Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

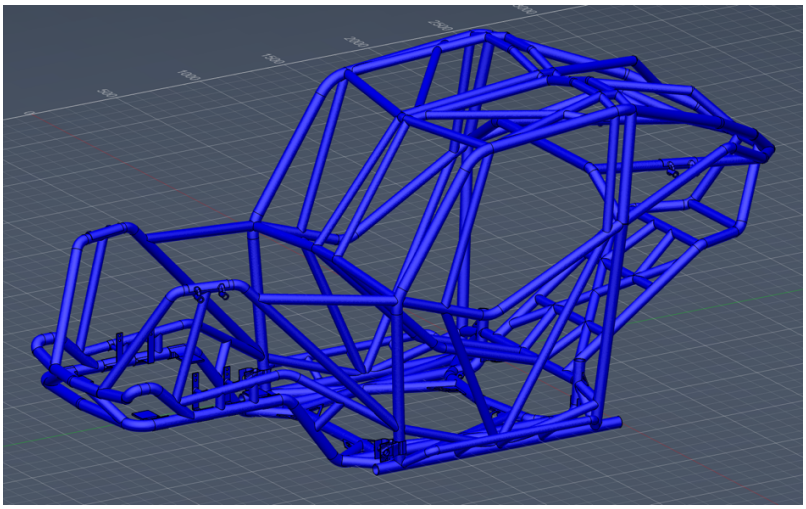
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τοπολογική Βελτιστοποίηση Μηχανολογικών Εφαρμογών

Διπλωματική Εργασία

Του

Παναγιώτη Γερακαράκου Κωνσταντάκου



Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Αμαλία Μουτσοπούλου

Περίληψη

Στο ξεκίνημα της εργασίας αναγράφεται η ιστορική αναδρομή στη βελτιστοποίηση της τοπολογίας. Πραγματοποιείται η περιγραφή των κατηγοριών της βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται αναλυτικά οι τέσσερις πιο γνωστές μαθηματικοί μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική παραγωγή. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα μαθηματικά βήματα αυτών των μεθόδων μέσω πεπερασμένων στοιχείων και παράλληλα αναλύεται η θεωρία προσομοίωσης του σασί ως τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο.

Γίνεται περιγραφή του λογισμικού που αξιοποιήθηκε για το σύνολο της μελέτης και επεξηγείται πως γεφυρώνεται ο σχεδιασμός σωληνωτών τμημάτων με την προσομοίωση, την επιβολή φορτίων, τη δημιουργία διαχωριστικού πλέγματος και την αξιολόγηση των τάσεων. Ακολουθεί η δομική ανάλυση του κύριου δικτυωτού πλαισίου για όχημα τύπου Trophy Truck. Εξηγείτε η επιλογή του υλικού κατασκευής του και παρουσιάζονται όλα τα ρεαλιστικά σενάρια φόρτισης που έχουν επιβληθεί στο όχημα.

Στο τέλος, η μελέτη εστιάζει στην εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε επιμέρους εξαρτήματα, ενσωματωμένα στο δικτυωτό πλαίσιο (σασί) του οχήματος. Για την μείωση της μάζας, χρησιμοποιούνται από το λογισμικό οι μαθηματικοί αλγόριθμοι Shape Optimization και Generative Design. Η εργασία ολοκληρώνεται με την δυναμική ανάλυση, εξασφαλίζοντας τις φυσικές ιδιοσυχνότητες του πλαισίου για την αποφυγή του φαινομένου του συντονισμού.

Abstract

The thesis begins with a historical overview of topology optimization. A description of the optimization categories is provided, and the four most widely known mathematical methods used in industrial manufacturing are presented in details. Subsequently, the mathematical steps of these methods are outlined using finite elements, while the simulation theory of the chassis as a three-dimensional space-frame is simultaneously analyzed.

The software utilized for the entirety of the study is described, explaining how the design of tubular sections is integrated with simulation, load application, mesh generation and stress evaluation. This is followed by the structural analysis of the main space-frame for a Trophy Truck. The selection of its construction material is explained and all realistic loading scenarios imposed an the vehicle are presented.

Finally, the study focuses on the application of topology optimization to individual components integrated into the vehicle's space-frame chassis. To achieve mass reduction, the Shape Optimization and Generative Design mathematical algorithms provided by the software are utilized. The thesis concludes with a dynamic analysis, verifying the natural frequencies of the frame to prevent the phenomenon of resonance.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη ***2***

Abstract ***3***

1. Εισαγωγή ***13***

1.1. Ιστορική αναδρομή **13**

1.2. Σκοπός της εργασίας **15**

2. Κατηγορίες της δομικής βελτιστοποίησης ***16***

2.1. Βελτιστοποίηση μεγέθους **16**

2.2. Βελτιστοποίηση σχήματος **17**

2.3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας **17**

3. Μέθοδοι εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας ***18***

3.1. Μέθοδος SIMP **18**

3.2. Μέθοδος ESO και BESO **20**

3.2.1. ESO με περιορισμό της τάσης 21

3.2.2. ESO για μεγιστοποίηση της στιβαρότητας (ελαχιστοποίηση ενδοτικότητας/compliance) 21

3.2.3. Μέθοδος BESO (Bi directional evolutionary structural optimization) 22

3.3. Μέθοδος Level-Set **25**

3.3.1. Παραμετροποίηση της συνάρτησης Level-Set 25

3.3.2. Διακριτοποίηση της μεθόδου Level-Set 26

3.4. Μέθοδος της τοπολογικής παραγώγου **28**

4. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για δικτυωτό πλαισίου ***30***

4.1. Βήματα της διεργασίας πεπερασμένων στοιχείων **30**

4.1.1. Διακριτοποίηση και επιλογή τύπων στοιχείων 30

4.1.2. Επιλογή μιας συνάρτησης μετατόπισης 31

4.1.3. Ορισμός σχέσεων μεταξύ παραμόρφωσης με μετατόπιση και τάσης με παραμόρφωση 31

4.1.4. Εύρεση του μητρώου δυσκαμψίας και των εξισώσεων του στοιχείου 32

4.1.5. Κατάστρωση των εξισώσεων του στοιχείου για την εύρεση των ολικών ή των συνολικών εξισώσεων και τον ορισμό συνοριακών συνθηκών 33

4.1.6. Επίλυση ως προς τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας (ή της γενικευμένες μετατοπίσεις) 34

4.1.7. Επίλυση ως προς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις του στοιχείου 34

4.1.8. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων 35

4.2. Θεωρία προσομοίωσης του δικτυωτού πλαισίου (σασί) οχήματος σε τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο **36**

4.3. Θεωρία γραμμικού λυγισμού [Linear eigenvalue buckling] **39**

4.4. Δυναμική ανάλυση φυσικών ιδιοσυχνότητων και ιδιομορφών [Modal Analysis]..... 39

5. Περιγραφή του λογισμικού σχεδίασης και ανάλυσης Autodesk Fusion 360 40

5.1. Επισκόπηση της πλατφόρμας και τα περιβάλλοντας εργασίας..... 40

5.2. Μεθοδολογία τρισδιάστατης σχεδίασης δικτυωτών πλαισίων..... 47

5.3. Παραμετροποίηση στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων 53

5.3.1. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων 1ο σεναρίου ανάλυσης..... 59

5.3.2. Παραμετροποίηση και αξιολόγηση 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης..... 67

6. Παρουσίαση του χωροδικτυώματος του οχήματος Trophy Truck και των κύριων στατικών μελετών για την ανάλυση της ακαμψίας και αντοχής του. 74

6.1. Διαστάσεις του δικτυωτού πλαισίου και διατομές των σωληνωτών τμημάτων που το αποτελούν. 74

6.2. Η επιλογή και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού: Χάλυβας AISI 4130 chromoly 259 QT . 77

6.3. Οι στατικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο της αντοχής του δικτυωτού πλαισίου 79

6.3.1. Στατική ανάλυση στρεπτικής ακαμψίας (Torsional stiffness) 80

6.3.2. Στατική ανάλυση κάθετης κάμψης (Vertical bending) 85

6.3.3. Στατική ανάλυση μετωπικής σύγκρουσης (Frontal impact)..... 90

6.3.4. Στατική ανάλυση ανατροπής οχήματος (Rollover & roof crush)..... 95

6.3.5. Στατική ανάλυση πλευρικής κάμψης (Lateral bending) 100

6.3.6. Συγκριτική στατική ανάλυση πλευρικής κάμψης με χρήση ενισχυτικών ελασμάτων (Lateral bending with gusset plates)..... 105

7. Δυναμική ανάλυση του πλαισίου και τοπολογική βελτιστοποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων του 109

7.1. Εισαγωγή στην φιλοσοφία της τοπολογικής βελτιστοποίηση και της μείωσης μάζας.. 109

7.2. Θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης που τέθηκαν σε εφαρμογή..... 110

7.3. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης (Shape optimization) στα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης..... 111

7.3.1. Συγκριτική στατική αξιολόγηση και αποτίμηση μείωσης βάρους τριγωνικού ελάσματος..... 122

7.4. Εφαρμογή της Παραγωγικής Σχεδίασης (Generative Design) στις βάσεις των αναρτήσεων 124

7.4.1. Άνω βάσεις στήριξης αναρτήσεων..... 124

7.4.2. Κάτω βάσεις στήριξης αναρτήσεων..... 136

7.5. Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς του πλαισίου..... 139

7.5.1. Οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του δικτυωτού πλαισίου 141

8. Συμπεράσματα ***145***

9. Βιβλιογραφία ***147***

Κατάλογος εικόνων και πινάκων

Εικόνα 1 Απεικόνιση των περιβαλλόντων εργασίας (workspaces) του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 41
Εικόνα 2 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Design του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 42
Εικόνα 3 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Generative Design του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 43
Εικόνα 4 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Render του Autodesk Fusion 360. 44
Εικόνα 5 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Animation του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 45
Εικόνα 6 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Simulation του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 46
Εικόνα 7 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Manufacture του λογισμικού Autodesk Fusion 360. 47
Εικόνα 8 Απεικόνιση του εργαλείου Create Sketch για την δημιουργία του τρισδιάστατου σκίτσου. 48
Εικόνα 9 Απεικόνιση των εντολών του εργαλείου Create Sketch. 49
Εικόνα 10 Απεικόνιση της εντολής Pipe στην καρτέλα Create. 50
Εικόνα 11 Απεικόνιση της εντολής Combine από την καρτέλα Modify. 51
Εικόνα 12 Απεικόνιση των πλεονάζων τεμαχίων πριν από την αφαίρεση τους με το εργαλείο Remove. 52
Εικόνα 13 Απεικόνιση του αποτελέσματος της χρήσης του εργαλείου Fillet. 53
Εικόνα 14 Απεικόνιση του πρώτου σεναρίου στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. 54
Εικόνα 15 Απεικόνιση της διαδικασίας επιλογής υλικού του πλαισίου. 55
Εικόνα 16 Απεικόνιση του τρόπου ανάπτυξης νέου, ειδικά διαμορφωμένου υλικού. 56
Εικόνα 17 Απεικόνιση των παραμέτρων για την προσομοίωση του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 58
Εικόνα 18 Απεικόνιση της εντολής Solve για την επίλυση της στατικής ανάλυσης. 59
Εικόνα 19 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 60
Εικόνα 20 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 62
Εικόνα 21 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 64
Εικόνα 22 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής δύναμης αντίδρασης του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 65

Εικόνα 23 Απεικόνιση της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 66
Εικόνα 24 Απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης του πλαισίου, για την προσομοίωση του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 67
Εικόνα 25 Απεικόνιση της διαδικασίας επιλογής υλικού του πλαισίου. 68
Εικόνα 26 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 69
Εικόνα 27 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 70
Εικόνα 28 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 71
Εικόνα 29 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής δύναμης αντίδρασης του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 72
Εικόνα 30 Απεικόνιση της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης. 73
Εικόνα 31 Απεικόνιση του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck". 74
Εικόνα 32 Απεικόνιση πλάγιων όψεων του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck". 76
Εικόνα 33 Απεικόνιση εμπρόσθιας και οπίσθιας όψης του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck". 77
Πίνακας 1 Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα AISI 4130 και του αντίστοιχου με θερμική διεργασία 259 QT 78
Εικόνα 34 Απεικόνιση της προσομοίωσης της στρεπτικής ακαμψίας ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου. 81
Εικόνα 35 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας. 82
Εικόνα 36 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας. 83
Εικόνα 37 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας. 84
Εικόνα 38 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας. 85
Εικόνα 39 Απεικόνιση της προσομοίωση της κάθετης κάμψης ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου. 86
Εικόνα 40 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης. 87

Εικόνα 41 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης. 88
Εικόνα 42 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης. 89
Εικόνα 43 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης. 90
Εικόνα 44 Απεικόνιση της προσομοίωση της μετωπικής σύγκρουσης ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου. 91
Εικόνα 45 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης. 92
Εικόνα 46 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης. 93
Εικόνα 47 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης. 94
Εικόνα 48 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης. 95
Εικόνα 49 Απεικόνιση της προσομοίωση της ανάλυσης της ανατροπής του δικτυωτού πλαισίου. 96
Εικόνα 50 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του. 97
Εικόνα 51 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του. 98
Εικόνα 52 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του. 99
Εικόνα 53 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του. 100
Εικόνα 54 Απεικόνιση της προσομοίωση της ανάλυσης της πλευρικής κάμψης του δικτυωτού πλαισίου. 101
Εικόνα 55 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 102
Εικόνα 56 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 103
Εικόνα 57 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 104
Εικόνα 58 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 105

Εικόνα 59 Απεικόνιση της ανάλυσης της πλευρικής κάμψης του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης..... 106
Εικόνα 60 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 107
Εικόνα 61 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης. 108
Εικόνα 62 Απεικόνιση της σύγκρισης των συγκεντρωτικών τάσεων σε κόμβο του κατώτερου τμήματος του πλαισίου, πριν και μετά την ενσωμάτωση τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης..... 109
Εικόνα 63 Απεικόνιση όλων των αρχικών τριγωνικών ελασμάτων ενίσχυσης του δικτυωτού πλαισίου..... 112
Εικόνα 64 Απεικόνιση του ορισμού χώρου εργασίας για την εφαρμογή της διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης..... 113
Εικόνα 65 Απεικόνιση του καθορισμού των δυο σεναρίων φόρτισης του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. 114
Εικόνα 66 Απεικόνιση του ορισμού των περιοχών διατήρησης του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. 115
Εικόνα 67 Απεικόνιση της επιβολής του γεωμετρικού περιορισμού της επίπεδης συμμετρίας του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. 116
Εικόνα 68 Απεικόνιση της καρτέλας παραμέτρων, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης..... 117
Εικόνα 69 Απεικόνιση δυο εκδοχών βέλτιστης κατανομή της σχετικής πυκνότητας, για την διεξαγωγή του βελτιστοποιημένου τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης. 118
Εικόνα 70 Απεικόνιση για την διεξαγωγή του βελτιστοποιημένου τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης..... 119
Εικόνα 71 Απεικόνιση του παραγόμενου πλέγματος πυκνότητας για την διεξαγωγή του τελικού τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης. 120
Εικόνα 72 Απεικόνιση όλων των αρχικών και των βελτιστοποιημένων ενσωματωμένων τριγωνικών ελασμάτων ενίσχυσης του δικτυωτού πλαισίου. 121
Πίνακας 2 Συγκριτικός πίνακας της μάζας των τριγωνικών ελασμάτων πριν και μετά την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. 121
Εικόνα 73 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας των πιθανών σεναρίων φόρτισης, για το αρχικό τριγωνικό έλασμα ενίσχυσης..... 122

Εικόνα 74 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας των πιθανών σεναρίων φόρτισης, για το βελτιστοποιημένο τριγωνικό έλασμα ενίσχυσης. 123
Πίνακας 3 Παρουσίαση της σύγκρισης των ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας (Minimum SF) πριν και μετά την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης..... 124
Εικόνα 75 Απεικόνιση των άνω βάσεων των αναρτήσεων του δικτυωτού πλαισίου..... 125
Εικόνα 76 Απεικόνιση των γεωμετριών εμποδίων, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης. 126
Εικόνα 77 Απεικόνιση των γεωμετριών διατήρησης, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης. 127
Εικόνα 78 Απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης. 128
Εικόνα 79 Απεικόνιση των καρτελών ”Manufacturing” και “Objectives and limits”. 130
Εικόνα 80 Απεικόνιση των εναλλακτικών βελτιστοποιημένων λύσεων, της παραγωγικής σχεδίασης, για την άνω βάση της ανάρτησης. 131
Εικόνα 81 Απεικόνιση της αρχικής και της τελικής μορφής της άνω βάσης της ανάρτησης. 132
Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας της αρχικής και της τελικής μάζας της άνω βάσης της ανάρτησης..... 133
Εικόνα 82 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της αρχικής βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N. 134
Εικόνα 83 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της τελικής βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N. 135
Εικόνα 84 Απεικόνιση της αρχικής και της τελικής μορφής της κάτω βάσης της ανάρτησης. 136
Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας της αρχικής και της τελικής μάζας της κάτω βάσης της ανάρτησης..... 137
Εικόνα 85 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της αρχικής κάτω βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N. 138
Εικόνα 86 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της τελικής κάτω βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N. 139
Εικόνα 87 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των ιδιόμορφών και των ιδιοσυχνοτήτων του δικτυωτού πλαισίου. 140
Πίνακας 6 Πίνακας του συντελεστή συμμετοχής μάζας του πλαισίου στις 12 πρώτες ιδιομορφές του πλαισίου. 141
Εικόνα 88 Απεικόνιση της εγκάρσιας πλευρικής ταλάντωσης του κεντρικού τμήματος του δικτυώματος, της 1ης ιδιομορφής του. 142
Εικόνα 89 Απεικόνιση της ταλάντωσης στο διαμήκη άξονα Y του δικτυωτού πλαισίου, της 3ης ιδιομορφής του..... 143

Εικόνα 90 Απεικόνιση της ταλάντωσης στον διαμήκη άξονα Z του δικτυωτού πλαισίου, της 4ης ιδιομορφής του. 144

1. Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση του λόγους αντοχής προς βάρος είναι ένα από τα θεμελιώδη ζητούμενα στον τομέα της μηχανολογικής σχεδίασης. Συγκεκριμένα σε κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική, η μείωση της μάζας μιας κατασκευής αποτελεί καθοριστικό ρόλο, καθώς έχει άμεση σύνδεση με τη βελτίωση των δυναμικών ιδιοτήτων και την εξοικονόμηση υλικού. Όμως, οι καθιερωμένες προσεγγίσεις σχεδιασμού στηρίζονται στην εμπειρία του μηχανικού, μέθοδοι που δεν είναι εφικτές να εξασφαλίσουν την βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου υλικού.

Η αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών επιτυγχάνεται μέσω της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Topology Optimization). Είναι μια προηγμένη υπολογιστική μέθοδος, η οποία προσδιορίζει την ιδανική κατανομή του υλικού για συγκεκριμένο χώρο σχεδίασης. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Με την επιβολή των φορτίων, τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες και τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, ο αλγόριθμος αφαιρεί στοχευμένα υλικό από τις περιοχές χαμηλής καταπόνησης. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται γεωμετρίες με οργανική μορφολογία, όπου η μάζα που διατηρείται εντοπίζεται σε σημεία που είναι σημαντικά, για τον ασφαλή διαμοιρασμό των τάσεων.

1.1. Ιστορική αναδρομή

Η μέθοδος της βελτιστοποίησης της τοπολογίας διαδραματίζει πλέον καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη μηχανολογία, καθώς ανοίγει τον δρόμο για το σχεδιασμό κατασκευών με την ελάχιστη δυνατή χρήση υλικού, διατηρώντας παράλληλα σταθερές τις μηχανικές αντοχές και ιδιότητες τους. Η ιστορική της αφετηρία εντοπίζεται στο έργο του Galileo Galilei (1638), ο οποίος μελέτησε τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχήματος μιας δοκού υπό την επίδραση καμπτικού φορτίου, παρατηρώντας πως η διαφοροποίηση της διατομής κατά μήκος του άξονα της, επηρεάζει την αντοχή της. Αργότερα, κατά τον 17ο και 18ο αιώνα, επιστήμονες όπως οι Newton, Euler, και Lagrange, ανέπτυξαν βελτιστοποιημένους σχεδιασμούς μέσω αυστηρών μαθηματικών προσεγγίσεων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την προσπάθεια ελαχιστοποίησης του υλικού σε αξονοσυμμετρικά υποστυλώματα που υπόκεινται σε λυγισμό.

Οι αναλύσεις για την εύρεση αποδοτικότερων δομικών μορφών επεκτάθηκαν από τον Levy (1873), ο οποίος απέδειξε θεωρητικά ότι για την επίτευξη της βέλτιστης μορφή ενός δικτυώματος υπό σταθερή καταπόνηση, θα πρέπει να είναι στατικά ορισμένο. Στην συνεχεία, ο A.G.M. Michell (1904) διατύπωσε μια πρωτοποριακή θεωρητική προσέγγιση (γνωστή και ως δικτύωμα Michell), η οποία εξασφάλισε το ελάχιστο δυνατό βάρος σε ένα δικτύωμα υπό την επιρροή συγκεκριμένων τάσεων. Παρόλο που ο Michell υπήρξε πρωτοπόρος, για πολλές δεκαετίες η θεωρία του δεν εφαρμόστηκε σε πρακτικό στάδιο και

παρέμεινε ένα αμιγώς ακαδημαϊκό επίτευγμα. Το γεγονός αυτό, οφειλόταν στον τεράστιο όγκο των απαιτούμενων υπολογισμών, οι οποίοι ήταν αδύνατον να υπολογισθούν με τα μέσα της εποχής (πολύπλοκες τρισδιάστατες μηχανολογικές εφαρμογές).

Ο ανταγωνισμός στον τομέα της αεροναυπηγικής, κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου, κατέθεσε νέο κίνητρο για την ανάπτυξη διαδικασιών εξοικονόμησης βάρους. Πρωταγωνιστές σε αυτή τη προσπάθεια, ήταν ερευνητές όπως οι Smith και Cox, οι οποίοι ανέπτυξαν αρχές βασισμένες στην μείωση του βάρους των κατασκευών. Ωστόσο, η πραγματική επανάσταση στη δομική βελτιστοποίηση μέσω της πρακτικής εφαρμογής του απειροστικού λογισμού και των αριθμητικών μεθόδων, συντελέστηκε με την έλευση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Από το 1960 και έπειτα, αναπτύχθηκαν πολυάριθμες αριθμητικές αναλύσεις, όπως οι μέθοδοι των Hooke και Jeeves, η μέθοδος του Powell, η μέθοδος του Zoutendijk, η μέθοδος του Rosen, αλλά και η γνωστή μέθοδος του Box. Αυτές οι μεθοδολογίες αποσκοπούσαν στην επίλυση του γενικότερου προβλήματος της βελτιστοποίησης για οποιαδήποτε μαθηματική συνάρτηση, διαφοροποιώντας την επιβολή περιορισμών, ανεξάρτητα από την φυσική υπόσταση του προβλήματος. Έτσι, μέχρι το 1970, η επιστημονική κοινότητα πίστευε πως αυτού του τύπου οι αλγόριθμοι μη γραμμικού προγραμματισμού θα επαρκούσαν για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης της τοπολογίας στη μηχανολογία.

Όμως στην πράξη, η εφαρμογή αυτών των μεθόδων αποκάλυψε δυο σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, το υπολογιστικό κόστος ήταν απαγορευτικό, διότι η διακριτοποίηση του εξαρτήματος μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEA) παρήγαγε χιλιάδες μεταβλητές σχεδιασμού. Δεύτερον, οι αλγόριθμοι συχνά εγκλωβίζονταν σε τοπικά ελάχιστα, αδυνατώντας να βρουν την ολική βέλτιστη λύση. Αυτά τα αδιέξοδα, οδήγησαν τη δεκαετία του ’70 στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας των βέλτιστων κριτηρίων (optimality criteria - OC). Η προσέγγιση αυτή βασίστηκε σε καθαρά μηχανικά κριτήρια, σε θεωρίες της μηχανικής των υλικών και στη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange, προσφέροντας πολύ πιο αποδοτικές λύσεις.

Η καθοριστική χρονιά, ωστόσο, που εδραίωσε τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας ως ένα πρακτικά εφαρμόσιμο μηχανολογικό εργαλείο, ήταν το 1988. Οι ερευνητές Martin Bendsoe και Noboru Kikuchi εισήγαγαν τη μέθοδο της ομογενοποίησης (homogenization method), καταφέρνοντας να συνδυάσουν αποτελεσματικά τη βελτιστοποίηση της τοπολογίας με τα πεπερασμένα στοιχεία. Αποδείχθηκε ότι είναι εφικτή η υπολογιστική βελτίωση της κατανομής του υλικού, εντός ενός δεδομένου χωρίου σχεδιασμού.

Η δεκαετία του ’90, ήταν μια περίοδος ραγδαίας εξέλιξης όπου αναπτύχθηκαν οι κυριότερες σύγχρονες μέθοδοι της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Οι Bendsoe, Rozvany και Zhou διαμόρφωσαν την ευρέως διαδεδομένη μέθοδο SIMP (solid isotropic material with penalization). Η SIMP εισήγαγε τη λογική της συνεχούς μεταβλητής, δηλαδή την μαθηματική προσέγγιση τη πυκνότητας του υλικού από το 0 έως το 1. Με την παράλληλη χρήση, ενός

παράγοντα ποινής για την αφαίρεση των ενδιάμεσων τιμών, όπου αποτελούσαν τις μη κατασκευάσιμες πυκνότητες (συμπαγές υλικό ή κενό), αναδείχθηκε που ακριβώς υπάρχει απαίτηση υλικού στο χώρο σχεδίασης.

Την ίδια χρονική περίοδο, αναπτύχθηκαν και άλλες θεμελιώδεις προσεγγίσεις. Ξεχωρίζουν, η μέθοδος εξελικτικής βελτιστοποίησης κατασκευών (ESO) και η πιο εξελιγμένη, αμφίδρομη μορφή της (BESO), οι οποίες βασίστηκαν στη λογική της διακριτής μεταβλητής, αφαιρώντας και προσθέτοντας σταδιακά υλικό, βάσει των τοπικών τάσεων. Παράλληλα, αναπτύχθηκε η τοπολογική παράγωγος (topological derivative), μια αυστηρή μαθηματική προσέγγιση που αξιολογεί την ευαισθησία της κατασκευής όταν δημιουργείται μια απειροστή οπή στο εσωτερικό της. Έτσι, καθοδηγεί τον αλγόριθμο για το που πρέπει να αφαιρεθεί μάζα χωρίς να μειωθεί η στιβαρότητα της κατασκευής. Τέλος, αναδείχθηκε η μέθοδος Level-Set, η οποία αντί να χειρίζεται την πυκνότητα των μεμονωμένων στοιχείων, διαχειρίζεται και εξελίσσει τα ίδια τα εξωτερικά όρια του σχήματος με απόλυτη μαθηματική ομαλότητα.

Με την ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών στις αρχές του 21ου αιώνα, η βελτιστοποίηση της τοπολογίας, ενσωματώθηκε στα κορυφαία εμπορικά λογισμικά CAE (computer aided engineering). Η άμεση εφαρμογή της σε βιομηχανίες, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική, πρόσφερε τεράστια οικονομικά και ενεργειακά οφέλη λόγω της δραστικής μείωσης της μάζας των οχημάτων.

Παρά την γενική πρόοδο, η βιομηχανία ήρθε σύντομα αντιμέτωπη με ένα νέο εμπόδιο. Η παραγωγή πολύπλοκων, οργανικών σχημάτων που παρήγαγαν οι αλγόριθμοι (και των τεσσάρων μεθόδων που αναφέρθηκαν) ήταν συχνά αδύνατη με τις παραδοσιακές αφαιρετικές μεθόδους κατεργασίας (όπως το CNC ή με συμβατική χύτευση). Το εμπόδιο αυτό ξεπεράστηκε οριστικά τα τελευταία χρόνια με την προσθετική κατασκευή (3D printing) μετάλλων και προηγμένων πολυμερών υλικών.

Σε συνδυασμό με την ανάπτυξη του παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design) μέσω της τεχνητής νοημοσύνης, είναι εφικτή η δημιουργία χιλιάδων βελτιστοποιημένων λύσεων. Στην σύγχρονη εποχή της μηχανολογίας, η βελτιστοποίηση της τοπολογίας έχει μεταβεί από την επιστημονική έρευνα στο επίκεντρο της παραγωγής, αποτελώντας το πιο ισχυρό εργαλείο στα χέρια του σύγχρονου μηχανικού για το σχεδιασμό ελαφρών, αποδοτικών και καινοτόμων εξαρτημάτων.

1.2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη προσέγγιση της τοπολογικής βελτιστοποίησης, συνδέοντας το θεωρητικό μαθηματικό υπόβαθρο με την πρακτική εφαρμογή στη μηχανολογική σχεδίαση. Η μελέτη στοχεύει στην παρουσίαση και ανάλυση τεσσάρων κύριων μαθηματικών μεθόδων που διέπουν τη διαδικασία της

βελτιστοποίησης. Σε πρακτικό επίπεδο, η εργασία επικεντρώνεται στην υπολογιστική ανάλυση ενός οχήματος κατηγορίας Trophy Truck.

Ουσιαστικά, πραγματοποιούνται στατικές αναλύσεις μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), για την πλήρη αξιολόγηση και ανάδειξή της αντοχής και της ακαμψίας του δικτυωτού πλαισίου (σασί) υπό ακραία σενάρια φόρτισης. Στην συνέχεια, η εργασία διερευνά τον τρόπο με τον οποίο η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί στοχευμένα σε επιμέρους συγκολλημένα εξαρτήματα στο κύριο σασί, υλοποιώντας τον ιδανικό σχεδιασμό τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι όλες οι σχεδιαστικές παρεμβάσεις, καθώς και οι στατικές και τοπολογικές αναλύσεις, πραγματοποιηθήκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

2. Κατηγορίες της δομικής βελτιστοποίησης

Στην σύγχρονη μηχανολογική μελέτη, η δομική βελτιστοποίηση ταξινομείται σε τρεις κατηγορίες. Η διαβάθμιση αποτελείται από την τροποποίηση συγκεκριμένων διαστασιολογικών παραμέτρων, στη αλλαγή των εξωτερικών ορίων της γεωμετρίας και στο ριζικό ανασχεδιασμό της κατανομής του υλικού στο χώρο. Συγκεκριμένα, οι προσεγγίσεις αυτές είναι η βελτιστοποίηση μεγέθους, η βελτιστοποίηση σχήματος και αντίστοιχα η τοπολογική βελτιστοποίηση. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εν λόγω κατηγοριών εξηγούνται στις υποενότητες που ακολουθούν.

2.1. Βελτιστοποίηση μεγέθους

Η βελτιστοποίηση ως προς το μέγεθος μιας κατασκευής αποτελεί μια από τις πιο γνωστές και αποδοτικές διεργασίες ανάπτυξης ελαφρυντικού σχεδιασμού, κρατώντας ανέπαφες τις μηχανικές ιδιότητες στις αντοχές. Η αρχική συνδεσμολογία (τοπολογία) του συνόλου ή αλλιώς η γεωμετρική του μορφολογία δεν αλλάζει, καθώς η συγκεκριμένη μεθοδολογία πράττει στοχευμένες διαφοροποίησης στις διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής.

Πρακτικά, οι μεταβλητές του σχεδιασμού στην συγκεκριμένη μέθοδο, βασίζονται σε παραμέτρους όπως είναι το πάχος σε ένα έλασμα (δισδιάστατο στοιχείο) ή από το εμβαδόν και τις διαστάσεις της διατομής μιας δοκού (μονοδιάστατα στοιχεία). Ο αλγόριθμος είναι υπεύθυνος για τον υπολογισμό της ιδανικής κατανομής του υλικού, δηλαδή μειώνοντας τις διαστάσεις των στοιχείων που δέχονται μικρά ποσοστά καταπόνησης και απαλλάσσοντας την κατασκευή από το περιττό βάρος, αλλά ταυτόχρονα προσθέτοντας στα κρίσιμα σημεία λόγω της συγκέντρωσης τάσεων. Η βελτιστοποίηση του μεγέθους, συνολικά προσφέρει την

μέγιστη σχεδιαστική αποδοτικότητα, με τον ελάχιστο επιτρεπτό όγκο και χωρίς την ανάπτυξη αλλαγών στην δομική σταθερότητα και ακεραιότητα της κατασκευής.

2.2. Βελτιστοποίηση σχήματος

Η βελτιστοποίηση σχήματος (Shape optimization) είναι η μεθοδολογική προσέγγιση κατά την οποία τροποποιείται η εξωτερική μορφολογία και το περίγραμμα του κατασκευάσματος, χωρίς να αλλάζει η θεμελιώδης τοπολογία και η συνδεσμολογία του. Ουσιαστικά, η γενική αρχιτεκτονική του εξαρτήματος δεν αλλάζει, αλλά αντιθέτως πραγματοποιείται άμεση επέμβαση στις καμπύλες και στις οριακές επιφάνειες του σχεδίου, με σκοπό να καταστεί η γεωμετρία πιο αποδοτική ως προς την ροή των τάσεων.

Υπολογιστικά, αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της μετακίνησης των κόμβων (node morphing) του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στα όρια του μοντέλου, αφήνοντας ανέπαφο τον συνολικό αριθμό των οπών ή των συμπαγών περιοχών. Στις σύγχρονες μηχανολογικές μελέτες, συχνά εφαρμόζεται ένας συνδυασμός βελτιστοποίησης μεγέθους και σχήματος, παράγοντας μορφές που κυμαίνονται από πολύπλοκους και ανομοιόμορφους σχεδιασμούς, μέχρι άψογα βελτιστοποιημένα, τυποποιημένα προφίλ. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της διεργασίας είναι η αλλαγή της εσωτερικής μορφολογίας των οπών που ήδη υπάρχουν σε διάφορα ελάσματα. Με αυτήν την αναπτυσσόμενη προσαρμογή στο σχήμα, επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση του υλικού και ελάφρυνση της κατασκευής. Έτσι αποφεύγονται, οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων (stress concentrations) και διατηρείται η δομική αντοχή σε υψηλά επίπεδα.

2.3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology optimization) αποτελεί μια υπολογιστική διεργασία που στοχεύει στη δημιουργία μιας δομής με βέλτιστες μηχανικές και δυναμικές ιδιότητες, χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο δυνατό όγκο υλικού. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αξιοποιεί προηγμένους μαθηματικούς αλγόριθμους σε άμεση συνεργεία με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

Κατά την έναρξη της διαδικασίας, ορίζεται το χωριό σχεδιασμού, δηλαδή ο μέγιστος διαθέσιμος όγκος μέσα στον οποίο θα αναπτυχθεί το τεμάχιο. Παράλληλα, εισάγονται οι ιδιότητες του υλικού, καθώς και οι οριακές συνθήκες, δηλαδή τα σημεία στήριξης του εξαρτήματος και οι εξωτερικές καταπονήσεις με τις οποίες θα έρθει αντιμέτωπο.

Στην συνέχεια το λογισμικό εκτελεί μια επαναληπτική διαδικασία ανάλυσης, κατά την οποία αξιολογεί την κατανομή των τάσεων και αφαιρεί σταδιακά την περιττή μάζα από τις περιοχές που καταπονούνται λιγότερο. Με αυτόν τον τρόπο αλλάζει ριζικά η αρχιτεκτονική της δομής του εξαρτήματος. Η διεργασία αυτή τερματίζεται όταν ικανοποιηθούν τα αυστηρά κριτήρια

σύγκλισης που έχουν οριστεί. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η πιο αποδοτική μορφολογία του εξαρτήματος, δηλαδή είναι η δομή που επιτυγχάνει την ιδανική ισορροπία μεταξύ ελάχιστου βάρους και μέγιστης στιβαρότητας, ικανοποιώντας πλήρως όλα τα απαιτούμενα μηχανικά μέτρα ασφάλειας και αντοχής.

3. Μέθοδοι εφαρμογής της βελτιστοποίησης τοπολογίας

3.1. Μέθοδος SIMP

Η μέθοδος SIMP, θεωρείται μία από τις πιο δημοφιλείς μαθηματικές προσεγγίσεις, βασιζόμενη στα πεπερασμένα στοιχεία. Κύριος σκοπός της, είναι η βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, εξετάζοντας τον χώρο σχεδιασμού (ομοιόμορφα διαμοιρασμένος σε πεπερασμένα στοιχεία) για την ύπαρξη συμπαγούς δομής υλικού ή κενού. Αυτό που καταφέρνει η συγκεκριμένη διεργασία, είναι να αποκλείει τις ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας που μπορεί να προκύψουν στα στοιχεία. Έτσι, η σχετική πυκνότητα του υλικού, ωθείται στο να λάβει δυαδικές τιμές. Ουσιαστικά, $x_i = 1$ για τις περιοχές που απαιτούν υλικό και $x_i = 0$ (ή μια τιμή που προσεγγίζει το μηδέν) για εκείνες που είναι κενές.

Το γεγονός, ότι η παρουσία του υλικού μεταβάλλεται, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται άμεσα από τη σχετική πυκνότητα του κάθε στοιχείου. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E_i του στοιχείου i, γίνεται με την σχέση:

$$E_i(x_i) = x_i E_0$$

Όπου το E_0 δηλώνει το μέτρο ελαστικότητας του συμπαγούς υλικού και το x_i το συντελεστή της σχετικής πυκνότητας, με $x_i \in (0,1]$. Πρακτικά, το x_i δεν μπορεί να πάρει την απόλυτη μηδενική τιμή, διότι η έλλειψη ακαμψίας θα προκαλούσε ανωμαλίες (singularities) στους πίνακες του αλγόριθμου, κατά την επίλυση. Για τον λόγο αυτόν, ορίζεται ένα κατώτερο όριο x_{min} κοντά στο μηδέν. Επιπλέον, το p δηλώνει το συντελεστή ποινής (penalization factor), όπου για πρακτικούς λόγους, επιλέγεται η τιμή $p = 3$. Ο παράγοντας αυτός «τιμωρεί» τις ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας (στην γκρι ζώνη), καθοδηγώντας τη λύση προς τα άκρα, δηλαδή σε στοιχεία με $x_i = 1$ ή $x_i = x_{min}$.

Το συνολικό (ολικό) μητρώο δυσκαμψίας K, επηρεάζεται από το μέτρο ελαστικότητας των επιμέρους στοιχείων και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$K(x) = \sum_{i=1}^{N} \left(x_{min} + (1 - x_{min}) x_i^p\right) K_i$$

Όπου K_i είναι το μητρώο δυσκαμψίας του εκάστοτε στοιχείου με συμπαγές υλικό και N το συνολικό πλήθος των στοιχείων στον χώρο που επιδέχεται βελτιστοποίηση.

Ολόκληρη η διαδικασία αυτής της μεθοδολογίας εφαρμόζεται συχνά στο κλασικό πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της υποχωρητικότητας (Compliance, C), με στόχο τη μεγιστοποιήσω της συνολικής δυσκαμψίας του εξαρτήματος. Ο μαθηματικός αλγόριθμος της SIMP αναζητά την ιδανική κατανομή των πυκνοτήτων των τμημάτων, ώστε να μειωθεί δραματικά η ενδοτικότητα της κατασκευής. Ο τύπος που εκφράζει την αντικειμενική συνάρτηση της υποχωρητικότητας είναι:

$$minC(x) = U^T KU = \sum_{i=1}^{N} x_i^p u_i^T k_i u_i$$

Όπου K είναι το ολικό μητρώο δυσκαμψίας, U το ολικό διάνυσμα μετατοπίσεων, ενώ k_i και u_i, δηλώνουν τον πίνακα ακαμψίας και το διάνυσμα μετατόπισης του κάθε στοιχείου αντίστοιχα.

Η ελαχιστοποίηση αυτή υπόκειται στη θεμελιώδη εξίσωση ισορροπίας της ελαστικότητας:

$$F = KU$$

Όπου το F είναι το διάνυσα των εξωτερικών δυνάμεων. Τέλος, ο αλγόριθμος πρέπει να σέβεται τον περιορισμό του διαθέσιμου όγκου υλικού, κάτι που εξασφαλίζεται με την ανισότητα:

$$V(x) = \sum_{i=1}^{N} x_i u_i \leq V^*$$

Όπου V^* είναι ο μέγιστος επιτρεπτός όγκος της κατασκευής και u_i ο όγκος του κάθε πεπερασμένου στοιχείου ξεχωριστά.

Ο αλγόριθμος για να ξεχωρίσει ποια πεπερασμένα στοιχεία θα πρέπει να συντηρήσουν την συμπαγή τους δομή και ποια θα πρέπει να παραμείνουν κενά ή να τους αφαιρεθεί το υλικό, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της ευαισθησίας της αντικειμενικής συνάρτησης. Ουσιαστικά, για κάθε x_i στοιχείο, θα πρέπει να λυθεί η μερική παράγωγος της υποχωρητικότητας C. Η συγκεκριμένη παράγωγος, εκφράζεται από τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$\frac{dC}{dx_i} = -px_i^{p-1} u_i^T k_0 u_i$$

Από την ύπαρξη του αρνητικού πρόσημου, γίνεται φανερό πως η αύξηση της πυκνότητας του υλικού σε οποιοδήποτε στοιχείο, αντιστοιχεί σε μείωση της υποχωρητικότητας (αύξηση της

δυσκαμψία). Με την ένδειξη αυτών των τιμών ευαισθησία, ο αλγόριθμος αντιλαμβάνεται ποια είναι τα κρίσιμα στοιχεία που πρέπει να «προμηθευτούν» με υλικό.

Με την άμεση εφαρμογή της μεθόδου SIMP και χωρίς επιπρόσθετους περιορισμούς, παραπέμποται δυο γνωστές αριθμητικές κρίσεις. Η πρώτη είναι ο αλγόριθμος της σκακιέρας (Checkerboard Effect), στον οποίο υπάρχει η τάση να αναπτύσσονται κάποιες ζώνες, αποτελούμενες από στοιχεία με μεταβαλλόμενη πυκνότητα (από πλήρη πυκνότητα σε κενό). Επίσης, με αυτό το μοτίβο της αναφερόμενης αριθμητικής αστάθειας δεν προσεγγίζεται η ακαμψία του συνόλου.

Η δεύτερη αριθμητική κρίση είναι η εξάρτηση από το πλέγμα (Mesh dependency). Ουσιαστικά το δομημένο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύσσει πυκνότερη μορφολογία, επιβάλλοντας ριζικές τοπολογικές αλλαγές, καταλείποντας στην δημιουργία λεπτότερων δοκών, αντί να επιδιώκεται απλώς η σχηματική βελτίωση της κατασκευής.

Για την αποφυγή όλων αυτών των ανεπιθύμητων καταστάσεων, θα πρέπει να τεθούν σε εφαρμογή φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά προσφέρουν στο σύστημα μια μικροσκοπική ακτίνα επιρροής r_{min}, εξαφανίζοντας τις αιφνιδιάστηκες μεταβολές ενδιάμεσα των στοιχείων και θέτοντας ένα μέτρο ελέγχου ως προς το πάχος των τμημάτων του συνόλου.

Η εφαρμογή των φίλτρων και τον υπολογισμό των ευαισθησιών, θα οδηγήσουν στην σωστή εφαρμογή των επόμενων επαναλήψεων, ώστε οι τιμές των πυκνοτήτων του συστήματος να προσαρμοστούν στις ανανεώσεις που έχουν γίνει. Η πιο δημοφιλείς διαδικασία για την εύρεση λύσεων τέτοιου είδους προβλημάτων της μεθόδου SIMP, είναι η λεγόμενη «Κριτηρίων βελτιστότητας (Optimality criteria)». Η συγκεκριμένη μεθοδολογία, συνδυάζει τις τιμές από την παράγωγο με έναν Lagrange πολλαπλασιαστή (όπου με την παρουσία του εκτελείται έλεγχος στο περιορισμό του όγκου) για την βελτίωση των αποτελεσμάτων της πυκνότητας x_i για κάθε στοιχείο, σε κάθε κύκλο διεργασίας. Η διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται μέχρι να μην είναι εφικτή καμία άλλη αλλαγή στον χώρο σχεδιασμού.

3.2. Μέθοδος ESO και BESO

Η μέθοδος ESO (Evolutionary structural optimization method) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά και εξελίχθηκε κατά την δεκαετία του ΄90 από τους Xie και Steven. Η συγκεκριμένη διεργασία, ουσιαστικά αφαιρεί βαθμιαία ανούσιο υλικό από την κατασκευή. Η ESO δίνει λύσεις σε τρείς αναφερόμενες περιπτώσεις, οι οποίες είναι οι εξής:

α) ESO για περιορισμούς τάσης
β) ESO για βελτιστοποίηση της στιβαρότητας
γ) BESO: Bi-directional evolutionary structural optimization

3.2.1. ESO με περιορισμό της τάσης

Με την πλήρη εξέταση των τάσεων στο πεδίο της κατασκευής, είναι εφικτός ο εντοπισμός των περιοχών που ασκούνται τάσεις με χαμηλές τιμές. Με την ιδανικότερη περίπτωση να θεωρείται η κατασκευής που κατανέμεται από περιοχές με ισοδύναμες τάσεις, το σύστημα απαλλάσσεται από τα στοιχειά χαμηλών τάσεων. Η αφαίρεση υλικού πραγματοποιείται, με την δήλωση ενός κατωφλιού (threshold) πάχους των πεπερασμένων στοιχείων, όπου τίποτα δεν συνυπολογίζεται, διότι δεν είναι αποδεκτό να υπάρχουν στοιχεία μηδενικού πάχους, δηλαδή να αποτελούν ιδιόμορφο μητρώο στιβαρότητας Κ.

Για την ανάπτυξη πλήρη ελέγχου, με την προϋπόθεση να είναι εφικτή η εύρεση των σημείων με χαμηλή τάση, αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να πληρούν την παρακάτω ανίσωση:

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} < RR_i$$

Με το RR_i να είναι ο λόγος της απόρριψης. Ο λόγος αυτός δεν αλλάζει κατά την διάρκεια της μελέτης στον φορέα και στην απομάκρυνση των στοιχείων, ώσπου να φτάσει στο σημείο να μην είναι εφικτή η απομάκρυνση άλλων στοιχείων με την παρέμβαση του. Έχοντας αυτό το παρασκήνιο, προκύπτει ένας άλλος λόγος ER, ο οποίος ενσωματώνεται στον λόγο απομάκρυνσης, δίνοντας ταυτόχρονα τον εξής τύπο:

$$RR_{i+1} = RR_i + ER$$

Ο αναφερόμενος λόγος απομάκρυνσης, έχοντας αυξητικές τάσεις, δίνει συνέχεια στην μελέτη μέχρι το σύστημα να φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Η διαδικασία της βελτιστοποίηση κορυφώνεται όταν οποιοδήποτε στοιχείο διαπεράσει το όριο διαρροής του υλικού.

3.2.2. ESO για μεγιστοποίηση της στιβαρότητας (ελαχιστοποίηση ενδοτικότητας/compliance)

Η ύπαρξη αυτής της εκδοχής διαγραφής (ή μη διαγραφής) υλικού από την κατασκευή, έχει κύριο στόχο την βελτιστοποίηση της τοπολογίας του, με τη χρήση της ενδοτικότητας (average compliance). Ο ορισμός της πραγματοποιείται από την ολική ενέργεια των παραμορφώσεων του συνόλου ή από το ισοδύναμο έργο των εξωτερικών καταπονήσεων που δέχεται η κατασκευή και εκφράζεται από τον εξής τύπο:

$$C = \frac{1}{2} f^T u$$

με το f δηλώνει το διάνυσμα των δυνάμεων και u το διάνυσμα των μετατοπίσεων. Η διαφορά στο μητρώο της αρχική κατασκευής με το μητρώο που έχει δημιουργηθεί με την

απόσπαση του i-οστού πεπερασμένου στοιχείου είναι ισοδύναμη με το “αντίπαλο” μητρώο στιβαρότητας του i-οστού στοιχείου και αποδεικνύεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta K = K^* - K = -K_i$$

Αν ληφθεί υπόψη, ότι η διαγραφή ενός στοιχείου δεν αλλάζει το διάνυσμα φόρτισης και με τον υπολογισμό της σχέσης:

$$Ku = f$$

Θα είναι εφικτό να οριστεί η μεταβολή του διανύσματος της μετατόπισης με τον εξής τρόπο:

$$\Delta u = -K^{-1}\Delta K u$$

Τελικά, από τις προηγούμενες σχέσεις είναι δυνατό να υπολογισθεί η μεταβολή της μέσης ενδοτικότητας:

$$\Delta C = \frac{1}{2} f^T \Delta u = -\frac{1}{2} f^T K^{-1} \Delta K u = \frac{1}{2} u_i^T K_i u_i$$

Με την κατάληξη του τύπου δηλώνεται με το σύμβολο ${\alpha_i}^e$, δίνοντας την σχέση:

$$\alpha_i^e = u_i^T K_i u_i$$

3.2.3. Μέθοδος BESO (Bi directional evolutionary structural optimization)

Η μέθοδος BESO αποτελεί μια από τις αποτελεσματικές τεχνικές βελτιστοποίησης της τοπολογίας. Σε αντίθεση με τις παλαιότερες προσεγγίσεις, η BESO επιτρέπει την ταυτόχρονη αφαίρεση και προσθήκη υλικού (η αλλιώς αμφίδρομη εξέλιξη) σε κάθε επαναληπτικό βήμα, δίνοντας στον αλγόριθμο την ικανότητα να διορθώνει προηγούμενες επιλογές του. Στόχος της είναι η καθοδήγηση του σχεδιασμού προς τη βέλτιστη κατανομή υλικού, αποδίδοντας μέγιστη δομική αποδοτικότητα.

Κύριος στόχος της διεργασίας είναι η μεγιστοποίηση της στιβαρότητας της κατασκευής (ή άλλως, η ελαχιστοποίηση της μέσης ενδοτικότητας). Το πρόβλημα διατυπώνεται μαθηματικά ως η ελαχιστοποίηση του συνολικού έργου (W):

$$f(x) = W = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} \Delta U_i^T (F_i + F_{i-1})$$

με το n να είναι ο αριθμός των βημάτων μετατόπισης, ΔU_i το διάνυσμα μετατόπισης και F_i το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων.

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση υπόκειται στους εξής βασικούς περιορισμούς:

$$\begin{cases} R = F - F^{int} = 0 \\ V(x) = \sum_{e=1}^{M} u_e x_e = V^* \\ x = \{x_e\},\ x_e \in \{x_{min}, 1\} \end{cases}$$

με την πρώτη εξίσωση να εκφράζει την ισορροπία δυνάμεων (η F^{int} δηλώνει τις εσωτερικές δυνάμεις), η δεύτερη εξασφαλίζει ότι ο τελικός όγκος της κατασκευής ισούται με τον όγκο - στόχο V* και η τρίτη ορίζει τις διακριτές μεταβλητές σχεδιασμού x_e, για κάθε στοιχείο. Για τη αποφυγή ιδιόμορφων στο μητρώο δυσκαμψίας, τα στοιχεία που αντιστοιχούν σε κενό λαμβάνουν μια πολύ μικρή τιμή x_{min} (κοντά στο μηδέν), ενώ τα συμπαγή στοιχεία υλικού λαμβάνουν την τιμή 1.

Όταν η επιλογή της x_{min} (για παράδειγμα 10^{-3}), προσεγγίζει το μηδέν, εκφράζει σημάδια μιας σύγχρονης εκδοχής της μεθοδολογίας, γνωστή και ως «Soft kill BESO». Η συγκεκριμένη εκδοχή, απαλλάσσει το σύστημα από την ιδιομορφία του μητρώου στιβαρότητας και δίνει την δυνατότητα στα στοιχεία που είναι κενά να έχουν ένα μικρό περιθώριο παραμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται γνωστή η ευαισθησία και ο αλγόριθμός μπορεί να τα επαναφέρει στην προηγούμενη τους κατάσταση, για τον επόμενο κύκλο διεργασίας.

Για να καθοριστεί ποια στοιχεία πρέπει να διατηρηθούν και ποια να απομακρυνθούν, απαιτείται ο υπολογισμός της ευαισθησίας της αντικειμενικής συνάρτησης ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, δηλαδή $\frac{df}{dx_e}$. Καθώς η μεταβολή του υλικού μεταβάλλει άμεσα το πεδίο μετατοπίσεων ολόκληρης κατασκευής, είναι απαιτητικός ο υπολογισμός των όρων $\frac{dU}{dx_e}$.

Για την παράκαμψη αυτού του προβλήματος, εφαρμόζεται η μέθοδος συζυγούς εξίσωσης (Adjoint). Με την εισαγωγή των διανυσμάτων των πολλαπλασιαστών Lagrange λ_i η συνάρτηση είναι η εξής:

$$f(x) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}[(U_i^T - U_{i-1}^T)(F_i + F_{i-1}) + \lambda_i^T(R_i + R_{i-1})]$$

Με την επιλογή του κατάλληλου διανύσματος $\lambda_i = -\left(U_i{}^T - U_{i-1}{}^T\right)$, επιταχύνεται η απάλειψη των παραγόντων μετατοπίσεων, με την ευαισθησία να απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{df}{dx_e} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(U_i^T - U_{i-1}^T)(\frac{dF_i^{int}}{dx_e} + \frac{dF_{i-1}^{int}}{dx_e})$$

Ενσωματώνοντας στη μέθοδο BESO το σχήμα παρεμβολής υλικού SIMP με παράγοντα ποινής p = 3, η παραγωγός μας οδηγεί στον αριθμό ευαισθησίας α_e για κάθε πεπερασμένο στοιχείο:

$$\alpha_e = \frac{1}{p}\frac{df}{dx_e} = x_e^{p-1}E_n^e$$

Με το ${E_n}^e$ να είναι η ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου. Λόγω της διακριτής φύσης της μεθόδου, η εξίσωση ορίζεται ως:

$$\alpha_e = \begin{cases} E_n^e, x_e = 1 \\ x_{min}^{p-1}E_n^e, x_e = x_{min} \end{cases}$$

Για να αποφευχθούν αριθμητικές αστάθειες, όπως το φαινόμενο της σκακιέρας και η εξάρτηση από τη πυκνότητα του πλέγματος, εφαρμόζεται ένα χωρικό φίλτρο αποκατάστασης της μορφής:

$$\hat{\alpha}_e = \frac{\sum_j w(r_{ej})\alpha_j}{\sum_j w(r_{ej})}$$

με το $w(r_{ej}) = max(0, r_{min} - r_{ej})$ να είναι ο συντελεστής βάρους, r_{min} η ακτίνα επιρροής του φίλτρου και το r_{ej} η απόσταση των κεντρικών σημείων των αντίστοιχων στοιχείων. Επιπλέον, για να εξαλειφθούν οι ταλαντώσεις στην τοπολογία κατά την διάρκεια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, ο τελικός αριθμός ευαισθησίας υπολογίζεται ως ο μέσος όρος της τρέχουσας k και της προηγούμενης $k-1$ επανάληψης:

$$\tilde{\alpha}_e = \frac{\hat{\alpha}_e^k + \hat{\alpha}_e^{k-1}}{2}$$

Τυπική, η διεργασία ξεκινά θεωρώντας ολόκληρο το χωρίο σχεδιασμού ως πλήρες συμπαγές. Ο όγκος μειώνεται σταδιακά, σε κάθε βήμα μέχρι να προσεγγιστεί η του όγκου με στόχου V*. Ο απαιτούμενος όγκος υλικού για την επόμενη επανάληψη, καθορίζεται από τον ρυθμό εξέλιξης. Αποτελεί κρίσιμη παράμετρο (της περισσότερες φορές ισούται με 0,02) που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της ταχύτητας του αλγορίθμου:

$$V_{k+1} = V_k(1 \pm ER)$$

Σε κάθε κύκλο διεργασίας υπολογίζεται μια τιμή κατωφλιού (threshold) ευαισθησίας α_{th}, συνήθως μέσω της μεθόδου της διχοτόμησης, ώστε να καλυφθεί ο ακριβής όγκος V_{k+1}. Η

κατάσταση κάθε στοιχείου στην επόμενη επανάληψη (δηλαδή k+1) καθορίζεται από τον εξής μαθηματικό κανόνα ενημέρωσης:

$$x_e^{k+1} = \begin{cases} 1, & \alpha\nu\ \hat{\alpha}_e > \alpha_{th} \\ x_{min}, & \alpha\nu\ \hat{\alpha}_e \leq \alpha_{th} \end{cases}$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρι να επιτευχθεί ο τελικός όγκος (που έχει τεθεί σαν στόχος) και να ικανοποιηθεί το αυστηρό κριτήριο σύγκλισης, το οποίο ελέγχει τη σχετική μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης του έργου W για τα τελευταία N επαναληπτικά βήματα, απαιτώντας να είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή τ:

$$change = \frac{|\sum_{i=1}^{N}(W_{k-i+1} - W_{k-N-i+1})|}{\sum_{i=1}^{N} W_{k-i+1}} \leq \tau$$

3.3. Μέθοδος Level-Set

Η μέθοδος Level-Set είναι μια τεχνική που επιδιώκει την τοπολογική βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας μια έμμεση (implicit) περιγραφή του υλικού εντός του χωρίου μελέτης. Το σχήμα της κατασκευής αναπαρίσταται μέσω μιας συνάρτηση, της οποίας το περίγραμμα μηδενικού επιπέδου (zero control contour) προσδιορίζει τα φυσικά όρια (σύνορα) του συστήματος.

Κατά την πραγματοποίηση της βελτιστοποίησης, αυτό το περίγραμμα μεταβάλλεται και εξελίσσεται στον χώρο, ανάλογα με την ευαισθησία και τη μορφολογία του σχήματος. Οι έμμεσες αυτές μεταβολές είναι που δημιουργούν τις τοπολογικές διαφοροποιήσεις του εξαρτήματος (για παράδειγμα δημιουργία οπών ή συγχώνευση μελών). Για να αποδώσει βελτιστοποιημένα αποτελέσματα η μέθοδος, οι ενδιάμεσες πυκνότητες εγκλωβίζονται σε αυστηρά επιτρεπτά όρια εντός του πλαισιωμένου χωρίου σχεδιασμού.

Ο αλγόριθμος της μεθοδολογίας Level-Set ταξινομείται παραδοσιακά σε τρία στάδια. Το πρώτο είναι η παραμετροποίηση της συνάρτησης Level Set, το δεύτερο είναι η διακριτοποίηση των κινητήριων εξισώσεων και τρίτο η ενημέρωση της συνάρτησης.

3.3.1. Παραμετροποίηση της συνάρτησης Level-Set

Αρχικά, ορίζεται το σταθερό χωρίο σχεδιασμού D, το οποίο περιέχει ολόκληρο το υλικό του εξαρτήματος. Η κατανομή του υλικού Ω με σύνορο Γ περιγράφεται από την ακόλουθη συνάρτηση Level-Set Φ(x):

Φ(x) > 0 για x ∈ Ω όπου είναι η περιοχή με συμπαγές υλικό,
Φ(x) < 0 για x ∈ D \ Ω όπου είναι η περιοχή κενού ή αλλιώς απουσία υλικού,

Φ(x) = 0 για x ∈ Γ όπου είναι το σύνορο υλικού.

Η συνάρτηση Level-Set μπορεί να αναδειχθεί ως μια συνάρτηση Φ(x,t), με χωρικές συντεταγμένες x και πλασματικό χρόνο σχεδιασμού t, ως εξής:

$$\Phi(x,t) = \sum_i \beta_i(t) N_i(x)$$

Το β_i είναι οι συντελεστές σχεδιασμού και $N_i(x)$ οι γνωστές συναρτήσεις βάσης (ή συναρτήσεις σχήματος). Ως συναρτήσεις βάσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτές που προκύπτουν από τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων ή ακόμη και οι ακτινικές συναρτήσεις βάσης (Radial Basis Functions),αναπτύσσοντας με αυτόν τον τρόπο την μεθοδολογία.

3.3.2. Διακριτοποίηση της μεθόδου Level-Set

Για να πραγματοποιηθεί η διεργασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη η επίλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Στη μέθοδο level-Set χρησιμοποιείται συνήθως ένα σταθερό, μη σύμμορφο πλέγμα. Αυτό απαλλάσσει τη διαδικασία από χρονοβόρες και πολύπλοκες αναδημιουργίες πλέγματος κάθε φορά που αλλάζει το σχήμα.

Καθώς το πλέγμα είναι σταθερό, για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων κάθε στοιχείου γίνεται χρήση της συνάρτησης Heaviside, $H(\Phi)$. Η σύνδεση της πυκνότητας ρ_e, του κάθε πεπερασμένου στοιχείου e με τη συνάρτηση Level-Set Φ εκφράζεται ως εξής:

$$\rho_e = \frac{\int_{\Omega_e} H(\Phi) d\Omega}{\int_{\Omega_e} d\Omega}$$

Με το Ω_e να δηλώνει τον φυσικό όγκο χωρίου του στοιχείου e.

Για την αποφυγή απότομων ασυνεχειών που προκαλούν προβλήματα σύγκλισης, η συνάρτηση Heaviside αντικαθίσταται συχνά από μια προσεγγιστική μορφή. Με την προϋπόθεση ότι η Φ διατηρεί την ιδιότητα της συνάρτησης της προσημασμένης απόστασης (signed distance function), ένα πολυώνυμο 3ου βαθμού που χρησιμοποιείται είναι το εξής:

$$H(\Phi) = \begin{cases} \epsilon & \gamma\iota\alpha\ \Phi < -h \\ \alpha\left(\frac{\Phi}{h}\right)^3 + b\left(\frac{\Phi}{h}\right) + C & \gamma\iota\alpha\ -h \le \Phi \le h \\ 1 & \gamma\iota\alpha\ \Phi > h \end{cases}$$

με σταθερές:

$$\alpha = \frac{1}{4}(\epsilon - 1), \qquad b = \frac{3}{4}(1 - \epsilon), \qquad c = \frac{1}{2}(\epsilon + 1)$$

Όπου ε > 0 αποτελεί την ελάχιστη τιμή πυκνότητας του στοιχείου και h το μισό εύρος της ζώνης μετάβασης. Αν το h → 0, η συνάρτηση τείνει στην ακριβή συνάρτηση Heaviside.

Αυτή η εξομάλυνση αναπτύσσει ενδιάμεσες πυκνότητες ($\varepsilon < \rho_e < 1$), κοντά στα όρια του αντικειμένου, δημιουργώντας μια στενή «γκρίζα ζώνη» ημισυμπαγούς υλικού. Οι μαθηματικοί υπολογισμοί εκμεταλλεύονται αυτό το εύρος για την αφαίρεση ή την πρόσθεση υλικό με ομαλό ρυθμό.

Τέλος, αυτές οι πυκνότητες ενσωματώνονται στην εξίσωση γραμμικής ελαστικότητας. Το συνολικό μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος K προκύπτει από το άθροισμα της συνεισφοράς όλων των στοιχείων, δηλαδή $K = \Sigma_e \rho_e K_e$. Έτσι, η καθολική εξίσωση ισορροπίας της κατασκευής εκφράζεται από τον γνωστό τύπο:

$$F = KU$$

όπου K_e είναι το μητρώο δυσκαμψίας του κάθε στοιχείου, U είναι το συνολικό διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας (μετατοπίσεων) και το F είναι το συνολικό διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων.

Με τον ορισμό της συνάρτησης και την πραγματοποίηση της διακριτοποίησης του πεδίου, το επόμενο μέτρο που θα πρέπει να ληφθεί είναι η μετατόπιση του συνόρου του υλικού, ώστε να είναι εφικτή η εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας. Με την βελτιστοποίησης του σχήματος, η εξέλιξη του περιγράμματος μηδενικού επιπέδου γίνεται σε πλασματικό χρονικό σχεδιασμό t. Η μαθηματική περιγραφή της δυναμικής εξέλιξη του συνόρου, γίνεται από την διαφορική εξίσωση μερικών παραγώγων πρώτης τάξεως, λεγόμενη ως εξίσωση Hamilton-Jacobi:

$$\frac{d\Phi(x,t)}{dt} + V_n|\nabla\Phi(x,t)| = 0$$

με τον όρο $\frac{d\Phi}{dt}$, να δηλώνει τον αυξομειωτικό ρυθμό της Level-Set συνάρτησης ως προς τον χρόνο. Το σύμβολο ∇Φ δείχνει την κλήσης που έχει η συνάρτηση και |∇Φ| αντίστοιχα το μέτρο της. Βέβαια, το σημαντικότερο είναι το V_n, καθώς εκπροσωπεί το πεδίο της κανονικής ταχύτητας του συνόρου. Η προέλευση της αναφερόμενης ταχύτητας V_n γίνεται από την μελέτη της ευαισθησίας σχήματος, δίνοντας ταυτοχρόνως στο σύστημα τον έλεγχο για το αν το σύνορο θα πρέπει να επεκταθεί στην εξωτερική κατεύθυνση (προσθέτοντας υλικό) ή αντίστοιχα προς την εσωτερική (να μειωθεί υλικό). Όλα αυτά που αναφερθήκαν πραγματοποιούνται με την προϋπόθεση η αντικειμενική συνάρτηση να ελαχιστοποιηθεί.

Στην συνέχεια, αναλαμβάνει δράση η διαδικασία της επαναρχικοποίησης (Re-initialization). Η ευελιξία που διαθέτει η συνάρτηση φ(x), να πραγματοποιείται συνάρτηση προσαρμοσμένης απόστασης, οδηγεί σε προϋποθέσεις αριθμητικής ευστάθειας της Level-Set μεθοδολογίας, φέρνοντας το μέτρο της κλίσης ισάξιο της μονάδας($|\nabla\Phi| = 1$). Όμως με την επαναλαμβανόμενη λύση της εξίσωσης Hamilton-Jacobi και με το σύνορο σε εν κίνηση, η συνάρτηση βρίσκεται σε τάση παραμόρφωσης. Πρακτικά, σε κάποια σημεία της γίνονται πολύ απότομα και κάποια άλλα υπερβολικά επίπεδα.

Η παραμόρφωση για την οποία έγινε αναφορά, οδηγεί το σύστημα σε σοβαρές αριθμητικές διαταραχές και σφάλματα στην εύρεση του διανύσματος καμπυλότητας και της κάθετης. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, επιβάλλεται η περιοδική επαναρχικοποίηση της συνάρτησης Φ. Η ανασύνταξη της Level-Set συνάρτησης οφείλεται σε αυτή την διαδικασία, μέχρι να επαναφέρει την χαρακτηριστική $|\nabla\Phi| = 1$ σε όλο το χωρίο, οδηγώντας ταυτόχρονα το περίγραμμα του μηδενικού επιπέδου (όριο υλικού) στην ίδια θέση ακριβώς.

