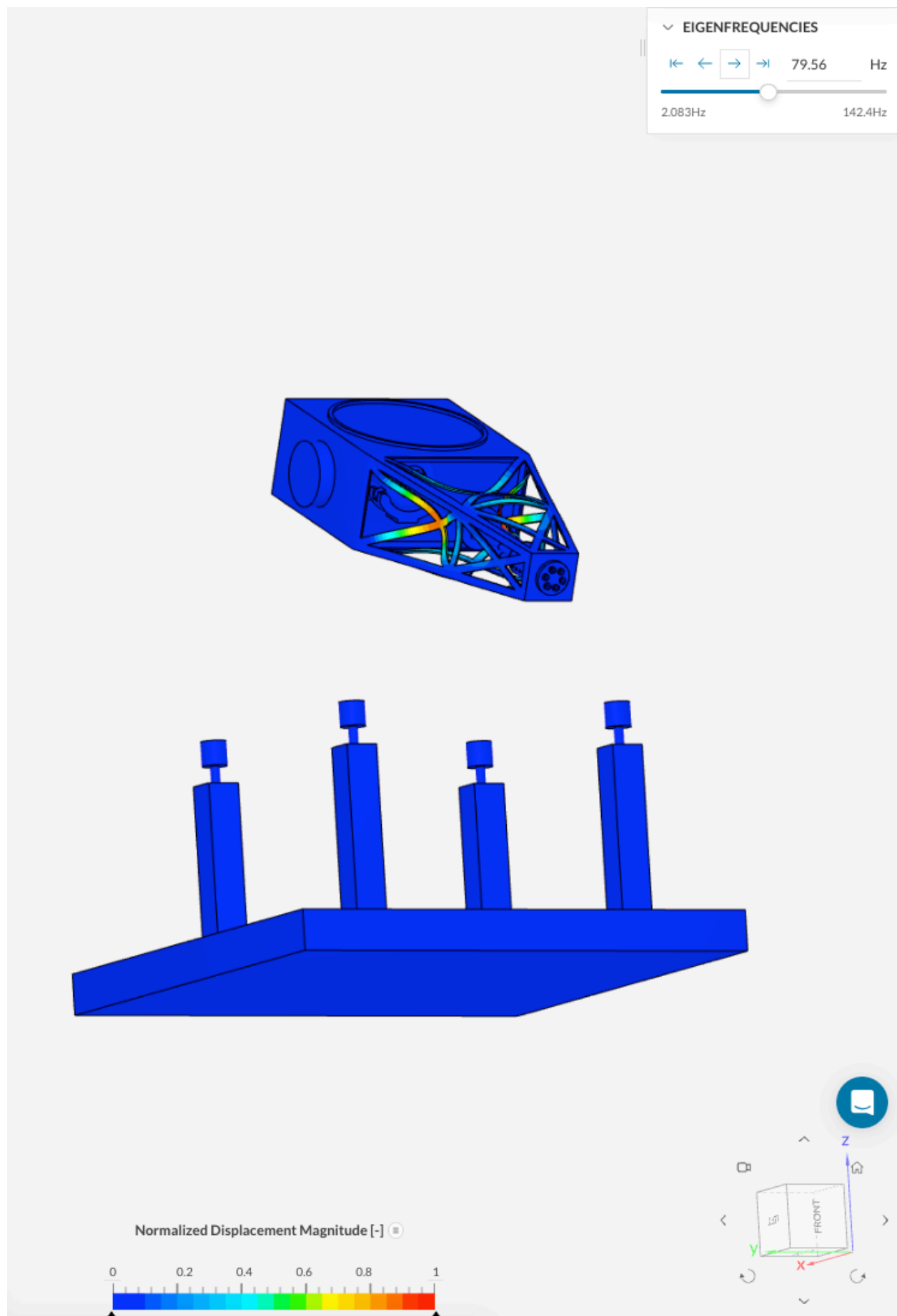
2.083Hz

142.4Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]

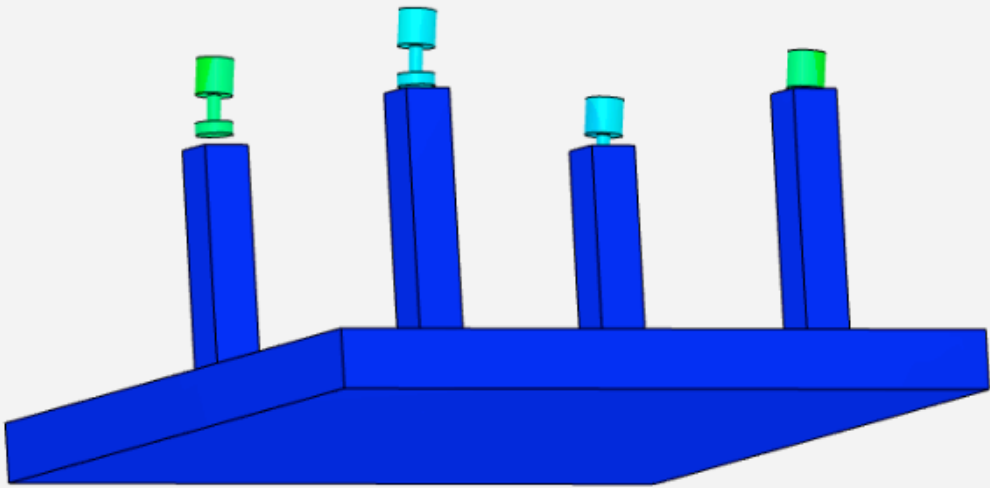
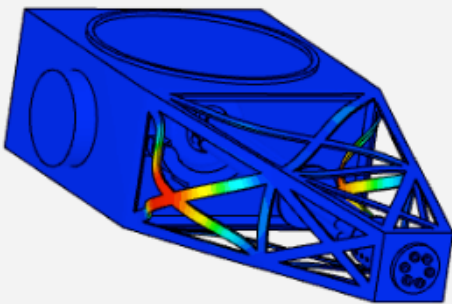




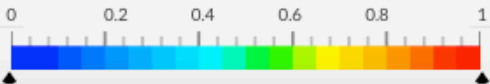
▼ EIGENFREQUENCIES

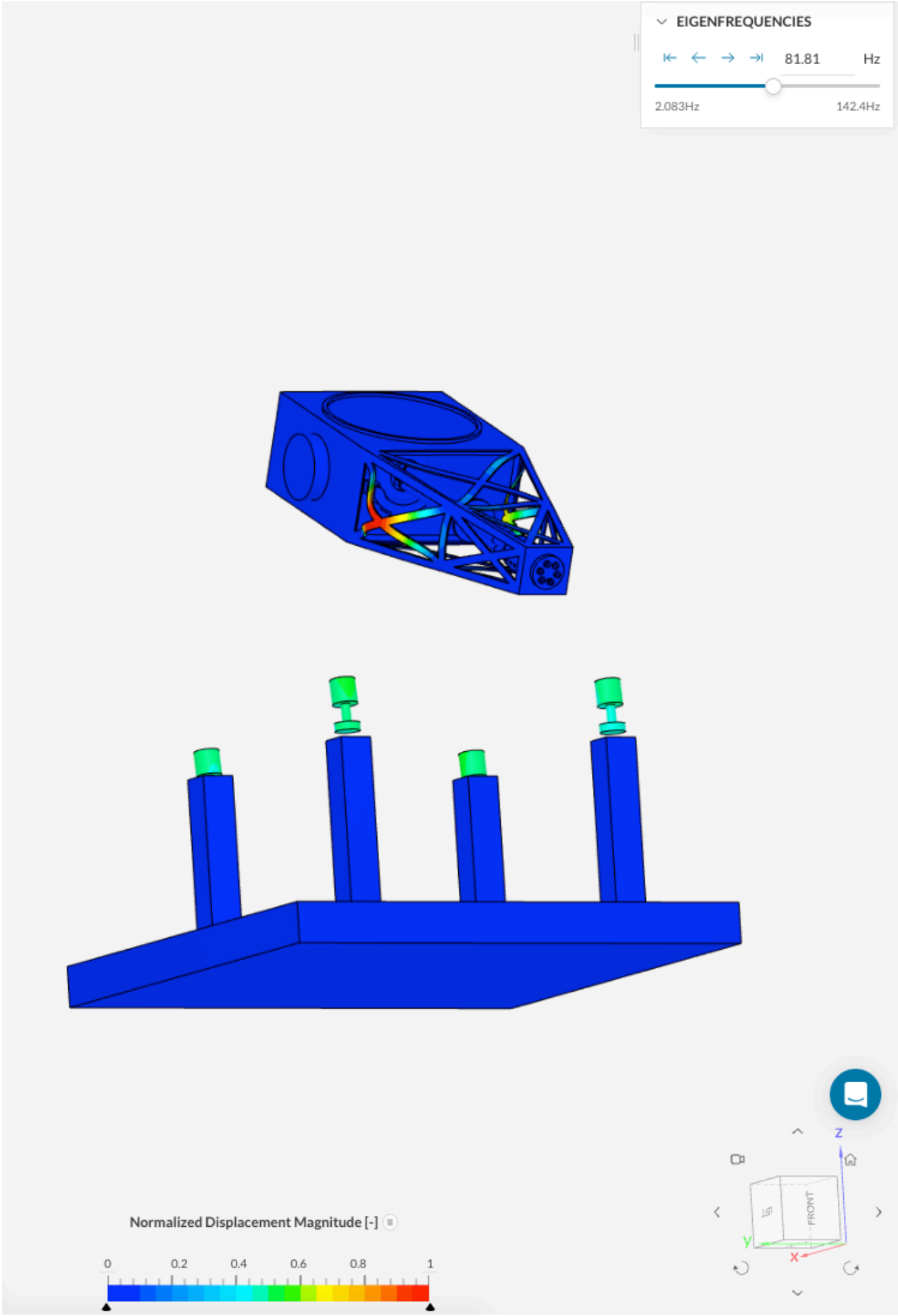
81.18 Hz

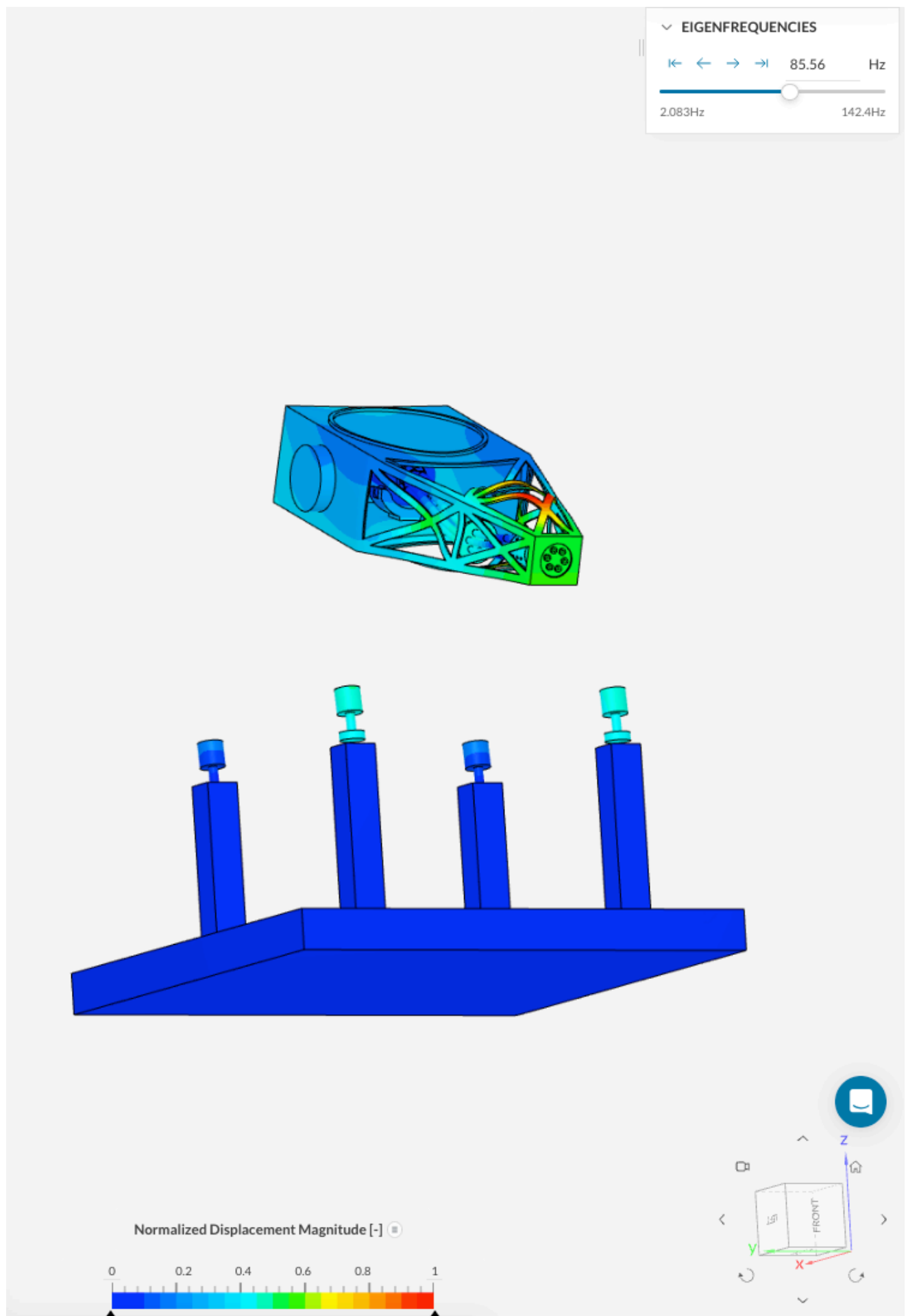
2.083Hz 142.4Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]





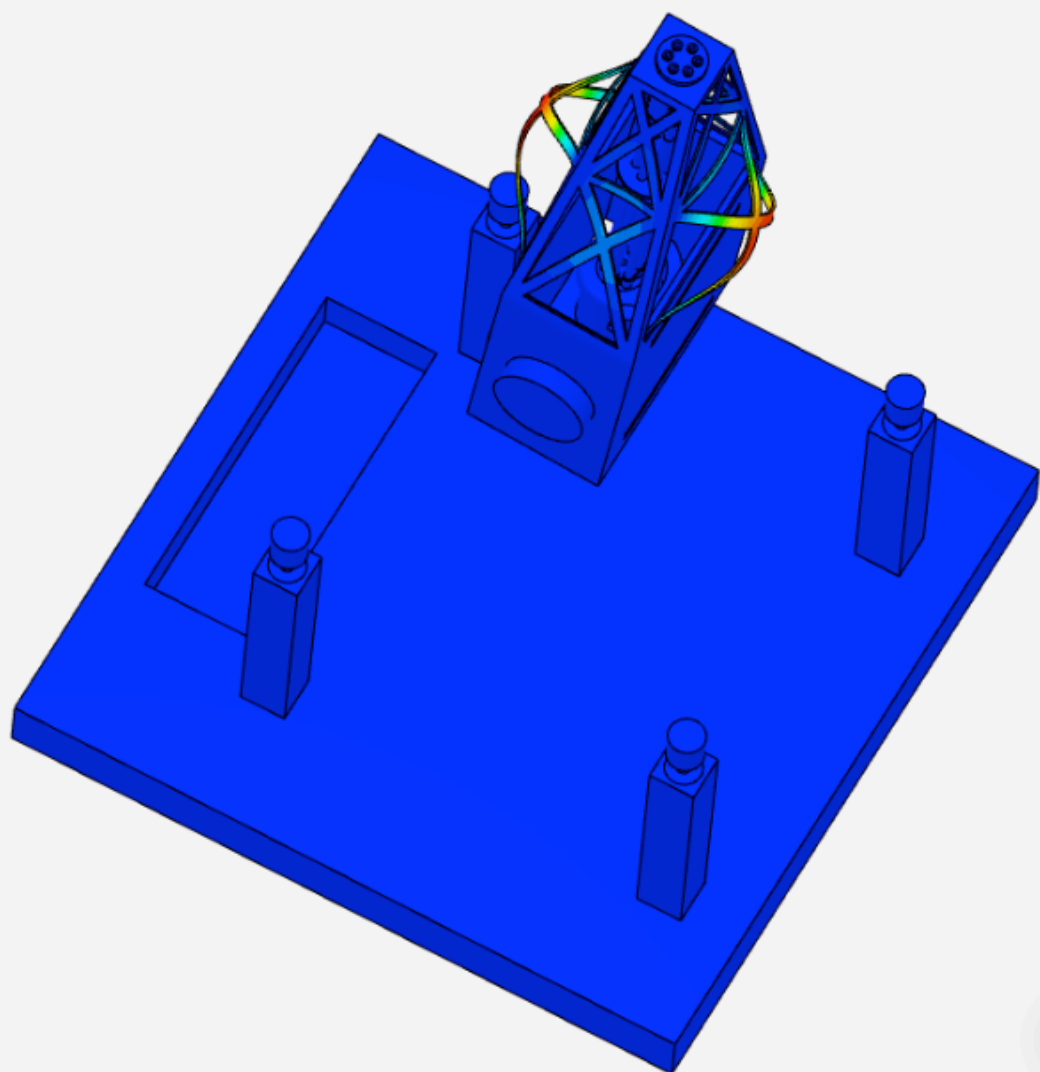


✓ EIGENFREQUENCIES

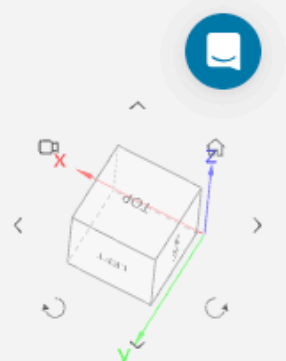
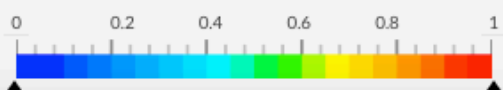
← → 47.33 Hz

1.845Hz

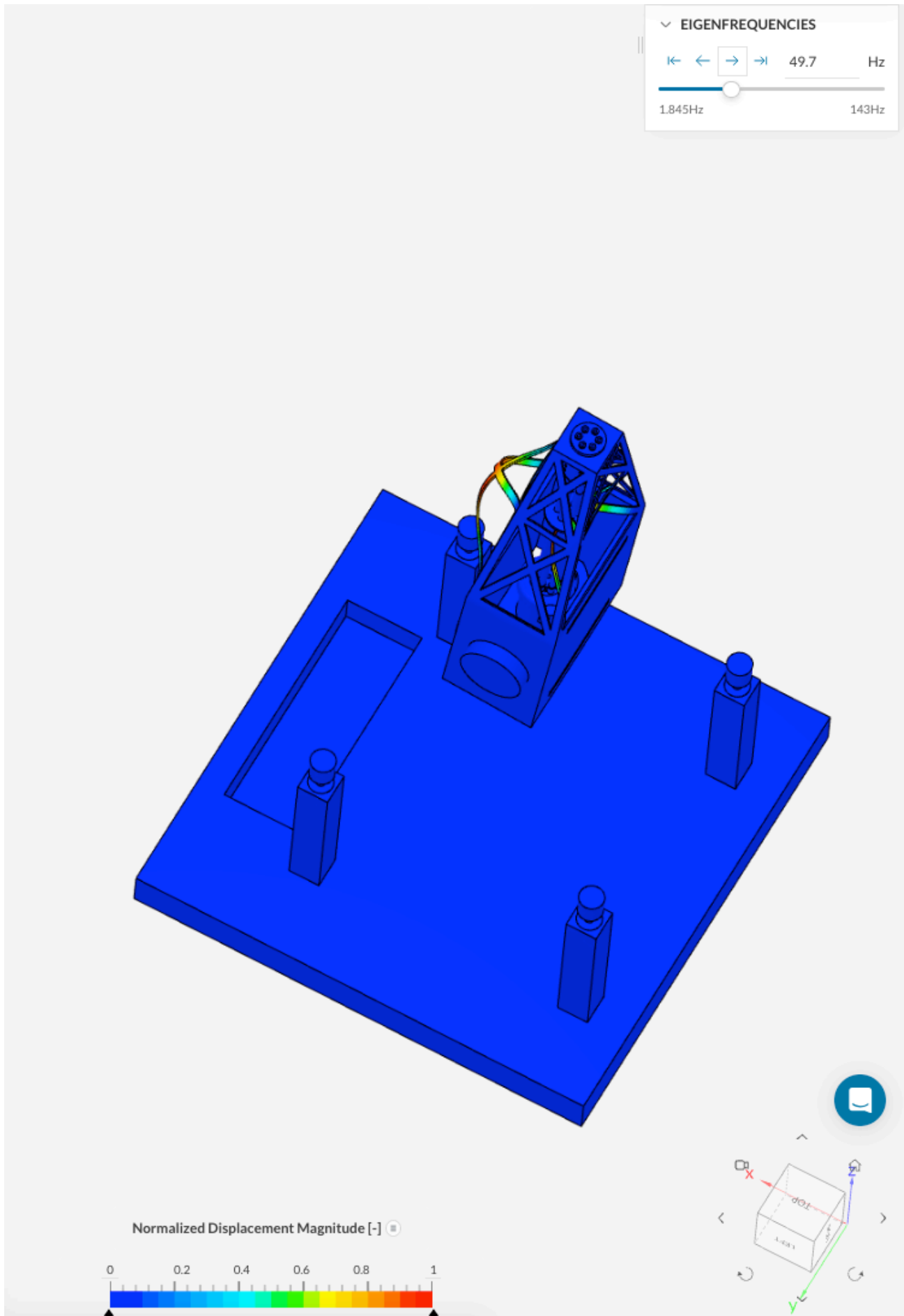
143Hz



Normalized Displacement Magnitude [-]



