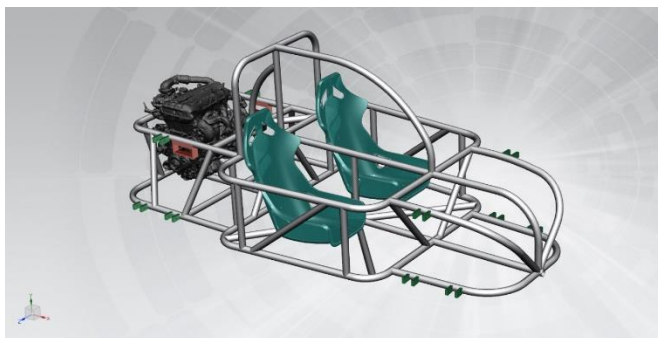




Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Σχεδίαση και Παραγωγή Προϊόντων

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ενσωμάτωση φωτογραμμετρίας για τη μοντελοποίηση κινητήρα, τρισδιάστατος  
σχεδιασμός και υπολογιστική μηχανική ανάλυση ενός αγωνιστικού σασί**



Σπυρίδων Λαγός

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

Τριμελής Επιτροπή: Γεώργιος Σταυρουλάκης

Αντωνιάδης Αριστομένης

Μπιλάλης Νικόλαος

Αύγουστος 2024

## Πρόλογος

Ο ταχύτατα εξελισσόμενος τομέας της μηχανικής και της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε σημαντικές καινοτομίες στον σχεδιασμό και την κατασκευή αγωνιστικών οχημάτων. Η σύγχρονη επιστήμη προσφέρει νέες μεθόδους και εργαλεία, που επιτρέπουν την ακριβή προσομοίωση και βελτιστοποίηση των μηχανικών εξαρτημάτων και συστημάτων ενός οχήματος. Ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία για την επιτυχία ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου είναι η ανθεκτικότητα και η απόδοση του σασί, το οποίο πρέπει να συνδυάζει χαμηλό βάρος με υψηλή στρεπτική ακαμψία.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην τεχνική της φωτογραμμετρίας για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων κινητήρων, καθώς και στον σχεδιασμό και την ανάλυση ενός αγωνιστικού σασί μέσω της χρήσης προηγμένων λογισμικών CAE. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τη συλλογή και επεξεργασία φωτογραφικών δεδομένων για την ακριβή αναπαράσταση του μοντέλου, την διαδικασία σχεδιασμού καθώς και την ανάλυση μέσω Υπολογιστικής Αντοχής για την αξιολόγηση της αντοχής και της ασφάλειας του σχεδιασμένου οχήματος.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναμένεται να προσφέρουν πολύτιμες γνώσεις και πληροφορίες για μελλοντικές έρευνες και εφαρμογές στον τομέα της αγωνιστικής μηχανικής και της βελτιστοποίησης οχημάτων.

## Συντελεστές – Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συνεισφορά και υποστήριξη αρκετών ατόμων και φορέων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά.

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη. Η πολύτιμη καθοδήγησή του, οι γνώσεις του και η διαρκής υποστήριξή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής υπήρξαν αναντικατάστατες. Η εμπειρία του στον τομέα της μηχανικής και η αφοσίωσή του στη διδασκαλία αποτέλεσαν σημαντική πηγή έμπνευσης για εμένα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η υπομονή, η κατανόηση και η ενθάρρυνσή τους ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Χωρίς τη συναισθηματική τους βοήθεια, η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή.

Ευχαριστώ επίσης τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τη συμπαράσταση και τη συνεργασία τους. Η ανταλλαγή απόψεων και ιδεών μαζί τους συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη των γνώσεων και των δεξιοτήτων μου.

Τέλος, ευχαριστώ όλους όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Η συμβολή του καθενός υπήρξε σημαντική και ουσιαστική.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	2
Συντελεστές – Ευχαριστίες .....	3
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	5
1.1 Στόχος και αντικείμενο της έρευνας.....	6
1.2 Σημασία της έρευνας .....	7
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	8
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία.....	10
2.1 Μοντελοποίηση Κινητήρα-Κιβωτίου με χρήση φωτογραμμετρίας.....	10
2.1.1. Προετοιμασία χώρου και μοντέλου. ....	11
2.1.2. Βήματα επεξεργασίας δεδομένων για τη δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου.....	15
2.1.3. Δημιουργία τελικού μοντέλου, τύπος εξαγωγής και ποιότητα .....	23
2.2 Σχεδιασμός Αγωνιστικού Σασί.....	24
2.2.1. Τρισδιάστατο πρόγραμμα σχεδιασμού .....	26
2.2.2. Αναλυτικά βήματα σχεδιασμού .....	31
2.2.3. Απαιτήσεις και προδιαγραφές για το σασί.....	37
2.3 Ανάλυση CAE.....	41
2.3.1 Επισκόπηση και Σημασία της μεθοδολογίας FEA .....	42
2.3.2 Αναλυτικά βήματα προετοιμασίας ανάλυσης.....	42
2.3.3 Αναλυτικά βήματα επίλυσης .....	49
Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και ανάλυση .....	51
3.1 Στρεπτική Ακαμψία .....	52
3.2 Μετωπική Κρούση.....	56
3.3 Σύνοψη Αποτελεσμάτων .....	59
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα.....	60
Βιβλιογραφία .....	61
Εικόνες.....	62

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η μηχανική επιστήμη έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο, συμβάλλοντας καθοριστικά στην ανάπτυξη τεχνολογιών και εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Με την πρόοδο της ψηφιακής τεχνολογίας και των υπολογιστικών μεθόδων, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνικές που επιτρέπουν την ακριβέστερη ανάλυση και το σχεδιασμό μηχανικών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση μεθόδων όπως η φωτογραμμετρία και η υπολογιστική μηχανική ανάλυση έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ενσωμάτωσης της φωτογραμμετρίας για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων κινητήρων και στην ανάλυση του σχεδιασμού ενός αγωνιστικού σασί. Η φωτογραμμετρία χρησιμοποιείται για την ακριβή αναπαράσταση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μηχανικών εξαρτημάτων, ενώ η υπολογιστική ανάλυση, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA), επιτρέπει την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας και της αντοχής του σασί.

Η έρευνα αυτή αποσκοπεί στην παροχή μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού οχημάτων, με έμφαση στην ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Τα ευρήματα της εργασίας αναμένεται να συμβάλλουν στην κατανόηση και βελτίωση των διαδικασιών σχεδιασμού στον τομέα της μηχανικής των αγωνιστικών οχημάτων.

## 1.1 Στόχος και αντικείμενο της έρευνας

Η παρούσα εργασία έχει ως **σκοπό** αφενός την μοντελοποίηση ενός ισχυρού κινητήρα, ο οποίος αποτελεί την κινητήρια δύναμη πίσω από την απόδοση ενός οχήματος και αφετέρου την εύρεση των απόλυτων σημείων στήριξης του κινητήρα-κιβωτίου στο χώρο και τον σχεδιασμό ενός ανθεκτικού και αποδοτικού σασί<sup>1</sup>. Πραγματοποιείται η σχεδίαση του σασί, το οποίο αποτελεί το κρίσιμο σημείο για την ασφάλεια και τη σταθερότητα του οχήματος. Μέσω του σχεδιασμού του, αναζητείται η βέλτιστη απόδοση και αντοχή του, κάτι το οποίο θα μελετηθεί με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων . Το σασί θα αποτελεί χωροδικτύωμα (Space Frame) και ο λόγος της επιλογής σχεδιασμού τέτοιου είδους σασί, είναι η πεποίθηση ότι θα επιτευχθεί η μεγαλύτερη στρεπτική ακαμψία με το μικρότερο δυνατό βάρος. **Αντικείμενο** της έρευνας, αποτελεί ένας κινητήρας Saab turbo B204L 16V 2.000 κυβικών με το κιβώτιό του, τα οποία μοντελοποιούνται μέσω της μεθόδου της φωτογραμμετρίας.

---

<sup>1</sup> Σασί – Chassis, n. pl. **chas·sis** (-ēz)

**a.** The rectangular, usually steel frame, supported on springs and attached to the axles, that holds the body and motor of an automotive vehicle.

**b.** The landing gear of an aircraft, including the wheels, skids, floats, and other structures that support the aircraft on land or water.

**c.** The frame on which a gun carriage moves forward and backward.

**d.** The framework to which the components of a radio, television, or other electronic devices are attached.

[French châssis, frame, from Old French, from Vulgar Latin \*capsīcium, from Latin capsā, box.]

The American Heritage Dictionary of the English Language, Fifth Edition, HarperCollins Publishers, 2022

## 1.2 Σημασία της έρευνας

Η στρεπτική ακαμψία ενός αγωνιστικού οχήματος παρουσιάζει ουσιαστική επίδραση στη συμπεριφορά του κατά το χειρισμό. Η υπερστροφή και υποστροφή μπορούν να τροποποιηθούν με την αλλαγή της κλίσης του αμαξώματος από την εμπρός ή πίσω ανάρτηση. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν την κατανομή των φορτίων και, συνεπώς, την πίεση κάθε τροχού κατά τις στροφές. Για τον ακριβή έλεγχο του χειρισμού, το πλαίσιο πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτο για να διατηρήσει την ανάρτηση στη σωστή θέση της.

Αυτό είναι κρίσιμο, ιδίως σε οχήματα υψηλής απόδοσης ή/και αγωνιστικά, όπου η φόρτιση της ανάρτησης είναι ιδιαίτερα μεγάλη και οι προσαρμογές στην ανάρτηση είναι ουσιώδεις. Η στρεπτική ακαμψία αξιολογεί την αντίσταση του σκελετού ενός οχήματος στην στρέψη του όταν εφαρμόζεται μια ροπή στον διαμήκη άξονά του.

Για τον έλεγχο αυτών των χαρακτηριστικών, οι κορυφαίοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πολύπλοκα λογισμικά για δοκιμές. Ωστόσο, οι μικρότεροι κατασκευαστές συχνά χρησιμοποιούν δικά τους λογισμικά, πιο προσιτά αλλά λιγότερο προηγμένα. Μια εναλλακτική είναι η εικονική προσομοίωση, βασισμένη σε τρισδιάστατα μοντέλα και πολύπλοκες δομές. Αυτά τα μοντέλα, παράγονται από τη γεωμετρία του οχήματος και μοντελοποιούν τα βασικά χαρακτηριστικά όπως η μάζα, το κέντρο βάρους και η στρεπτική ακαμψία. Αυτή η προσέγγιση δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα του οχήματος, περιλαμβάνοντας δυναμικές δοκιμές και προσομοιώσεις.

### 1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Ανατρέχοντας στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, διαπιστώνεται ότι η επιστημονική βιβλιογραφία στον τομέα της μηχανικής και της τεχνολογίας αγωνιστικών οχημάτων επικεντρώνεται στην εξέλιξη προηγμένων μεθόδων και εργαλείων για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης, της ανάλυσης και της απόδοσης των οχημάτων. Η χρήση της φωτογραμμετρίας έχει αναδειχθεί ως μια πρωτοποριακή τεχνική για τη δημιουργία ακριβών τρισδιάστατων μοντέλων μέσω φωτογραφικών δεδομένων. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας και των επιφανειακών χαρακτηριστικών των μηχανικών εξαρτημάτων, προσφέροντας σημαντική ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους μέτρησης.

Παράλληλα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση και την ανάλυση της μηχανικής απόκρισης των δομών υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Η FEA παρέχει δυνατότητες για ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υλικών και των κατασκευών, διευκολύνοντας την αξιολόγηση της αντοχής, της στρεπτικής ακαμψίας και άλλων κρίσιμων μηχανικών ιδιοτήτων. Στη σχετική βιβλιογραφία, η χρήση της FEA είναι ιδιαίτερα σημαντική στον σχεδιασμό σασί αγωνιστικών οχημάτων, όπου η βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων αποτελεί κεντρικό ζήτημα.

Οι σύγχρονες έρευνες εστιάζουν στη χρήση ελαφρών και υψηλής αντοχής υλικών, όπως τα σύνθετα υλικά και τα κράματα αλουμινίου, για τη μείωση του βάρους και την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας. Οι μελέτες αυτές αναδεικνύουν τη σημασία της επιλογής κατάλληλων υλικών και τεχνικών κατασκευής για την επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων. Επιπλέον, οι διασυνδέσεις μεταξύ των διαφόρων συστημάτων του οχήματος, όπως ο κινητήρας, το σασί και η ανάρτηση, εξετάζονται λεπτομερώς για τη συνολική βελτιστοποίησή τους.



Σημαντικές πηγές δημοσιευμένων στοιχείων στάθηκαν τα εξής:

1. Armin Gruen, *Development and Status of Image matching in Photogrammetry*, Institute of Conservation and Building Research, ETH Zurich, 2010
2. Doriot Furnea, Silviu Butnariu, *New Approaches in Designing a Race Car Chassis for Formula Student Engineering Competition*, Transilvania University of Brasov, Romania, 2018
3. Jazar N. Reza, *Vehicle Dynamics. Theory and Application*, Springer, New York, 2008
4. Paul M. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers, Third Edition*, SAE International, 2022
5. Δρ Π. Α. Βουθούνης, *Τεχνική Μηχανική-Αντοχή των Υλικών*, 2011

## **Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία**

### **2.1 Μοντελοποίηση Κινητήρα-Κιβωτίου με χρήση φωτογραμμετρίας**

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση του κινητήρα-κιβωτίου με τη χρήση της φωτογραμμετρίας, μιας σύγχρονης τεχνικής που επιτρέπει τη δημιουργία ακριβών τρισδιάστατων μοντέλων μέσω της επεξεργασίας φωτογραφικών δεδομένων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελείται από διάφορα στάδια, καθένα από τα οποία είναι κρίσιμο για την επίτευξη ενός υψηλής ακρίβειας και ποιότητας τελικού αποτελέσματος.