3.4. Μέθοδος της τοπολογικής παραγώγου

Στον τομέα της βελτιστοποίησης της τοπολογίας ενός εξαρτήματος, η μέθοδος της τοπολογικής παραγώγου (Topological Derivative), η οποία συχνά εκφράζεται με τον συμβολισμό $F(x\hat{})$ ή $T(x\hat{})$, αποτελεί μια συνάρτηση που αντιπροσωπεύει μια διόρθωση πρώτης τάξης ενός συναρτησιακού σχήματος Ψ(χ).

Ή συγκεκριμένη διεργασία υπολογίζει την ευαισθησία του συστήματος και την ασυμπτωτική του τάση, εισάγοντας μικρές σε μέγεθος τοπολογικές διαταραχές ε σε ένα συγκεκριμένο, τυχαία επιλεγμένο σημείο $x\hat{}$στον χώρο σχεδίασης. Πρακτικά, με τα αποτελέσματα του ορίου ε καθώς τείνουν στο μηδέν, γίνονται εμφανή τα σημεία στα οποία πρέπει να δημιουργηθούν μικρές οπές στο υλικό.

Ή όλη έννοια της τοπολογικής παραγώγου εφαρμόζεται σε ένα ανοιχτό και φραγμένο χωρίο $\Omega \subset R^d$ με $d \geq 2$, μέσα στο οποίο εξελίσσεται μια μη ομαλή διαταραχή. Η διαταραχή αυτή περιορίζεται στο εύρος μιας μικρής περιοχής $\omega_\varepsilon(x)\hat{} = x\hat{} + \varepsilon\omega$. Εισάγεται μια χαρακτηριστική συνάρτηση $x \mapsto \chi(x)$, με $\chi \in R^d$, η οποία συνδέεται άμεσα με το αρχικό (μη διαταραγμένο) χωριό, όπου $\chi = 1|_\Omega$. Ο όγκος (μέτρο Lebesgue) αυτού του μη διαταραγμένου χωριού εκφράζεται ως εξής:

$$|\Omega| = \int_{R^d} X$$

Στην συνέχεια, ακολουθεί ορισμός μιας χαρακτηριστικής συνάρτησης που συνδέεται άμεσα με το διαταραγμένο τοπολογικά (σύνθετο) χωρίο, δηλαδή $x \mapsto x_\varepsilon(x;\hat{x})$. Στο ενδεχόμενο μιας

διάτρησης, όπου $x_\varepsilon(x)^\wedge = 1_\Omega - 1_{\omega\varepsilon(x)^\wedge}$, το αντίστοιχο διάτρητο πεδίο μετατρέπεται σε $\Omega_\varepsilon = \Omega/\overline{\omega_\varepsilon}$.

Έπειτα, διατυπώνεται η υπόθεση ότι ένα δεδομένο συναρτησιακό σχήματος $\Psi(x_\varepsilon(x)^\wedge)$, άμεσα συνδεδεμένο με το διαταραγμένο χωρίο, επιδέχεται το ακόλουθο ασυμπτωτικό ανάπτυγμα:

$$\Psi(x_\epsilon(\hat{x})) = \psi(x) + f(\epsilon)F(\hat{x}) + o(f(\epsilon))$$

Όπου το $\Psi(x)$, αποτελεί τη συνάρτηση που αλληλεπιδρά με το πεδίο αναφοράς, το f(ε) δηλώνει μια θετική συνάρτηση διόρθωσης πρώτης τάξης του ε, και το υπόλοιπο είναι το o(f(ε)) (το οποίο σημαίνει ότι o(f(ε)) / f(ε) → 0 καθώς ε → 0). Με αναδιάταξη του παραπάνω αναπτύγματος, προκύπτει:

$$\frac{\Psi\left(x_\epsilon(\hat{x})\right) - \psi(x)}{f(\epsilon)} = F(\hat{x}) + \frac{o(f(\epsilon))}{f(\epsilon)}$$

θέτοντας το όριο ε → 0, αναπτύσσεται ο τελικός ορισμός της τοπολογικής παραγώγου:

$$F(\hat{x}) \coloneqq \lim_{\epsilon\to 0} \frac{\psi\left(x_\epsilon(\hat{x})\right) - \Psi(x)}{f(\epsilon)}$$

Η μέθοδος της τοπολογικής παραγώγου ασχολείται κυρίως με δύο είδη διαταραχών. Η πρώτη είναι οι ιδιάζουσες διαταραχές (Singular Perturbations) και η δεύτερη οι κανονικές διαταραχές (Regular Perturbations). Οι ιδιάζουσες διαταραχές χρησιμοποιούνται για τη ανάπτυξη πυρήνων οπών (αφαίρεση υλικού) στο εσωτερικό του πεδίου εφαρμογής. Από μαθηματική άποψης θεωρούνται αρκετά σύνθετες, διότι τροποποιούν εξ ολοκλήρου την τοπολογία του συστήματος. Οι κανονικές διαταραχές χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη πυρήνων εγκλεισμάτων. Αποτελούν μια πιο απλοϊκή μαθηματική διαδικασία, διότι απλώς προσθέτουν ή αλλάζουν τις ιδιότητες του ήδη υπάρχοντος υλικού μέσα στον χώρο σχεδίασης.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια απλή παραμόρφωση των εξωτερικών συνόρων (κλασική παράγωγος σχήματος) δεν μπορεί να οδηγήσει σε καμία τοπολογική βελτίωση, οδηγώντας τον αλγόριθμο σε αδιέξοδο. Τη λύση σε αυτές τις καταστάσεις δίνει η τοπολογική παράγωγος. Αναλύοντας το εσωτερικό του υλικού, αναδεικνύονται τα σημεία όπου λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Αυτό υποδεικνύει την ανάγκη δημιουργίας οπών ακριβώς σε εκείνα τα σημεία, δημιουργώντας έτσι το ιδανικό σχήμα με μηδενικό σφάλμα.

4. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για δικτυωτό πλαισίου

4.1. Βήματα της διεργασίας πεπερασμένων στοιχείων

Στις πολύπλοκες κατασκευές, όπως το δικτυωτό πλαίσιο του οχήματος τύπου Trophy Truck, η χρήση συμβατικών μεθόδων προσδιορισμού της κατανεμημένης παραμόρφωσης, εκφράζεται ως μια δύσκολη διαδικασία. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η συγκεκριμένη ανάλυση, διαμοιράζει την κατασκευή (σασί) σε μικρά μεγέθους στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους, τα οποία ονομάζονται ως πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινόχρηστων δι' επιφανειών που αποτελούνται από κόμβους, επιφάνειες ή συνοριακές γραμμές. Με την εφαρμογή διαδεδομένων ιδιοτήτων τάσης και παραμόρφωσης του υλικού κατασκευής του πλαισίου, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς των κόμβων, με τη μορφή συνάρτησης των ιδιοτήτων για κάθε άλλο στοιχείο της δομής.

Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, βασίζεται από την εφαρμογή καθορισμένων βημάτων και το είδος της κατασκευή. Τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

1) Διακριτοποίηση και επιλογή τύπων στοιχείων
2) Επιλογή συνάρτησης μετατόπισης
3) Ορισμός των σχέσεων παραμόρφωσης με μετατόπιση και τάσης με παραμόρφωσης
4) Εύρεση του μητρώου δυσκαμψίας και των εξισώσεων του στοιχείου
5) Κατάστρωση των εξισώσεων στοιχείου για την εύρεση των ολικών ή των συνολικών εξισώσεων αλλά και τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών
6) Επίλυση ως προς τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας
7) Επίλυση ως προς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις του στοιχείου
8) Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

4.1.1. Διακριτοποίηση και επιλογή τύπων στοιχείων

Στο πρώτο βήμα το δικτυωτό πλαίσιο του trophy truck, διαχωρίζεται από ένα ισοδύναμο σύνολο πεπερασμένων στοιχείων, αποτελούμενο από τους αντίστοιχους κόμβους του. Αυτό το βήμα εφαρμόζεται στο χώρο σχεδίασης του λογισμικού της Autodesk Fusion 360, με την δημιουργία του πλέγματος Mesh. Επιλέχθηκε το κατάλληλο στοιχείο, για την ανάπτυξη της κατάλληλης προσομοίωσης της πραγματικής μηχανικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Για την δημιουργία του πλέγματος της συγκεκριμένης κατασκευής, έγινε χρήση τρισδιάστατων

στερεών στοιχείων για την πλήρη ανάλυση των τάσεων στους πολύπλοκους συγκολλημένους κόμβους.

Δεν έχει σημασία το είδος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό. Επιπλέον, το μέγεθος των στοιχείων θα πρέπει να είναι ισορροπημένο, για την μείωση του πλήθους των υπολογισμών και τον καθορισμό των επιθυμητών αποτελεσμάτων. Αυτή η ισορροπία, επιτεύχθηκε με κάποιες διαφοροποιήσεις στις ρυθμίσεις της πυκνότητας του πλέγματος (mesh controls), δίνοντας την δυνατότητα της πύκνωσης των περιοχών (συνήθως κόμβοι), που αποτελούν ταχείες γεωμετρικές αλλαγές. Επιπλέον πραγματοποιείται και αραίωση σε γεωμετρικά σημεία που η δομή τους έχει πιο απλοϊκή μορφολογία.

4.1.2. Επιλογή μιας συνάρτησης μετατόπισης

Το δεύτερο βήμα, αποτελείται από την συνάρτηση μετατόπισης εντός του κάθε στοιχείου. Σύμφωνα με τις τιμές στους κόμβους των στοιχείων, καθορίζεται η συνάρτηση και είναι συνήθως γραμμική, τετραγωνική και κυβικά πολυώνυμη. Η απλότητα των συγκεκριμένων συναρτήσεων, βοηθάει στην καλύτερη διατύπωση των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων. Εξαιτίας της αναφερόμενης διαδικασίας, στη παραμόρφωση και τη μετατόπιση του χωροδικτυώματος στην εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων, πλησιάζει μια ιδανική περίπτωση ενός συνόλου ομαδικών συνεχών συναρτήσεων.

Για την ανάλυση του σωληνωτού πλαισίου του οχήματος trophy truck, χρησιμοποιήθηκαν μονοδιάστατα (1D) στοιχεία δοκού μέσα σε τρισδιάστατο χώρο. Η συνάρτηση είναι μιας μόνο συντεταγμένης, η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος των σωλήνων του σασί. Το πρόγραμμα του λογισμικού Fusion 360 εκτελεί, με μια αυτόματη λειτουργία, όλες τις πολυωνυμίες συναρτήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, αποδίδεται με ακρίβεια η καμπτική και στρεπτική παραμόρφωση που εξελίσσεται στο κάθε σωλήνα εντός των κόμβων (των σημείων που συνδέονται), λόγω των ασκούμενων δυνάμεων.

4.1.3. Ορισμός σχέσεων μεταξύ παραμόρφωσης με μετατόπιση και τάσης με παραμόρφωση

Για την σύνταξη των εξισώσεων κάθε πεπερασμένου στοιχείου κομβικές είναι οι σχέσεις μεταξύ παραμόρφωσης-μετατόπισης και τάσης -παραμόρφωσης. Όπως έγινε αναφορά και στο 2ο βήμα, τα στοιχεία που στην περίπτωση του πλαισίου, δέχονται μονοδιάστατη παραμόρφωση, υπάρχει άμεση διασύνδεση της παραμόρφωσης ϵ_x με την μετατόπιση u. Για τις μικρές παραμορφώσεις δίνεται ο εξής τύπος:

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx}$$

Για την επίλυση του προβλήματος, θα πρέπει να διαμορφωθούν τάσεις που θα συσχετίζονται με τις αναπτυγμένες παραμορφώσεις. Αυτό πραγματοποιείται, με την βοήθεια ενός προσδιορισμένου νόμου της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης, έχοντας ως γενική ονομασία «καταστατικός νόμος». Για την μελέτη μεταλλικών κατασκευών, υπό την επίδραση σταθερών κανονικών δυνάμεων λειτουργίας, εφαρμόζεται ο νόμος τάσης-παραμόρφωσης, δηλαδή ο νόμος του Hooke που εκφράζεται με την εξής μαθηματική σχέση:

$$\sigma_x = E\epsilon_x$$

Με το σ_x, να δηλώνει την τάση σε διεύθυνση x και το E το μέτρο ελαστικότητας. Το βήμα αυτό ολοκληρώνεται στο λογισμικό Fusion 360 με την ανάθεση του υλικού κατασκευής του δικτυωτού πλαισίου (σασί). Με τον ορισμό του υλικού, γίνεται αυτόματα η εισαγωγή των κατάλληλων τιμών του λόγου Poisson και του μέτρου ελαστικότητας E, γνωστοποιώντας τον ελαστικό καταστατικό νόμο. Έτσι, είναι εφικτή η συσχέτιση της τάσης που εμφανίζεται στο εσωτερικό του κάθε σωλήνα με την ελαστική του παραμόρφωση.

4.1.4. Εύρεση του μητρώου δυσκαμψίας και των εξισώσεων του στοιχείου

Το 4ο βήμα θεωρείται ένα από τα πιο σημαντικά στάδια, καθώς σε αυτό αναπλάθονται οι εξισώσεις που φανερώνουν την μηχανική συμπεριφορά για κάθε ένα πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστά. Για την ανάλυση του σασί υπό συγκεκριμένο υλικό κατασκευής, το λογισμικό Fusion 360 στηρίζεται στην αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας. Σε αυτήν, βρίσκεται η βάση για την ανάπτυξη εξισώσεων του μητρώου δυσκαμψίας και είναι κατάλληλη για τα υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Πρακτικά, γίνεται περιγραφή με αλγεβρικές εξισώσεις για την περιγραφή του τρόπου με τον οποίο παραμορφώνεται ο κάθε σωλήνας, με λόγω των αναπτυσσόμενων φορτίων. Οι εξισώσεις αυτές, αναγράφονται με την εξής συμπαγή μορφή μητρώου:

$$\{\mathcal{F}\} = [k]\{d\}$$

Με το $\{\mathcal{F}\}$ να δηλώνει το διάνυσμα των δυνάμεων του κάθε στοιχείου, το $[k]$ να είναι το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου, το οποίο είναι εξαρτώμενο από το γεωμετρικό προφίλ (μήκος, διατομή) αλλά και από τις ιδιότητες του υλικού και το $\{d\}$ να αποτελεί το διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας του στοιχείου στους κόμβους του. Στο χωρικό σασί, είναι οι γενικευμένες μετατοπίσεις που βασίζονται τόσο στις πραγματικές μετατοπίσεις (στους άξονες x,y,z) αλλά όσο και στις σχέσεις κλίσεις με περιστροφές, στα σημεία των αξόνων.

4.1.5. Κατάστρωση των εξισώσεων του στοιχείου για την εύρεση των ολικών ή των συνολικών εξισώσεων και τον ορισμό συνοριακών συνθηκών

Αφού βρεθούν, για όλα τα πεπερασμένα στοιχεία, οι επιμέρους εξισώσεις ισορροπίας, μετά ακολουθεί η εξαγωγή της ολικής εξίσωσης ισορροπίας του σασί. Και αυτή δηλώνεται, σε μορφή πίνακα και αναδεικνύεται με τον εξής τρόπο:

$$\{F\} = [K]\{d\}$$

Με το $\{F\}$ να δηλώνει το διάνυσμα των ολικών κομβικών δυνάμεων, το $[K]$ να είναι το μητρώο της ολικής δυσκαμψίας του σασί και το $\{d\}$ αντίστοιχα το διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας του συστήματος. Το γενικό μητρώο δυσκαμψίας αποτελείται από συγκεκριμένα χαρακτηρίστηκα όπως να έχει τετραγωνική, συμμετρική μορφή. Επίσης, οι βασικοί διαγώνιοι όροι του είναι πάντα θετικοί, καθώς σε μια διαφορετική περίπτωση, μια θετική δύναμη θα ήταν υπεύθυνη για την ανάπτυξη αρνητικής μετατόπισης.

Πριν γίνει ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών, το μητρώο $[K]$ έχει μηδενική ορίζουσα και δεν υπάρχει η αντίστροφή του εκδοχή. Αυτό είναι ένα γεγονός, που εκφράζει ένα ασταθές σύστημα. Ουσιαστικά, υπάρχει η ελευθερία στην μετακίνηση του σασί, στον χώρο ως ένα στερεό σώμα απροσδιόριστης μορφής, δίχως να ανταποκρίνεται στα φορτία που δέχεται.

Έτσι για την αποφυγή αυτής της κατάστασης θα πρέπει να επιβληθούν συνοριακές συνθήκες (δηλαδή, συνθήκες στήριξης). Οι συνοριακές συνθήκες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η μία και την οποία έχει χρησιμοποιηθεί στο σασί είναι «οι ομογενείς συνοριακές συνθήκες», και ορίζονται σε θέσεις, απαγορεύοντας την οποιαδήποτε κίνηση μεταξύ των αξόνων. Η δεύτερη είναι οι «μη ομογενείς», που επιτρέπουν συγκεκριμένες μετατοπίσεις αξόνων (αλλά όχι σε όλους).

Μαθηματικά μπορούν να εκφραστούν οι συνοριακές συνθήκες με των εξής καταμερισμό, των γενικών εξισώσεων ισορροπίας:

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{d_1\} \\ \{d_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \end{Bmatrix}$$

Με το $\{d_1\}$ να είναι οι ελεύθερες μετατοπίσεις και το $\{d_2\}$ να είναι οι καθορισμένες μετατοπίσεις. Με αυτόν το καθορισμό έχουμε μια σημαντική εξίσωση για την εύρεση μετατοπίσεων που δεν είναι γνωστές, και εκφράζεται με αυτή τη μορφή:

$$[K_{11}]\{d_1\} = \{F_1\} - [K_{12}]\{d_2\}$$

Με την τοποθέτηση των στηρίξεων, το υπό μητρώο $[K_{11}]$ δεν έχει πλέον μηδενική ορίζουσα, δίνοντας δυνατότητα προσδιορισμού στο $\{d_1\}$. Στις μελέτες που έγιναν στο σασί του

οχήματος τύπου trophy truck, στο λογισμικό Fusion 360, η συγκεκριμένη θεωρία εφαρμόζεται με άμεσο τρόπο με την τοποθετήσει των φορτίων (loads) και των πακτώσεων (constraints) στις κατάλληλες περιοχές του πλαισίου. Δηλαδή, όπως έγινε αναφορά και προηγουμένως, έγινε ορισμός των μη ομογενών συνοριακών συνθηκών σε όλες τις μελέτες που έγινα στο σασί και θα αναδειχθούν στα επόμενα κεφάλαια.

4.1.6. Επίλυση ως προς τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας (ή της γενικευμένες μετατοπίσεις)

Αφού οριστούν οι συνοριακές συνθήκες, αμέσως μετά είναι έτοιμη για επίλυση η τροποποιημένη αλγεβρική εξίσωση. Επιπλέον η εξίσωση αυτή, μπορεί να απόκτηση την εξής μορφή:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix}$$

Πρακτικά, σε αυτό το βήμα, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μετατοπίσεων $\{d\}$ των κόμβων, οι οποίες είναι και οι άγνωστοι του θέματος αλλά και οι πρώτες ποσότητες που βρίσκονται στην μέθοδο της δυσκαμψίας.

Για παράδειγμα το $\{d\}$, για μια δοκό στο χώρο συνοδευόμενη με δυο κόμβους, όπου ο καθένας από αυτούς έχει αντίστοιχα έξι βαθμούς ελευθερίας (δηλαδή, τρεις μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές), είναι διάνυσμα με στήλη διάστασης 12 x 1, έχοντας την εξής μορφή:

$$\{d\} = \{u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad \theta_{x1} \quad \theta_{y1} \quad \theta_{z1} \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad \theta_{x2} \quad \theta_{y2} \quad \theta_{z2}\}^T$$

Για διευκόλυνση, οι υπολογισμοί της επίλυσης αυτού του τεράστιου συστήματος εξισώσεων, για το οποίο ο αριθμός των αγνώστων είναι ο ίδιος με τους βαθμούς ελευθέριάς όλου του σασί, γίνονται από το λογισμικό του Fusion 360. Ουσιαστικά, χρησιμοποιούνται εξελιγμένες αριθμητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος απαλοιφής Gauss ή επαναληπτικές μεθόδους Gauss – Seidel. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτό το βήμα είναι οι τιμές των μετακινήσεων για κάθε κόμβο (τα σημεία ένωσης των σωλήνων μεταξύ τους) που αποτελείται ο χώρος σχεδίασης.

4.1.7. Επίλυση ως προς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις του στοιχείου

Με τον υπολογισμό των μετατοπίσεων όλων των κόμβων, δηλαδή το διάνυσμα $\{d\}$, το πρόγραμμα συνεχίζει με τον προσδιορισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων. Αυτό συμβαίνει διότι τα συγκεκριμένα μεγέθη σχετίζονται άμεσα με την εξής συνάρτηση μετατοπίσεων:

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\}$$

Με το $\{\epsilon\}$ να δηλώνει το διάνυσμα των μετατοπίσεων και το $[B]$ το μητρώο που γεφυρώνει την μετατόπιση και την παραμόρφωση. Ουσιαστικά, για μια δοκό στο χώρο αποτελούμενη από δυο κόμβους, το διάνυσμα παραμορφώσεων $\{\epsilon\}$, συμπεριλαμβάνει τρεις ορθές τάσεις και τρεις διατμητικές παραμορφώσεις, δίνοντας ένα διάνυσμα με στήλη 6 x 1 και έχοντας αυτήν την μορφή:

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

Αμέσως μετά, με την χρήση του νόμου τάσης-παραμόρφωσης του υλικού, (δηλαδή ο νόμος του Hooke), οι τάσεις που αναπτύσσονται επιλύνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\}$$

Με το $\{\sigma\}$ να είναι το διάνυσμα των τάσεων και το $[D]$ το μητρώο ελαστικότητας του υλικού. Αντίστοιχα, το διάνυσμα τάσεων $\{\sigma\}$, αποτελείται και αυτό από τρεις ορθές και τρεις διατμητικές τάσεις που λαμβάνουν χώρα στο υλικό, δημιουργώντας την παρακάτω μορφή:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}$$

Επιπλέον το μητρώο μετατόπισης $[B]$, απαρτίζεται από τις παραγώγου των πολυωνυμιών συναρτήσεων του σχήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί πως διαμορφώνεται από την γεωμετρική μορφολογία του εκάστοτε στοιχείου και αντιστοιχεί το διάνυσμα 12 x 1 με το διάνυσμα 6 x 1. Ακόμα το μητρώο $[D]$ του υλικού, αποτελείται από το μέτρο της ελαστικότητας E του υλικού και από τον λόγο ν του Poisson. Πρακτικά μέσω των δυο προαναφερθεισών εξισώσεων, το λογισμικό Fusion 360 υπολογίζει τη μετατόπιση κάθε σωλήνα του πλαισίου, συναρτήσει των αντίστοιχων αξονικών, καμπτικών και στρεπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό.

4.1.8. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας, το τελικό στάδιο αφορά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με σκοπό τη λήψη των κατάλληλων σχεδιαστικών

αποφάσεων. Η ερμηνεία αυτή πραγματοποιείται βάσει του κριτηρίου αστοχίας κατά της ισοδύναμης Von Mises τάσης. Το λογισμικό Fusion 360 αξιοποιεί τις συνιστώσες των τάσεων που προκύπτουν από το προηγούμενο στάδιο (7ο βήμα) και προσδιορίζει την ισοδύναμη τάση Von Mises μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{\left[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)\right]}{2}}$$

Όπως προαναφέρθηκε, οι τιμές των ορθών και διατμητικών τάσεων αντλούνται από το 7ο βήμα της ανάλυσης. Προκειμένου το πλαίσιο να μην υποστεί μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση, θα πρέπει η ισοδύναμη τάση Von Mises να μην υπερβαίνει το όριο διαρροής (yield strength) του υλικού. Στον περιβάλλον του Fusion 360, η αξιολόγηση αυτή αυτοματοποιείται μέσω του συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ορίου διαρροής προς την τάση Von Mises, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$safety\ factor = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{VM}}$$

4.2. Θεωρία προσομοίωσης του δικτυωτού πλαισίου (σασί) οχήματος σε τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο

Για την αναπαράσταση του σωληνωτού χωροδικτυώματος του οχήματος τύπου trophy truck, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση του ως τρισδιάστατο χωρικό πλαίσιο, με τη χρήση της θεωρία γραμμικών στοιχείων δοκού τυχαίου προσανατολισμού στον χώρο. Κάθε επιμέρους σωληνωτό στοιχείο υπόκειται σε σύνθετη εντατική κατάσταση, η οποία περιλαμβάνει αξονικά φορτία, στρέψη και κάμψη ως προς δύο άξονες (διαξονική κάμψη).

Για κάθε στοιχείο δοκού ορίζεται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Ο διαμήκης άξονας x', συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα του σωλήνα, με θετική κατεύθυνση από τον πρώτο κόμβο (κόμβος αρχής) προς τον δεύτερο (κόμβος τέλους). Εν συνεχεία γίνεται εξέταση του σωλήνα για κάμψη ως προς τους άλλους δύο άξονες. Οι υπόλοιποι δύο εγκάρσιοι άξονες, y και z, ορίζουν τα επίπεδα κάμψης της δοκού και προσδιορίζονται με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού, αντιπροσωπεύοντας τους κύριους άξονες αδράνειας της διατομής. Επισημαίνεται ότι, λόγω της κυκλικής διατομής των σωλήνων, οι κύριες ροπές αδράνειας παρουσιάζουν συμμετρία $\left(I_y = I_z\right)$, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την υπολογιστική συμπεριφορά και τη μαθηματική ανάλυση των στοιχείων.

Το τοπικό μητρώο δυσκαμψίας $\left[k_y'\right]$ εξαιτίας της κάμψης στο τοπικό επίπεδο $x' - z'$, υπολογίζεται με τον εξής τρόπο:

$$[k_y^{'}] = \frac{EI_y}{L^4}\begin{bmatrix} +12L & -6L^2 & -12L & -6L^2 \\ -6L^2 & +4L^3 & +6L^2 & +2L^3 \\ -12L & +6L^2 & +12L & +6L^2 \\ -6L^2 & +2L^3 & +6L^2 & +4L^3 \end{bmatrix}$$

Αντίστοιχα το τοπικό μητρώο δυσκαμψίας $[k_z^{'}]$, λόγω της κάμψης στο επίπεδο $x^{'} - y^{'}$ υπολογίζεται και αυτό με τον εξής τρόπο:

$$[k_z^{'}] = \frac{EL_z}{L^4}\begin{bmatrix} +12L & +6L^2 & -12L & +6L^2 \\ +6L^2 & +4L^3 & -6L^2 & +2L^3 \\ -12L & -6L^2 & 12L & -6L^2 \\ +6L^2 & +2L^3 & -6L^2 & +4L^3 \end{bmatrix}$$

Δεδομένου ότι τα σωληνωτά στοιχεία του πλαισίου είναι συγκολλημένα υπό διαφορετικές και τυχαίες γωνίες στον χώρο, η απευθείας άθροιση των τοπικών μητρώων δυσκαμψίας τους είναι αδύνατη. Για την επίτευξη της συνολικής σύνθεσης του μητρώου δυσκαμψίας της κατασκευής, απαιτείται προηγουμένως ο μετασχηματισμός των τοπικών μητρώων, ώστε οι βαθμοί ελευθερίας κάθε στοιχείου να αναφέρονται σε ένα κοινό, καθολικό σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z).

Με την παρακάτω εξίσωση μετασχηματισμού γίνεται η μετάθεση του τοπικού, σε γενικό σύστημα αξόνων:

$$[k] = [T]^T [k^{'}][T]$$

Με το $[k^{'}]$ να είναι να είναι το τοπικό μητρώο δυσκαμψίας του σωλήνα και να δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$[k'] = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 2\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

Στην συνέχεια η μετάθεση από το τοπικό στο γενικό πλαίσιο αξόνων με την ύπαρξη της παρακάτω εξίσωσης μετασχηματισμού:

$$[k] = [T]^T \left[k^{'}\right][T]$$

Με το $[k]$ να είναι το γενικό μητρώο δυσκαμψίας του σωλήνα, το $\left[k^{'}\right]$ να είναι αντίστοιχα το τοπικό μητρώο δυσκαμψίας και το $[T]$ να είναι το μητρώο μετασχηματισμού. Το $[T]$ δίνετε από τον παρακάτω τύπο:

$$[T] = \begin{bmatrix} [\lambda]_{3\times3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [\lambda]_{3\times3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [\lambda]_{3\times3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [\lambda]_{3\times3} \end{bmatrix}$$

Και το $[\lambda]$ να προέρχεται από το εξής πλαίσιο:

$$[\lambda]_{3\times3} = \begin{bmatrix} l & m & n \\ -\frac{m}{D} & \frac{l}{D} & 0 \\ -\frac{ln}{D} & -\frac{mn}{D} & D \end{bmatrix}$$

Ουσιαστικά, το μητρώο μετασχηματισμού $[T]$ εμπεριέχει τα συνημίτονα κατεύθυνσης των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ των αξόνων του τοπικού και του καθολικού συστήματος συντεταγμένων. Το συγκεκριμένο μητρώο επιτρέπει τη μαθηματική προβολή και μεταφορά οποιουδήποτε διανυσματικού μεγέθους (όπως των μετατοπίσεων) από το τοπικό σύστημα αναφοράς στο καθολικό. Η διαδικασία αυτή εκτελείται αυτόματα από το λογισμικό Fusion 360 για το σύνολο των σωληνωτών στοιχείων του πλαισίου, οδηγώντας στη σύνθεση του καθολικού μητρώου δυσκαμψίας ολόκληρης της κατασκευής (Trophy truck), γεγονός που αποτελεί το 5ο βήμα της υπολογιστικής ροής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

4.3. Θεωρία γραμμικού λυγισμού [Linear eigenvalue buckling]

Σε πολύπλοκα δομικά σύνολα, όπως το σωληνωτό χωροδικτύωμα ενός οχήματος τύπου Trophy Truck, το οποίο συντίθεται από λεπτότοιχους σωλήνες, οι συμβατικές στατικές αναλύσεις δεν επαρκούν για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας έναντι του συνόλου των επιβαλλόμενων καταπονήσεων. Ειδικότερα, υπό την επίδραση θλιπτικών φορτίων, υφίσταται σοβαρός κίνδυνος τα σωληνωτά μέλη να υποστούν απότομη πλευρική παραμόρφωση και να αστοχήσουν λόγω λυγισμού, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπολείπονται σημαντικά του ορίου διαρροής του υλικού.

Για να γίνει η αποφυγή αυτού του φαινόμενου, στο 5ο βήμα των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται η ανάλυση του γραμμικού λυγισμού, η οποία μαθηματικά δεν είναι παρά ένα πρόβλημα ιδιοτιμών που εκφράζεται ως εξής:

$$([K] + \lambda[K_G])\{\Phi\} = 0$$

Με το $[K_G]$ να είναι το μητρώο της γεωμετρικής δυσκαμψίας, η οποία εκφράζεται από τα φορτία που επικρατούν στην κατασκευή, το λ να είναι η ιδιοτιμή, όπου είναι ο συντελεστής φορτίου λυγισμού και το $\{\Phi\}$ δηλώνει το ιδιοδιάνυσμα, που εκφράζει την παραμόρφωση που θα δεχτεί το πλαίσιο. Το λογισμικό πραγματοποιεί την μελέτη και προσπαθεί να υπολογίσει την κρίσιμη ιδιοτιμή. Αν το λ > 1, το σύνολο είναι απόλυτα ασφαλές και θα πρέπει το ασκούμενο φορτίο να πολλαπλασιαστεί με το λ για να υπάρχει λυγισμός. Αντιθέτως, αν το λ < 0, τότε το πλαίσιο θα λυγίσει με τις υπάρχουσες καταπονήσεις και θα πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός.

4.4. Δυναμική ανάλυση φυσικών ιδιοσυχνότητων και ιδιομορφών [Modal Analysis]

Το πλαίσιο ενός οχήματος τύπου Trophy Truck υπόκειται σε έντονα δυναμικά φορτία, τα οποία προέρχονται τόσο από τις κραδασμικές διεγέρσεις του κινητήρα όσο και από τη δυναμική απόκριση της ανάρτησης λόγω του ανώμαλου εδάφους. Στο πλαίσιο αυτό, η ιδιομορφική

ανάλυση αποτελεί μια από τις κρισιμότερες μελέτες, καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη και την αποφυγή του καταστροφικού φαινομένου του συντονισμού. Ο συντονισμός εκδηλώνεται όταν οι συχνότητες των εξωτερικών διεγέρσεων συμπίπτουν με τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής, προκαλώντας ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους.

Η δυναμική συμπεριφορά του κάθε σωλήνα εξαρτάται από την δυσκαμψία του αλλά και από την κατανομή της μάζας του. Έχοντας ένα σύστημα χωρίς απόσβεση και χωρίς εξωτερικά φορτία, η γενική διαφορική εξίσωση κίνηση έχει την εξής μορφή:

$$[M]\{\ddot{d}\} + [K]\{d\} = 0$$

Με το $[M]$ να είναι το ολικό μητρώο μάζας του σωληνωτού πλαισίου, $\{d\}$ το διάνυσμα μετατοπίσεων και $\{\ddot{d}\}$ αντίστοιχα το διάνυσμα των επιταχύνσεων.

Άμα θεωρήσουμε πως η κατασκευή πραγματοποίει αρμονική ταλάντωση της μορφής:

$$\{d\} = \{\Phi\}\sin(\omega t)$$

Τότε η διαφορική εξίσωση οδηγείτε σε ένα τυπικό πρόβλημα ιδιοτιμών της μορφής:

$$([K] - \omega^2[M])\{\Phi\} = 0$$

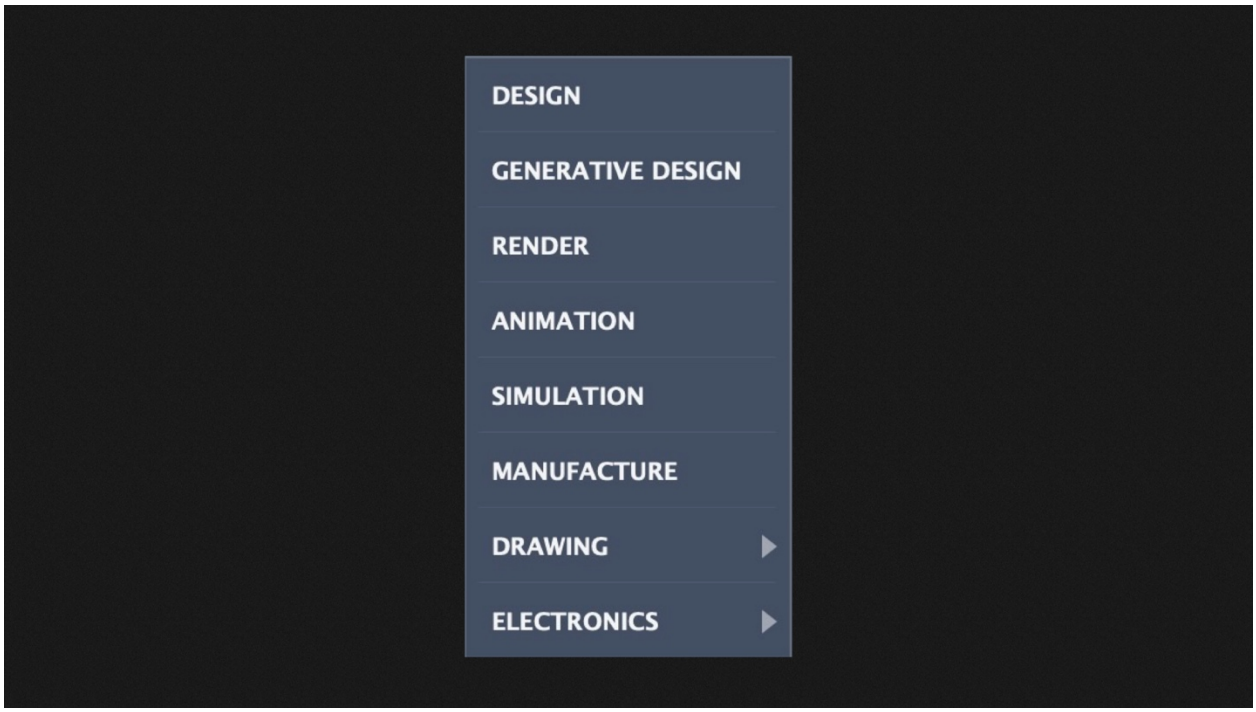
Το λογισμικό Fusion 360 εξάγει τις κυκλικές ιδιοσυχνότητες ω (rad/sec) και κατ' επέκταση τις φυσικές ιδιοσυχνότητες f (Hz) της σωληνωτής δομής. Επιπλέον υπολογίζονται τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα $\{\Phi\}$ τα οποία καθορίζουν τις ιδιόμορφές (mode shapes) του συστήματος. Οι ιδιόμορφές αυτές περιγράφουν πρακτικά το μοτίβο παραμόρφωσης, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο ταλαντώνεται ή κάμπτεται το χωροδικτύωμα όταν διεγείρεται στην εκάστοτε ιδιοσυχνότητα.

5. Περιγραφή του λογισμικού σχεδίασης και ανάλυσης Autodesk Fusion 360

5.1. Επισκόπηση της πλατφόρμας και τα περιβάλλοντας εργασίας

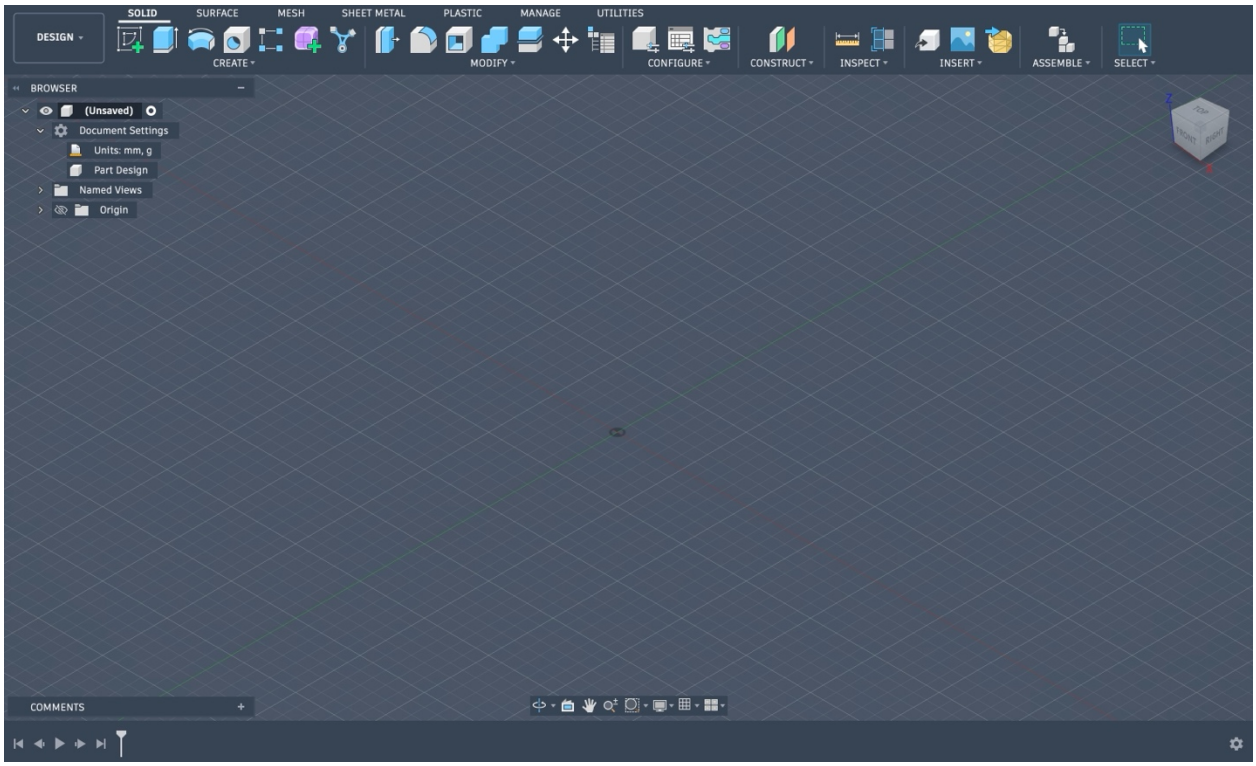
Ο σχεδιασμός του σωληνωτού σασί του Trophy truck, των εξαρτημάτων που συνδέονται πάνω σε αυτό, οι μηχανολογικές στατικές μελέτες (στο σασί) και οι τοπολογικές βελτιστοποιήσεις (στα εξαρτήματα) πραγματοποιήθηκαν εξ ολοκλήρου στο λογισμικό της Autodesk, το Fusion 360. Είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα cloud η οποία περιέχει CAD εργαλεία σχεδιασμού (CAD), κατασκευής (CAM) και μηχανολογικές μελέτες (CAE) στον ίδιο περιβάλλον εργασίας.

Για την αξιοποίηση όλων των παραπάνω εργαλείων, το λογισμικό έχει χωριστεί σε οκτώ διαφορετικά περιβάλλοντα εργασίας (workspaces) τα οποία είναι το Design, το Generative Design, το Render, το Animation, το Simulation, το Manufacture, το Drawing και το Electronics.



Εικόνα 1 Απεικόνιση των περιβαλλόντων εργασίας (workspaces) του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

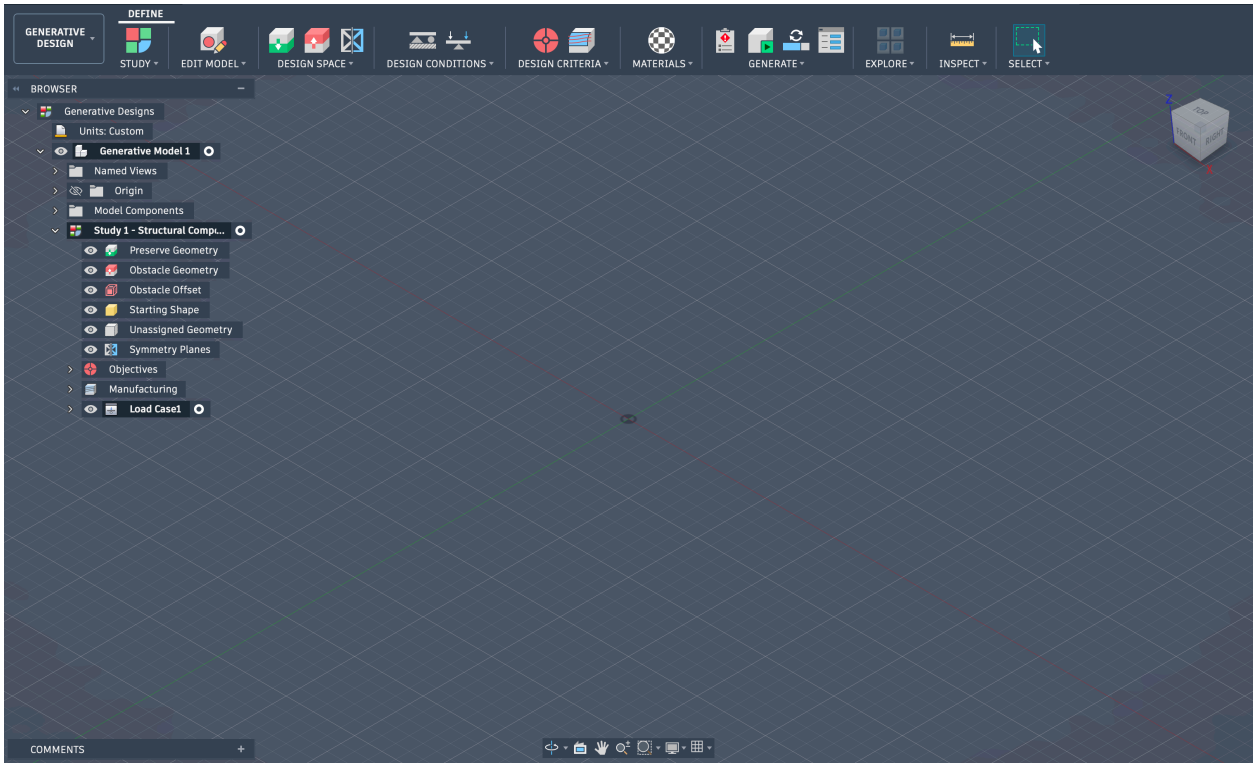
Το Design είναι το κύριο περιβάλλον όπου υλοποιείται ο παραμετρικός σχεδιασμός των τρισδιάστατων μοντέλων και η ανάπτυξη των επιφανειών. Το εν λόγω περιβάλλον αποτέλεσε το βασικότερο για την εξ ολοκλήρου δημιουργία του σασί και των εξαρτημάτων που προσαρμόζονται σε αυτό.



Εικόνα 2 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Design του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

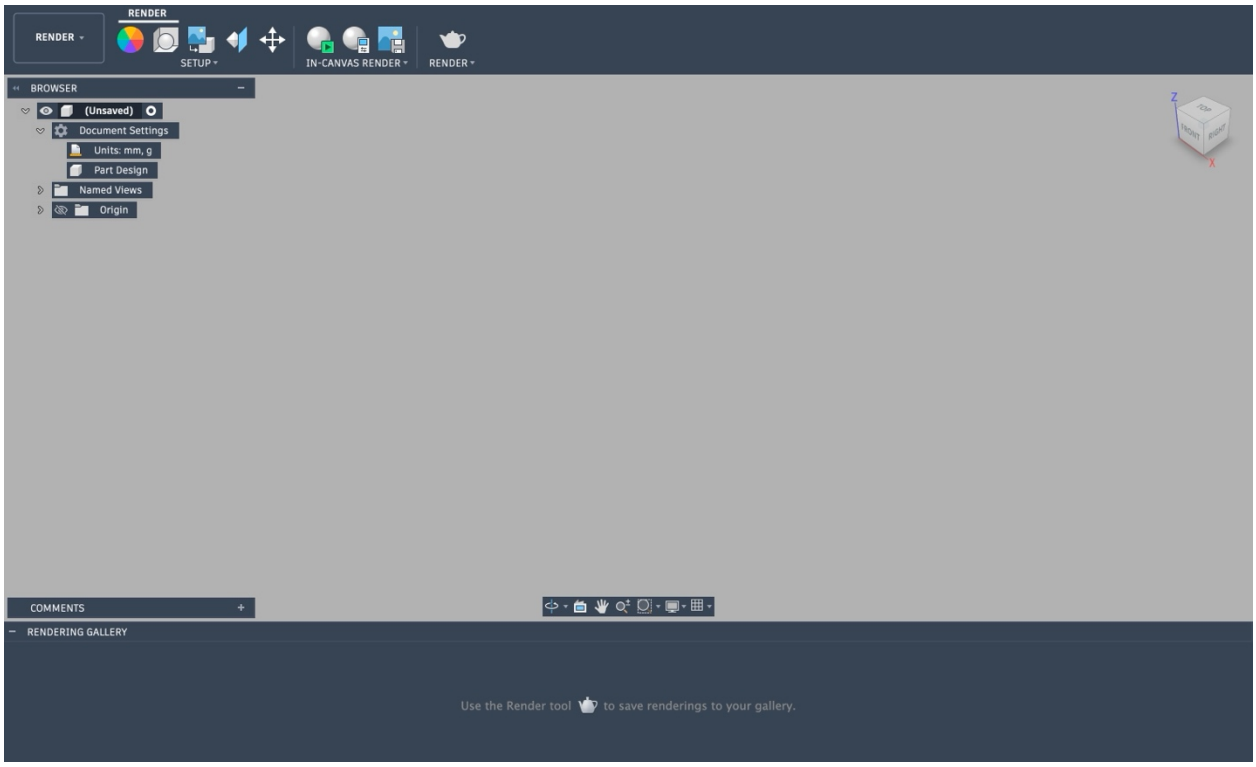
Το Generative Design αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβάλλοντα σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης στις βάσεις των αμορτισέρ και των ψαλιδιών με την χρήση της τεχνητής νοημοσύνης (AI). Μέσα σε αυτό, γίνεται ο ορισμός των σημείων που θα υπάρχουν πακτώσεις, τα ασκούμενα φορτία, το υλικό

της κατασκευή αλλά και η μέθοδος παραγωγής δεκάδων νέων, βελτιστοποιημένων γεωμετρικών μοντέλων.



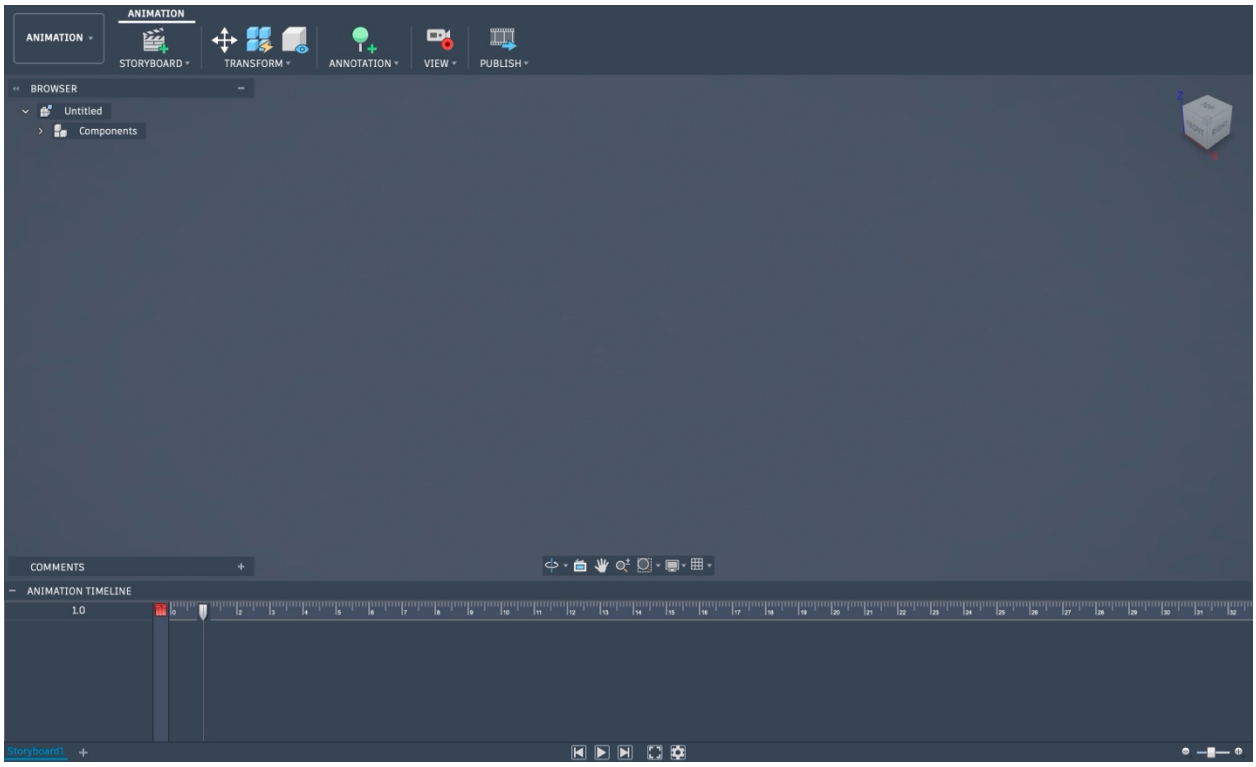
Εικόνα 3 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Generative Design του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

Το Render, όπως υποδηλώνει και η ονομασία του, είναι το περιβάλλον που δημιουργεί ρεαλιστικές εικόνες για τα τρισδιάστατα μοντέλα. Μέσα σε αυτό γίνεται η προσθήκη του κατάλληλου φωτισμού και περιβαλλοντικών συνθηκών για την φωτορεαλιστική απεικόνιση άριστης ποιότητας.



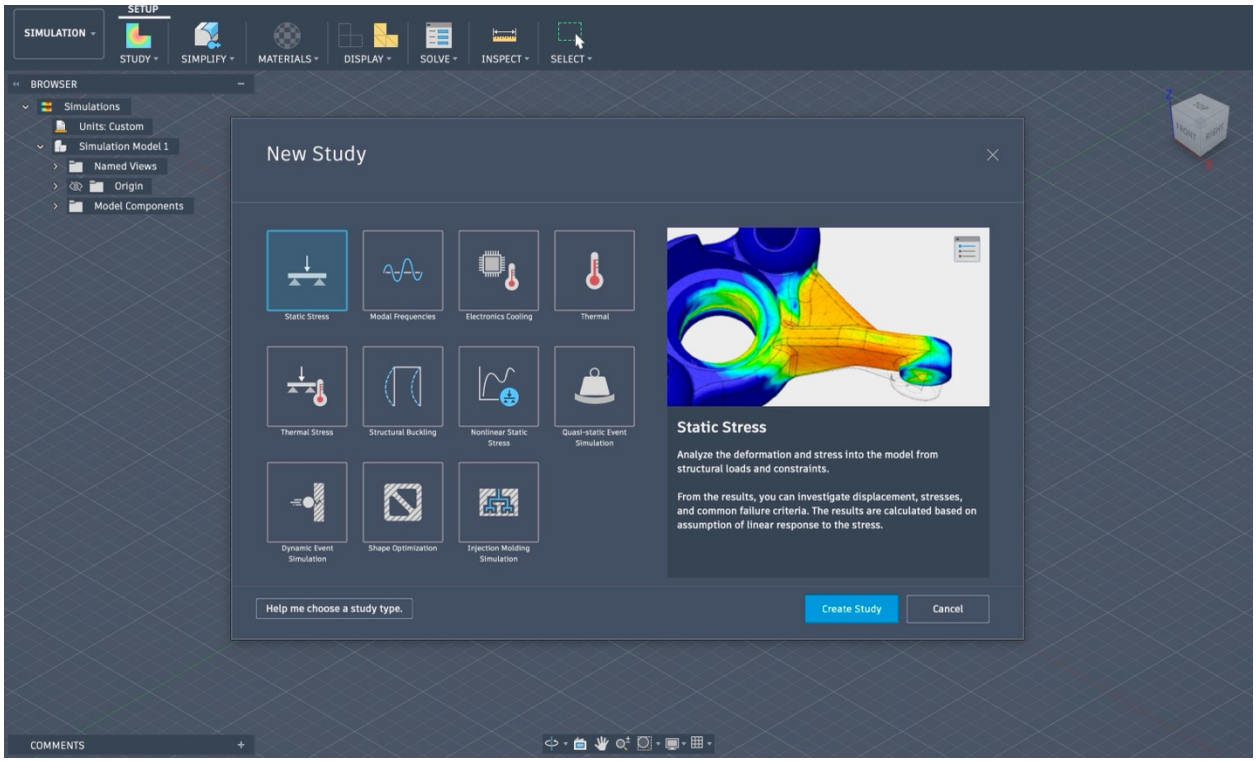
Εικόνα 4 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Render του Autodesk Fusion 360.

Το περιβάλλον του Animation προσφέρει τα εργαλεία για τη δημιουργία βίντεο σχετικά με τον τρόπο συναρμολόγησης οι τρισδιάστατες κατασκευές μεταξύ τους. Μέσω αυτών των βίντεο, διακρίνεται ο τρόπος λειτουργίας πολύπλοκών κατασκευών, διευκολύνοντας έτσι την καλύτερη κατανόηση τους.



Εικόνα 5 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Animation του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

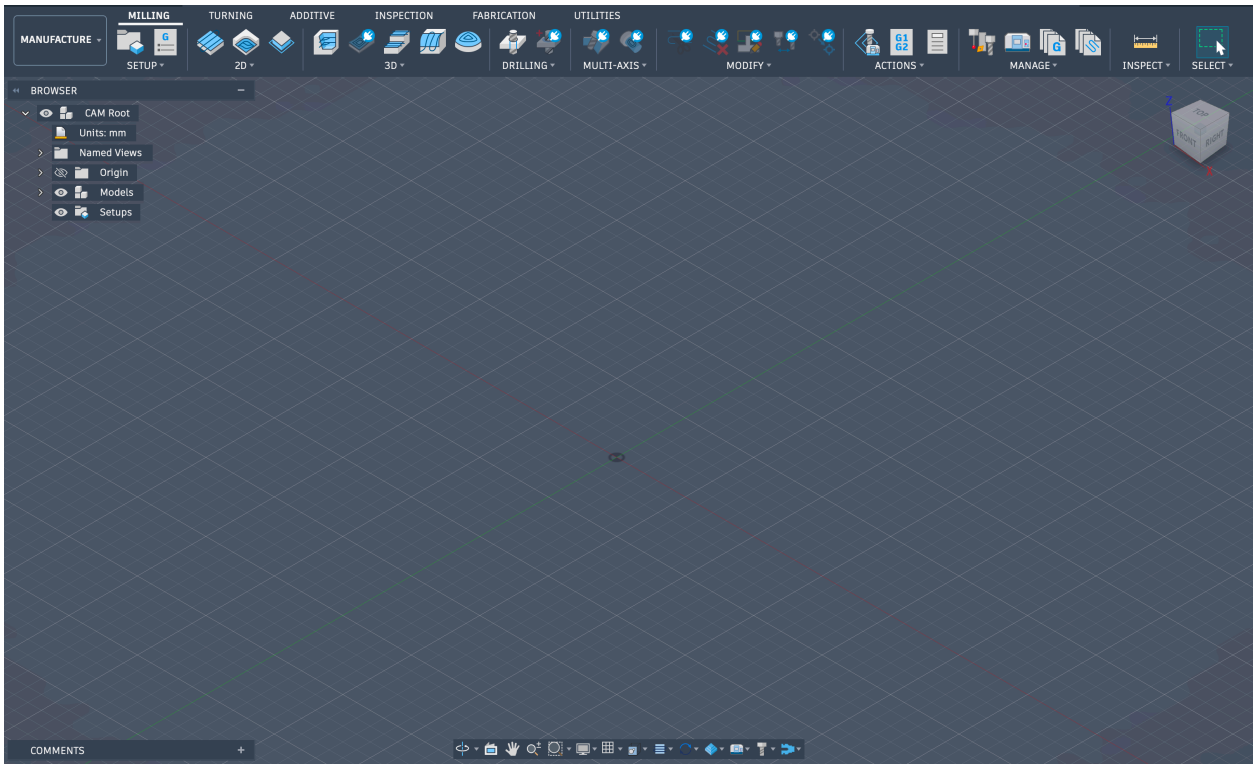
Αμέσως μετά, το περιβάλλον του Simulation είναι εξίσου ένας από τους χώρους που χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο καθώς είναι το CAE περιβάλλον (Computer Aided Engineering) και μέσα σε αυτόν πραγματοποιούνται όλες οι αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 6 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Simulation του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

Όπως απεικονίζεται και στην προηγούμενη εικόνα η πρώτη ο μηχανολόγος καλείται όταν εισέρχεται στο περιβάλλον Simulation είναι να επιλέξει το είδος της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιηθήκαν στατικές μελέτες (Static Stress) για την αντοχή του σωληνωτού σασί του Trophy truck, μελέτες ιδιοσυχνότητας (Modal Frequencies) καθώς και αναλύσεις βελτιστοποίησης σχήματος (Shape Optimization) για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας σε συγκεκριμένα μηχανικά εξαρτήματα.

Στη συνέχεια, το Manufacture περιβάλλον αναλαμβάνει την προετοιμασία της παραγωγής του τρισδιάστατου μοντέλου. Ουσιαστικά μέσα σε αυτόν τον συγκεκριμένο χώρο πραγματοποιείται ο προγραμματισμός των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή, όπως είναι οι εργαλειομηχανές CNC, συστήματα κοπής με λέιζερ ή με υδροκοπή αλλά και για τη χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης (Additive Manufacturing).



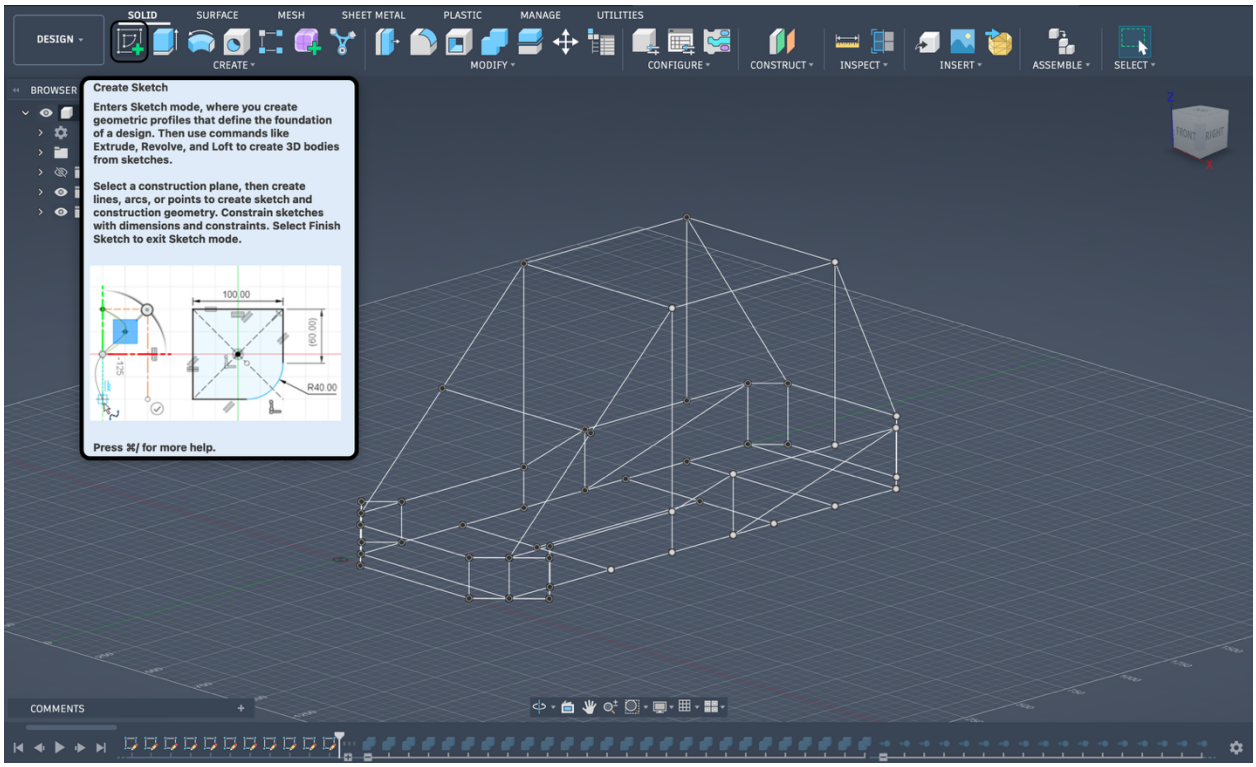
Εικόνα 7 Απεικόνιση του εργασιακού χώρου Manufacture του λογισμικού Autodesk Fusion 360.

Τέλος, τα περιβάλλοντα Drawing και Electronics είναι οι χώροι που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία δισδιάστατων σχεδίων (2D), τα οποία προκύπτουν από τα αντίστοιχα τρισδιάστατα μοντέλα (3D) για όλες τις διαστασιολογημένες όψεις και για τον σχεδιασμό κυκλωμάτων και ηλεκτρονικών διαγραμμάτων, αντίστοιχα.

5.2. Μεθοδολογία τρισδιάστατης σχεδίασης δικτυωτών πλαισίων

Θα ακολουθήσουν δυο παραδείγματα που αφορούν δικτυωτά πλαίσια σασί και θα αναδειχθούν οι εντολές που χρειάζονται για τη σχεδίαση τους. Ακόμα μέσα από αυτά τα παραδείγματα θα γίνει η αναπαράσταση των κατάλληλων ρυθμίσεων για την διεξαγωγή στατικών αναλύσεων.

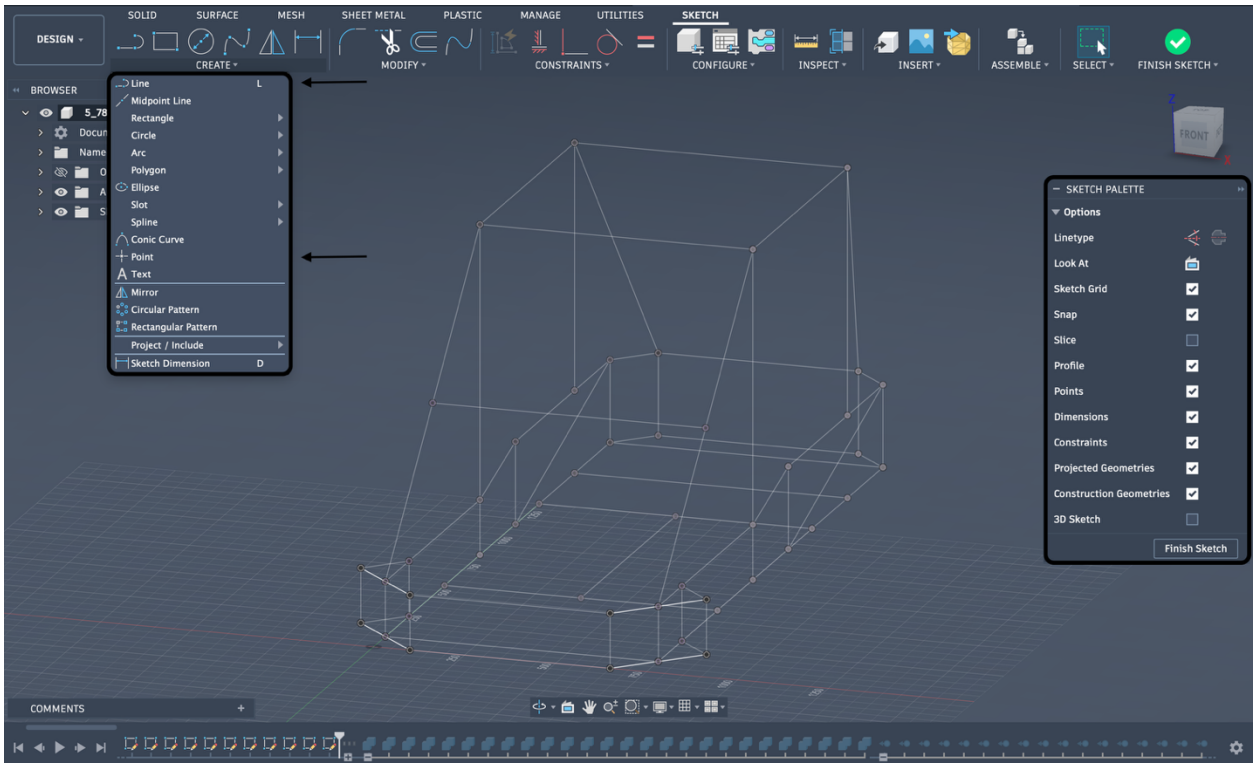
Αρχικά, θα πρέπει να σχεδιαστεί το δισδιάστατο σκίτσο (sketch) του σασί ώστε στην συνέχεια να μετατραπεί σε τρισδιάστατο μοντέλο. Για τη δημιουργία του sketch, το κατάλληλο εργασιακό περιβάλλον είναι το «DESIGN» και στην κατηγορία εντολών «SOLID» επιλέγεται η εντολή «Create Sketch».