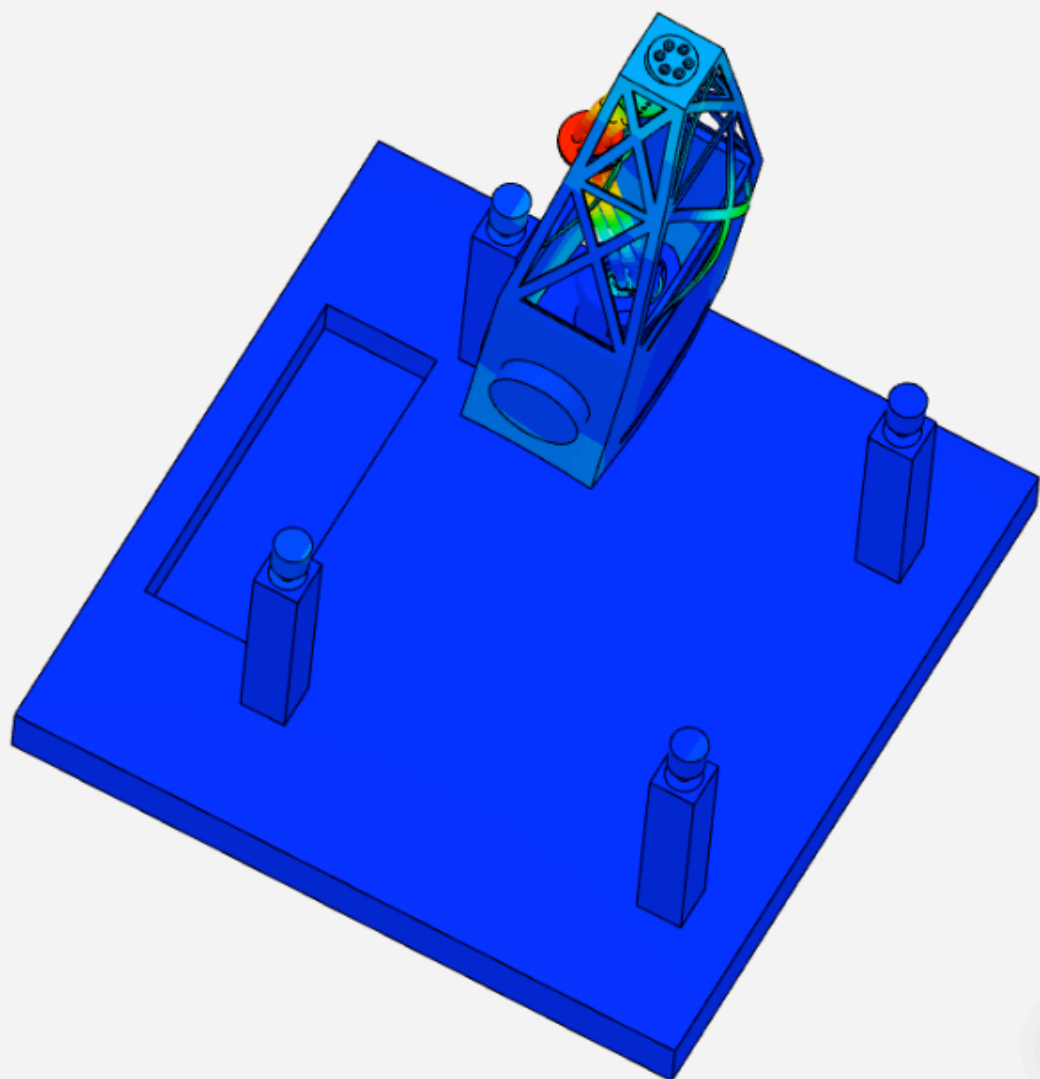




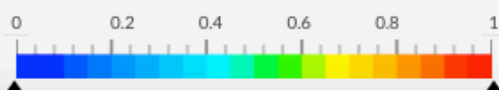
▼ EIGENFREQUENCIES

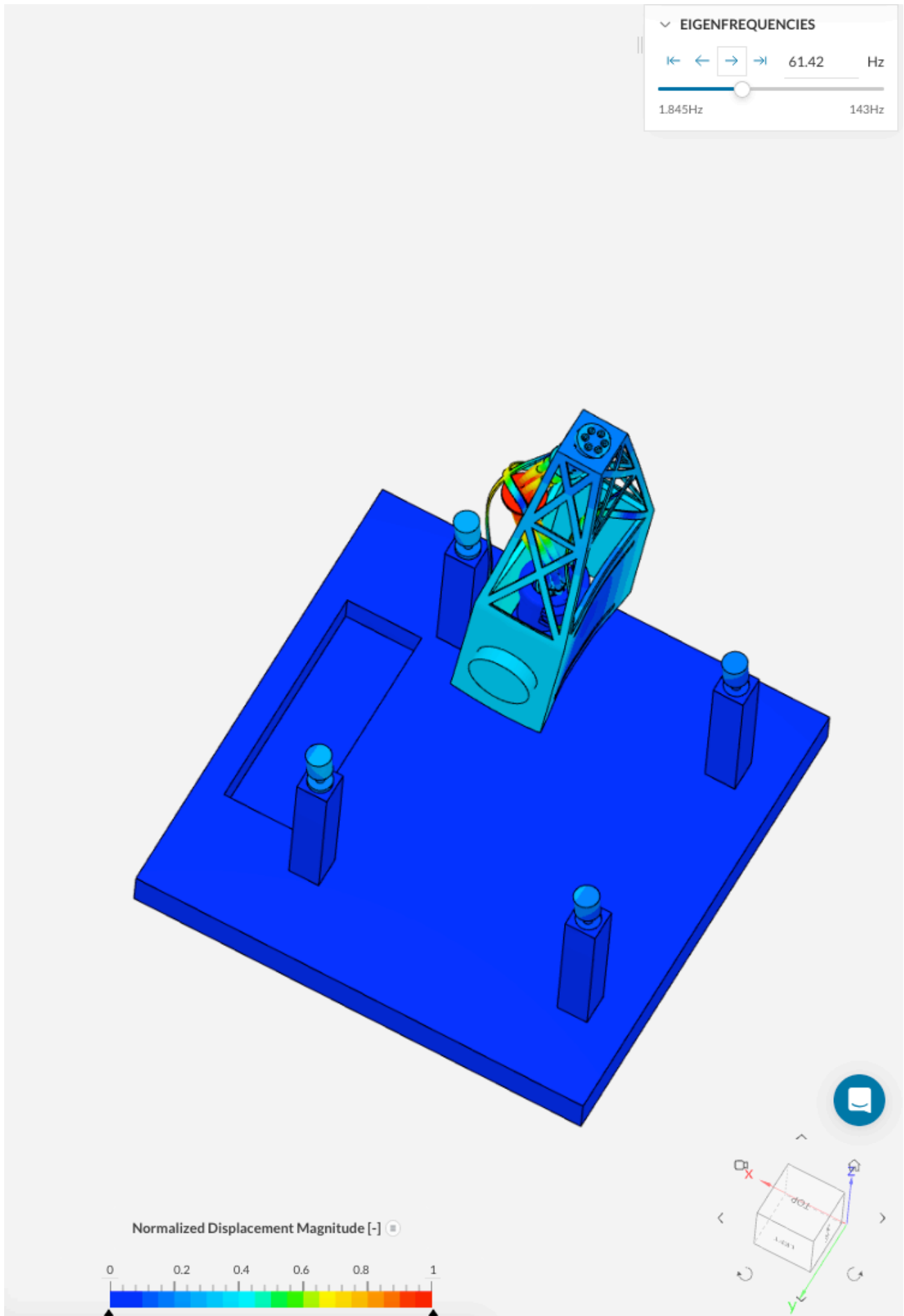
1.845Hz   56.04 Hz   143Hz

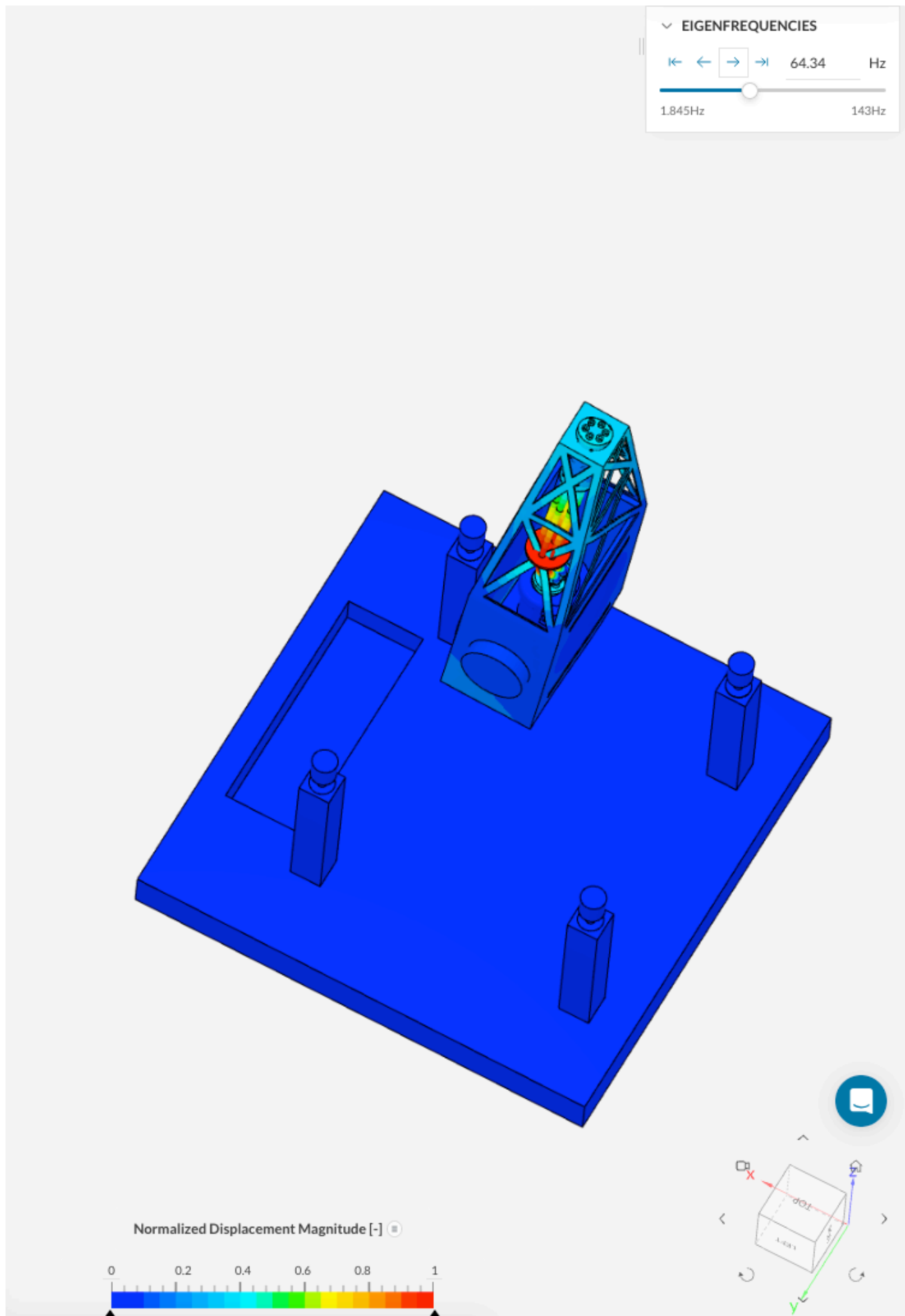
Navigation icons: back, forward, first, last, and a slider control.

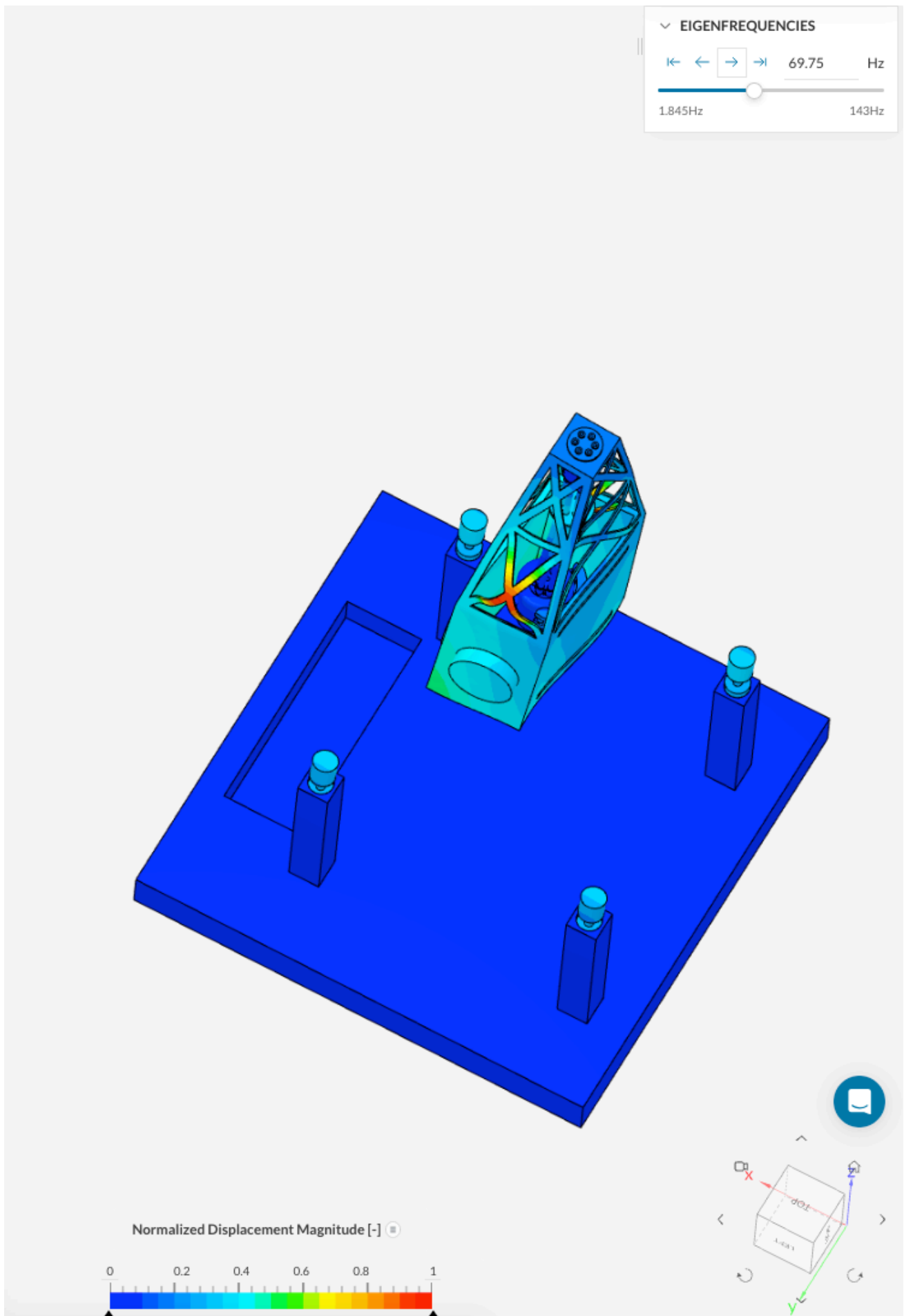


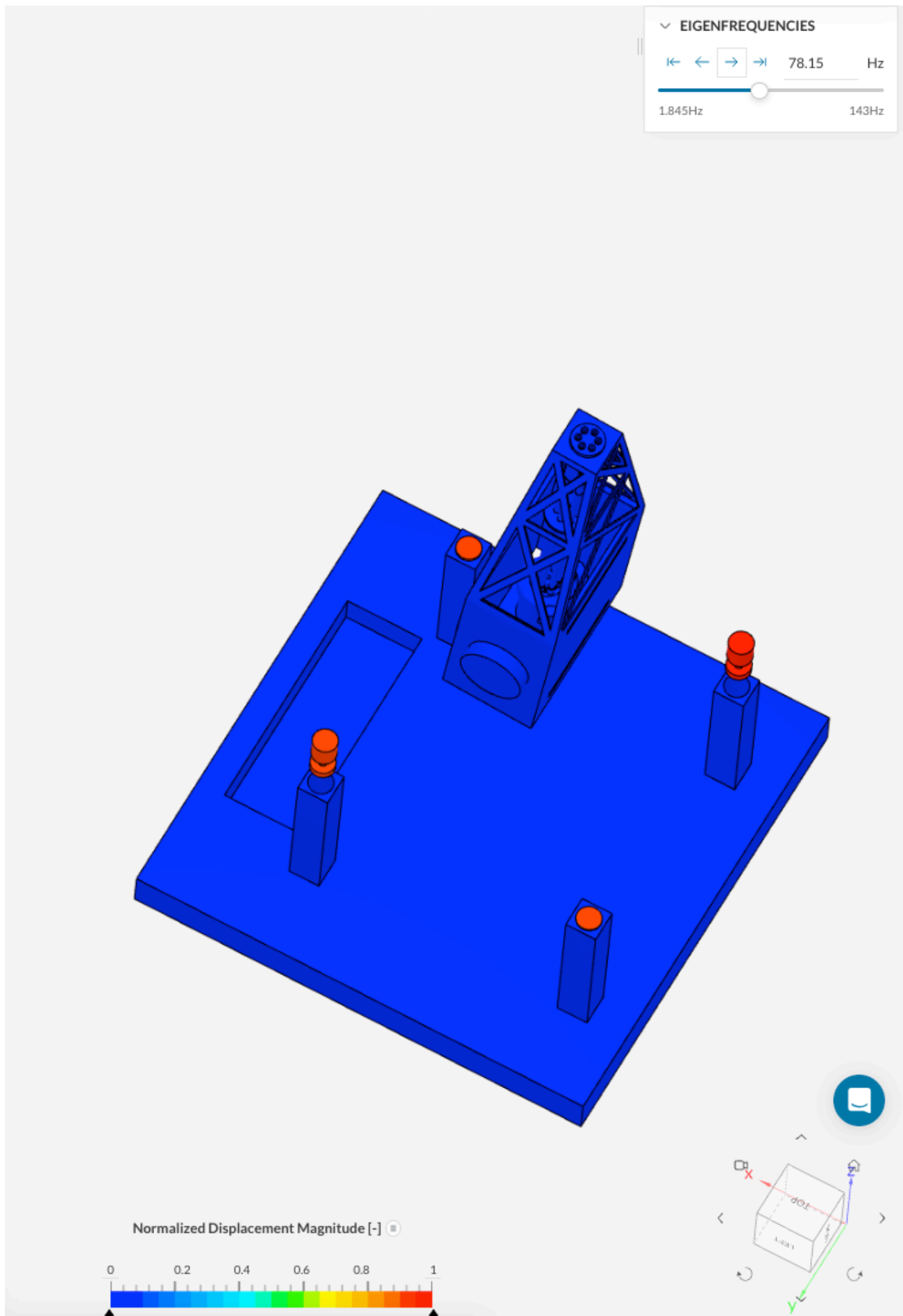
Normalized Displacement Magnitude [-]