Αρχικά, αναλύονται λεπτομερώς όλες οι τεχνικές φωτογραμμετρίας που εφαρμόστηκαν για την απόκτηση των απαραίτητων δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει την προσεκτική προετοιμασία του χώρου και του μοντέλου πριν από τη φωτογράφιση, καθώς και την επιλογή του κατάλληλου φωτογραφικού εξοπλισμού. Ειδική έμφαση δίνεται στην εξασφάλιση ομοιόμορφου φωτισμού και στην αποφυγή σκιών, καθώς αυτά τα στοιχεία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα των φωτογραφιών και, κατ' επέκταση, την ακρίβεια του τελικού μοντέλου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την απόκτηση των φωτογραφιών. Κάθε βήμα της φωτογράφισης περιγράφεται λεπτομερώς, από την επιλογή των γωνιών λήψης μέχρι την εξασφάλιση της σωστής εστίασης και τη χρήση τριπόδου για τη σταθερότητα της φωτογραφικής μηχανής. Επίσης, αναφέρονται οι προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, όπως η ανάγκη για καθαρές και χωρίς θόρυβο φωτογραφίες, και οι λύσεις που εφαρμόστηκαν για την αντιμετώπισή τους.

Ακολούθως, αναλύεται η διαδικασία επεξεργασίας των φωτογραφικών δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τη φόρτωση των φωτογραφιών σε ειδικό λογισμικό φωτογραμμετρίας, την αυτόματη ανάλυση των σημείων αναφοράς, την τριγωνοποίηση και την αφαίρεση του θορύβου. Περιγράφονται επίσης οι εναλλακτικές λύσεις που εφαρμόστηκαν για την αντιμετώπιση τυχόν περιορισμών και προκλήσεων που προέκυψαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Τέλος, το κεφάλαιο καταλήγει με την παρουσίαση του τελικού μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου που προέκυψε από αυτήν τη διαδικασία. Η ακρίβεια και η ποιότητα του μοντέλου αξιολογούνται μέσω της μεθόδου της επαλήθευσης, εξασφαλίζοντας ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται στις απαιτούμενες προδιαγραφές και είναι έτοιμο για περαιτέρω χρήση σε προγράμματα CAD και άλλες εφαρμογές.

Αυτή η αναλυτική προσέγγιση της διαδικασίας φωτογραμμετρίας επιτρέπει την πλήρη κατανόηση των σταδίων που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός ακριβούς τρισδιάστατου μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες και για άλλες μελλοντικές εφαρμογές της τεχνικής αυτής.

Το περιεχόμενο αυτού του κεφαλαίου βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στις παρακάτω πηγές, οι οποίες προσέφεραν ουσιαστική υποστήριξη και πολύτιμες πληροφορίες:

- Armin Gruen, 2010
- T. Schenk, 2005
- Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0, 2023

### **2.1.1. Προετοιμασία χώρου και μοντέλου.**

- **Προετοιμασία χώρου φωτογράφισης**

Η προετοιμασία του χώρου φωτογράφισης αποδείχθηκε βήμα μεγίστης σημασίας για την δημιουργία του μοντέλου. Το βασικότερο πρόβλημα που χρειάστηκε να αντιμετωπισθεί είναι αυτό του φωτισμού και ειδικότερα της ομοιόμορφης κατανομής του φωτισμού. Πρέπει ο χώρος να έχει επαρκή φωτισμό για να αποφευχθούν οι σκιές και οι ασαφείς λεπτομέρειες στις φωτογραφίες. Η ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού είναι σημαντική διότι κατά την λήψη των φωτογραφιών υπήρχαν περιπτώσεις που εξαιτίας λανθασμένου φωτισμού δημιουργούταν σκιά στο μοντέλο. Ακόμα, ιδιαίτερα σημαντικό είναι ο χώρος να είναι προστατευμένος από εξωτερικούς παράγοντες όπως το φως του ήλιου, διότι δεν επιτυγχάνεται σταθερός φωτισμός και ο αέρας ενδέχεται να κουνήσει το αντικείμενο ή να μεταφέρει πάνω σε αυτό ξένα αντικείμενα.

- Προετοιμασία και τοποθέτηση κινητήρα-κιβωτίου προς φωτογράφιση

Κατά την προετοιμασία και την τοποθέτηση του κινητήρα-κιβωτίου προς φωτογράφιση, το μοντέλο πρέπει να είναι καθαρό και να μην έχει εμπόδια που θα παρεμβάλλονται στη λήψη των φωτογραφιών. Κατά το στάδιο αυτό όμως, ένα βασικό πρόβλημα που δημιουργήθηκε και ήταν αναπόφευκτο, ήταν η ανάρτηση του μοντέλου με ιμάντες έτσι ώστε να είναι δυνατή η λήψη φωτογραφιών από οποιαδήποτε γωνία. Βέβαια, οι ιμάντες είναι ξένα αντικείμενα. Παρόλα αυτά για τις ανάγκες της φωτογράφισης δεν γινόταν να αποφευχθούν και θα ενσωματωθούν στο τελικό μοντέλο. Ακόμα, τοποθετήθηκαν ειδικοί στόχοι – τεχνητά φωτοσταθερά σημεία (coded targets) πάνω σε διάφορα σημεία του μοντέλου, διατεταγμένα με τρόπο τέτοιο ώστε να δημιουργούν τριγωνισμούς, απαραίτητους για την πραγματοποίηση υπολογισμών και με σκοπό να λειτουργούν ως σημεία αναφοράς ώστε να βοηθήσουν στην ακρίβεια του μοντέλου που θα δημιουργηθεί.



Εικ. 1. Τοποθέτηση επαρκούς φωτισμού περιμετρικά του αντικειμένου και ανάρτηση αυτού με ιμάντες



Εικ. 2. Αριθμημένα φωτοσταθερά (coded targets)



Εικ. 3. Τοποθέτηση αριθμημένων στόχων στην κατάλληλη διάταξη.

#### 2.1.2. Βήματα απόκτησης δεδομένων για τη δημιουργία του ακριβούς μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου

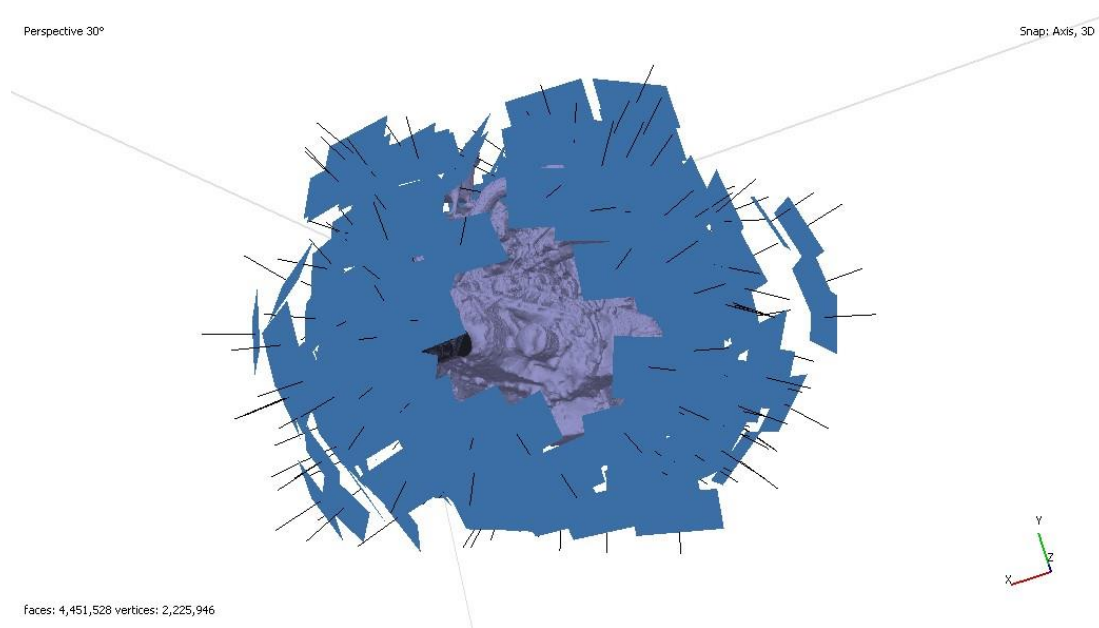
Τα βήματα απόκτησης δεδομένων, δηλαδή η φωτογράφιση του μοντέλου, είναι σχετικά εύκολη αλλά απόλυτα κρίσιμη για τη συνέχεια της δημιουργίας ακριβούς μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου. Τα βήματα αυτά είναι:

- **Επιλογή φωτογραφικού εξοπλισμού**

Για την λήψη σωστών φωτογραφιών χρειάζεται κατάλληλος φωτογραφικός εξοπλισμός, όπως μια ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (DSLR). Αρχικά, λόγω έλλειψης του συγκεκριμένου εξοπλισμού εργασίας η φωτογράφιση ξεκίνησε με ένα απλό κινητό που όμως στην πορεία αποδείχθηκε ότι δεν μπορούσε να δημιουργηθεί μοντέλο, διότι το κινητό δεν έχει εστιακό βάθος και η εύρεση του παραπάνω εξοπλισμού κρίθηκε αναγκαία. Η τελική φωτογράφιση του μοντέλου έγινε με ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης.

- **Οπτική κάλυψη**

Για την ολοκληρωμένη και επαρκή οπτική κάλυψη του μοντέλου είναι σημαντική η φωτογράφισή του από διάφορες γωνίες, όλες τις πλευρές, καθώς και από ψηλά και χαμηλά χωρίς να δημιουργηθούν σκιές. Κάθε σημείο του αντικειμένου είναι απαραίτητο να καλύπτεται από τουλάχιστον τρεις φωτογραφίες από διαφορετικές γωνίες και κάθε φωτογραφία είναι σημαντικό να περιέχει τουλάχιστον τρεις στόχους (σημεία αναφοράς). Αυτό βέβαια δεν ήταν εφικτό στο σύνολο των φωτογραφιών.



Εικ. 4. Φωτογραφία του μοντέλου στο οποίο απεικονίζονται (ορθογώνιες διατομές με μπλε χρώμα) η γωνία και το σημείο της κάθε επιμέρους λήψης φωτογραφίας.



- **Σωστή εστίαση**

Εξίσου σημαντικό με τα παραπάνω βήματα είναι οι φωτογραφίες να είναι καθαρές και με σωστό εστιακό βάθος. Η σωστή εστίαση στα εκάστοτε σημεία που φωτογραφίζονται και η σταθερότητα της φωτογραφικής μηχανής κατά την φωτογράφιση είναι απολύτως απαραίτητα για την αξιόπιστη αντιγραφή του μοντέλου. Σε αυτό κρίνεται αναγκαία η χρήση κάποιου τριπόδου ή άλλου σταθερού στηρίγματος για τη φωτογραφική μηχανή.

### **2.1.2. Βήματα επεξεργασίας δεδομένων για τη δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου κινητήρα-κιβωτίου**

Σε αυτό το σημείο αναφέρονται και αναλύονται τα βήματα της επεξεργασίας των φωτογραφιών και η δημιουργία του τελικού μοντέλου. Για όλα τα βήματα που περιγράφονται παρακάτω, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα της Metashape, το Agisoft.

- **Φόρτωση φωτογραφιών**

Η διαδικασία φόρτωσης εικόνων στο Agisoft είναι απλή. Παρόλα αυτά, βασική προϋπόθεση είναι οι εικόνες να είναι υψηλής ανάλυσης και ποιότητας και να περιλαμβάνουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για το αντικείμενο. Αφού φορτωθούν οι εικόνες ή κατά την αρχειοθέτηση των φωτογραφιών στον ηλεκτρονικό υπολογιστή πρέπει να γίνει η διαλογή όσων από αυτές θα χρησιμοποιηθούν. Όσες περισσότερες είναι οι φωτογραφίες τόσο μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ανάλυση θα μπορέσουμε να έχουμε στο τελικό μοντέλο, αλλά η επεξεργασία θα διαρκέσει πολύ περισσότερο χρόνο. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν κρίνεται απαραίτητη τόσο η λεπτομέρεια, όσο η γενική γεωμετρία του αντικειμένου και οι ακριβείς θέσεις των τριών βάσεων στήριξης του κινητήρα-κιβωτίου.

- **Ευθυγράμμιση φωτογραφιών (Align) – Δημιουργία αραιού νέφους σημείων (Sparse point Cloud)**

Το στάδιο του **Align Photos** (ευθυγράμμιση φωτογραφιών) στο λογισμικό Agisoft Metashape είναι ένα από τα βασικά βήματα στη διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων από φωτογραφίες μέσω φωτογραμμετρίας. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αναγνώριση και το ταίριασμα χαρακτηριστικών σημάτων (feature points- coded

targets) στις φωτογραφίες που έχουν εισαχθεί στο λογισμικό, με σκοπό την ανασυγκρότηση της γεωμετρίας του αντικειμένου που απεικονίζεται.

#### **Λεπτομερής περιγραφή του σταδίου Align Photos:**

1. **Ανίχνευση Χαρακτηριστικών Σημείων:** Το λογισμικό αναγνωρίζει χαρακτηριστικά σημεία σε κάθε φωτογραφία, τα οποία αποτελούν διακριτά και ανιχνεύσιμα στοιχεία, όπως άκρα, γωνίες και άλλες μοναδικές δομές. Αυτά τα σημεία είναι ουσιαστικά σημεία ενδιαφέροντος που μπορούν να αναγνωριστούν σε διαφορετικές λήψεις.
2. **Ταίριασμα Σημείων (Matching):** Στη συνέχεια, το Agisoft προσπαθεί να εντοπίσει τα ίδια χαρακτηριστικά σημεία σε διαφορετικές φωτογραφίες. Χρησιμοποιώντας αλγορίθμους ταύτισης, όπως το Scale-Invariant Feature Transform (SIFT), το λογισμικό ταυτίζει αυτά τα σημεία μεταξύ των φωτογραφιών, δημιουργώντας συζεύξεις (matches) που συνδέουν κοινά σημεία από διαφορετικές γωνίες λήψης.
3. **Ευθυγράμμιση (Alignment):** Με βάση τις ταυτίσεις, το λογισμικό υπολογίζει τη σχετική θέση και κατεύθυνση της κάμερας για κάθε φωτογραφία. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει την εκτίμηση των εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας (θέση και προσανατολισμός) καθώς και των εσωτερικών παραμέτρων (εστιακή απόσταση, παραμόρφωση φακού, κλπ.). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η αναδημιουργία μιας πρώτης εκτίμησης της θέσης των χαρακτηριστικών σημείων στον τρισδιάστατο χώρο.
4. **Βαθμονόμηση (Optimization):** Μετά την αρχική ευθυγράμμιση, το λογισμικό βελτιώνει τα αποτελέσματα μέσω περαιτέρω βελτιστοποίησης, μειώνοντας τα σφάλματα και βελτιώνοντας την ακρίβεια της ανασυγκρότησης.