Εικόνα 8 Απεικόνιση του εργαλείου Create Sketch για την δημιουργία του τρισδιάστατου σκίτσου.

Με την επιλογή αυτής της εντολής, αυτόματα εμφανίζονται όλες οι εντολές για την δημιουργία του sketch. Για τα αναφερόμενα παραδείγματα οι δυο εντολές που χρησιμοποιήθηκαν εκτενέστερα ήταν η «Line» και η «Point», όπου με αυτές σχεδιάστηκαν οι γραμμές και τα σημεία ένωσης των γραμμών (κόμβοι), αντίστοιχα. Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως για τη δημιουργία sketch, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου επίπεδου σχεδίασης (οριζόμενου από τους αντίστοιχους άξονες) που θα πραγματοποιηθούν οι εντολές.

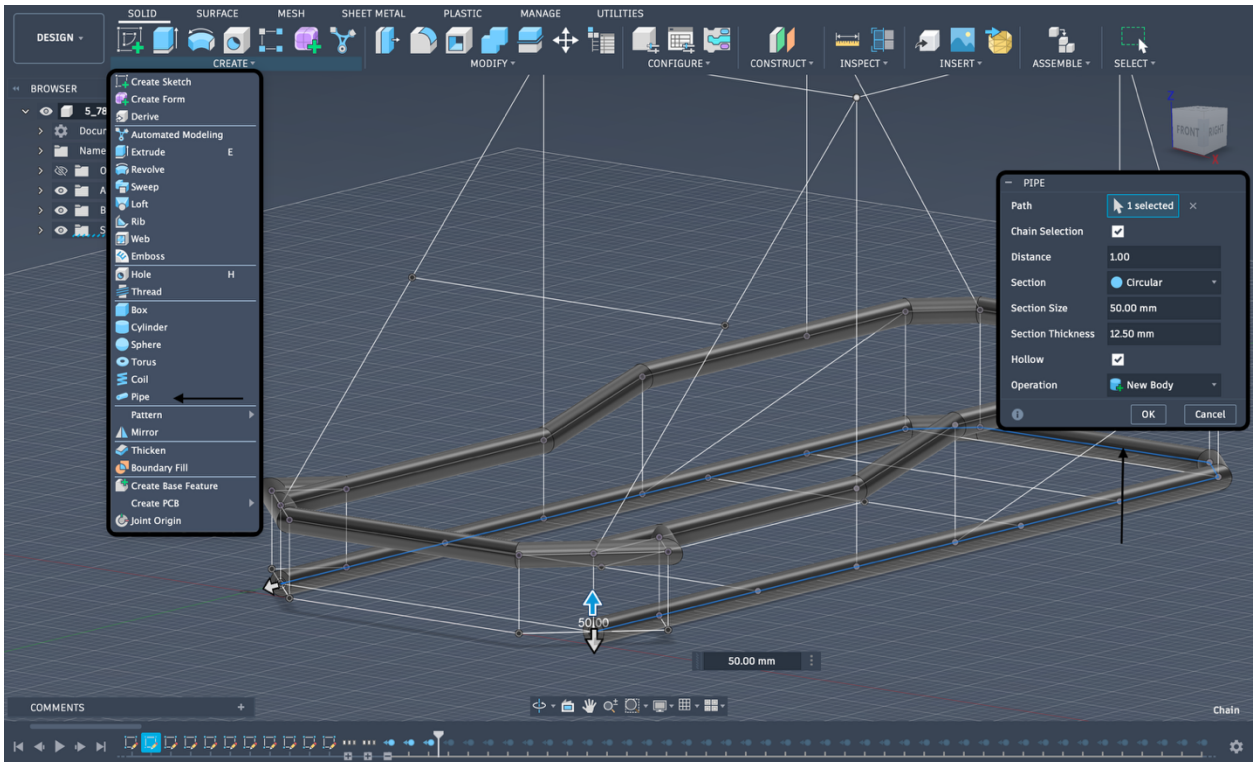
Στην παρούσα εργασία χρειάστηκαν όλοι οι συνδυασμοί που είναι διαθέσιμοι. Ακόμη, όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα, υπάρχει ένας πίνακας με ονομασία «SKETCH PALETTE». Εντός αυτού υπάρχουν διάφορες επιλογές όπου μέσω αυτών πραγματοποιείται η ρύθμιση του τρόπο σχεδίασης. Σε όλα τα σχέδια που μελετήθηκαν για τη διεξαγωγή αυτής της εργασίας επιλέχθηκαν όλες οι επιλογές εκτός από την «Slice» καθώς επιτρέπει το προσωρινό κόψιμο οποιουδήποτε αντικειμένου που εμποδίζει στη σχεδίαση του σκίτσου (γεγονός που στις περιπτώσεις της εργασίας δεν χρειάστηκε διότι πρώτα σχεδιαζόταν το σκίτσο και μετά ακολουθούσε η ανάπτυξη του τρισδιάστατου μοντέλου).



Εικόνα 9 Απεικόνιση των εντολών του εργαλείου Create Sketch.

Με την ολοκλήρωση του δισδιάστατου σκίτσου, σειρά έχει η μοντελοποίηση των σωλήνων για την ανάπτυξη της τρισδιάστατης μορφής. Με την επιλογή του «FINISH SKETCH», γίνεται η επιστροφή στο βασικό «DESIGN» περιβάλλον και στην κατηγορία «CREATE» γίνεται η ενεργοποίηση της εντολής «Pipe».

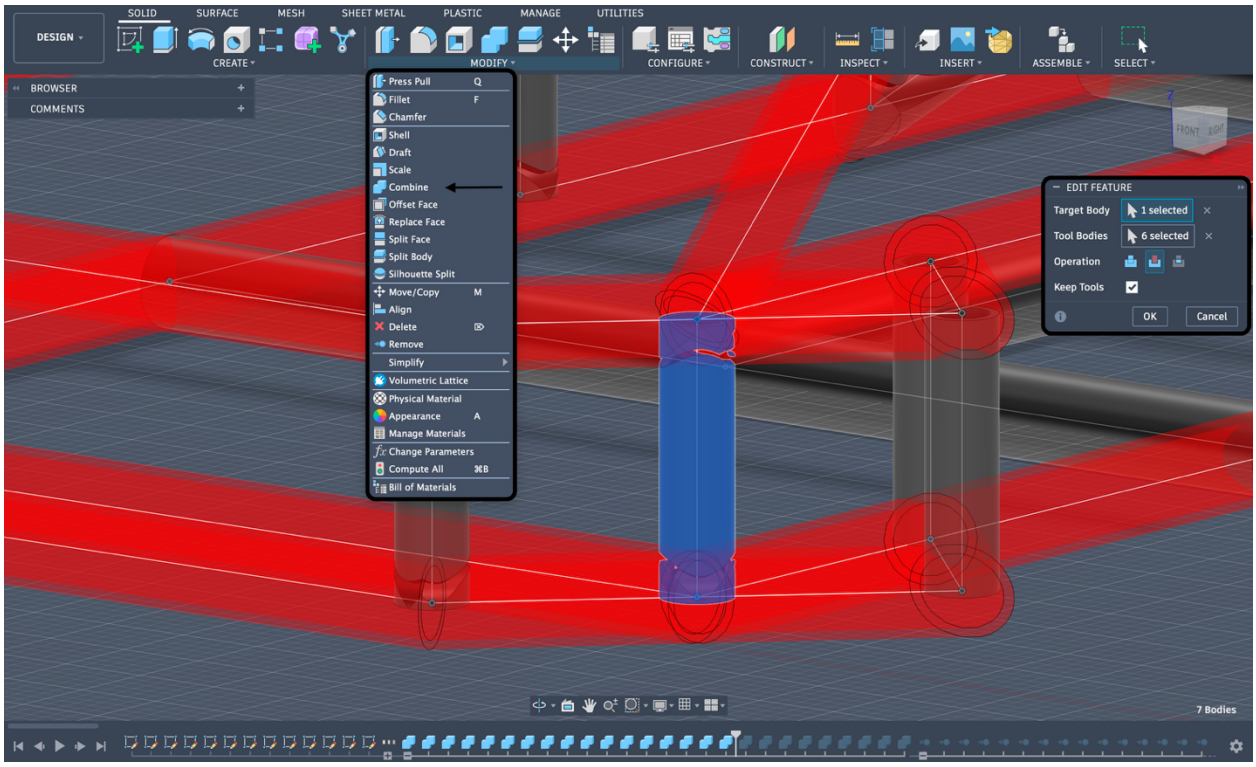
Στην συνέχεια αφού επιλεγεί η γραμμή που θα χρησιμοποιηθεί σαν άξονας, τότε εμφανίζεται ο πίνακας με την επιλογή των χαρακτηριστικών του σωλήνα. Ρυθμίζοντας μέσω αυτού την εξωτερική διάμετρο, το πάχος που θα έχει, την κυκλική του μορφή αλλά και τον τύπο της λειτουργίας (στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας όλοι οι σωλήνες λειτουργούν στην ομάδα «New Body»), δημιουργείται ο σωλήνας κατά μήκος της προεπιλεγμένης γραμμής.



Εικόνα 10 Απεικόνιση της εντολής Pipe στην καρτέλα Create.

Με τη δημιουργία όλων των σωλήνων με την εντολή «Pipe», επόμενο βήμα είναι η περικοπή των σημείων στους κόμβους λόγο της «διείσδυσης» του ενός στερεού στο άλλο. Αυτό συμβαίνει διότι οι κόμβοι είναι τα σημεία που συναντώνται δυο ή περισσότεροι σωλήνες, και με την εκτέλεση της εντολής «Pipe», τέμνονται ο ένας στον άλλον. Η εντολή που αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο για την περικοπή αυτών των σημείων, είναι η «Combine».

Επιλέγοντας το συγκεκριμένο εργαλείο, απαιτείται ο καθορισμός δυο παραμέτρων. Η πρώτη είναι ορισμός του σώματος που θέλουμε να δεχτεί την κοπή (Target Body) και η δεύτερη τα σώματα που θέλουμε να λειτουργήσουν ως εργαλεία κοπής (Tool Bodies). Αμέσως μετά πρέπει να ρυθμιστεί η εντολή ώστε η κύρια λειτουργία της να είναι η περικοπή και να επιλεχθεί το «Keep Tools» ώστε να διατηρηθούν τα σώματα που μετατρέπονται σε κοπτικά εργαλεία μετά την ολοκλήρωση της κοπής.



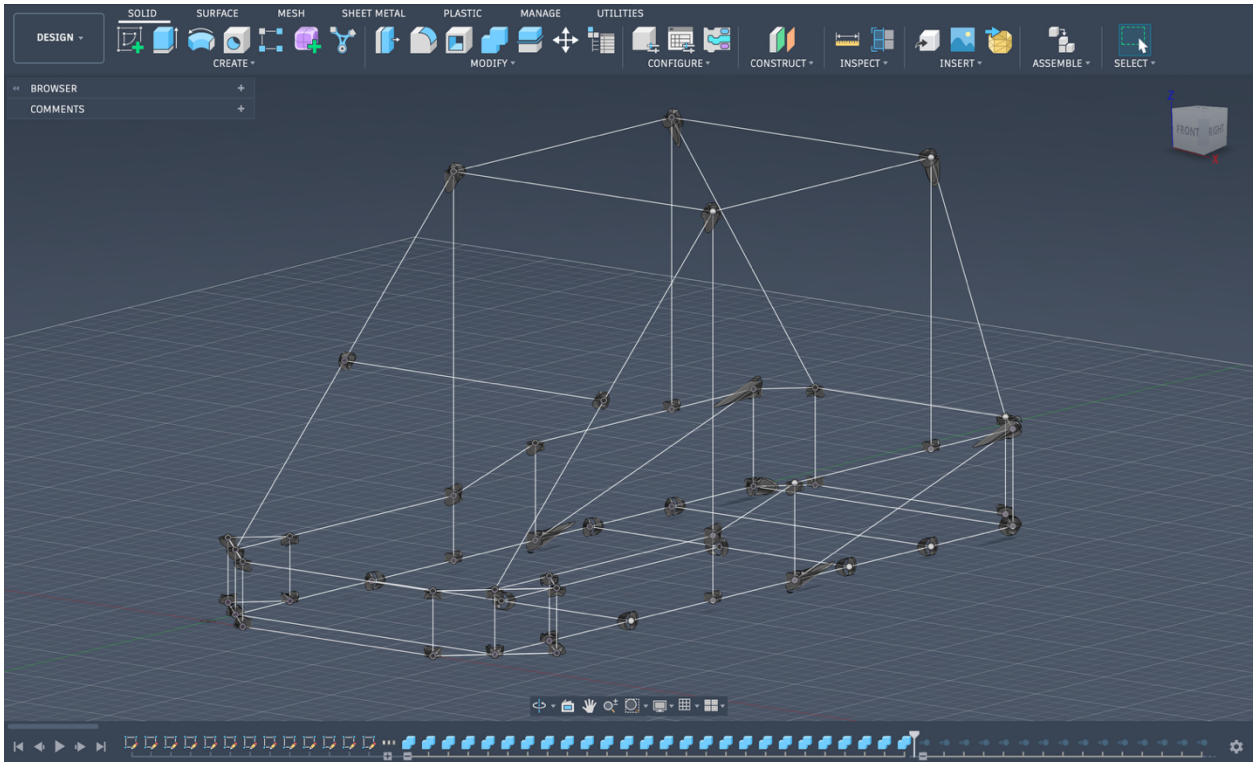
Εικόνα 11 Απεικόνιση της εντολής Combine από την καρτέλα Modify.

Αφού επαναληφθεί η λειτουργία «Combine» σε όλους τους σωλήνες που καταλήγουν σε κόμβους, απαιτείται η αφαίρεση όλων των πλεοναζόντων σωμάτων που δημιουργούνται μετά τη διεργασία της περικοπής. Η αφαίρεση αυτών των περιττών τμημάτων πραγματοποιείται μέσω της εντολή «Remove» που ανήκει στην κατηγορία «MODIFY». θεωρείται από τις πιο απλές εντολές του λογισμικού (Fusion 360), καθώς, μετά την ενεργοποίηση της, το μόνο που απαιτείται είναι η επιλογή όλων των κομματιών και στην συνέχεια το πάτημα του «Ok».

Αμέσως μετά, είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθεί ότι κανένα σώμα δεν συμπίπτει με άλλο. Προκειμένου να αποφευχθούν μελλοντικά προβλήματα στην δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Mesh), εκτελείται η εντολή «Interference» από την κατηγορία «INSPECT». Με την ύπαρξη σφαλμάτων (Error), δεν είναι δυνατή η ολοκλήρωση του διαχωρισμού της κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία οδηγώντας σε μη υλοποίηση των στατικών και δυναμικών αναλύσεων.

Έτσι για να διασφαλιστεί ότι η εντολή «Combine» πραγματοποιήθηκε σε όλα τα κατάλληλα σημεία, ενεργοποιείται το εργαλείο «Interference», επιλέγετε ολόκληρη η κατασκευή και τότε γίνεται η ενεργοποίηση του «Compute». Αν εμφανιστεί το μήνυμα «No interference detected»

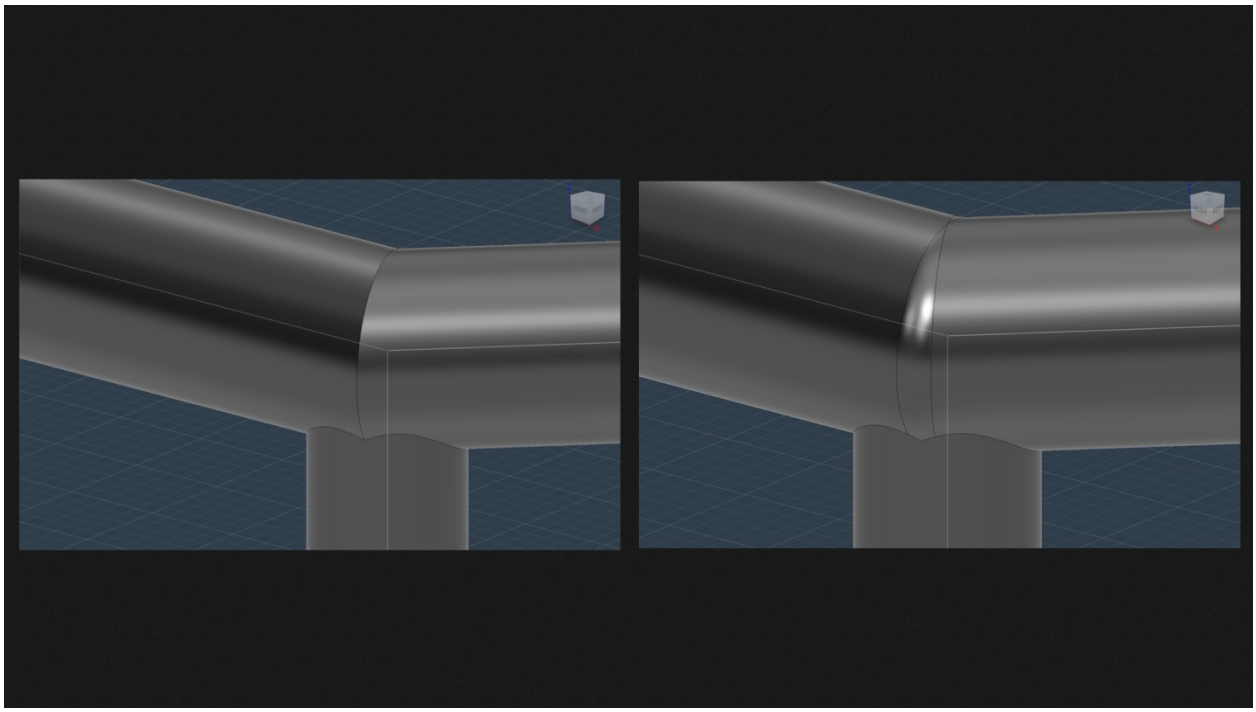
γίνεται γνωστό πως δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί η περικοπή κάπου αλλού και οι συνδεσμολογίες των σωλήνων στους κόμβους έχουν δημιουργηθεί με απόλυτη ακρίβεια.



Εικόνα 12 Απεικόνιση των πλεονάζων τεμαχίων πριν από την αφαίρεση τους με το εργαλείο Remove.

Για την ολοκλήρωση του σχεδιαστικού μέρους, ολόκληρη η κατασκευή απαιτείται να απαλλαγεί από τις αιχμηρές γωνίες που προέκυψαν κατά τα προηγούμενα στάδια σχεδίασης. Ουσιαστικά, πρέπει να στρογγυλοποιηθούν οι ακμές και να μετατραπούν οι απότομες γωνίες σε ομοιόμορφες καμπύλες, για μηχανικούς σκοπούς (μειώνει τη συγκέντρωση τάσεων), για να αποφευχθούν προβλήματα ασφάλειας (αιχμηρές γωνίες αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας) αλλά και για αισθητικούς λόγους.

Έτσι, η κατάλληλη εντολή για αυτήν την περίπτωση είναι η «Fillet» από την καρτέλα «MODIFY». Η λειτουργία του συγκεκριμένου εργαλείου είναι ιδιαίτερα απλή, καθώς το μόνο που πρέπει να οριστεί η κατάλληλη ακμή και η εύρεση της ακτίνας που θα εφαρμοστεί για την δημιουργία της καμπύλης.



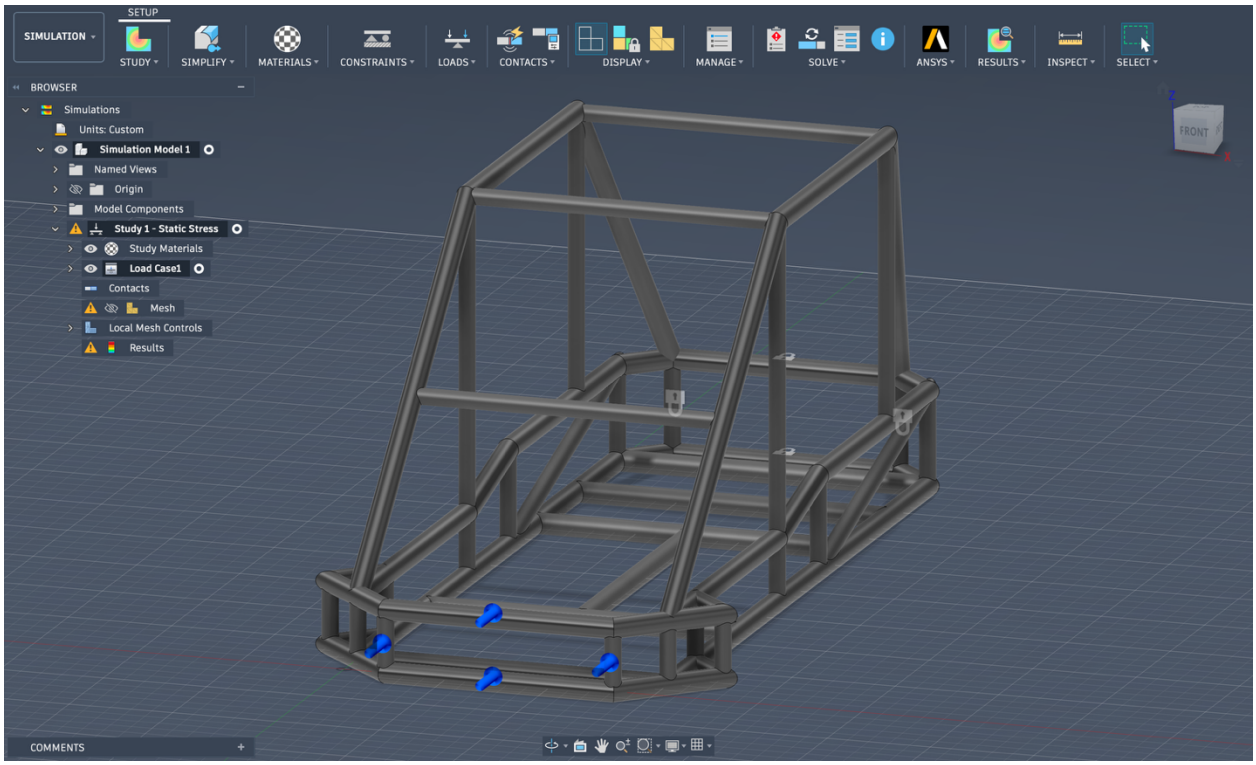
Εικόνα 13 Απεικόνιση του αποτελέσματος της χρήσης του εργαλείου Fillet.

Για τον καθορισμό των περιορισμών (στηρίξεων) και την διεξαγωγή οποιασδήποτε στατική ανάλυση, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αλλαγή του περιβάλλον εργασίας και από το «DESIGN» να γίνει μετάβαση στο «SIMULATION».

5.3. Παραμετροποίηση στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

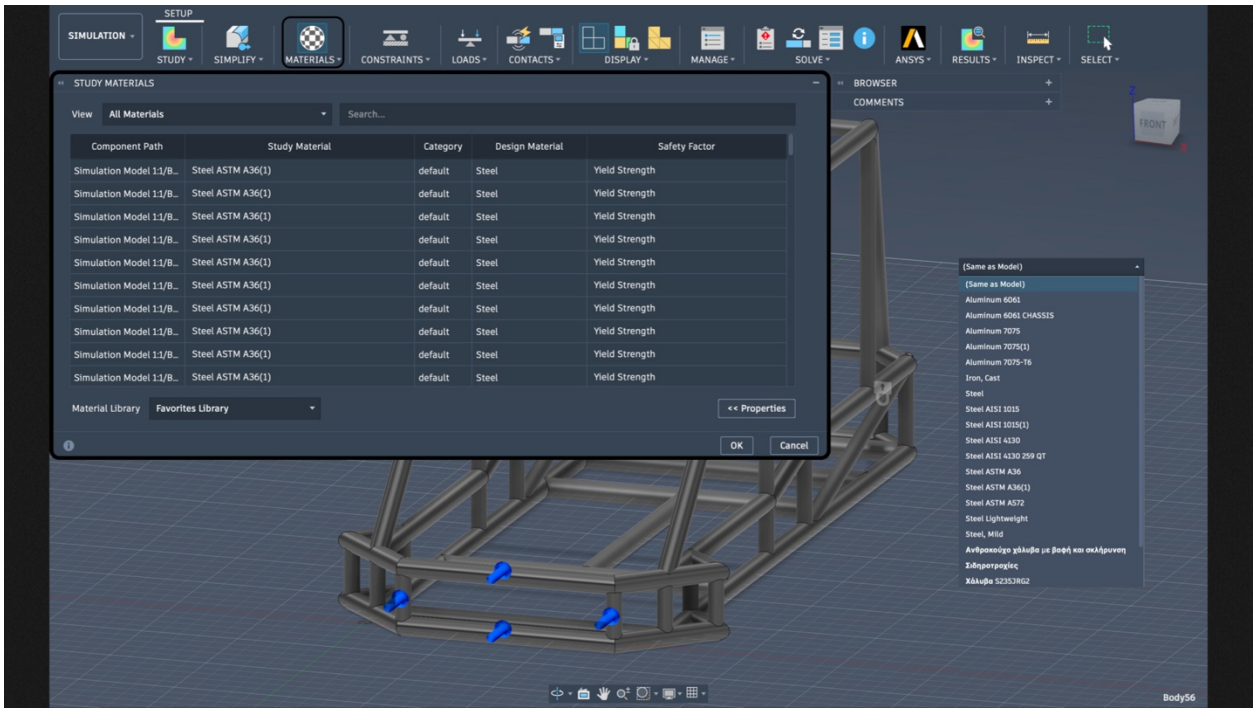
Προκειμένου το μοντέλο να υποβληθεί σε μια στατική μελέτη, θα πρέπει να προηγηθεί η δημιουργία πλέγματος (meshing) για να διαχωριστεί η κατασκευή σε πεπερασμένα στοιχεία. Με την ολοκλήρωση του πλέγματος ακολουθάει ο ορισμός του υλικού κατασκευής, τα φορτία και τα σημεία εφαρμογής τους, καθώς και τα μέρη που θα είναι πακτωμένα.

Τέλος εξίσου σημαντικό είναι ο ορισμός των συνθηκών επαφής (Contacts) όλων των τμημάτων από τα οποία αποτελείται η κατασκευή. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται η σύνδεσή μεταξύ τους και το λογισμικό αναγνωρίζει πως είναι ένα ενιαίο κατασκεύασμα.



Εικόνα 14 Απεικόνιση του πρώτου σεναρίου στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

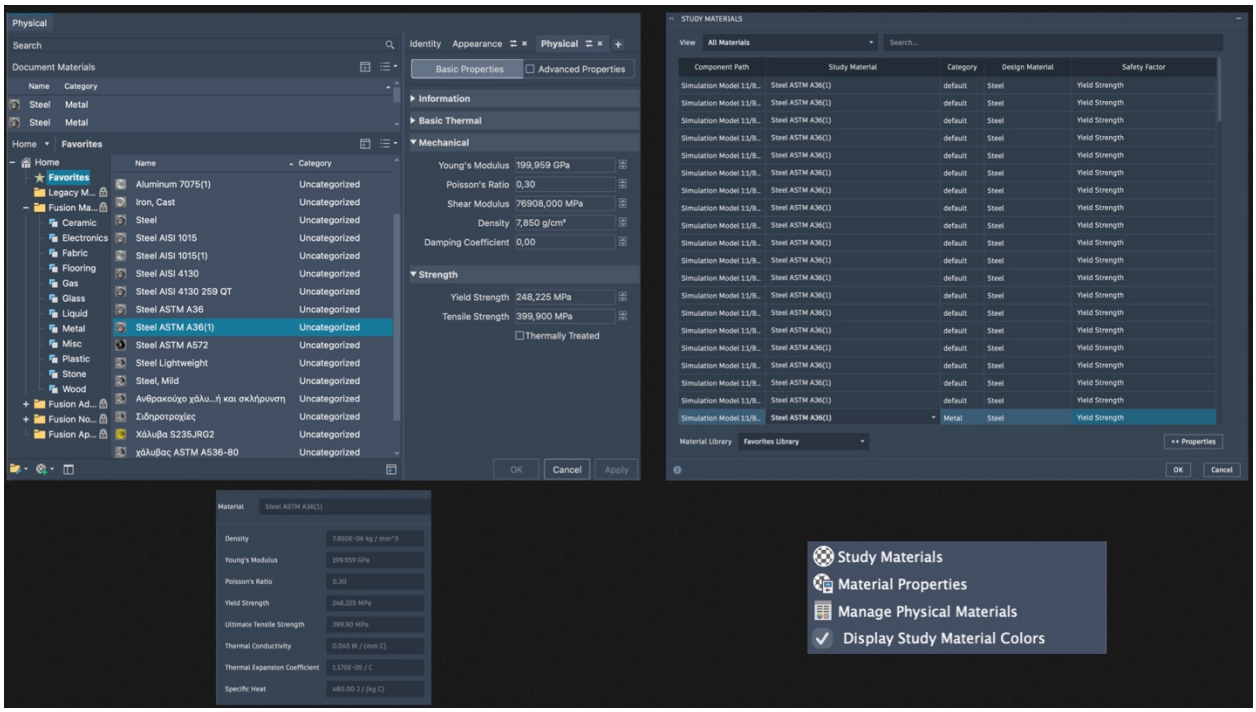
Ο ορισμός του υλικού της κατασκευής υλοποιείται με την επιλογή της ομάδα εντολών «MATERIALS» και συγκεκριμένα την εντολή «Study Materials». Εκεί παρέχεται πρόσβαση σε λίστες με βιβλιοθήκες υλικών (material libraries), ώστε να αντιστοιχήσουν στα επιμέρους τμήματα του μοντέλου.



Εικόνα 15 Απεικόνιση της διαδικασίας επιλογής υλικού του πλαισίου.

Σε περίπτωση που απαιτείται η χρήση ενός μετάλλου με συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες, το οποίο δεν υπάρχει στις προεπιλεγμένες βιβλιοθήκες λογισμικού (Fusion 360), προσφέρεται η ευκαιρία ανάπτυξης νέου, ειδικά διαμορφωμένου υλικού, από την εντολή «Manage Physical Materials».

Με αυτόν τον τρόπο ο μηχανικός με τη δημιουργία αντίγραφου (duplicate) του υπάρχοντος υλικού και με την κατάλληλη επεξεργασία για να αποθηκευτούνε οι σωστές μηχανικές ιδιότητες και η αντίστοιχη ονομασία του προσδοκώμενου μετάλλου. Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διεργασίας, το νέο υλικό καταχωρίζεται στην βιβλιοθήκη αγαπημένων (Favorites), βρισκόμενο σε άμεση διαθεσιμότητα και έτοιμο για χρήση.



Εικόνα 16 Απεικόνιση του τρόπου ανάπτυξης νέου, ειδικά διαμορφωμένου υλικού.

Για την επιβολή των φορτίων που δέχεται το σωληνωτό σασί, επιλέγεται το εργαλείο “LOADS” και συγκεκριμένα το «Structural Loads». Εντός της συγκεκριμένης καρτέλας πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των επιφανειών που θα ασκούνται τα φορτία, το μέγεθος και η μονάδα μέτρησης (συνήθως οι δυνάμεις μετριούνται σε Newton), η κατεύθυνση και ο προσανατολισμό από την αρχή των αξόνων x, y, z αλλά και ο τύπος της φόρτισης (στις περιπτώσεις των παραδειγμάτων και του κύριου σασί είναι όλες «Force»). Με την ολοκλήρωση όλων των παραπάνω ρυθμίσεων και με την επιλογή του “OK” πραγματοποιείται και η εφαρμογή τους.

Αμέσως επόμενο βήμα αφορά τον καθορισμό των συνοριακών συνθηκών στήριξης, μέσω του «Constraints» και ειδικότερα από το «Structural Constraints». Προκειμένου να εξασφαλιστεί η στατική ισορροπία του μοντέλο κατά την επιβολή των φορτίων θα πρέπει να οριστούν τα σταθερά τμήματα και ο περιορισμό ως προς την ελευθερία κινήσεων. Σε όλες τις μελέτες που εξελιχθήκαν στην παρούσα εργασία, οι στηρίξεις ήταν πακτώσεις (στο λογισμικό είναι ο τύπος «Fixed»). Με αυτήν την επιλογή, αποτρέπεται κίνηση του επιλεγμένου σημείου και στους έξι βαθμούς ελευθερίας (τρεις μετατοπίσεις στους x, y, z και τρεις περιστροφές γύρω από τους ίδιους άξονες).

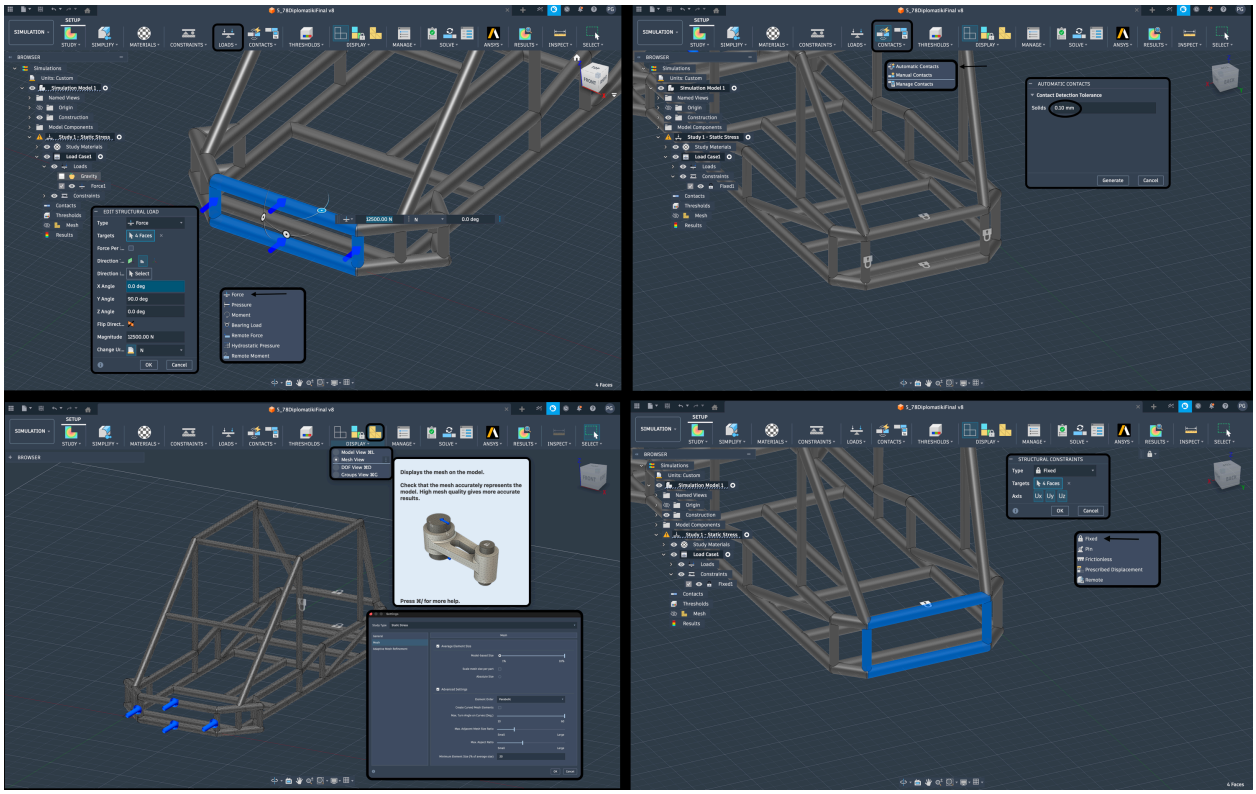
Στη συνέχεια απαιτείται η ενεργοποίηση της εντολής «Automatic Contacts» στα δυο υπό εξέταση μοντέλα αλλά και στο κύριο σασί με τα επιμέρους εξαρτήματα. Ο λόγος είναι ότι

αποτελούνται από πολλά τμήματα και είναι αναγκαίος ο καθορισμός των συνθηκών επαφής στα σημεία σύνδεσης τους.

Η συγκεκριμένη εντολή θεωρείται από τους πιο σημαντικούς αυτοματισμούς στο λογισμικό, καθώς το μόνο που απαιτείται είναι να οριστεί το όριο ανοχής της απόστασης επαφής (Contact tolerance) των τμημάτων αντίστοιχα. Για παράδειγμα η απόσταση 0,1mm είναι μια ασφαλής προσέγγιση που ικανοποιεί τις περισσότερες περιπτώσεις.

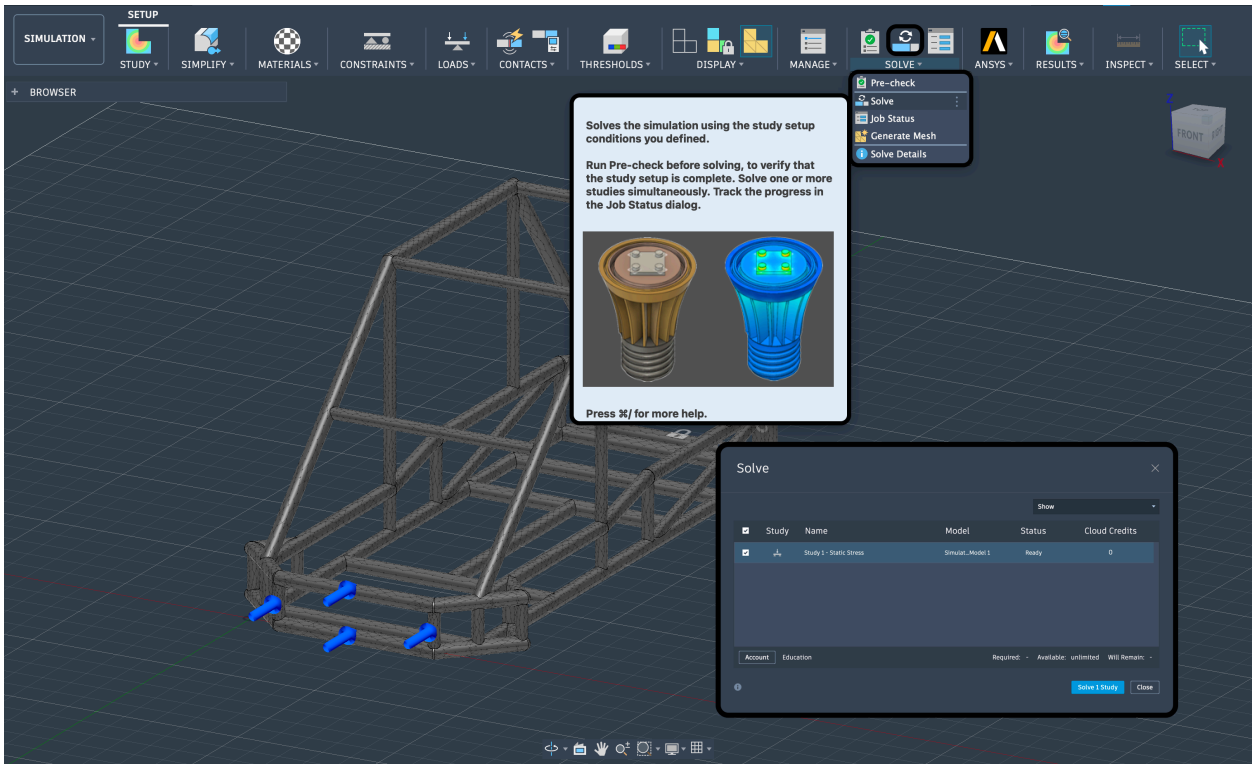
Ο τελευταίος έλεγχος που πρέπει να λάβει χώρα, για να μην υπάρχουν σφάλματα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), είναι στις ρυθμίσεις του πλέγματος «Mesh». Σε αυτήν την καρτέλα, θα πρέπει να καθοριστεί με μια μεθοδική προσεγγιστική διαδικασία, το μέσο μέγεθος του στοιχείου (Average Element Size). Επιπλέον θα πρέπει να τονιστεί, ότι όσο πιο μικρό μέγεθος τόσο πυκνότερο πλέγμα και ταυτόχρονα περισσότερο χρόνο επίλυσης της ανάλυσης.

Επίσης ορίζεται και η τάξη (Order) των στοιχείων, με την επιλογή της συμπεριφοράς ως γραμμική (Linear) ή παραβολική (Parabolic). Αν η τάξη είναι παραβολική τότε αυξάνονται οι ενδιάμεσοι κόμβοι στις πλευρές των στοιχείων και είναι πολύ πιο ακριβής για σύνθετα σχήματα και καμπύλες. Πρακτικά το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αυτό μετατρέπει το πλέγμα στην πιο ακριβής εκδοχή του, όπου συγκριτικά με τα γραμμικά στοιχεία, υστερούν και είναι ανακριβής.



Εικόνα 17 Απεικόνιση των παραμέτρων για την προσομοίωση του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Με την ολοκλήρωση των ορισμών όλων των παραμέτρων για να ξεκινήσει η διαδικασία της επίλυσης της στατικής μελέτης ξεκινάει με την χρήση της εντολή «SOLVE». Στο ενδιάμεσο παράθυρο, επιλέγεται η αντίστοιχη μελέτη και το πλήκτρο «Solve 1 Study». Μετά πραγματοποιείται αποστολή των δεδομένων της ανάλυσης στους διακομιστές (Cloud Servers) της «Autodesk». Αφού ολοκληρωθεί στο cloud η επίλυση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, τα αντίστοιχα δεδομένα στέλνονται πίσω στο μηχανολόγο για να τεθούν σε αξιολόγηση.



Εικόνα 18 Απεικόνιση της εντολής Solve για την επίλυση της στατικής ανάλυσης.

Για την εξέταση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα πρέπει να επιλεχθεί το πλήκτρο “RESULTS”.

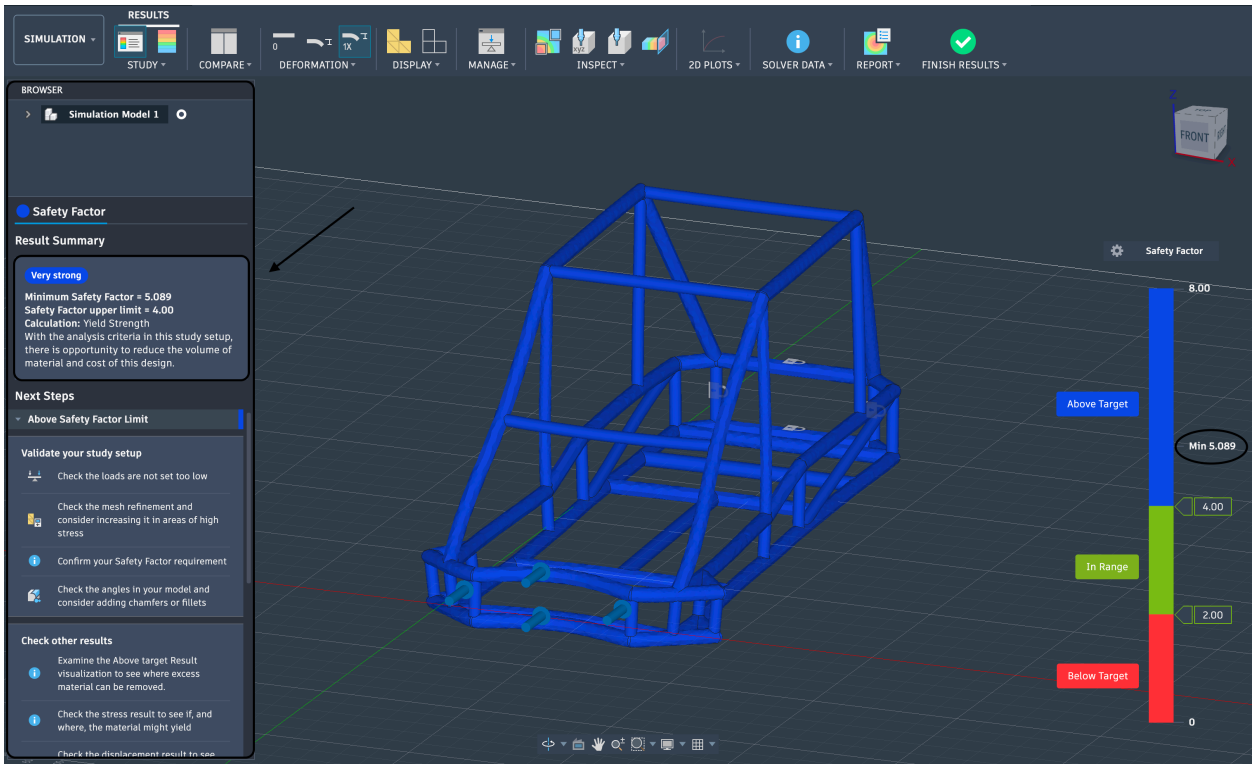
5.3.1. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων 1ο σεναρίου ανάλυσης

Με την επιλογή της καρτέλας «Results», ανακτώνται τα δεδομένα της επίλυσης από τον διακομιστή και γνωστοποιούνται τα αποτελέσματα της μελέτης. Με την ολοκλήρωση της φόρτωσης απεικονίζεται η συμπεριφορά αλλά και οι αριθμητικές τιμές της απόκρισης του μοντέλου ως προς τις συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν στα προηγούμενα στάδια. Στο αριστερό πλαίσιο του εργασιακού περιβάλλοντος παρουσιάζεται ο συντελεστής ασφαλείας (Safety Factor) αλλά και η αξιολόγηση της αντοχής του σασί.

Όπως διακρίνεται στο παράδειγμα που ακολουθεί, ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (Minimum Safety Factor) ισούται με 5,089. Η τιμή αυτή υποδηλώνει πως το σασί αντέχει τα πενταπλάσια φορτία από αυτά που έχουν επιβληθεί, πριν την υπέρβαση του ορίου διαρροής (yield strength) του υλικού. Επίσης με μια μπλε ένδειξη το λογισμικό ειδοποιεί πως η κατασκευή είναι πολύ υπερδιαστασιολογημένη παρέχοντας περιθώρια μείωση βάρους (άρα και κόστους) καθώς ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από το προεπιλεγμένο όριο αναφοράς του λογισμικού.

Ακριβώς κάτω από τις ενδείξεις ασφαλείας το λογισμικό παρέχει κάποιες συμβουλευτικές προτάσεις, οι οποίες δύνανται να εφαρμοστούν (προαιρετικές συστάσεις). Συγκεκριμένα, παρέχονται τρεις εναλλακτικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση και βελτίωση της ανάλυσης. Ο πρώτος ουσιαστικά είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος για την καταλληλόλητα των φορτίων που έχουν οριστεί. Παράλληλα συνιστάται η εξάλειψη (αν υπάρχουν) αιχμηρές γωνίες με την μετατροπή τους σε καμπύλες (Fillets) για να αποφευχθούν περαιτέρω συγκεντρώσεις τάσεων και στις τοπικές πυκνώσεις του πλέγματος και να διασφαλιστεί η ακρίβεια των υπολογισμών.

Στο δεύτερο τρόπο προτείνεται η αφαίρεση υλικού σε σωλήνες που εμφανίζουν χαμηλή καταπόνηση (μπλε χρωματισμός). Ακόμα αν το επιτρέπει η συνθήκη είναι εφικτή και η αφαίρεση αν η παρουσία τους θεωρείται περιττή. Ο τρίτος και ο τελευταίος τρόπος αποτελεί την πραγματοποίηση βελτιώσεων στην τοπολογία της κατασκευής. Ουσιαστικά, το λογισμικό προτείνει την ανάλυση «Shape Optimization», που εμφανίζει ποια σημεία είναι δυνατή η αφαίρεση υλικού (μηδενική συγκέντρωση τάσης) μέσω υπόδειξης οπών. Επιπλέον, συνιστάται και η χρήση της μελέτης «Generative Design» στην οποία με την υποστήριξης της τεχνητής νοημοσύνης (AI), δημιουργείται ο ανασχεδιασμός του μοντέλου. Στόχος και των δυο μεθόδων είναι μείωση όσου δυνατού περισσότερου βάρους, χωρίς να επηρεαστεί η μηχανική αντοχή του ίδιου σεναρίου φόρτισης.



Εικόνα 19 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Στη συνέχεια, στο εργασιακό περιβάλλον «Simulation» και συγκεκριμένα μέσω της καρτέλας “Results” της εκάστοτε μελέτης, βρίσκονται σε διαθεσιμότητα όλα τα εξαγόμενα δεδομένα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων. Αναλυτικότερα, όπως αποτυπώνεται και στις παρακάτω εικόνες, παρέχεται η δυνατότητα επισκόπησης σημαντικών μεγεθών. Σε αυτά συγκαταλέγονται ο συντελεστής ασφαλείας, οι αναπτυσσόμενες τάσεις, οι μετατοπίσεις, οι δυνάμεις αντίδρασης, οι παραμορφώσεις καθώς και η συνολική δύναμη και πίεση που συγκεντρώνεται στους κόμβους του (εν ολίγης στα σημεία επαφής και σύνδεσης δυο η περισσότερων σωλήνων).

Το λογισμικό στην κατηγορία τάξη «Stress» υπολογίζει τα αποτελέσματα των τάσεων που εμφανίζονται στο σωληνωτό σασί, σε διαφορετικές συνιστώσες. Ειδικότερα, παρέχεται η δυνατότητα μελέτης της ισοδύναμης τάση (Von Mises), της πρώτης και τρίτης κύριας τάσης (1 and 3 Principal), των ορθών τάσεων (Normal XX, Normal YY, Normal ZZ), καθώς και των διατμητικών τάσεων (Shear XY, Shear YZ, Shear XZ).

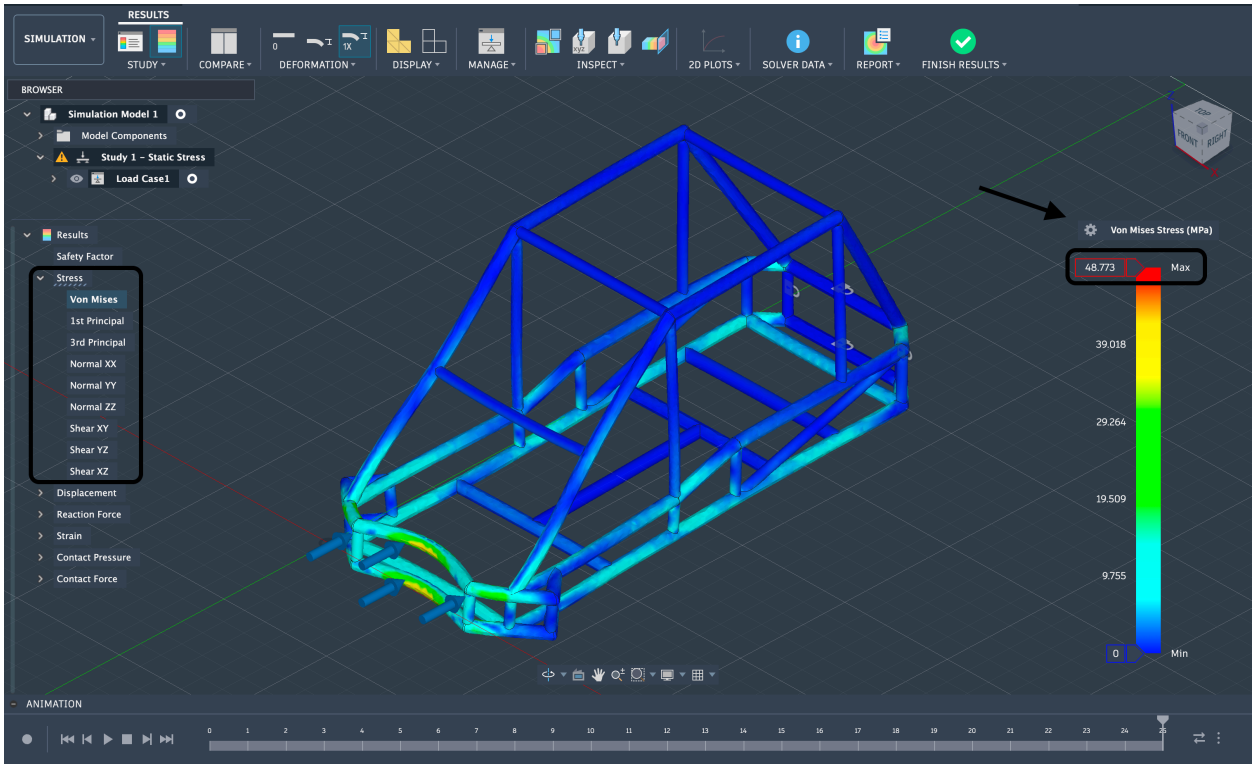
Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την αντοχή, η τάση «Von Mises» είναι ικανοποιητική. Η εν θέματι τάση, είναι ένας συνδυασμός τάσεων που δεν αποτελεί μια φυσική συνιστώσα που αναπτύσσεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση αλλά ένα μαθηματικό μέγεθος, προερχόμενο από ένα συνδυασμό ορθών και διατμητικών τάσεων. Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτελεί το βασικό κριτήριο για τον έλεγχο της αστοχίας του υλικού. Δηλαδή, με βάση την θεωρία της τάσης «Von Mises», η παραμόρφωση του υλικού θα μεταβεί στην πλαστική περιοχή εάν η ισοδύναμη τάση ξεπεράσει το όριο διαρροής (Yield Strength) του υλικού.

Στο δεξιά πλαίσιο του περιβάλλοντος εργασίας υπάρχει μια κλίμακα η οποία φέρει συγκεκριμένη χρωματική διαβάθμιση, συμβολίζοντας το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων. Τα ίδια ακριβώς χρώματα επικαλύπτουν το τρισδιάστατο μοντέλο του σασί, παρέχοντας μια πλήρη οπτική απεικόνιση για τις τάσεις που επικρατούν σε κάθε περιοχή του, αντίστοιχα.

Η κλίμακα ξεκινάει με ένα σκούρο μπλε χρώμα, όπου υποδηλώνει τις περιοχές με μηδενική ή ελάχιστη καταπόνηση. Αμέσως μετά υπάρχουν κάποια άλλα ενδεικτικά χρώματα που αντιπροσωπεύουν σταδιακά μεγαλύτερες τάσεις, καταλήγοντας στο κόκκινο χρώμα, το οποίο καταδεικνύει τα σημεία με τις μεγαλύτερες καταπονήσεις.

Η μέγιστη αναπτυσσομένη ισοδύναμη τάση (Von Mises) στη συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με 48,773 MPa. Επιπλέον, είναι φανερές και οι συνοριακές συνθήκες με την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων επί του πλαισίου, με τις πακτώσεις να έχουν οριστεί στο πίσω μέρος και τα φορτία αντίστοιχα, στο μπροστινό, προσομοιώνοντας μια μετωπική σύγκρουση σε τοίχο.

Όπως γίνεται φανερό, ο χρωματισμός του σασί επιβεβαιώνει την αναμενόμενη μηχανική συμπεριφορά του. Ουσιαστικά στους εμπρόσθιους τμηματικούς σωλήνες του σασί αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες τάσεις, επειδή είναι τα αρχικά σημεία που έρχονται αντιμέτωπα με τις κρουστικές δυνάμεις (υποδεικνύεται και από τους πράσινο προς πορτοκαλί χρωματισμό). Συγκριτικά, στα υπόλοιπα τμήματα του μοντέλου επικρατεί ο μπλε χρωματισμός (εκτός από κάποιες εξαιρέσεις που είναι γαλάζιος) υποδεικνύοντας αμελητέα καταπόνηση και κατ' επέκταση, δέχονται ελάχιστη παραμόρφωση.



Εικόνα 20 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

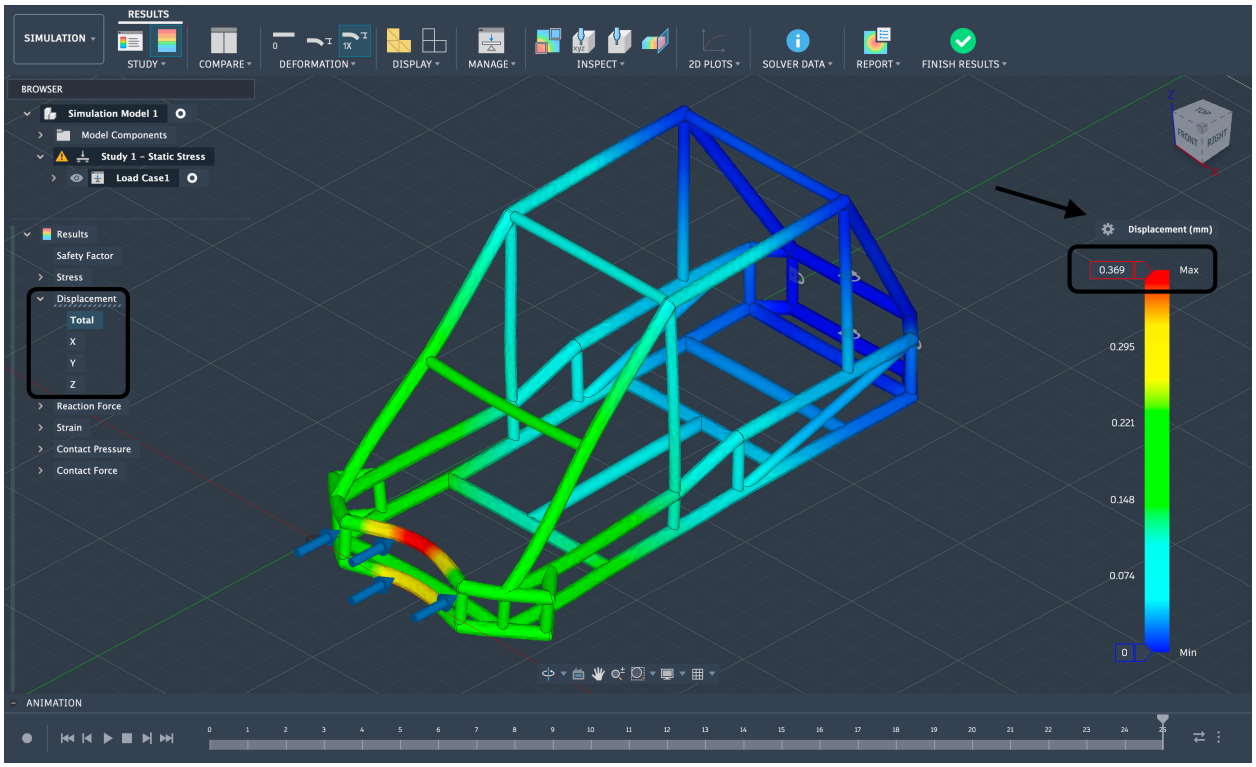
Αμέσως μετά, λαμβάνει χώρα ο έλεγχος των αποτελεσμάτων για τις μετατοπίσεις (Displacement) που εμφανίζονται στο πλαίσιο. Στην αντίστοιχη καρτέλα, εξετάζεται η απόκλιση κάθε σωληνωτού τμήματος του σασί από την αρχική του θέση, εκφρασμένη σε χιλιοστά, κατά μήκος των τριών αξόνων (X, Y, Z). Στο δεξί τμήμα του περιβάλλοντος υπάρχει κλίμακα πανομοιότυπη με αυτή των μηχανικών τάσεων. Αντίστοιχα, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει τα σώματα που έχουν υποστεί ελάχιστη ή μηδενική μετακίνηση. Η διαβάθμιση οδεύει σταδιακά προς τους υπόλοιπους χρωματισμούς η τιμή της μετατόπιση να αυξάνεται μέχρι και το κόκκινο χρώμα όπου αντιπροσωπεύει τη μέγιστη παρατηρούμενη παραμόρφωση ή μετατόπιση.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση, στα σημεία που έχουν οριστεί οι πακτώσεις και γενικότερα στο οπίσθιο και στο τμήμα της οροφής του σασί, επικρατεί ο μπλε χρωματισμός. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως η μετατόπιση αυτών των τμημάτων είναι ελάχιστη έως μηδενική. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την ορθή επιβολή των συνοριακών συνθηκών στην μελέτη, διότι τα πακτωμένα σημεία πρέπει σύμφωνα με την θεωρία να είναι ακίνητα.

Αντίθετα το εμπρόσθιο τμήμα αποτελείται από συνδυασμό πράσινων, κίτρινων και κόκκινων χρωματισμών, υποδεικνύοντας ότι τα τμήματα που ασκούνται τα φορτία αλλά και οι γύρο περιοχές τους, έχουν υποστεί σημαντική μετατόπιση. Η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται στα 0,369 mm και εντοπίζονται, όπως είναι απόλυτα λογικό, στους σωλήνες που δέχονται πρώτοι τα φορτία.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως, οπτικά μπορεί η παραμόρφωση στο σύνολο να φαίνεται μεγάλη, αλλά στην πραγματικότητα δεν ξεπερνά ούτε μισό χιλιοστό. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας στην οπτική μεγεθυμένης της κλίμακας παραμόρφωσης (Deformation Scale). Το λογισμικό ενεργοποιεί αυτόματα αυτή τη ρύθμιση, για να έχει τη δυνατότητα ο μηχανικός να παρατηρήσει με σαφήνεια την κατεύθυνση αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα παραμορφωθεί το κατασκεύασμα.

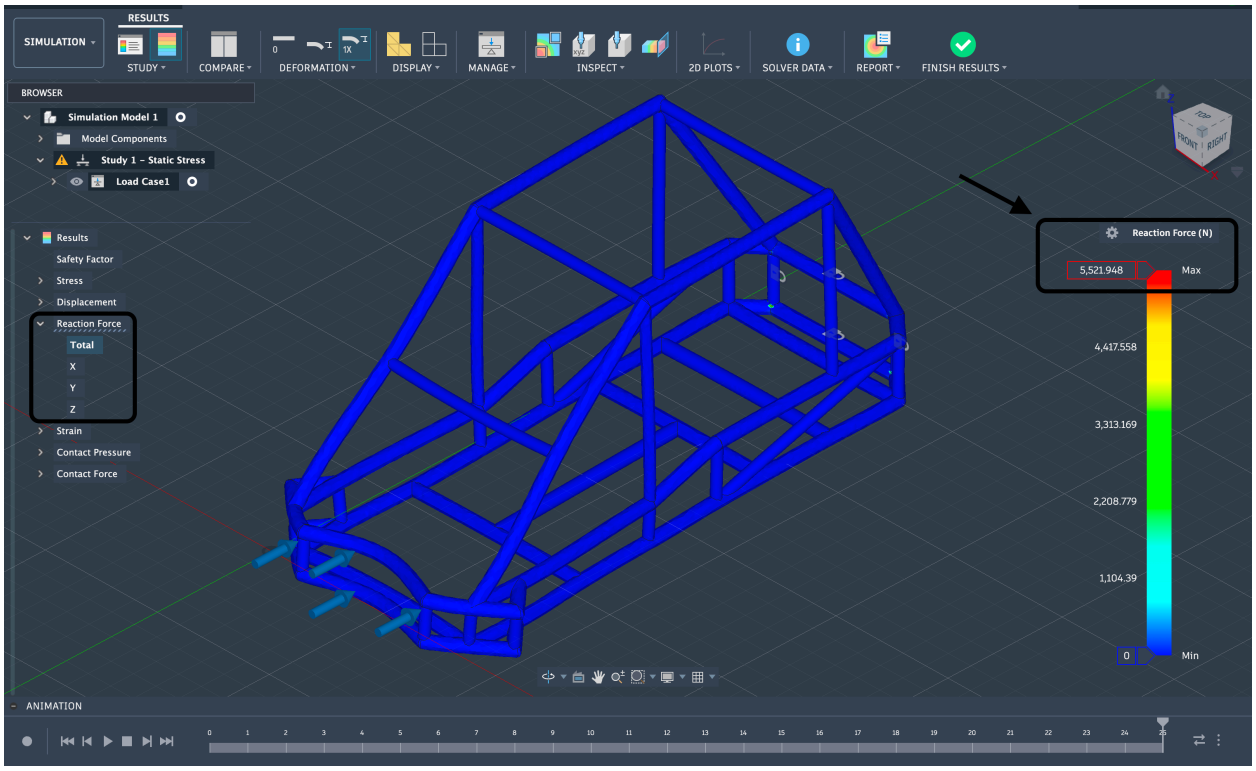
Πρακτικά είναι απόλυτα χρήσιμο, καθώς με γυμνό μάτι, μετατοπίσεις χιλιοστών είναι αδύνατο να παρατηρηθούν. Τα συνολικά αποτελέσματα της παραμόρφωσης στην επιλογή «Total» αλλά ακριβώς από κάτω εντοπίζονται οι φάκελοι X, Y και Z που προβάλλουν τη μετατόπιση κατά μήκος του καθενός ξεχωριστά.



Εικόνα 21 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Ο τρίτος κατά σειρά φάκελος αποτελεσμάτων αφορά τις δυνάμεις αντίδρασης (Reaction forces), αποτυπώνοντας τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σημεία που στηρίζεται και είναι πακτωμένη η κατασκευή. Το λογισμικό υπολογίζει και προσφέρει τις δυνάμεις που ασκεί (δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς) τις οποίες το πλαίσιο αναπτύσσει στα πακτωμένα σημεία, προκειμένου να διατηρηθεί η στατική ισορροπία της κατασκευής. Όπως σε όλα τα περιβάλλοντα εργασίας όλων των αναλύσεων, έτσι και σε αυτό, στο αριστερό τμήμα υπάρχει η αντίστοιχη κλίμακα, με το Newton (N) να είναι η μονάδα μέτρησης.

Στην περίπτωση του σασί, η μέγιστη δύναμη που εμφανίζεται (όχι η συνολική) ισοδυναμεί με 5.521,948 N και αποτυπώνεται με κόκκινο χρωματισμό. Όπως είναι αναμενόμενο, τα μοναδικά σημεία που εμφανίζονται οι δυνάμεις αντίδρασης (και είναι χρωματιστά) είναι αυτά που έχουν οριστεί ως πακτώσεις. Το υπόλοιπο σασί δεν αναπτύσσει δυνάμεις αντίδρασης και διατηρεί το μπλε χρωματισμό. Η τιμή των 5,5 kN είναι ένα μέγεθος από τη συνισταμένη δύναμη (X, Y, Z) και από τον φάκελο με την ονομασία «Total». Αντιστοίχως, οι άλλοι φάκελοι με τον κάθε ένα μεμονωμένο άξονα, προβάλουν τις αντιδράσεις κατά το μήκος του εκάστοτε ξεχωριστά.