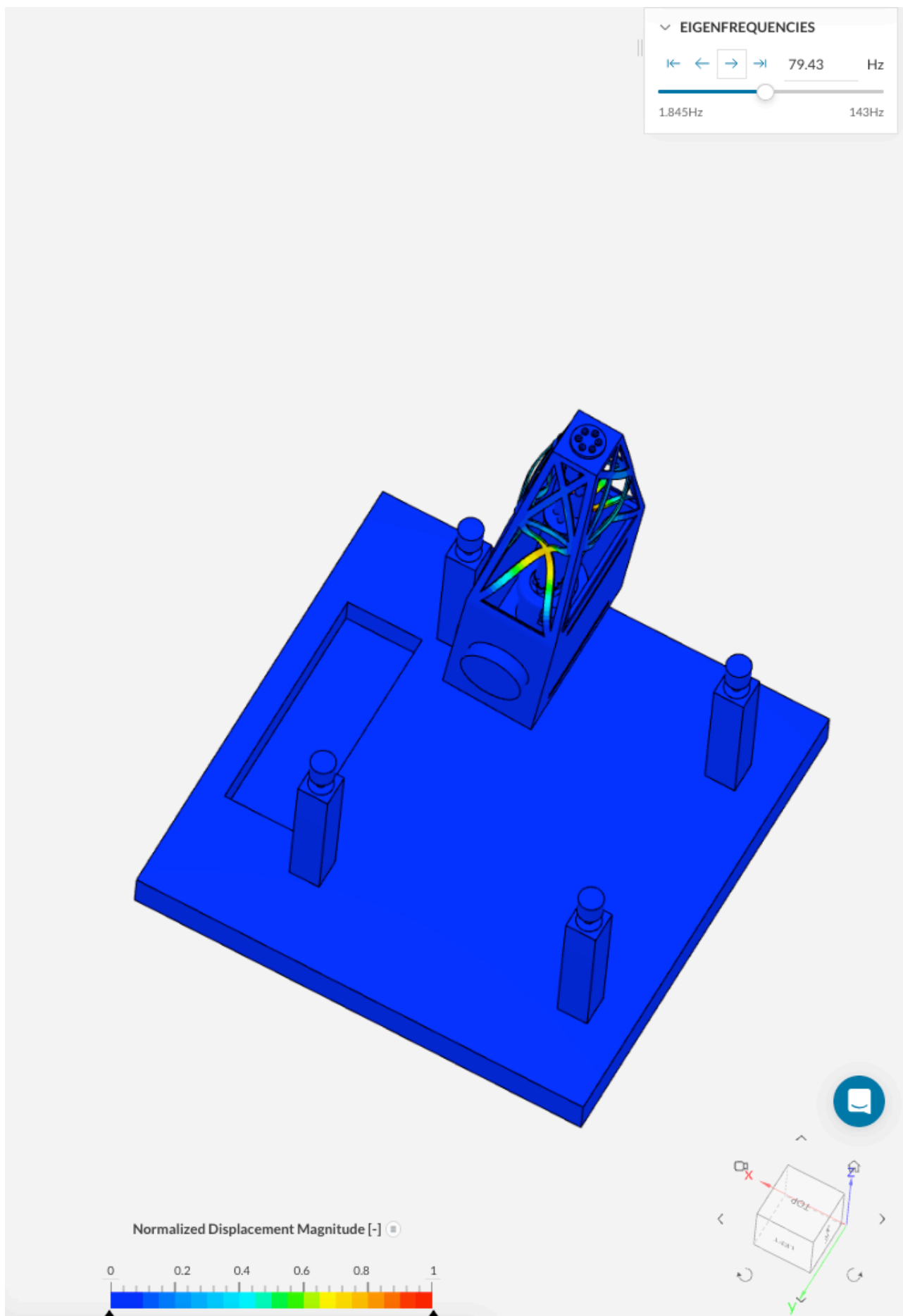


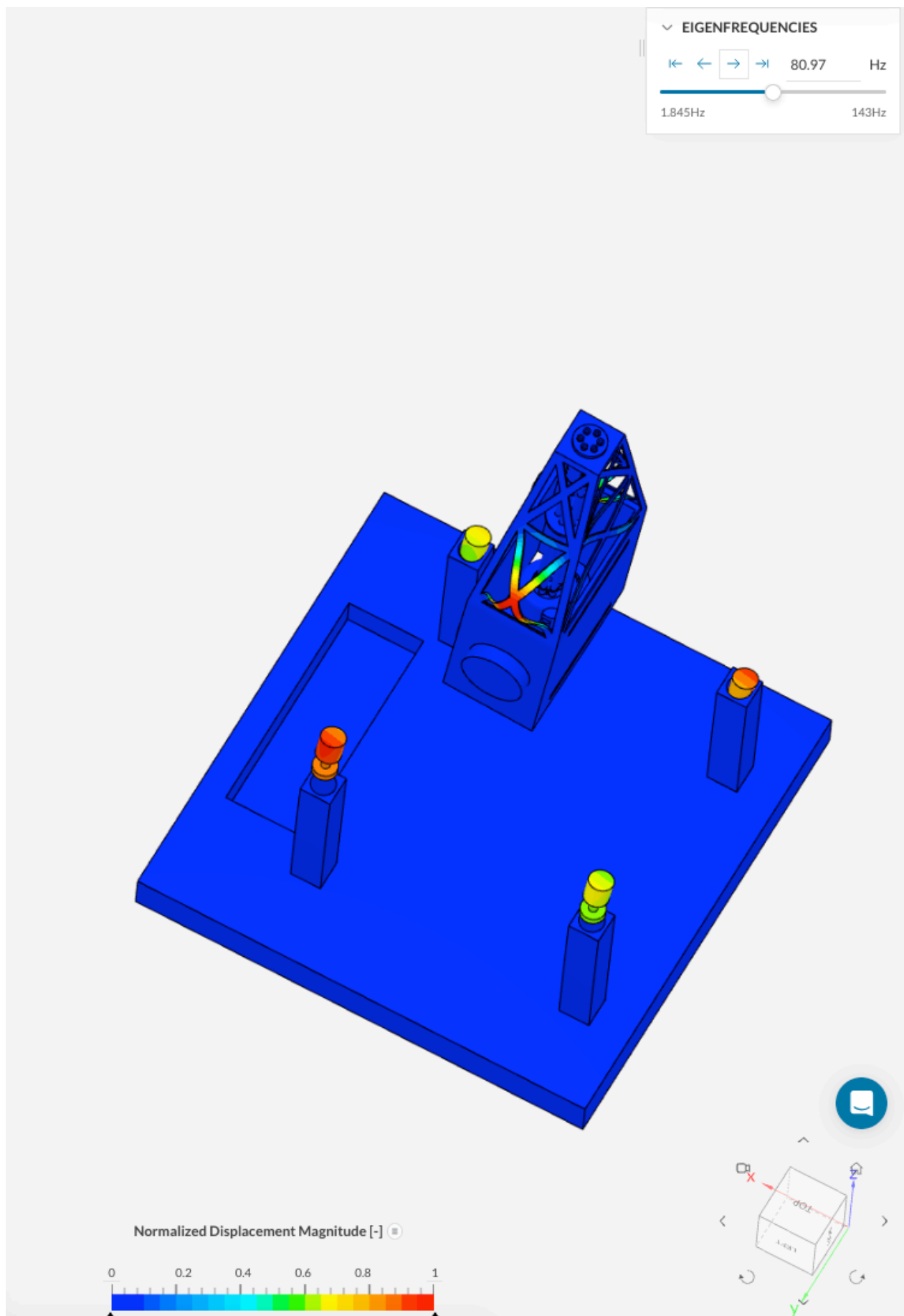




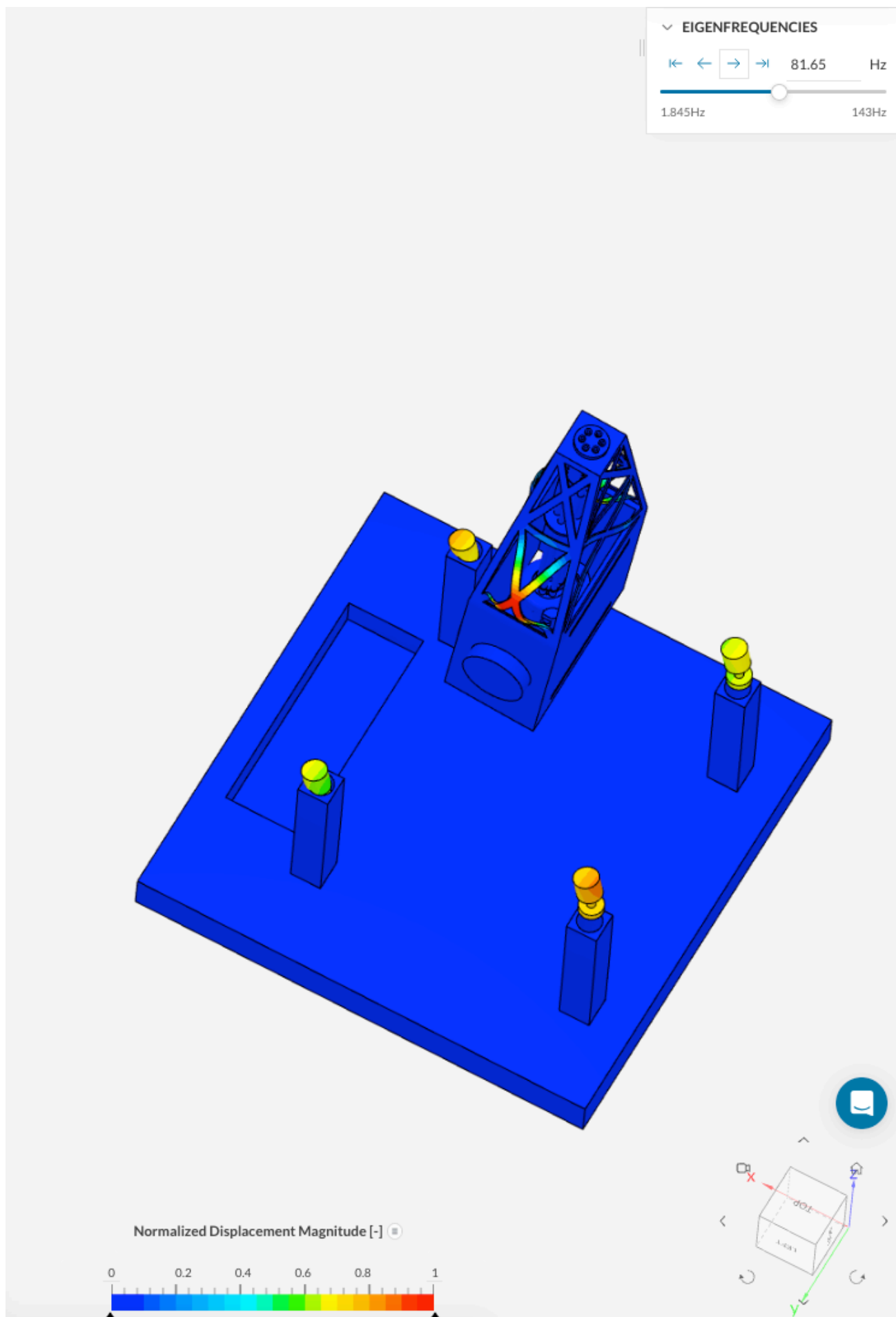


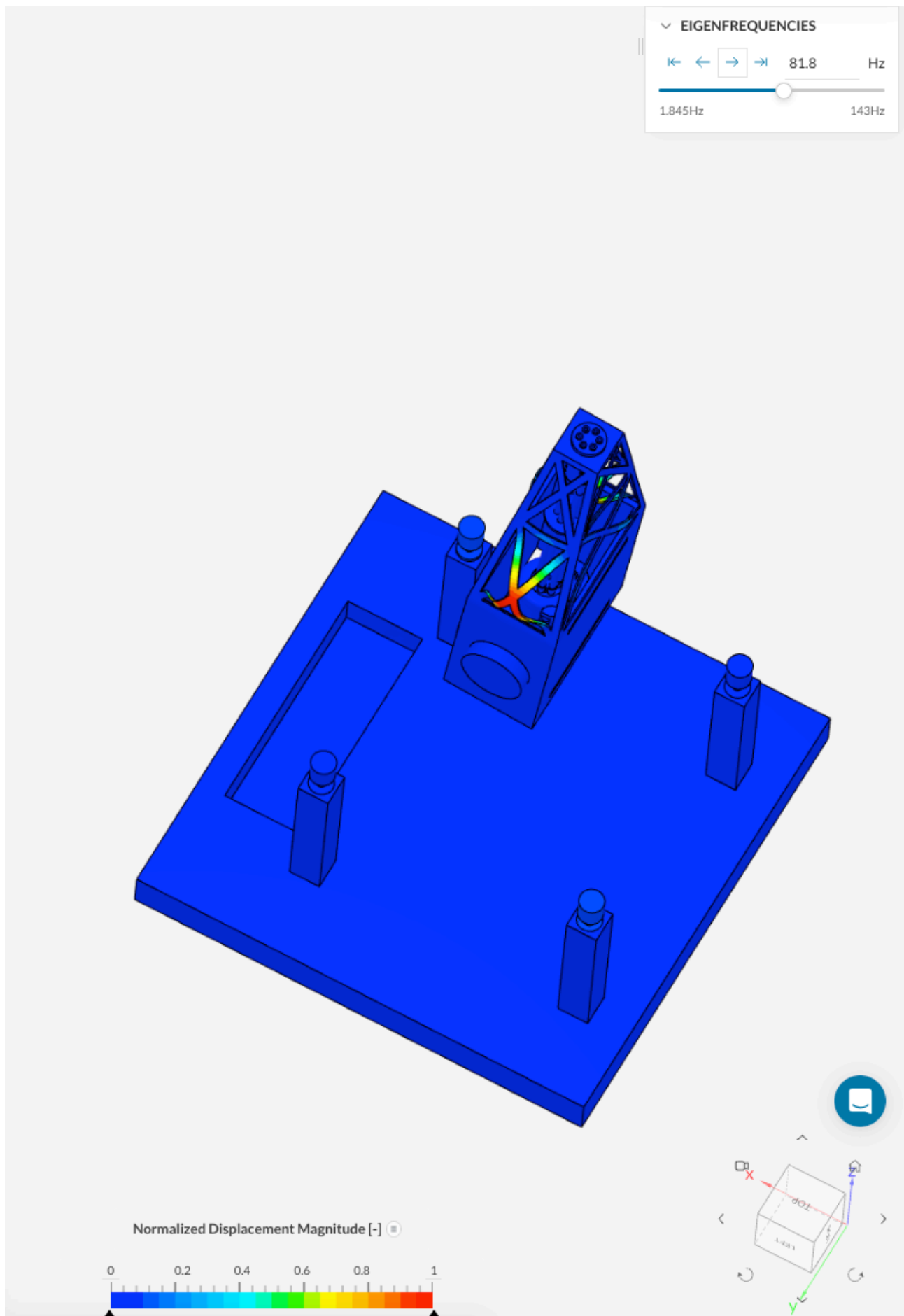










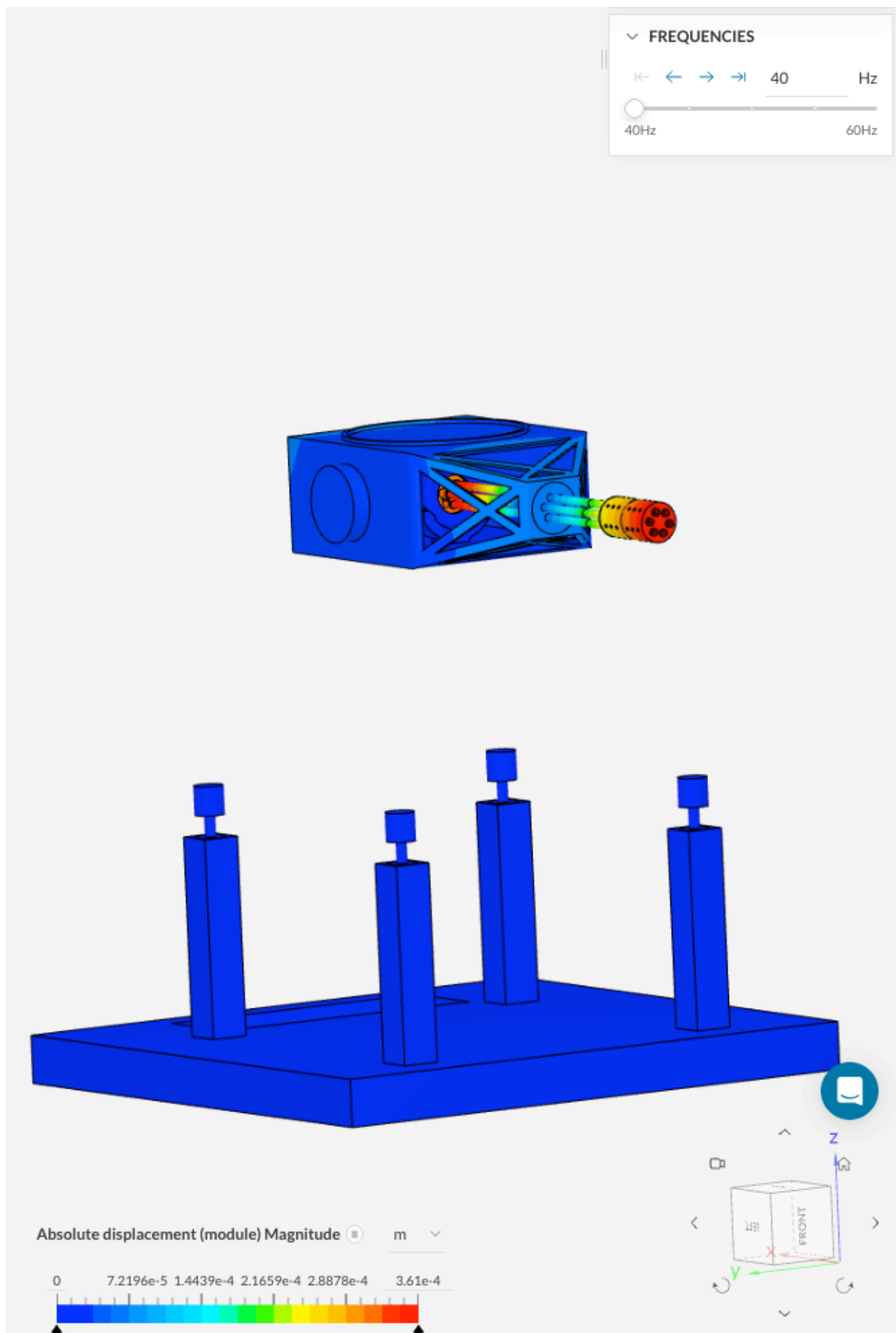


---

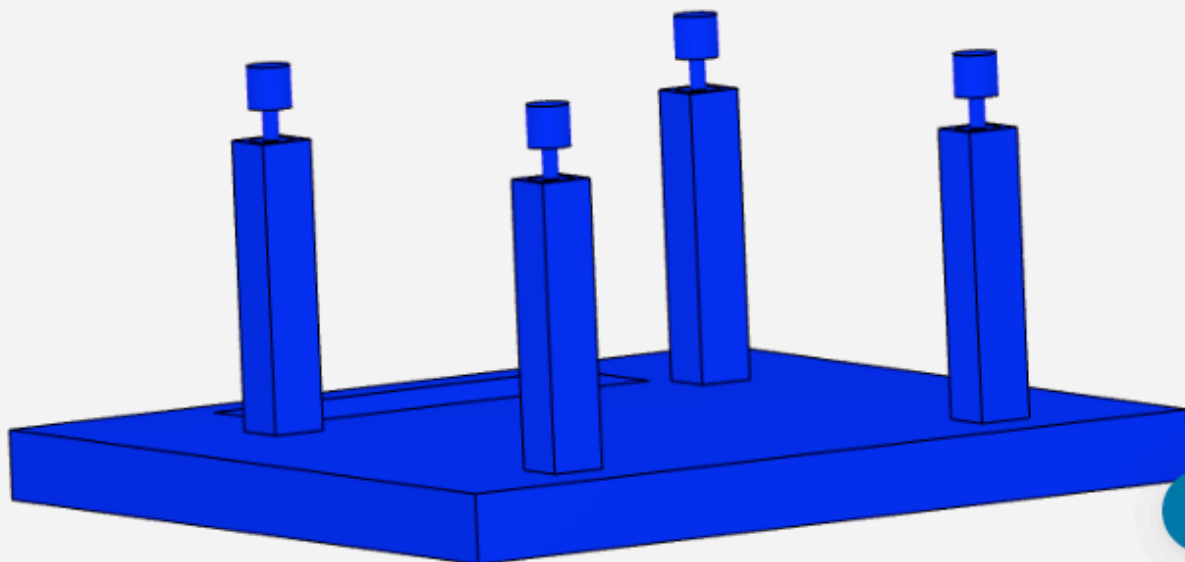
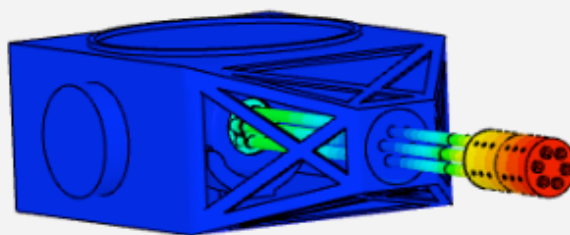
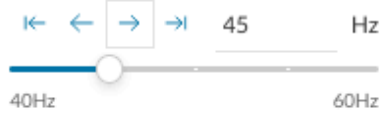
### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ ΑΡΧΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ**