Εικ. 5. Φωτογραφία του μοντέλου μετά το στάδιο του Align (Tie points – Sparse point cloud)

- Τοποθέτηση της αναφορικής απόστασης

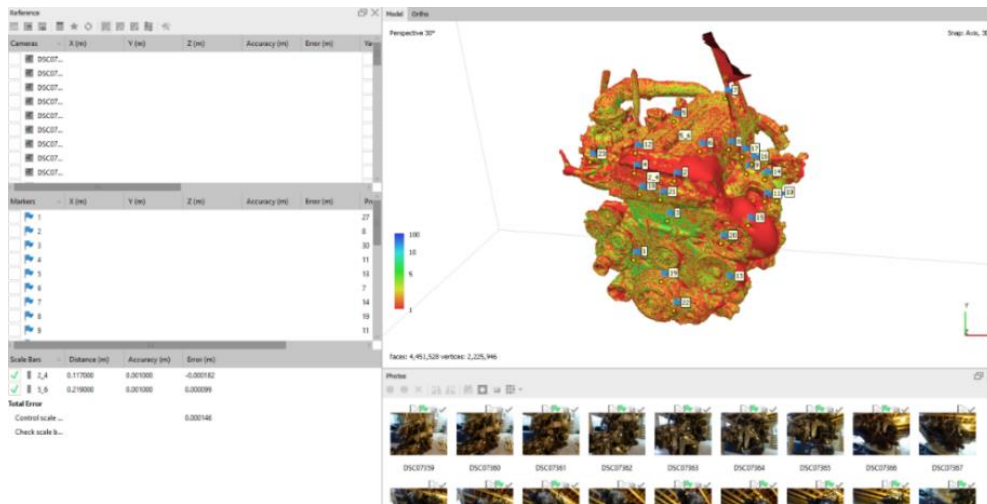
Στη συνέχεια της διαδικασίας της μοντελοποίησης, τοποθετείται κάποια αναφορική απόσταση μεταξύ δύο σημείων που έχουν μετρηθεί στο πραγματικό μοντέλο (Scale bars). Αυτή η απόσταση θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των πραγματικών αποστάσεων στο μοντέλο.

- Σύνδεση των σημείων αναφοράς

Τα σημεία αναφοράς τελικά συνδέονται μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας την αναφορική απόσταση ως μέτρο σύγκρισης. Αυτό δίνει πλέον τη δυνατότητα να καθοριστεί η πραγματική κλίμακα του μοντέλου μας και να υπολογιστούν οι πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των σημείων.

- Προσαρμογή της κλίμακας

Τέλος, με βάση την αναφορική απόσταση και τη σύνδεση των σημείων αναφοράς προκύπτει το μοντέλο σε κλίμακα 1:1, εξασφαλίζοντας ότι οι πραγματικές αποστάσεις αντιστοιχούν στις αποστάσεις του μοντέλου.



Εικ. 6. Δημιουργία αναφορικών αποστάσεων (Scale bars) μεταξύ δύο σημείων.

- **Δημιουργία πυκνού νέφους σημείων (Dense Cloud)**

Το στάδιο του **Dense Cloud** (πυκνό νέφος σημείων) στο Agisoft Metashape είναι ένα από τα κρίσιμα βήματα στη διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων από φωτογραφίες μέσω φωτογραμμετρίας. Ακολουθώντας το στάδιο της ευθυγράμμισης φωτογραφιών (Align Photos), το οποίο δημιουργεί ένα αραιό νέφος σημείων (sparse point cloud), το στάδιο του πυκνού νέφους σημείων παράγει μια λεπτομερέστερη και πιο ακριβή αναπαράσταση της επιφάνειας του αντικειμένου ή της σκηνής.

#### Λεπτομερής περιγραφή του σταδίου Dense Cloud:

1. **Δημιουργία Πυκνού Νέφους Σημείων:** Το λογισμικό Agisoft Metashape χρησιμοποιεί τις πληροφορίες από το αραιό νέφος σημείων, τις αντίστοιχες φωτογραφίες, και τα δεδομένα της κάμερας (εξωτερικές και εσωτερικές παραμέτρους) για να ανακατασκευάσει ένα πιο λεπτομερές νέφος σημείων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το λογισμικό επεξεργάζεται κάθε φωτογραφία σε σχέση με τις άλλες, αναλύοντας τα pixels για να ανιχνεύσει την επιφάνεια του αντικειμένου με υψηλή ακρίβεια.
2. **Υπολογισμός Βάθους:** Το λογισμικό υπολογίζει τη διαφορά βάθους (depth maps) για κάθε ζεύγος φωτογραφιών, χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους παράγοντες ταύτισης που δημιουργήθηκαν στο στάδιο της ευθυγράμμισης. Αυτές οι χαρτογραφήσεις βάθους επιτρέπουν την εκτίμηση της απόστασης των σημείων της επιφάνειας από τη θέση της κάμερας για κάθε φωτογραφία.

3. **Σύνθεση Νέφους:** Οι χαρτογραφήσεις βάθους συγχωνεύονται για να σχηματίσουν ένα ολοκληρωμένο πυκνό νέφος σημείων. Σε αυτό το στάδιο, το λογισμικό συγκεντρώνει τα σημεία από όλες τις φωτογραφίες και δημιουργεί ένα τρισδιάστατο νέφος σημείων με υψηλή πυκνότητα, το οποίο απεικονίζει λεπτομερώς την επιφάνεια του αντικειμένου ή της σκηνής.
4. **Βελτιστοποίηση και Φιλτράρισμα:** Το τελικό πυκνό νέφος σημείων μπορεί να υποστεί βελτιστοποίηση και φιλτράρισμα για να αφαιρεθούν ανεπιθύμητα σημεία ή θόρυβος. Αυτό εξασφαλίζει ότι το τελικό μοντέλο είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβές και απαλλαγμένο από σφάλματα.

Το πυκνό νέφος σημείων αποτελεί το θεμέλιο για τα επόμενα στάδια στη διαδικασία δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου, όπως η κατασκευή του πλέγματος (mesh) και η εφαρμογή της υφής (texture). Η ποιότητα του πυκνού νέφους επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια του τελικού 3D μοντέλου. Συνεπώς, η προσεκτική εκτέλεση αυτού του σταδίου είναι καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της τρισδιάστατης αναπαράστασης.



Εικ. 7. Τελικό προϊόν μετά το στάδιο της δημιουργίας πυκνού νέφους σημείων (dense cloud)

- **Δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος (Mesh)**

Το στάδιο του **Mesh** στο Agisoft Metashape είναι η διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα από το πυκνό νέφος σημείων. Το πλέγμα (mesh) αποτελεί μια σύνθεση τριγώνων που περιγράφουν την επιφάνεια του

αντικειμένου ή της σκηνής που ανακατασκευάζεται. Αυτή η φάση είναι καθοριστική για την μετάβαση από μια συλλογή σημείων σε μια συνεκτική και ομαλή τρισδιάστατη επιφάνεια, επιτρέποντας την ακριβή αναπαράσταση του γεωμετρικού σχήματος του αντικειμένου.

#### **Λεπτομερής περιγραφή του σταδίου Mesh:**

1. **Δημιουργία Πλέγματος (Mesh Generation):** Το λογισμικό χρησιμοποιεί το πυκνό νέφος σημείων ως βάση για τη δημιουργία του πλέγματος. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, τα σημεία συνδέονται με τριγωνικά επίπεδα, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα που περιγράφει την επιφάνεια του αντικειμένου. Τα τρίγωνα σχηματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν ολόκληρη την επιφάνεια, ενώνοντας γειτονικά σημεία.
2. **Επιλογή Μεθόδου Δημιουργίας Πλέγματος:** Το Agisoft Metashape παρέχει διάφορες μεθόδους δημιουργίας πλέγματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και την ποιότητα του πυκνού νέφους σημείων. Οι κύριες μέθοδοι περιλαμβάνουν:
  - **Arbitrary (Arbitrary):** Χρησιμοποιείται για γενικά αντικείμενα και επιφάνειες με περίπλοκη γεωμετρία. Είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου οι επιφάνειες δεν είναι απαραίτητα λεία ή συνεχείς.
  - **Height Field:** Χρησιμοποιείται συνήθως για τοπογραφικές επιφάνειες ή περιοχές όπου η γεωμετρία μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν επίπεδη σε μεγάλη κλίμακα.
3. **Βελτιστοποίηση Πλέγματος (Mesh Optimization):** Μετά τη δημιουργία του αρχικού πλέγματος, το λογισμικό προσφέρει εργαλεία για τη βελτιστοποίηση του πλέγματος. Αυτή η βελτιστοποίηση μπορεί να περιλαμβάνει την απλοποίηση του πλέγματος (reduction), διατηρώντας όμως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την εξομάλυνση της επιφάνειας (smoothing) για τη μείωση θορύβου και ατελειών.
4. **Κλείσιμο Κενών (Hole Filling):** Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν κενά (τρύπες) στο πλέγμα λόγω ελλείψεων στα δεδομένα ή στις φωτογραφίες, το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το κλείσιμο αυτών των κενών, διασφαλίζοντας την πληρότητα του μοντέλου.

Το τελικό προϊόν του σταδίου Mesh είναι ένα τρισδιάστατο πλέγμα που περιγράφει λεπτομερώς τη γεωμετρία του αντικειμένου ή της σκηνής. Αυτό το πλέγμα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή υφής (texturing) και άλλων

διαδικασιών, όπως η απόδοση σκίασης (rendering) ή η ανάλυση των γεωμετρικών ιδιοτήτων του αντικειμένου. Το πλέγμα αποτελεί τον πυρήνα της τελικής τρισδιάστατης αναπαράστασης και είναι κρίσιμο για την ακρίβεια και την ποιότητα του τελικού μοντέλου.

- **Δημιουργία υφής (Texture mapping)**

Στο στάδιο του **texture** στο Agisoft Metashape, το πλέγμα (mesh) που έχει δημιουργηθεί από το πυκνό νέφος σημείων επεξεργάζεται για να του εφαρμοστεί υφή, δημιουργώντας έτσι μια ρεαλιστική απεικόνιση του αντικειμένου ή της σκηνής. Το τελικό προϊόν είναι ένα λεπτομερές και φωτορεαλιστικό 3D μοντέλο, έτοιμο για χρήση σε εφαρμογές όπως η απόδοση σκίασης (rendering), η ανάλυση γεωμετρικών ιδιοτήτων, ή η ενσωμάτωσή του σε εικονικά περιβάλλοντα.

## **Στάδιο του Texture**

### **1. Δημιουργία Υφής (Texture Mapping)**

Στο στάδιο αυτό, το λογισμικό χρησιμοποιεί τις φωτογραφίες που έχουν ληφθεί κατά τη διαδικασία φωτογραμμετρίας για να δημιουργήσει υφές που εφαρμόζονται στο πλέγμα. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

- **Ανάλυση Φωτογραφιών:** Οι φωτογραφίες χρησιμοποιούνται για την καταγραφή λεπτομερειών της επιφάνειας του αντικειμένου. Το λογισμικό εντοπίζει χαρακτηριστικά και μοτίβα στις φωτογραφίες και τα συνδυάζει για να δημιουργήσει υφές.
- **Αποτύπωση Υφής:** Το λογισμικό δημιουργεί ένα χάρτη υφής (texture map), ο οποίος αντιστοιχεί στις φωτογραφίες με το πλέγμα. Αυτός ο χάρτης καθορίζει πώς οι φωτογραφίες πρέπει να δημιουργήσουν την επιφάνεια του πλέγματος.

### **2. Εφαρμογή Υφής**

Η υφή εφαρμόζεται στο πλέγμα με τις παρακάτω διαδικασίες:

- **Εξαγωγή Υφής:** Το λογισμικό δημιουργεί μια εικόνα (ή πολλές εικόνες) που περιγράφει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας. Αυτές οι εικόνες χρησιμοποιούνται για να επικάλυψουν την επιφάνεια του τρισδιάστατου μοντέλου.
- **Μέθοδος Αντιστοίχισης (UV Mapping):** Καθορίζεται πώς η υφή "προσαρμόζεται" στο πλέγμα. Το UV mapping είναι η διαδικασία που αντιστοιχεί τις συντεταγμένες της υφής (UV) στις τρισδιάστατες συντεταγμένες του πλέγματος (XYZ).

### **3. Βελτιστοποίηση Υφής**

Η υφή μπορεί να βελτιωθεί μέσω διαφόρων εργαλείων και ρυθμίσεων, όπως:

- **Απλοποίηση Υφής:** Μείωση της ανάλυσης της υφής για τη βελτίωση της απόδοσης, διατηρώντας ωστόσο την ποιότητα που απαιτείται.
- **Διόρθωση Λαθών:** Διόρθωση τυχόν παραμορφώσεων ή ατελειών στην υφή που μπορεί να προκύψουν.
- **Τελικό Προϊόν**

Το τελικό προϊόν είναι ένα ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο που συνδυάζει τη γεωμετρία του αντικειμένου με τις φωτογραφίες που του δίνουν ρεαλιστική υφή. Το αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο με:

- **Ακριβή Γεωμετρία:** Περιγράφει πιστά την επιφάνεια και τη δομή του αντικειμένου ή της σκηνής.
- **Ρεαλιστική Υφή:** Η επιφάνεια του μοντέλου είναι επενδεδυμένη με λεπτομερείς και ακριβείς εικόνες, που το καθιστούν οπτικά ρεαλιστικό.
- **Έτοιμο προς Χρήση:** Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές απόδοσης, εικονικής πραγματικότητας, ή ακόμα και σε εικονικά περιβάλλοντα για διάφορους σκοπούς.