Εικόνα 22 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής δύναμης αντίδρασης του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Ένας επιπλέον έλεγχος που ολοκληρώνει την αξιολόγηση της στατικής ανάλυσης είναι η ειδική παραμόρφωση (Strain). Το συγκεκριμένο μέγεθος αποτυπώνει την εσωτερική παραμόρφωση του υλικού της κατασκευής. Μαθηματικά, ορίζεται ως ο λόγο της μεταβολής του μήκους (ΔL) ως προς το αρχικό μήκος (L_0) και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

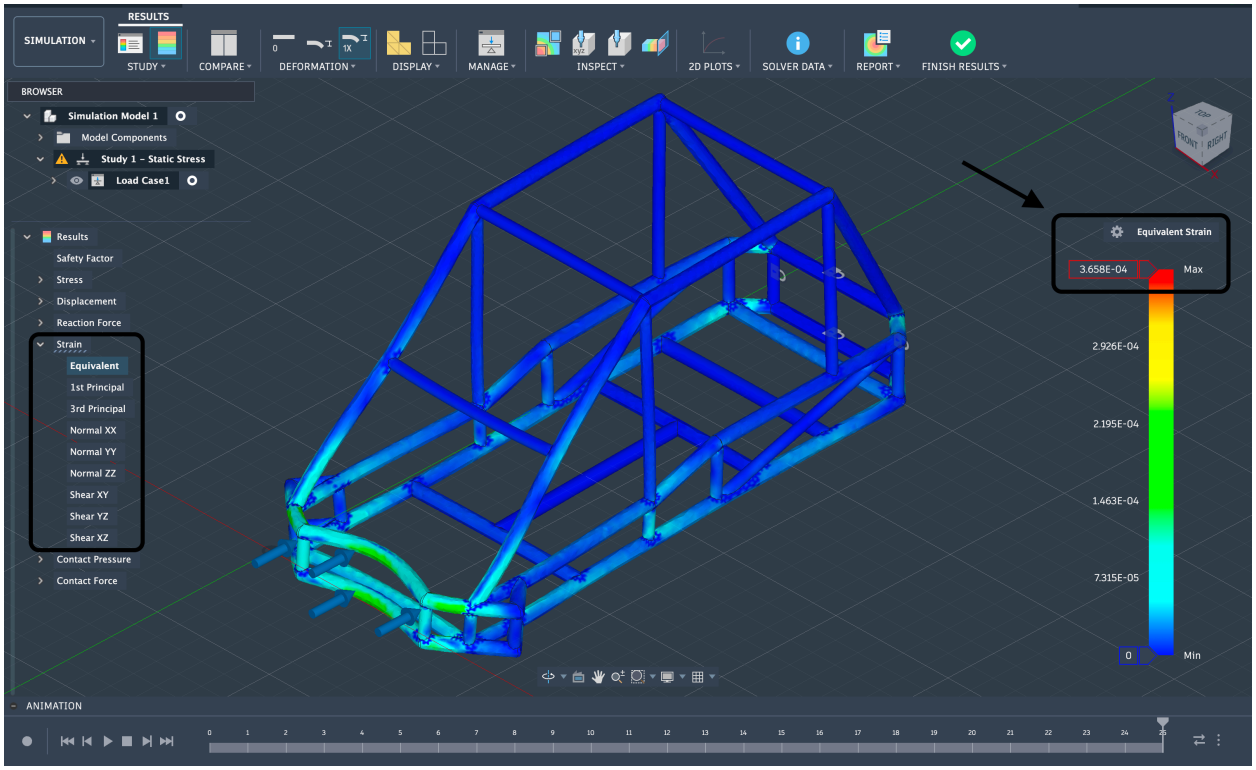
Εξαιτίας του συγκεκριμένου λόγου δυο ομοειδών (μήκος προς μήκος), προκύπτει ένα αδιάστατο μέγεθος, χωρίς κάποια μονάδα μέτρησης. Για διευκόλυνση, το μέγεθος μετατρέπεται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Θα πρέπει να τονιστεί η άμεση συσχέτιση της ειδικής παραμόρφωσης (Strain) με τη τάση (Stress) από τον νόμο του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$), η οποία εφαρμόζεται εντός της γραμμικής ελαστικής περιοχής του υλικού. Η σταθερά αναλογίας Ε ισούται με το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) του εκάστοτε μετάλλου.

Στο εργασιακό περιβάλλον των αποτελεσμάτων του «Simulation», εντός της επιλογής της ειδικής παραμόρφωσης (Strain), υπάρχει το μενού της ισοδύναμης ειδικής παραμόρφωσης (Equivalent). Η συγκεκριμένη επιλογή συνδυάζει τις επιμέρους παραμορφώσεις όλων των αξόνων, με μια ενιαία, απόλυτη τιμή, απεικονίζοντας τη συνολική παραμόρφωση της κατασκευής. Στο αριστερό τμήμα του περιβάλλοντος προβάλλεται η χρωματιστή κλίμακα,

(όπως σε όλα τα αποτελέσματα της στατικής μελέτης) αδιάστατου μεγέθους (χωρίς μονάδα μέτρησης).

Στην περίπτωση του σασί, η μέγιστη τιμή, η οποία συνίσταται με κόκκινο χρωματισμό, υπολογίζεται σε 3,658E-04, όπου ισοδυναμεί με 0,0003658. Με τη μετατροπή του εν λόγου αριθμού σε ποσοστό, συνάγεται το 0,036% το οποίο διατυπώνει το μέγεθος της σχετικής επιμήκυνσης που επικρατεί στο εκάστοτε καταπονημένο σωληνωτό τμήμα . Το συμπέρασμα που προκύπτει και γίνεται άμεσα αντιληπτό είναι η άμεση ταύτιση της χρωματικής κλίμακας παραμόρφωσης με την αντίστοιχη των τάσεων (Stress). Τα παραπάνω αποτελέσματα υποδεικνύουν πως τμήματα που υφίστανται μεγαλύτερες τάσεις υπόκεινται σε μεγαλύτερη παραμόρφωση.

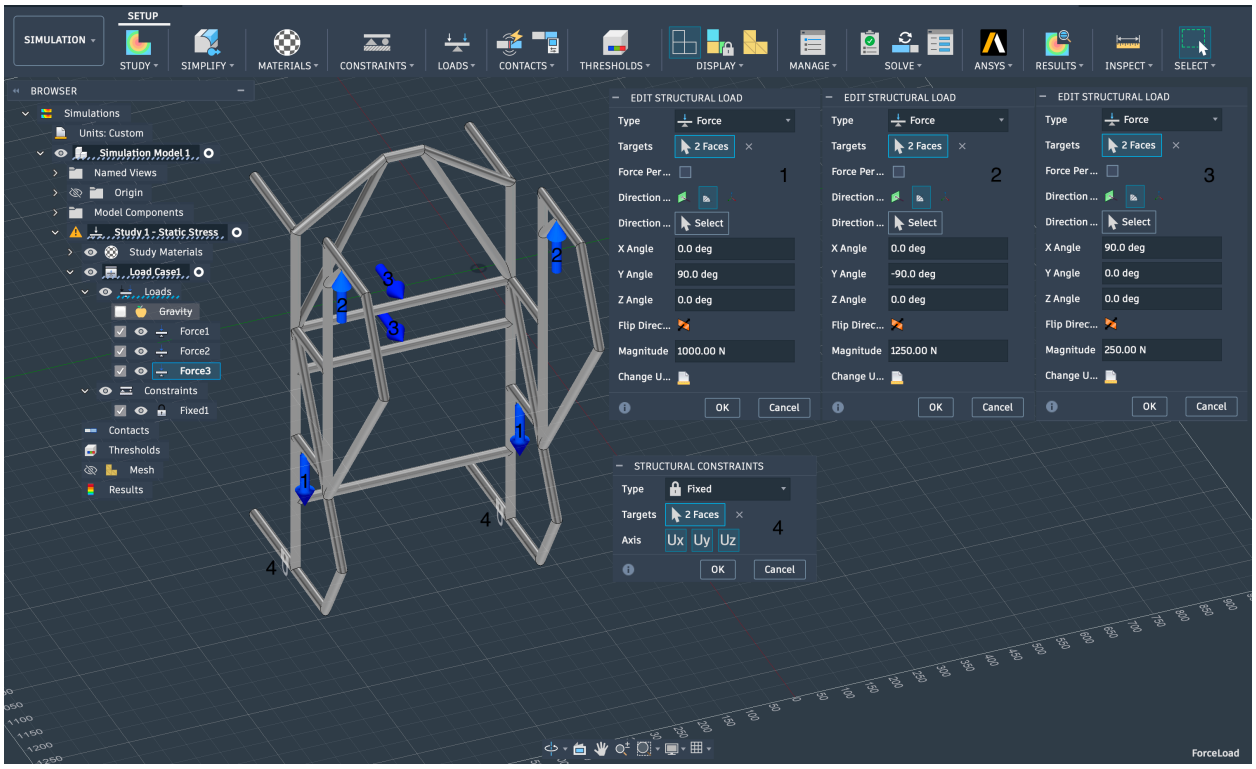
Συνοπτικά, διαπιστώνεται πως σε συγκεκριμένα σωληνωτά τμήματα του πλαισίου, υφίστανται αμελητέα παραμόρφωση. Δεδομένου ότι η αναπτυσσόμενη τάση δεν ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού η κατασκευή παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά, γεγονός που σημαίνει ότι μετά την άρση της επιβαλλόμενης φόρτισης επανέρχεται πλήρως στην αρχική του γεωμετρική κατάσταση.



Εικόνα 23 Απεικόνιση της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, του 1ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

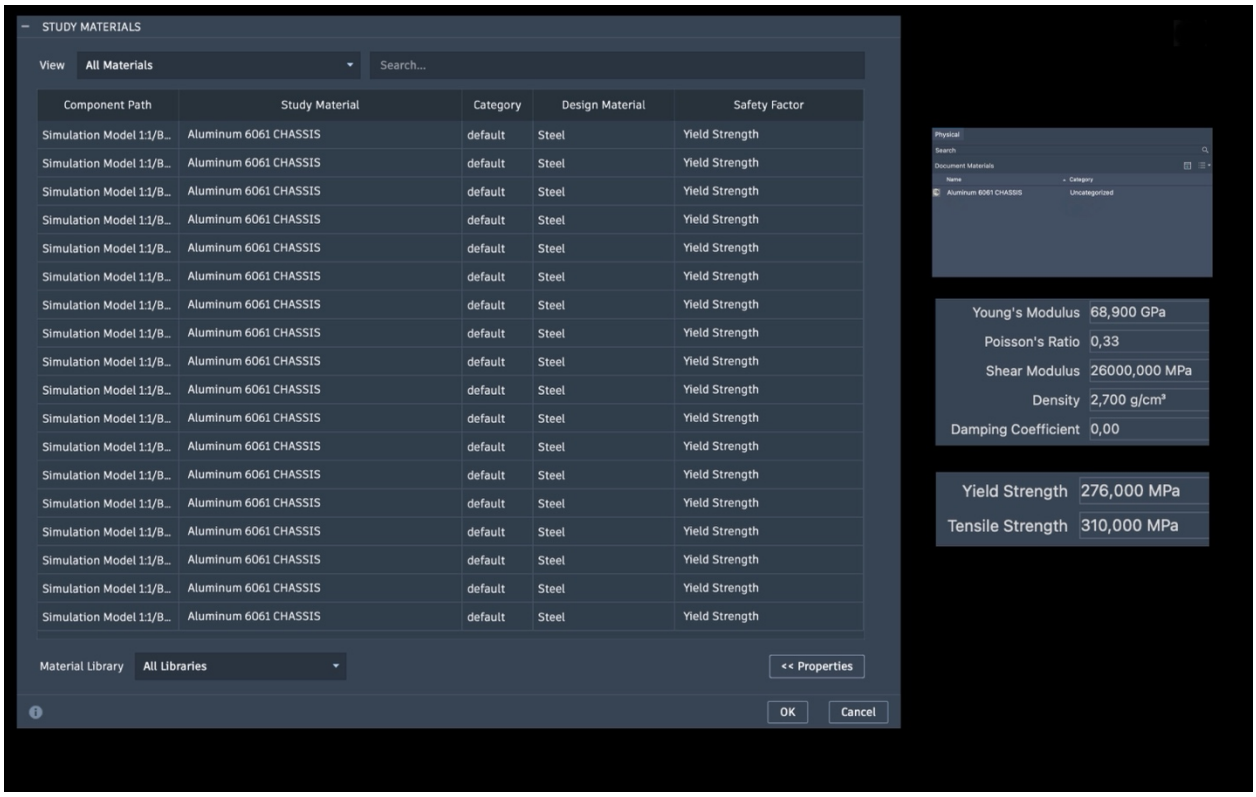
5.3.2. Παραμετροποίηση και αξιολόγηση 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης

Σε ένα άλλο παράδειγμα δικτυωτής και σωληνωτής κατασκευής που έχει δημιουργηθεί με την ίδια ακριβώς μεθοδολογία που αναλύθηκε προηγουμένως για το σασί, οι συνοριακές συνθήκες έχουν οριστεί με την επιβολή έξι δυνάμεων (κατανεμημένων σε δυάδες σε διαφορετικά σημεία) και τον ορισμό δύο σημείων πάκτωσης στο κάτω μέρος. Στόχος της πραγματοποίηση αυτή της συμπληρωματικής στατικής μελέτης, με στόχο την πληρέστερη κατανόηση της λειτουργία του λογισμικού Fusion 360 και της διαδικασίας αξιολόγησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 24 Απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης του πλαισίου, για την προσομοίωση του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη κατασκευή είναι το κράμα αλουμίνιο 6061 (Aluminum 6061), το οποίο έχει βασικά στοιχεία κράματος το μαγνήσιο (Mg) και το πυρίτιο (Si). Οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες συμπεριλαμβάνουν όριο διαρροής (Yield strength) ίσο με 276 MPa, το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) στα 68,900 GPa και πυκνότητα (density) της τάξεως 3.33 g/cm^3.



Εικόνα 25 Απεικόνιση της διαδικασίας επιλογής υλικού του πλαισίου.

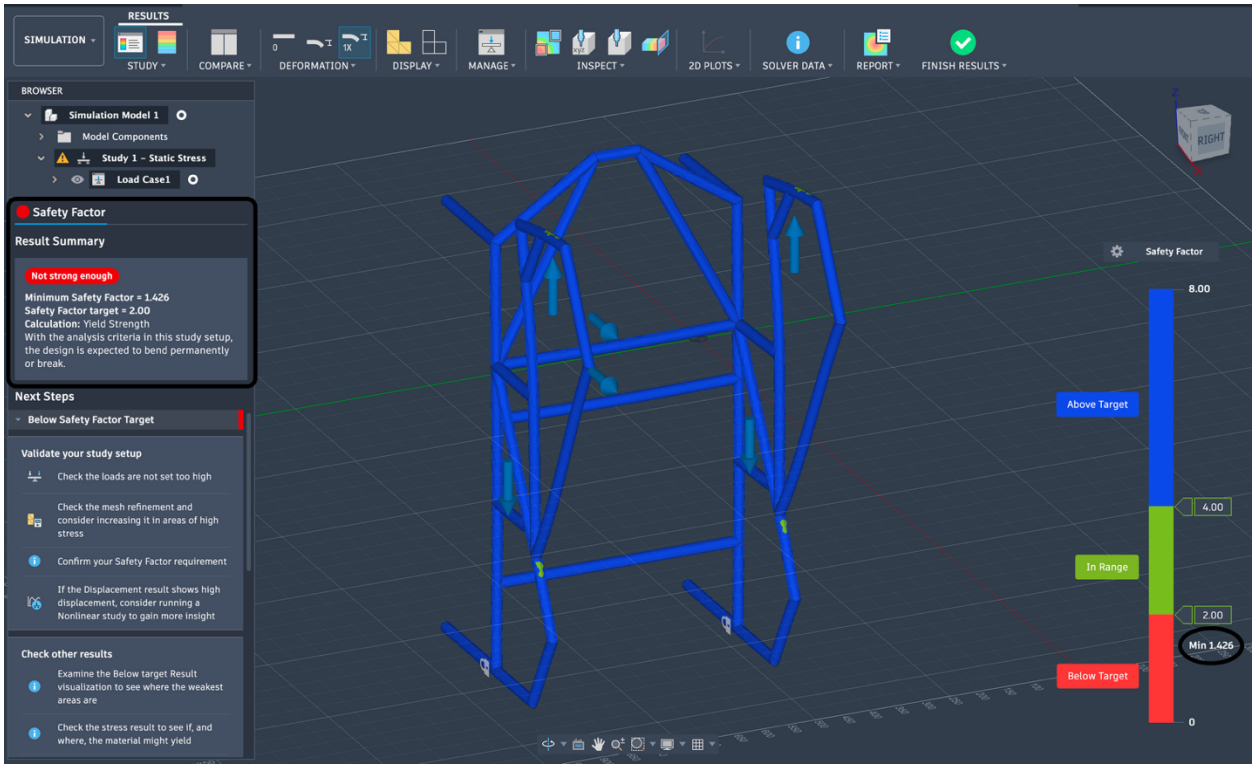
Αφού ολοκληρωθεί η επίλυσης της μελέτης, προκύπτει ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (Minimum Safety Factor) ανέρχεται σε 1,426. Το γεγονός ότι το λογισμικό χαρακτηρίζει το μοντέλο ως μη αρκετά ασφαλές, σύμφωνα με τα δικά του κριτήρια, δεν σημαίνει ότι η κατασκευή θα αστοχήσει ή θα δεχτεί μόνιμη παραμόρφωση. Η συγκεκριμένη ένδειξη οφείλεται στο ότι το λογισμικό θέτει αυτόματα ως στόχο, έναν συντελεστή ασφαλείας ίσο με 2 (δημιουργώντας την απαίτηση την αντοχή σε διπλάσια φορτία από τα επιβαλλόμενα).

Παρόλα αυτά, η θεμελιώδης αρχή της αντοχής υλικών αναφέρει πως αν ο συντελεστής ασφαλείας (SF) είναι μεγαλύτερος της μονάδα (SF > 1), τότε η κατασκευή μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια τα επιβαλλόμενα φορτία, παραμένοντας στην ελαστική περιοχή του υλικού. Αντίθετα αν ο συντελεστής είναι μικρότερος της μονάδας (SF < 1), οι ασκούμενες τάσεις ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού μεταβιβάζοντας την κατασκευή στην πλαστική περιοχή (δέχεται μόνιμη παραμόρφωση) ή ακόμα και στη οδήγηση σε πλήρη αστοχία (θραύση).

Επίσης γίνεται αντιληπτό μέσω της παρατήρησης της χρωματικής κλίμακας ότι η συντριπτική πλειονότητα των σωληνωτών τμημάτων του πλαισίου βρίσκονται στην μπλε ζώνη (μεταξύ, 4 < SF < 8). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι οι εν λόγω περιοχές ανταποκρίνονται

ικανοποιητικά υπό την επίδραση των ασκούμενων φορτίων και διαθέτουν εξαιρετικά υψηλά περιθώρια ασφαλείας. Ταυτόχρονα, εμφανίζονται και κάποια τμήματα τα οποία εντάσσονται στην πράσινη ζώνη (δηλαδή 2 < SF < 4), δείχνοντας πως τα συγκεκριμένα σημεία ικανοποιούν πλήρως τα προκαθορισμένα κριτήρια σχεδιασμού και κρίνονται απολύτως ασφαλή.

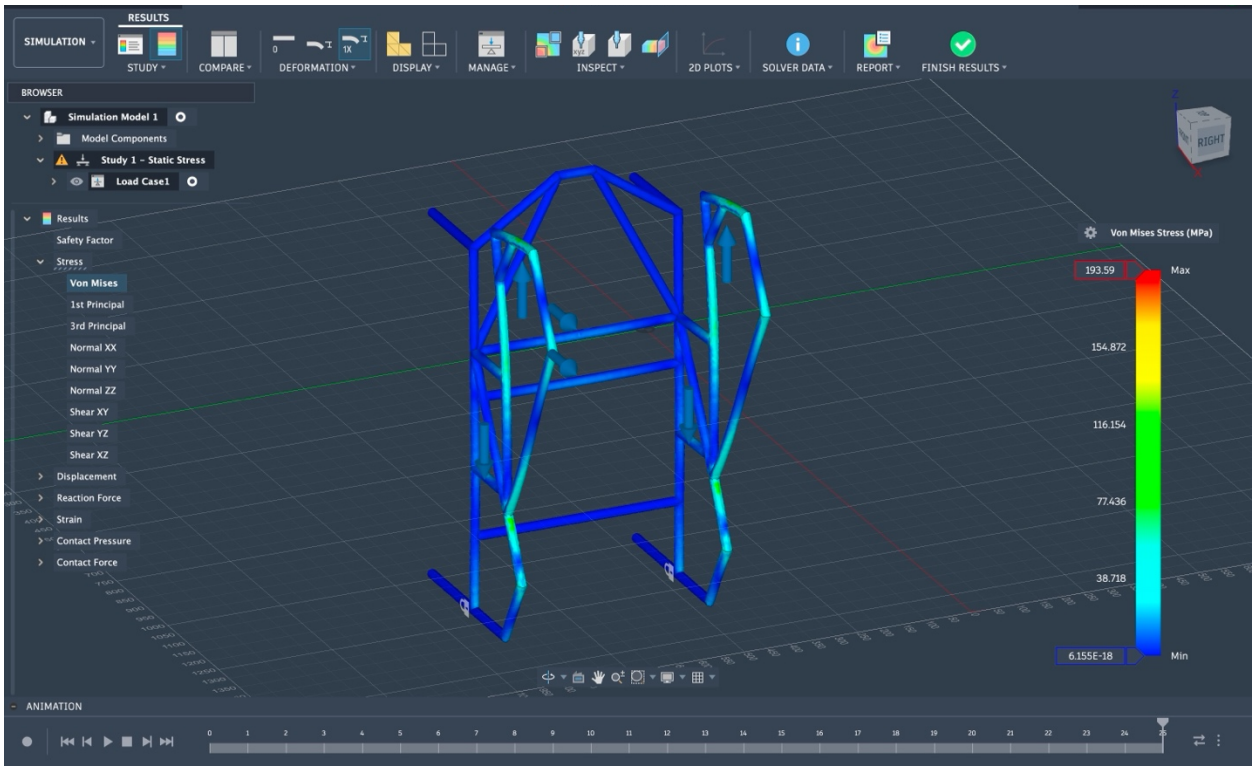
Τέλος, επισημαίνεται πως σε κάποιες περιοχές, κοντά στους κόμβους σύνδεσης, επικρατεί ο κόκκινος χρωματισμός συμπεριλαμβάνοντας και την μικρότερη τιμή του 1,426. Πρακτικά, η συγκεκριμένη τιμή δηλώνει πως σε αυτές τις περιοχές συγκροτείται η μεγαλύτερη τάση, μετατρέποντας τα στα πιο κρίσιμα σημεία του πλαισίου. Συνεπώς, σε κάποιο ενδεχόμενο ακραίας φόρτωσης, η αστοχία του υλικού θα ξεκινήσει από αυτά τα σημεία.



Εικόνα 26 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Μέσω της εξέτασης των αναπτυσσόμενων τάσεων (Stress), διαπιστώνεται ότι η μέγιστη ισοδύναμη τάση «Von Mises» ισούται με 193,59 MPa. Επειδή το όριο διαρροής (Yield Strength) του υλικού είναι 276 MPa, είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση, δείχνοντας πως η κατασκευή δεν θα αστοχήσει. Ως προς την καλύτερη κατανόηση, επειδή οι τάσεις που αναπτύσσονται υπολείπονται του ορίου διαρροής, το υλικό λειτουργεί αυστηρά εντός της ελαστικής περιοχής, αποκλείοντας το κάθε ενδεχόμενο εμφάνισης μόνιμων (πλαστικών) παραμορφώσεων. Με την εφαρμογή του αναλυτικού τύπου υπολογισμού του

συντελεστή ασφαλείας (SF), γίνεται επαλήθευση της τιμής που συνήγαγε το πρόγραμμα, δηλαδή: $SF = \frac{276}{193,59} = 1,4256$.



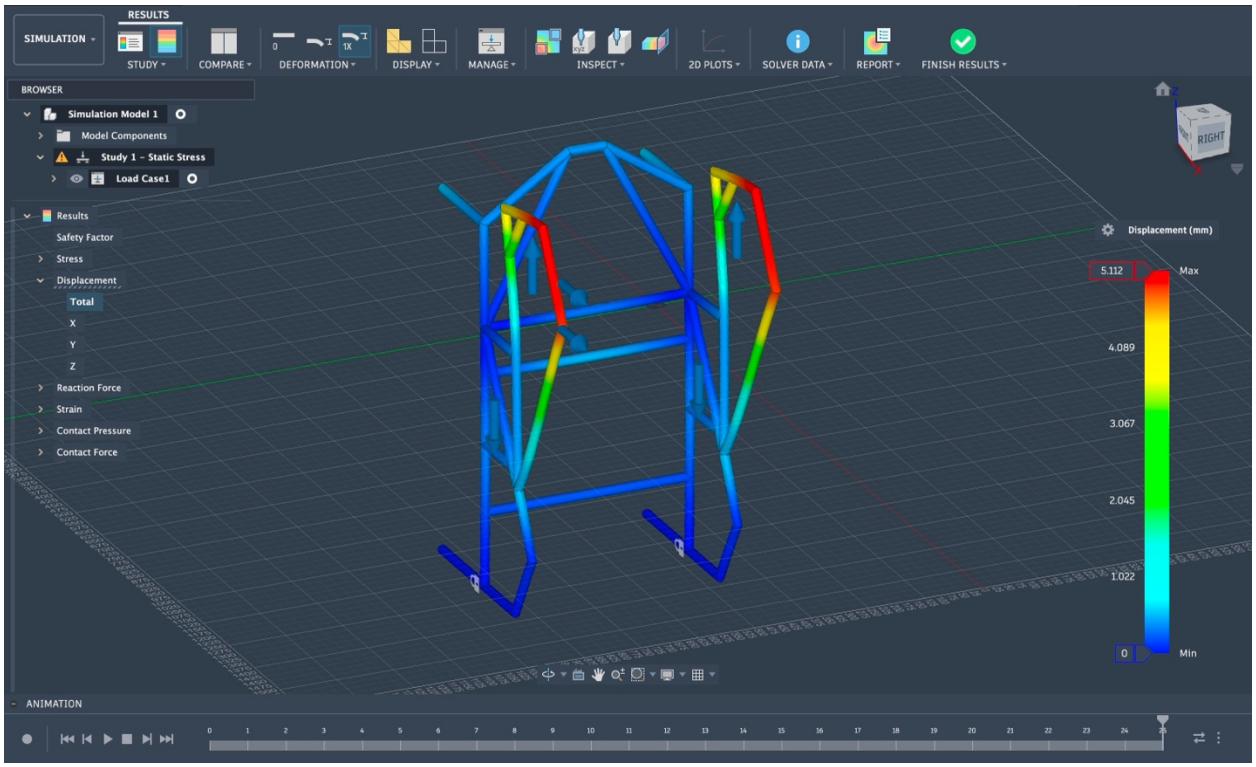
Εικόνα 27 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Στην συνεχεία με τον έλεγχο των αποτελεσμάτων στην καρτέλα της μετατόπισης (displacement), γίνεται γνωστό μέσω της χρωματική κλίμακα ότι η μέγιστη τιμή της μετατόπιση ισούται με 5,112 mm. Τα σημεία που έχουν δεχτεί τη μετατοπιστική παραμόρφωση αποτυπώνονται με τον κόκκινο χρωματισμό.

Ταυτίζονται με τα τμήματα στα όποια επιβάλλονται τα φορτία, γεγονός που επιβεβαιώνει την αναμενόμενη μηχανική συμπεριφορά. Αντίθετα, οι περιοχές που έχουν οριστεί οι πακτώσεις (αλλά και οι γύρω περιοχές), εντοπίζεται ελάχιστη μετατόπιση. Ουσιαστικά, η τιμή της μετατόπισης αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση των τμημάτων από τα σημεία σταθερής στήριξης του πλαισίου.

Πρακτικά, εξαιτίας του μεγάλου μήκους των σωλήνων τμημάτων, δημιουργούνται ροπές κάμψης, οι όποιες είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη καμπτικών παραμορφώσεων στο άνω μέρος της κατασκευής. Μια μέγιστη μετατόπιση της τάξεως των 5 mm αποτελεί ένα υπολογίσιμο μέγεθος το οποίο δεν μπορεί να αγνοηθεί (ανάλογα την κατασκευή).

Σε περίπτωση που το εξεταζόμενο μοντέλο υποστηρίζει εξάρτημα που προορίζεται να ενσωματωθεί σε ένα ευρύτερο μηχανικό σύνολο (στο οποίο είθισται να απαιτούνται αυστηρές κατασκευαστικές ανοχές), θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ο ανασχεδιασμός της τοπολογίας ή να λάβουν μέρος ουσιαστικές τοπολογικές επεμβάσεις για να μειωθεί η μετατόπιση.

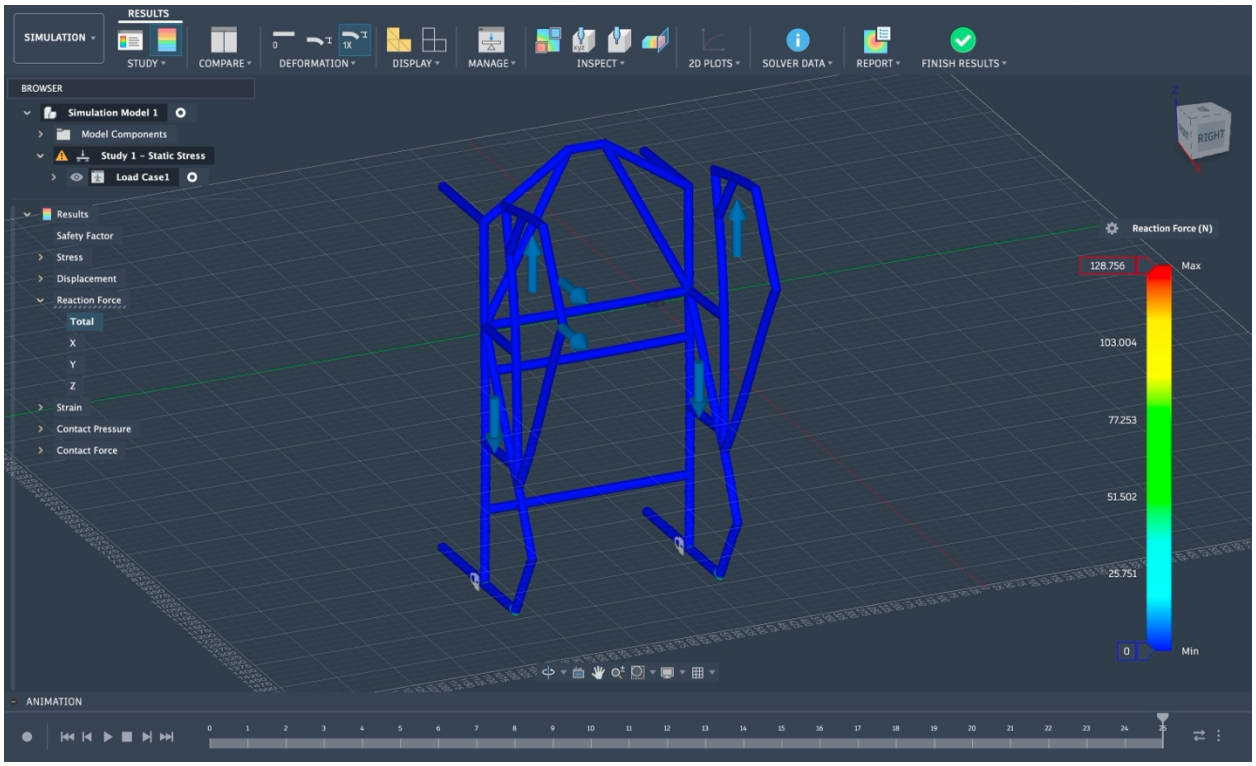


Εικόνα 28 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Αμέσως μετά ακολουθεί η εξέταση της καρτέλας που περιέχει τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τις δυνάμεις αντίδρασης (Reaction Forces), οι οποίες εμφανίζονται στα σημεία σταθερής στήριξης της κατασκευής κατά την διάρκεια της επίδρασης των επιβαλλόμενων φορτίων. Όπως έχει ήδη επισημανθεί και στο προηγούμενο παράδειγμα, για να διατηρήσει η κατασκευή τη στατική της ισορροπία και να παραμείνει ακίνητη κατά την άσκηση των εξωτερικών δυνάμεων, οφείλει να αναπτύξει αντίστοιχες δυνάμεις αντίδρασης.

Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι ολόκληρο το σασί επικαλύπτεται με μπλε χρωματισμό (δηλαδή υπάρχει μηδενική αντίδραση) και τα μόνα σημεία που φέρουν διαφορετικό χρωματισμό (δηλαδή εκεί εμφανίζονται δυνάμεις αντίδρασης) είναι οι κόμβοι πλησίον των πακτώσεων. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη αντίδρασης και για τους τρεις άξονες (X, Y, Z) είναι στα 128,756 N.

Με τα συγκεκριμένα δεδομένα, ο μηχανικός είναι σε θέση να αποφανθεί εάν απαιτείται στους κόμβους η τοποθέτηση στοιχείων ενίσχυσης ή όχι. Στην παρούσα περίπτωση η τιμή των 128,75 N συνιστά ένα μικρό μέγεθος δύναμης. Ως εκ τούτου η επίδραση της σε μια τέτοια μηχανική κατασκευή είναι αμελητέα, υποδηλώνοντας πως δεν είναι αναγκαία κάποια παραπάνω παρέμβαση.



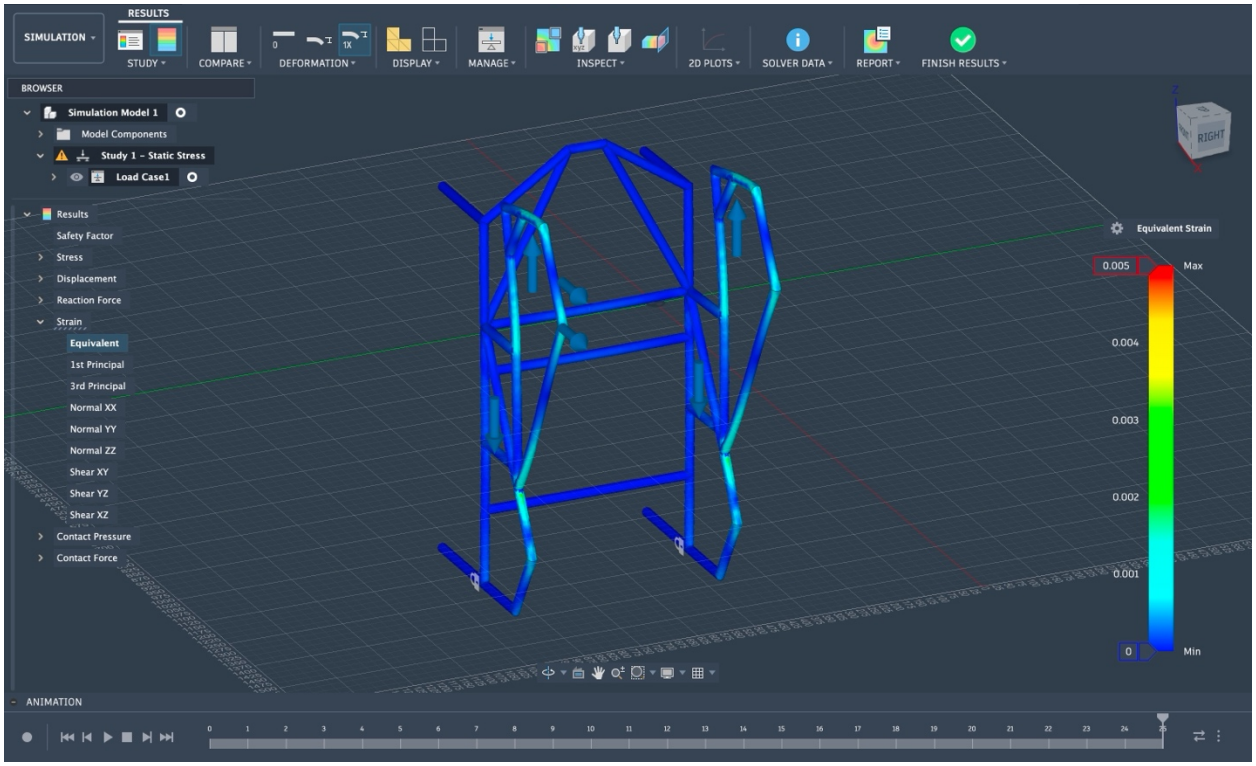
Εικόνα 29 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής δύναμης αντίδρασης του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

Στον έλεγχο της τελευταίας καρτέλας αποτελεσμάτων περιέχονται πληροφορίες σχετικά με την ειδική παραμόρφωση (Strain), όπου καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της εσωτερικής συμπεριφοράς του ίδιου του υλικού. Σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα, διαπιστώνεται ότι η μέγιστη τιμή ειδικής παραμόρφωσης ανέρχεται σε 0,005, που ισοδυναμεί με ποσοστό 0,5%. Το ποσοστό αυτό μπορεί να φαντάζει αμελητέο, όμως στη μηχανική των μεταλλικών κατασκευών θεωρείτε αρκετό για να προκύψει μόνιμη (πλαστική) παραμόρφωση, καθώς στην πλειοψηφία των δομικών κραμάτων η διαρροή του υλικού ξεκινάει σε παραμορφώσεις της τάξεως του 0,2%.

Τα σημεία που δέχονται τη μεγαλύτερη εφελκυστική ή θλιπτική δύναμη, είναι οι γωνίες που βρίσκονται σε κοντινή εμβέλεια τις περιοχές όπου επιβάλλονται τα φορτία. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου παραδείγματος, καθίσταται σαφές ότι η εξεταζόμενη κατασκευή εμφανίζει μια ανομοιόμορφη κατανομή καταπονήσεων. Σε κάποια σημεία

εμφανίζεται παραμόρφωση της τάξεως 0,5% για να απορροφήσουν την προερχομένη ενέργεια από τα εξωτερικά φορτία, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του πλαισίου μένει σε μια ακαταπόνητη κατάσταση (δηλαδή, μηδενική καταπόνηση).

Όλα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα πως σημεία που είναι «καταπονημένα» απαιτούν τοπική ενίσχυση με προσθήκη υλικού. Οι άλλες περιοχές που δεν εντοπίζεται καταπόνηση, προσφέρουν την ευκαιρία για αφαίρεση υλικού και την επίτευξη τοπικών τοπολογικών βελτιώσεων που θα οδηγήσουν στην μείωση του συνολικού βάρους και συνάμα μείωση κόστους κατασκευής.



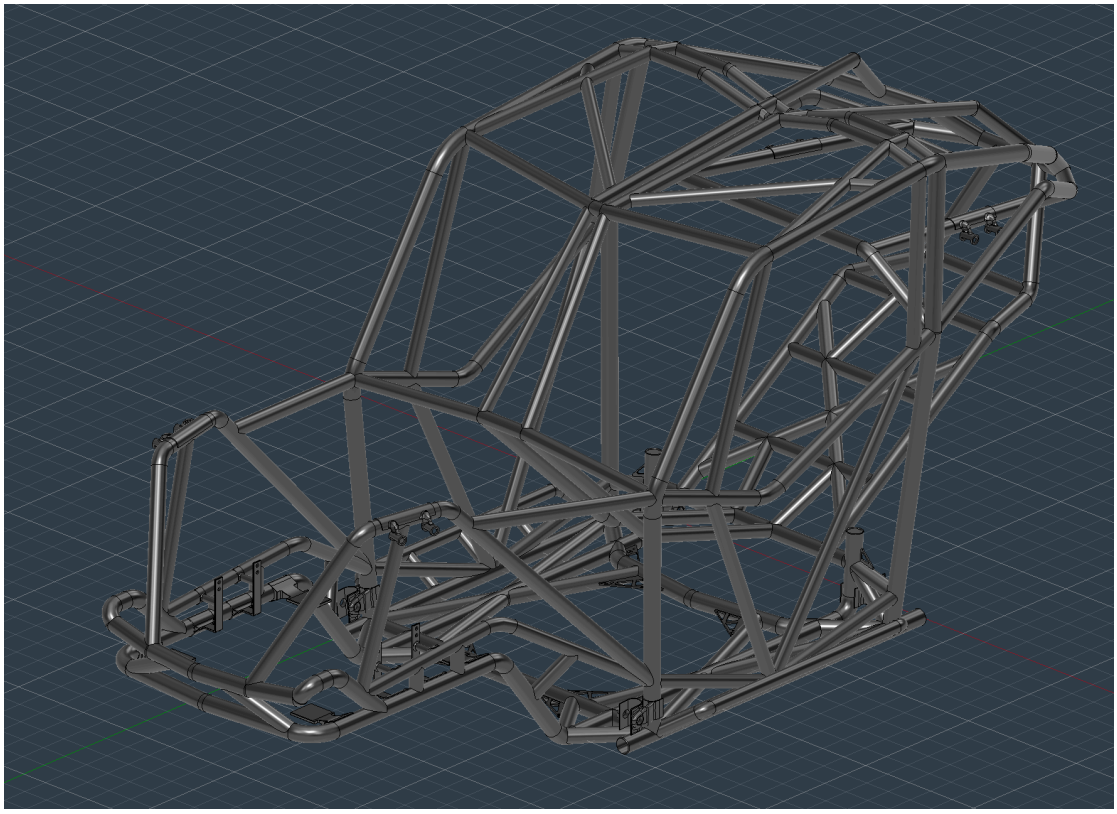
Εικόνα 30 Απεικόνιση της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, του 2ο σεναρίου στατικής ανάλυσης.

6. Παρουσίαση του χωροδικτυώματος του οχήματος Trophy Truck και των κύριων στατικών μελετών για την ανάλυση της ακαμψίας και αντοχής του.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται μια αναλυτική παρουσίαση του σωληνωτού πλαισίου (σασί) που σχεδιάστηκε για ένα εκτός δρόμου, μονοθέσιο όχημα τύπου «Trophy truck». Ταυτόχρονα θα αναδειχθούν οι υπολογιστικές αναλύσει πεπερασμένων στοιχείων (FEA) που διεξήχθησαν για την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής του πλαισίου και της δομικής του ακεραιότητας.

6.1. Διαστάσεις του δικτυωτού πλαισίου και διατομές των σωληνωτών τμημάτων που το αποτελούν.

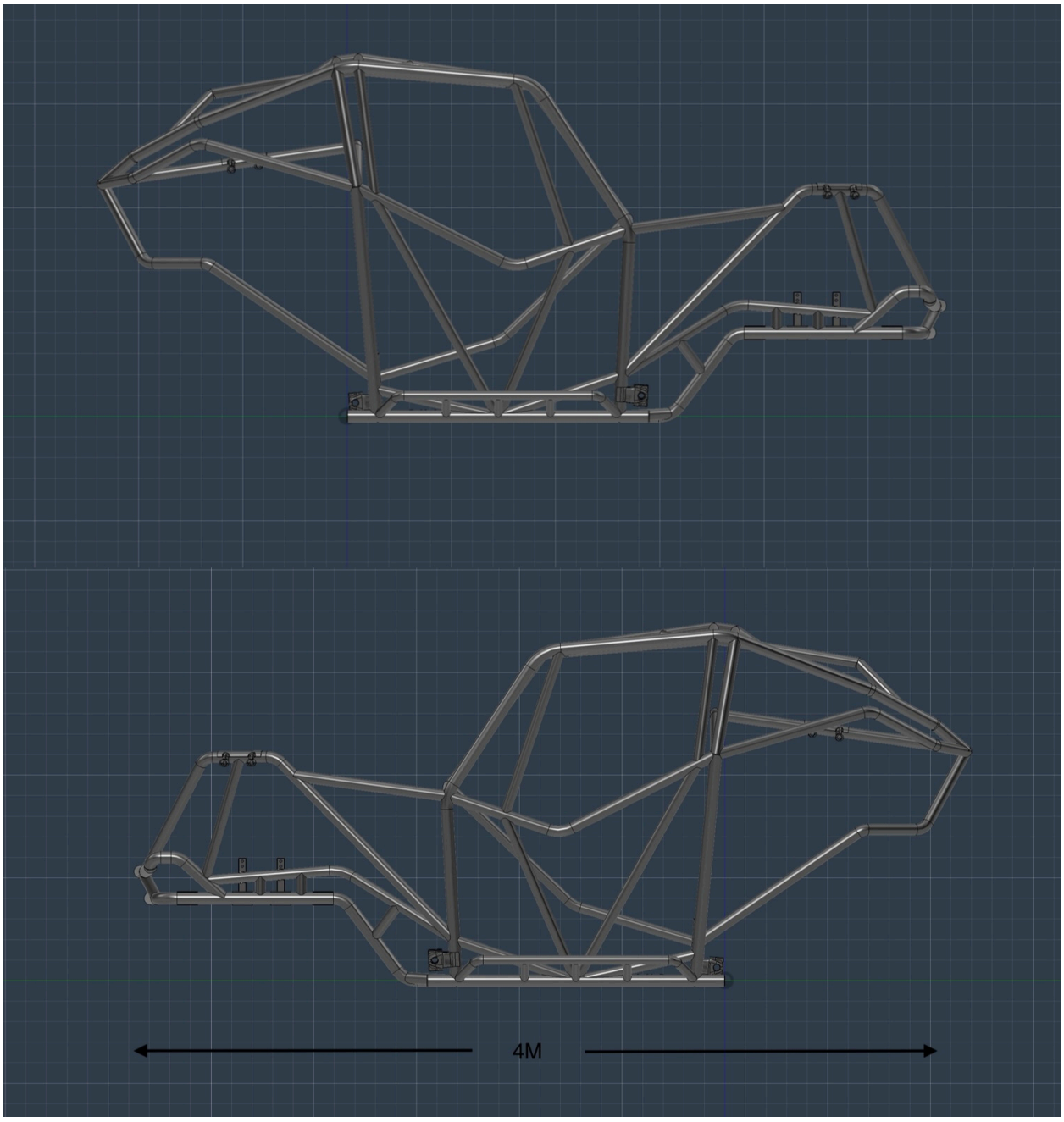
Η σχεδίαση του πραγματοποιήθηκε μέσω του περιβάλλοντος «Design» του προγράμματος (Fusion 360) κάνοντας χρήση των εντολών «Sketch» και «Pipe», και διαμορφώθηκε ως εξής:



Εικόνα 31 Απεικόνιση του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck".

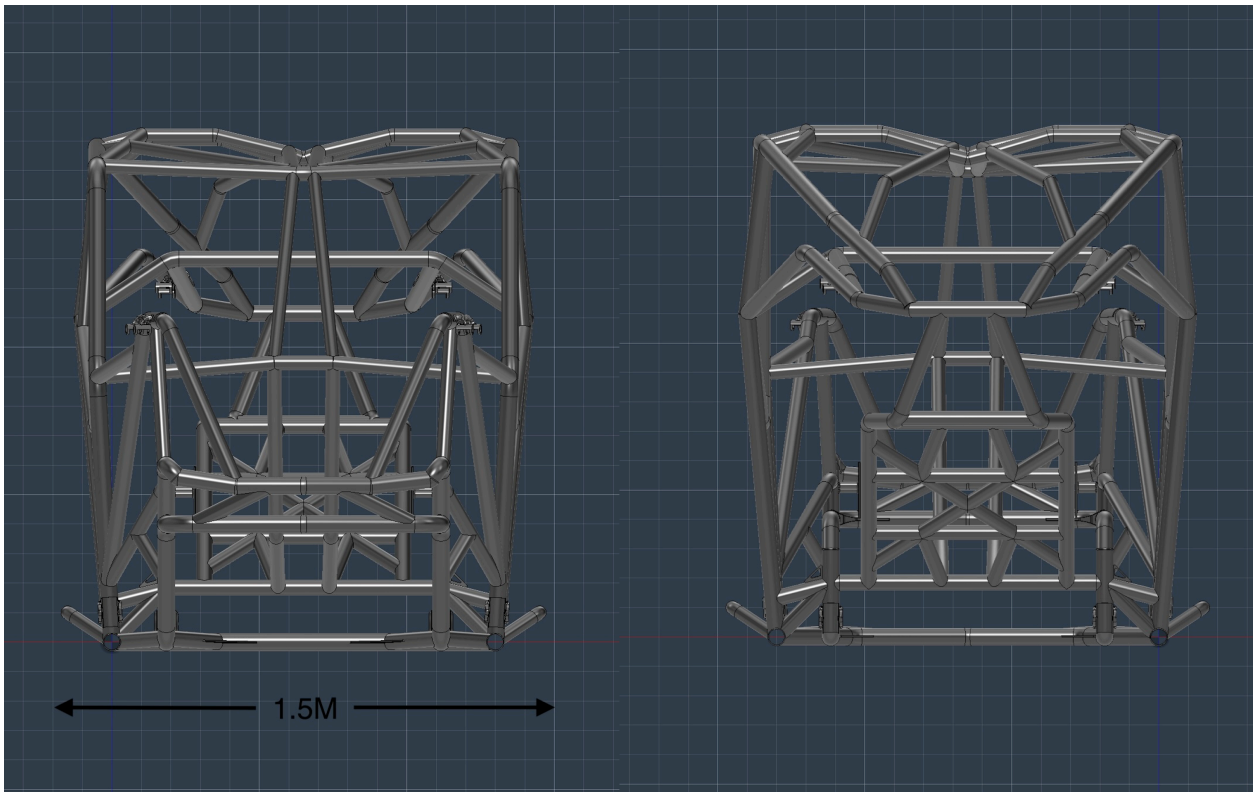
Τα σωληνωτά τμήματα του πλαισίου αποτελούνται από διαφορετικές εξωτερικές διαμέτρους και πάχη τοιχώματος, ανάλογα με την τοποθεσία και τον δομικό τους ρόλο στην κατασκευή. Συγκεκριμένα, στο κατώτερο επίπεδο εδράζεται η κύρια σωληνωτή βάση, η οποία αποτελείται από σωλήνα εξωτερικής διαμέτρου 60 mm και πάχους τοιχώματος 4mm. Η βάση πλαισιώνεται από δευτερεύοντες σωλήνες, όπου οι διαστάσεις (εξωτερική διάμετρο x πάχος τοιχώματος) τους αντίστοιχα είναι στα 55x3 mm, 50x3 mm, 45x3 mm.

Το εμπρόσθιο τμήμα, εκεί που εγκαθίσταται η βάση στήριξης του κινητήρα, συγκροτείται από σωλήνες διατομών 60x3 mm, 55x3 mm, 50x3 mm. Αντίστοιχα το οπίσθιο τμήμα αποτελείται από σωλήνες διατομών 55x3 mm, 50x3 mm και η άνω περιοχή του πλαισίου από σωλήνες διατομών 60x3 mm, 55x3 mm, 50x3 mm και 45x3 mm.



Εικόνα 32 Απεικόνιση πλάγιων όψεων του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck".

Το σωληνωτό πλαίσιο (σασί) του «Trophy Truck» μοντελοποιήθηκε με συνολικό μήκος 4 μέτρων και πλάτος 1,5 μέτρου. Το συνολικό βάρος ανέρχεται στα 347,832 kg και οι διαστάσεις αυτές το κατατάσσουν στην κατηγορία οχημάτων εκτός δρόμου (“off-road”), με δυνατότητα ταχείας κίνησης σε στενές και ταυτόχρονα δύσβατες διαδρομές.



Εικόνα 33 Απεικόνιση εμπρόσθιας και οπίσθιας όψης του δικτυωτού πλαισίου, του μονοθέσιου οχήματος τύπου "Trophy Truck".

Ο κύριος μηχανολογικός στόχος για την κατασκευή του εν λόγω οχήματος ήταν η δημιουργία ενός στιβαρού και εξαιρετικά άκαμπτου συνόλου, ικανού να ανταποκριθεί υπό οποιεσδήποτε συνθήκες φόρτισης. Για αυτό τον λόγο, προτιμήθηκε η ανάπτυξη ενός δικτυωτού πλαισίου σωληνωτών τμημάτων με πυκνή χωρική διάταξη. Θεωρήθηκε, πως η γεωμετρία αυτή προσφέρει μεγάλη καμπτική και στρεπτική ακαμψία, εξασφαλίζοντας έναν δραστικό περιορισμό σε οποιασδήποτε ανεπιθύμητη παραμόρφωση.

6.2. Η επιλογή και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού: Χάλυβας AISI 4130 chromoly 259 QT

Για την κατασκευή του σωληνωτού χωροδικτυώματος του οχήματος «trophy Truck» επιλέχθηκε ο χρωμιομολυβδαινιούχος χάλυβας (Chromoly Steel) ποιότητας AISI 4130. Προέρχεται από μια κατηγορία κράματος η οποία αποτελεί την πιο χαρακτηριστική επιλογή υλικού για την πλειονότητα των αγωνιστικών οχημάτων εκτός δρόμου (off road) σε παγκόσμια κλίμακα.

Η σύνθεση του σε χρώμιο (Cr) και μολυβδαίνιο (Mo), προσφέρει υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, επιτρέποντας στους μηχανολόγους την δυνατότητα κατασκευής σωληνωτών διατομών με μικρότερο πάχος τοιχώματος, επιτυγχάνοντας μείωση της συνολικής μάζας της τελική κατασκευή, δίχως να προκαλούνται αλλαγές ως προς την δομική ακεραιότητα.

Επιπλέον θα πρέπει να επισημανθεί, πως ο συγκεκριμένος χάλυβας έχει δεχθεί θερμική κατεργασία, η οποία τον κατατάσσει στην κατάσταση «Quenched & Tempered» (QT), (Βαφή και Επαναφορά). Πρακτικά, είναι μια θερμική διαδικασία σκλήρυνσης του υλικού με βαφή και επακόλουθης επαναφοράς, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος.

Η συγκεκριμένη επεξεργασία, επιτυγχάνει αύξηση του διαρροής (Yield Strength) αλλά και στην αντοχή του εφελκυσμού (Tensile strength), συγκριτικά με έναν αντίστοιχο χάλυβα AISI 4130 που δεν έχει υποστεί θερμική επεξεργασία.

Στην συνέχεια παρατίθεται πίνακας, με τις μηχανικές ιδιότητες του απλού χάλυβα κράματος AISI 4130 σε μη κατεργασμένη κατάσταση και του αντίστοιχου χάλυβα έπειτα από θερμική κατεργασία (Quenched and Tempered). Ο χάλυβας της δεύτερης στήλης (θερμικά κατεργασμένη κατάσταση), αποτελεί την τελική επιλογή για την κατασκευή του σωληνωτού σασί.

Μηχανικές ιδιότητες	Χάλυβας AISI 4130	Χάλυβας AISI 4130 259 QT
	Ο χάλυβας χωρίς θερμική διεργασία	Ο χάλυβας με θερμική διεργασία
Πυκνότητα (g/cm^3)	7.85	7.85
Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	~205	207
Λόγος Poisson	0.29 - 0.33	0.33
Όριο διαρροής (Mpa)	435 - 460	900
Όριο θραύσης (Mpa)	670 - 690	1050

Πίνακας 1 Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα AISI 4130 και του αντίστοιχου με θερμική διεργασία 259 QT

Για τις περιπτώσεις των περισσότερων στατικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων που εκτελούνται στο περιβάλλον εργασίας «SIMULATION» του λογισμικού «Fusion 360», η πλέον κρίσιμη παράμετρος αξιολόγησης είναι το ορίου διαρροής (Yield Strength) του υλικού, το οποίο είναι ίσο με 900 MPa. Ουσιαστικά πραγματοποιείται απευθείας σύγκριση των αναπτυσσόμενων ισοδύναμων τάσεων «Von Mises» της εκάστοτε ανάλυσης, με το αναφερόμενο όριο.

Κύριος στόχος σε κάθε σενάριο υψηλών φορτίσεων της κατασκευής, είναι ο υπολογιζόμενος συντελεστής ασφαλείας (Safety factor) να είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας ($SF > 1$). Το δεδομένο αυτό εξασφαλίζει πως δεν θα αναπτυχθούν τάσεις σε κανένα τμήμα του πλαισίου

που να υπερβαίνουν τα 900 MPa, εμποδίζοντας το ενδεχόμενο για οποιαδήποτε αστοχία του υλικού.

Εκτός της υψηλής μηχανικής του αντοχής, ο χάλυβας AISI 4130 διακρίνεται από εξαιρετικές ιδιότητες ως προς τη συγκολλησιμότητα του, μέσω της μεθόδου συγκόλλησης TIG (Tungsten Inert Gas). Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα του συγκεκριμένου κράματος για τη χρήση του στην κατασκευή σύνθετων σωληνωτών χωροδικτυωμάτων, όπως είναι το πλαίσιο του οχήματος “Trophy Truck”.

6.3. Οι στατικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τον έλεγχο της αντοχής του δικτυωτού πλαισίου

Τα σωληνωτά πλαίσια των οχημάτων τύπου «Trophy Truck» (και γενικά όλων των οχημάτων), υπόκεινται σε πολλαπλά και πολυαξονικά φορτία, σε όλη τη διάρκεια της κίνησης του. Στην εξέταση του σωληνωτού σασί, καλείται να ανταπεξέλθει σε σύνθετες και ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες φόρτισης. Πρακτικά προσομοιώνονται ακραία σενάρια φόρτισης, τα οποία απαρτίζονται από πιθανές μετωπικές συγκρούσεις ή ανατροπές, δυναμικές καταπονήσεις από προσγειώσεις αλμάτων, αλλά και υψηλά διαμήκη φορτία λόγω απότομων επιταχύνσεων.

Για τη διασφάλιση της σωματικής ακεραιότητας του χειριστή αλλά και της δομικής ακεραιότητας του πλαισίου (σασί), πραγματοποιήθηκε σειρά κρίσιμων υπολογιστικών στατικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Αξίζει να σημειωθεί πως διεξήχθησαν και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις ακραίων σεναρίων φόρτισης, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της κατασκευής για κάθε επιμέρους συνθήκη ξεχωριστά.

Τα βασικά ακραία σενάρια καταπόνησης του πλαισίου (Load Cases), τα οποία η προσομοιώσει τους μέσω στατικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, συνοψίζονται στα εξής:

1. Στρεπτική ακαμψία (Torsional Stiffness): Πραγματοποιείται έλεγχος για την ικανότητα του πλαισίου να ανταπεξέρχεται σε στρεπτικά φορτία κατά μήκος των τμημάτων του. Τέτοιου είδους καταπονήσεις προέρχονται από τις διαδοχικές ανωμαλίες και εδαφικές κλίσεις και η αντιμετώπιση της είναι σημαντική ως προς τη εξασφάλιση της άρτιας λειτουργίας των αναρτήσεων.
2. Κάμψη με κάθετο προσανατολισμό (vertical bending): Σε αυτήν την ανάλυση προσομοιώνονται οι στατικές κατακόρυφες δυνάμεις που δέχεται το δικτυωτό πλαίσιο εξαιτίας του βάρους των αναρτημένων μαζών και εξαρτημάτων (όπως ο κινητήρας, το ρεζερβουάρ καυσίμου, το ψυγείο, η ρεζέρβα και τον οδηγό). Κύριος στόχος είναι να επιβεβαιωθεί ότι το πλαίσιο διαθέτει την απαραίτητη καμπτική

ακαμψία ώστε να φέρει με ασφάλεια αυτά τα στατικά φορτία, χωρίς να αναπτύσσονται υπερβολικές παραμορφώσεις ή τάσεις που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργικότητα των εξαρτημάτων ή τη δομική του ακεραιότητα.

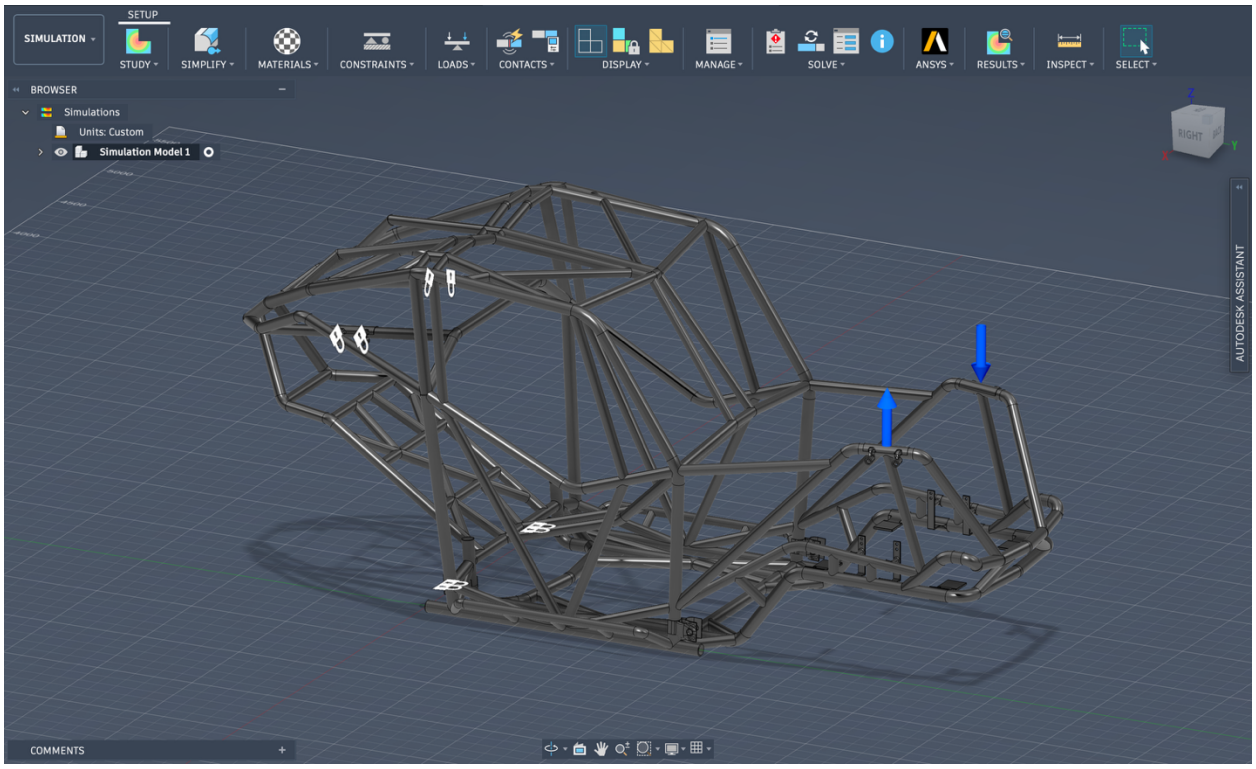
3. Μετωπική σύγκρουση (Frontal Impact): Πραγματοποιείται προσομοίωση πρόσκρουσης του οχήματος με ένα σταθερό εμπόδιο, ανερχόμενο με υψηλή ταχύτητα. Ο στόχος είναι να διασφαλιστεί πως δεν θα υποστεί το τμήμα της καμπίνας παραμόρφωση, η οποία θα έθετε σε κίνδυνο την ζωή του οδηγού.
4. Ανατροπή και χτύπημα οροφής (Rollover & Roof Crush): Σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται η αντοχή του άνω τμήματος (οροφής) του πλαισίου. Πραγματοποιείται σενάριο στο οποίο το όχημα δέχεται φόρτιση κατά τη διάρκεια ανατροπής του λόγω απώλειας ελέγχου.
5. Πλευρική κάμψη (Lateral Bending): Εξελίσσεται ανάλυση του οχήματος στην οποία εξετάζεται η δομική του ακαμψία στο οριζόντιο επίπεδο. Εφαρμόζεται έλεγχος προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το πλαίσιο έχει την απαιτούμενη πλευρική ακαμψία, ώστε να διατηρεί σταθερή την τροχιά του, αποκλείοντας ασταθείς και ανεπιθύμητες συμπεριφορά.

6.3.1. Στατική ανάλυση στρεπτικής ακαμψίας (Torsional stiffness)

Μια από τις πιο σημαντικές μελέτες που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο σωληνωτό χωροδικτύωμα (σασί), είναι αυτή της στρεπτικής ακαμψίας. Ουσιαστικά, μέσω της συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζεται η αντίσταση που προβάλλει το πλαίσιο κατά των τάσεων της στρέψης, λόγω των αντίθετων φορτίων που εμφανίζονται στους τροχούς του οχήματος.

Αν η στρεπτική ακαμψία του πλαισίου είναι ανεπαρκής, η κατασκευή καθίσταται επιρρεπής σε ανεξέλεγκτες παραμορφώσεις. Έτσι πρωταρχικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ακαμψίας του πλαισίου, ώστε τα δυναμικά φορτία και η ενέργεια που προκύπτει από τις εδαφικές ανωμαλίες να απορροφώντας αποκλειστικό από το σύστημα των αναρτήσεων.

Ο σωστός ορισμός των συνοριακών συνθηκών για την προσομοίωση αυτής της μελέτης λαμβάνει χώρα με την επιβολή των πακτώσεων στα σημεία στήριξης των αναρτήσεων, στο οπίσθιο τμήμα του πλαισίου. Ταυτόχρονα, ένα ζεύγος δυνάμεων ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς δυνάμεων εφαρμόζονται σε δυο ακραίους κόμβους στο εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος. Αντιστοίχως, τα μεγέθη και των δυο δυνάμεων είναι 1000 N και τα σημεία εφαρμογής τους απέχουν 900 mm.



Εικόνα 34 Απεικόνιση της προσομοίωσης της στρεπτικής ακαμψίας ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου.