---

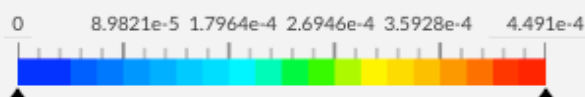


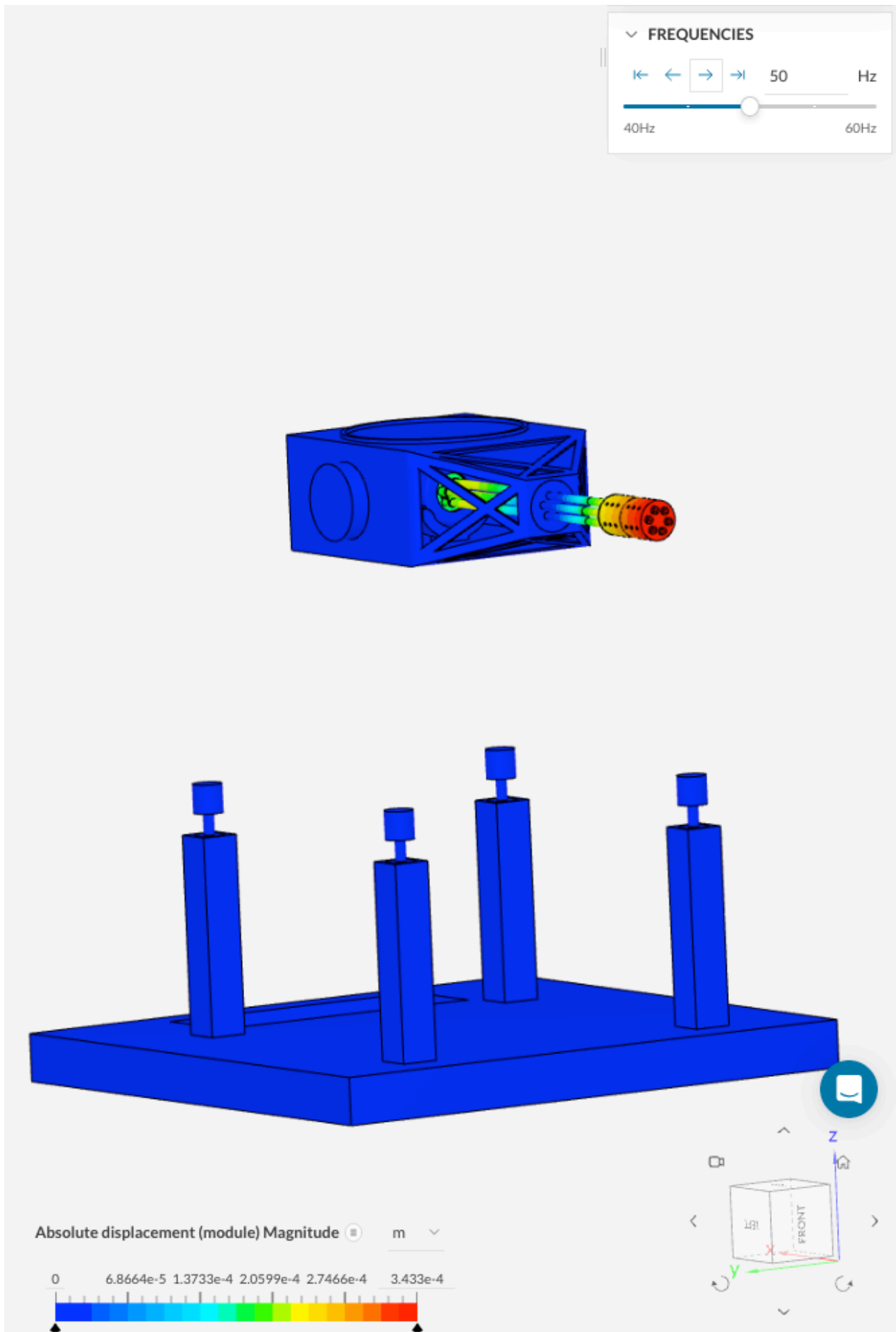


▼ FREQUENCIES

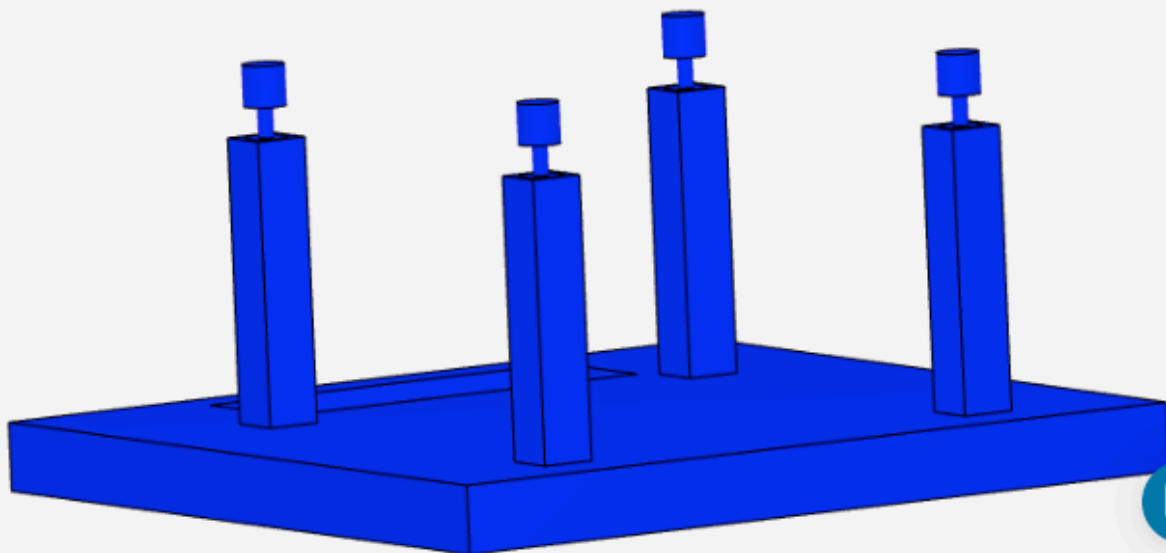
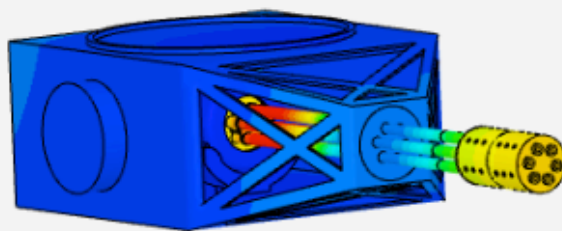


Absolute displacement (module) Magnitude m

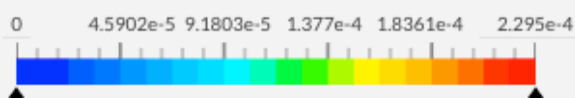




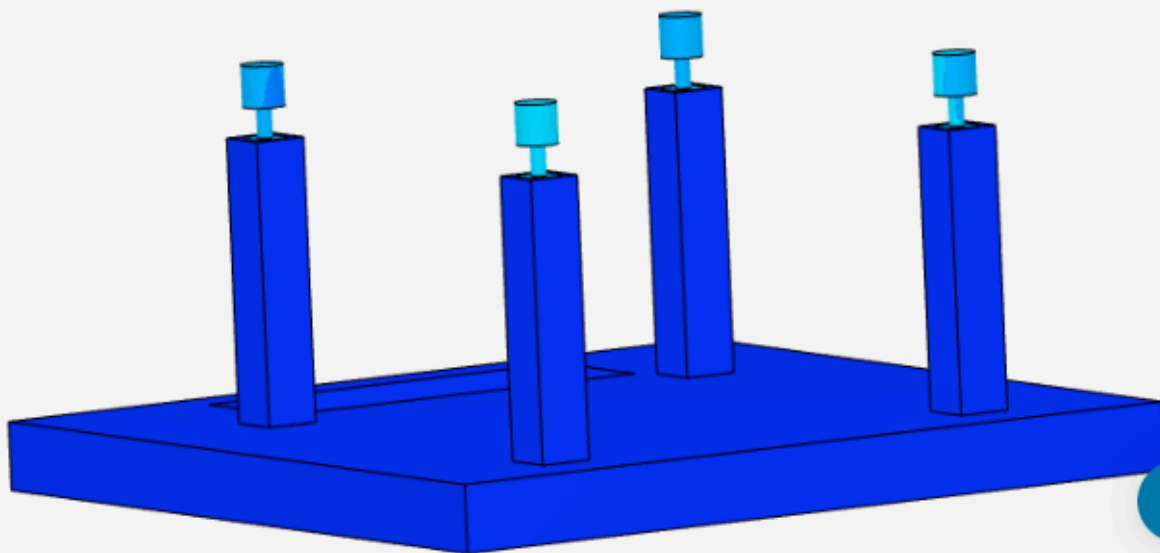
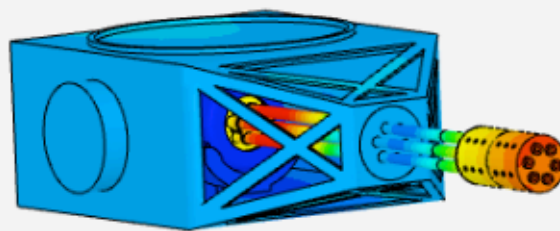
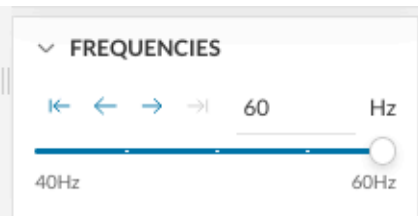
FREQUENCIES  
 55 Hz  
 40Hz 60Hz



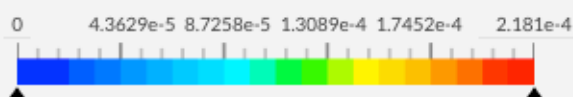
Absolute displacement (module) Magnitude m

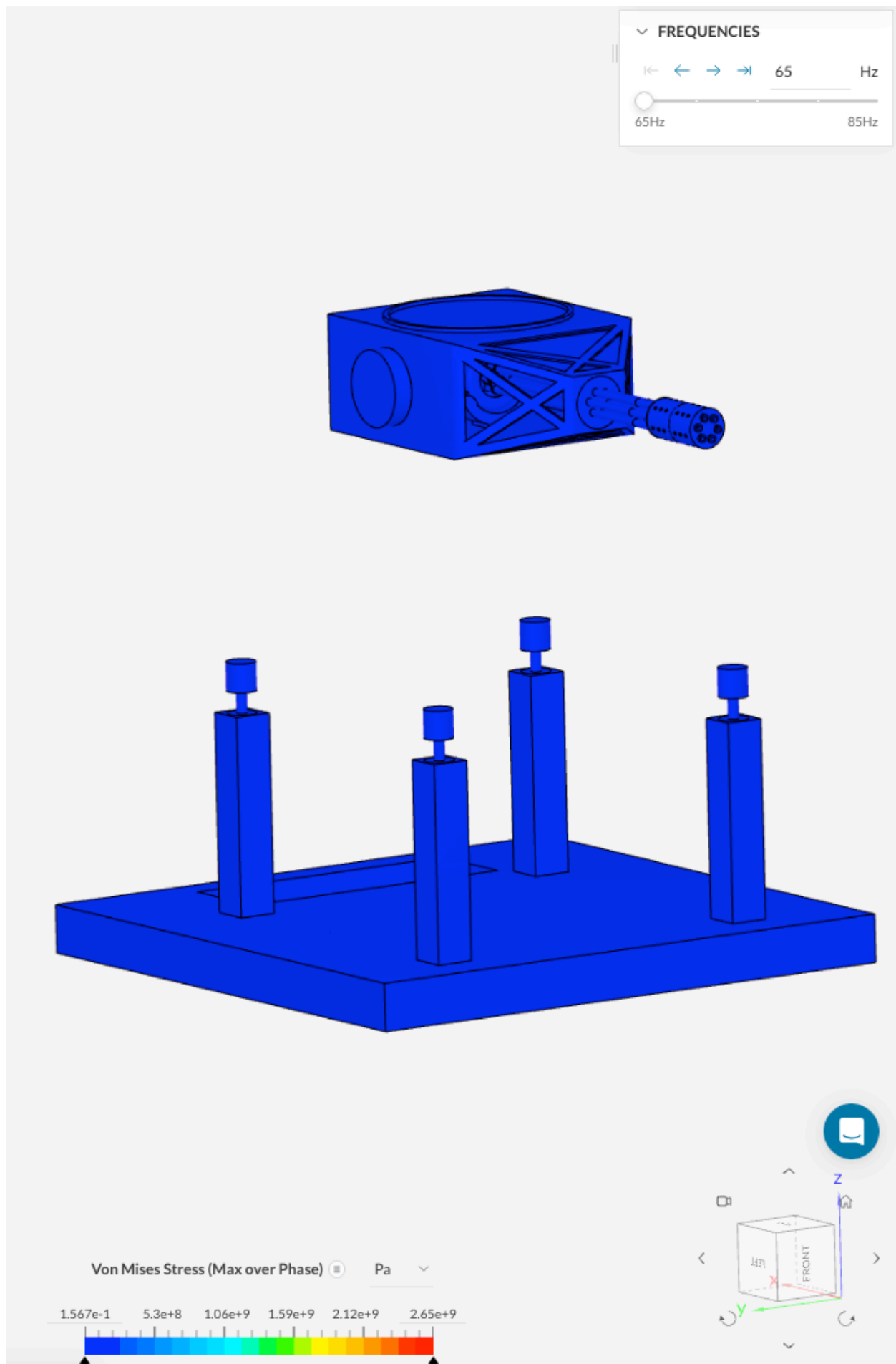




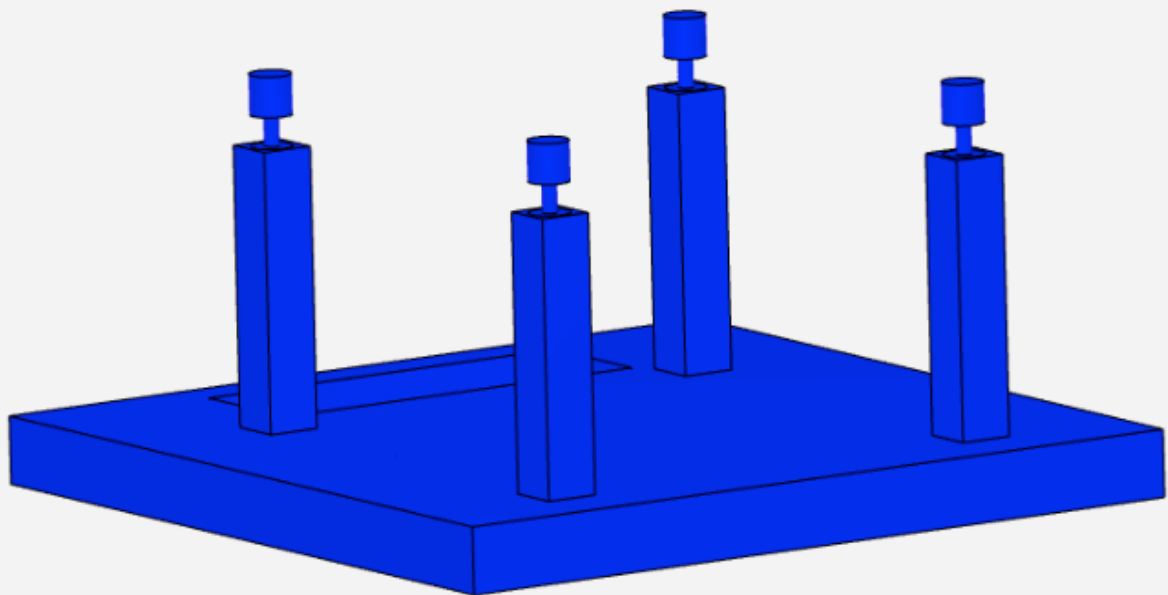
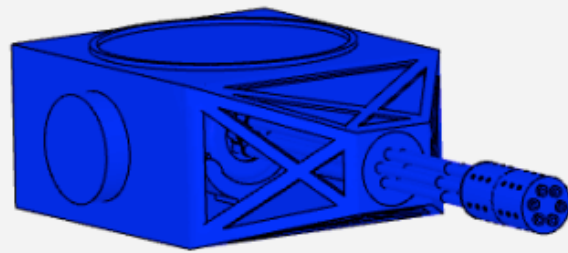