Η εφαρμογή υφής είναι κρίσιμη για την επίτευξη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων και είναι απαραίτητη για την ολοκλήρωση του 3D μοντέλου.



Εικ. 8. Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο με την ολοκλήρωση όλων των σταδίων

### **2.1.3. Δημιουργία τελικού μοντέλου, τύπος εξαγωγής και ποιότητα**

Η ενότητα αυτή εστιάζει στη δημιουργία του τελικού μοντέλου και τον τρόπο εξαγωγής του σε μορφή αρχείου, καθώς και στην αξιολόγηση της ποιότητάς του. Μετά την επεξεργασία των φωτογραφιών και τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, ακολουθούνται ορισμένα συγκεκριμένα βήματα για να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα και παρουσιάζονται παρακάτω.

Καταρχάς, είναι σημαντικό να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος αρχείου εξαγωγής για το μοντέλο μας. Το Agisoft παρέχει διάφορες επιλογές ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου. Ορισμένοι από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους τύπους εξαγωγής για τη χρήση σε προγράμματα CAD είναι οι μορφές αρχείων STL και OBJ και για την ανάλυση και αποθήκευση δεδομένων επιφάνειας η μορφή PLY. Για την συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η εξαγωγή σε μορφή STL.

Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ποιότητα του τελικού μοντέλου. Κατά την επεξεργασία, είναι σημαντικό να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές για τη βελτίωση της ποιότητας, όπως η απαλοιφή ατελειών, η μείωση του θορύβου ή η εφαρμογή υψηλότερης ανάλυσης στα σημεία ενδιαφέροντος. Είναι σημαντικό να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και απόδοσης του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των διαθέσιμων πόρων και τις απαιτήσεις του έργου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω έχει σημασία να οριστούν σωστά οι απόλυτες θέσεις των βάσεων κινητήρα-κιβώτιου, οπότε η καλή ποιότητα σε αυτά τα τρία σημεία είναι σημαντική.

Τέλος, η αξιολόγηση της ποιότητας του μοντέλου είναι ένα κρίσιμο βήμα αναφορικά με την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων και την επίτευξη των επιθυμητών προδιαγραφών. Στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ποιότητας των τριγώνων, της ομαλότητας των επιφανειών και χρησιμοποιήθηκαν οι δυνατότητες μέτρησης του προγράμματος (measurements) για να προσδιοριστεί η ακρίβεια του μοντέλου και η επιτυχία προσαρμογής της κλίμακας.



## 2.2 Σχεδιασμός Αγωνιστικού Σασί

Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζεται αναλυτικά η χρήση του λογισμικού Siemens NX για τον σχεδιασμό του αγωνιστικού σασί. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο βασικά τμήματα: το πρώτο επικεντρώνεται στο τρισδιάστατο πρόγραμμα σχεδίασης (Siemens NX) και τις δυνατότητές του για τη δημιουργία ακριβών και προηγμένων μοντέλων, ενώ το δεύτερο αναλύει τις απαιτήσεις, τις προδιαγραφές και τους περιορισμούς που καθορίζουν τον σχεδιασμό του σασί. Μέσω της διερεύνησης αυτών των δύο τμημάτων, αναδεικνύονται οι τεχνολογικές δυνατότητες και η ευελιξία του Siemens NX στον σχεδιασμό αγωνιστικών οχημάτων και διάφορων μηχανολογικών εξαρτημάτων τους.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία σχεδιασμού στο λογισμικό, πραγματοποιήθηκε ένα προκαταρκτικό σχέδιο στο χαρτί. Το σχέδιο αυτό δεν περιλάμβανε συγκεκριμένες διαστάσεις, αλλά απεικόνιζε μόνο τη γενική γεωμετρία που θα ακολουθηθεί. Αυτό το προκαταρκτικό βήμα βοήθησε στη διαμόρφωση μιας συνολικής εικόνας για τον σχεδιασμό του σασί, διευκολύνοντας την κατανόηση των βασικών γραμμών και της διαμόρφωσης του χώρου πριν από την ψηφιακή μοντελοποίηση. Το βήμα αυτό βασίστηκε σε συνδυασμό προσωπικών εκτιμήσεων και γνώσεων, καθώς και στη μελέτη διάφορων εντύπων και πηγών σχετικών με τον σχεδιασμό αγωνιστικών σασί.

Οι περιορισμοί που τέθηκαν επικεντρώθηκαν κυρίως σε θέματα ασφάλειας και αντοχής. Ο σχεδιασμός του σασί επικεντρώνεται στην δημιουργία σωληνωτού σασί (space frame chassis), το οποίο προτιμάται για την αντοχή του και την ευκολία κατασκευής του. Οι βασικές διατομές που θα χρησιμοποιηθούν είναι κυκλικές. Το προκαταρκτικό αυτό στάδιο του σχεδιασμού παρείχε την ευκαιρία να αναγνωριστούν και να αντιμετωπιστούν πιθανά προβλήματα πριν από την είσοδο στην πιο λεπτομερή και ακριβή ψηφιακή φάση.

Ένα από τα βασικά κριτήρια για τον σχεδιασμό του σασί ήταν η στρεπτική ακαμψία. Η στρεπτική ακαμψία είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια του αγωνιστικού οχήματος, καθώς επηρεάζει την ικανότητα του οχήματος να αντιστέκεται στις στρεπτικές δυνάμεις που ασκούνται κατά την κίνηση, τις στροφές και τις επιταχύνσεις. Χρησιμοποιώντας τεχνικές τριγωνισμού, οι οποίες είναι γνωστές για την αύξηση της δομικής ακαμψίας, επιτεύχθηκε μια ισχυρή και ανθεκτική



κατασκευή. Ο τριγωνισμός των δομικών στοιχείων του σασί διασφαλίζει ότι οι δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλη τη δομή, μειώνοντας τις τάσεις και τις παραμορφώσεις. Αυτό βελτιώνει την ευστάθεια και την απόκριση του οχήματος, εξασφαλίζοντας ότι το σασί μπορεί να αντέξει τις απαιτήσεις των αγωνιστικών συνθηκών<sup>2</sup>.

Η ανάλυση περιελάμβανε επίσης τη μελέτη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σασί, κάτι που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Το υλικό Chromoly 4340 επιλέχθηκε για την υψηλή του αντοχή και την ικανότητά του να απορροφά ενέργεια κατά την πρόσκρουση, εξασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια του οδηγού. Η επιλογή αυτού του υλικού βασίστηκε σε συγκριτικές μελέτες με άλλα υλικά, όπως ο χάλυβας SAE 1005, και απέδειξε ότι το Chromoly 4340 ήταν η καλύτερη επιλογή για την συγκεκριμένη εφαρμογή<sup>3</sup>.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, αντλήθηκαν σημαντικές πληροφορίες από τις παρακάτω πηγές, οι οποίες αποτέλεσαν πολύτιμη βοήθεια για την ολοκλήρωση της έρευνας:

- Yogesh Sahu, Nikhil Ramachandran, Sham Pandhavl, Hrushikesh Deshmukh, Shubhangi Manvatkar, 2018
- Prajwal Kumar M. P, Vivek Muralidharan, G. Madhusudhana, 2014
- Sham Tickoo, 2019
- Ming C. Leu, Wenjin Tao, Amir Ghazanfari, Krishna Kolan, 2019

Τέλος, η εργονομία και η άνεση του οδηγού είναι κρίσιμα σημεία του σχεδιασμού. Η θέση του οδηγού και η ορατότητα κατά την οδήγηση λήφθηκαν υπόψη για να εξασφαλιστεί ότι ο οδηγός θα μπορεί να οδηγήσει το όχημα με άνεση και ασφάλεια. Χρησιμοποιήσαμε έτοιμα μοντέλα καθισμάτων από το διαδίκτυο, τα οποία προστέθηκαν ως αντικείμενα στο σχεδιασμό, παρέχοντας μια καλύτερη εικόνα για τις διαστάσεις του μεσαίου μέρους του σασί. Αυτός ο τρόπος προσέγγισης μας επέτρεψε να διασφαλίσουμε ότι οι χώροι είναι επαρκείς και εργονομικοί.

---

<sup>2</sup> Ο τριγωνισμός χρησιμοποιείται για την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας του σασί, δεδομένου ότι η τριγωνική δομή είναι η απλούστερη μορφή που παρέχει υψηλή δομική ακαμψία. Ο τριγωνισμός των σωλήνων του σασί βοηθά στην κατανομή των δυνάμεων και στην ενίσχυση της αντοχής της κατασκευής (Yogesh Sahu, Nikhil Ramachandran, Sham Pandhavl, Hrushikesh Deshmukh, Shubhangi Manvatkar, 2018)

<sup>3</sup> Το υλικό Chromoly 4340 επιλέχθηκε λόγω της υψηλής αντοχής και της ικανότητάς του να αντέχει σε ακραίες συνθήκες, σε αντίθεση με το SAE 1005, το οποίο είναι λιγότερο ανθεκτικό. (Prajwal Kumar M. P, Vivek Muralidharan, G. Madhusudhana, 2014)

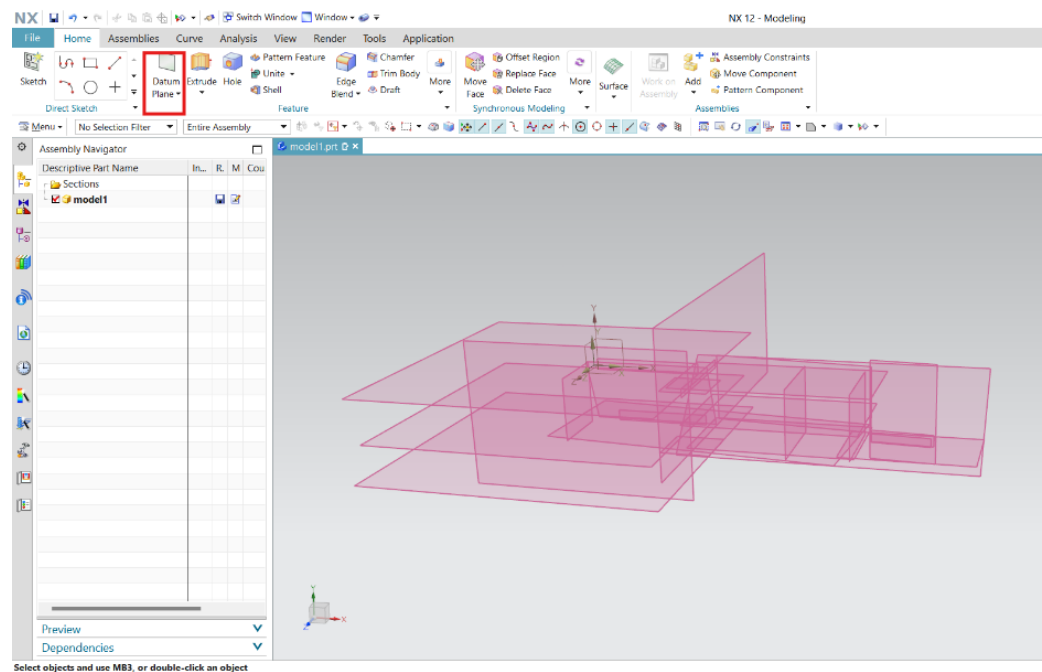
### 2.2.1. Τρισδιάστατο πρόγραμμα σχεδιασμού

Το Siemens NX αποτελεί ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο στο χώρο της σύγχρονης σχεδίασης και ανάπτυξης μηχανολογικών συστημάτων. Ενσωματώνοντας προηγμένες δυνατότητες και λειτουργίες, το Siemens NX επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων, όπου στην συνέχεια μπορεί να εφαρμοστεί ανάλυση για επιβεβαίωση της αξιοπιστίας τους, κάτι που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Το πρόγραμμα παρέχει μια ευρεία γκάμα εργαλείων και λειτουργιών που είναι κρίσιμες για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου. Κατά την εφαρμογή του σχεδιασμού, χρησιμοποιήθηκαν ιδιαίτερα οι εξής λειτουργίες:

- Datum Plane

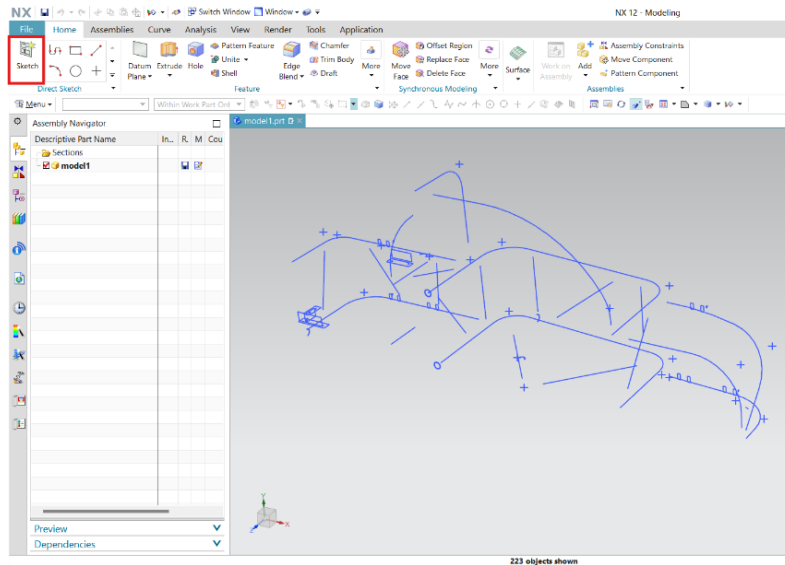
Η εντολή Datum Plane δημιουργεί επίπεδες επιφάνειες που χρησιμοποιούνται ως βασικές αναφορές για την τοποθέτηση και σχεδίαση γεωμετρικών στοιχείων σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Τα Datum Plane παρέχουν σταθερές, ευθυγραμμισμένες επιφάνειες που επιτρέπουν την ακριβή τοποθέτηση και αναφορά άλλων γεωμετρικών σχημάτων και χαρακτηριστικών μέσα στο περιβάλλον σχεδίασης.