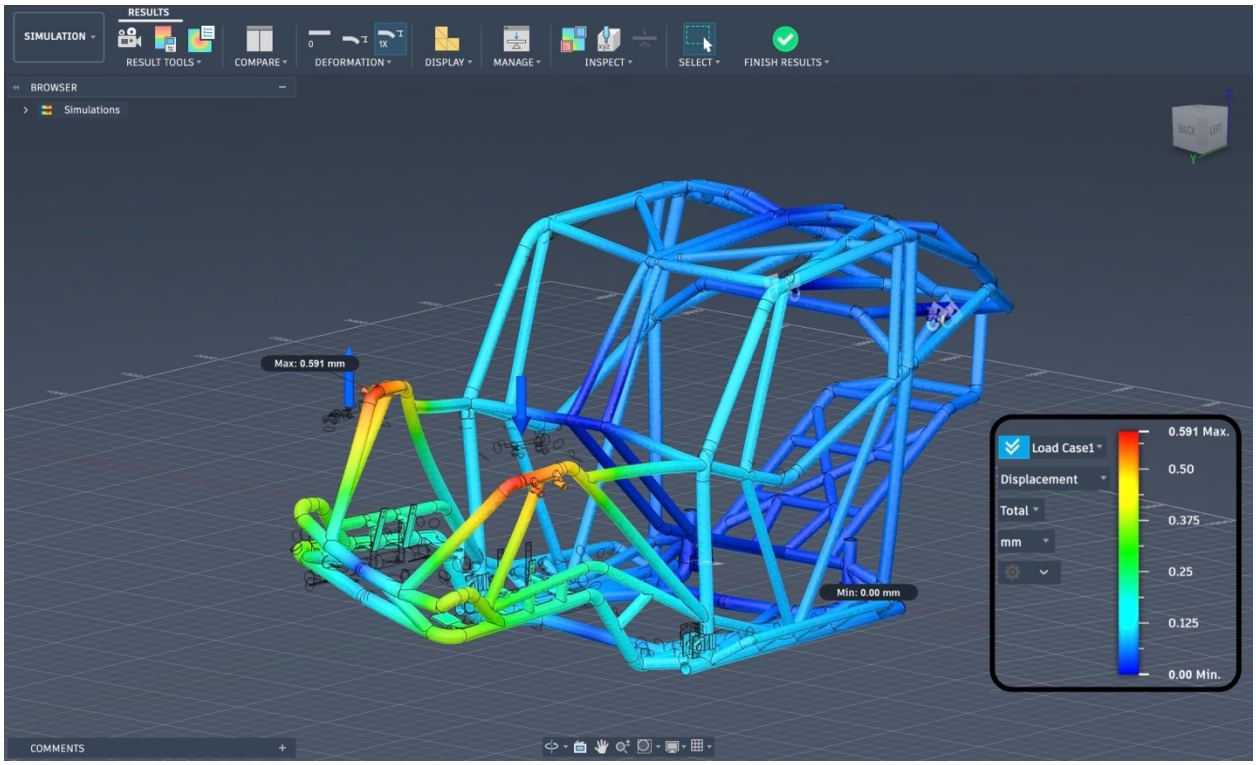
Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, το κρίσιμο μέγεθος που εξάγεται για τον υπολογισμό της στρεπτικής ακαμψίας (K_t) είναι η μέγιστη μετατόπιση των σωληνωτών τμημάτων από την αρχική τους κατάσταση. Η στρεπτική ακαμψία, εκφράζεται μαθηματικά από τον ακόλουθο τύπο:

$$K_t = \frac{F \cdot W}{arctan\left(\frac{d_1 + d_2}{W}\right)}$$

Όπου το $T = F \cdot W$ να η επιβαλλόμενη ροπή στρέψης (F είναι το μέγεθος των αντίρροπων δυνάμεων και το W η μεταξύ τους απόσταση). Το $\Theta = arctan\left(\frac{2 \cdot d}{W}\right)$ είναι η υπολογιζόμενη γωνία στρέψης. Θα πρέπει να τονιστεί, πως το $d_1 + d_2$ δηλώνουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων που ασκούνται τα φορτία, όμως στην παρούσα περίπτωση λόγω συμμετρίας του συστήματος, ισχύει $d_1 = d_2 = d$, με το άθροισμα να απλοποιείται σε $2 \cdot d$.

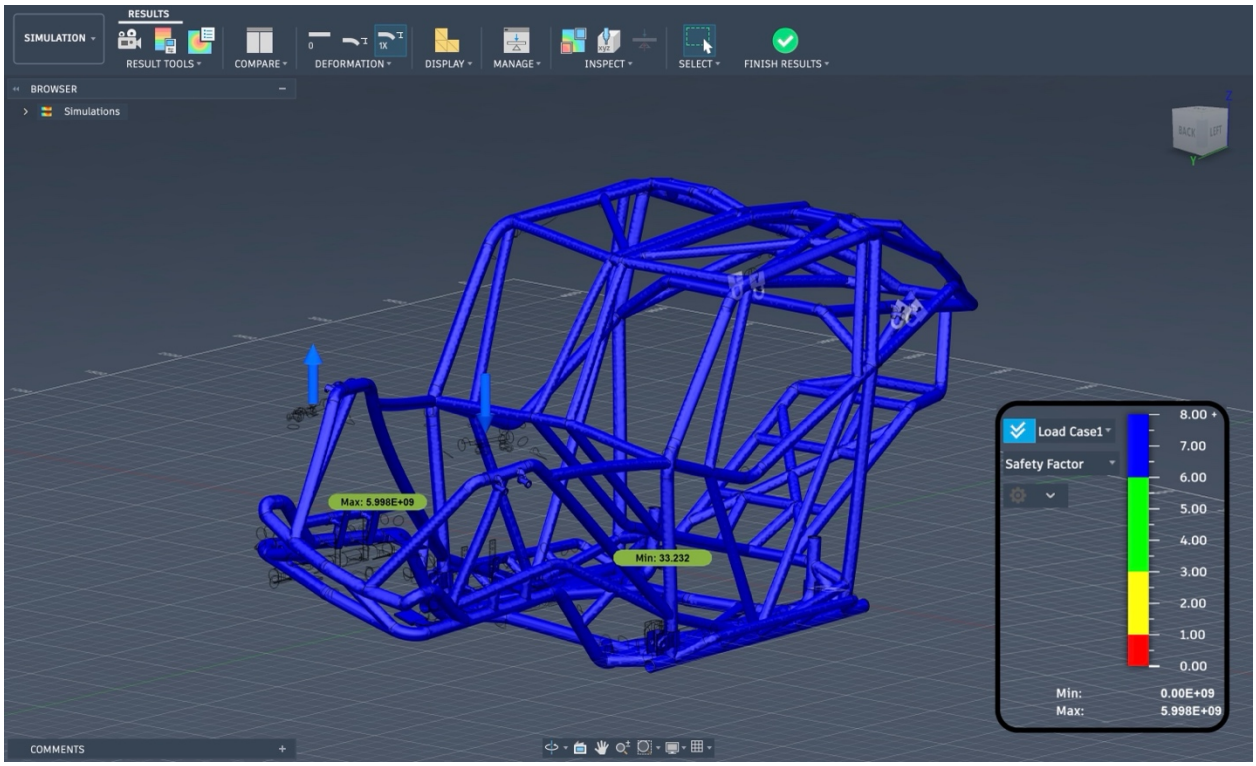
Όπως απεικονίζεται και στην επόμενη εικόνα, η μέγιστη μετατόπιση και στα δυο σημεία επιβολής φορτίων ανέρχεται στα 0,591mm. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν αναφερθεί, η στρεπτική ακαμψία σωληνωτού δικτυώματος υπολογίζεται στα $K_t = 12000\ Nm/deg$, μέγεθος το οποίο συμβάλει με ένα εξαιρετικό αποτέλεσμα.

Στα συμβατικά οχήματα εκτός δρόμου (buggies) η στρεπτική ακαμψία είναι συνήθως στα $3000 - 5000\ Nm/deg$ και τιμές των $10000\ Nm/deg$ και άνω, εντοπίζονται σε περιπτώσεις αγωνιστικών και οχημάτων υψηλών αποδόσεων. Αυτό το αποτέλεσμα, αποδεικνύει πως οι διαστάσεις (4 x 1,5 m) και σε συνδυασμό με την επιλογή πυκνού σωληνωτού πλαισίου, αποτελούν έναν ιδανικό σχεδιαστικό προσανατολισμό για τη δημιουργία ενός άκαμπτου οχήματος.



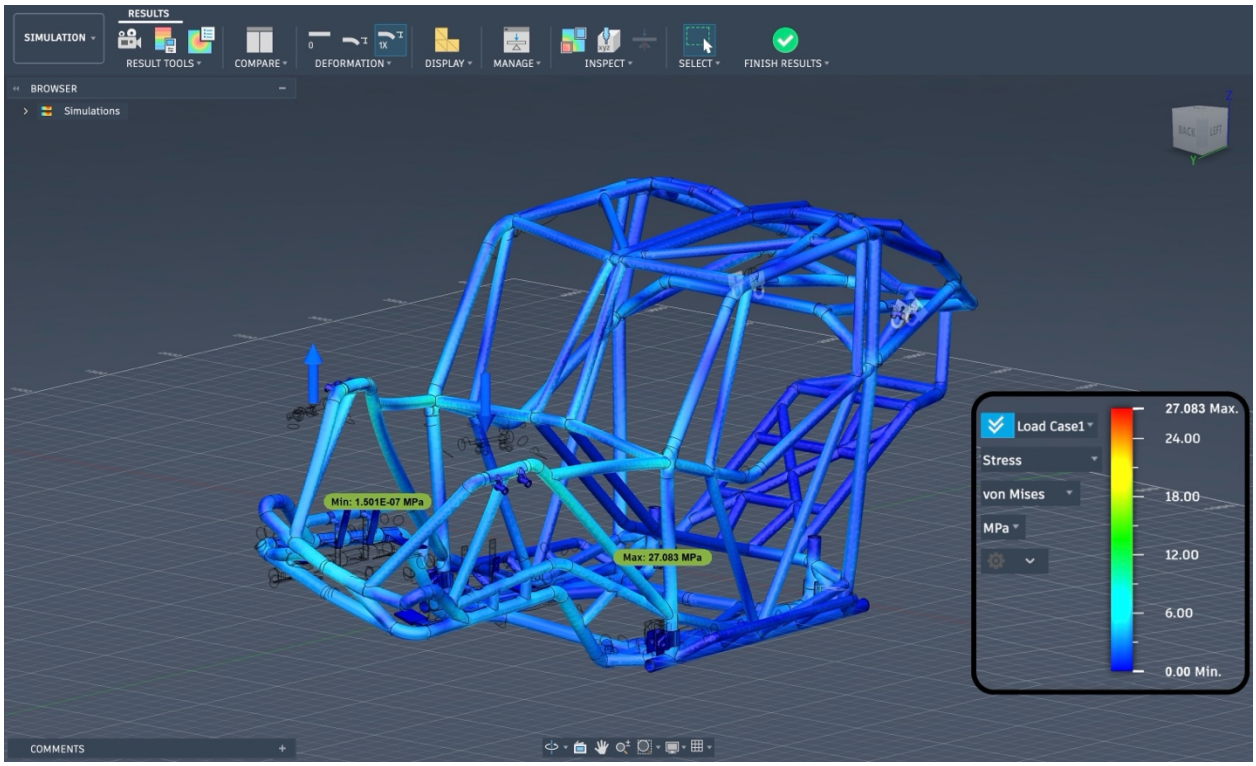
Εικόνα 35 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας.

Παρόλο που τα επόμενα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης δεν σχετίζονται με τη μαθηματική ερμηνεία της στρεπτικής ακαμψίας, ακολουθεί η αξιολόγηση τους για λόγους πληρότητας της μελέτης. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας (Safety Factor), υπολογίστηκε σε $SF = 33{,}232$. Το γεγονός, της εξαγωγής μιας τόσο υψηλής τιμής, είναι απόλυτα λογική και δικαιολογείται πλήρως. Ο πρώτος λόγος είναι η επιλογή του κράματος χάλυβα AISI 4130 259 (QT) η οποία διαθέτει υψηλό όριο διαρροής (900MPa) και ο δεύτερος, στην επιβολή δυνάμεων της τάξεως των 1000 N. Τα συγκεκριμένα μεγέθη είναι αυθαίρετα φορτία δοκιμής καθώς, ο μοναδικός σκοπός της εφαρμογής τους είναι η επίτευξη ελαστικής παραμόρφωσης, για τον θεωρητικό υπολογισμό της στρεπτικής ακαμψίας του πλαισίου.



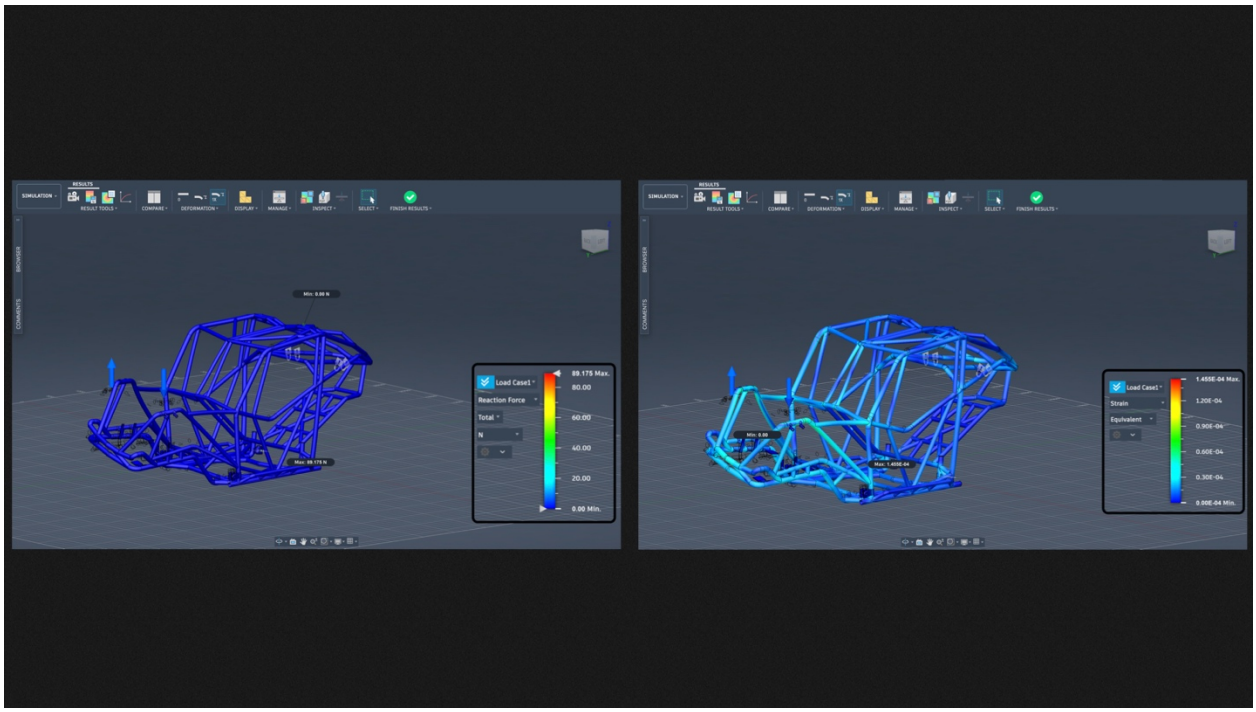
Εικόνα 36 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστής ασφαλείας του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας.

Επιπλέον, η μέγιστη ισοδύναμη τάση «Von Mises» που αναπτύσσεται πάνω στο σωληνωτό δικτύωμα ανέρχεται σε 27,08 MPa. Όπως είναι φανερό, το εν λόγω μέγεθος υπολείπεται κατά πολύ του συμβατικού ορίου διαρροής του υλικού ($\sigma_{VM} = 27{,}08\,MPa \ll \sigma_y = 900\,MPa$). Το γεγονός αυτό σημαίνει η οποιαδήποτε ελαστική παραμόρφωση που δημιουργείται θεωρείτε πρακτικά αμελητέα. Παράλληλα, με την χρωματική κλίμακα των τάσεων επί του μοντέλου, γίνεται αντιληπτό πως υπάρχει μια ομαλή κατανομή των φορτιών συνολικά στην κατασκευή χωρίς να διαπιστώνονται επικίνδυνες συγκεντρώσεις τάσεων στους κόμβους του πλαισίου, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα των σημείων συγκόλλησης των σωλήνων.



Εικόνα 37 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως οι δυνάμεις αντίδρασης ($RF = 89{,}175\ N$) που αναπτύσσονται στα πακτωμένα σημεία αλλά και η ισοδύναμη παραμόρφωση ($ES = 1{,}455 \times 10^{-4}$), διατηρούνται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται η γραμμική και η ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς η επιβαλλόμενη ροπή στρέψης κατανέμεται ομοιόμορφα, λόγω της άκαμπτης συμπεριφοράς του μοντέλου.



Εικόνα 38 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας.

6.3.2. Στατική ανάλυση κάθετης κάμψης (Vertical bending)

Η επόμενη στατική μελέτη πεπερασμένων στοιχείων, αυτή της κατακόρυφης κάμψης (Vertical Bending), είναι εξίσου σημαντική. Η εφαρμογή της στο μοντέλο του πλαισίου ελέγχει την ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει με ασφάλεια τα κατακόρυφα στατικά φορτία που προκύπτουν από το βάρος των προσαρτημένων εξαρτημάτων.

Επί της ουσίας, σε αυτήν τη ανάλυση προσομοιώνονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο σωληνωτό δικτύωμα λόγω των μαζών που στηρίζονται πάνω του (κινητήρας, το ρεζερβουάρ, το ψυγείο, η ρεζέρβα και ο οδηγός). Σε αυτήν την περίπτωση φόρτισης, τα κεντρικά σημεία έδρασης των βαρέων εξαρτημάτων υφίστανται συνήθως τη μεγαλύτερη καταπόνηση, αποτελώντας τις κύριες περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων.

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι να εξασφαλιστεί ότι το σασί δεν θα υποστεί πλαστική παραμόρφωση και θα διατηρήσει την απαιτούμενη καμπτική του ακαμψία. Πρέπει να τονιστεί πως η εμφάνιση της οποιασδήποτε εκτεταμένης παραμόρφωσης είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει σε δομική αστάθεια, επηρεάζοντας αρνητικά τη σωστή λειτουργία, την ευθυγράμμιση και τη στήριξη των μηχανικών μερών που εδράζονται στο πλαίσιο.

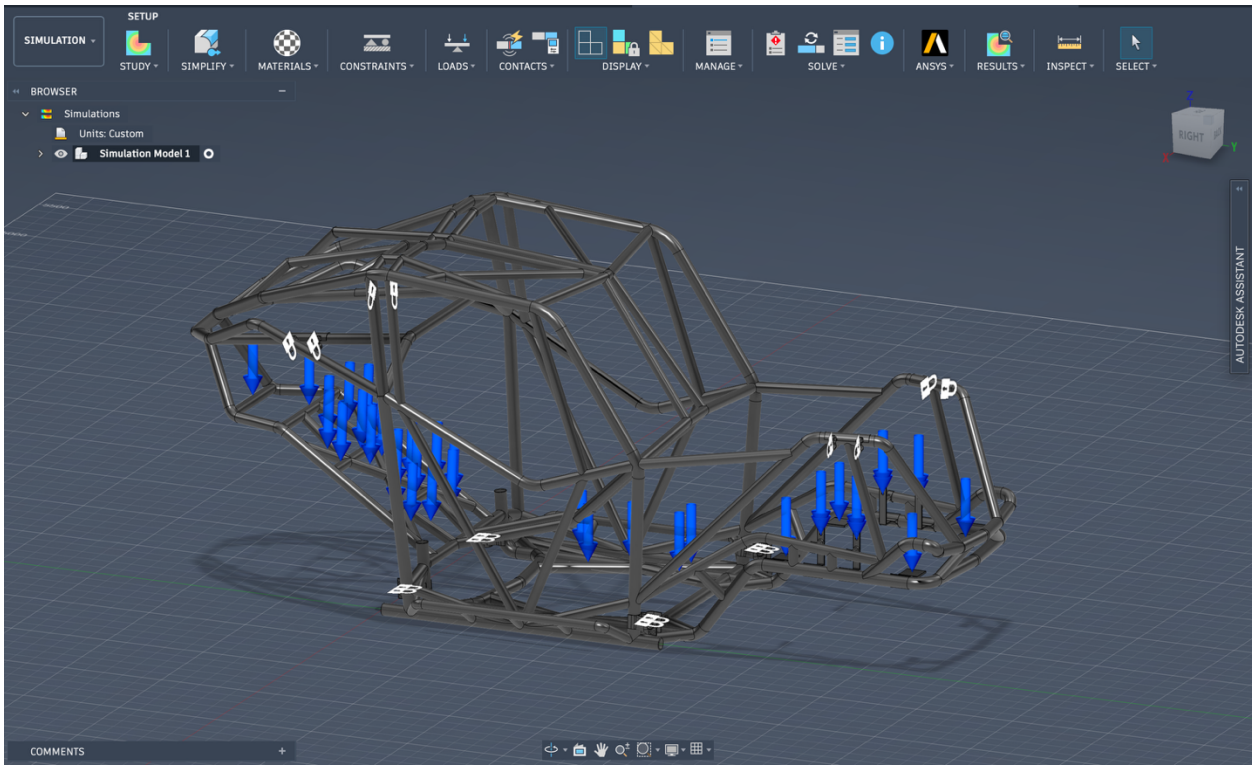
Για την προσομοίωση της στατικής κατακόρυφης φόρτισης μέσω της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων, προϋποτίθεται ο ακριβής ορισμός των κατάλληλων συνοριακών

συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, επιβλήθηκαν πακτώσεις σε όλες τις βάσεις των αναρτήσεων, καθώς είναι τα σημεία μέσω των οποίων το όχημα στηρίζεται και αντιδρά στα κατακόρυφα φορτία του βάρους του.

Αμέσως μετά, εφαρμοστήκαν όλες οι δυνάμεις που δέχεται κατά μήκος το πλαίσιο προερχόμενα από την μάζα του υπάρχουν εξοπλισμού και οδηγού. Συνολικά, όλα τα επιβαλλόμενα φορτία αποτελούν μια κατακόρυφη δύναμη μεγέθους 17.000 N. Για την επίτευξη μιας ρεαλιστικής προσέγγισης μιας τέτοιας πραγματικής συνθήκης, η κατανομή των δυνάμεων αναπτύχθηκε τοπικά, αναλογικά με τις μάζες του εκάστοτε τμήματος.

Στο εμπρόσθιο τμήμα είναι τοποθετημένη η βάση στήριξης του κινητήρα και εφαρμόστηκε συνολικό φορτίο μεγέθους 3000 N, εκτιμώντας πως ο κινητήρας έχει βάρος (200 – 250 Kg). Στο κεντρικό τμήμα που είναι η περιοχή της καμπίνα του οδηγού έχει επιβληθεί φορτίο της τάξεως των 7.000 N. Αυτό το συνολικό μέγεθος προέρχεται από το βάρος του οδηγού, του καθίσματος, του υπάρχουν παρελκόμενου εξοπλισμού.

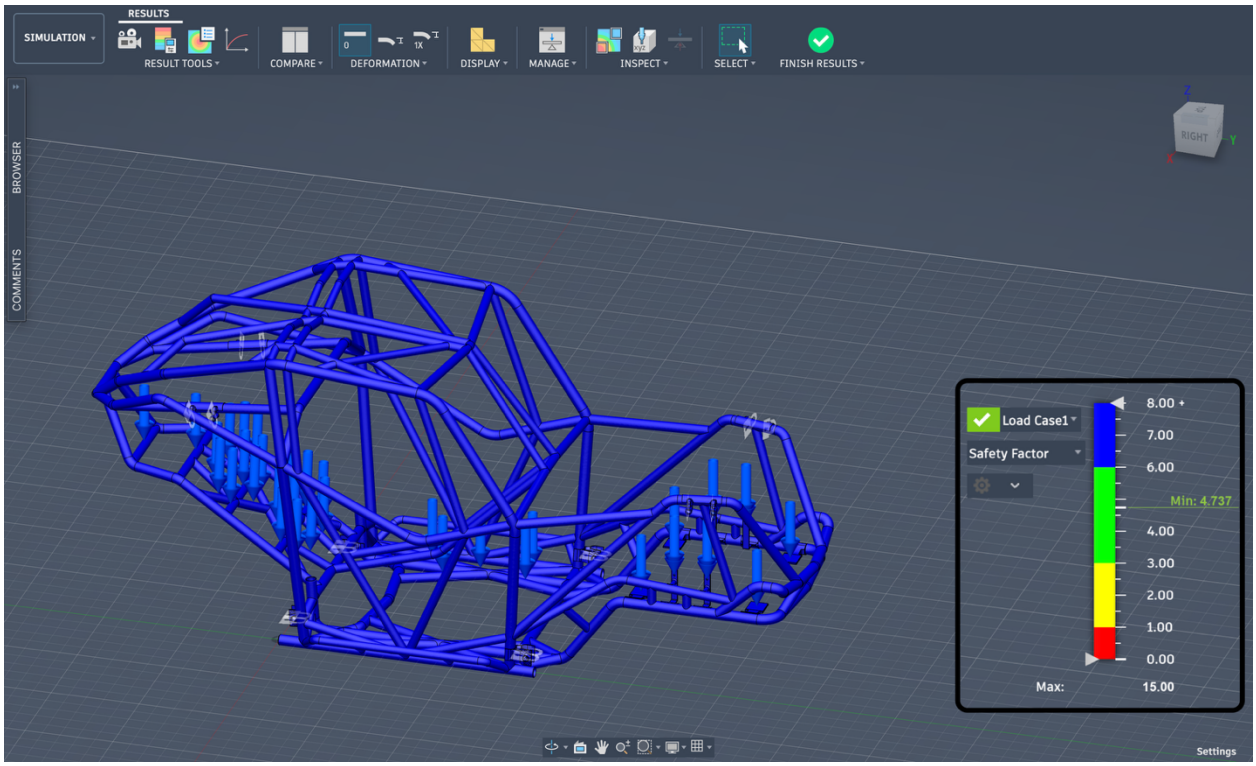
Στο οπίσθιο τμήμα, εφαρμόστηκαν δυνάμεις που το επιβαρύνουν συνολικά με φορτία της τάξεως 7.000 N. Για το συγκεκριμένο τμήμα συνυπολογίστηκε το βάρος του εφεδρικού τροχού, της γεμάτης δεξαμενής καυσίμου, του συστήματος ψύξης.



Εικόνα 39 Απεικόνιση της προσομοίωση της κάθετης κάμψης ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου.

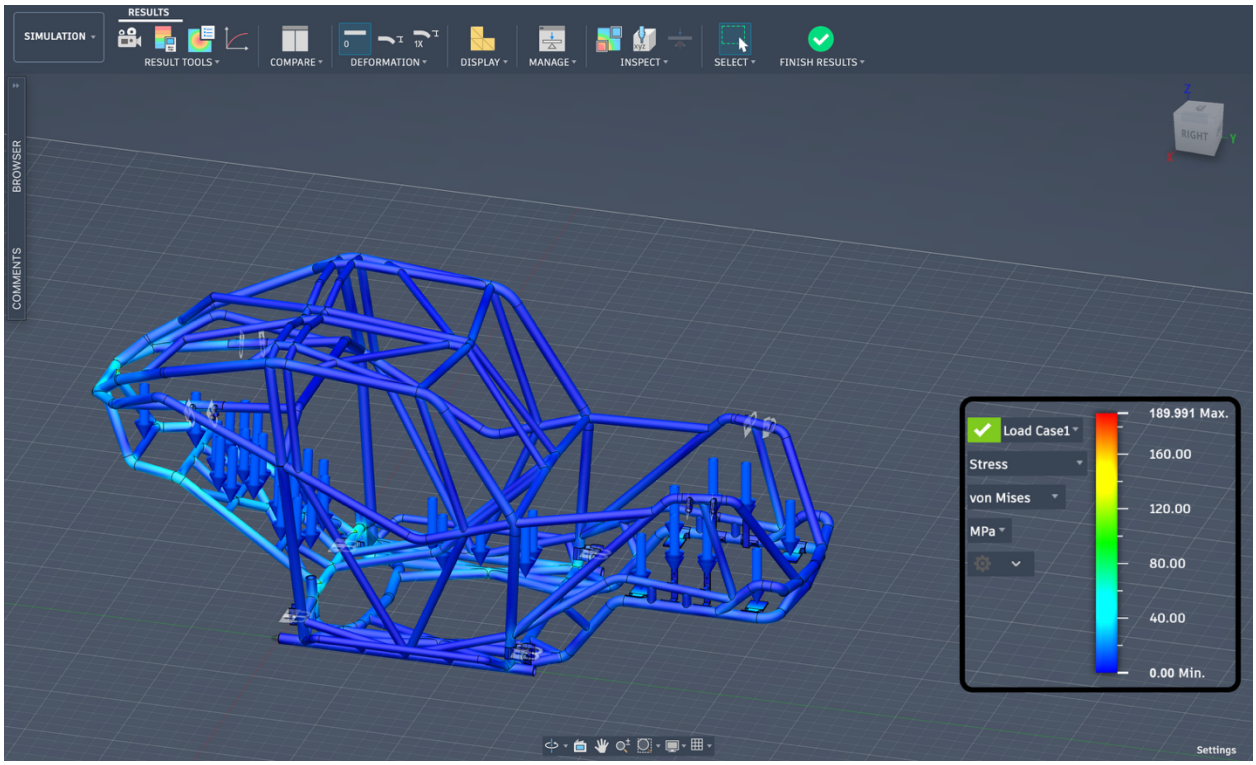
Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες υπολογίστηκε σε $SF = 4{,}737$, δείχνοντας την υψηλή δομική επάρκεια του πλαισίου υπό τη συγκεκριμένη καταπόνηση. Πρακτικά, η τιμή αυτή μεταφράζεται στο γεγονός ότι η κατασκευή έχει την ικανότητα να παραλάβει πενταπλάσιο φορτίο από το ήδη επιβαλλόμενο.

Επιπλέον, στο λογισμικό για αυτήν την στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, διαπιστώνεται ότι υπάρχει περιθώριο δομικής βελτιώσεις, καθώς είναι αρκετά ισχυρό. όμως στην παρούσα φάση θα αποτελούσε μια πρόωρης και ενδεχομένως επισφαλής κίνηση καθώς δεν έχουν αξιολογηθεί όλες οι απαραίτητες προσομοιώσεις στατικής καταπόνησης.



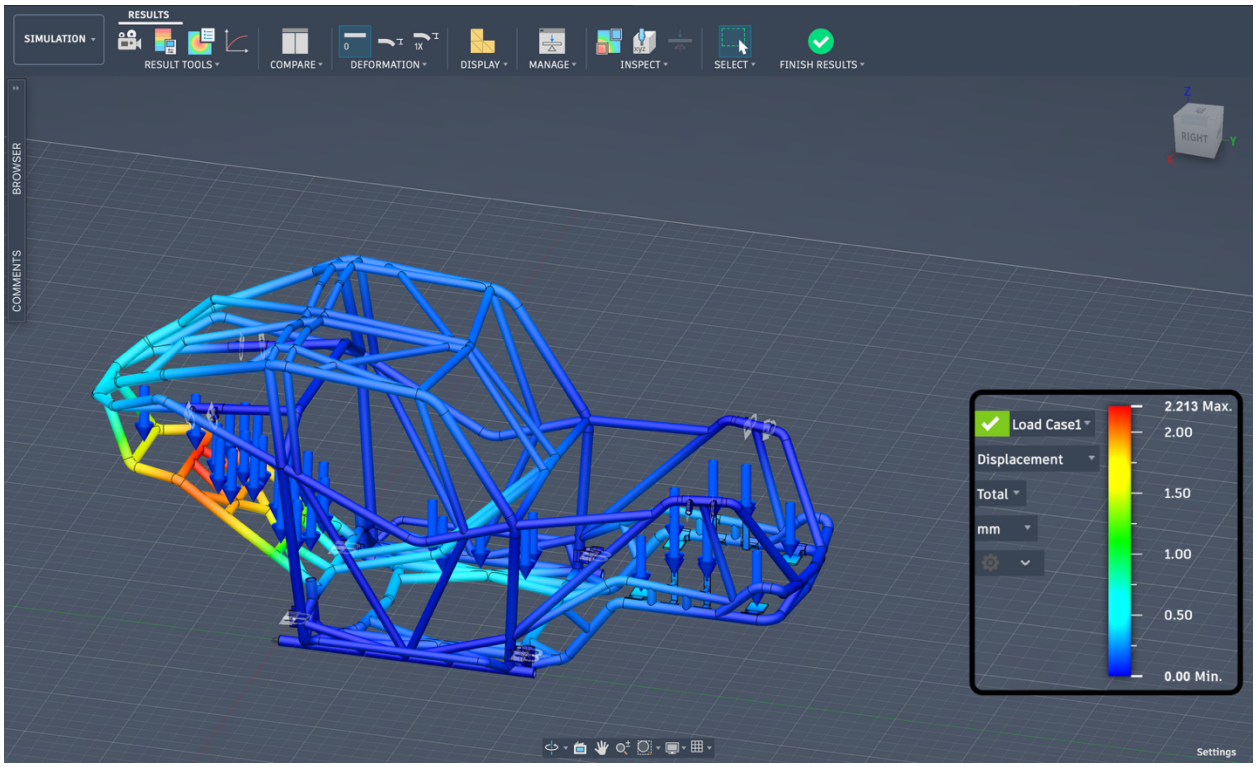
Εικόνα 40 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης.

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη ισοδύναμη τάση Von Mises ανέρχονται σε 189,991 MPa. Συγκρίνοντας το μέγεθος αυτό με το όριο διαρροής (Yield Strength) του αντίστοιχου χάλυβα (Steel AISI 4130 259 QT), μπορούμε να συνειδητοποιήσουμε πως η συσσώρευση τάσεων προκαλώντας κίνδυνο στην δομή του πλαισίου θεωρείται εξαιρετικά απίθανο. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι το υλικό που επιλέχθηκε διαθέτει την απαιτούμενη επάρκεια έτσι ώστε να λάβει με επιτυχία το σύνολο των αναπτυσσόμενων φορτίων που πάνω στο μοντέλο.



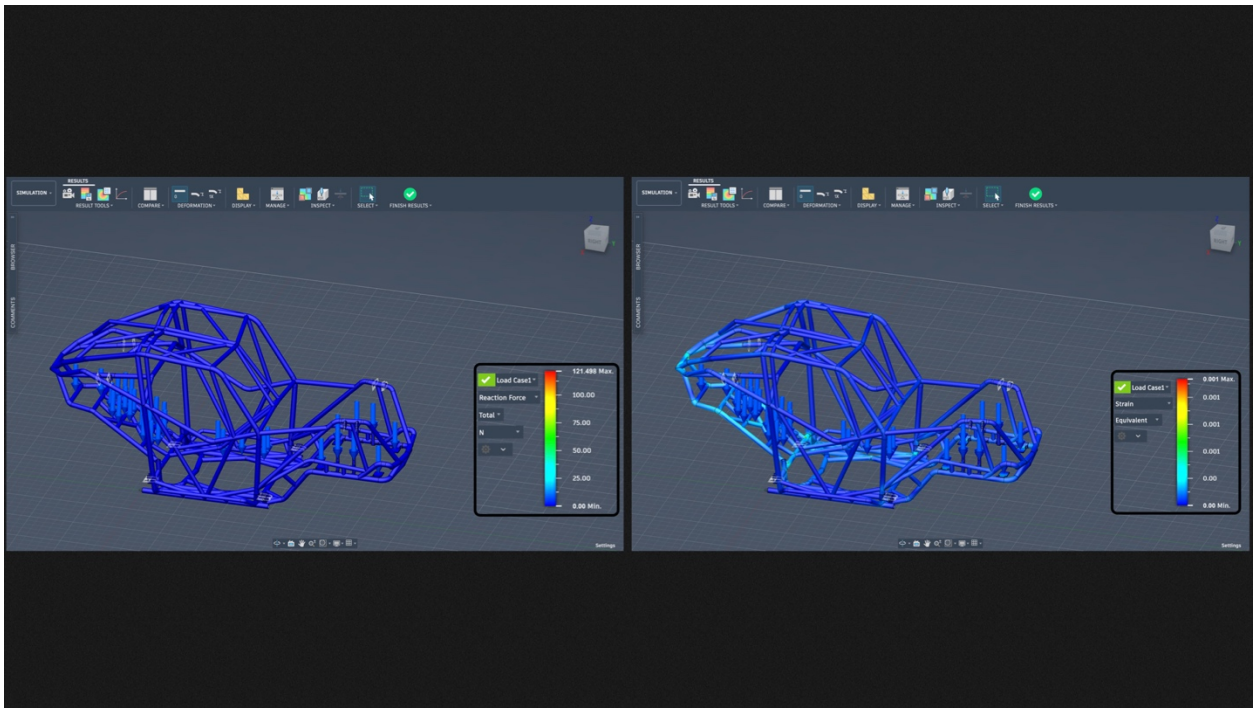
Εικόνα 41 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης.

Όπως αντικρίζεται στην εικόνα, στα αποτελέσματα της μετατόπισης, η μέγιστη μετατόπιση βρίσκεται στο οπίσθιο μέρος του οχήματος και ανέρχεται σε 2,213 mm. Αξίζει να τονιστεί πως, για ακραίο σενάριο όπου στο σωληνωτό δικτύωμα εξελίσσονται φορτία σχεδόν πενταπλάσιου μεγέθους από τα αρχικά επιληφθέντα, καταγράφεται ως μέγιστη μετατόπιση το αμελητέο μέγεθος της τάξεως περίπου δυο χιλιοστών. Κατά συνέπεια, τα δεδομένα αυτά πιστοποιούν πως το πλαίσιο, υπό τη επίδραση των κατακόρυφων στατικών φορτίων, ανταποκρίθηκε με απόλυτα άκαμπτη συμπεριφορά, αποκλείοντας το ενδεχόμενο οποιασδήποτε δομικής του αλλοίωσης ή αστοχίας.



Εικόνα 42 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης.

Τέλος, οι μέγιστες δυνάμεις αντίδρασης (Reaction Forces) οι οποίες αναπτύσσονται στις βάσεις στήριξης των αναρτήσεων (σημεία πάκτωσης), υπολογίζονται σε 121 N. Κρίνεται ως ένα χαμηλό και αποδεκτό μέγεθος, τονίζοντας πως δεν παρουσιάζονται κρίσιμες καταπονήσεις στα σημεία έδρασης του δικτυωτού πλαισίου. Παράλληλα, η ισοδύναμη παραμόρφωση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα έχοντας ως ανώτατο όριο μόλις το 0,1%, δείχνοντας πλήρως την γραμμική και αποτελεσματική μηχανική συμπεριφορά του επιλεχθέντος κράματος. Το συμβατικό όριο πλαστικής διαρροής (Yield Point) ανέρχεται στο 0,2% της ισοδύναμης παραμόρφωσης.



Εικόνα 43 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της κάθετης κάμψης.

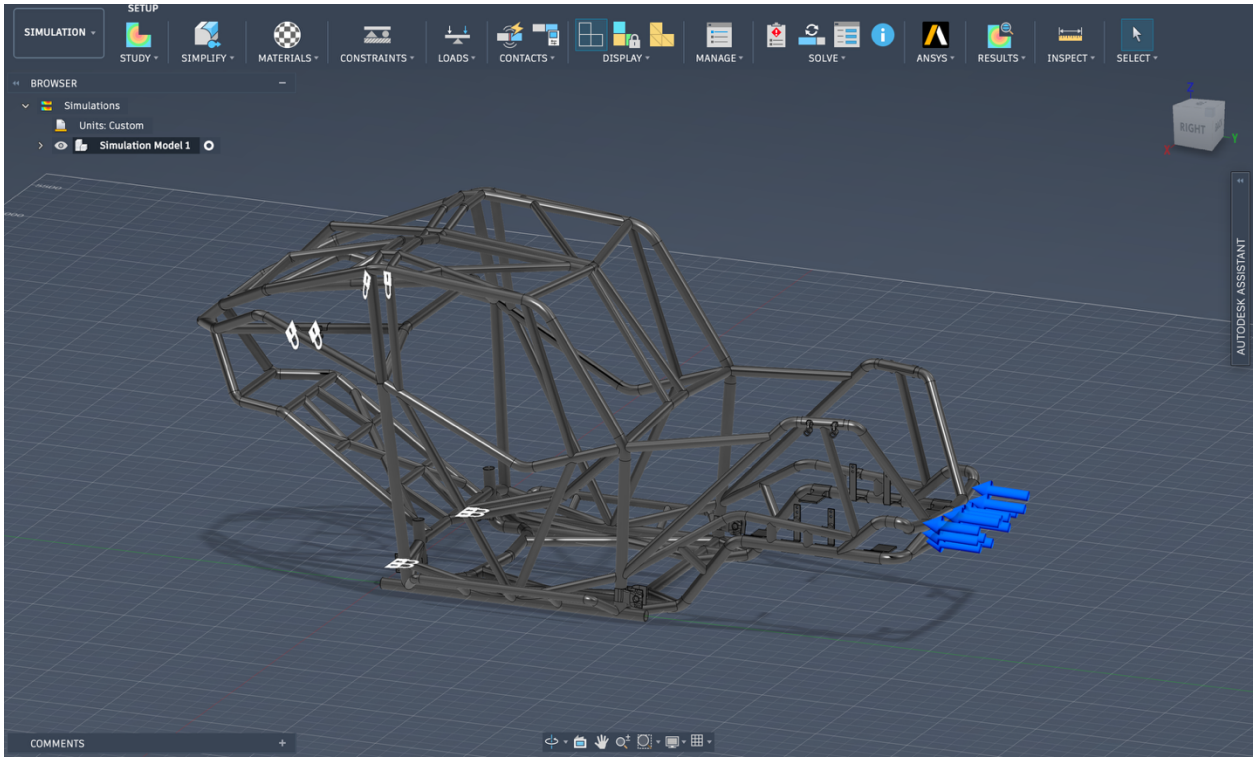
6.3.3. Στατική ανάλυση μετωπικής σύγκρουσης (Frontal impact)

Η επόμενη κρίσιμη μελέτη, πραγματοποιείται σε όλα τα είδη των οχημάτων και είναι αυτή της μετωπικής σύγκρουσης (Frontal Impact) σε σταθερό εμπόδιο. Με της συγκεκριμένης στατικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, εξετάζεται η δομική συμπεριφορά του του σωληνωτού πλαισίου υπό συνθήκες ακραίας μετωπικής σύγκρουσης. Για να μπορέσει να στεφθεί με επιτυχία αυτό το προσομοιωμένο σενάριο, θα πρέπει να προκύψουν δύο πολύ σημαντικά αποτελέσματα.

Πρωτίστως, απαιτείται η προστασία της δομικής ακεραιότητας του ζωτικού χώρου της καμπίνας. Πρέπει να αποδειχθεί, πως η καμπίνα δεν θα υποστεί καμία κρίσιμη παραμόρφωση, μετά από μια ισχυρή σύγκρουση, διατηρώντας την ασφάλεια του χειριστή. Δευτερευόντως, ελέγχεται η δυνατότητα του εμπρόσθιου τμήματος του οχήματος, ώστε να λειτουργήσει ως ζώνη ελεγχόμενης παραμόρφωσης, δηλαδή να αποτελέσει το τμήμα που θα δεχτεί τη μεγαλύτερη παραμόρφωση, αποτρέποντας την εξάπλωση της κινητική ενέργεια στα κεντρικά και στα οπίσθια τμήματα.

Για την επίτευξη μιας ρεαλιστικής προσέγγισης, εφαρμόστηκαν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Πρακτικά, ορίστηκαν πακτώσεις στις οπίσθιες βάσεις στήριξης των αναρτήσεων

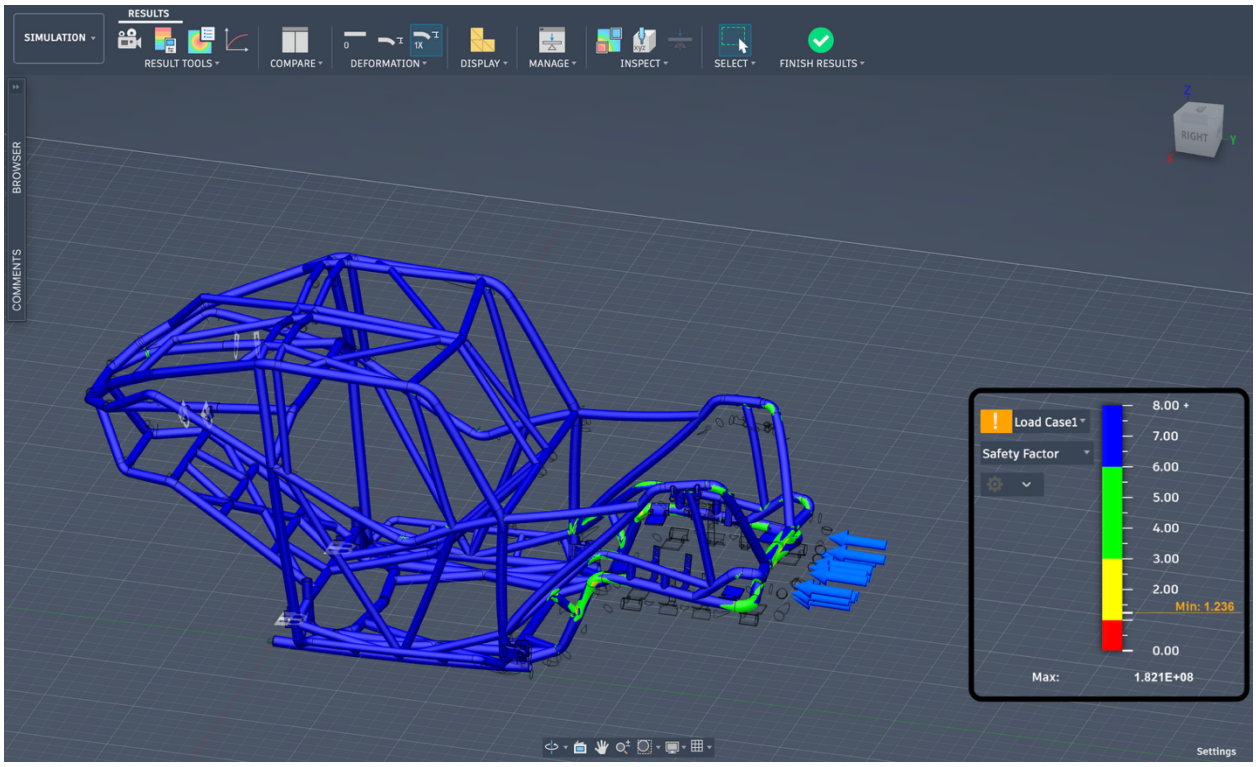
και αντιστοίχως, στο εμπρόσθιο τμήμα επιβληθήκαν δυνάμεις συνολικού μεγέθους 80.000 N (ουσιαστικά οχτώ τόνοι). Με την υπόθεση ότι η μέση μάζα ενός οχήματος ανέρχεται στα 1.700 Kg, γίνεται αντιληπτή η ακραία προσέγγιση που υπάρχει στην μελέτη της μετωπικής πρόσκρουσης.



Εικόνα 44 Απεικόνιση της προσομοίωση της μετωπικής σύγκρουσης ανάλυσης του δικτυωτού πλαισίου.

Στα αποτέλεσμα του συντελεστή ασφαλείας, προκύπτει πως η ελάχιστη τιμή που υπολογίστηκε στο μοντέλο, ισούται σε $SF = 1{,}236$. Υπάρχει υψηλό ενδεχόμενο λανθασμένων εκτιμήσεων καθώς αυτή η τιμή φαντάζει αρκετά χαμηλή, όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως ο έλεγχος αναπτύσσεται έχοντας ως δεδομένο την τεράστια ισχύ της πρόσκρουση. Αν τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης ισοδυναμούσαν με υψηλό ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, θα στερούνταν υπό ενός ρεαλιστικού συμπεράσματος, διότι θα υποδείκνυε μια άκαμπτη δικτυωτή κατασκευή η οποία αδυνατεί να απορροφήσει την δυναμική ενέργεια.

Καταλήγοντας, ο υπολογισμός ενός χαμηλού συντελεστή ασφαλείας είναι απολύτως λογική και επιθυμητή, δημιουργώντας προσδοκίες για τις ικανότητες του πλαισίου ως προς τις δομικές του αποκρίσεις.

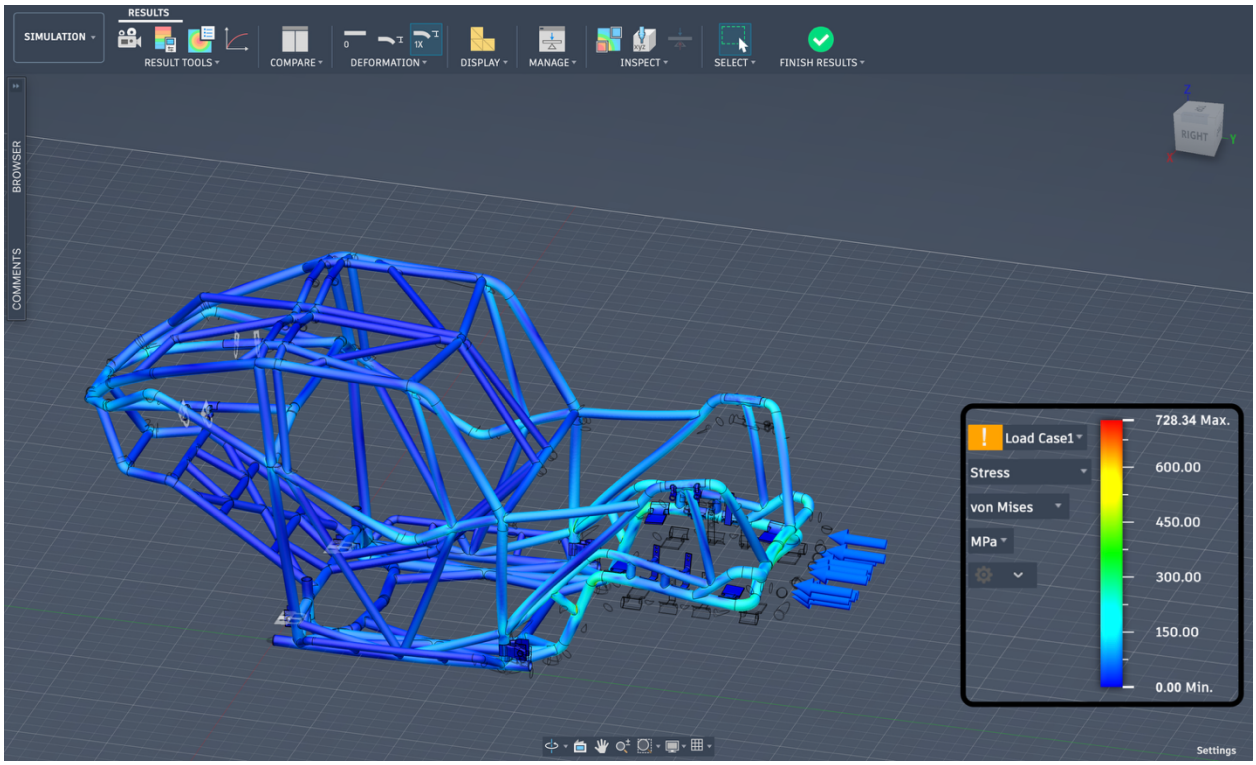


Εικόνα 45 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης.

Στη συνέχει παρατηρείται ότι η μέγιστη ισοδύναμη τάση Von Mises που αναπτύσσεται στο πλαίσιο είναι μεγέθους 728,34 MPa και εντοπίζεται στα εμπρόσθια τμήματα του, τα οποία υφίστανται την άμεση επίδραση της πρόσκρουση. Με δεδομένο ότι το όριο διαρροής του χάλυβα να ανέρχεται στα 900 MPa, δικαιολογείται η χαμηλή τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

Όλα αυτά τα δεδομένα παρέχουν πολύ σημαντικά συμπεράσματα καθώς με την υπόδειξη της χρωματικής κλίμακας, οι συγκεντρώσεις των μέγιστων τάσεων εμφανίζονται στα εμπρόσθια τμήματα, υποδηλώνοντας ότι αυτά θα υποστούν την μέγιστη παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, οι χρωματικές ενδείξεις στο κεντρικό τμήμα του πλαισίου, φανερώνουν πως αποτρέπεται η μετάδοση των υψηλών κρουστικών φορτίων στην υπόλοιπη δομή του μοντέλου, εξαλείφοντας τον κίνδυνο για την ζωή του χειριστή.

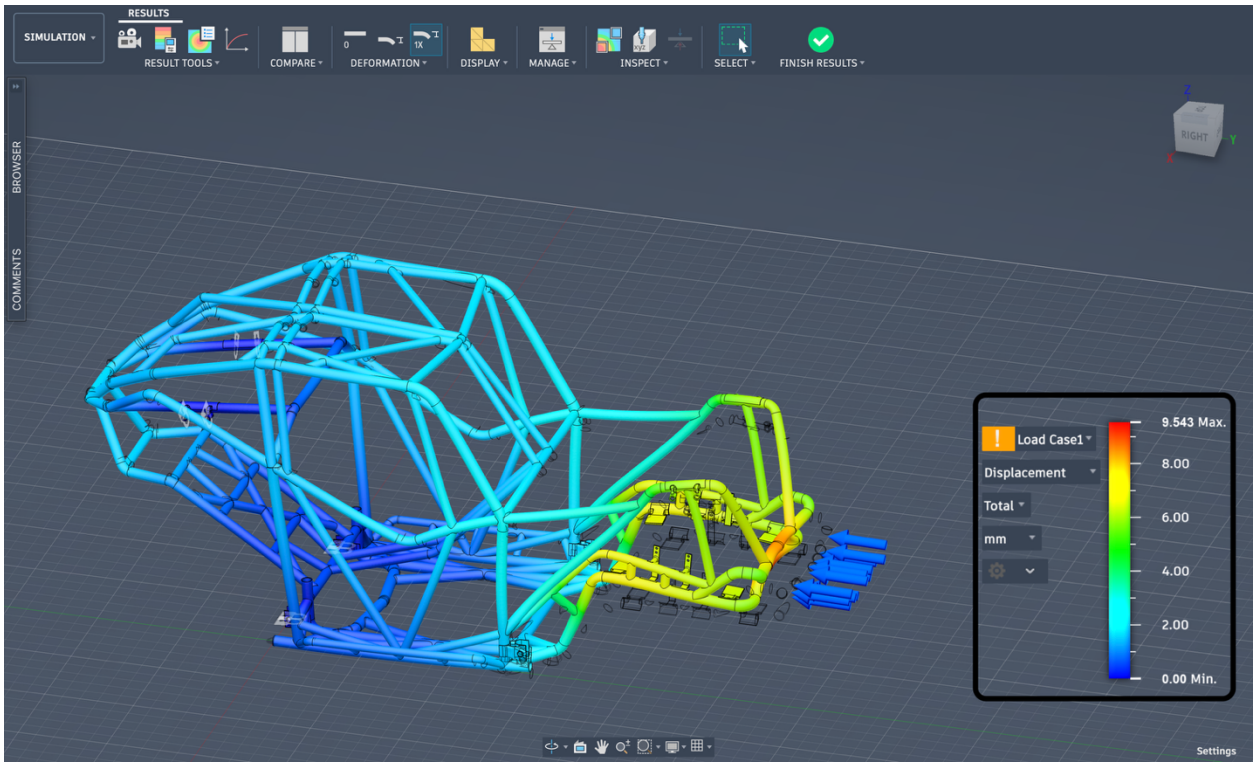
Ουσιαστικά, ο κύριος στόχος επιτεύχθηκε με επιτυχία, καθώς το εμπρόσθιο τμήμα τίθεται υπό την εστιασμένη πλαστική παραμόρφωση, λειτουργώντας όλοι οι ευρισκόμενοι σωλήνες ως ζώνες ελεγχόμενης απορρόφησης της κινητικής ενέργειας.



Εικόνα 46 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης.

Επιπλέον από το αποτελέσματα των μετατοπίσεων προκύπτει ότι η μέγιστη μετατόπιση που αναπτύσσεται στο χαλύβδινο πλαίσιο ανέρχεται σε 9,543 mm. Και αυτό το εύρημα, έγκειται στο γεγονός ότι οι υψηλές παραμορφώσεις περιορίζονται μόνο στα εμπρόσθια τμήματα του οχήματος, άρα εντός της ζώνης παραμόρφωσης. Αντιθέτως, στην καμπίνα και στα υπόλοιπα δομικά μέλη του οπίσθιου τμήματος μετατοπίσεις που εντοπίζονται κυμαίνονται στο εύρος 2 έως 2,5 mm.

Οι τιμές αυτές αποδεικνύουν την δομική σταθερότητα και ικανοποιητική ακαμψία του περιβάλλοντα χώρου του οδηγού, καθώς ακόμα και με την εξέλιξη ακραίας πρόσκρουσης του οχήματος, ισοδύναμου φορτίου μεγέθους 8 τόνων, η προστασία του επιβαίνοντα δεν θα επηρεαστεί.



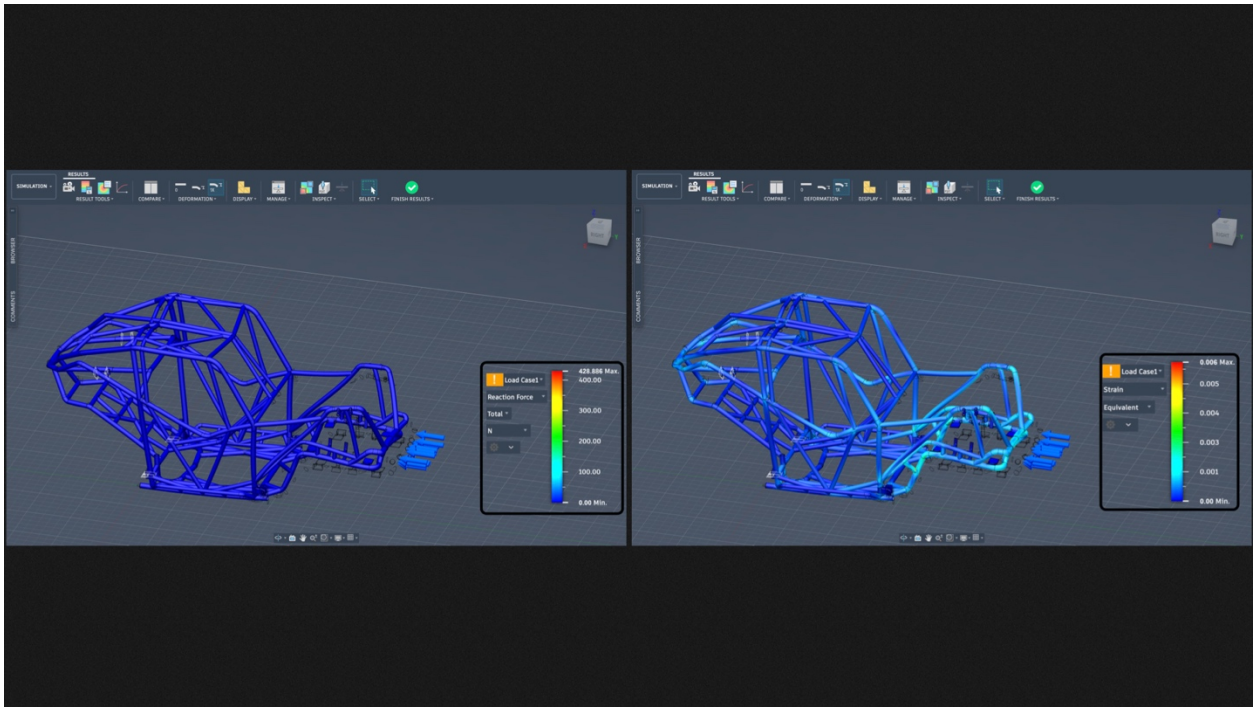
Εικόνα 47 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης.

Τέλος, θέτονται υπό έλεγχο τα αποτελέσματα των δυνάμεων αντιδράσεις (Reaction Forces) και της ισοδύναμης παραμόρφωσης (Strain). Στα σημεία στήριξης των αναρτήσεων που έχουν επιβληθεί οι πακτώσεις εντοπίζονται οι μέγιστες δυνάμεις αντίδρασης της τάξεως των 428,886 N. Η τιμή αυτή είναι απολυτός λογική, καθώς αποτελεί την μέγιστη δύναμη αντίδρασης που εξελίσσεται ανά κόμβο του αναπτυσσόμενου πλέγματος σε κάθε σημείο σταθερής δέσμευσης. Στην συγκεκριμένη μελέτη έχουν οριστεί δυο πακτώσεις σε κάθε βάση ανάρτησης, συνοψίζοντας συνολικά οχτώ πακτώσεις.

Το άθροισμα των κρουστικών φορτίων (80.000 N) και των δυνάμεων αντίδρασης θα πρέπει να ισούνται με μηδέν. ($\Sigma F = 0$). Διευκολύνοντας την απόδειξη, αν το φορτίο διακυμανθεί συμμετρικά και στα οχτώ σημεία πάκτωσης, το καθένα από αυτό θα δεχτεί κρουστικές καταπονήσεις μεγέθους 10.000 N. Με την δύναμη αντίδρασης του κάθε κόμβου να ανέρχεται σε τιμή των 430 N (στρογγυλοποιημένη τιμή), σημαίνει πως κάθε ορισμένο σημείο στήριξης διαχωρίζεται σε 23 κόμβους ($10.000 \div 430 = 23.25$). Με τα δεδομένα αυτά, διαπιστώνεται πως εξελίσσεται ο κατάλληλος διαμοιρασμός των προερχόμενων φορτίων της σύγκρουσης, στους συνολικούς κόμβους του πλαισίου.

Επιπλέον, η ισοδύναμη παραμόρφωση καταγράφει την τιμή 0,006 (0,6%). Το συγκεκριμένο γεγονός, διαμορφώνει πως το υλικό ξεπερνάει το όριο διαρροής του, υποδηλώνοντας πως

τα εμπρόσθια μέλη του δικτυώματος, με την επίτευξη των κρουστικών φορτίων, εγκαταλείπουν την ελαστική τους συμπεριφορά και εισέρχονται στο πεδίο της πλαστικής παραμόρφωσης.



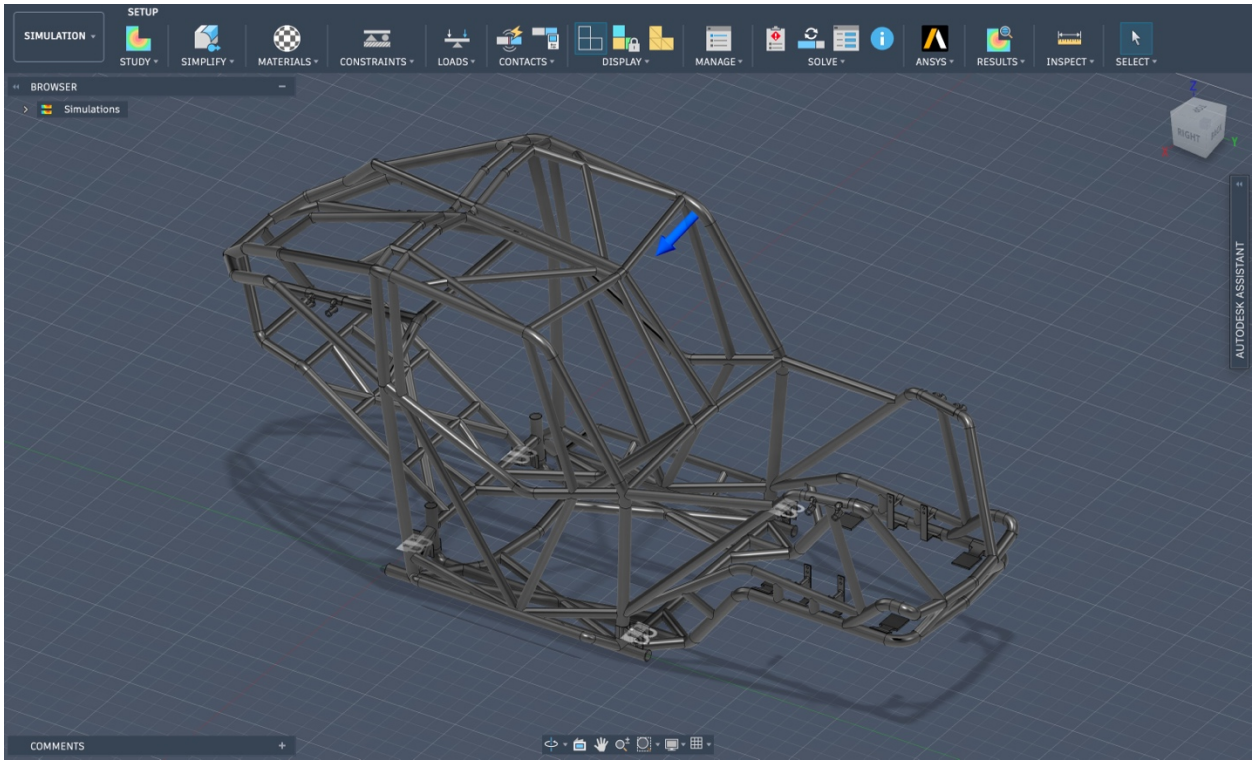
Εικόνα 48 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της μετωπικής σύγκρουσης.

6.3.4. Στατική ανάλυση ανατροπής οχήματος (Rollover & roof crush)

Τα οχήματα τύπου «Trophy truck» όπου συνηθίζεται να οδηγούν σε εκτός δρόμου διαδρομές και με εδαφικές ανωμαλίες, αυξάνοντας σημαντικά τον κίνδυνο ατυχήματος, όπως η ανατροπή (Rollover) του οχήματος. Συνεπώς, η στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που θα ακολουθήσει είναι βασισμένη σε τέτοιου ακραίου σεναρίου καταπόνησης. Ο βασικός σχεδιαστικός σκοπός αυτής είναι η διασφάλιση της σωματικής ακεραιότητας του οδηγού. Πρακτικά, εξετάζεται η αντοχή του σωληνωτού πλαισίου σε πολλαπλάσιο φορτίο του βάρους του, εξασφαλίζοντας πως δεν θα αναπτυχθεί πλαστική παραμόρφωση στο κεντρικό τμήμα, προκαλώντας την οποιαδήποτε μορφή κινδύνου ως προς την ασφάλεια του οδηγού.