Absolute displacement (module) Magnitude ☐ m ▼



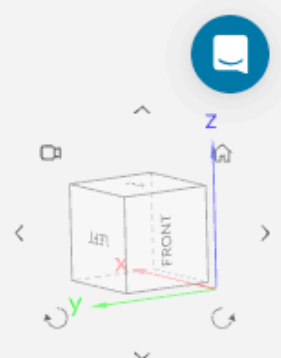


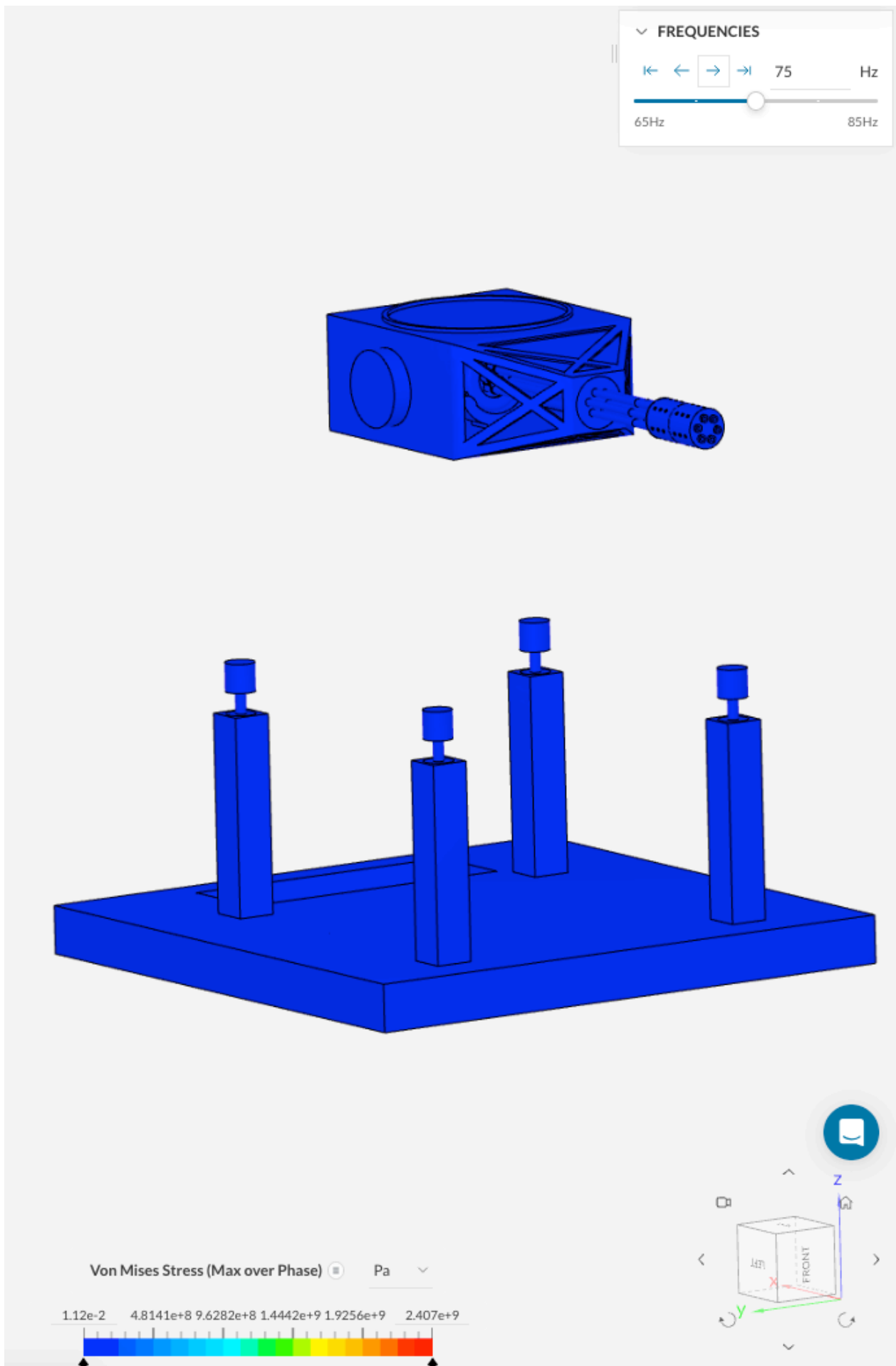
✓ FREQUENCIES

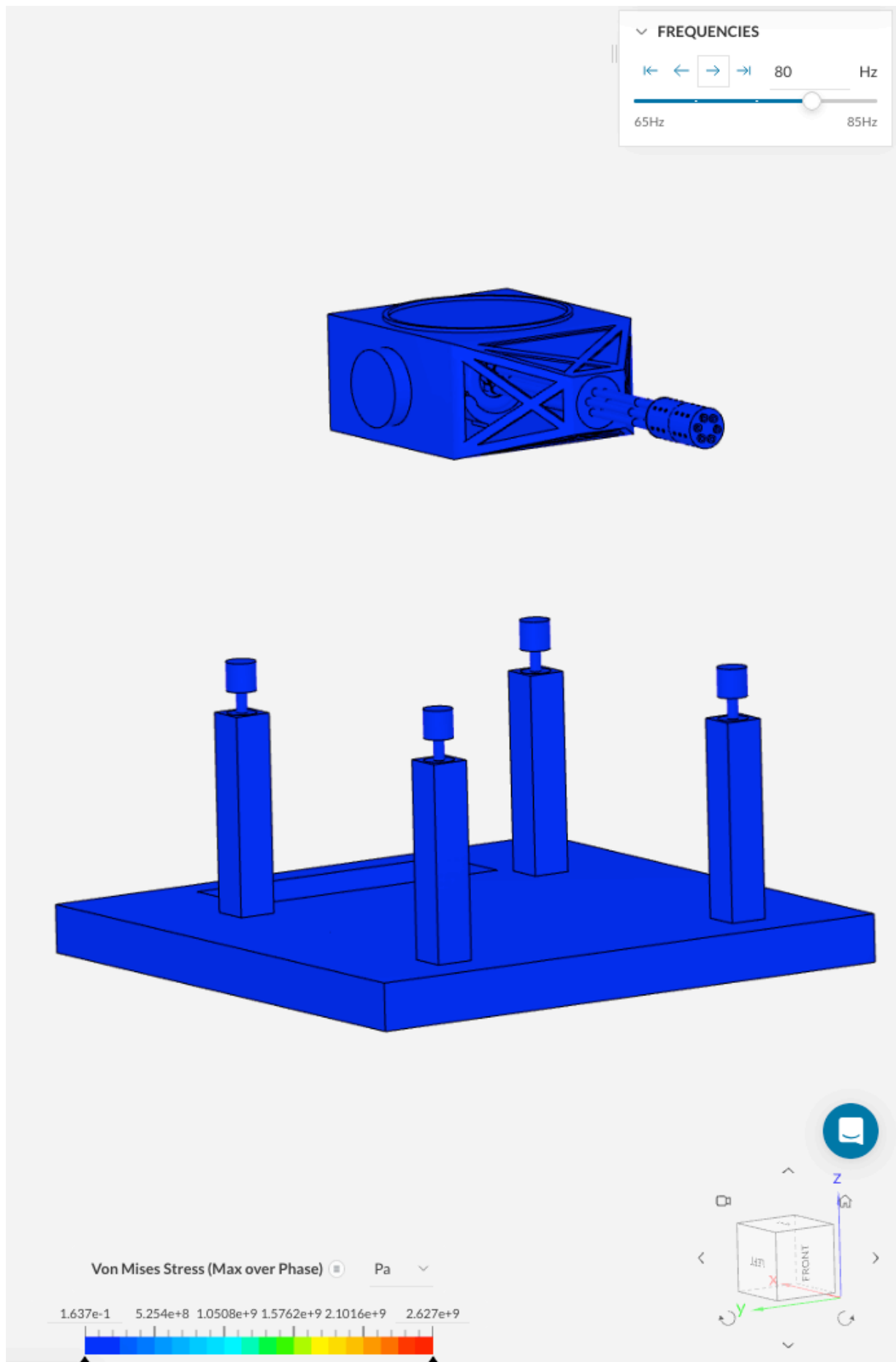


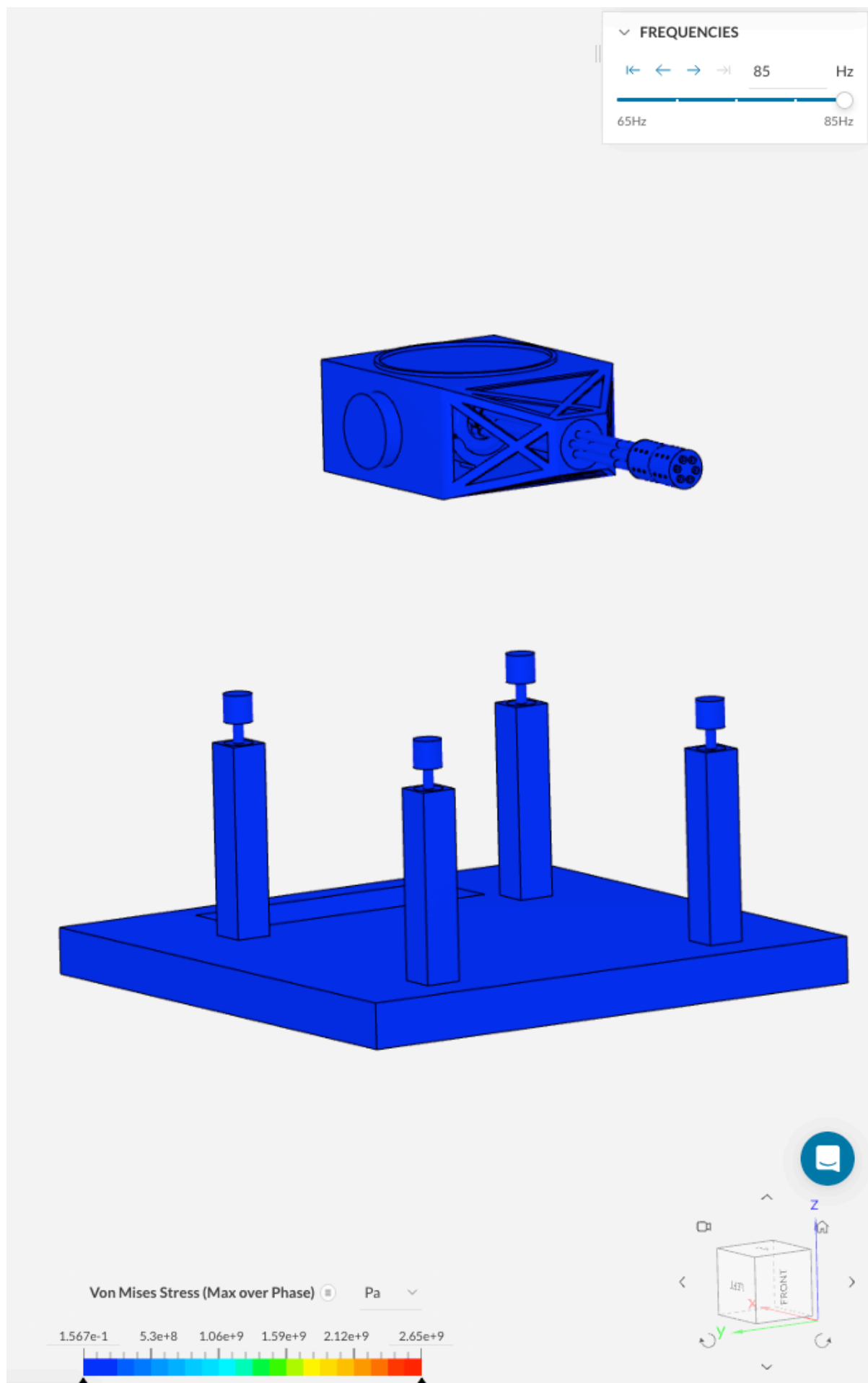
Von Mises Stress (Max over Phase) Pa

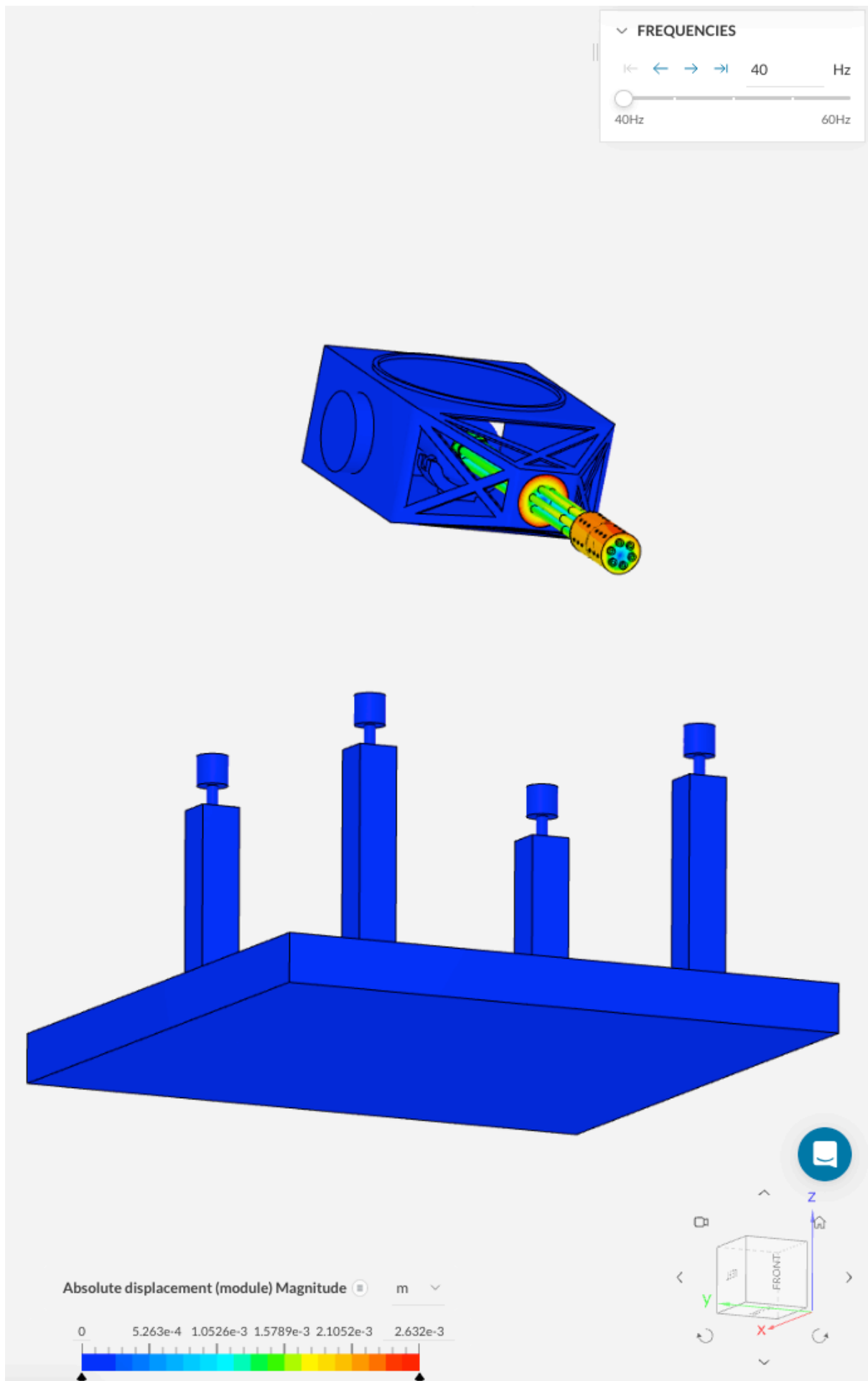
7.402e-2 7.6857e+8 1.5371e+9 2.3057e+9 3.0743e+9 3.843e+9