Εικ. 9. Όλα τα datum planes που χρησιμοποιήθηκαν

- **Sketch**

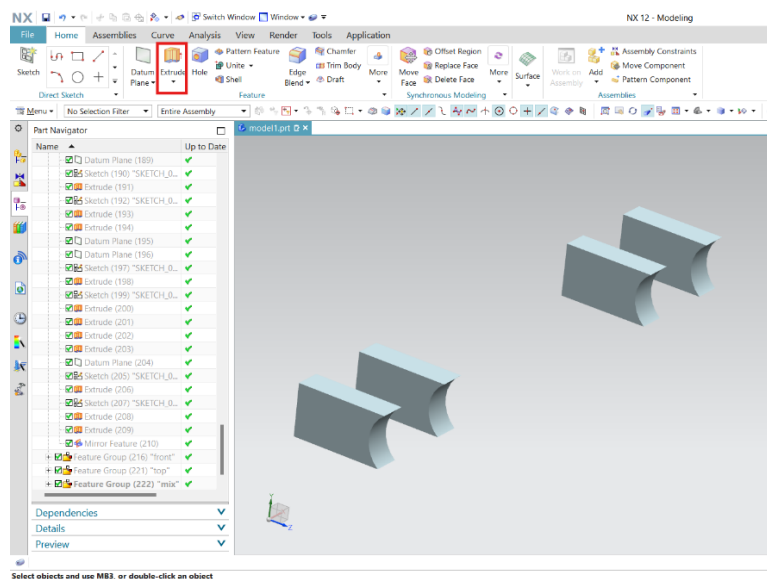
Η εντολή Sketch επιτρέπει τη δημιουργία δισδιάστατων σχημάτων και γεωμετρικών σχημάτων σε επίπεδες επιφάνειες. Αυτά τα σκίτσα χρησιμεύουν ως βάση για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, μετατρέποντας απλές δισδιάστατες διατομές σε πιο σύνθετες τρισδιάστατες γεωμετρίες μέσω εντολών όπως το Extrude ή το Revolve.



Εικ. 10. Τα sketches στον χώρο

- **Extrude**

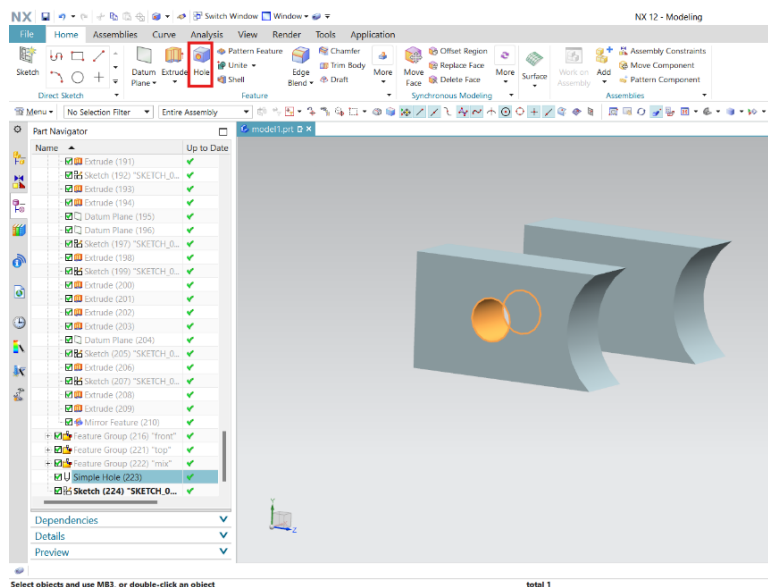
Η εντολή Extrude μετατρέπει δισδιάστατα σκίτσα σε τρισδιάστατα αντικείμενα, επεκτείνοντας τη δισδιάστατη επιφάνεια κατά μήκος ενός άξονα. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία όγκων και γεωμετρικών σχημάτων με συγκεκριμένο βάθος ή ύψος, βασισμένων στα αρχικά σκίτσα.



Εικ. 11. Ένα παράδειγμα Extrude

- **Hole**

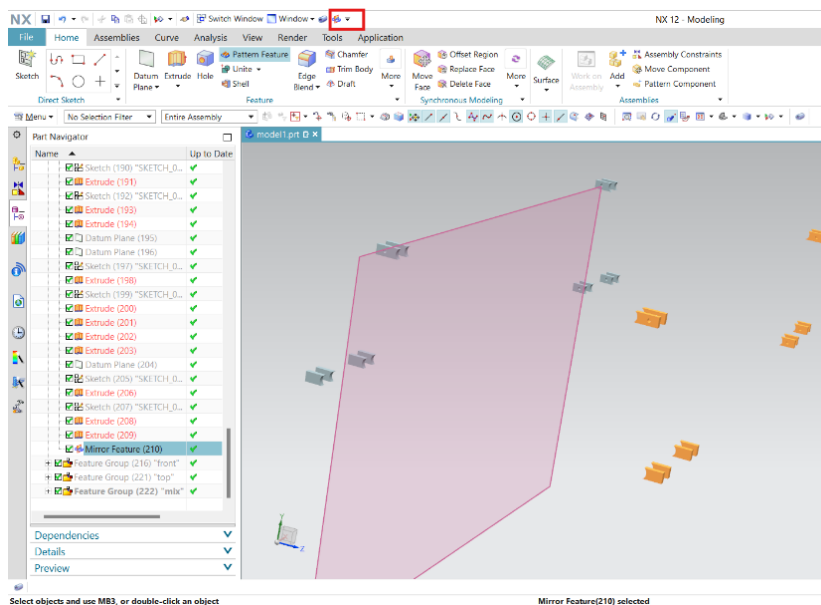
Η εντολή Hole δημιουργεί οπές ή κοιλότητες σε επιφάνειες, καθορίζοντας διάφορους τύπους γεωμετρίας οπών. Αυτές οι οπές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στερέωση εξαρτημάτων, τη δημιουργία ανοιγμάτων ή τη διευκόλυνση της εισαγωγής άλλων στοιχείων.



Εικ. 12. Simple Hole με την εντολή Hole

- **Mirror Feature**

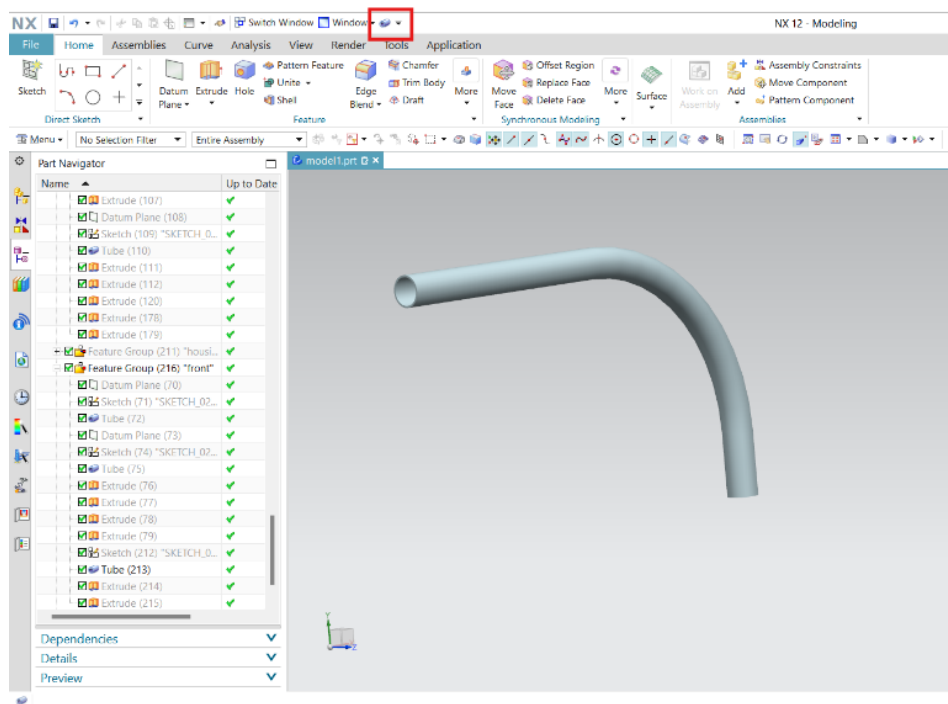
Η εντολή Mirror Feature αναπαράγει στην αντίθετη πλευρά, γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή στοιχεία από τη μία πλευρά ενός επιλεγμένου άξονα-επιπέδου. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία συμμετρικών στοιχείων με μεγάλη ευκολία και ταχύτητα, διατηρώντας τη γεωμετρική συμμετρία του σχεδίου.



Εικ. 13. Mirror Feature με το Datum "mirror"

- Tube

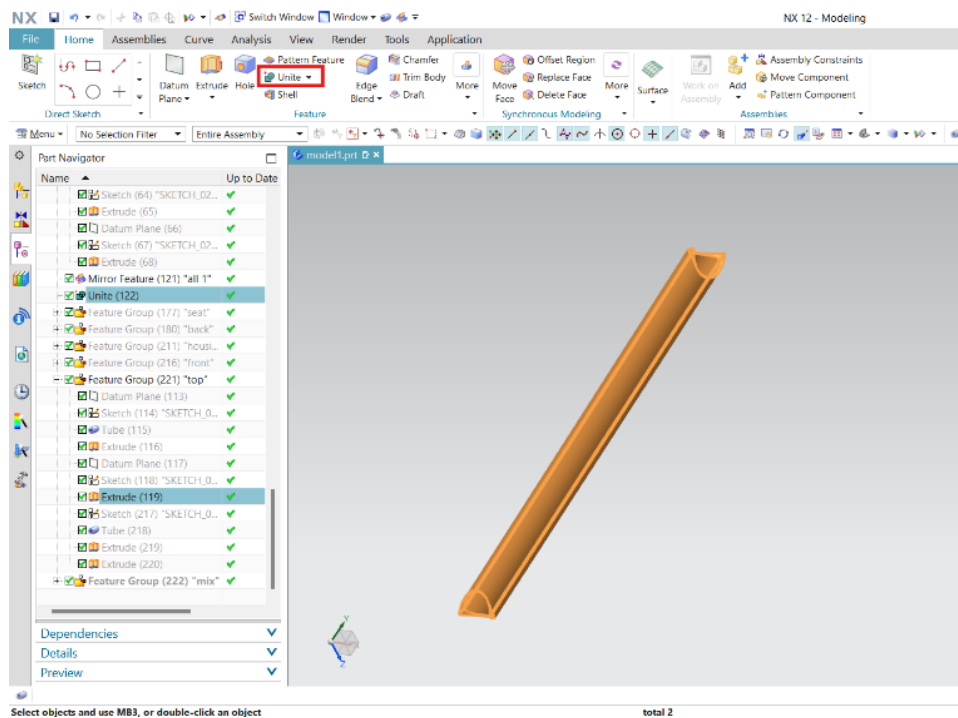
Η εντολή Tube επιτρέπει τη δημιουργία σωληνοειδών στοιχείων με κυκλική διατομή, κάτι που είναι ιδανικό για σχεδίαση σωλήνων, αγωγών και άλλων σωληνοειδών δομών. Δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε τις εξωτερικές και εσωτερικές διαμέτρους του σωλήνα, επιτρέποντας την ακριβή προσαρμογή στις απαιτήσεις του σχεδίου.



Εικ. 14. Ένα τυχαίο κομμάτι του σασί με την εντολή Tube

- Unite

Η εντολή Unite συνδυάζει δύο ή περισσότερα γεωμετρικά σώματα σε ένα ενιαίο σώμα. Χρησιμοποιείται για την ενοποίηση χωριστών τρισδιάστατων σχημάτων ή μονάδων, δημιουργώντας ένα συνεκτικό και αδιαίρετο γεωμετρικό σύνολο. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη δημιουργία σύνθετων γεωμετρικών μορφών από απλές, ξεχωριστές μονάδες, διευκολύνοντας την επεξεργασία, την ανάλυση και την παρουσίαση του τελικού σχεδιαστικού μοντέλου.



Εικ. 15. Ένωση δυο κομματιών σωλήνα σε έναν

- **Group Feature**

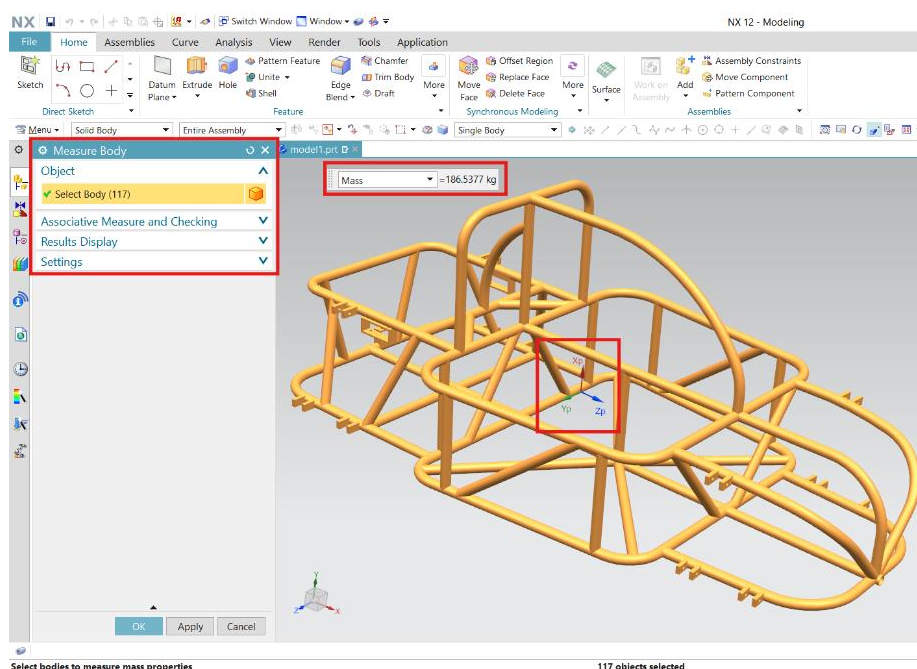
Η εντολή Group Feature συλλέγει και οργανώνει πολλαπλά γεωμετρικά στοιχεία ή χαρακτηριστικά σε μια ενιαία ομάδα. Αυτή η ομαδοποίηση διευκολύνει την επεξεργασία, την οργάνωση και την ανάλυση του σχεδιαστικού μοντέλου, επιτρέποντας την ομαδική διαχείριση των στοιχείων.