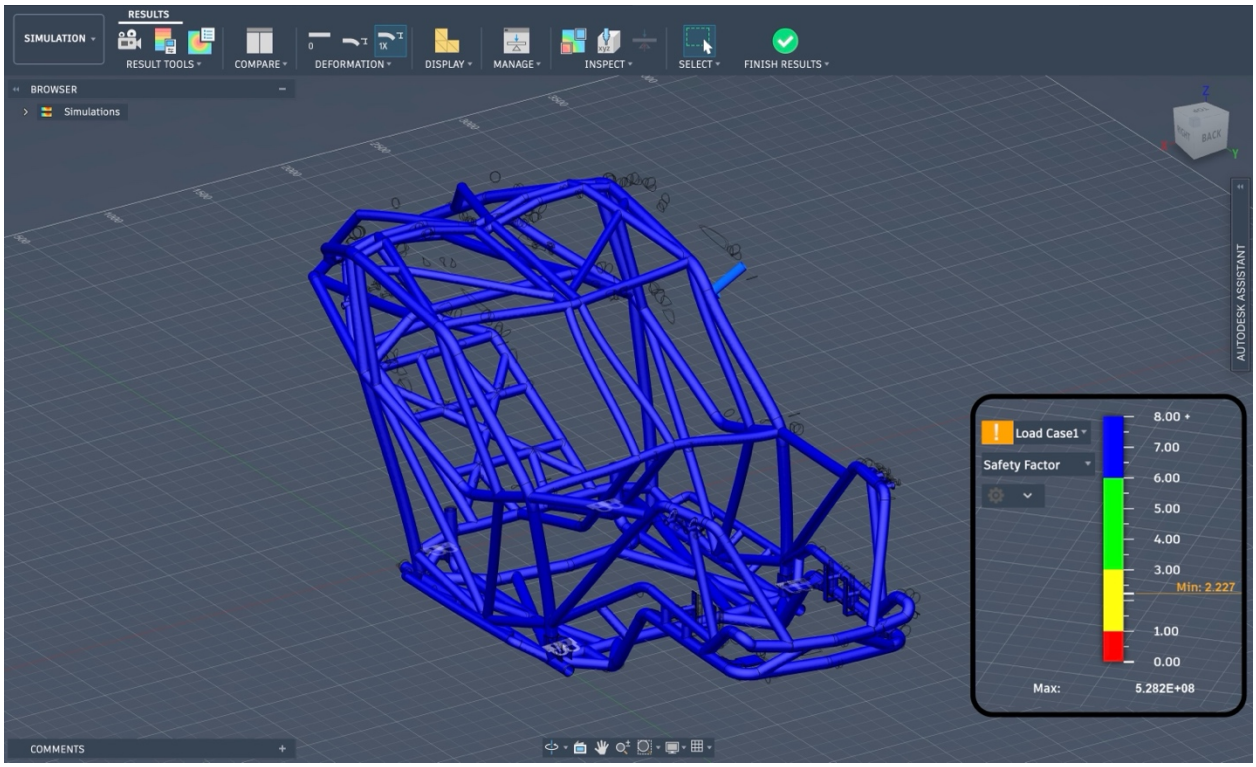
Για την προσέγγιση μιας ρεαλιστικής προσομοίωσης του συμβάντος, απαιτείται ο κατάλληλος καθορισμός των συνοριακών συνθηκών. Έτσι, σε έναν εμπρόσθιο γωνιακό κόμβο της κορυφής του κεντρικού τμήματος, ορίστηκε φορτίο της τάξεως των 20.000 N. Η επιλογή της επιβολής του φορτίου υπό συγκεκριμένη γωνία (διαγώνια κλίση) έγινε, για να προκληθεί ταυτόχρονη κάμψη και στρέψη στους σωλήνες του δικτυώματος. Επιπλέον, επιβλήθηκαν πακτώσεις στις τέσσερις υποδοχής των αναρτήσεων του κατώτερου τμήματος του οχήματος

διότι. Αυτή η διάταξη προσφέρει ομαλή κατανομή των τάσεων από το σημείο κρούσης στην οροφή και ως προς τη βάση του οχήματος, αναδημιουργώντας τη ροή των φορτίων στο σενάριο ανατροπής.



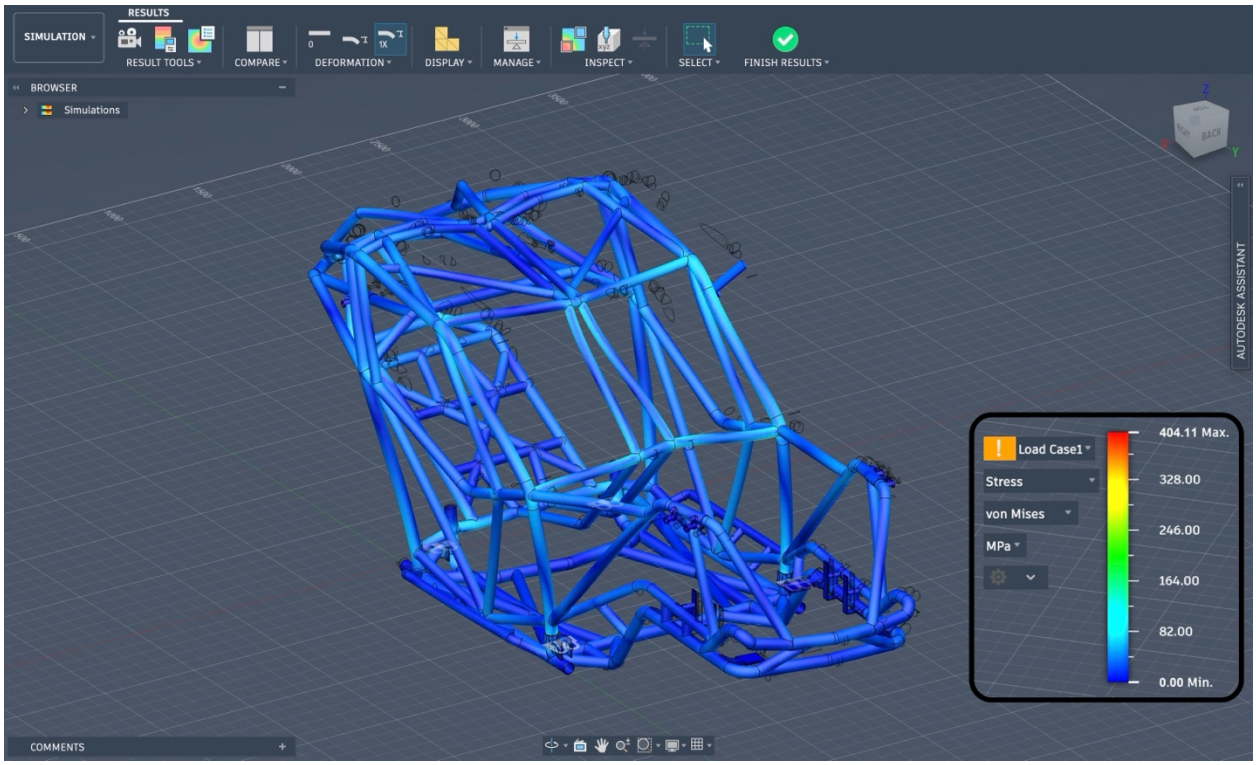
Εικόνα 49 Απεικόνιση της προσομοίωση της ανάλυσης της ανατροπής του δικτυωτού πλαισίου.

Μετά από την ολοκλήρωση της μελέτης, ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας για το αντίστοιχο κράμα χάλυβα (Steel AISI 4130 259 QT), ανέρχεται σε $SF = 2{,}227$. Ουσιαστικά, όπως έχει τεκμηριωθεί και στις προηγούμενες αναλύσεις, η συγκεκριμένη τιμή πιστοποιεί πως το σωληνωτό δικτύωμα δύναται να παραλάβει με σιγουριά υπερδιπλάσια φορτία σε σχέση με τα αρχικώς επιβαλλόμενα (πλησιάζοντας την τιμή των 44.540 Newton), και χωρίς να υποστεί πλαστική παραμόρφωση η οποία θα προκαλούσε δομική αστοχία. Εάν ληφθεί υπόψη ότι για ένα πλήρως εξοπλισμένο όχημα «Trophy Truck», η μάζα του ανέρχεται σε 1.700 Kg,τότε η καμπίνα του οχήματος για τον οδηγό, έχει την ικανότητα αντοχής στατικών φορτίων που κατά 2,5 φορές το ίδιο το βάρος της κατασκευής.



Εικόνα 50 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του.

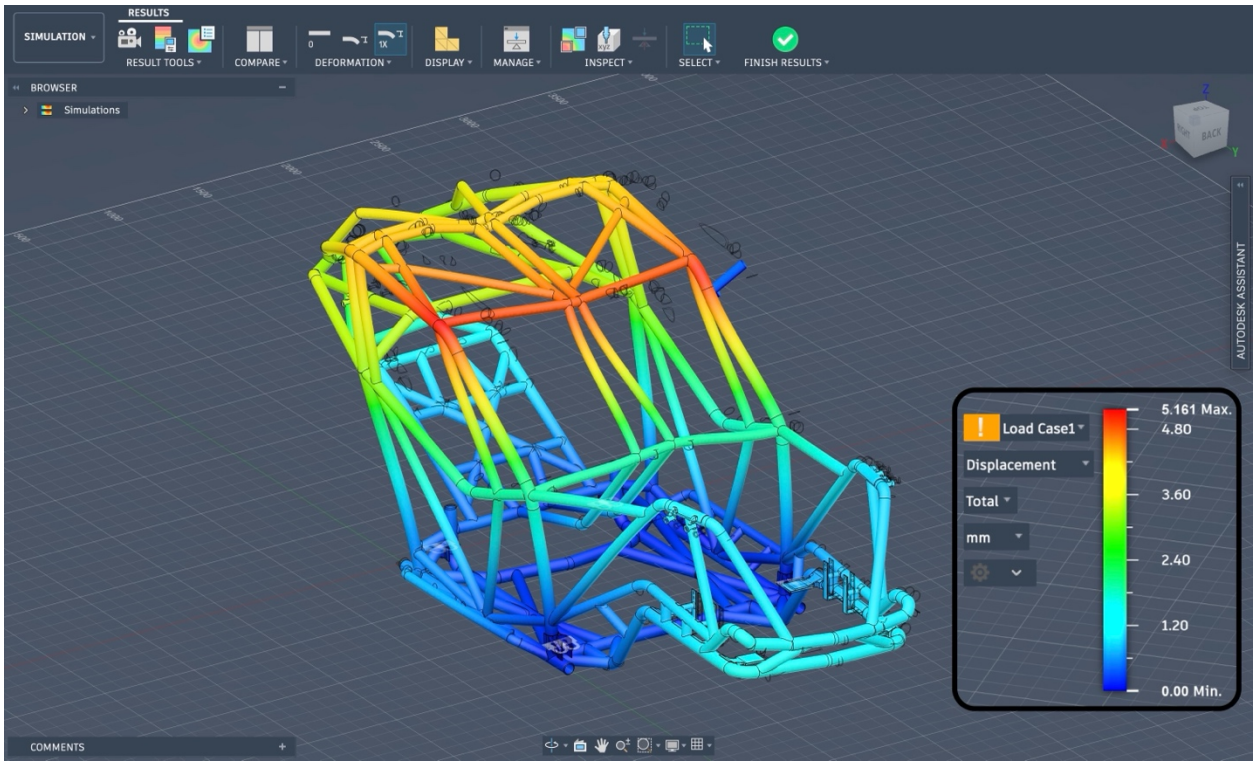
Τα συμπεράσματα που διατυπώθηκαν προηγουμένως συμβαδίζουν με την μέγιστη ισοδύναμη τάση Von Mises, η οποία υπολογίστηκε στα 404,11 MPa. Τα σημεία στα οποία αναπτύσσονται αυτά τα μεγέθη τάσης είναι τοπικά κατά μήκος του σωληνωτού γωνιακού κόμβου στο οποίο επιβλήθηκε το εξωτερικό φορτίο. Με το όριο διαρροής να ανέρχεται στα 900 MPa και συγκρίνοντας το με την Von Mises τάση, προκύπτει και μαθηματικά ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ($SF = 2{,}227$) για την περίπτωση ανατροπής του πλαισίου.



Εικόνα 51 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του.

Στη συνέχεια, η μέγιστη παραμόρφωση υπολογίστηκε στα 5,161 mm. Σύμφωνα με τη χρωματική κλίμακα διαπιστώνεται πως η παραμόρφωση αυτή εντοπίζεται τοπικά στο εμπρόσθιο ακραίο κόμβο της οροφής της καμπίνας. Επίσης, αναδεικνύεται η ομαλή κατανομή του φορτίου στην κατασκευή με τις εξελισσόμενες μετατοπίσεις εντός ρεαλιστικών και ασφαλή επιπέδων. Το γεγονός ότι, για επιβολή κρουστικού φορτίου της τάξεως 22.000 (λίγο παραπάνω από δυο τόνους) προκαλεί μετατόπιση της οροφής κατά 0,5 cm (μισό εκατοστό), αποτελεί την απόδειξη της ορθότητας τόσο των σχεδιαστικών επιλογών πλαισίου αλλά και του υλικό κατασκευής του.

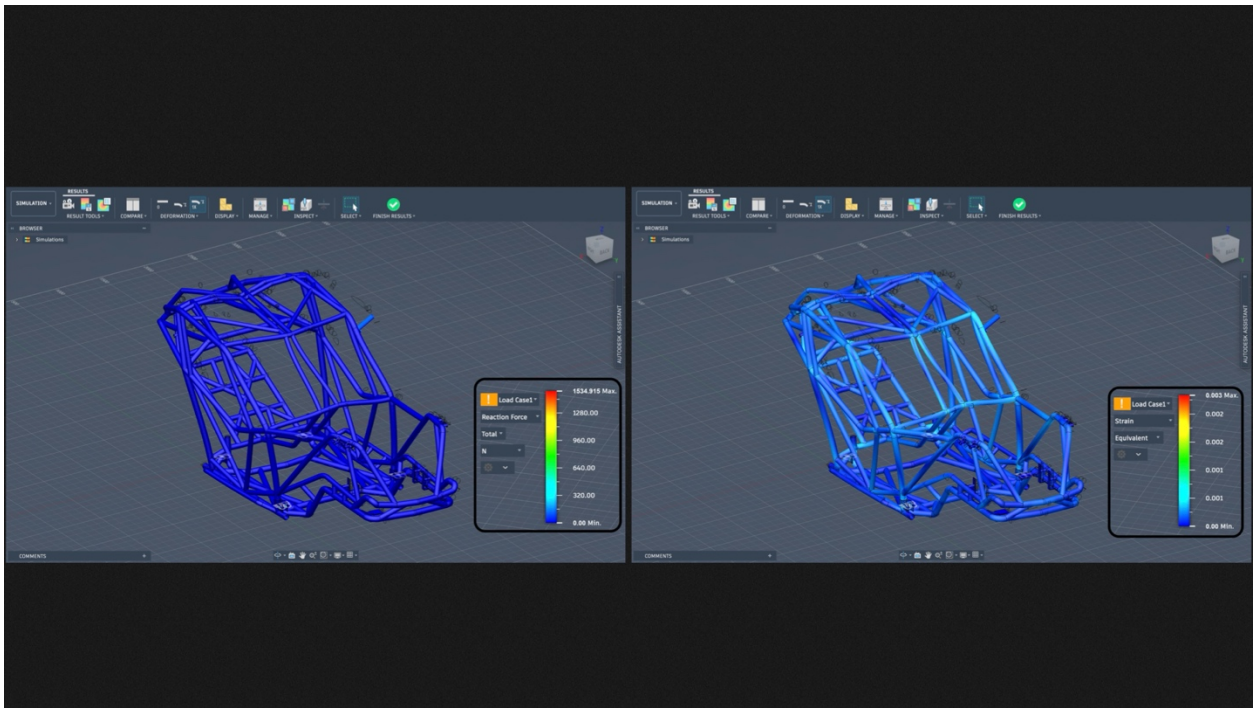
Πρακτικά, ο κύριος παράγοντας που εξασφαλίζει την υψηλή ακαμψία του πλαισίου υπό τη συγκεκριμένη φόρτιση είναι ο τριγωνισμός του δικτυώματος της οροφής, δηλαδή η τριγωνική διάταξη των σωλήνων που ενώνει τα ακραία σημεία με τους κεντρικούς άξονες. Μέσω αυτής της διάταξης εξασφαλίζεται η προστασία του χειριστή, επειδή οι διαγώνιοι σωλήνες λειτουργούν ως φορείς μεταφοράς φορτίων. Κατά αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται ομοιόμορφος διαμοιρασμός του κρουστικού φορτίου και στο απέναντι συμμετρικό τμήμα της οροφής της καμπίνας.



Εικόνα 52 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί πως η μέγιστη δύναμη αντίδρασης, η οποία εντοπίζεται στα επιμέρους σημεία πάκτωσης ανέρχεται σε 1.534,915 N. Μπορεί το συγκεκριμένο μέγεθος για δύναμη αντίδρασης εκ πρώτης όψεως να εκτιμάται χαμηλό, θα πρέπει να επισημανθεί πως το συνολικό αντιδραστικό φορτίο επιμερίζεται. Αν για τα οχτώ ορισμένα σημεία στήριξης (δυο επιβαλλόμενες πακτώσεις σε κάθε βάση ανάρτησης) υλοποιηθεί το αλγεβρικό άθροισμα των δυνάμεων αντίδρασης, τότε συνολικά προκύπτει ένα ικανοποιητικό μέγεθος αντίδρασης.

Συμπληρωματικά, η ισοδύναμη παραμόρφωση (Strain) ανέρχεται στα 0,003 (0,3%). Αυτό το αποτέλεσμα αποδεικνύει πως η μηχανική απόκριση του κράματος χάλυβα που έχει επιλεχθεί, βρίσκεται οριακά στο τέλος του ελαστικού του πεδίου. Μπορεί το όριο διαρροής του υλικού έχει ξεπεραστεί κατά 0,1%, όμως η πλαστική παραμόρφωση βρίσκεται χαμηλό στάδιο με αποτέλεσμα να μην προκύπτει εκτεταμένη αστοχία (Το υλικό απέχει πολύ από το όριο θραύσης). Το σωληνωτό χωροδικτύωμα λειτουργεί ως ένα ενιαίο και συνεργαζόμενο φορέα, κατανέμοντας τα κρουστικά φορτία της ανατροπής ομοιόμορφα, σε όλα τα τμήματα του.



Εικόνα 53 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της ανατροπής του.

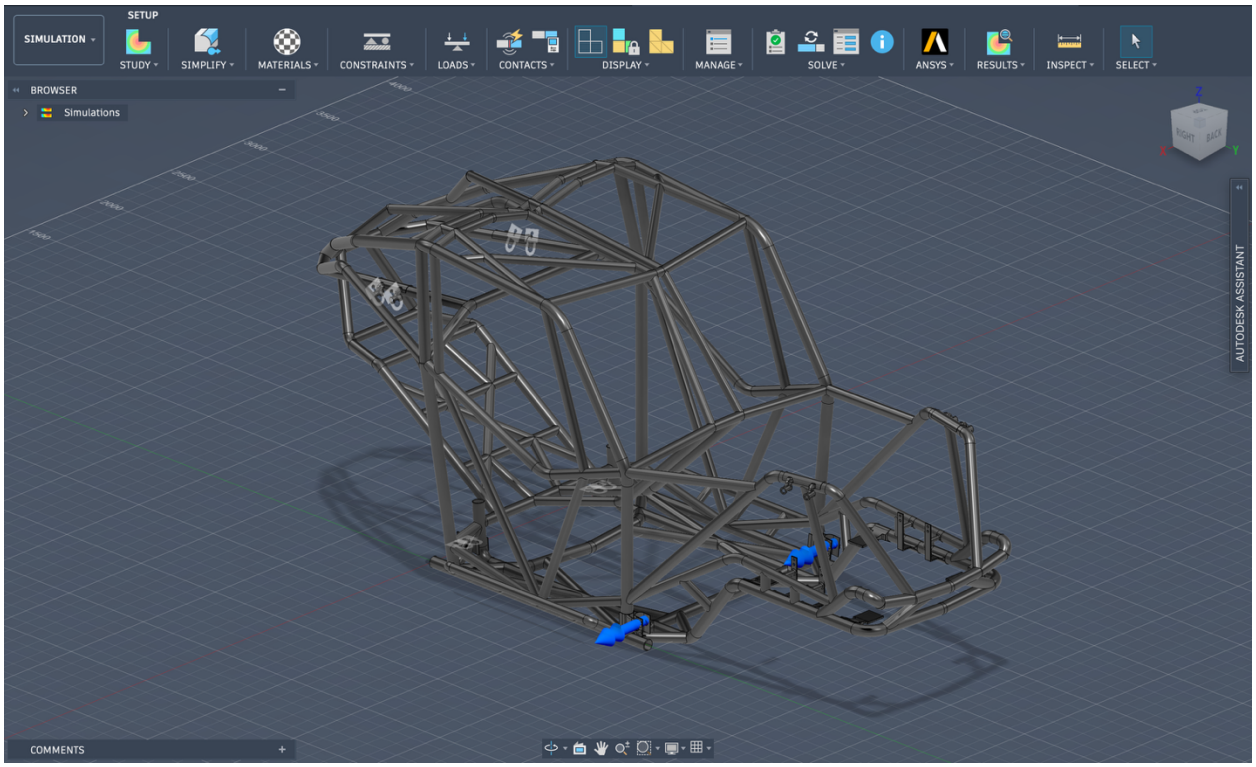
6.3.5. Στατική ανάλυση πλευρικής κάμψης (Lateral bending)

Η τελευταία στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκε στο σωληνωτό πλαίσιο αφορά την πλευρική ακαμψία του. Αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μελέτες, καθώς το χωροδικτύωμα εξετάζεται υπό συνθήκες έντονης εγκάρσιας φόρτισης. Όπως υφίστανται σε όλα τα οχήματα υψηλών επιδόσεων, τα πλαίσια έρχονται αντιμέτωπα με πλευρικά φορτία που τα καταπονούν. Η πλειοψηφία φορτίων τέτοιων περιπτώσεων, προέρχονται είτε από την εξέλιξη υψηλών πλευρικών επιταχύνσεων κατά την διάρκεια απότομων αλλαγών πορείας, είτε από δυναμικές κρούσεις στους τροχούς εξαιτίας των εδαφικών ανωμαλιών που κατανέμονται στις βάσεις των αναρτήσεων.

Βασικός σκοπός της συγκεκριμένη στατική μελέτη πεπερασμένων συγκροτείται στην συντήρηση της κινηματικής ευστάθειας του σωληνωτού δικτυώματος υπό τις συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Ακόμα τίθενται υπό έλεγχο η ανταπόκριση των κατώτερων δομικών μελών σε εκτεταμένες εγκάρσιες παραμορφώσεις. Εάν το εμπρόσθιο τμήμα του πλαισίου εμφάνιζε κάποια μη αποδεκτή πλευρική στρέβλωση, αυτό θα επηρέαζε δραματικά οδική συμπεριφορά του οχήματος , μετατρέποντας το σε άκρως απρόβλεπτο και επισφαλές μέσο.

Για να δημιουργία ενός ρεαλιστικού σεναρίου απότομης πλαγιολίσθησης, καθορίστηκαν σε ισχύ οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Τα σημεία στα οποία επιβλήθηκαν πακτώσεις είναι στις τέσσερις βάσεις των οπίσθιων αναρτήσεων, υποθέτοντας ότι σε αυτήν την δεδομένη ο

οπίσθιος άξονας του οχήματος συντηρεί πλήρη πλευρική πρόσφυση με το οδόστρωμα. Στην συνέχεια, εφαρμόστηκαν πλευρικές δυνάμεις μεγέθους 22.000 N, στις κατώτερες βάσεις της εμπρόσθιας ανάρτησης. Δεδομένης και της μάζα του οχήματος, το συγκεκριμένο μέγεθος αντιπροσωπεύει μια ακραία επιτάχυνση πλευρικής κατεύθυνσης, αναπαριστώντας τις απαιτητικές προδιαγραφές της πρόσφυσης και της πλευρικής καταπόνησης.

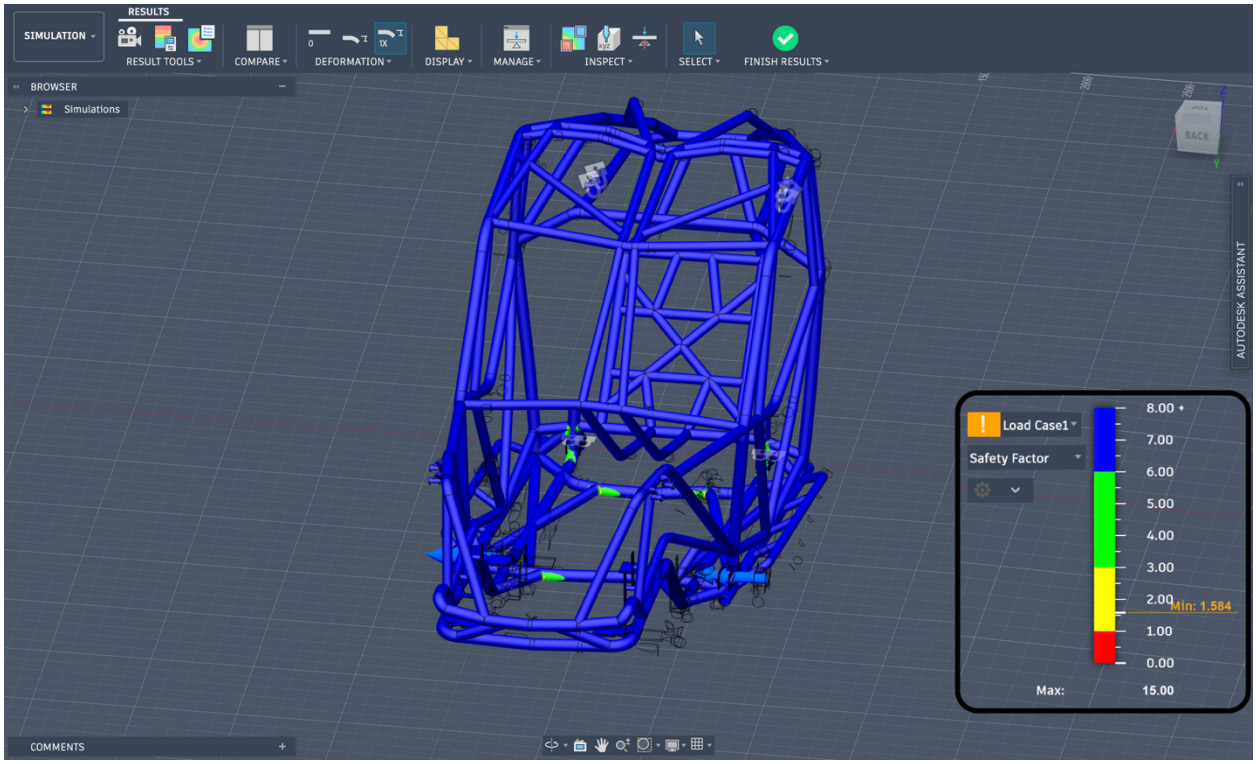


Εικόνα 54 Απεικόνιση της προσομοίωση της ανάλυσης της πλευρικής κάμψης του δικτυωτού πλαισίου.

Το πρώτο εξαγόμενο αποτέλεσμα με την ολοκλήρωση της ανάλυσης είναι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος υπολογίστηκε σε $SF = 1{,}584$. Στη μελέτη της κατακόρυφης κάμψης, το λογισμικό είχε υπολογίσει ένα αρκετά υψηλότερο συντελεστή $SF \approx 4{,}7$. Μια επιφανειακή συγκριτική θεώρηση των δυο αυτών τιμών θα μπορούσε να οδηγήσει στο εσφαλμένο συμπέρασμα πως η αντοχή του πλαισίου σε πλευρική φόρτιση είναι χαμηλή.

Η υπάρχουσα αυτή διαφορά είναι απόλυτα λογική, λόγω της συγκεκριμένης δομής της κατασκευής. Η τοποθέτηση επιπλέων διαγώνιων δομικών μελών στις πλευρικές επιφάνειες περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό, καθώς απαιτείται η εξασφάλιση του απαιτούμενου χώρου για τον οδηγό και τον απαραίτητο εξοπλισμό. Με τους ήδη υπάρχων κατασκευαστικούς περιορισμούς, το γεγονός ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι της τάξεως 1,584, υπό την επίδρασης εγκάρσιων καταπονήσεων ύψους 22.000 N (2,2 τόνων), θεωρείται

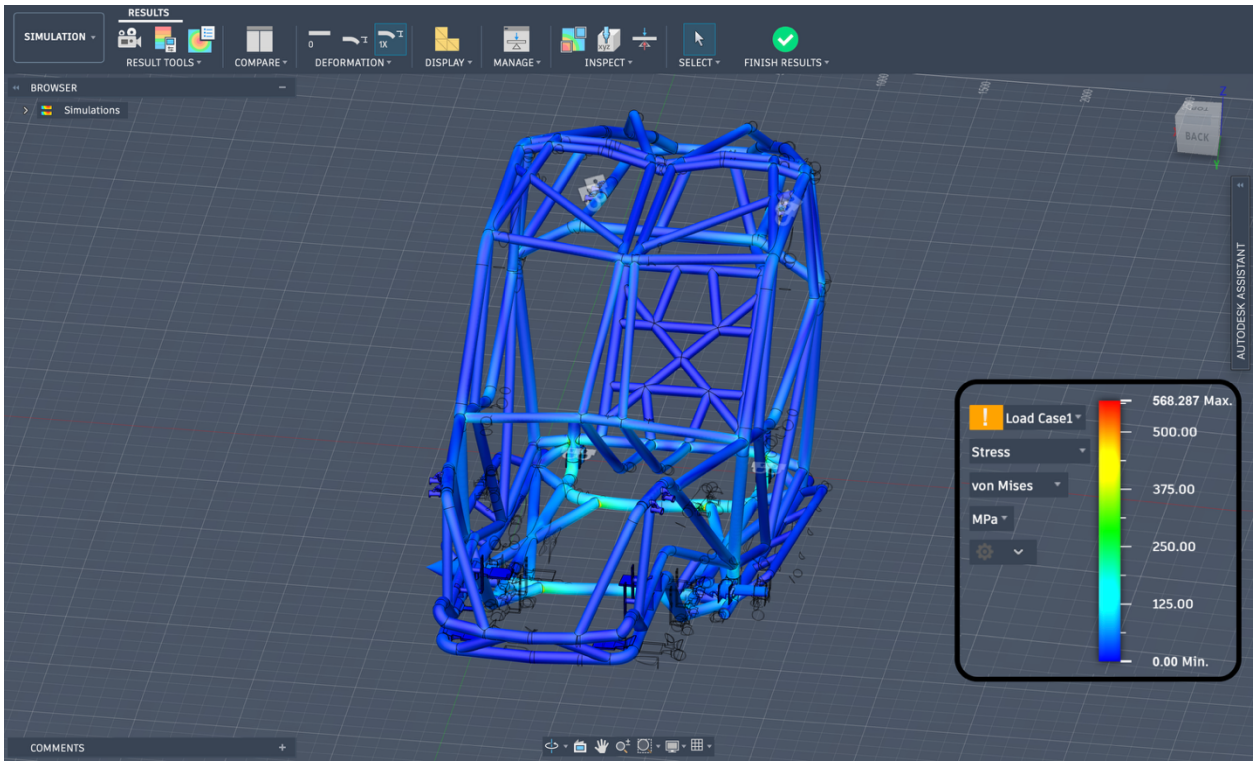
επίτευγμα. Ουσιαστικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας της τάξεως του 58 % πριν την εμφάνιση κάποιας μορφής πλαστικής παραμόρφωσης στο πλαίσιο.



Εικόνα 55 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

Συμπληρωματικά, η μέγιστη ισοδύναμη τάση Von Mises τάση που αναπτύσσονται στο χωροδικτύωμα υπολογίστηκε στα 568,287 MPa. Όπως γίνετε εμφανές και στην ακολουθεί εικόνα, η μέγιστη συγκέντρωση των τάσεων αυτών βρίσκεται στο κατώτερο τμήμα της σωληνωτής βάσης της κατασκευής, και συγκεκριμένα στους κόμβους (σημεία σύνδεσης) που σχηματίζουν γωνίες μεγαλύτερες των 90 °.

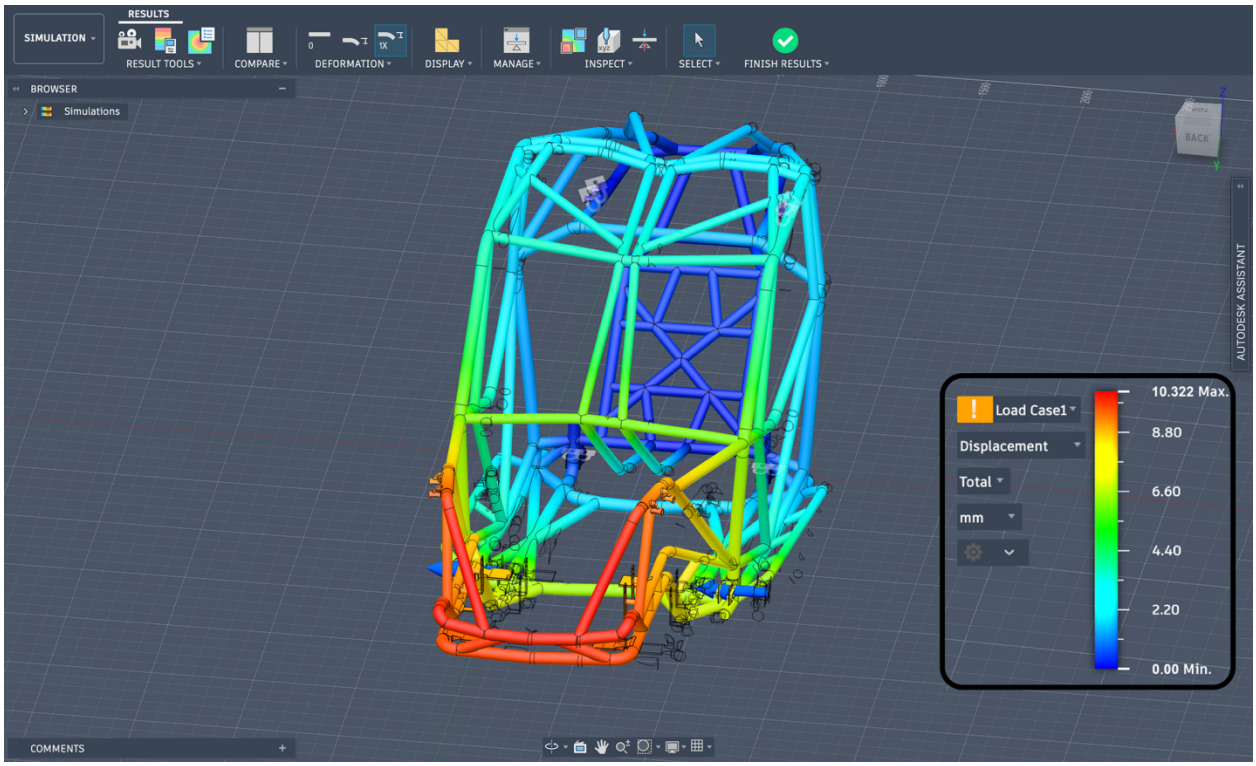
Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί πως το όριο διαρροής του επιλεχθέντος χάλυβα (steel AISI 4130 259 QT) ανέρχεται στα 900 MPa, σαφώς υψηλότερο από την μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση. Η μελέτη αυτή, υποδηλώνει την δυνατότητα του υλικού και της κατασκευής να παραλάβει τη φόρτιση, παραμένοντας στην ελαστική ζώνη παραμόρφωσης και συντηρώντας τον συντελεστή ασφαλείας σταθερό και μεγαλύτερο της μονάδας ($SF > 1$).



Εικόνα 56 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

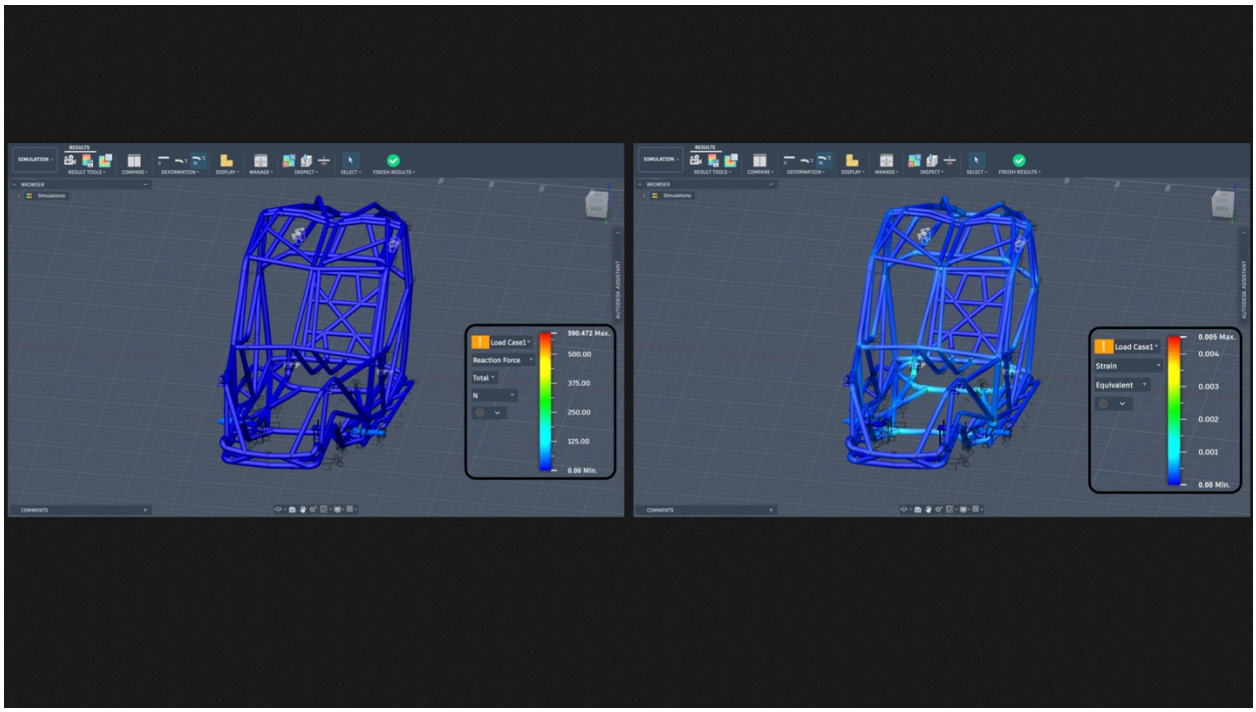
Επιπλέον, η ανάλυση των μετατοπίσεων αποκαλύπτει πως τα σημεία που δέχονται την μεγαλύτερη παραμόρφωση βρίσκονται στο εμπρόσθιο τμήμα του σασί (το τμήμα που βρίσκεται ο κινητήρας). Συγκεκριμένα, η μέγιστη πλευρική μετατόπιση υπολογίστηκε στα 10,322 mm ($\sim 1\ cm$). Αποτελεί τη μεγαλύτερη τιμή μετατόπισης που έχει εντοπιστεί μεταξύ όλων των στατικών αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτήν την κατασκευή. Με την εξέταση του γεγονότος αυτού, το όχημα συνολικού μήκους τεσσάρων μέτρων και δεχόμενο εγκάρσια καταπόνηση μεγέθους μεγαλύτερο των δυο τόνους στο εμπρόσθιο τμήμα του, σημειώνει μετατόπισης της τάξης του ενός εκατοστού, επιβεβαιώνει την υψηλή ακαμψία και στιβαρότητα του χωροδικτυώματος.

Παρ' όλα αυτά, οι αναλύσεις συνεχίστηκαν για την περαιτέρω ελαχιστοποιήσει της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα της θα αναλυθούν στην συνέχεια, απαρτίζεται στην ενσωμάτωση τριγωνικών ελασμάτων ενίσχυσης. Τα ελάσματα αυτά τοποθετήθηκαν στους κόμβους της κεντρικής βάσης του πλαισίου, όπου σύμφωνα με την ανάλυση, αποτελούν τα σημεία με την συγκέντρωση των υψηλότερων τάσεων (υπό την ακραία πλευρική φόρτιση των 22.000N).



Εικόνα 57 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

Τέλος, σε κάθε σημείο όπου επιβλήθηκε πάκτωση, υπολογίστηκε μέγιστη τοπική δύναμη αντίδρασης ίση με 590,472 N , ενώ η μέγιστη ισοδύναμη παραμόρφωση σε ποσοστό 0,5 %. Το συγκεκριμένο ποσοστό υποδεικνύει, πως στα τοπικά σημεία εντοπισμού του υπερβαίνετε το όριο ελαστικότητας του κράματος και εντάσσεται στην ζώνη της πλαστικής παραμόρφωσης. Όμως το φαινόμενο της πλαστικοποίησης επισημαίνεται τοπικά, με την συνολική κατασκευή να μην αντιμετωπίζει κίνδυνο δομικής αστοχίας. Σε ένα ακραίο σενάριο εγκάρσιας φόρτισης, το σασί επιδεικνύει υψηλή δομική απόκριση στο κεντρικό του τμήμα.

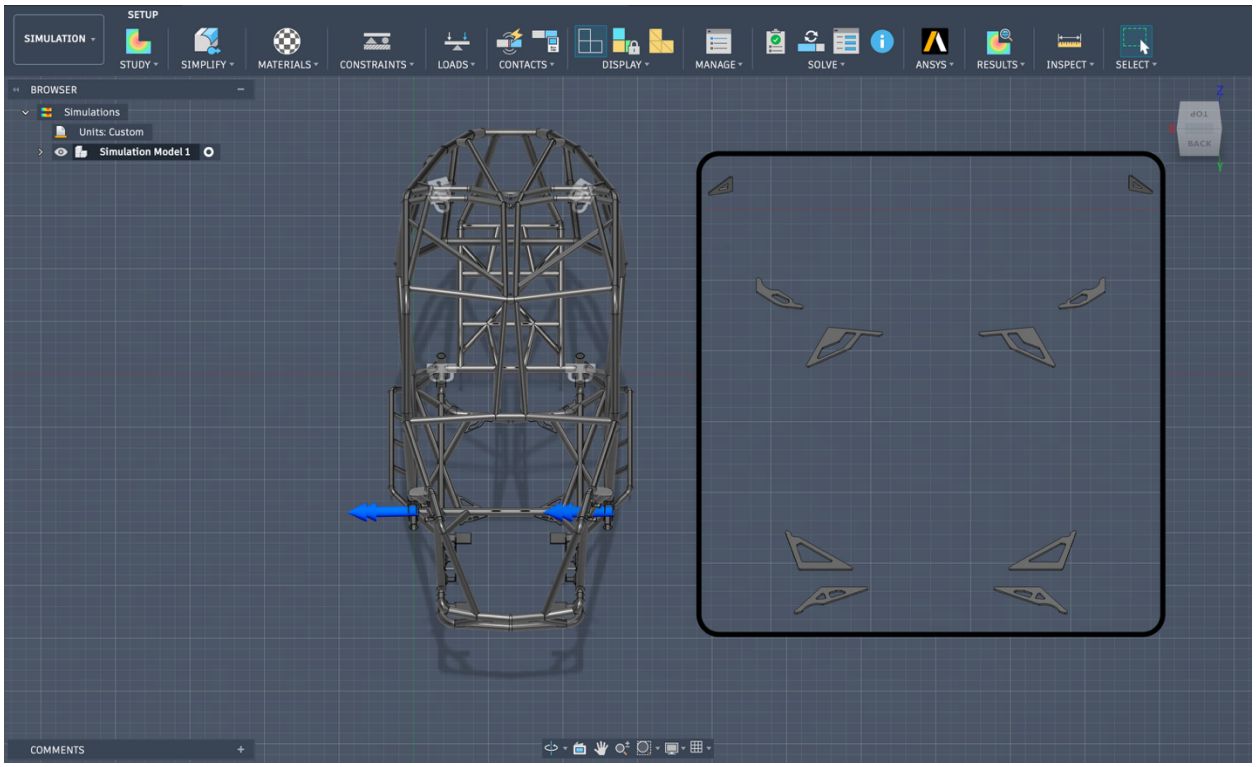


Εικόνα 58 Απεικόνιση της τοπικής μέγιστης δύναμης αντίδρασης και της ειδικής παραμόρφωσης του πλαισίου, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

6.3.6. Συγκριτική στατική ανάλυση πλευρικής κάμψης με χρήση ενισχυτικών ελασμάτων (Lateral bending with gusset plates)

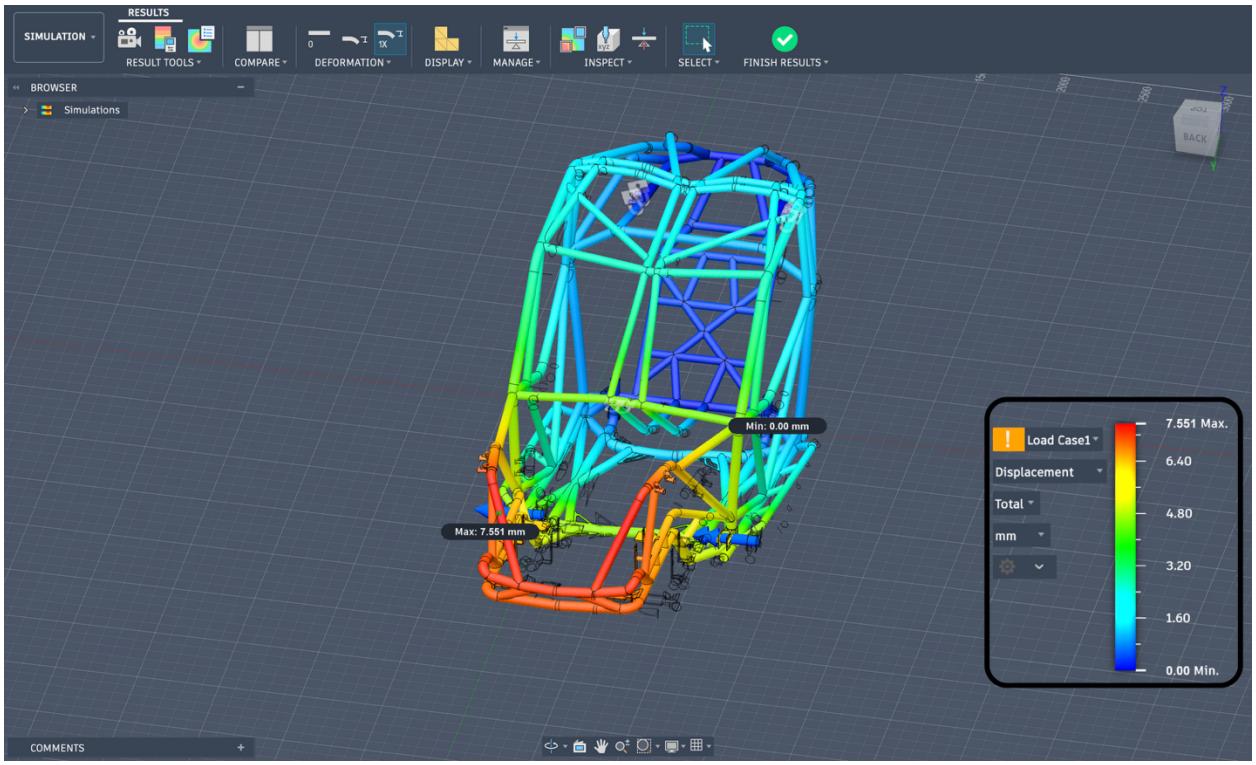
Όπως αποδείχθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, η στατική ανάλυση της πλευρικής κάμψης διεξήγαγε την υψηλότερη μέγιστη μετατόπιση, η οποία υπολογίστηκε στα 10,322 mm υπό φορτίο 22.000 N. Με πρωταρχικό στόχο την ενίσχυση της βάσης του κεντρικού τμήματος του πλαισίου, για την επίτευξη της μείωσης της μέγιστης μετατόπισης, πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση τριγωνικών ενισχυτικών ελασμάτων, πάχους 5 mm, στους πλέον αναδεικνυόμενους καταπονημένους κόμβους.

Στην συνέχεια, εκτελέστηκε συγκριτική στατική ανάλυση πλευρικής ακαμψίας, υπό την εφαρμογή των ίδιων συνοριακών συνθηκών και φορτίσεων, για τον έλεγχο επιρροής των ελασμάτων στην δομική απόκριση της κατασκευής.



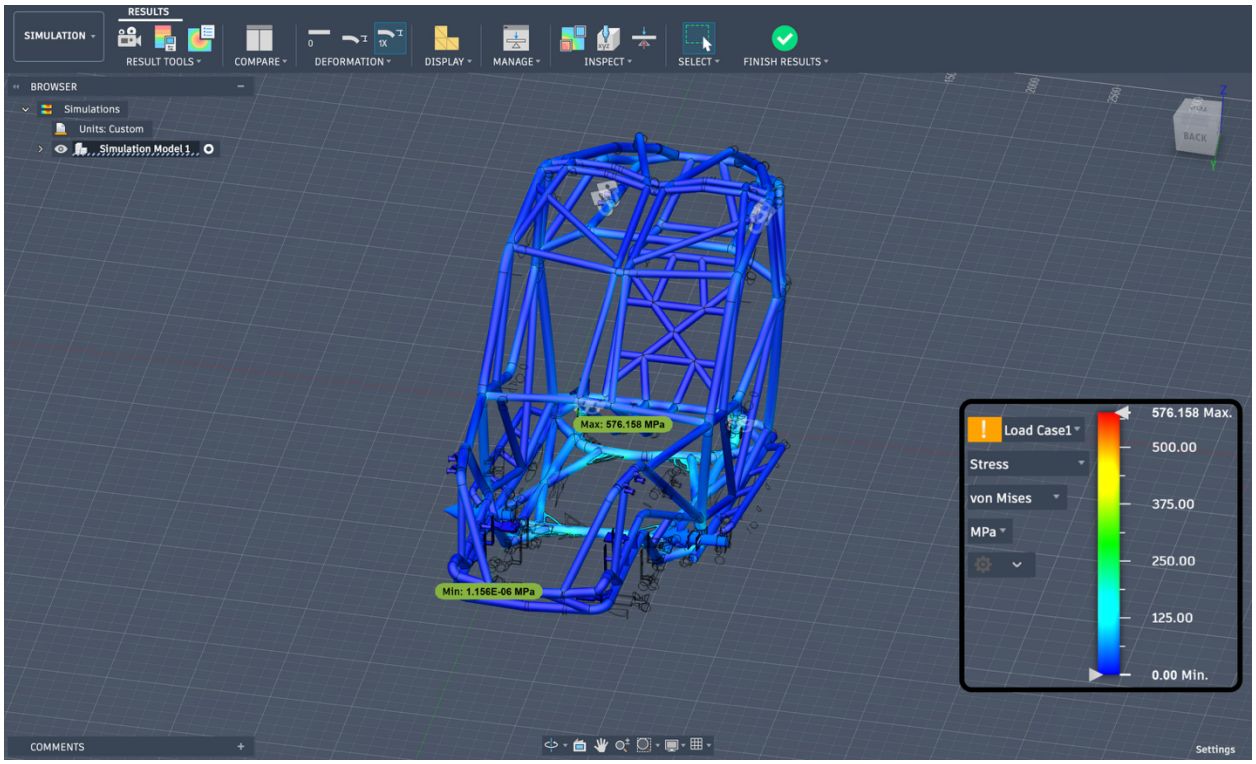
Εικόνα 59 Απεικόνιση της ανάλυσης της πλευρικής κάμψης του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης.

Στην εικόνα 60, απεικονίζονται τα αποτελέσματα των νέων αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων στο βελτιστοποιημένο δικτυωτό πλαίσιο. Η καταγραφή της νέας μέγιστης πλευρικής μετατόπισης ανέρχεται σε 7,551 mm. Συγκρίνοντας αυτήν την τιμή με την αρχική παραμόρφωση (10,322 mm), επιβεβαιώνεται μια προφανής μείωση της τάξεως του 26,8 %. Το συγκεκριμένα αποτελέσματα, πιστοποιεί πως η ενσωμάτωση των ελασμάτων, βοήθησε ως προς την δομική ενίσχυση του πλαισίου, περιορίζοντας αισθητά τις πλευρικές μετατοπίσεις στο εμπρόσθιο τμήμα του.



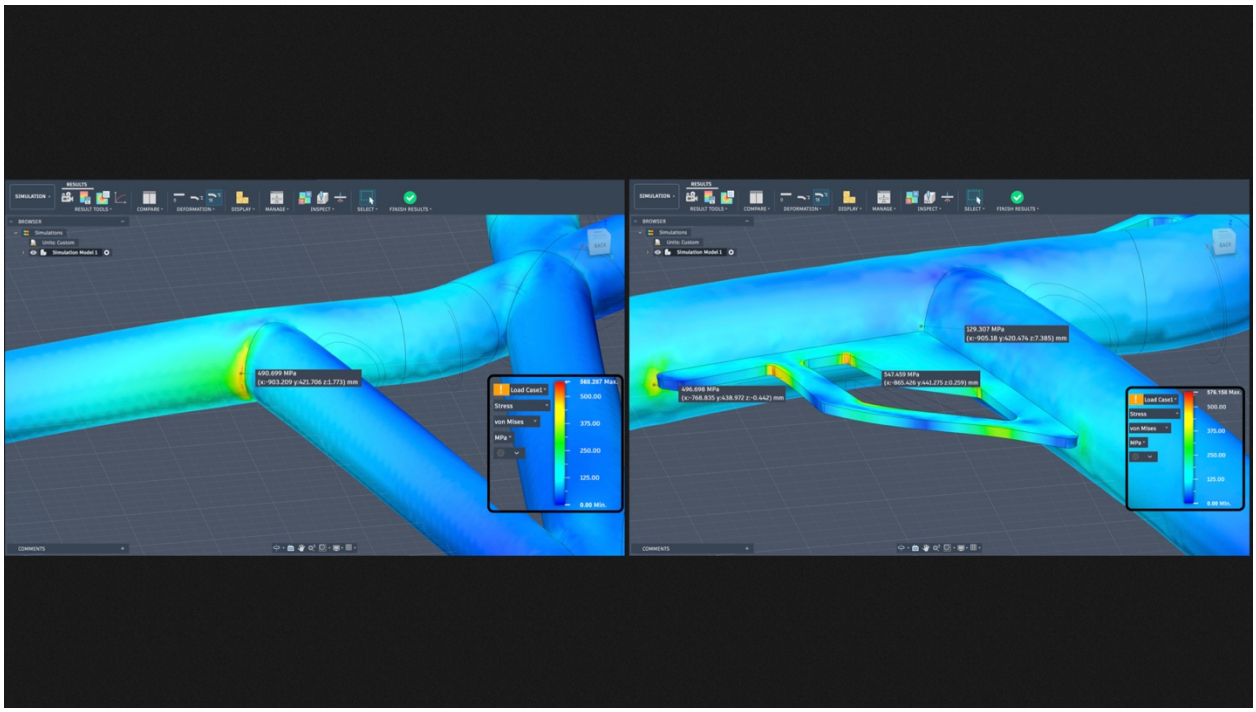
Εικόνα 60 Απεικόνιση της μέγιστης τοπικής μετατόπισης του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

Συμπληρωματικά, η μέγιστη ισοδύναμη τάση Von Mises, εμφανίζει μια αμελητέα αύξηση, μεγέθους 576,158 MPa. Η αρχική αντίστοιχη τάση υπολογίστηκε στα 568,287 MPa, δηλαδή προκύπτοντας μια αύξηση κατά 1,4 %. Πρακτικά, μπορεί να αυξάνεται τοπικά στους κόμβους η ακαμψία, περιορίζοντας σε συνολικό βαθμό την εκτονωτική παραμόρφωση, όμως εμφανίζονται νέα σημεία συγκεντρώσεων τάσεων στις άκρες και τις ενώσεις των ελασμάτων με τα σωληνωτά τμήματα.



Εικόνα 61 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises του δικτυωτού πλαισίου με ενσωματωμένα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, για την ανάλυση της πλευρικής του κάμψης.

Η οριακή αύξηση της μέγιστης τάσης έχει άμεση συνέπεια στον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, μεταβάλλοντας τον στο 1,562 (από $SF = 1{,}584$). Επιβεβαιώνεται ο χαρακτηρισμός «αμελητέα» αύξηση μέγιστης τάσης, καθώς ο συντελεστής ασφαλείας διατηρείτε σταθερά μεγαλύτερος του 1,5, διασφαλίζοντας ένα περιθώριο μεγαλύτερο του 50 % για την ανάπτυξη πλαστικής διαρροής.



Εικόνα 62 Απεικόνιση της σύγκρισης των συγκεντρωτικών τάσεων σε κόμβο του κατώτερου τμήματος του πλαισίου, πριν και μετά την ενσωμάτωση τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης.

7. Δυναμική ανάλυση του πλαισίου και τοπολογική βελτιστοποίηση των επιμέρους εξαρτημάτων του

7.1. Εισαγωγή στην φιλοσοφία της τοπολογικής βελτιστοποίηση και της μείωσης μάζας

Κατά τον σχεδιασμό ενός εκτός δρόμου οχήματος κατηγορίας «Trophy Truck», η συνολική μάζα αποτελεί τον πλέον καθοριστικό παράγοντα για τις τελικές δυναμικές του επιδόσεις. Σύμφωνα με τις θεμελιώδεις αρχές της δυναμικής, η ελαχιστοποίηση της μάζας προσφέρει άμεση βελτίωση στην επιτάχυνση και στην συνολική οδική συμπεριφορά, βελτιστοποιώντας την αναλογία ισχύος και βάρους, με δεδομένη τη σταθερή απόδοση του κινητήρα. Η στοχευμένη μείωση του βάρους σε κομβικά δομικά εξαρτήματα του δικτυωτού πλαισίου, όπως είναι οι βάσεις στήριξης των αναρτήσεων, επιφέρει δραστική μείωση της συνολικής αναρτώμενης μάζας, γεγονός που συμβάλλει στην αναβάθμιση των δυναμικών χαρακτηριστικών του οχήματος.

Ωστόσο, η εφαρμογή αυθαίρετων μεθόδων αφαίρεσης υλικού δύναται να οδηγήσει σε δραστική υποβάθμιση της ακαμψίας του πλαισίου, προκαλώντας επικίνδυνες τοπικές

συγκεντρώσεις τάσεων και σε δομική αστοχία. Για τον λόγο αυτό, στη σύγχρονη μηχανολογική προσέγγιση, τον πρωτεύοντα ρόλο διαδραματίζει η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization). Στη συγκεκριμένη υπολογιστική μέθοδο, δεν επιδιώκεται απλώς άσκοπη ελάττωση του βάρους, αλλά μια μαθηματική στοχευμένη ανακατανομή του υλικού εντός του σχεδιαστικού χώρου, με σκοπό τη μεγιστοποίηση του λόγου ακαμψίας προς μάζα.

Ουσιαστικά, η διαδικασία αυτή επιβάλει αφαίρεση υλικού στις περιοχές των εξαρτημάτων όπου δεν υφίστανται σημαντική μηχανική καταπόνηση κατά την εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων. Αντιθέτως, διατηρείται απαρέγκλιτα ο απαιτούμενος όγκος υλικού στις περιοχές όπου σημειώνονται υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων, για την διασφάλιση των υποχρεωτικών ροών των φορτίων. Για την παραγωγή των εναλλακτικών και βέλτιστων εξαρτημάτων, αξιοποιήθηκαν δύο προηγμένα υπολογιστικά εργαλεία του λογισμικού Autodesk Fusion 360, η «Τοπολογική Βελτιστοποίηση (Shape Optimization)» και η «Παραγωγική Σχεδίαση (Generative Design)».

Μέσω των συγκεκριμένων υπολογιστικών μεθόδων, πραγματοποιήθηκε ο ανασχεδιασμός στις βάσεις των αναρτήσεων και στα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, με απώτερο σκοπό την απομάκρυνσης της πλεονάζουσας μάζας. Στην παρούσα ενότητα θα αναδείχνουν με λεπτομέρεια οι εφαρμογές των δυο μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Επιπλέον, θα παρουσιαστούν οι συγκριτικές στατικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες πιστοποιούν την διατήρησης της δομικής ακαμψίας των εξαρτημάτων, καθώς και η τελική δυναμική επαλήθευση ολόκληρου του δικτυωτού πλαισίου.

7.2. Θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης που τέθηκαν σε εφαρμογή

Το υπολογιστικό εργαλείο «Shape Optimization» του λογισμικού αποτελεί μια χαρακτηριστική εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης. Το θεωρητικό υπόβαθρο του στηρίζεται πλήρως στη μαθηματική μέθοδο SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization, Συμπαγές ισότροπο υλικό με επιβολή ποινής). Όπως έχει ήδη αναλυθεί στην 1^{η} ενότητα, στην μέθοδο αυτή ο σχεδιαστικός χώρος διαχωρίζεται σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάθε μεμονωμένο στοιχείο γίνετε αντιστοιχίσει με μια μεταβλητή σχετικής πυκνότητας όπου εντός αυτού του πεδίου ενσωματώνεται μια μεταβλητή σχετικής πυκνότητας, η οποία τίθεται να λάβει συνεχείς τιμές στο διάστημα από 0 (απουσία υλικού) έως 1(πλήρως συμπαγές υλικό).

Πρακτικά, ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την ενδοτικότητα του εξαρτήματος για ένα προκαθορισμένο όριο μάζας, απομακρύνοντας το υλικό από τις περιοχές οι οποίες δεν

αναπτύσσουν τάσεις και συνεπώς, δεν συμβάλλουν στη μεταφορά των φορτίων. Η συγκεκριμένη υπολογιστική διαδικασία εφαρμόστηκε στα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, καθώς πρόκειται για δομικά στοιχεία με καθορισμένες κατευθύνσεις φόρτισης στο επίπεδο τους.

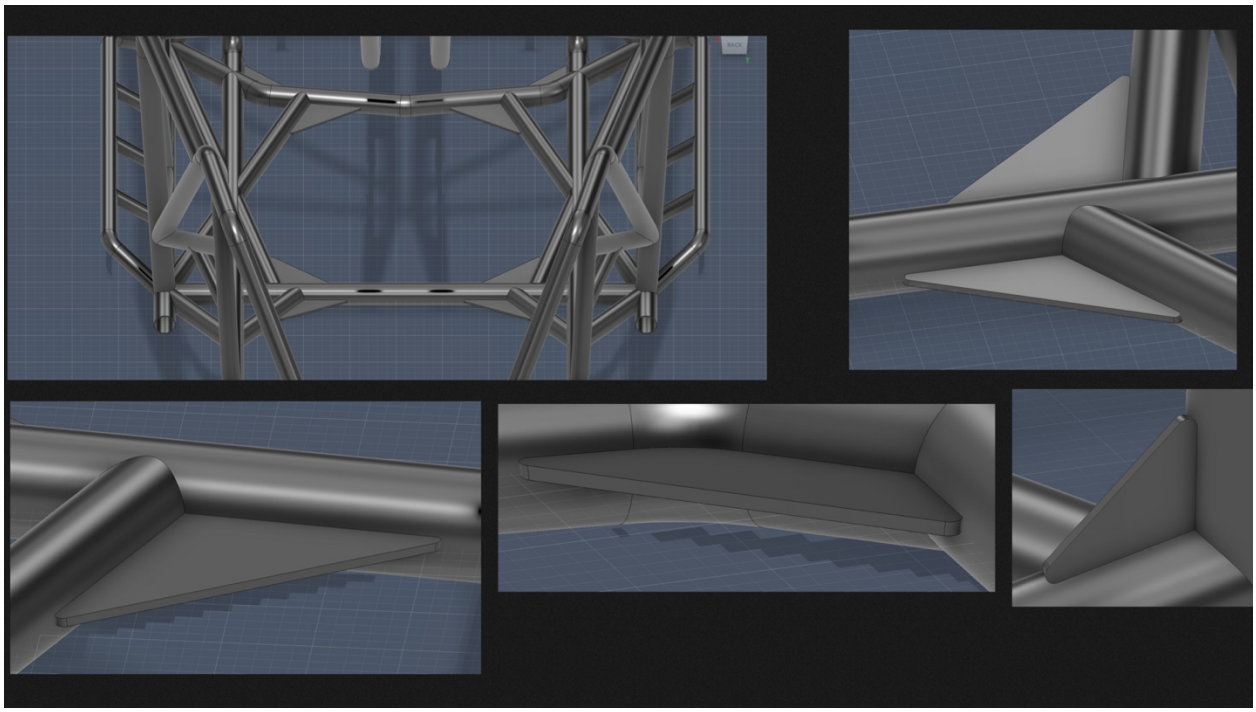
Για τις βάσεις στήριξης των αναρτήσεων, δεδομένου ότι υπόκεινται σε πολύπλοκα και πολυαξονικά φορτία, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο του παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design). Το θεωρητικό υπόβαθρο του συγκεκριμένου αλγορίθμου στηρίζεται σε μια παραλλαγή της μαθηματικής μεθόδου των Ισοσταθμικών συνόλων (LSM, Level Set Method). Πρακτικά η προσέγγιση αυτή παρακολουθεί δυναμικά την εξέλιξη της επιφάνειας κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, επιτρέποντας τον σαφή καθορισμό και την άμεση παραγωγή αυστηρών γεωμετρικών ορίων για την τελική κατασκευή.

Ταυτόχρονα, το συγκεκριμένο εργαλείο ενσωματώνει Πολυκριτηριακούς εξελικτικούς αλγόριθμους (Multi Objective Evolutionary Algorithms) για την περαιτέρω διερεύνηση του σχεδιαστικού χώρου του εξαρτήματος. Κατά τη διαδικασία του παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design) το λογισμικό δεν περιορίζεται στην αφαίρεση υλικού. Αντιθέτως, αναπτύσσει νέες, βελτιστοποιημένες οργανικές μορφές, υπό την επιβολή αυστηρών σχεδιαστικών και κινηματικών περιορισμών. Η παραγωγή των μορφών αυτών αναπτύσσονται αυστηρά από τον προκαθορισμό γεωμετριών διατήρησης (Preserve Geometries), περιοχές που απαιτείται η ύπαρξη υλικού για λόγους σύνδεσης και γεωμετρικών εμποδίων (Obstacle Geometries), οι οποίες ορίζουν την απαγορευμένη περιοχή λόγω ύπαρξης άλλων εξαρτημάτων.

7.3. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης (Shape optimization) στα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Topology Optimization) που εφαρμόστηκε στα επίπεδα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, τα οποία ενσωματώνονται στους κόμβους του κατώτερου τμήματος του δικτυωτού πλαισίου. Στόχος της εν λόγω μεθοδολογίας είναι η στοχευμένη αφαίρεση της περιττής μάζας από τα συγκεκριμένα εξαρτήματα, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση της δομικής τους ακαμψίας και της παραλαβής των επιβαλλόμενων φορτίων.