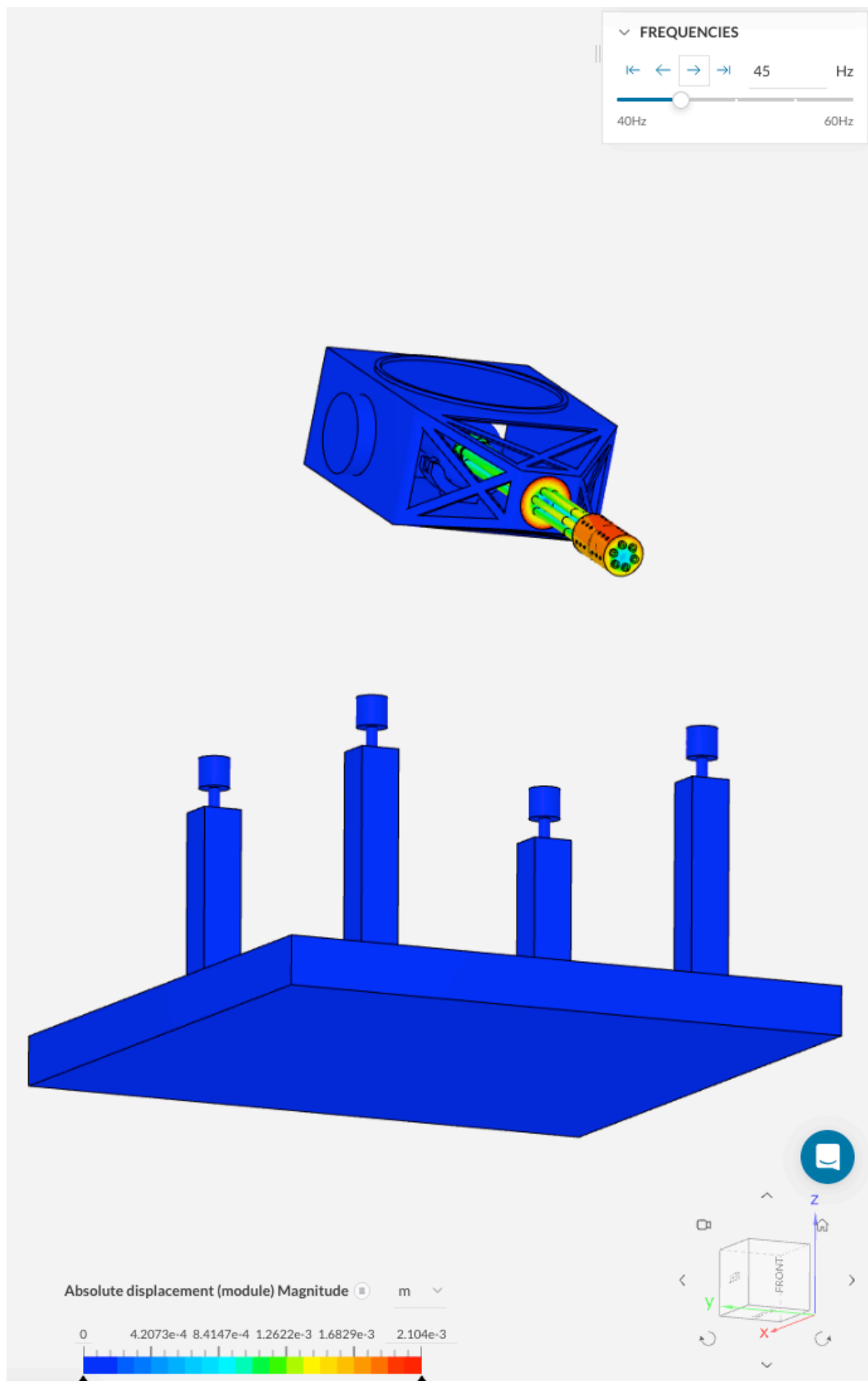




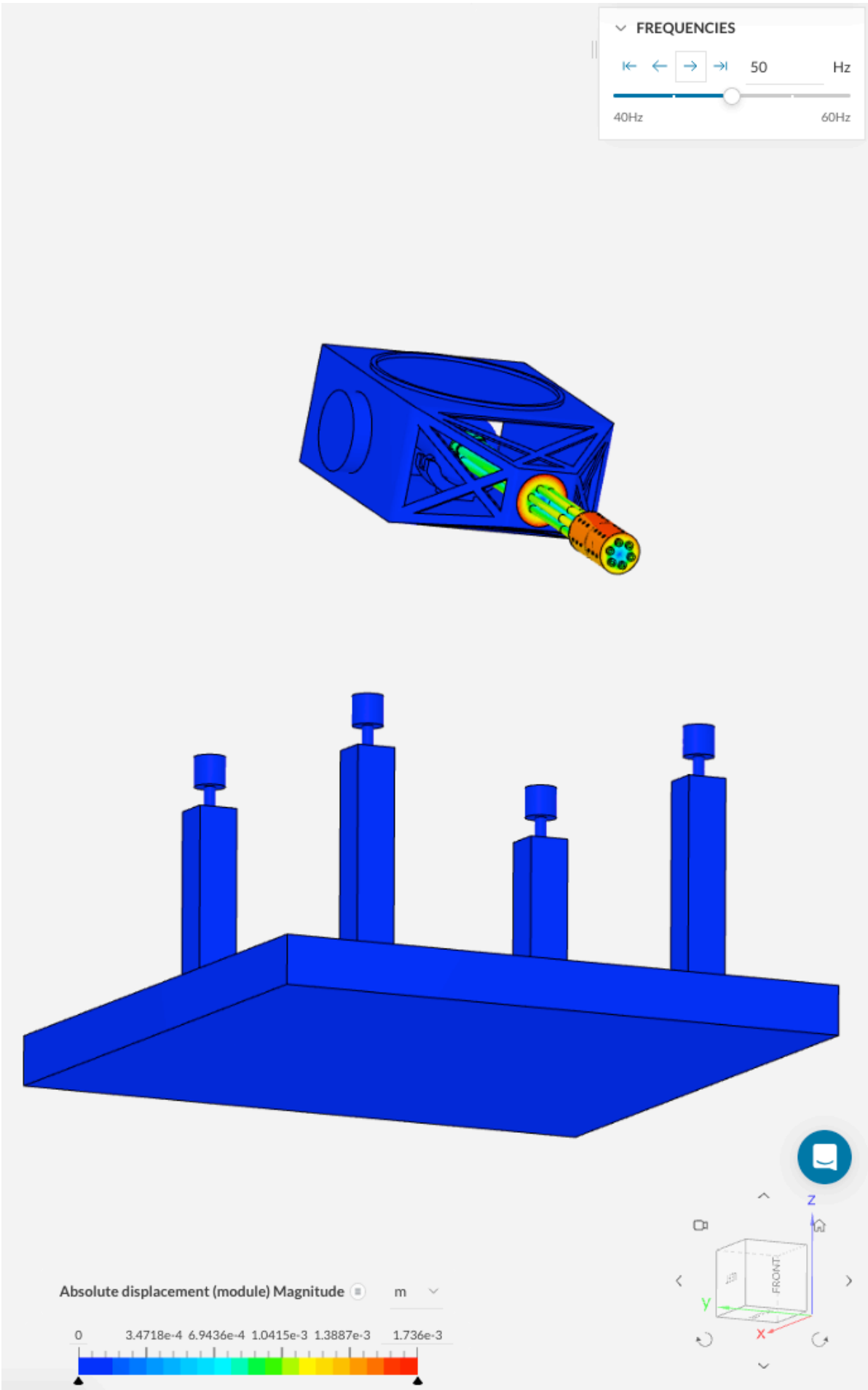


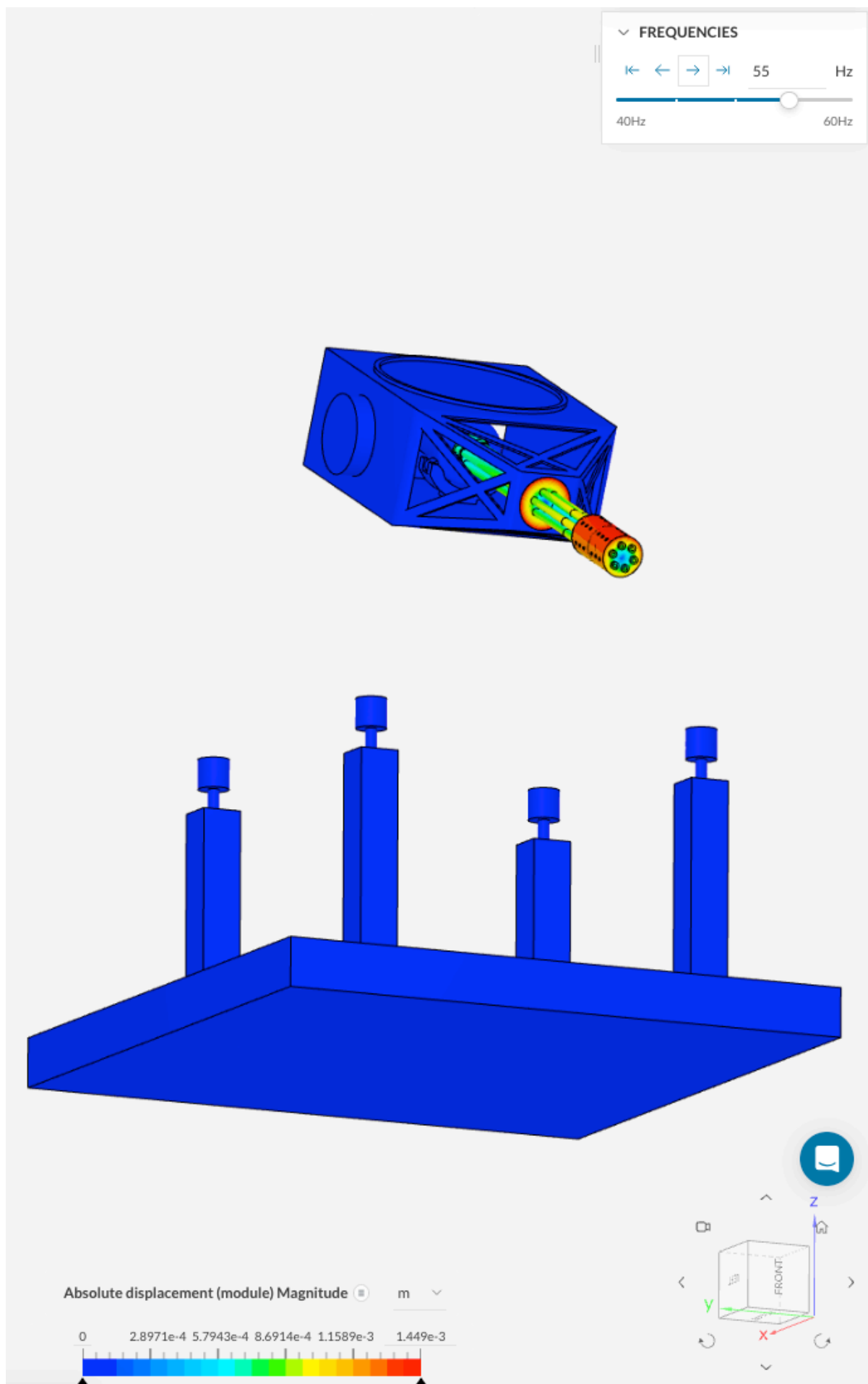


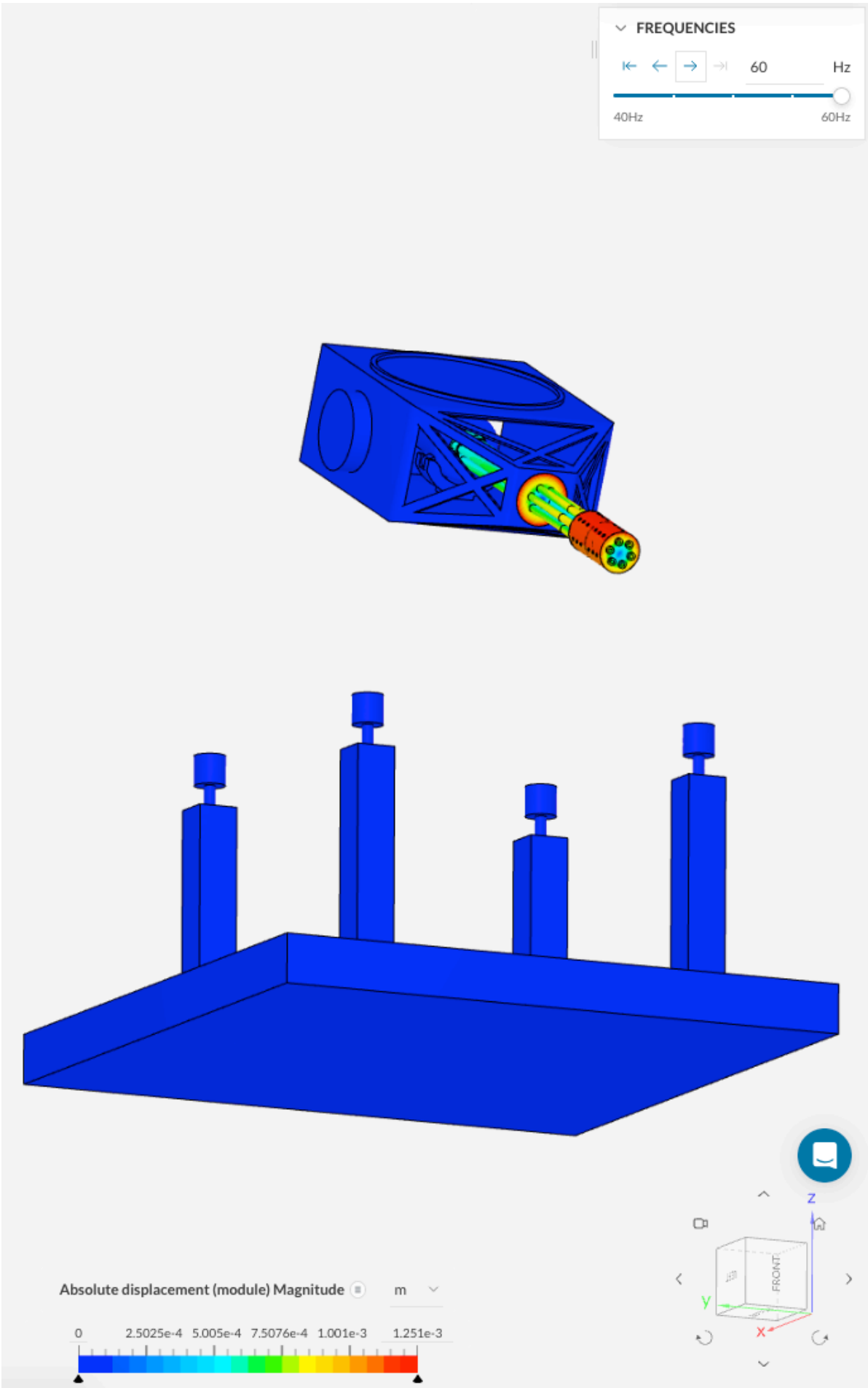


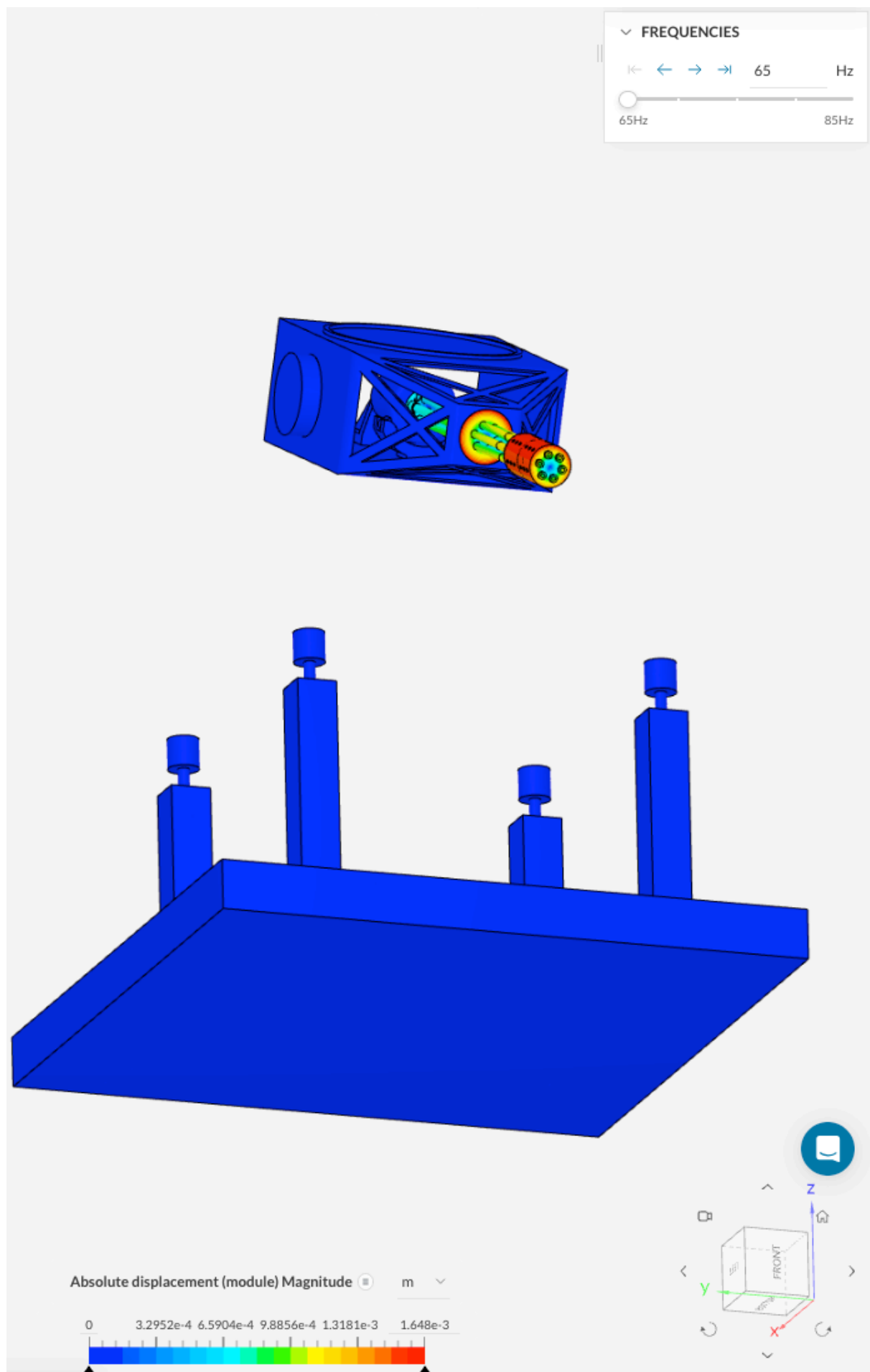


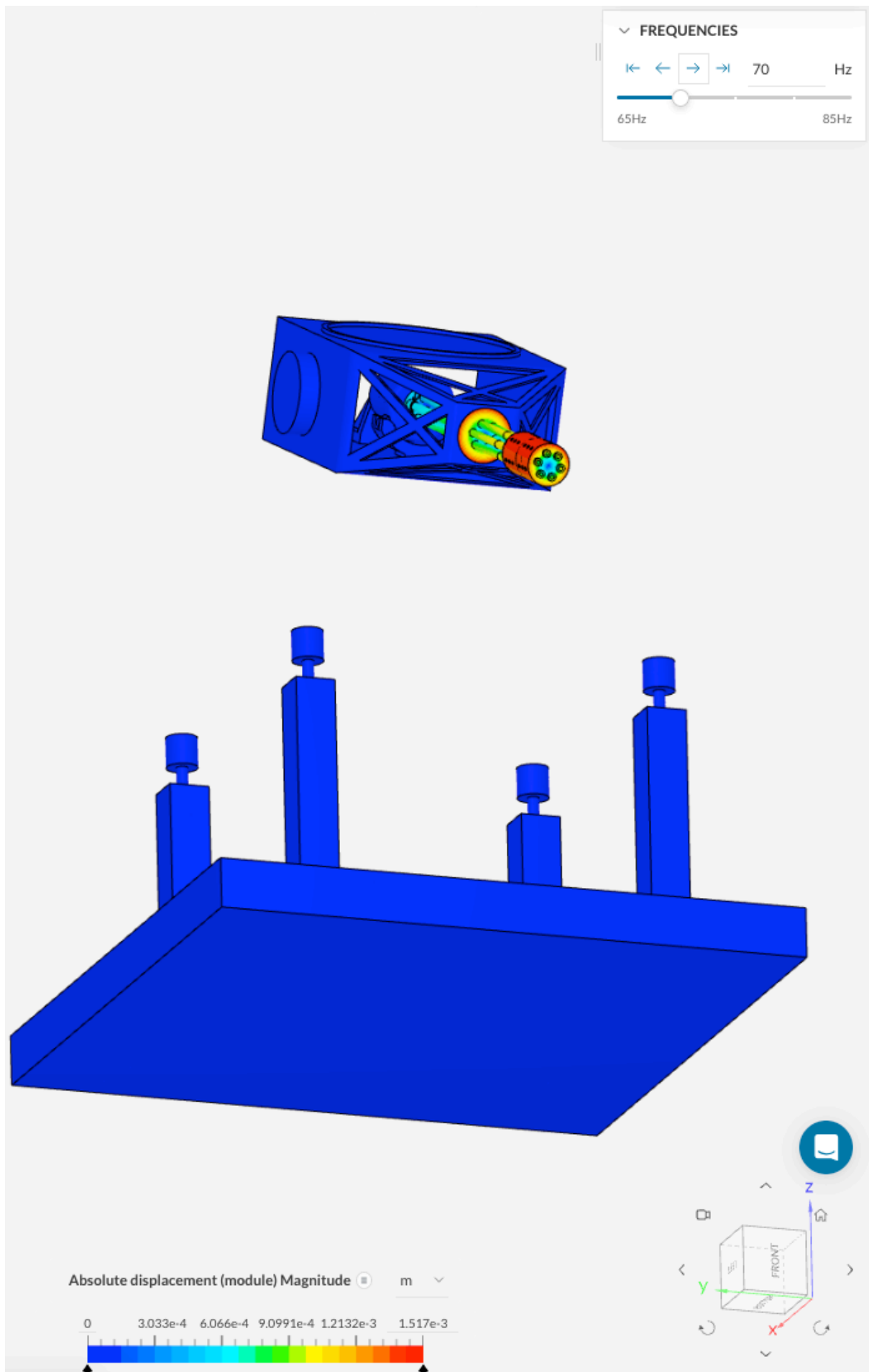


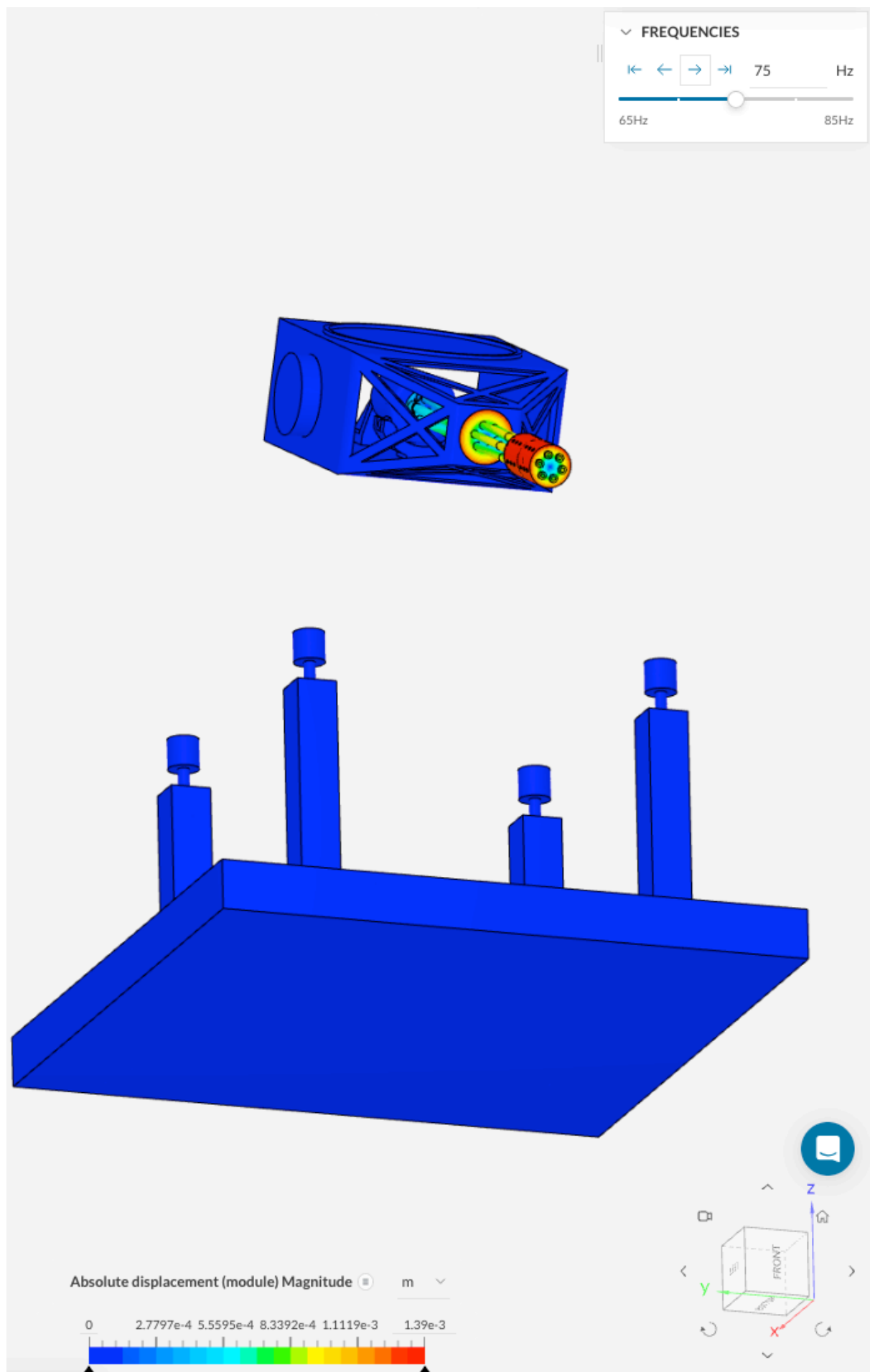