Model History			
	Datum Coordinate System (0)	✓	
	Convergent Body (1)	✓	
	Feature Group (15) "housing"	✓	
	Datum Plane (16) "mirror"	✓	
	Feature Group (69) "mid"	✓	
	Mirror Feature (121) "all 1"	✓	
	Unite (122)	✓	
	Feature Group (177) "seat"	✓	
	Feature Group (180) "back"	✓	
	Feature Group (211) "housing suspensions arm"	✓	
	Feature Group (216) "front"	✓	
	Feature Group (221) "top"	✓	
	Feature Group (222) "mix"	✓	

Εικ. 16. Ομαδοποίηση εντολών

- **Measure Body**

Η εντολή Measure Body μετρά φυσικά χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου μοντέλου, όπως διαστάσεις, όγκο, επιφάνεια και κέντρο βάρους. Αυτή η εντολή παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ανάλυση και αξιολόγηση του μοντέλου, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση και την επιβεβαίωση της γεωμετρίας του.



Εικ. 17. Συνολικό βάρος και κέντρο βάρους με την Measure Body

### 2.2.2. Αναλυτικά βήματα σχεδιασμού

Τα περισσότερα προγράμματα σχεδιασμού προσφέρουν τρεις τρόπους σχεδίασης, τη παραμετρική μοντελοποίηση, την άμεση μοντελοποίηση και την ελεύθερη μοντελοποίηση. Η επιλογή του τρόπου σχεδίασης που επιλέχθηκε είναι η άμεση μοντελοποίηση<sup>4</sup>.

Η παραμετρική μοντελοποίηση (Parametric Modeling) επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μέσω παραμέτρων. Κάθε στοιχείο του μοντέλου ορίζεται από συγκεκριμένες διαστάσεις και σχέσεις, διευκολύνοντας την τροποποίηση και τη βελτιστοποίηση των σχεδίων. Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης είναι ιδανικός για περιπτώσεις όπου απαιτείται αυστηρός έλεγχος των διαστάσεων και των σχέσεων

<sup>4</sup> Automotive CAD: Industry-specific CAD solutions | Siemens Software

μεταξύ των μερών του μοντέλου, καθώς οι τροποποιήσεις μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα μέσω της αλλαγής των παραμέτρων.

Η ελεύθερη μοντελοποίηση (Freeform Modeling) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ελεύθερων μορφών και επιφανειών, καθιστώντας την ιδανική για την ανάπτυξη σύνθετων και οργανικών σχημάτων. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπου οι γεωμετρίες είναι πιο ρευστές και απαιτείται μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό. Οι σχεδιαστές μπορούν να πειραματιστούν με τις μορφές και να δημιουργήσουν πολύπλοκες καμπύλες και επιφάνειες που δεν περιορίζονται από παραμέτρους.

Η άμεση μοντελοποίηση (Direct Modeling) προσφέρει την ευελιξία να γίνονται αλλαγές στο μοντέλο απευθείας, χωρίς την ανάγκη παραμετρικών περιορισμών. Αυτό επιτρέπει στους σχεδιαστές να τροποποιούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά γρήγορα και εύκολα, κάνοντας τη διαδικασία σχεδιασμού πιο ευέλικτη και αποδοτική. Η άμεση μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται γρήγορες αλλαγές και προσαρμογές, καθώς οι σχεδιαστές μπορούν να δουν αμέσως τις επιπτώσεις των αλλαγών τους στο συνολικό μοντέλο.

Παρακάτω ακολουθούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίηση του σχεδιασμού, παρουσιάζοντας τη λεπτομερή διαδικασία και τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αγωνιστικού σασί.

- **Δημιουργία νέου αρχείου μοντέλου**

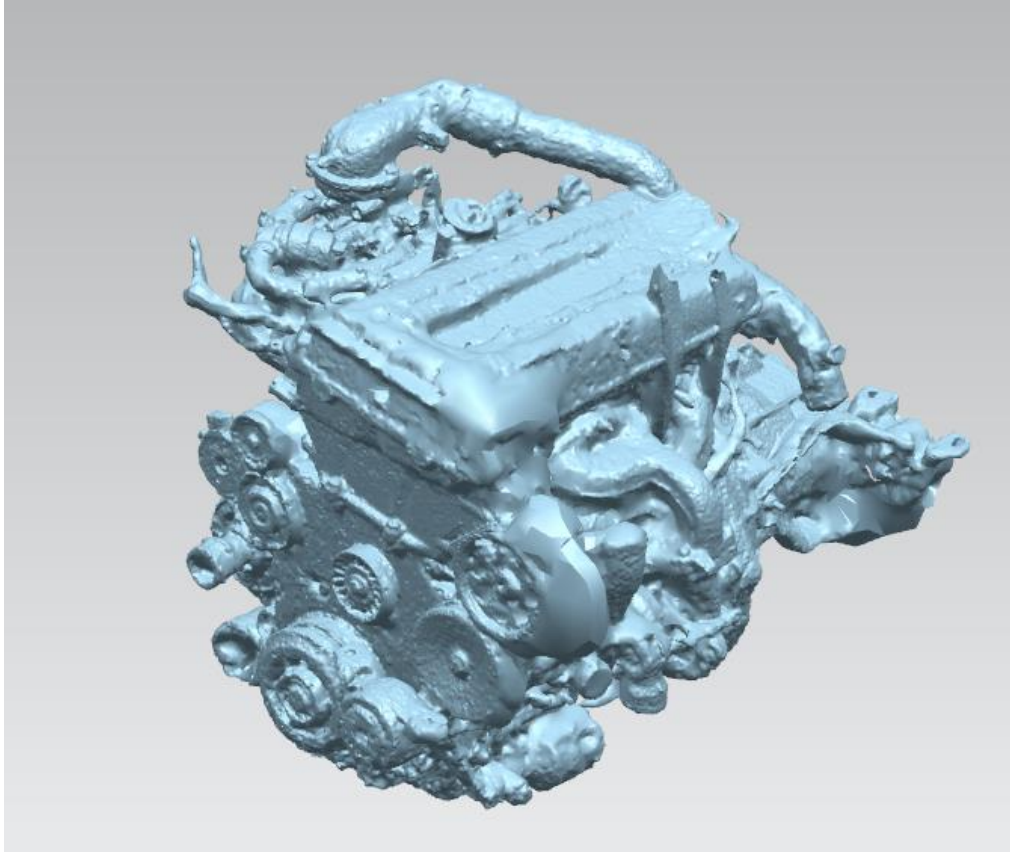
Για να ξεκινήσει η διαδικασία πρέπει να δημιουργηθεί ένα νέο αρχείο μοντέλου στο πρόγραμμα NX (prt.). Αυτό το νέο αρχείο μοντέλου θα λειτουργήσει ως το περιβάλλον σχεδίασης για το σασί του οχήματος.

- **Φόρτωση Τρισδιάστατου Μοντέλου Κινητήρα-κιβωτίου**

Στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας, γίνεται η φόρτωση του τρισδιάστατου μοντέλου του κινητήρα-κιβωτίου, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας. Το εν λόγω μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις κρίσιμες λεπτομέρειες, όπως τις διαστάσεις, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα σημεία στήριξης. Η ακριβής



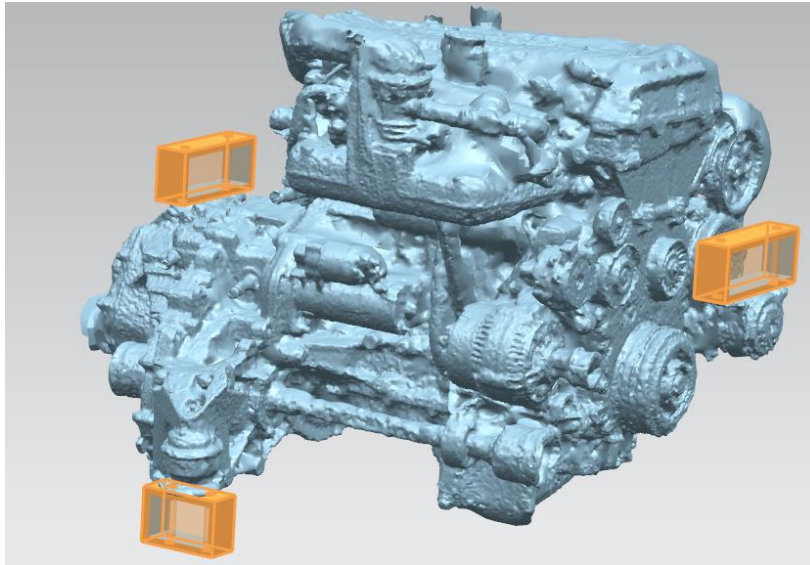
αναπαράσταση του κινητήρα-κιβωτίου, και ειδικότερα οι βάσεις στήριξης, είναι μείζονος σημασίας, καθώς παρέχει τη θεμελιώδη βάση για τη συνέχεια του σχεδιασμού του σασί.



Εικ. 18. Μοντέλο κινητήρα-κιβωτίου

- Σχεδίαση των Βάσεων Στήριξης του Κινητήρα-κιβωτίου

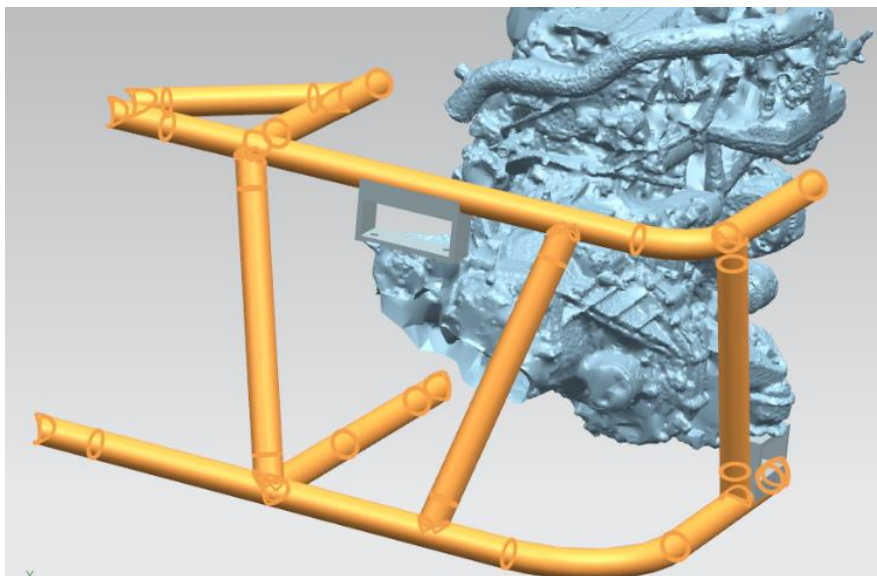
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η σχεδίαση των τριών βάσεων στήριξης του κινητήρα-κιβωτίου. Οι βάσεις σχεδιάζονται με προσοχή, προκειμένου να διασφαλιστεί η σταθερή και ασφαλής τοποθέτηση του κινητήρα-κιβωτίου στο σασί. Η ακριβής τοποθέτηση των βάσεων στο χώρο είναι κρίσιμη, καθώς αποτελεί το σημείο εκκίνησης για ολόκληρη τη διαδικασία σχεδιασμού του σασί. Επιπλέον, είναι σημαντικό οι βάσεις να διαθέτουν τη σωστή αντοχή ώστε να αντεπεξέρχονται στις δυνάμεις και δονήσεις που προκύπτουν.



Εικ. 19. Βάσεις κινητήρα-κιβωτίου

- Σχεδίαση του Πίσω Μέρους του Σασί

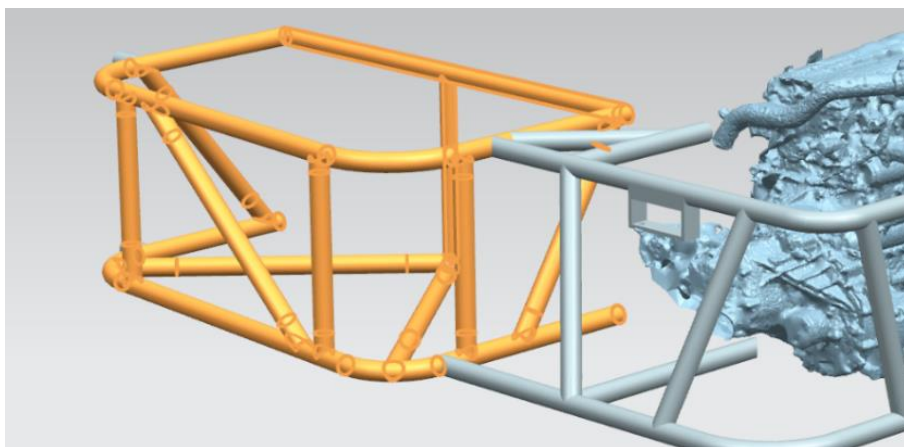
Με βάση τις τρεις βάσεις στήριξης του κινητήρα-κιβωτίου, προχωρά η σχεδίαση του πίσω μέρους του σασί. Στη διαδικασία αυτή, περιλαμβάνεται η τοποθέτηση των σημείων στήριξης για τους βραχίονες ανάρτησης και βραχίονες τροχών. Η σχεδίαση του πίσω μέρους πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ανάγκη για ακαμψία, αντοχή, καθώς και την ευκολία συντήρησης και πρόσβασης στα μηχανικά μέρη. Οι δομές που σχεδιάζονται πρέπει να παρέχουν την απαραίτητη στήριξη, διασφαλίζοντας ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κίνηση του οχήματος διανέμονται ομοιόμορφα και δεν προκαλούν τοπικές υπερφορτώσεις.