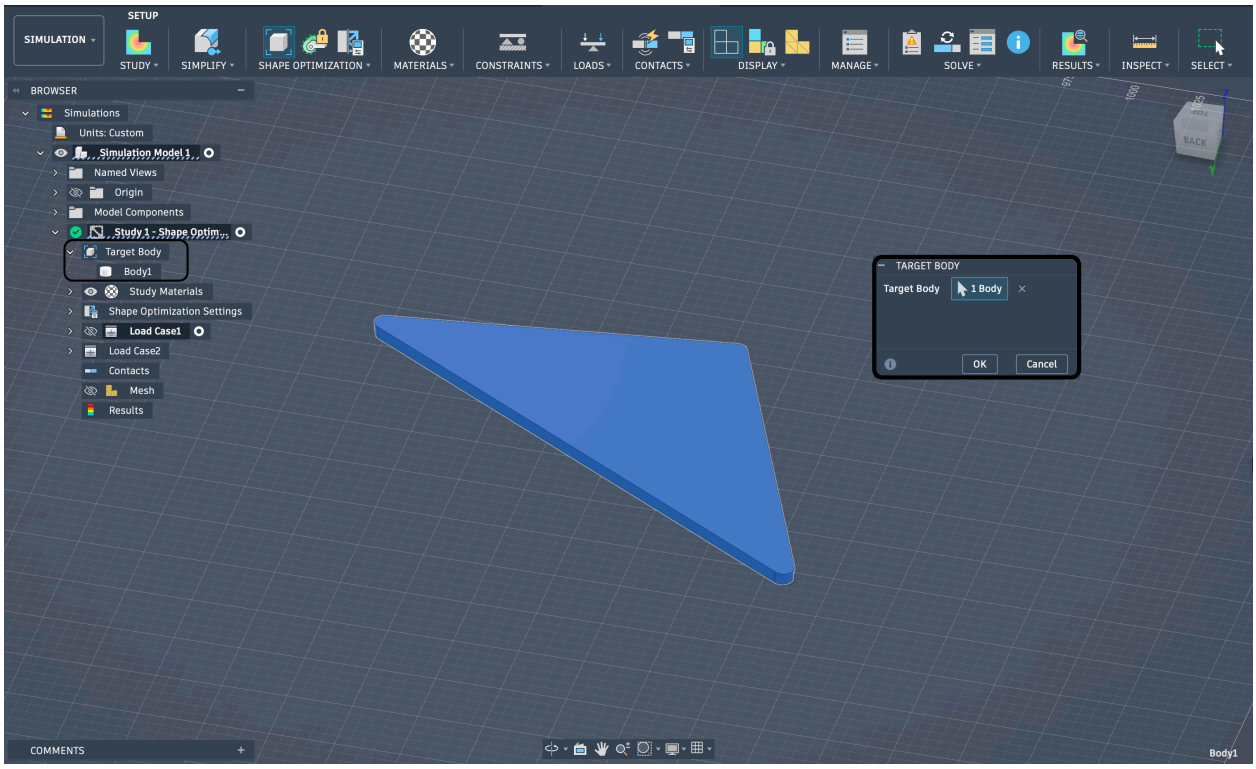
Το δικτυωτό πλαίσιο ενισχύθηκε με δέκα (10) επίπεδα τριγωνικά ελάσματα διαφορετικών διαστάσεων, τα οποία διέθεταν σταθερό πάχος ίσο με 5mm. Στο σύνολο όλο αυτών των τριγωνικών εξαρτημάτων εφαρμόστηκε επιτυχώς η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Shape Optimization).



Εικόνα 63 Απεικόνιση όλων των αρχικών τριγωνικών ελασμάτων ενίσχυσης του δικτυωτού πλαισίου.

Θα παρουσιαστεί όλη η διαδικασία αφαίρεσης υλικού για ένα τριγωνικό έλασμα (δεδομένου ότι η εν λόγω μεθοδολογία παραμένει πανομοιότυπη για το σύνολο των εξαρτημάτων). Στο τέλος, θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των συγκριτικών στατικών αναλύσεων επί του συγκεκριμένου ελάσματος, πριν και μετά τη βελτιστοποίηση, προκειμένου να πιστοποιηθεί η διατήρηση της δομικής του ακαμψίας και αντοχής.

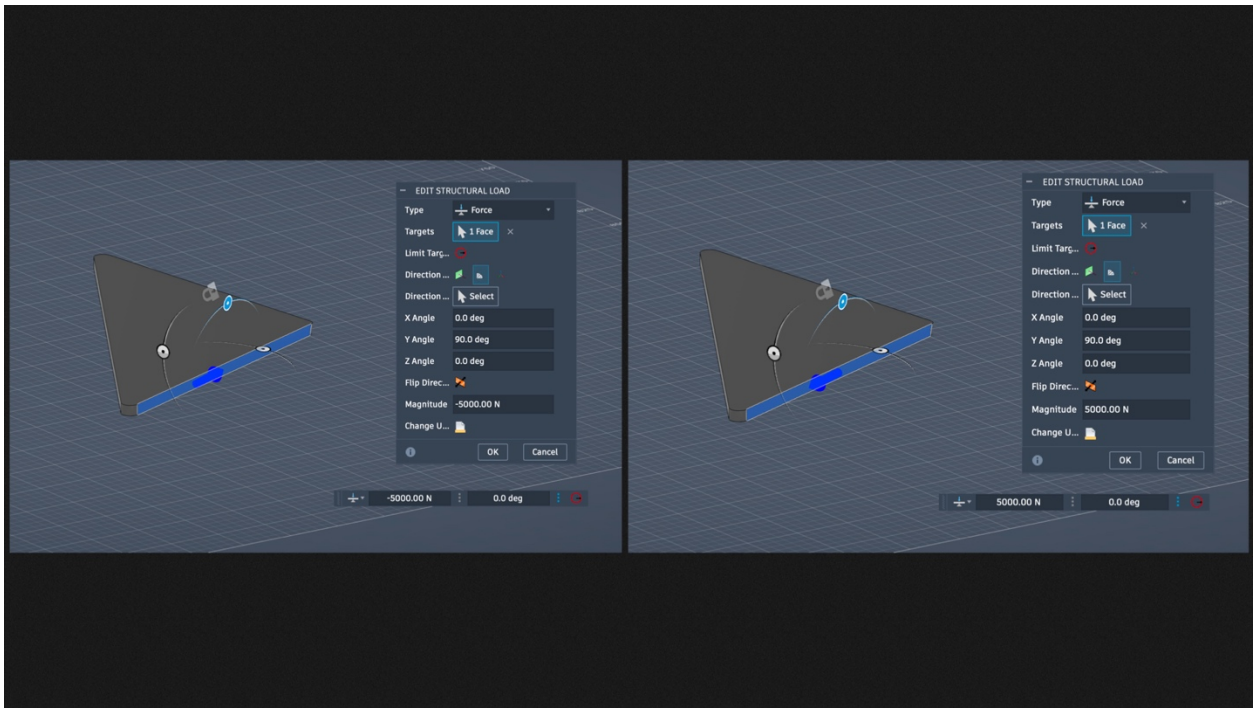
Για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του λογισμικού Autodesk Fusion 360. Ειδικότερα, εντός του χώρου εργασίας προσομοίωσης (Simulation), ενεργοποιήθηκε το υπολογιστικό εργαλείο «Shape Optimization». Το πρωταρχικό βήμα της διαδικασίας ήταν στον καθορισμό του σχεδιαστικού χώρου (Design Space).



Εικόνα 64 Απεικόνιση του ορισμού χώρου εργασίας για την εφαρμογή της διαδικασίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

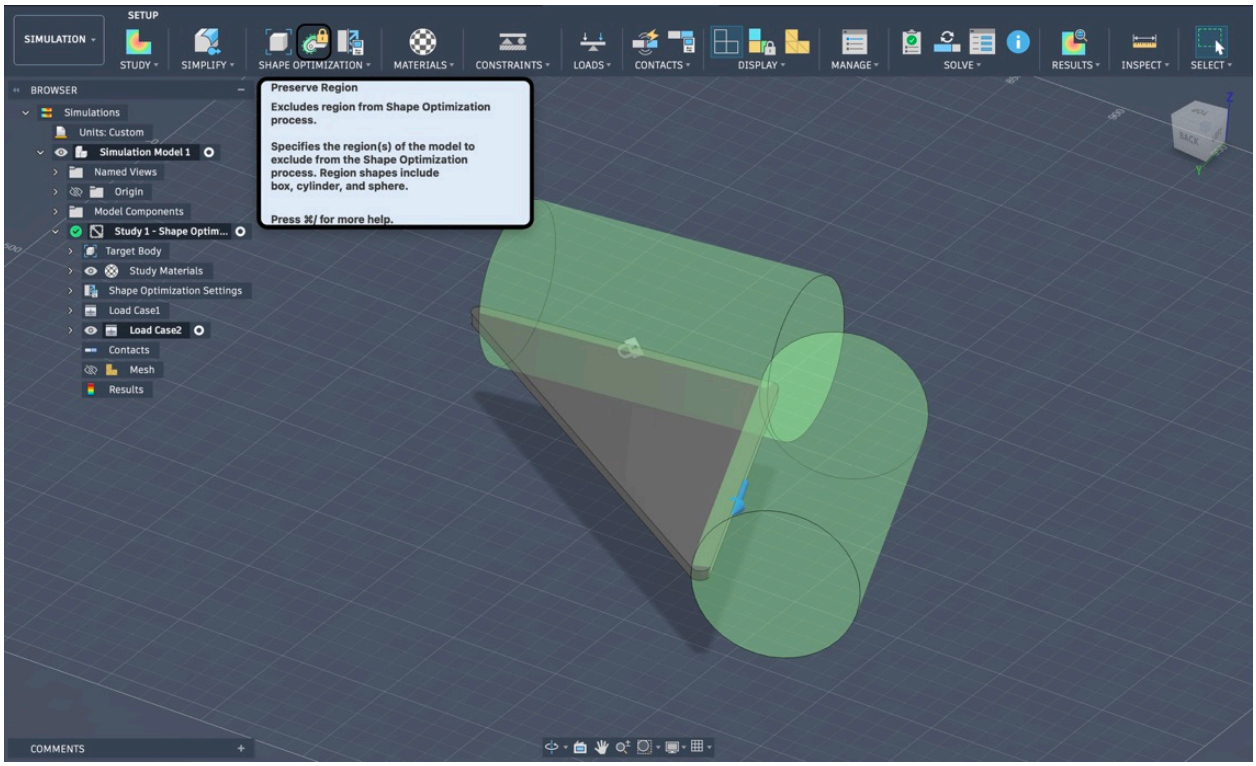
Μέσω της εντολής «Target body», το έλασμα ορίστηκε ως ο διαθέσιμο σχεδιαστικός χώρος (Design Space) για την υλοποίηση της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης στα οποία υπόκεινται το δομικό στοιχείο υπό ρεαλιστικές συνθήκες φόρτισης. Συγκεκριμένα στη μια ακμή του τριγωνικού ελάσματος επιβλήθηκε πάκτωση, καθώς προσομοιώνει τη σταθερή ραφή συγκόλλησης επί του σωλήνα του δικτυωτού πλαισίου. Αντιθέτως, στην άλλη ακμή εφαρμόστηκαν δυο διακριτές περιπτώσεις στατικής καταπόνησης.

Και στα δυο σενάρια φόρτισης, το μέτρο της επιβαλλόμενης δύναμης ανέρχεται σε 5.000 N, με παράλληλη διεύθυνση ως προς την ακμή διεπαφής μεταξύ του ελάσματος και του σωλήνα. Για την πληρέστερη προσομοίωση του εναλλασσόμενου χαρακτήρα των καταπονήσεων, τα σενάρια που ορίστηκαν είναι αντίρροπα. Ειδικότερα το πρώτο σενάριο (Load Case 1) προσομοιώνει την καταπόνηση της θλίψης μέσω ενός φορτίου αρνητικής φοράς, ενώ το δεύτερο σενάριο (Load Case 2) εξετάζει την περίπτωση του εφελκυσμού με την επιβολή ισόποσο φορτίου θετικής φοράς.



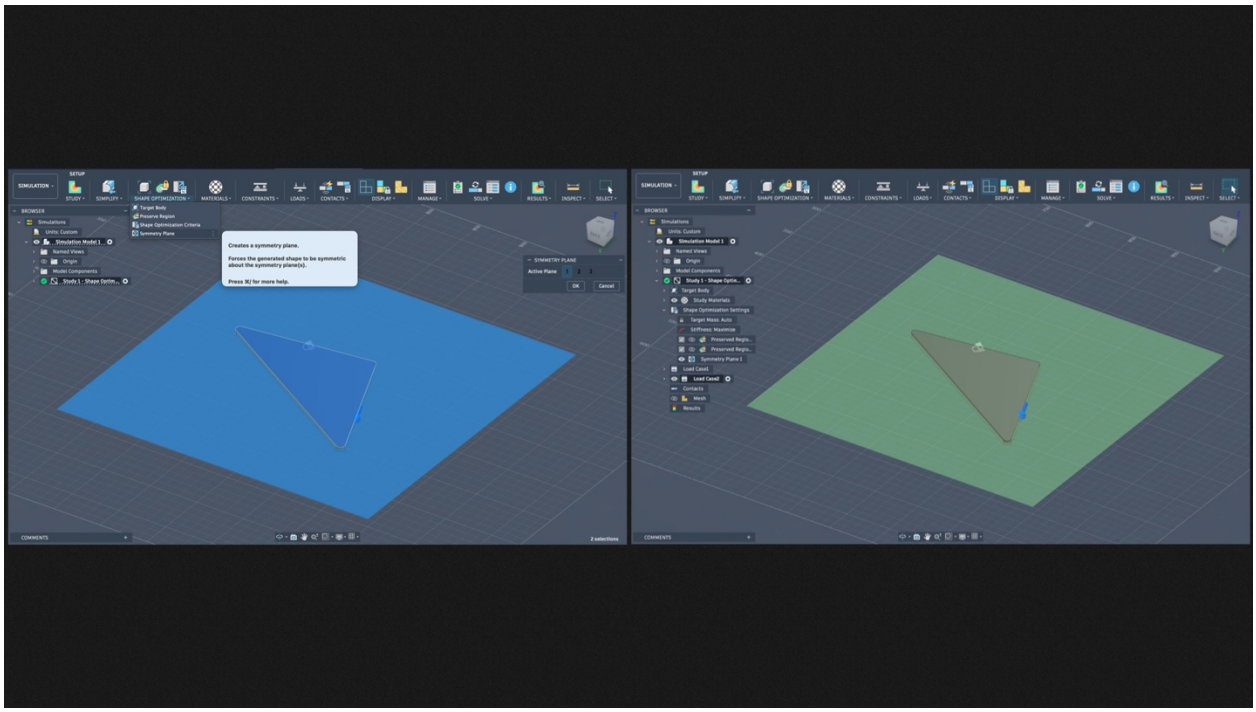
Εικόνα 65 Απεικόνιση του καθορισμού των δυο σεναρίων φόρτισης του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Για την διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας στους κόμβους σύνδεσης με τους σωλήνες του πλαισίου, έγινε χρήση της εντολής των περιοχών διατήρησης (Preserve Region). Η συγκεκριμένη παράμετρος κρίνεται ζωτικής σημασίας, καθώς εξασφαλίζει ότι στα κρίσιμα σημεία διεπαφής, θα παραμείνει ανέπαφος ο αρχικός όγκος και το πάχος του υλικού. Πρακτικά, στις περιοχές αυτές, τοποθετήθηκαν δυο επικαλυπτόμενοι κυλινδρικοί όγκοι, οι οποίοι λειτούργησαν ως γεωμετρικοί περιορισμοί, αποτρέποντας τον αλγόριθμο από την αφαίρεση του υλικού στα συγκεκριμένα σημεία.



Εικόνα 66 Απεικόνιση του ορισμού των περιοχών διατήρησης του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

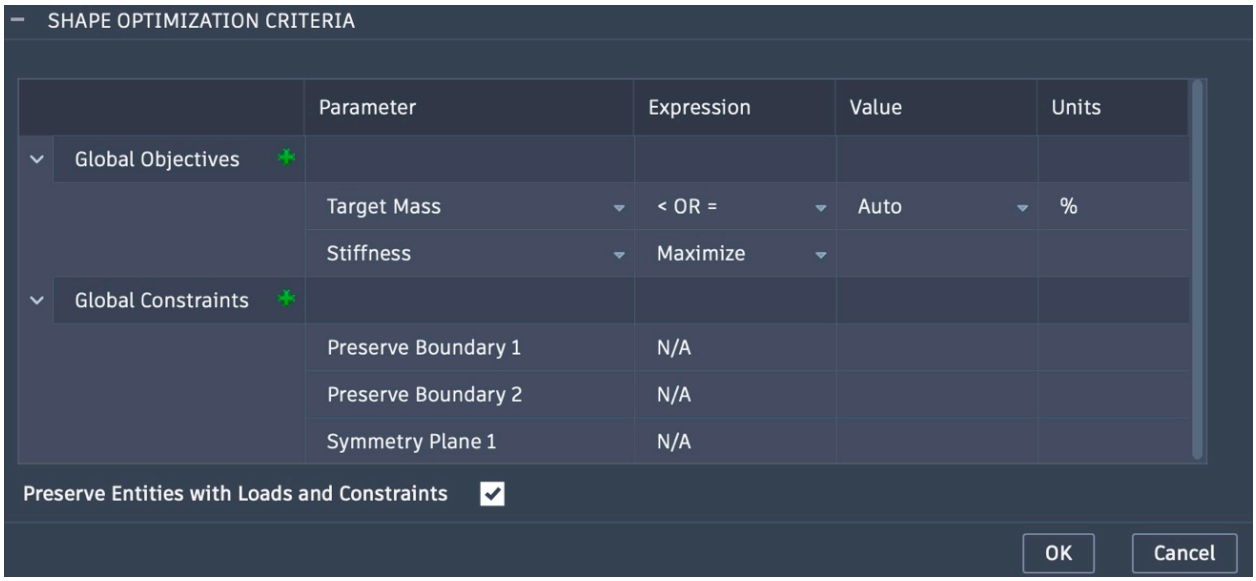
Επιπλέον, για την τελική κατασκευή του εξαρτήματος, κρίθηκε απαραίτητη η επιβολή του γεωμετρικού περιορισμού επίπεδης συμμετρίας (Symmetry Plane). Στόχος αυτής της ρύθμισης είναι η εξαγωγή ενός ομοιόμορφου πλέγματος (Mesh) που αποτυπώνει τον ενεργό όγκο υλικού που συμμετέχει στην παραλαβή των φορτίων. Η παράμετρος αυτή του αλγορίθμου «Shape Optimization» εξαναγκάζει το λογισμικό να κατανείμει το υλικό απολύτως συμμετρικά ως προς το μεσαίο επίπεδο του ελάσματος, κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Έτσι, αποτρέπεται η ανάπτυξη οπών στην μια μόνο πλευρά, δημιουργώντας μια τελική μορφή του εξαρτήματος πλήρη συμβατή με τις δισδιάστατες κατεργασίες κοπής προφίλ.



Εικόνα 67 Απεικόνιση της επιβολής του γεωμετρικού περιορισμού της επίπεδης συμμετρίας του τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Πριν από την εκτέλεση της τοπολογικής βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη η ρύθμιση των παραμέτρων της επίλυσης και ο καθορισμός των αντίστοιχων μαθηματικών αντικειμενικών συναρτήσεων. Η πρώτη παράμετρος, αφορά στη μεγιστοποίηση της ακαμψίας, η οποία στη μαθηματική διατύπωση μεταφράζεται ως η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας. Παράλληλα, λόγω μη προκαθορισμένου στόχου τελικής μάζας, επιλέχθηκε η αυτόματη ρύθμιση του αλγορίθμου. Με αυτόν τον τρόπο, το λογισμικό δεν προβαίνει σε ανεξέλεγκτη αφαίρεση υλικού, αλλά αναζητά την βέλτιστη γεωμετρική μορφή του εξαρτήματος, διατηρώντας τη δομική του ακαμψία.

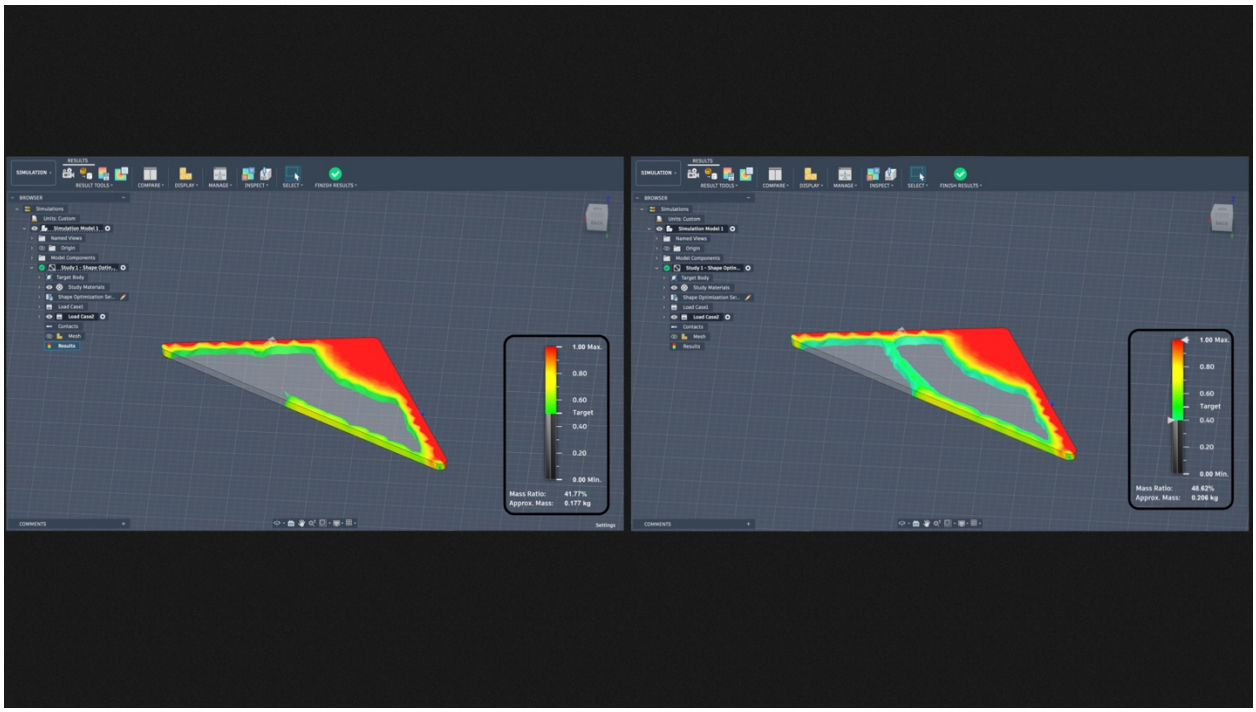
Επιπλέον, η δεύτερη κρίσιμη παράμετρος αφορά στην προστασία των συνοριακών συνθηκών. Με την ενεργοποίηση της, εξασφαλίζετε η διατήρηση της μάζας του δομικού στοιχείου στα σημεία όπου έχουν επιβληθεί τα φορτία των 5000 N, καθώς και οι περιοχές πλήρους πάκτωσης. Η συγκεκριμένη ρύθμιση διατηρήθηκε ενεργή, προκειμένου να αποτραπούν ενδεχόμενες αριθμητικές ανωμαλίες κατά τη διαδικασία της επίλυση, οι οποίες θα μπορούσαν να καταστήσουν τα τελικά αποτελέσματα άκυρα.



Εικόνα 68 Απεικόνιση της καρτέλας παραμέτρων, για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

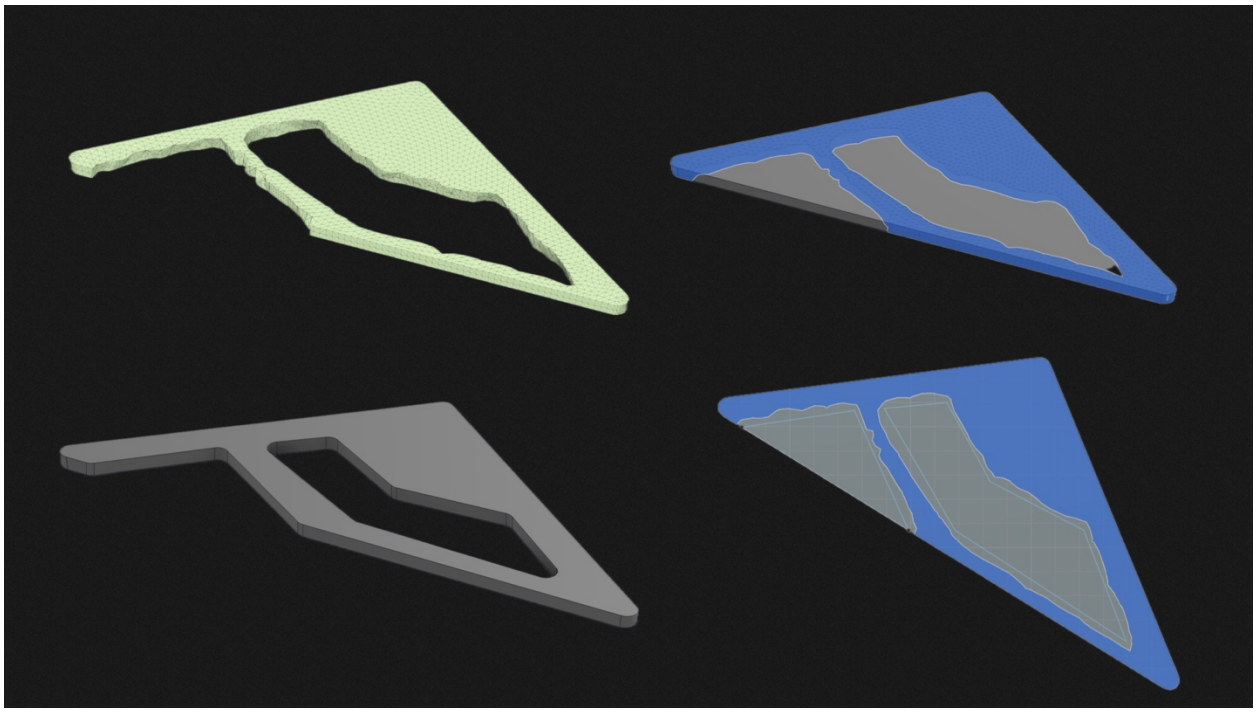
Έπειτα από την ολοκλήρωση της επίλυσης, το λογισμικό εξάγει το τριγωνικό έλασμα ενίσχυσης με χρωματισμούς, οι οποίοι αποτυπώνουν την κατανομή της σχετικής πυκνότητας του υλικού. Οι περιοχές με κόκκινους χρωματισμούς (με τη σχετική πυκνότητα να προσεγγίζει την τιμή 1) αναδεικνύουν τις κύριες διαδρομές μεταφοράς φορτίων και τα σημεία συγκέντρωσης υψηλών τάσεων. Η αρχική βέλτιστη λύση του αλγόριθμου προέβλεπε ένα θεωρητικό έλασμα το οποίο διατηρούσε το 41,77 % (Mass Ration) της αρχικής μάζας. Η υπόλοιπη μάζα (ποσοστό 58,23 %) εντοπίστηκε στις γκρι ζώνες του πλέγματος (dead weight), υποδεικνύοντας πως δεν συμμετέχουν ενεργά στη δομική ακαμψία του εξαρτήματος.

Παρόλα αυτά, η τελική σχεδιαστική επιλογή διαφοροποιήθηκε από την αρχική υπολογιστική πρόταση του λογισμικού. Για τη διασφάλιση του απαιτούμενου συντελεστή ασφαλείας του τριγωνικού ελάσματος, πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη αναπροσαρμογή του ορίου σχετικής πυκνότητας στο 0,40. Επί της ουσίας, διατηρήθηκε περισσότερο ποσοστό μάζας με το «Mass Ratio» να ανέρχεται στο 48,6 %, με το θεωρητικό βάρος να διαμορφώνεται στα 206 g (Αρχικός βάρος ανέρχεται σε 422,13 g).



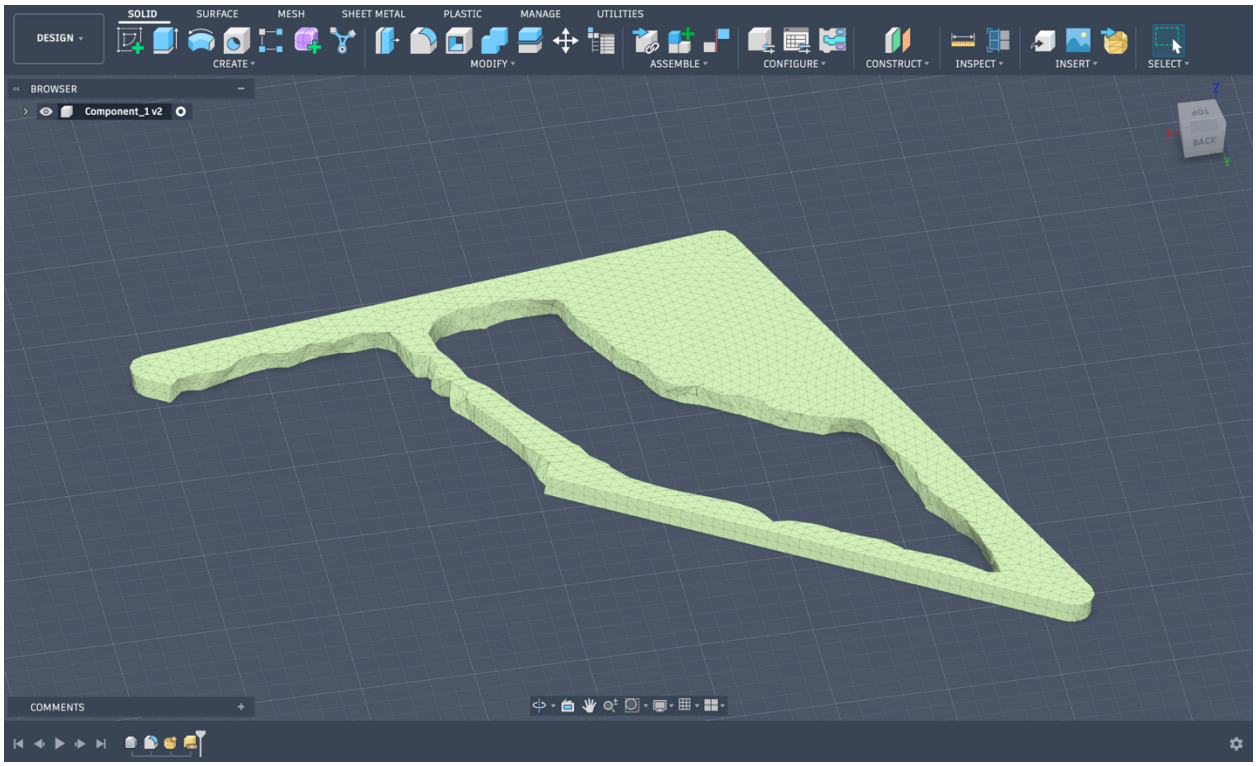
Εικόνα 69 Απεικόνιση δυο εκδοχών βέλτιστης κατανομή της σχετικής πυκνότητας, για την διεξαγωγή του βελτιστοποιημένου τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης.

Μετά την ολοκλήρωση του καθορισμού του κατωφλιού σχετικής πυκνότητας, ακολουθεί η προώθηση του προκύπτοντος πλέγματος στον αρχικό σχεδιαστικό χώρο (Design Workspace). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εντολή «Promote», η οποία εντοπίζεται στην καρτέλα «Results Tools». Έπειτα, με την χρήση του πλέγματος ως γεωμετρικό οδηγό, πραγματοποιήθηκε ο τελικός ανασχεδιασμός του εξαρτήματος μέσω δισδιάστατου σκαριφήματος (Sketch) και της εντολής εξώθησης (Extrude). Τέλος, για την αποφυγή επικίνδυνων συγκεντρώσεων τάσεων στην τελική κατασκευή, προστέθηκαν ομαλές καμπύλες (Fillets) σε όλες τις εσωτερικές αιχμηρές γωνίες της νέας, βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.



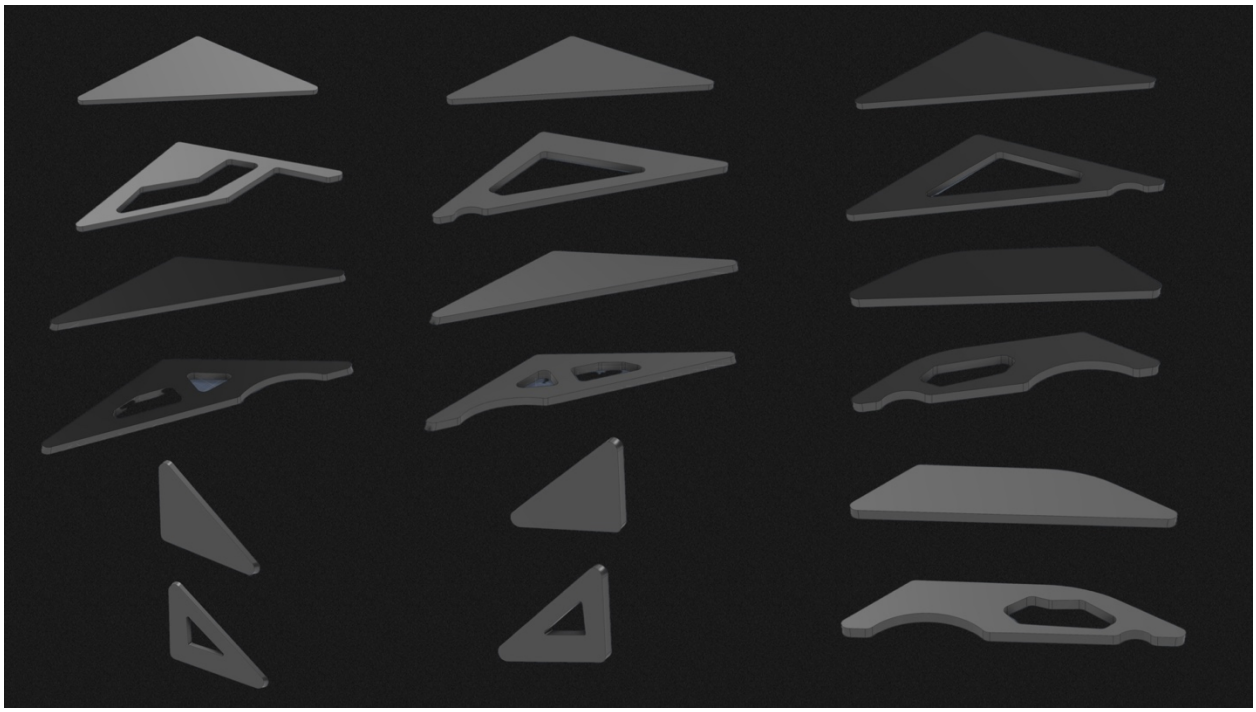
Εικόνα 70 Απεικόνιση για την διεξαγωγή του βελτιστοποιημένου τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης.

Το βάρος του τελικού, ανασχεδιασμένου τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης ανέρχεται σε 262,397 g. Η συγκεκριμένη τιμή προσεγγίζει κατά 78,5 % το θεωρητικό βάρος του παραγόμενου πλέγματος της σχετικής πυκνότητας. Συνολικά η διαδικασία, οδήγησε σε ποσοστό μείωσης μάζας κατά 37,84 %, συγκριτικά με την αρχική συμπαγή κατάσταση του εξαρτήματος.



Εικόνα 71 Απεικόνιση του παραγόμενου πλέγματος πυκνότητας για την διεξαγωγή του τελικού τριγωνικού ελάσματος ενίσχυσης.

Όπως έχει γίνει ήδη αναφορά, στα 9 υπόλοιπα τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, έχει εφαρμοστεί η ίδια ακριβώς μεθοδολογία τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αθροιστικά, όλα τα ελάσματα οδηγήθηκαν σε σημαντική αφαίρεση της πλεονάζουσας μάζας, επιτυγχάνοντας ουσιαστική εξοικονόμηση υλικού.



Εικόνα 72 Απεικόνιση όλων των αρχικών και των βελτιστοποιημένων ενσωματωμένων τριγωνικών ελασμάτων ενίσχυσης του δικτυωτού πλαισίου.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για όλα τα ελάσματα, αναδεικνύοντας τη μεταβολή της μάζας και το ποσοστό απώλειας βάρους που επιτεύχθηκε ανά εξάρτημα.

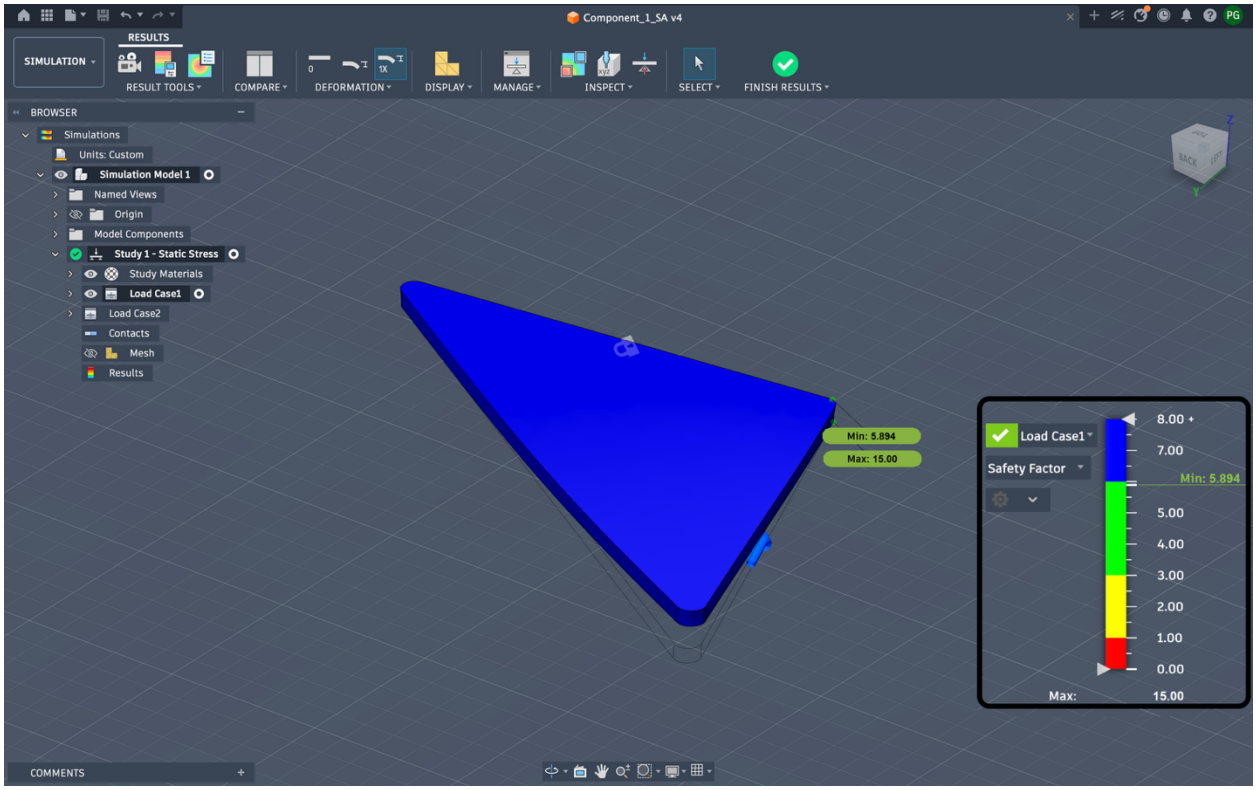
Τριγωνικά Ελάσματα	Αρχική Μάζα (g)	Τελική Μάζα (g)	Ποσοστό Απώλειας (%)
1	422,13	262,397	38,84
2	422,13	256,467	39,24
3	392,957	263,497	32,94
4	392,954	261,57	33,43
5	258,642	198,663	23,19
6	258,649	198,872	25,43
7	182,199	128,086	29,7
8	182,203	125,735	30,99
9	65,929	57,248	13,17
10	67,678	58,727	13,22
Συνολικά	2.645,381	1.811,262	31,53

Πίνακας 2 Συγκριτικός πίνακας της μάζας των τριγωνικών ελασμάτων πριν και μετά την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

7.3.1. Συγκριτική στατική αξιολόγηση και αποτίμηση μείωσης βάρους τριγωνικού ελάσματος

Μετά την ολοκλήρωση του παραμετρικού ανασχεδιασμού, εκτελέστηκε μια τελική στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων προς πιστοποίηση της δομικής ακαμψίας και αντοχή του νέου ελάσματος. Ο συγκεκριμένος έλεγχος λειτουργεί ως το τελικό στάδιο επαλήθευσης. Ουσιαστικά, πραγματοποιείται μια άμεση σύγκριση της μηχανικής απόκρισης μεταξύ του αρχικού, συμπαγούς τριγωνικού ελάσματος και της τελικής ανασχεδιασμένη εκδοχή του, υπό τις ίδιες ακριβώς συνοριακές συνθήκες φόρτισης (επιβολή αντίρροπων καταπονήσεων εφελκυσμού και θλίψης, μεγέθους 5.000 N).

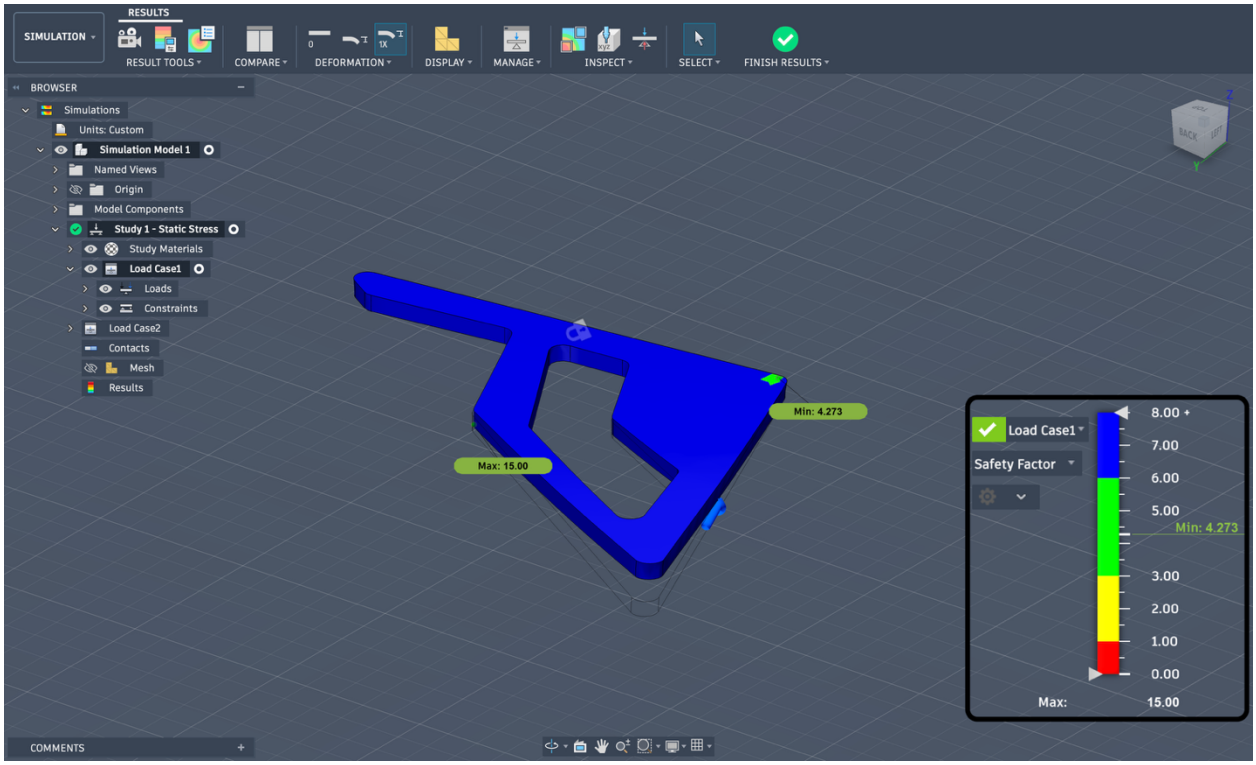
Αναφορικά με την αρχική μορφή του τριγωνικού ελάσματος (αρχικού βάρους 422,13 g) η στατική ανάλυση κατέδειξε ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας διαμορφώνεται στο 5,89, με τη μέγιστη τάση Von Mises να ανέρχεται σε 152,80 MPa.



Εικόνα 73 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας των πιθανών σεναρίων φόρτισης, για το αρχικό τριγωνικό έλασμα ενίσχυσης.

Αντιστοίχως, για τα ίδια σενάρια φόρτισης στην τελική βελτιστοποιημένη μορφή του ελάσματος (τελικό βάρος 262,397 g), ανέδειξε ότι ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας διαμορφώθηκε στο 4,27. Παράλληλα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises ανέρχεται

σε 210,77 MPa, επιβεβαιώνοντας την απόλυτη δομική επάρκεια του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος.



Εικόνα 74 Απεικόνιση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας των πιθανών σεναρίων φόρτισης, για το βελτιστοποιημένο τριγωνικό έλασμα ενίσχυσης.

Με το ποσοστό μείωσης του βάρους να ανέρχεται στο 37,83 %, σημειώθηκε μια αναμενόμενη πτώση του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας κατά 27,5 %. Αν και η συνολική αφαίρεση του υλικού αντιστοιχεί σε 159,73 g, τα επίπεδα της δομικής αντοχής και ακαμψίας του τελικού τριγωνικού ελάσματος διατηρούνται σε απόλυτα ικανοποιητικό επίπεδο. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει πλήρως την ορθότητα της μελέτης, αποδεικνύοντας την επιτυχή εφαρμογή της μεθοδολογίας της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τη σύγκριση των ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας (Minimum SF) πριν και μετά την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Τριγωνικά Ελάσματα	Αρχικός Ελάχιστος SF	Τελικός Ελάχιστος SF	Απώλεια SF (%)	Απώλεια Μάζας (%)
1	5,89	4,27	27,5	37,84
2	4,51	3,97	11,97	39,24
3	10,31	9,13	11,44	32,94

4	7,78	7,64	1,8	33,43
5	6,9	6,1	11,59	23,19
6	6,92	5,78	16,47	25,43
7	2,85	2,34	17,89	29,7
8	2,82	2,53	10,28	30,99
9	11,04	10,46	5,25	13,17
10	11,32	10,93	3,44	13,22
Μέσος όρος	7,03	6,31	11,76	27,91

Πίνακας 3 Παρουσίαση της σύγκρισης των ελάχιστων συντελεστών ασφαλείας (Minimum SF) πριν και μετά την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

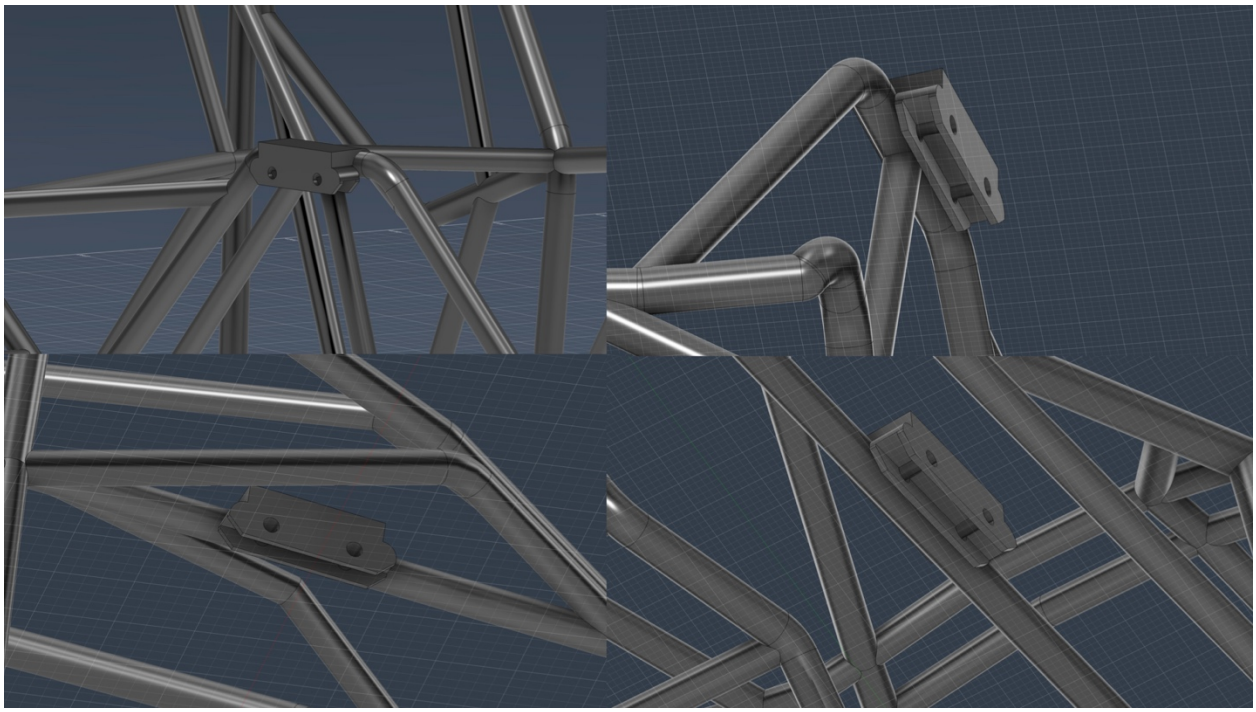
7.4. Εφαρμογή της Παραγωγικής Σχεδίασης (Generative Design) στις βάσεις των αναρτήσεων

Η διαχείριση των επιβαλλόμενων φορτίων στις κύριες βάσεις στήριξης της ανάρτησης και συγκεκριμένα για το όχημα κατηγορίας Trophy Truck, οδήγησε στην χρήση ενός κομβικού εργαλείου του προγράμματος για την ανάπτυξη της δομικής του σχεδίασης. Εξαιτίας των πολύπλοκών σεναρίων πολυαξονικής φόρτισης αλλά και των αυστηρών χωροταξικών που επιβάλλουν τα παρακείμενα διασυνδεδεμένα εξαρτήματα, η μεθοδολογία αφαίρεσης υλικού (Shape Optimization) που εφαρμόστηκε στα τριγωνικά ελάσματα, κρίνεται ανεπαρκής.

Για αυτόν τον λόγο, μέσω του λογισμικού (Fusion 360) αξιοποιήθηκε το προηγμένο υπολογιστικό περιβάλλον του παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design), με σκοπό τη σύνθεση εξολοκλήρου νέων, τοπολογικά βελτιστοποιημένων βάσεων στήριξης. Όπως και με την προηγούμενη μεθοδολογία (Shape Optimization), ο στόχος της συγκεκριμένης μελέτης παραμένει στην ελαχιστοποίηση της μάζας και την ταυτόχρονη διατήρηση της δομικής ακαμψίας. Επιπλέον έγινε χρήση του ίδιου κράματος χάλυβα με αυτό του δικτυωτού πλαισίου (Steel AISI 4130 259 QT).

7.4.1. Άνω βάσεις στήριξης αναρτήσεων

Η μεταβίβαση των φορτίων από το σύστημα της ανάρτησης προς το άνω τμήμα του δικτυωτού πλαισίου πραγματοποιείται με τέσσερις πανομοιότυπες άνω βάσεις στήριξης. Για τον βέλτιστο ανασχεδιασμό των εν λόγω εξαρτημάτων, ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτελεί τον ακριβή καθορισμό των γεωμετριών, την εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών στήριξης, την επιβολή των ρεαλιστικών σεναρίων φόρτισης, καθώς και την ενσωμάτωση των απαραίτητων κατασκευαστικών περιορισμών.

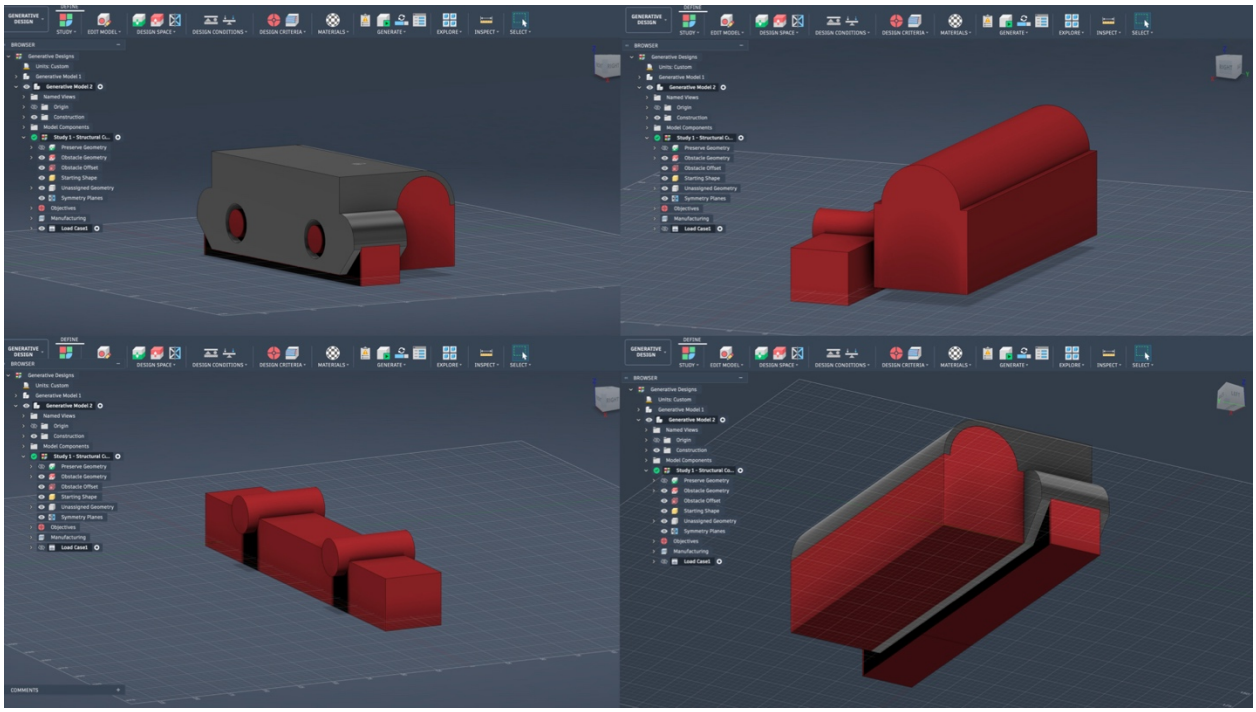


Εικόνα 75 Απεικόνιση των άνω βάσεων των αναρτήσεων του δικτυωτού πλαισίου.

Το πρώτο και σημαντικότερο βήμα του παραγωγικού σχεδιασμού, είναι ο καθορισμός των περιοχών όπου απαιτείται η υποχρεωτική διατήρηση του υλικού (Preserve Geometries), καθώς και των χωρικών τμημάτων όπου απαγορεύεται η ανάπτυξη του (Obstacle Geometries). Όμως, πριν από την επιβολή των εν λόγω περιορισμών, χρειάστηκε η κατάλληλη γεωμετρική προετοιμασία του μοντέλου της βάσης.

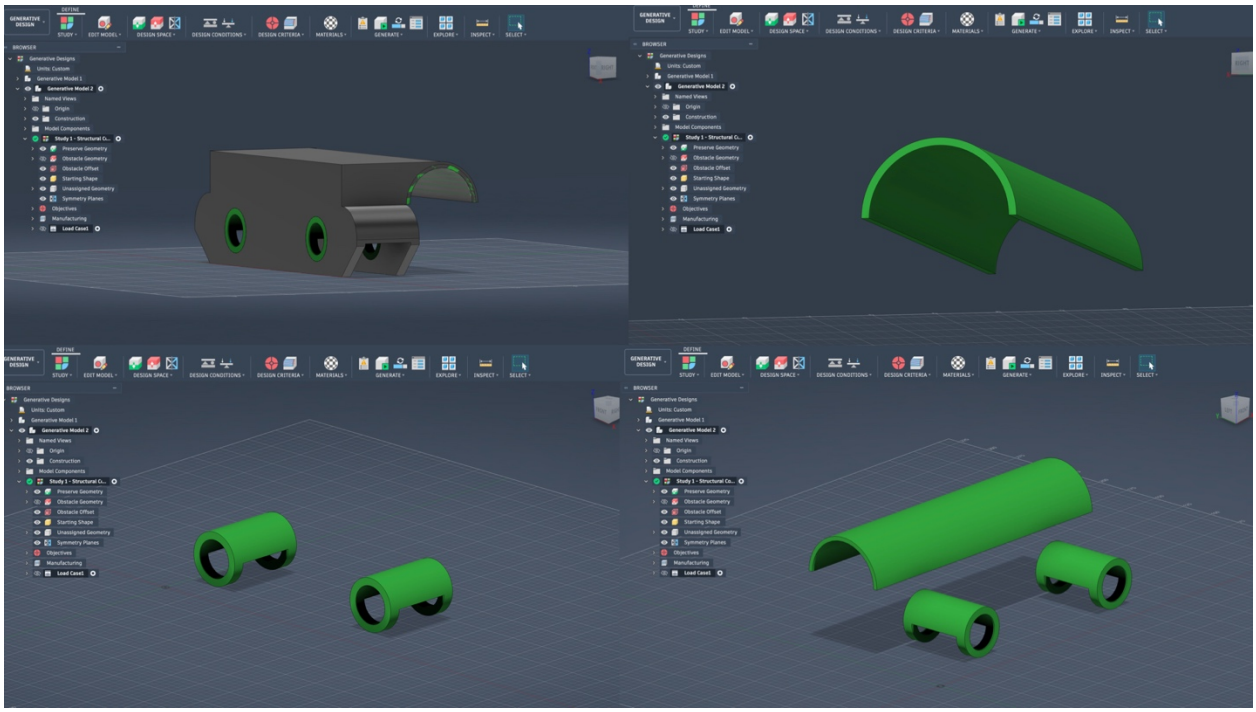
Εντός του περιβάλλοντος εργασίας του «Generative Design» και συγκεκριμένα μέσω του εργαλείου «Edit Model», πραγματοποιήθηκε η πλήρης μοντελοποίηση των βοηθητικών στερεών σωμάτων (Solid Bodies), που θα αποτελέσουν τις περιοχές περιορισμού. Πρακτικά, λόγω ότι ο αλγόριθμος συνθέτει τη νέα βάση εξολοκλήρου από την αρχή, επιβλήθηκε η διατήρηση των σημείων διεπαφής με το πλαίσιο και το σύστημα ανάρτησης (περιοχές όπου απαγορεύεται η αφαίρεση υλικού) και αφετέρου η προστασία των χωρίων όπου δεν επιτρέπεται η εισχώρηση νέου υλικού.

Για τον καθορισμό των γεωμετριών εμποδίων (Obstacle Geometries), δημιουργήθηκαν και στην συνέχεια επιλέχθηκαν τέσσερα στερεά σώματα. Με αυτόν το τρόπο, επιβάλλεται στον αλγόριθμο η απαγόρευση της τοποθέτησης υλικού εντός των συγκεκριμένων τμημάτων. Στο περιβάλλον εργασίας, τα σώματα επισημαίνονται με κόκκινο χρωματισμό και είναι υπεύθυνα για την διασφάλιση του απαραίτητου λειτουργικού κενού στις περιοχές κίνησης των ψαλιδιών της ανάρτησης, καθώς και στα σημεία ενσωμάτωσης της βάσης με το άνω τμήμα του δικτυωτού πλαισίου.



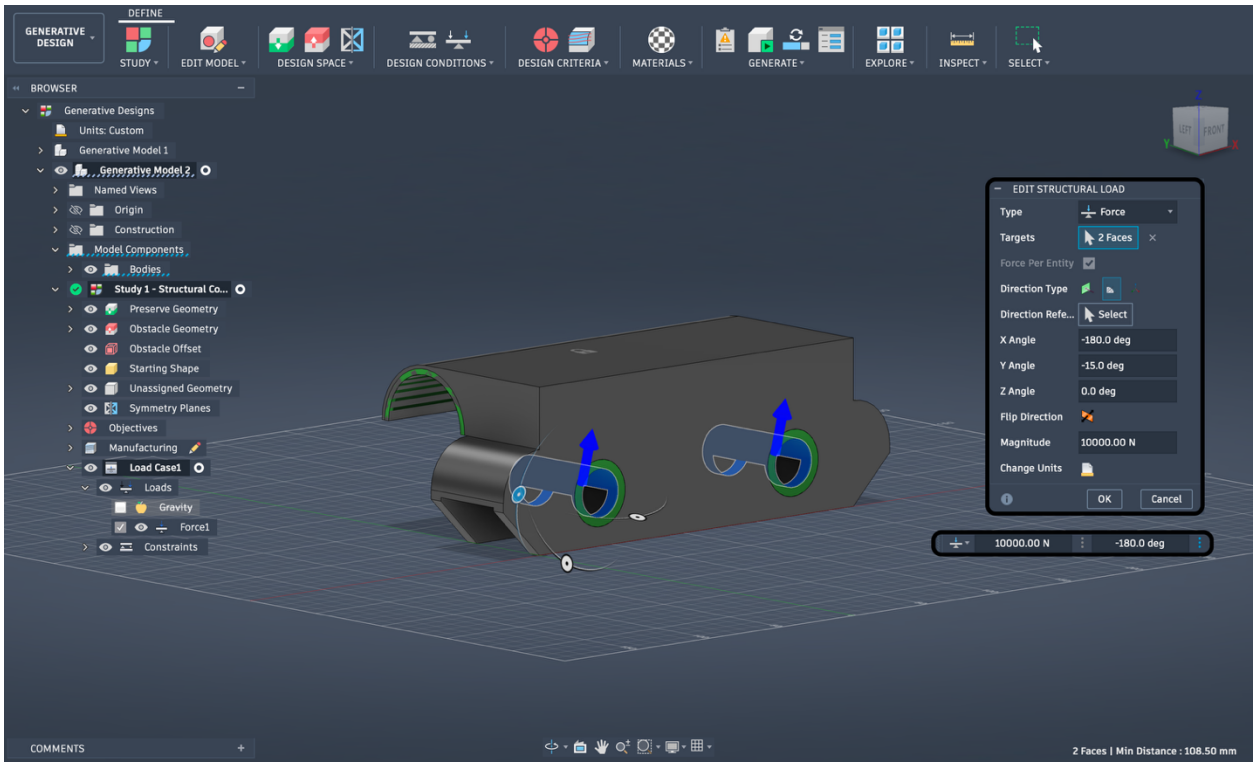
Εικόνα 76 Απεικόνιση των γεωμετριών εμποδίων, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης.

Αντιστοίχως, για τον καθορισμό ακόμη γεωμετριών διατήρησης (Preserve Geometries), πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση τριών επιπρόσθετων στερεών σωμάτων. Το χρώμα που εκπροσωπεί τα συγκεκριμένα σώματα είναι το πράσινο και είναι το άνω ημικυλινδρικό τμήμα, το οποίο προσομοιώνει την επιφάνεια διεπαφής για τη συγκόλληση με τον σωλήνα του δικτυωτού πλαισίου. Τα κατώτερα δυο σώματα αντιπροσωπεύουν τις κυλινδρικές οπές, οι οποίες συγκροτούν τα σημεία άρθρωσης για τη στήριξης του ψαλιδιού της ανάρτησης, επιτρέποντας τη διέλευση του διερχόμενο πείρο.



Εικόνα 77 Απεικόνιση των γεωμετριών διατήρησης, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης.

Το επόμενο σημαντικό βήμα στη διαδικασία του παραγωγικού σχεδιασμού αφορά την επιβολή των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης. Καθώς τα δυναμικά φορτία που καταπονούν το σύστημα της ανάρτησης, είναι δύσκολή η προσέγγιση, επιβλήθηκαν στις εσωτερικές κυλινδρικές επιφάνειες των οπών διέλευσης του πείρου, δυνάμεις συνολικού μέτρου 10.000 N. Επιπλέον, για την πιστότερη προσομοίωση της ρεαλιστικής μετάβασης των φορτίων, το διάνυσμα της δύναμης του φορτίου έλαβε κατεύθυνση από το ψαλίδι προς τη βάση, υπό γωνία 15 μοιρών ως προς τον άξονα Y. Στην συνέχεια, όσον αφορά τη στήριξη του εξαρτήματος, εφαρμόστηκε πλήρης πάκτωση, στην εσωτερική επιφάνεια του άνω κυλινδρικού στερεού , το οποίο αποτελεί και την επιφάνεια διεπαφής με το σασί.



Εικόνα 78 Απεικόνιση των συνοριακών συνθηκών και των σεναρίων φόρτισης, για την εφαρμογή της παραγωγικής σχεδίασης στην άνω βάση της ανάρτησης.

Ο παραγωγικός σχεδιασμός ξεχωρίζει, λόγω της ταυτόχρονης παραγωγής ποικίλων βελτιστοποιημένων λύσεων (για κάθε μέθοδο κατασκευής). Έτσι, στο τελικό στάδιο της προετοιμασίας του μοντέλου, εντός της καρτέλας «Objectives & Manufacturing», τέθηκαν σε ισχύ κριτήρια σχεδιασμού και επιβλήθηκαν οι απαραίτητοι κατασκευαστικοί περιορισμοί. Ειδικότερα, ως πρωταρχικός στόχος της υπολογιστικής ανάλυσης ορίστηκε η ελαχιστοποίηση της μάζας (Minimize Mass).

Για λόγους ασφαλείας και αποφυγής του σχεδιασμού μιας δομικά ανεπαρκής βάσης, ορίστηκε το κατώτερο όριο του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας στο 3,00. Θεωρήθηκε απαραίτητη η εφαρμογή αυτού του περιθωρίου ως προς την διασφάλιση της επιτυχούς παραλαβής των απρόβλεπτων κρουστικών φορτίων που υφίσταται το εξάρτημα κατά τη λειτουργία του οχήματος. Επί της ουσίας, ρυθμίζετε ο αλγόριθμος ως προς την ανάπτυξη της γεωμετρίας, επιβάλλοντας τον να ολοκληρώσει τη διαδικασία παραγωγής του υλικού όταν η αναπτυσσόμενη μέγιστη τάση Von Mises του εξαρτήματος περιοριστεί στο 1/3 του ορίου διαρροής του υλικού.

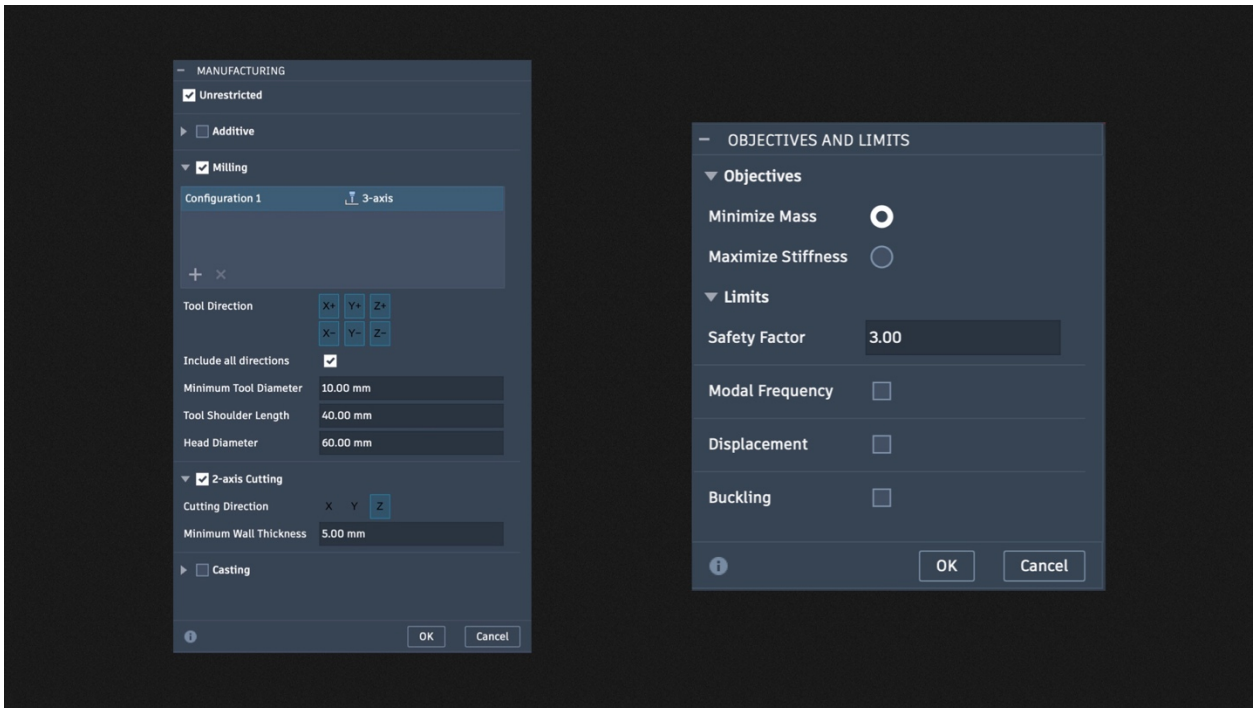
Στην συνέχεια, επιλέχθηκαν και ενεργοποιήθηκαν τρεις διακριτοί κατασκευαστικοί περιορισμοί. Ο πρώτος αφορά την απουσία κατασκευαστικών περιορισμών (Unrestricted), επιτρέποντας στο αλγόριθμο να τοποθετήσει υλικό ακολουθώντας αποκλειστικά τις

βέλτιστες ροές μεταφοράς φορτίων (Load Paths), χωρίς να λαμβάνει υπόψη τους χωρικούς περιορισμούς κάποιας συμβατικής μεθόδου κατασκευής. Ουσιαστικά, επιβάλλεται η παραγωγή οργανικών δομών (όπως τρισδιάστατοι εκτυπωτές μετάλλου) καθιστώντας ένα ιδανικό μέτρο σύγκρισης για την αξιολόγηση των γεωμετριών που θα προκύψουν από τις υπόλοιπες κατασκευαστικές μεθόδους.