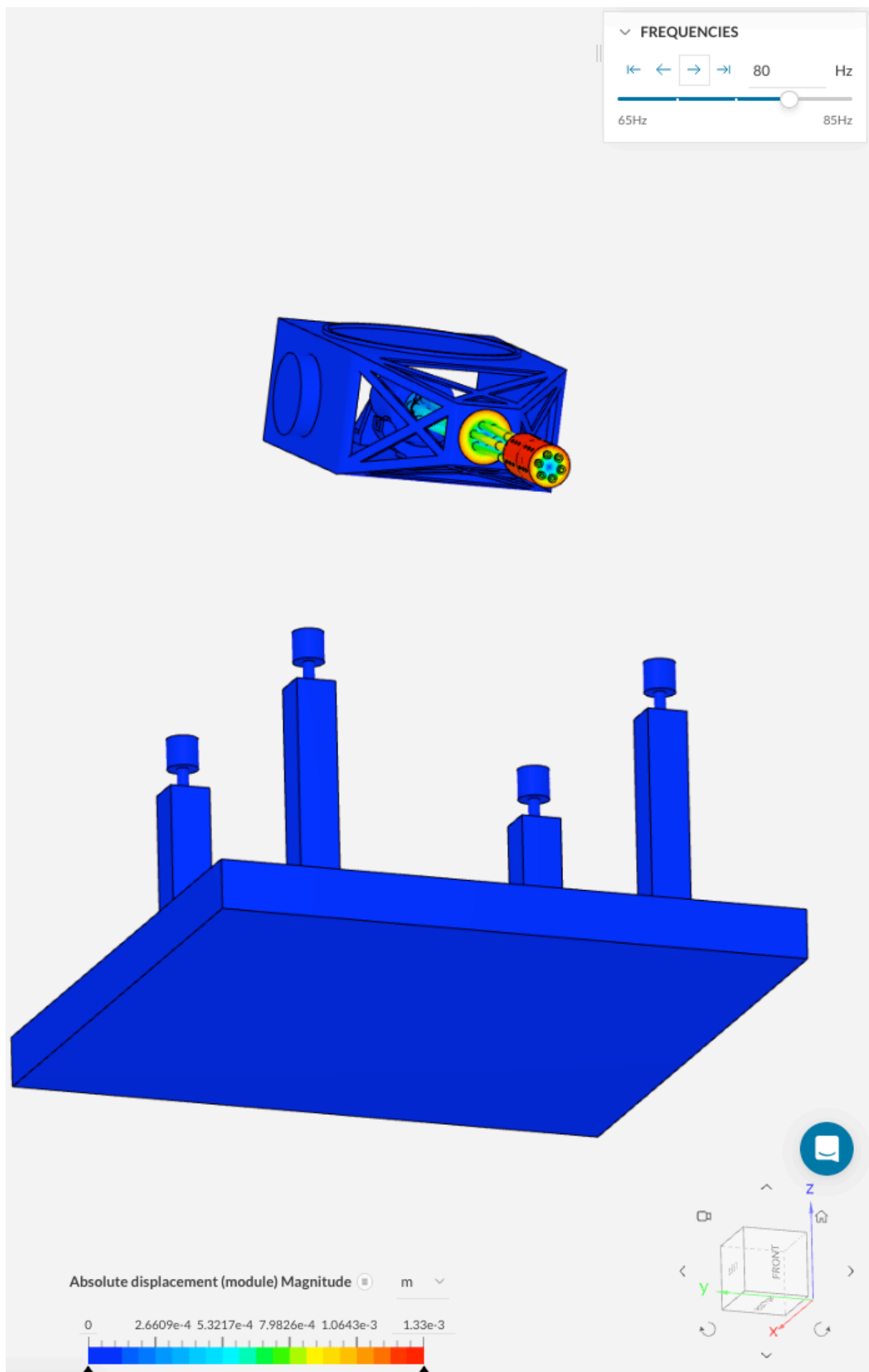


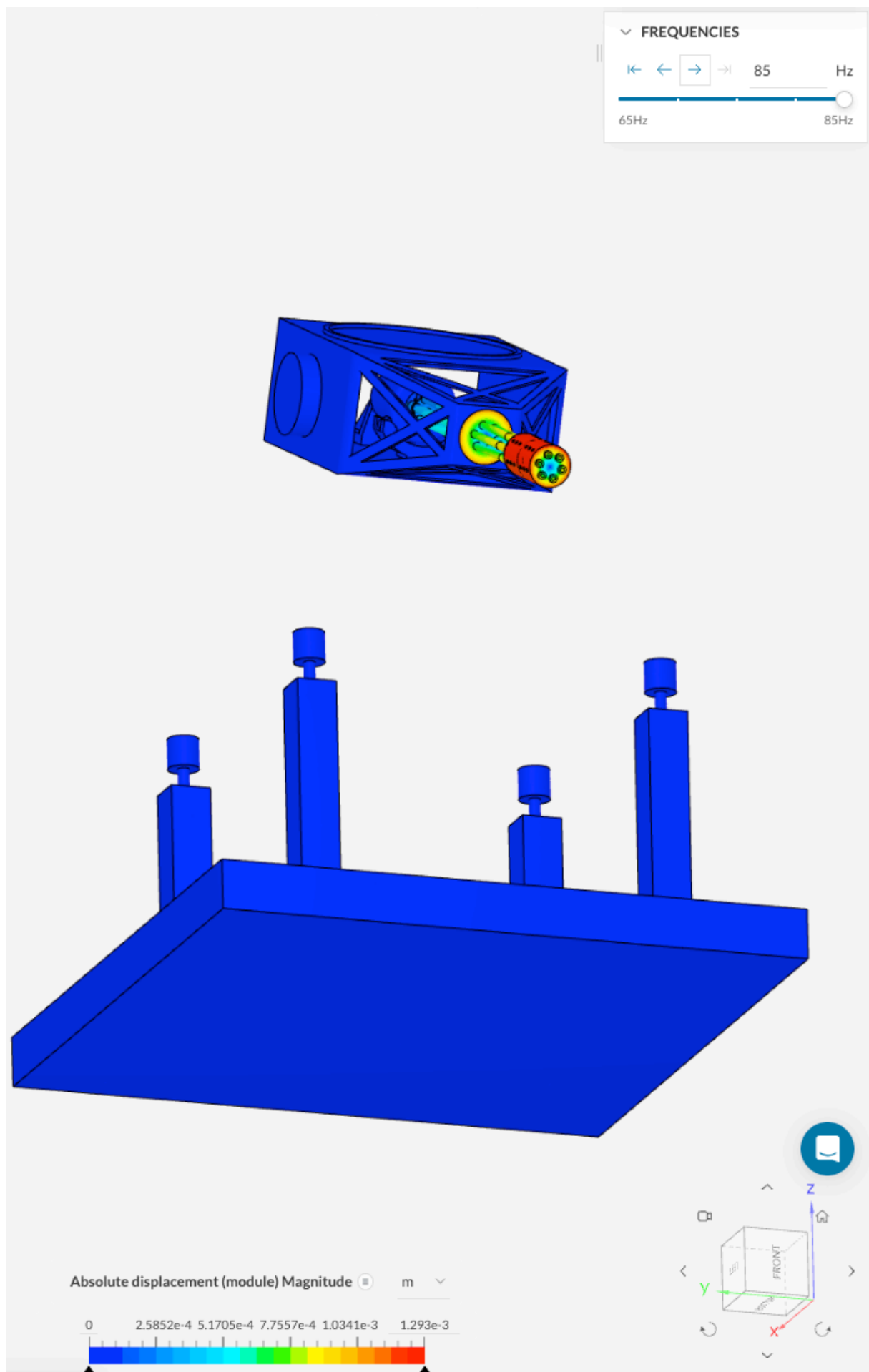




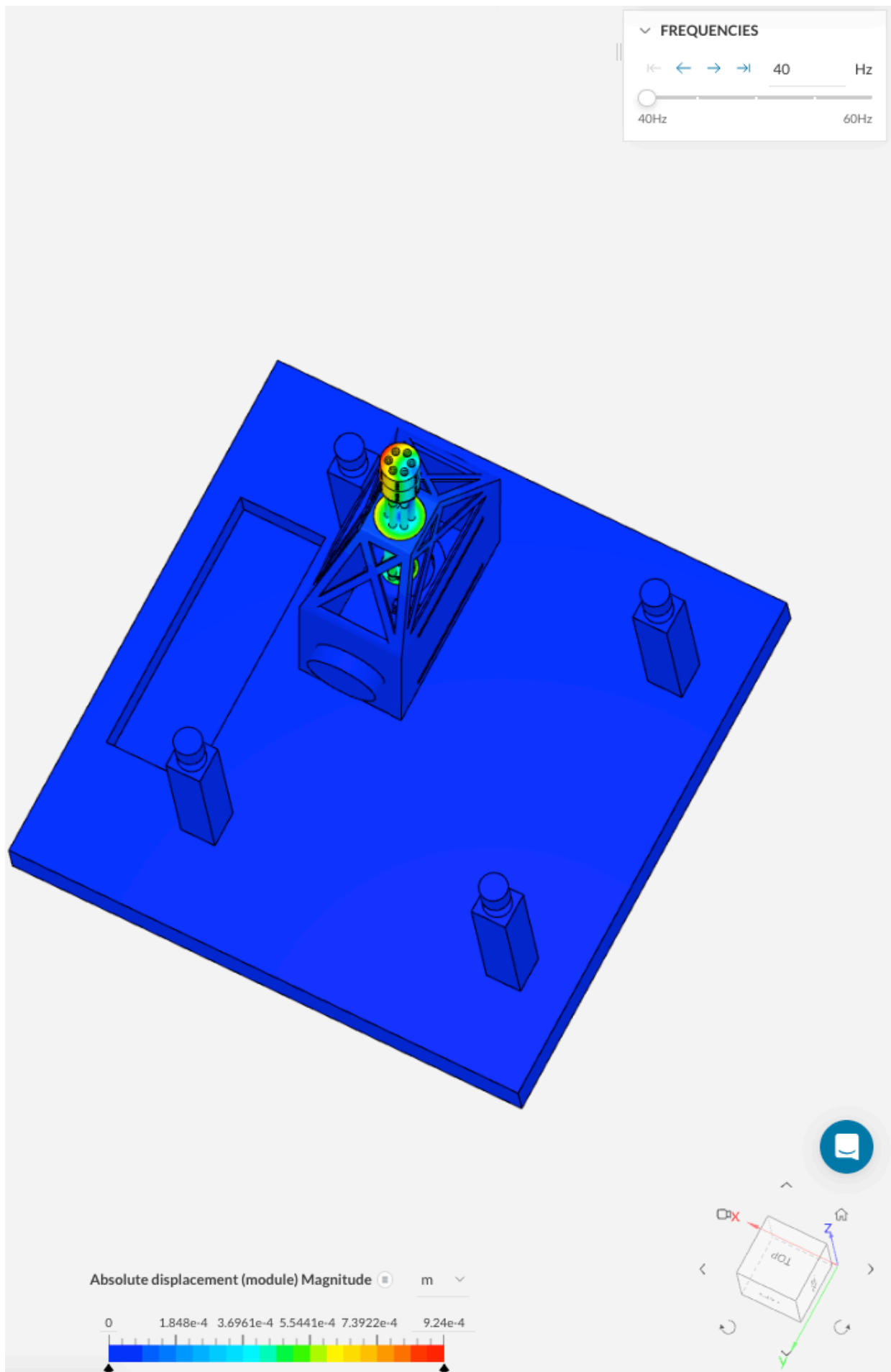


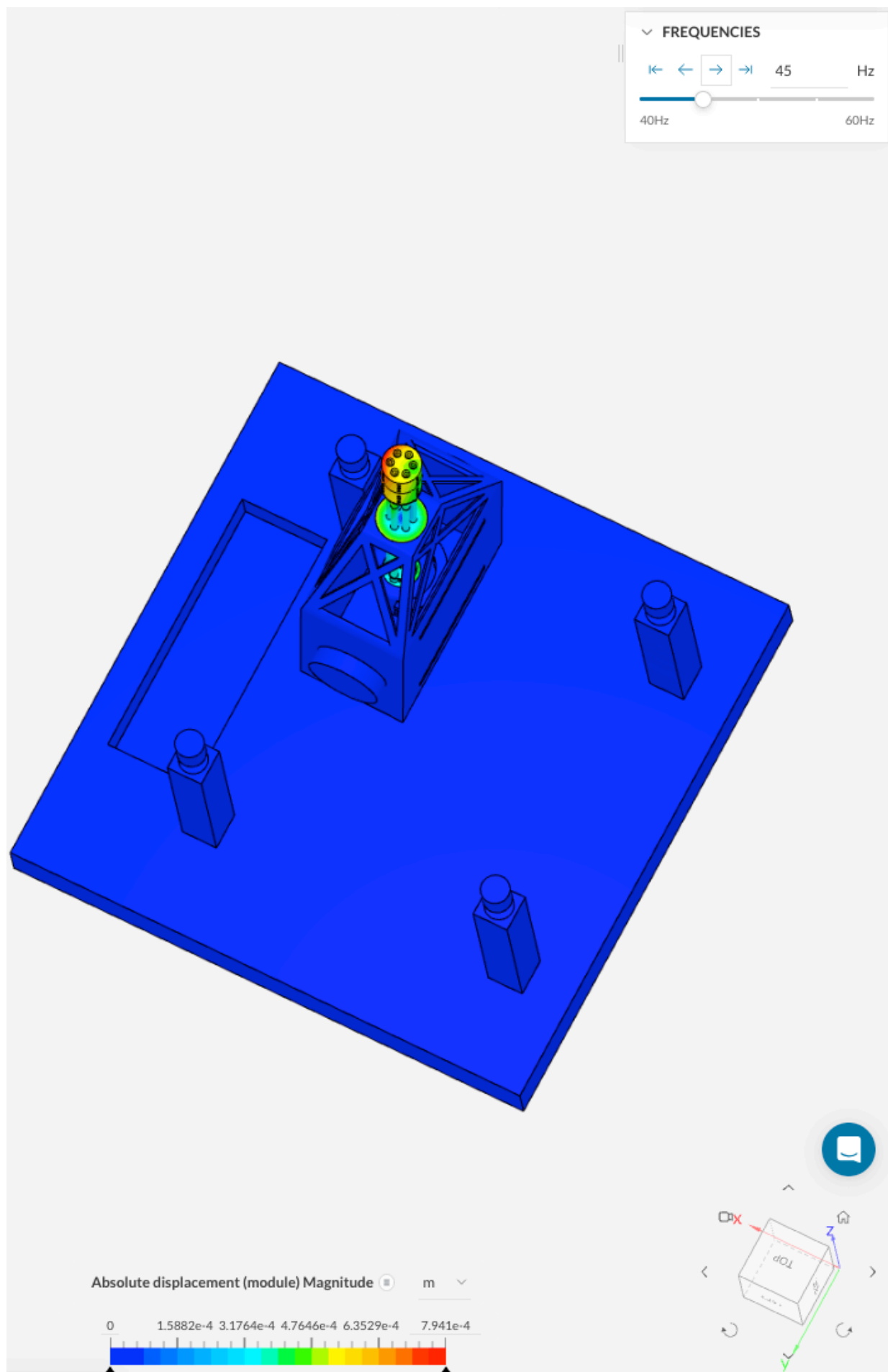


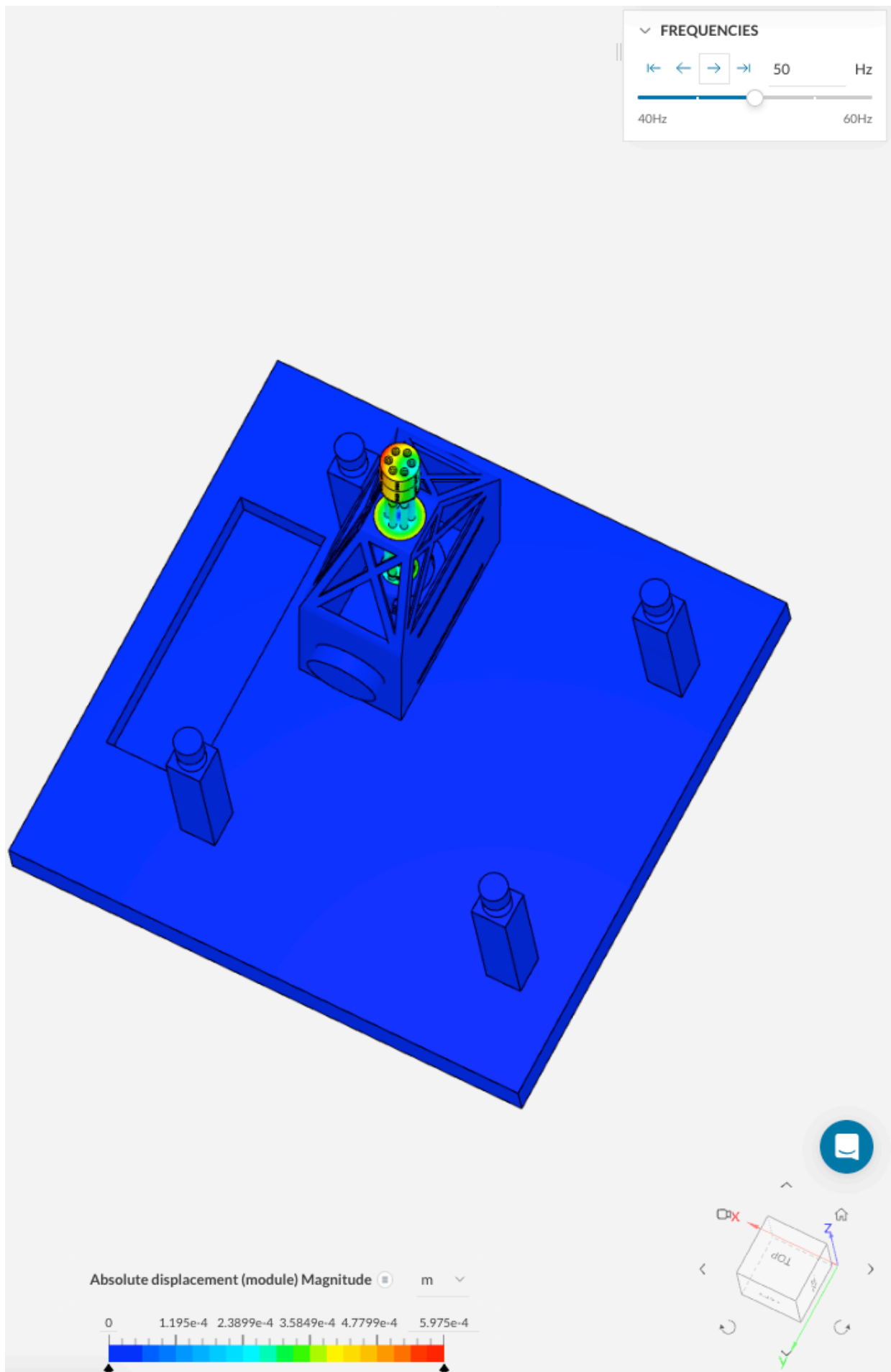


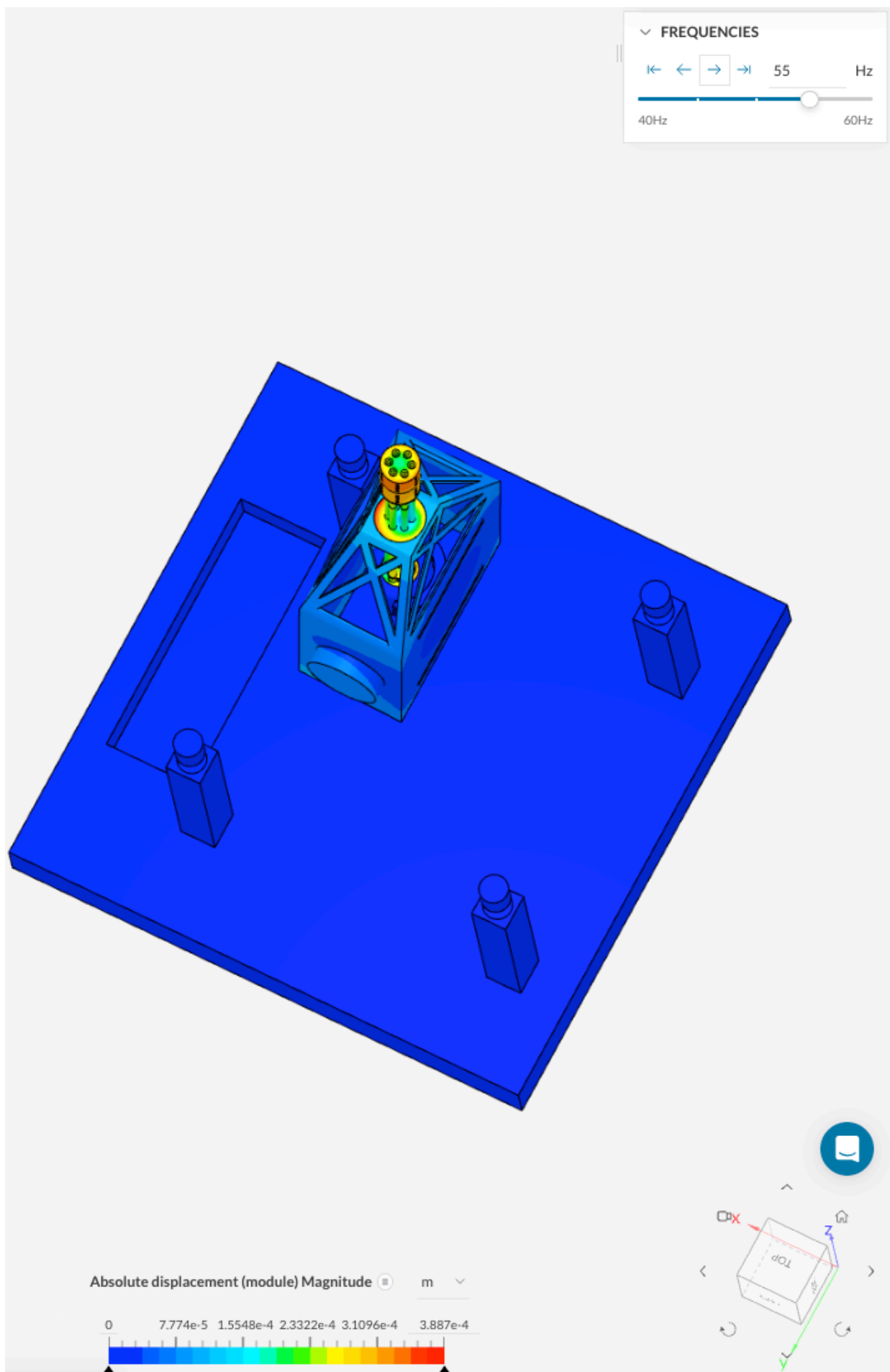


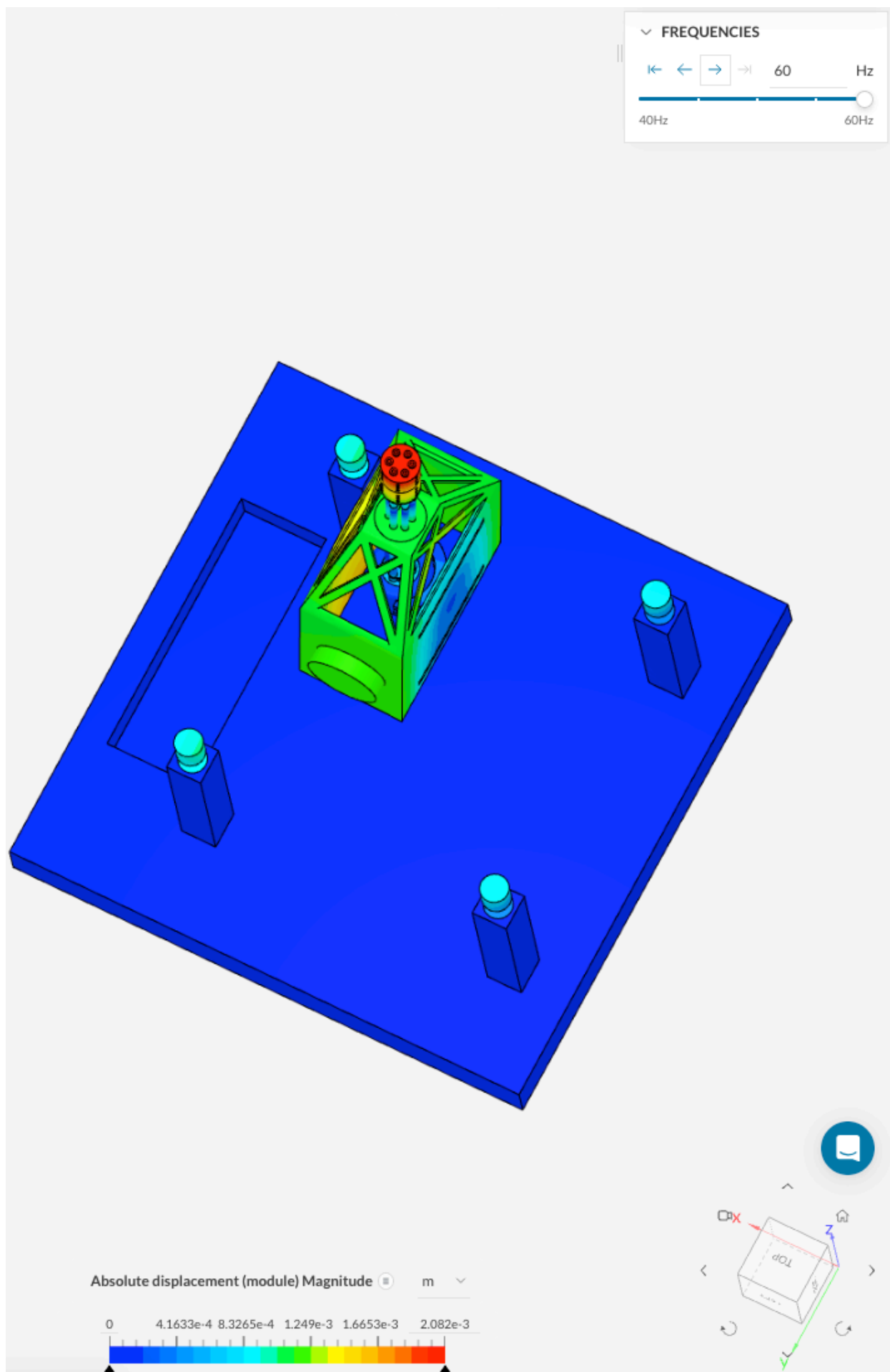