Εικ. 20. Σχεδιασμός πίσω μέρους

- Σχεδίαση του Μεσαίου Μέρους του Σασί

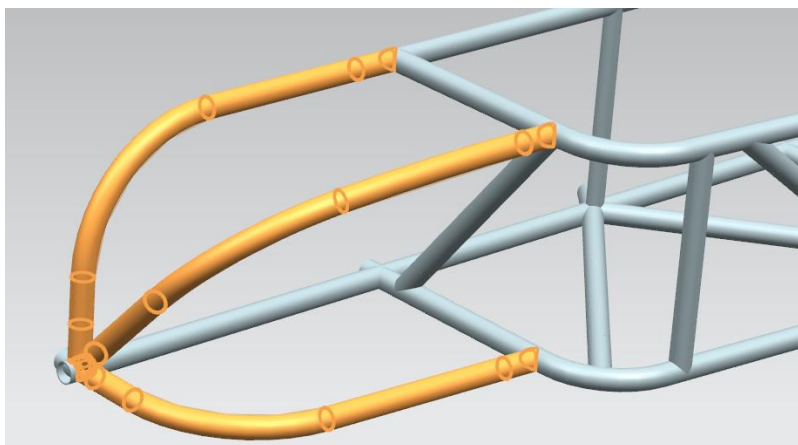
Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η σχεδίαση του μεσαίου μέρους του σασί, το οποίο περιλαμβάνει τον χώρο των καθισμάτων του οδηγού και του συνοδηγού. Η διαμόρφωση αυτής της περιοχής είναι κρίσιμη για την άνεση και την ασφάλεια των επιβατών. Λαμβάνονται υπόψη οι εργονομικές απαιτήσεις, όπως η θέση των καθισμάτων και η ορατότητα. Επίσης, η σχεδίαση πρέπει να εξασφαλίζει την προστασία των επιβατών σε περίπτωση ατυχήματος, με την ενσωμάτωση δομικών ενισχύσεων και ζωνών απορρόφησης ενέργειας.



Εικ. 21. Σχεδιασμός μεσαίου μέρους

- Σχεδίαση του Μπροστινού Μέρους του Σασί

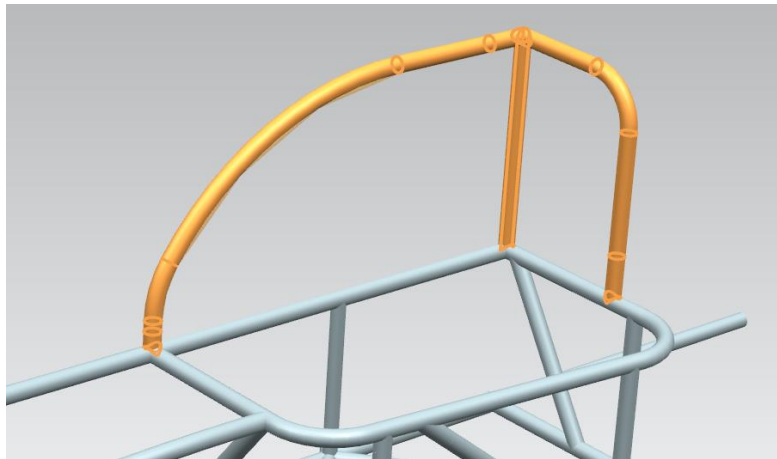
Ακολουθεί η σχεδίαση του μπροστινού μέρους του σασί. Στη διαδικασία αυτή, περιλαμβάνεται η τοποθέτηση των σημείων στήριξης για τους βραχίονες ανάρτησης και τους βραχίονες τροχών, εξασφαλίζοντας την απαραίτητη ακαμψία και σταθερότητα. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η αεροδυναμική απόδοση, με τη διαμόρφωση του μπροστινού μέρους να συμβάλλει στη μείωση της αντίστασης του αέρα και στην αύξηση της κάθετης δύναμης.



Εικ. 22. Σχεδιασμός μπροστινού μέρους

- Σχεδίαση του Πάνω Μέρους του Σασί

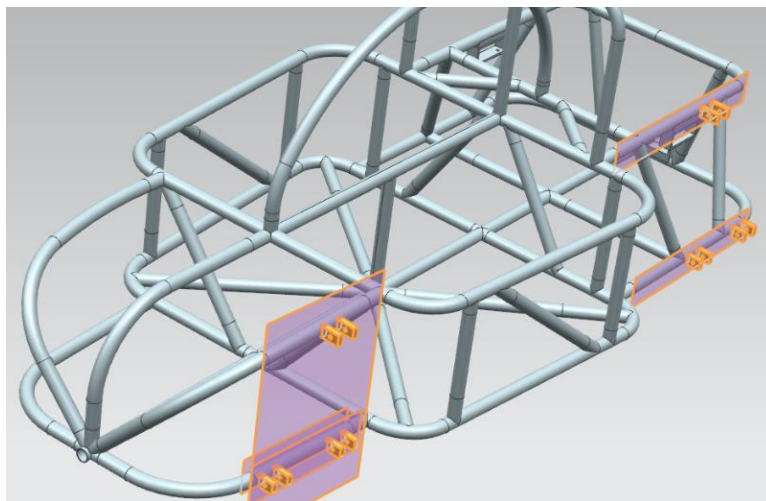
Το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση του μέρους που βρίσκεται άνω του μεσαίου και του πίσω μέρους του σασί, το οποίο σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια του οδηγού και του συνοδηγού. Η δομή αυτή παρέχει την απαραίτητη προστασία σε περίπτωση ατυχήματος, με την ενσωμάτωση ενισχύσεων και ζωνών απορρόφησης ενέργειας. Η σχεδίαση πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατανομή των δυνάμεων και την ακαμψία της κατασκευής, εξασφαλίζοντας ότι το σασί μπορεί να αντέξει τις πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την οδήγηση και τις κρούσεις.



Εικ. 23. Σχεδιασμός πάνω μέρους

- Βάσεις στήριξης αναρτήσεων και βραχιόνων τροχών

Ένα από τα τελευταία βήματα στον σχεδιασμό του αγωνιστικού σασί αφορά τη δημιουργία των βάσεων για τις αναρτήσεις και τους βραχιόνες τροχών. Αυτές οι βάσεις αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του σχεδιασμού και θα χρησιμοποιηθούν ενεργά στη φάση της ανάλυσης CAE που θα ακολουθήσει.



Εικ. 24. Σχεδιασμός βάσεων στήριξης αναρτήσεων και βραχιόνων τροχών



- Χρήση της Λειτουργίας Mirror Feature

Τέλος, η σχεδίαση του πίσω, μεσαίου, μπροστινού και πάνω μέρους πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της λειτουργίας Mirror Feature. Αρχικά σχεδιάστηκε η αριστερή πλευρά (κοιτάζοντας το σασί από πίσω) και στη συνέχεια όλα τα σχεδιασμένα στοιχεία αντιγράφηκαν με συμμετρικό τρόπο για να δημιουργηθεί η δεξιά πλευρά του σασί, εξασφαλίζοντας απόλυτη συμμετρία και ισορροπία. Ακριβώς το ίδιο έγινε και με τις βάσεις στήριξης των αναρτήσεων και βραχιόνων τροχών. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει την ακριβή αναπαραγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και τη διατήρηση της συμμετρίας της κατασκευής, κάτι που είναι κρίσιμο για την ισορροπία και τη σταθερότητα του οχήματος.



Εικ. 25. Δημιουργία υπόλοιπου μισού

### 2.2.3. Απαιτήσεις και προδιαγραφές για το σασί

Η σχεδίαση του αγωνιστικού σασί ακολουθεί συγκεκριμένες απαιτήσεις και προδιαγραφές που είναι κρίσιμες για την ασφάλεια, την αντοχή και την αξιοπιστία του οχήματος. Αν και αυτές οι προδιαγραφές καθορίζονται συνήθως βάσει διεθνών προτύπων και κανονισμών, στη δική μας περίπτωση βασιστήκαμε κυρίως σε εμπειρικά δεδομένα από προηγούμενες αγωνιστικές εφαρμογές. Χρησιμοποιήσαμε μια προσέγγιση που εστιάζει στις εξειδικευμένες ανάγκες του συγκεκριμένου έργου, λαμβάνοντας υπόψη τις βέλτιστες πρακτικές και τα δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις απαιτήσεις και προδιαγραφές.

- **Υλικό Κατασκευής**

Το υλικό πρέπει να προσφέρει εξαιρετική αντοχή και ανθεκτικότητα, ενώ παράλληλα να παραμένει σχετικά ελαφρύ, συμβάλλοντας σημαντικά στη συνολική απόδοση του οχήματος. Αυτές οι ιδιότητες είναι απαραίτητες για να διασφαλιστεί ότι το σασί μπορεί να αντέξει τις δυνάμεις που ασκούνται κατά τη διάρκεια της οδήγησης και των αγωνιστικών συνθηκών καθώς και την πιθανή κρούση, παρέχοντας ταυτόχρονα βέλτιστες επιδόσεις και ασφάλεια.

- **Ακαμψία και Αντοχή**

Το σασί πρέπει να έχει υψηλή στρεπτική ακαμψία και αντοχή για να αντιστέκεται στις δυνάμεις που ασκούνται κατά τη διάρκεια των αγωνιστικών συνθηκών. Η υψηλή ακαμψία είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας και της σταθερότητας του οχήματος, ενώ η αντοχή διασφαλίζει ότι το σασί μπορεί να αντέξει τις δυνάμεις που προκύπτουν από την έντονη χρήση στις πίστες αγώνων ή από πιθανή κρούση.

- **Ασφάλεια Οδηγού**

Ο σχεδιασμός του σασί πρέπει να προστατεύει τον οδηγό σε περίπτωση ατυχήματος. Αυτό περιλαμβάνει την ενίσχυση των κρίσιμων σημείων και τη δημιουργία ζωνών παραμόρφωσης που μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια της πρόσκρουσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο τραυματισμού.

- **Βάρος**

Η διαχείριση του βάρους είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την απόδοση του οχήματος. Το ιδανικό συνολικό βάρος του οχήματος πρέπει να είναι αρκετά χαμηλό ώστε να επιτρέπει μέγιστη επιτάχυνση και ευελιξία, αλλά επαρκές για να διασφαλίσει τη σταθερότητα και την ασφάλεια του οχήματος. Οι μηχανικοί συχνά αναφέρονται στο λόγο κιλών ανά ίππο ως έναν θεμελιώδη δείκτη, ο οποίος συνδέει το βάρος του οχήματος με τη δύναμη του κινητήρα. Αυτός ο λόγος υποδεικνύει πόσα κιλά του οχήματος κινούνται από κάθε ίππο δύναμης, επηρεάζοντας άμεσα την επιτάχυνση.

- Διαστάσεις

Οι απαιτήσεις για τις ακριβείς διαστάσεις του αγωνιστικού σασί περιλαμβάνουν περιορισμούς για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του οχήματος, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η ισορροπία. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ των αξόνων των μπροστινών και πίσω τροχών (μεταξόνιο) καθώς και η απόσταση μεταξύ των κέντρων των μπροστινών και των πίσω τροχών (μετατρόχιο) πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές για βέλτιστη απόδοση και σταθερότητα.

- Συντήρηση και Επισκευή

Ο σχεδιασμός πρέπει να επιτρέπει εύκολη συντήρηση και επισκευή του σασί. Αυτό σημαίνει ότι τα εξαρτήματα πρέπει να είναι προσβάσιμα και εύκολα να αντικατασταθούν σε περίπτωση φθοράς, ζημιάς ή συντήρησης.

- Δομική Ακεραιότητα

Το σασί πρέπει να υποστηρίζει το βάρος του κινητήρα και να αντέχει στις δυνάμεις που προκύπτουν από τη λειτουργία του. Το μοντέλο του κινητήρα δείχνει τα σημεία όπου χρειάζεται ενίσχυση ή προσαρμογή στη δομή του σασί για να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα.

- Κέντρο Βάρους

Ένα χαμηλό και κεντρικά τοποθετημένο κέντρο βάρους είναι επίσης κρίσιμο. Ένα χαμηλό κέντρο βάρους μειώνει την πιθανότητα ανατροπής κατά τις στροφές και εξασφαλίζει μεγαλύτερη πρόσφυση στους εσωτερικούς τροχούς, βελτιώνοντας τη σταθερότητα του οχήματος. Η κεντρική τοποθέτηση του κέντρου βάρους, τόσο κατά μήκος όσο και κατά πλάτος του οχήματος, συμβάλλει στην ισορροπημένη κατανομή των φορτίων στους τροχούς, αυξάνοντας την πρόσφυση και την ευστάθεια κατά την οδήγηση.

- Αεροδυναμική

Η αεροδυναμική απόδοση ενός αγωνιστικού οχήματος επηρεάζεται σημαντικά από τις δυνάμεις drag και downforce. Το drag (αντίσταση αέρα) είναι η δύναμη που αντιστέκεται στην κίνηση του οχήματος μέσα στον αέρα, μειώνοντας την ταχύτητα και την απόδοση. Η downforce (κάθετη δύναμη) είναι η δύναμη που πιέζει το όχημα προς το έδαφος, αυξάνοντας την πρόσφυση και τη σταθερότητα κατά την οδήγηση σε

υψηλές ταχύτητες. Παρόλο που αυτές οι δυνάμεις είναι κρίσιμες για την αύξηση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας του οχήματος σε αγωνιστικές συνθήκες, δεν θα εστιάσουμε ιδιαίτερα σε αυτές στη συγκεκριμένη μελέτη.