Ο δεύτερος κατασκευαστικός που ενεργοποιήθηκε είναι η κατεργασία του CNC φρεζαρίσματος τριών αξόνων (3-Axis Milling). Προκειμένου να προσομοιωθούν με ρεαλισμό οι πραγματικές συνθήκες παραγωγής της βάσης σε μηχανουργικό περιβάλλον, επιτράπηκε η πρόσβαση του κοπτικού εργαλείου και στις έξι βασικές κατευθύνσεις $(\pm X, \pm Y, \pm Z)$. Αυτή η ρύθμιση προϋποθέτει τη δυνατότητα πολλαπλών επανατοποθετήσεων του ημικατεργασμένου εξαρτήματος κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να αφαιρέσει υλικό από πολλαπλές πλευρές.

Επιπλέον, στον ίδιο κατασκευαστικό περιορισμό, επιβλήθηκαν οι γεωμετρικές διαστάσεις των εργαλείων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην διεργασία. Συγκεκριμένα η ελάχιστη διάμετρος του εργαλείου στα 10 mm, το ωφέλιμο μήκος του στελέχους στα 40 mm και η διάμετρος της κεφαλής στα 60 mm. Κατασκευαστικά, η συγκεκριμένη ρύθμιση έχει μεγάλη σημασία, καθώς αποτρέπει τον αλγόριθμο από το να δημιουργήσει μεγάλες και στενές κοιλότητες, στις οποίες θα ήταν αδύνατη η απρόσκοπτη πρόσβαση του κοπτικού εργαλείου χωρίς να προκληθεί σύγκρουση με το εξάρτημα.

Ο τρίτος και τελευταίος περιορισμός που ενεργοποιήθηκε αφορά τις κατεργασίες δισδιάστατης κοπής (2-Axis Cutting). Επί της ουσίας, περιορίζεται από τον αλγόριθμο η σύνθεση γεωμετριών που μπορούν να παραχθούν μέσω προφίλ κοπής αποκλειστικά κατά μήκος του άξονα Z. Σε αυτήν την επιλογή, εφαρμόστηκε ο επιπρόσθετος περιορισμός του ελάχιστου επιτρεπτού πάχους τοιχώματος (Minimum Wall Thickness) στα 5 mm. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίστηκε η απώλεια της οποιαδήποτε μορφής πλαστικής παραμόρφωσης στα σημεία σύνδεσης της κατασκευής, λόγω ανεπαρκούς συγκέντρωσης υλικού.

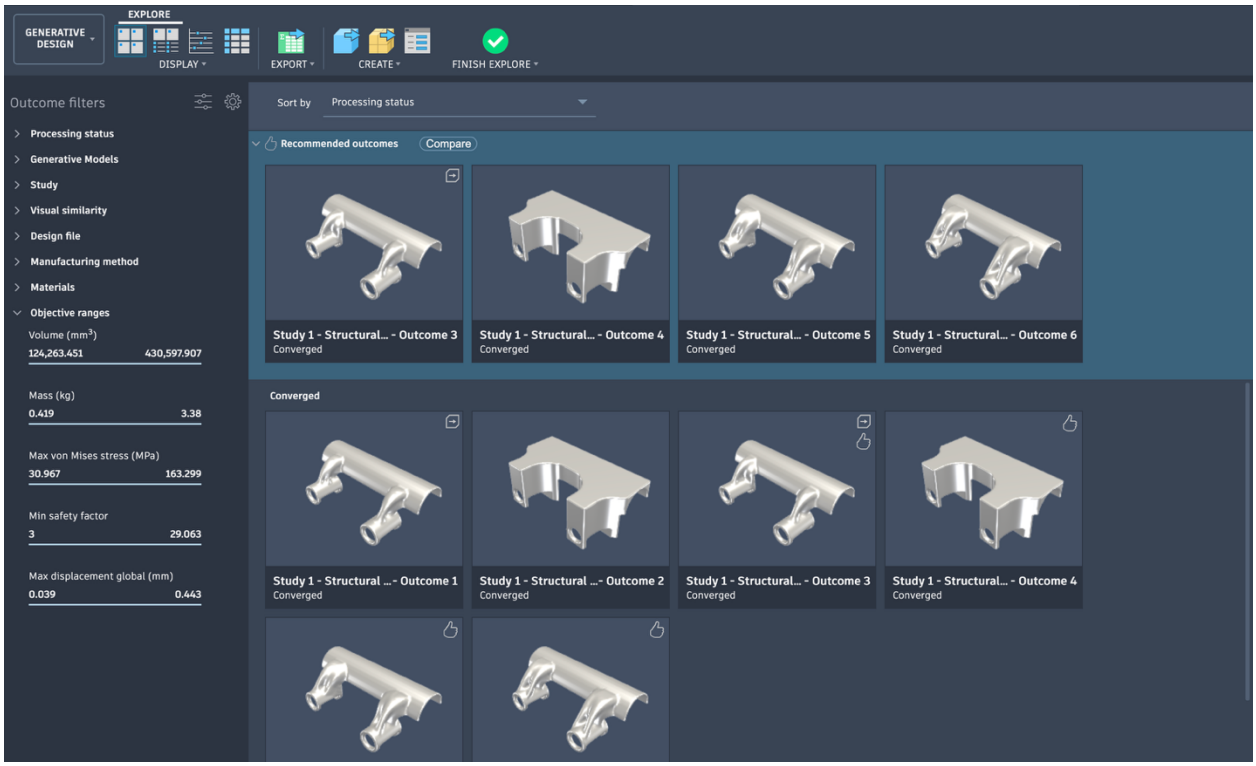


Εικόνα 79 Απεικόνιση των καρτελών "Manufacturing" και "Objectives and limits".

Με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής διαδικασίας επίλυσης (Cloud Solving), το πρόγραμμα διεξήγαγε τις εναλλακτικές βελτιστοποιημένες λύσεις, οποίες εναρμονίζονται με τα κατασκευαστικά κριτήρια που είχαν επιβληθεί. Η αξιολόγηση τους πραγματοποιείται εντός του ειδικού περιβάλλοντος «Explore Generative Results». Όπως γίνεται αντιληπτό και στην εικόνα 80, τα επιμέρους βελτιστοποιημένα μοντέλα περιέχουν την ένδειξη «Converged», δηλώνοντας πως το πρόγραμμα εφάρμοσε με επιτυχία την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη σήμανση, πιστοποιεί πως τηρήθηκε πλήρως το όριο του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας, χωρίς να σημειωθεί η ύπαρξή κάποιας μορφής παράβασης.

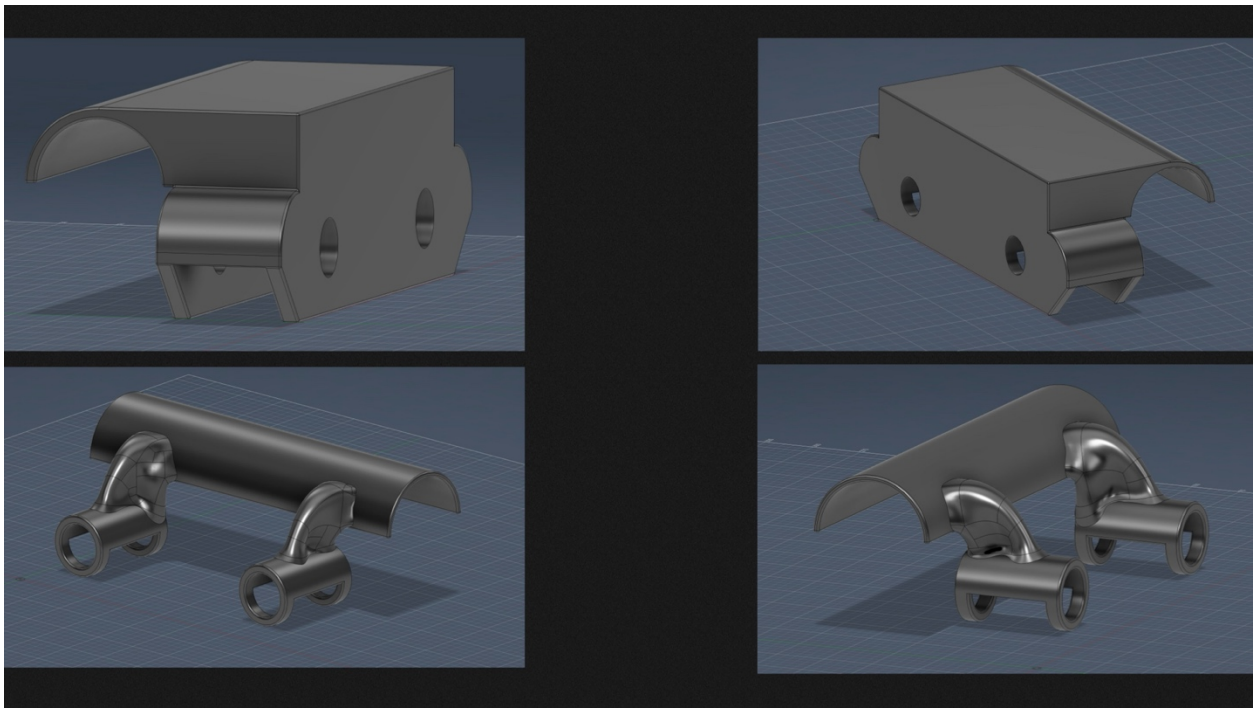
Επιπλέον, στο αριστερό τμήμα, αποκαλύπτεται η διαθεσιμότητα κάποιων συγκριτικών φίλτρων αξιολόγησης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η μάζα των προτεινόμενων βάσεων κυμαίνεται από 0,419 Kg έως και 3,38 Kg. Από την πρώτη συνοπτική επισκόπηση των παραγόμενων τεμαχίων, αναδεικνύεται η άμεση επιρροή των επιβληθέντων περιορισμών. Πρακτικά, διακρίνονται δομικά στοιχεία με απόλυτη οργανική μορφή αλλά σε πιο συμβατές, «πρισματικές» δομές.

Στις βέλτιστες κατασκευές, στις οποίες έχει διατηρηθεί ο μεγαλύτερος όγκος υλικού, με συνέπεια τη δημιουργία μεγάλων επίπεδων επιφανειών, αναδεικνύουν την συμβατικότητα τους με τα μηχανουργικά εργαλεία. Ουσιαστικά, βάσεις εξασφαλίζουν την προέλευση τους από δισδιάστατες κοπές και διεργασίας φρεζαρίσματος.



Εικόνα 80 Απεικόνιση των εναλλακτικών βελτιστοποιημένων λύσεων, της παραγωγικής σχεδίασης, για την άνω βάση της ανάρτησης.

Για την επιλογή της κατάλληλης βελτιστοποιημένης βάσης, πραγματοποιήθηκε μια πλήρη αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων επιλογών εντός του εργασιακού χώρου «Explore». Δόθηκε προτεραιότητα στην ελαχιστοποίηση της μάζας, δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες βάσεις εδράζονται σε υψηλό τμήμα του εμπρόσθιου και οπίσθιου πλαισίου, προκαλώντας συνολική επιρροή στο κέντρο βάρους. Ως εκ τούτου, εκλέχθηκε το τρίτο διεξαγόμενο δομικό στοιχείο (Outcome 3), του οποίου η παραγωγή πραγματοποιήθηκε χωρίς κατασκευαστικούς περιορισμούς (Unrestricted). Η συγκεκριμένη επιλογή προσέφερε το βέλτιστο λόγο αντοχής προς βάρος.



Εικόνα 81 Απεικόνιση της αρχικής και της τελικής μορφής της άνω βάσης της ανάρτησης.

Μετά από την επιλογή της βέλτιστης άνω βάσης, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση της με την αρχική της μορφή, για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας εξοικονόμησης μάζας που επιτεύχθηκε με τη μέθοδο του παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design). Το αρχικό βάρος της αρχικής, συμπαγούς άνω βάσης στήριξης της ανάρτησης ανέρχεται σε 7.975,534 g, υποδηλώνοντας πως το ποσοστό του όγκου της πλεονάζουσας μάζας του εξαρτήματος ήταν υψηλό. Μετά από την εφαρμογή της διαδικασία βελτιστοποίησης στο συγκεκριμένο εξάρτημα, το τελικό του βάρος ανέρχεται σε 986,998 g.

Τα παραπάνω δεδομένα, επισημαίνουν ένα δραστικό σενάριο μείωσης μάζας. Θα πρέπει να τονιστεί πως για αφαίρεση 6.988,536 g υλικού ανά βάση, υπολογίζεται μια ποσοστιαία μείωση μάζας ύψους 87,6 %. Για τη τοποθέτηση τεσσάρων τέτοιων βάσεων συνολικά στο άνω τμήμα του δικτυωτού πλαισίου, ισοδυναμεί με μια συνολική εξοικονόμηση βάρους μεγέθους 27,95 kg.

Παράμετρος Μάζας (g)	Αρχική Άνω Βάση	Βελστιστοποιημένη Βάση
Μάζα ανά εξάρτημα (g)	7.975,534	986,998
Συνολική Μείωση Βάρους (%)	-	87,62
Συνολική Μείωση Βάρους (Kg)	-	27,95

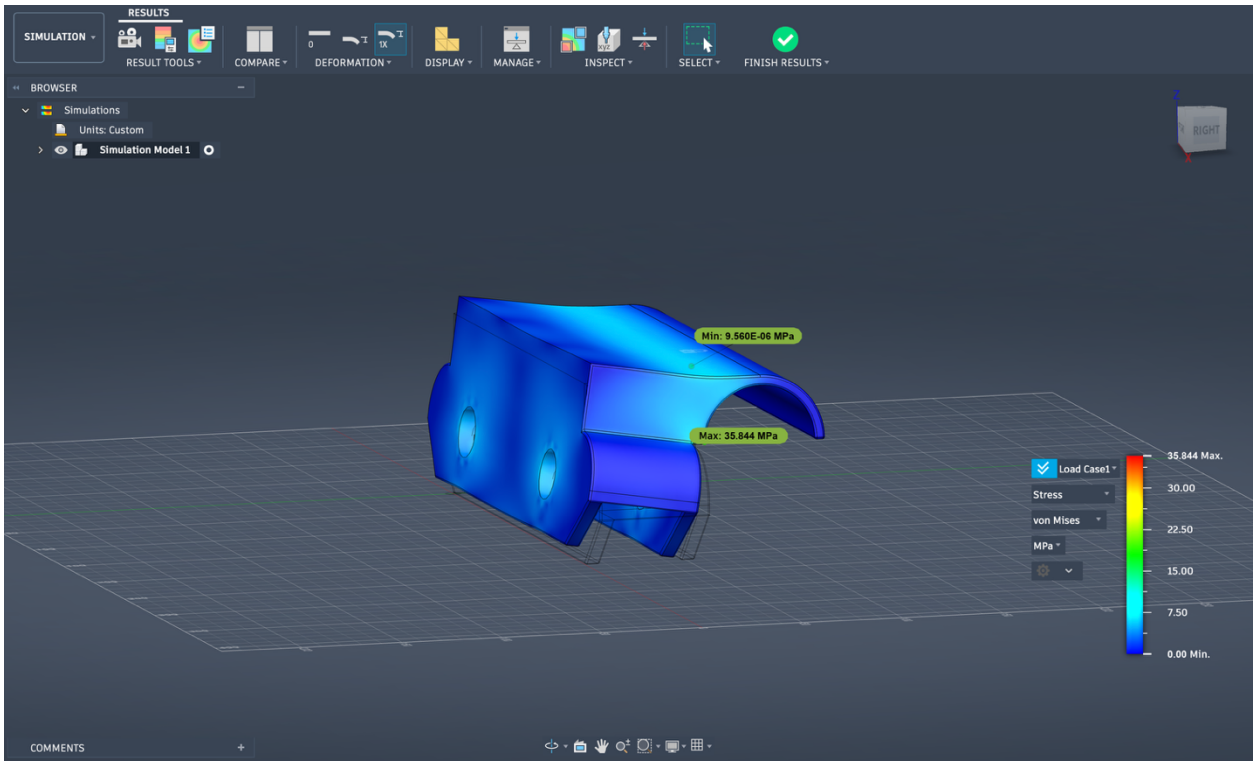
Πίνακας 4 Συγκριτικός πίνακας της αρχικής και της τελικής μάζας της άνω βάσης της ανάρτησης.

Δεδομένου τα σημεία στα οποία είναι τοποθετημένες οι συγκεκριμένες κατασκευές, η μείωση των $\sim 28\ kg$, συμβάλλει καθοριστικά στη μείωση της ροπής αδράνειας περί τον διαμήκη άξονα, ειδικά όσον αφορά τις πλευρικές κλίσεις. Έτσι, εξασφαλίζεται η καλύτερη κινηματική συμπεριφορά του οχήματος.

7.4.1.1. Συγκριτική στατική αξιολόγηση και ανάλυση αντοχής

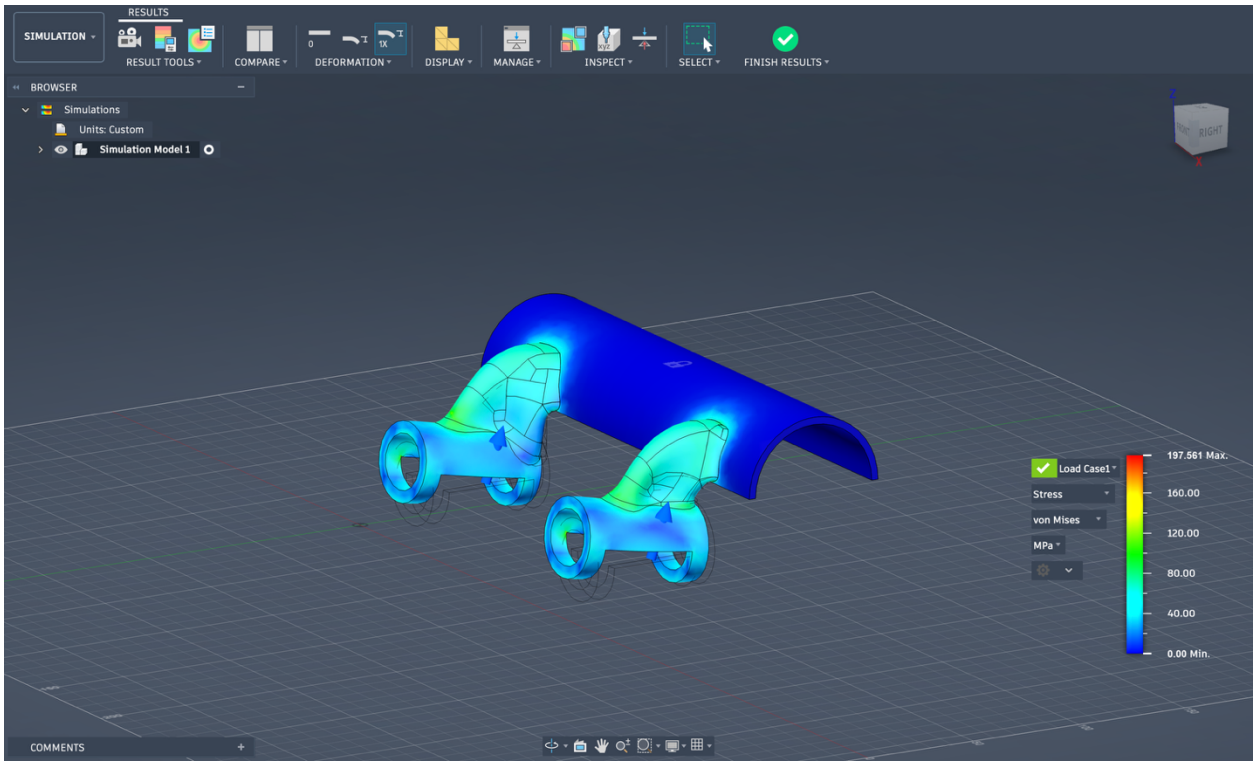
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε γραμμική στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στη νέα άνω βάση. Κατά την μελέτη, επιβλήθηκαν οι ίδιες συνοριακές συνθήκες και των κρουστικών φορτίων (μέτρου 10.000 N) με αυτά που είχαν χρησιμοποιηθεί στην αντίστοιχη ανάλυσης της αρχικής κατασκευής. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτέλεσε το τελικό στάδιο, καθώς πραγματοποιείται η επαλήθευση της δομικής ακαμψίας και αντοχής της παραγόμενης βάσης.

Στη στατική ανάλυση της αρχικής άνω βάσης, υπολογίστηκε μέγιστη τάση Von Mises στα 35,84 MPa, με τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας να ανέρχεται σε 25,11. Η υψηλή αυτή τιμή, επιβεβαιώνει έντονη υπερδιαστασιολόγηση του αρχικού μοντέλου καθώς η αναπτυσσόμενη τάση, απείχε πολύ από το όριο διαρροής του χάλυβα. Πρακτικά, ο συγκεκριμένος ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας απέδειξε την ύπαρξη υψηλού ποσοστού πλεονάζουσας μάζας, γεγονός που σημαίνει πως αρκετό υλικό δεν συμβάλλει στην ουσιαστική δομική ακαμψία της κατασκευή.



Εικόνα 82 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της αρχικής βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N.

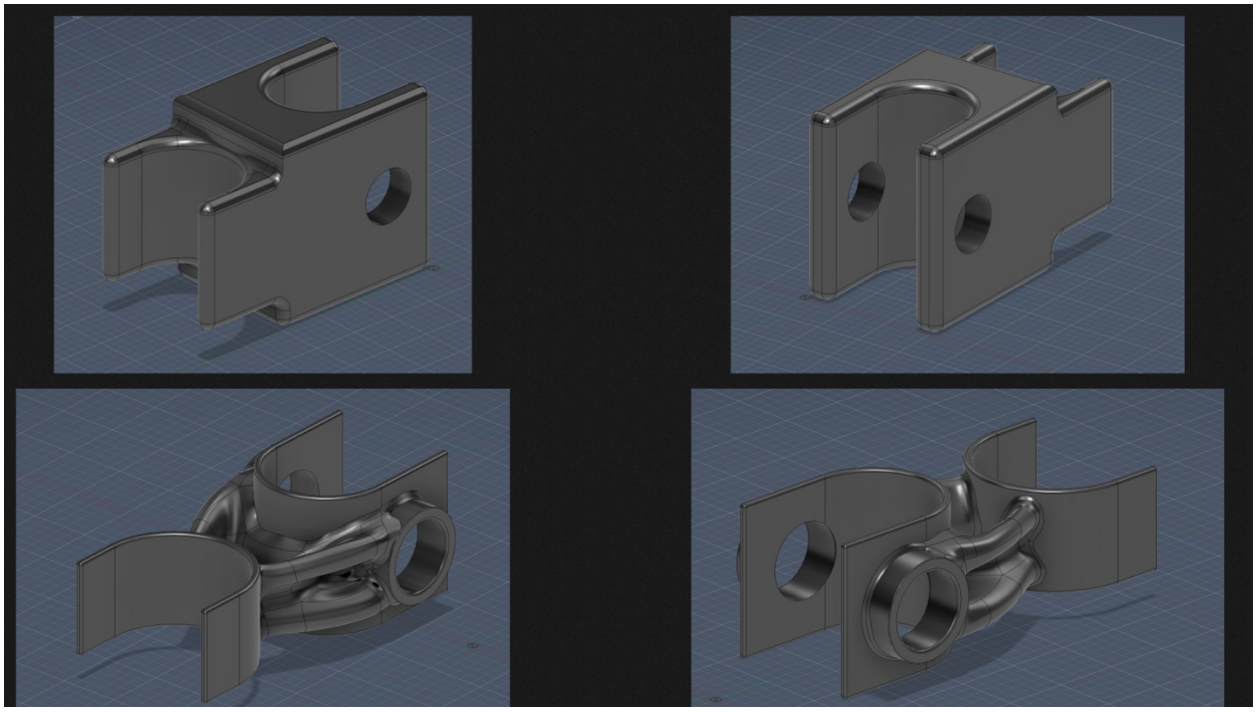
Στη νέα βελτιστοποιημένη οργανική βάση, καταγράφηκε αύξηση της μέγιστης τάσης Von Mises στα 197,56 MPa. Έτσι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας σταθεροποιήθηκε στο 4,55, παρά τη δραματική μείωση μάζας κατά 87,6 %. Πλέον, η βελτιστοποιημένη κατασκευή παρέχει την απαιτούμενη αντοχή, καθώς η κατανομή των κρουστικών φορτίων πραγματοποιείται με επιτυχία, εντός των αναπτυσσόμενων διαδρομών σε όλα τα σημεία της κατασκευής.



Εικόνα 83 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της τελικής βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N.

7.4.2. Κάτω βάσεις στήριξης αναρτήσεων

Για τον βέλτιστο ανασχεδιασμό των τεσσάρων βάσεων στήριξης των αναρτήσεων στο κατώτερο τμήμα του δικτυωτού πλαισίου, πραγματοποιήθηκε η ίδια ακριβώς μεθοδολογία παραγωγικού σχεδιασμού (Generative Design) η οποία αναλύθηκε στην Ενότητα 5.4.1. Για αυτόν τον λόγο, στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν και θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της μεθόδου, καθώς και τα δεδομένα των αντίστοιχων στατικών αναλύσεων, για την επαλήθευση της δομικής ακαμψίας και αντοχής των νέων εξαρτημάτων.



Εικόνα 84 Απεικόνιση της αρχικής και της τελικής μορφής της κάτω βάσης της ανάρτησης.

Πριν από την εκτέλεση της μέθοδο του παραγωγικού σχεδιασμού, η μάζα της αρχικής, κάτω βάσης στήριξης ανερχόταν σε 4.454,194 g. Στη συνέχεια, μετά από την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διαδικασίας, το τελικός βάρος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος διαμορφώθηκε στα 758,082 g. Ουσιαστικά, το ποσοστό της μείωσης της αρχικής μάζας της είναι στο 82,98 %, υποδηλώνοντας και σε αυτήν την περίπτωση την ύπαρξη μεγάλης ποσότητας πλεονάζοντος υλικού. Πρακτικά, η συνολική εξοικονόμηση βάρους από την αντικατάσταση και των τεσσάρων βάσεων ανέρχεται στα 14,78 kg.

Παράμετρος Μάζας (g)	Αρχική Κάτω Βάση	Βελστιστοποιημένη Βάση
Μάζα ανά εξάρτημα (g)	4.454,194	758,082
Συνολική Μείωση Βάρους (%)	-	82,98
Συνολική Μείωση Βάρους (Kg)	-	14,78

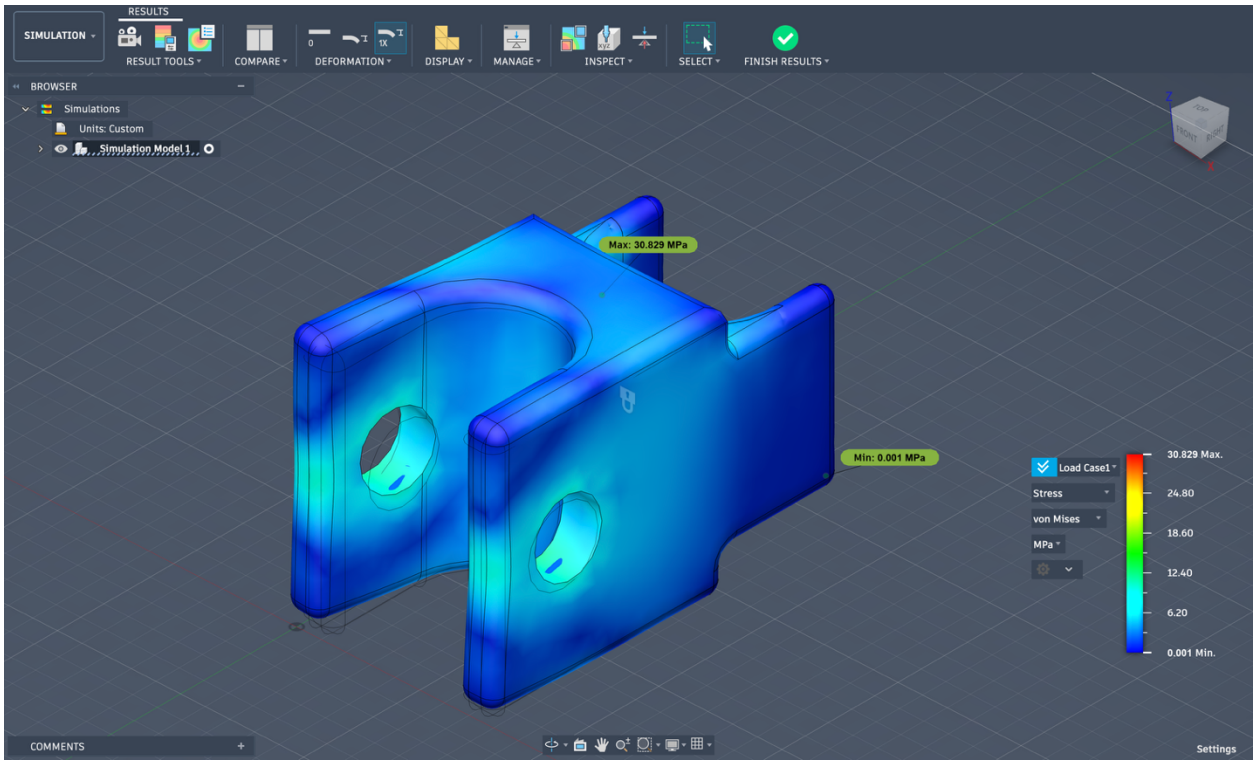
Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας της αρχικής και της τελικής μάζας της κάτω βάσης της ανάρτησης.

7.4.2.1. Συγκριτική στατική αξιολόγηση και ανάλυση αντοχής

Όπως έγινε αναφορά και στην ενότητα 5.4.1.1., πραγματοποιήθηκε γραμμική στατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στη νέα, ανασχεδιασμένη κάτω βάση. Κατά την διαδικασία, επιβλήθηκαν οι ίδιες συνοριακές συνθήκες και τα ίδια στατικά φορτία με την αντίστοιχη στατική ανάλυση της αρχικής κατασκευής. Στο τελικό στάδιο της μελέτης, επαληθεύτηκε η δομικής ακαμψίας και η αντοχή της παραγόμενης βάσης.

Υπό την επιβολή φορτίου συνολικού μεγέθους των 10.000 N στην αρχική, βάση του κάτω τμήματος, η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises υπολογίστηκε στα 30,83 MPa, καταγράφοντας υψηλό ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας στα 29,19. Όπως επιβεβαιώνεται και από τον χρωματισμό του μοντέλου, το μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου του εξαρτήματος εμφανίζει αμελητέες τάσεις (οι περιοχές με μπλε χρωματισμό). Πρακτικά, το υλικό σε εκείνες τις περιοχές δομικά είναι ανενεργό και δεν συμμετέχει στην μεταφορά των κρουστικών φορτίων από το σύστημα της ανάρτησης προς το σασί.

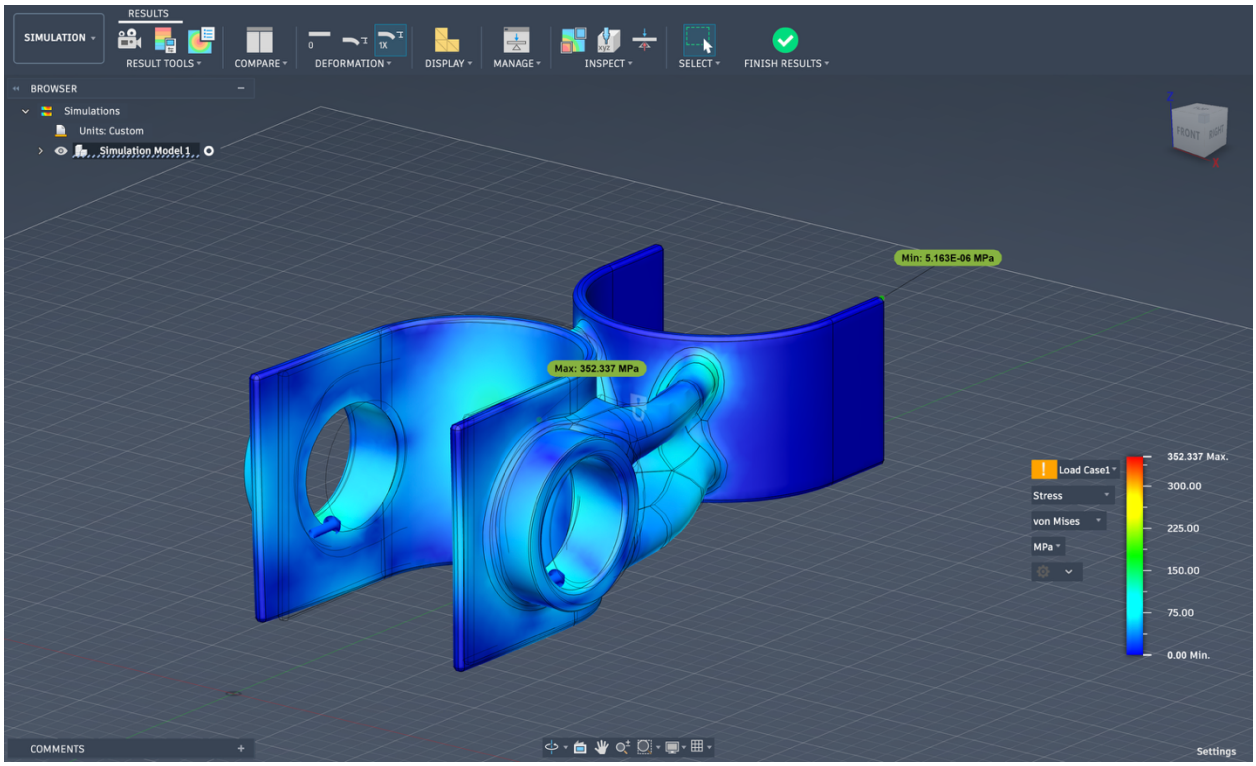
Ο υψηλός συντελεστής ασφαλείας μεταφράζεται σε ένα κρίσιμο σχεδιαστικό σφάλμα υπερδιαστασιολόγησης, συμβάλλοντας περισσότερο στην συνολική αύξηση της αδράνειας του οχήματος. Η μάζα των 4,45 Kg προκαλεί περαιτέρω στατική καταπόνηση στις συγκολλήσεις του δικτυωτού πλαισίου, υποβαθμίζοντας την δυναμική συμπεριφορά και απόδοση του οχήματος.



Εικόνα 85 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της αρχικής κάτω βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N.

Με την αφαίρεση της πλεονάζουσας μάζας κατά τη μείωση του συνολικού βάρους να ανέρχεται στα 758,082 g, η μηχανική συμπεριφορά της βάσης εμφάνισε ριζική αλλαγή. Η μέγιστη τάση Von Mises σημείωσε αύξηση στα 352,337 MPa, υποδηλώνοντας τη πλήρη δομική ενεργοποίηση όλων των τμημάτων της κατασκευής κατά την διάρκεια της επιβολής των εξωτερικών φορτίων. Σύμφωνα και με τη χρωματική ανάλυση, η κατανομή των τάσεων αναπτύσσεται με ομαλό ρυθμό κατά μήκος των διαδρομών μεταφοράς φορτίων, από τις οπές στήριξης των ψαλιδιών μέχρι και την κυλινδρική επιφάνεια πάκτωσης.

Επίσης, η απουσία υψηλών συγκεντρώσεων τάσεων, πιστοποιεί την εξάλειψη απότομων γωνιών στην κατασκευή. Ο νέος ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας ανέρχεται στο 2,55. Συγκριτικά με την αρχική τιμή, παρουσιάστηκε πτώση κατά 91 %. Η τιμή 2,55, δηλώνει ότι η κατασκευή διαθέτει την ικανότητα αντοχής έως και δυόμιση φορές του συνολικού φορτίου που της επιβλήθηκε. Αυτό το περιθώριο είναι αρκετό για την απορρόφηση απότομων φορτίσεων, ενώ με το τελικό ποσοστό μάζας που διατηρήθηκε, μεγιστοποιήθηκε ο λόγος αντοχής προς το βάρος του συστήματος.



Εικόνα 86 Απεικόνιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης Von Mises, της τελικής κάτω βάσης της ανάρτησης, για σενάριο φόρτισης συνολικού μεγέθους 10.000 N.

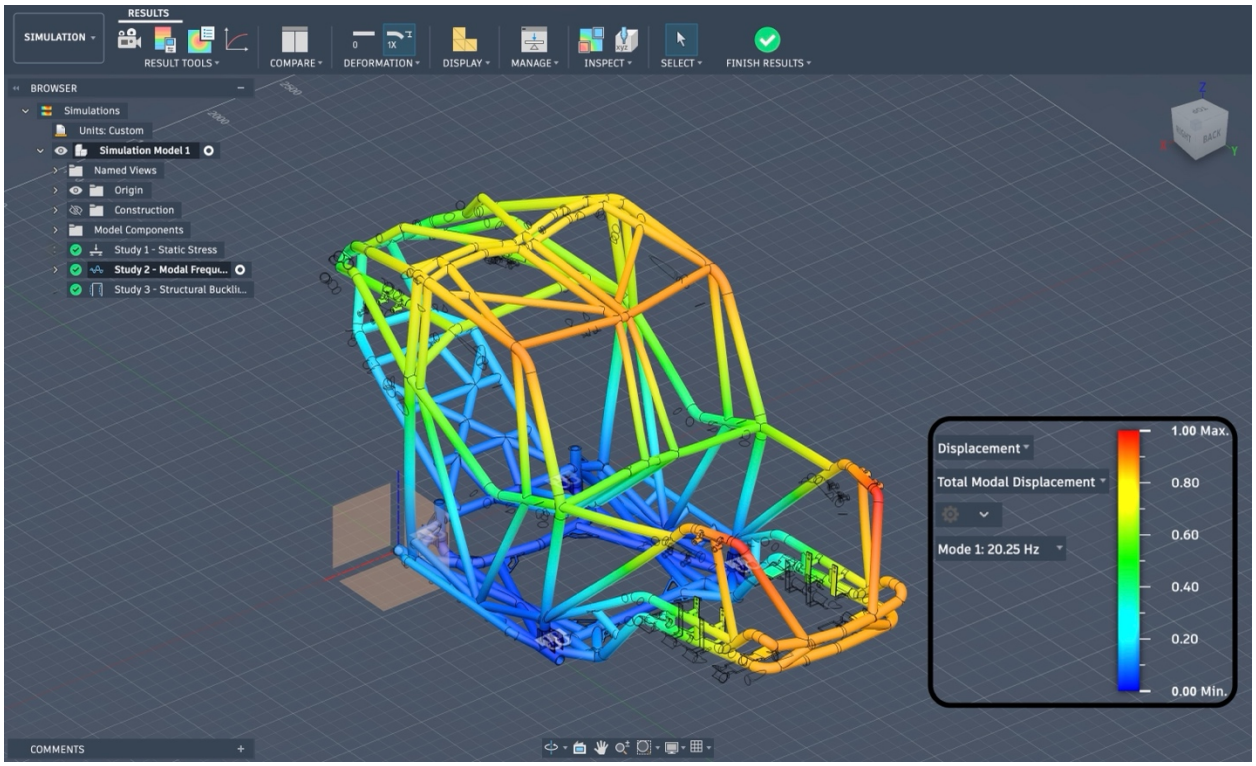
7.5. Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς του πλαισίου

Το δικτυωτό πλαίσιο, όπως όλες οι μηχανικές κατασκευές, έχει την τάση να ταλαντώνεται υπό την επίδραση συγκεκριμένων φυσικών συχνοτήτων. Στόχος της ανάλυσης των ιδιοσυχνοτήτων είναι να εντοπιστούν και να υπολογιστούν οι τιμές αυτών των συχνοτήτων (Hz) και των ιδιομορφών που προκαλούνται, όταν το δικτυωτό πλαίσιο βρίσκεται σε κατάσταση ταλάντωσης.

Η προκειμένη μελέτη, έχει καθοριστική σημασία για την κατασκευή του μοντελοποιημένου πλαισίου, καθώς πραγματοποιείται για την αποφυγή του φαινομένου με την ονομασία «συντονισμός». Ο συντονισμός προκύπτει, όταν κάποιο κρουστικό φορτίο από εξωτερικούς παράγοντες, ταυτιστεί με κάποια ιδιοσυχνότητα του οχήματος (περιοδικές διεγέρσεις από το ρελαντί του κινητήρα ή από το έδαφος μέσω των αναρτήσεων). Η ύπαρξη αυτής της συνθήκης, επιφέρει ανεξέλεγκτη αύξηση του πλάτους ταλάντωσης, επιταχύνοντας με ραγδαίο ρυθμό την κόπωση του υλικού κατασκευής και οδηγώντας σε πιθανή αστοχία του πλαισίου (σε σημεία ραφής συγκόλλησης)

Η εφαρμογή αυτής της ανάλυσης στο πρόγραμμα του Fusion 360, βασίζεται σε μια απλή μεθοδολογία, καθώς το μόνο που απαιτείται είναι η επιβολή των σωστών συνοριακών συνθηκών στήριξης και το υλικό κατασκευής. Μετά την ολοκλήρωση της, για τη διεξαγωγή έγκυρων πορισμάτων, το λογισμικό εκτός από την καταγραφή των ιδιοσυχνοτήτων, δημιουργεί και τον πίνακα του συντελεστή συμμετοχής μάζας (Mass Participation Factor) με τη συμμετοχή όλων των αξόνων. Η συγκεκριμένη καταγραφή, αναδεικνύει, για κάθε ταλάντωση σε κάθε άξονα, τη συνολική μάζα που ενεργοποιείται, υπό τη μορφή ποσοστών.

Ορίστηκαν πακτώσεις στις βάσεις των αναρτήσεων του κατώτερου τμήματος του πλαισίου (οκτώ πακτώσεις, δύο σε κάθε βάση ανάρτησης). Επιπλέον, σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων του περιβάλλοντος εργασίας του λογισμικού, κατά τον άξονα X αναπτύσσονται οι πλευρικές (εγκάρσιες) ταλαντώσεις, στον άξονα Y οι διαμήκεις ταλαντώσεις του πλαισίου και στον άξονα Z οι κατακόρυφες αντίστοιχα.



Εικόνα 87 Απεικόνιση των αποτελεσμάτων των ιδιόμορφών και των ιδιοσυχνοτήτων του δικτυωτού πλαισίου.

7.5.1. Οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του δικτυωτού πλαισίου

Αξιολογήθηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα των καθολικών ιδιομορφών (Global Modes) καθώς, διαθέτουν το υψηλότερο ποσοστό συμμετοχής μάζας ($> 15 - 20\%$). Ουσιαστικά, είναι οι ταλαντώσεις που προκαλούν παραμορφώσεις σε ολόκληρο το πλαίσιο, έχοντας καθοριστικό ρόλο για την ασφάλεια του. Οι ιδιομορφές που δεν χρειάζονται περαιτέρω έλεγχο, λόγω αμελητέας συμμετοχής μάζας ($< 1 - 2\%$) είναι οι τοπικές (Local Modes). Οι τοπικές ιδιομορφές αναφέρονται σε τοπικές ταλαντώσεις μεμονωμένων σημείων, χωρίς να επηρεάζεται η συνολική δομική ακεραιότητα του χωροδικτυώματος.

Με τον πίνακα του συντελεστή συμμετοχής μάζας, πραγματοποιήθηκε ο διαχωρισμός των 12 ιδιοσυχνοτήτων που προέκυψαν από την ανάλυση, στις δυο κατηγορίες που έγινε αναφορά προηγουμένως.

Ιδιομορφή (Mode)	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Συμμετοχή Μάζας X (%)	Συμμετοχή Μάζας Y (%)	Συμμετοχή Μάζας Z (%)
1	20.25	55.2595019	0	0
2	24.383	0.274199992	0.0002	0.0001
3	34.882	0.0002	22.6371005	0.860400032
4	46.505	0.015599999	0.049300003	27.837199
5	46.799	0.782600045	0.0022	0.484299986
6	55.398	0.0003	0.265599997	9.54380035
7	56.453	0.292000012	0	0.0239
8	59.561	0	0.578500004	1.04369996
9	63.966	0	3.09009999	1.28509998
10	69.916	0.0164	0.0006	0.0001
11	73.004	4.40290011	0.0017	0.001
12	75.697	0.0001	12.2887	1.84170008

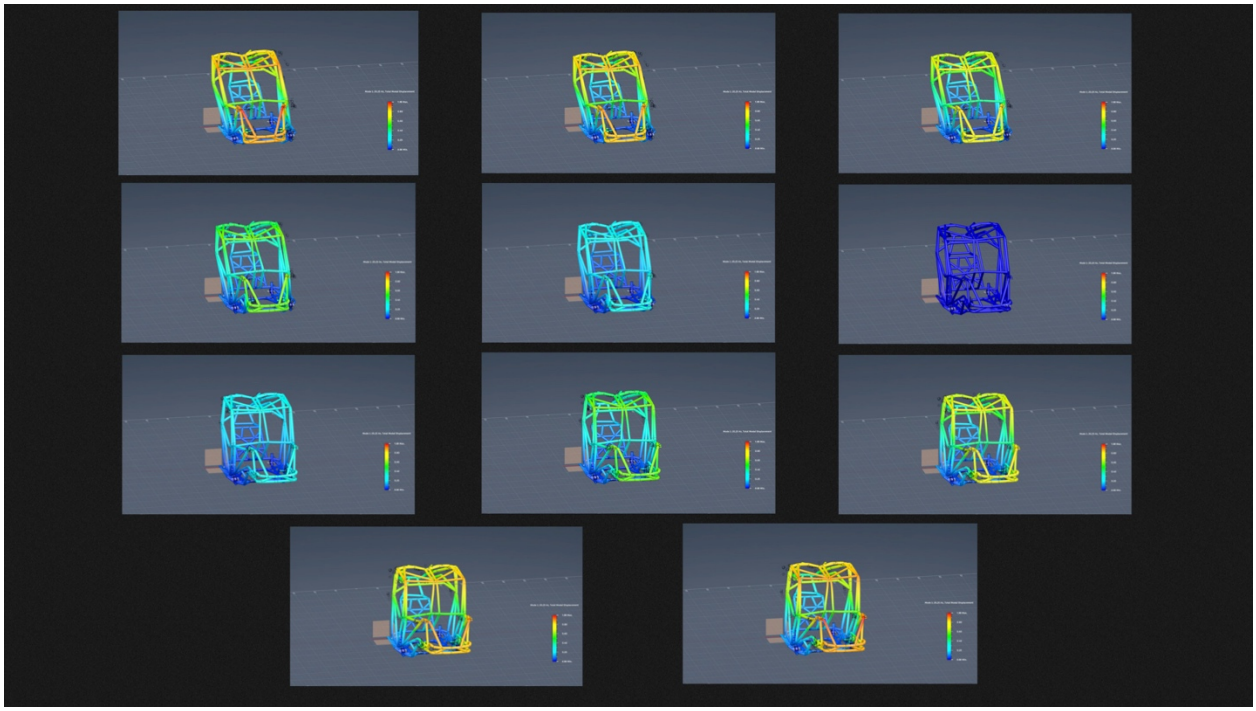
Πίνακας 6 Πίνακας του συντελεστή συμμετοχής μάζας του πλαισίου στις 12 πρώτες ιδιομορφές του πλαισίου.

Κατά την επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων και με τα ποσοστά συμμετοχής μάζας του δικτυωτού πλαισίου αναλύθηκαν οι εξής καθολικές ιδιομορφές:

1η Ιδιομορφή (Mode 1 στα 20,25 Hz): Είναι η πρώτη και η πιο σημαντική ιδιοσυχνότητα του σωληνωτού πλαισίου, σημειώνοντας το μέγιστο ποσοστό συμμετοχή μάζας, στο $\sim 55{,}26\%$, κατά την διεύθυνση του άξονα X. Μέσω του εργαλείου αναπαράστασης (Animate), αναδεικνύεται πως η συγκεκριμένη ιδιομορφή αντιστοιχεί στην εγκάρσια (πλευρική) ταλάντωση του κεντρικού τμήματος του δικτυώματος (καμπίνα οδηγού).

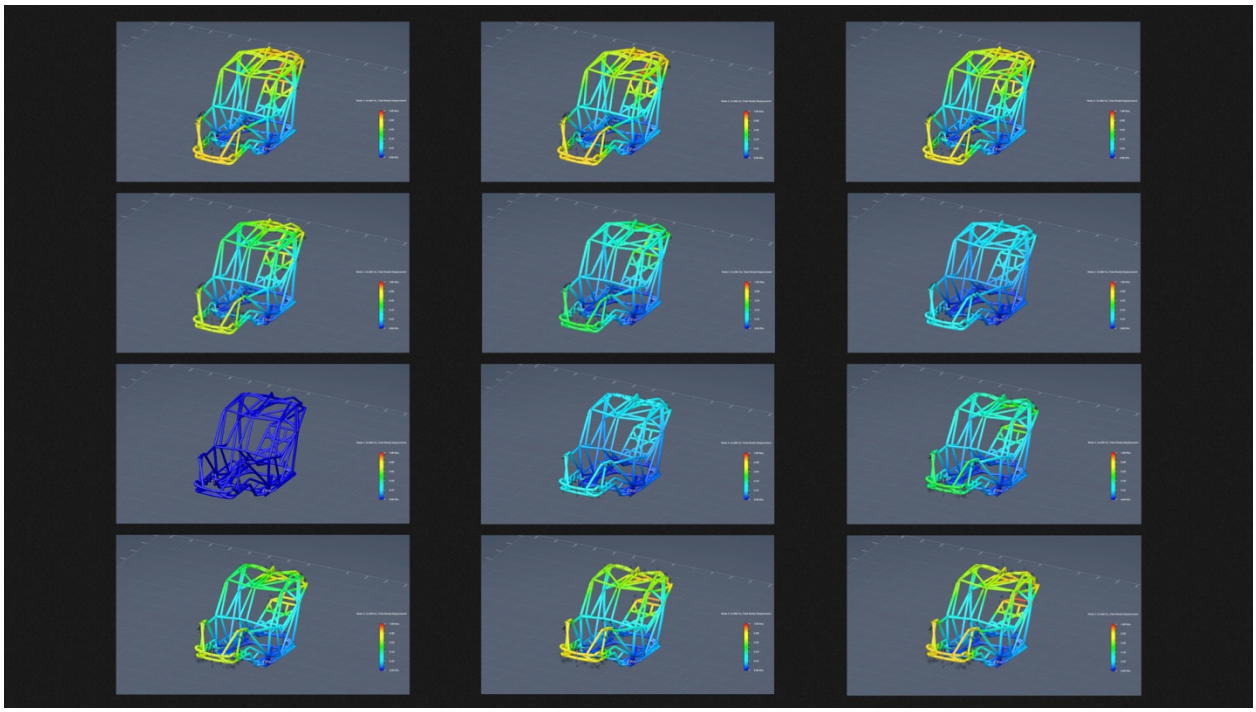
Αυτό το υψηλό ποσοστό οφείλετε στον αναγκαίο σχεδιαστικό συμβιβασμό που υφίσταται στα σημεία των θυρών και του παρμπρίζ, καθώς η ενσωμάτωση διαγώνιων σωλήνων

ενίσχυσης για πρακτικούς λόγους θεωρείτε αδύνατη. Επίσης, η μειωμένη ακαμψία δικαιολογείται και από το γεγονός ότι το συγκεκριμένο τμήμα του χωροδικτυώματος, συγκριτικά με το υπόλοιπο πλαίσιο, αποτελείται από σωλήνες μικρότερου πάχους.



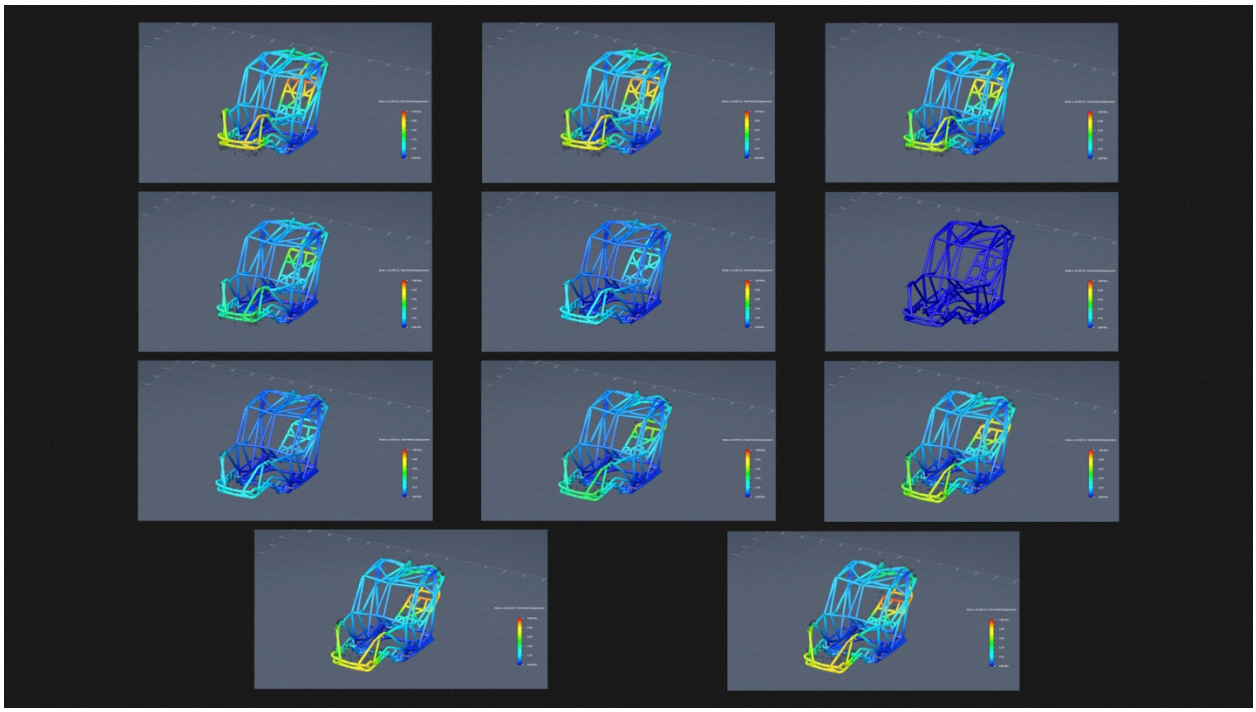
Εικόνα 88 Απεικόνιση της εγκάρσιας πλευρικής ταλάντωσης του κεντρικού τμήματος του δικτυώματος, της 1ης ιδιομορφής του.

3η Ιδιομορφή (Mode 3 στα 34,88 Hz): Είναι η τρίτη ιδιοσυχνότητα του πλαισίου, η οποία εμφανίζει ταλάντωση μάζας της τάξεως 22,64 % στον διαμήκη άξονα Y (η πρώτη ταλάντωση κατά τον άξονα Y). Η προσομοίωση αυτής της κινηματικής συμπεριφοράς, αναδεικνύει μια ταλάντωση στο εμπρόσθιο και οπίσθιο τμήμα αντίστοιχα, κατά μήκος της κατασκευής, ως προς τον άξονα Y. Έχοντας το σύστημα, ως πρώτη διαμήκους ταλάντωση συχνότητας $\sim 35\ Hz$, επιβεβαιώνει την δομική ακαμψία του πλαισίου για δυναμικά φορτία κατά την εκκίνηση του.



Εικόνα 89 Απεικόνιση της ταλάντωσης στο διαμήκη άξονα Y του δικτυωτού πλαισίου, της 3ης ιδιομορφής του.

4η Ιδιομορφή (Mode 4 στα 46,50 Hz): Αποτελεί την τέταρτη ταλάντωση και την πρώτη ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z, εμφανίζοντας ποσοστό συμμετοχής στο 27,83 % της μάζας. Η ταλάντωση, έχοντας μια κατακόρυφη κατεύθυνση τείνει να προκαλέσει κατακόρυφη κάμψη της κατασκευής, από την οροφή προς κατώτερο τμήμα. Αντιστοίχως, η υψηλή τιμή της συχνότητας, εκφράζει την ακαμψία του δικτυωτού πλαισίου υπό την επίδραση καταπονήσεων λόγω εδαφικών ανωμαλιών.



Εικόνα 90 Απεικόνιση της ταλάντωσης στον διαμήκη άξονα Z του δικτυωτού πλαισίου, της 4^{ης} ιδιομορφής του.

Βάσει των ιδιοσυχνοτήτων που υπολογίστηκαν μετά την ολοκλήρωση της μελέτης, πιστοποιείται πως δεν ταυτίζονται με εξωτερικές διεγέρσεις που προέρχονται από το σύστημα της ανάρτησης λόγω εδαφικών ανωμαλιών. Στην περίπτωση ενός οχήματος κατηγορίας «Trophy Truck», οι πιο συχνές περιπτώσεις δομικής αστοχίας οφείλονται στα κρουστικά φορτία των αναρτώμενων εξαρτημάτων, δηλαδή των τροχών και των συμπαγών αξόνων, τα οποία έχουν άμεση επαφή με το έδαφος. Οι βίαιοι κραδασμοί τέτοιου είδους προκαλούν φάσμα συχνοτήτων διέγερσης της τάξης των $(10 - 15)\ Hz$.

Δεδομένου ότι η πρώτη καθολική ιδιομορφή (Mode 1) εμφάνιζε ιδιοσυχνότητα μεγέθους 20,25 Hz, προκύπτει ένα περιθώριο ασφαλείας της τάξης του 25 %. Έτσι, εξασφαλίστηκε το συμπέρασμα, πως κατά την διέλευση του οχήματος από ανώμαλο έδαφος ή κατά την προσγείωση από άλματα, το σενάριο του συντονισμού θεωρείται απίθανο. Παράλληλα, οι πρώτες ιδιομορφές κατά τη διαμήκη (34,88 Hz) και την κατακόρυφη (46,50 Hz) διεύθυνση, πιστοποιούν πως η σχεδιαστική προσέγγιση του πλαισίου είναι επιτυχής, λόγω της δομικής ακαμψίας, στα φορτία κατά την επιτάχυνση και πέδηση του οχήματος.

Παρόλο που η κατασκευή εκφράζει μια υψηλή δομική στιβαρότητα, υπάρχει μια περίπτωση να προκύψει το φαινόμενο του συντονισμού. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα στις αρχικές στροφές του ρελαντί (1.200 RPM), οι συχνότητες διέγερσης του, ταυτίζονται με αυτή της πρώτης πλευρικής ιδιοσυχνότητας (20,25 Hz), όπως προκύπτει από την σχέση:

$$\frac{1.200\ περιστροφές}{60\ δευτερόλεπτα} = 20\ Hz$$

Συνεπώς, όταν το όχημα βρίσκεται σε πλήρη στάση και με τον κινητήρα σε λειτουργία, θα εμφανιστούν πλευρικοί κραδασμοί στην καμπίνα του οδηγού, εξαιτίας του συντονισμού. Επιπλέον, οι άλλες δύο σημαντικές ιδιομορφές θα έχουν στιγμιαία ταύτιση με τις συχνότητες του κινητήρα κατά την επιτάχυνση του, με το φαινόμενο του συντονισμού πρακτικά να μην γίνετε αντιληπτός.

Παρά το γεγονός του πολλαπλασιασμένου πλάτους της ταλάντωσης λόγω του συντονισμού, οι κραδασμοί που προέρχονται από το ρελαντί συγκριτικά με τα κρουστικά φορτία των αναρτήσεων, έχουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια. Πρακτικά, οι αναπτυσσόμενες τάσεις στα σωληνωτά μέλη και στους κόμβους συγκόλλησης του πλαισίου, περιορίζονται σε επίπεδα αρκετά χαμηλά, ώστε να αποφέρει κόπωση του κράματος χάλυβα. Θα πρέπει, ωστόσο, να τονιστεί πως οι κραδασμοί αυτοί θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα περιφερειακά εξαρτήματα του οχήματος, καθιστώντας την ανάγκη ενσωμάτωσης κατάλληλων αντικραδασμικών βάσεων για την στήριξη και σύνδεσης τους με το δικτυωτό πλαίσιο.

8. Συμπεράσματα

Η αποκλειστική χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360 αποδείχθηκε καθοριστική για την ολοκλήρωση της μελέτης. Η συγχώνευση των περιβαλλόντων σχεδίασης και της μηχανολογικής ανάλυσης επέτρεψε την άμεση μετάβαση από τη γεωμετρική μοντελοποίηση στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των πολλαπλών σεναρίων φόρτισης και την άμεση παραμετροποίηση του μοντέλου (δικτυωτού σωληνωτού πλαισίου), πιστοποιώντας ότι τα σύγχρονα λογισμικά αποτελούν το κατάλληλο εργαλείο για τον μηχανολόγο μηχανικό, στην διεξαγωγή βέλτιστων λύσεων.

Η επιλογή του θερμικά κατεργασμένου κράματος χάλυβα AISI 4130 259 QT, με υψηλό όριο διαρροής (900 MPa), αποτέλεσε μια εξαιρετική επιλογή για το σασί, προσφέροντας κορυφαίο λόγο αντοχής προς βάρος. Σε ακραία σενάρια φόρτισης, όπως η στρεπτική καταπόνηση, η κατακόρυφη κάμψη και η ανατροπή, το δικτυωτό πλαίσιο απέδειξε απόλυτα ελαστική συμπεριφορά με υψηλούς συντελεστές ασφαλείας, διασφαλίζοντας τον ζωτικό χώρο του οδηγού.

Στο σενάριο της μετωπικής πρόσκρουσης με φορτίο 80.000 N, αποδείχθηκε ότι το εμπρόσθιο τμήμα λειτουργεί σωστά, περιορίζοντας την πλαστική παραμόρφωση και αφήνοντας ανέπαφη την καμπίνα του οδηγού. Επιπλέον, η ανάλυση πλευρικής κάμψης

ανέδειξε μετατοπίσεις που αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς με την ενσωμάτωση τριγωνικών ελασμάτων, τα οποία μείωσαν την μέγιστη πλευρική μετατόπιση κατά 26,8 %.

Η εφαρμογή των μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης απέδειξε πως οι αρχικές, συμβατικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση. Συγκεκριμένα, η Shape Optimization στα 10 τριγωνικά ελάσματα ενίσχυσης, οδήγησε σε αφαίρεση πλεονάζουσας μάζας, επιτυγχάνοντας συνολική μείωση κατά 31,53 %, διατηρώντας ταυτόχρονα τη δομική τους ικανότητα.

Η εφαρμογή του παραγωγικού σχεδιασμού στις βάσεις των αναρτήσεων επέτρεψε τη δημιουργία νέων, οργανικών μορφών. Ο αλγόριθμος τοποθέτησε υλικό στις διαδρομές μεταφοράς φορτίων, ελαχιστοποιώντας το βάρος, ενώ ταυτόχρονα εξασφάλισε τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας που είχε οριστεί. Στο τέλος, η δυναμική ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών, εξασφάλισε την ύπαρξη του φαινομένου του συντονισμού όταν το όχημα παραμένει σταθερό με το κινητήρα σε ισχύ.

Όμως η αξιολόγηση για την συγκεκριμένη περίπτωση, επιβεβαίωσε την απουσία σημαντικού κινδύνου από τις συχνότητες διέγερσης του κινητήρα. Οι υπόλοιποι εντοπισμοί των φυσικών συχνοτήτων του πλαισίου εξασφάλισαν ότι το όχημα θα συμπεριφέρεται προβλέψιμα στις εδαφικές ανωμαλίες, ελαχιστοποιώντας την κόπωση λόγω καταπόνησης.

9. Βιβλιογραφία

[1] Eschenauer, H. A., & Olhoff, N. (2001). *Topology optimization of continuum structures: A review.* Applied Mechanics Reviews, 54(4), 331-390.

[2] Michell, A. G. M. (1904). *The limits of economy of material in frame-structures*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 8(47), 589-597.

[3] Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method.* Computer methods in applied mechanics and engineering, 71(2), 197-224.

[4] Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer Science & Business Media.

[5] Xie, Y. M., & Steven, G. P. (1993). *A simple evolutionary procedure for structural optimization*. Computers & structures, 49(5), 885-896.

[6] Xie, Y. M., & Steven, G. P. (1997). *Evolutionary structural optimization*. Springer Science & Business Media.

[7] Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). *Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications*.John Wiley & Sons.

[8] Wang, M. Y., Wang, X., & Guo, D. (2003). *A level set method for structural topology optimization*. Computer methods in applied mechanics and engineering, 192(1-2), 227-246.

[9] Allaire, G., Jouve, F., & Toader, A. M. (2004). *Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method*.Journal of computational physics, 194(1), 363-393.

[10] Tang, Y., Kurtz, A., & Zhao, Y. F. (2015). Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing.

[11] Osher, S., & Fedkiw, R. (2003). *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. Springer Science & Business Media.

[12] Novotny, A. A., & Sokołowski, J. (2013). *Topological derivatives in shape optimization*. Springer Science & Business Media.

[13] Osher, S., & Fedkiw, R. P. (2001). Level Set Methods: An Overview and Some Recent Results. *Journal of Computational Physics*, *169*(2), 463–502. https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6636

[14] Logan, D. L. (2016). A first course in the finite element method (6th ed., SI Edition). Boston, MA: Cengage Learning.