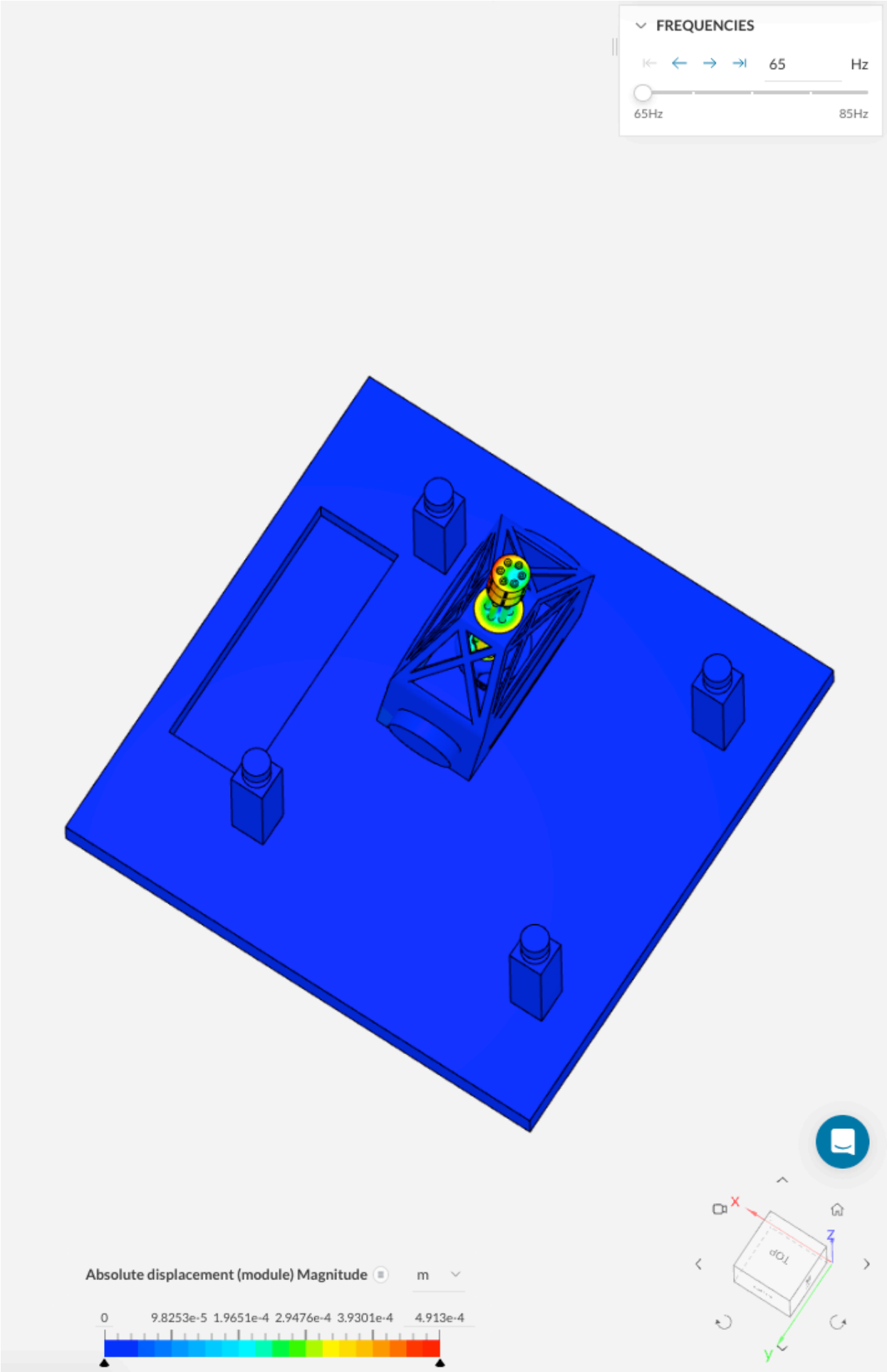


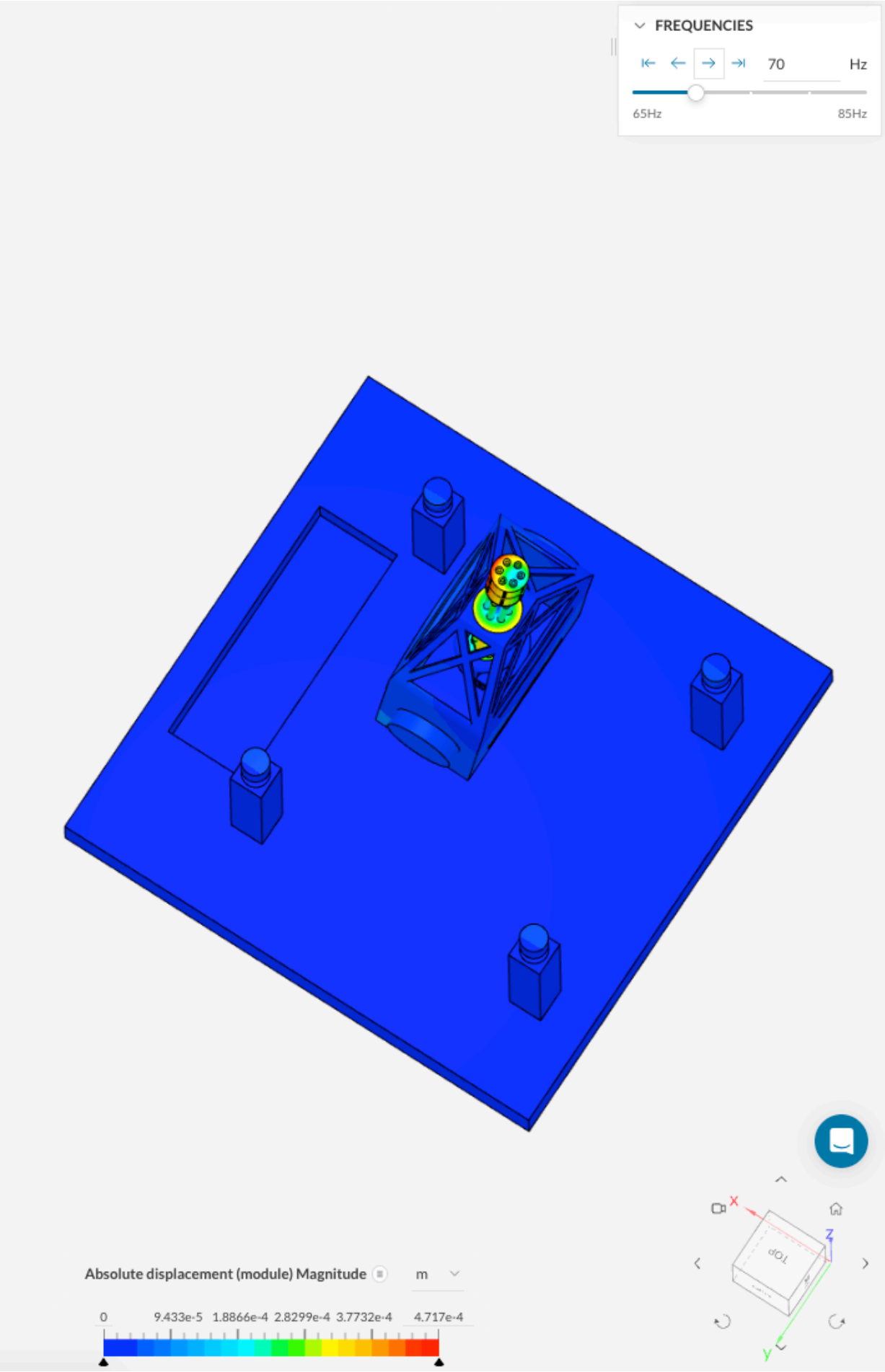


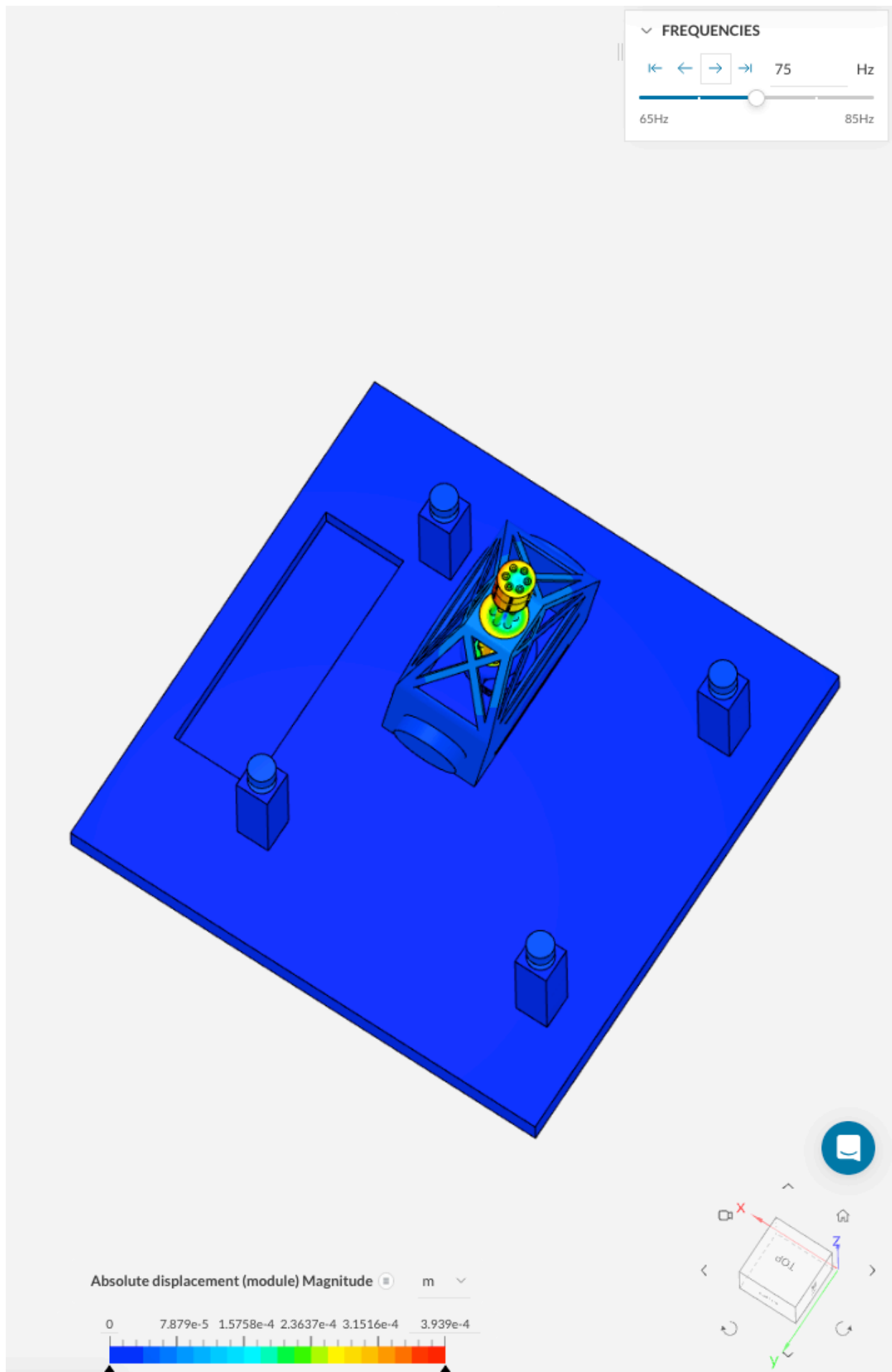




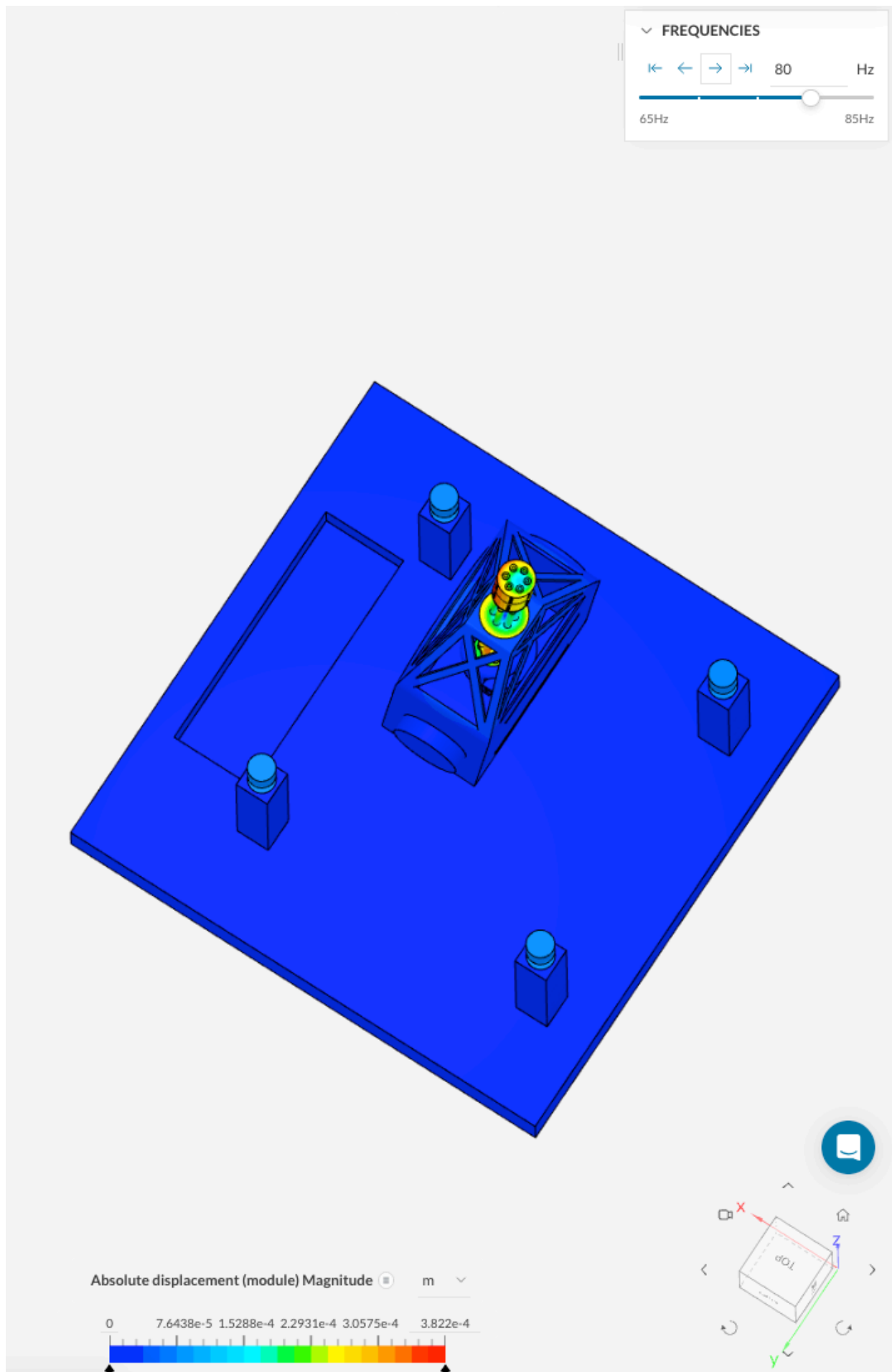


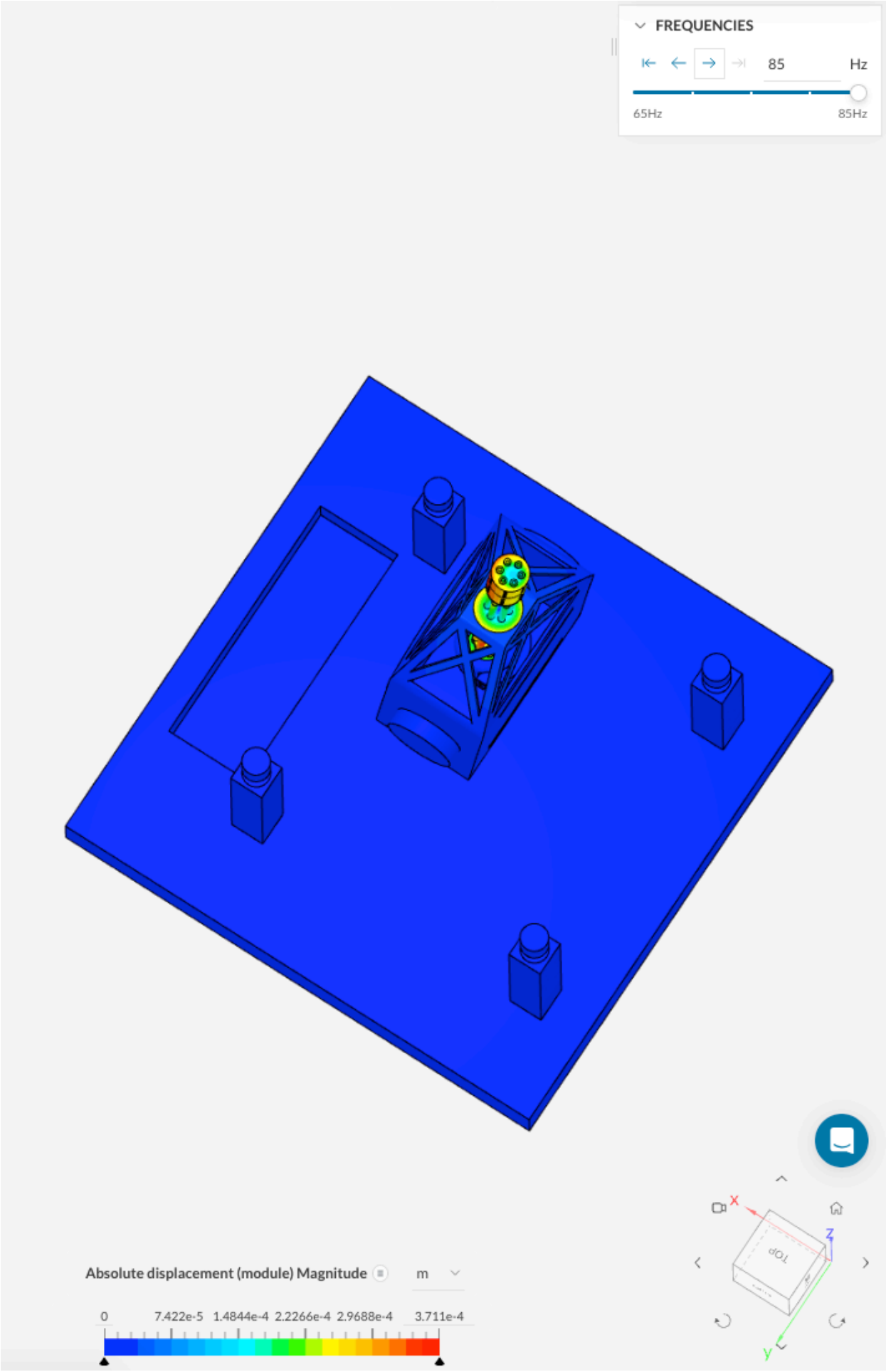












---

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ**

---