- **Συμμόρφωση με Κανονισμούς**

Το σασί πρέπει να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς της FIA (Federation Internationale de l'Automobile) και άλλων αρμόδιων οργανισμών για τα αγωνιστικά οχήματα μόνο στην περίπτωση κατασκευής του. Αυτό περιλαμβάνει την τήρηση των προδιαγραφών για τις διαστάσεις, το υλικό και τις δοκιμές αντοχής. Οι κανονισμοί αυτοί διασφαλίζουν ότι το σασί θα πληροί τα απαραίτητα πρότυπα ασφαλείας που απαιτούνται για τη συμμετοχή σε αγωνιστικές δραστηριότητες.



## 2.3 Ανάλυση CAE

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση του σχεδίου του αγωνιστικού σασί χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA), ενώ αξιοποιείται το λογισμικό CAE (Computer-Aided Engineering) της Siemens NX. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την προσομοίωση και ανάλυση διαφόρων φυσικών συμπεριφορών του σασί υπό συνθήκες φορτίου, όπως η αντοχή στις δυνάμεις, η στρεπτική ακαμψία και η δομική ακεραιότητα, με στόχο την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του οχήματος.

Η μεθοδολογία Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιείται για την λεπτομερή ανάλυση των στατικών φορτίων που δέχεται το σασί, καθώς και για την εκτίμηση των επιπτώσεων τυχόν αλλαγών στα υλικά κατασκευής ή στη γεωμετρία του σχεδίου. Αυτό επιτρέπει την ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση του σχεδίου του τελικού προϊόντος.

Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στα βήματα της μεθοδολογίας Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA), τα οποία αναλύονται λεπτομερώς, καθώς και στα αρχικά αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την ανάλυση. Οι επιπτώσεις αυτών των αποτελεσμάτων στην τελική δομή του σασί θα εξεταστούν ενδελεχώς στη συνέχεια της εργασίας, παρέχοντας μια πλήρη εικόνα της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στην ακεραιότητα και λειτουργικότητα του σασί.

Η επίλυση και ανάλυση με CAE, καθώς και η ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου, βασίστηκε στις παρακάτω πηγές, οι οποίες παρείχαν απαραίτητες γνώσεις και πληροφορίες:

- Jazar N. Reza, 2008
- Paul M. Kurowski, 2022
- Ming C. Leu, Wenjin Tao, Amir Ghazanfari, Krishna Kolan, 2019

### **2.3.1 Επισκόπηση και Σημασία της μεθοδολογίας FEA**

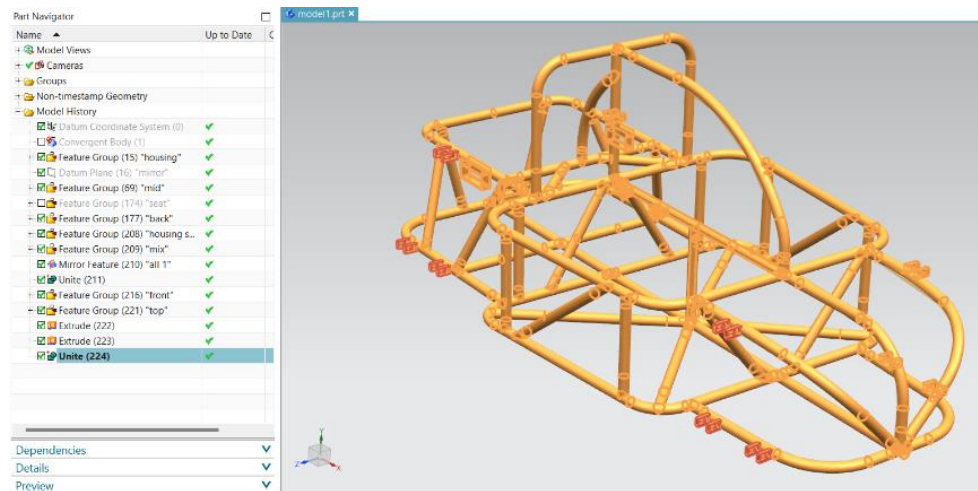
Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι μια εξαιρετικά λεπτομερής μεθοδολογία που διασπά το σύνθετο μοντέλο ενός αγωνιστικού σασί σε μικρότερα, διαχειρίσιμα τμήματα, γνωστά ως στοιχεία. Κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία μοντελοποιείται ως ένα ξεχωριστό, αυτόνομο μέρος που υπόκειται σε συγκεκριμένες δυνάμεις και φορτία. Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου υπό διάφορες συνθήκες φορτίου.

Η αξία της FEA έγκειται στην ικανότητά της να αναπαριστά τις εσωτερικές τάσεις και δυνάμεις με εξαιρετική λεπτομέρεια. Αυτό διασφαλίζει ότι κάθε στοιχείο του σασί αντιμετωπίζει τις φορτίσεις με τρόπο που αντανακλά την πραγματική τους επίδραση. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας δύναται να αναλυθούν τα σημεία υπερφορτίσεων και οι περιοχές υψηλών τάσεων, επιτρέποντας την τροποποίηση του σχεδίου για μέγιστη ανθεκτικότητα. Αυτή η λεπτομερής κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σασί προσφέρει τη δυνατότητα για στοχευμένες βελτιώσεις, αντιμετωπίζοντας τυχόν αδυναμίες πριν προχωρήσουν στην παραγωγή και την πρακτική εφαρμογή, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

### **2.3.2 Αναλυτικά βήματα προετοιμασίας ανάλυσης**

- **Επιβεβαίωση της Ολότητας του Μοντέλου**

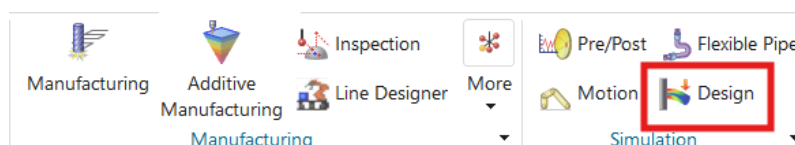
Πριν από την έναρξη της FEA, είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθεί ότι το σχεδιασμένο μοντέλο είναι ομοιογενές και ότι όλα τα τμήματά του είναι συνδεδεμένα απρόσκοπτα. Η χρήση της εντολής 'Unite', όπου αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, συμβάλλει στη δημιουργία ενός ενιαίου συνεκτικού σώματος, αποτρέποντας πιθανά προβλήματα στις αναλύσεις λόγω ασυνεχειών ή αδυναμιών στη δομή.



Εικ. 26. Έλεγχος Ολότητας Σχεδίου

- Χρήση του Application Design

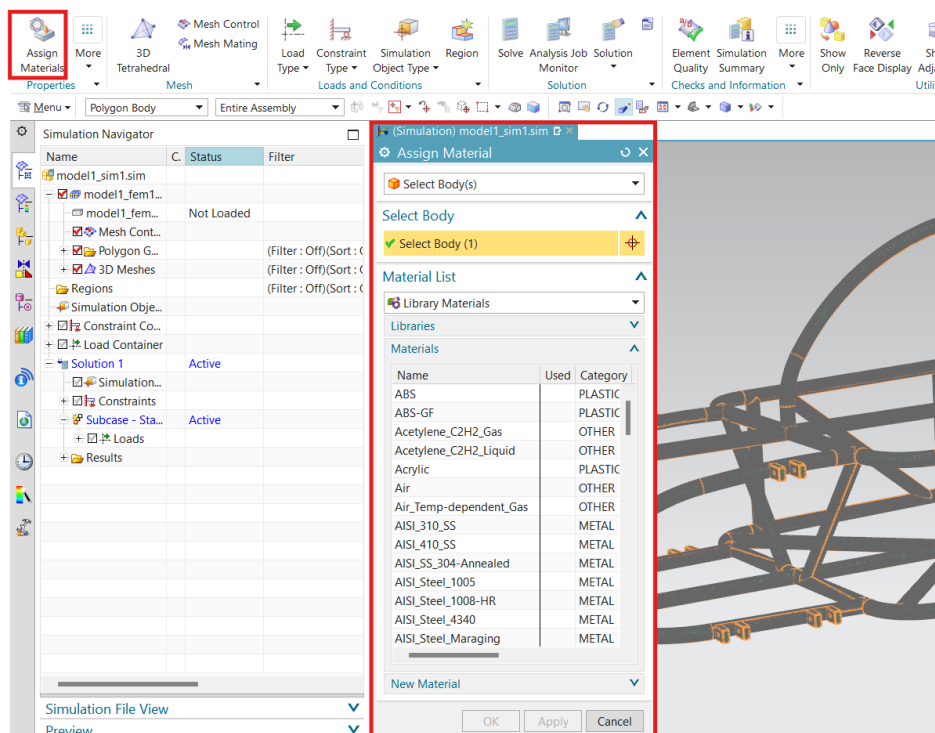
Ενεργοποιείται η εντολή Design στο λογισμικό Siemens NX, η οποία προσφέρει πρόσβαση σε εργαλεία και ρυθμίσεις, απαραίτητα για την FEA, όπως η εφαρμογή υλικών, τα εργαλεία δικτύωσης και η εφαρμογή φορτίων.



Εικ. 27. Χρήση του Application Design

- Εφαρμογή Υλικών και Ιδιοτήτων

Η επιλογή και ο καθορισμός του υλικού είναι κρίσιμα, καθώς τα υλικά επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου. Χρησιμοποιείται η εντολή 'Assign Materials' για να εφαρμοστεί ένα υφιστάμενο υλικό από τη βιβλιοθήκη ή να δημιουργηθεί ένα νέο υλικό προσθέτοντας τις ειδικές ιδιότητές του, όπως την ελαστικότητα, την πυκνότητα και τον συντελεστή Πουασόν. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά υλικά κατά την ανάλυση, με στόχο τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση της επίδρασης που έχουν οι διαφορετικές ιδιότητες υλικών στη συνολική απόκριση και αντοχή του σασί.



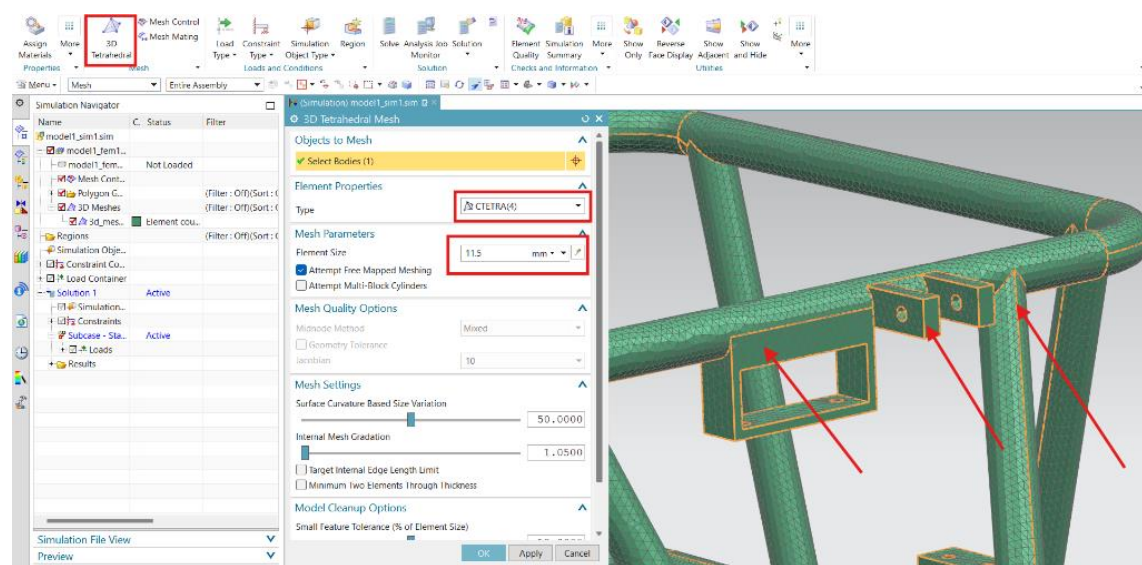
Εικ. 28. Εντολή 'Assign Materials'

- Δημιουργία του δικτύου (Mesh)

Η δημιουργία του δικτύου (Mesh) στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Στην παρούσα μελέτη, το δίκτυο δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας 3D τετραεδρικά στοιχεία (3D Tetrahedral), τα οποία είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την αποτύπωση των σύνθετων γεωμετριών που συναντώνται συνήθως στον σχεδιασμό του σασί αγωνιστικών οχημάτων. Τα τετραεδρικά στοιχεία παρέχουν ευελιξία προσαρμογής στις ακανόνιστες μορφές της δομής, επιτρέποντας μια πιο λεπτομερή και ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας του μοντέλου.

Για την ανάλυση αυτή, το μέγεθος των στοιχείων του δικτύου ορίστηκε χρησιμοποιώντας προκαθορισμένες τιμές εντός του λογισμικού, με σκοπό την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ υπολογιστικής αποδοτικότητας και επιπέδου λεπτομέρειας που απαιτείται για ακριβή αποτελέσματα. Ένα δίκτυο με περισσότερα στοιχεία μπορεί να παρέχει πιο λεπτομερή αποτελέσματα, αλλά με αυξημένο κόστος σε υπολογιστικούς πόρους και χρόνο. Αντίθετα, ένα δίκτυο με λιγότερα στοιχεία μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο, εξοικονομεί χρόνο, αλλά μπορεί να παραβλέψει κρίσιμες συγκεντρώσεις τάσεων. Η επιλογή του 3D τετραεδρικού δικτύου και η ρύθμιση του μεγέθους των

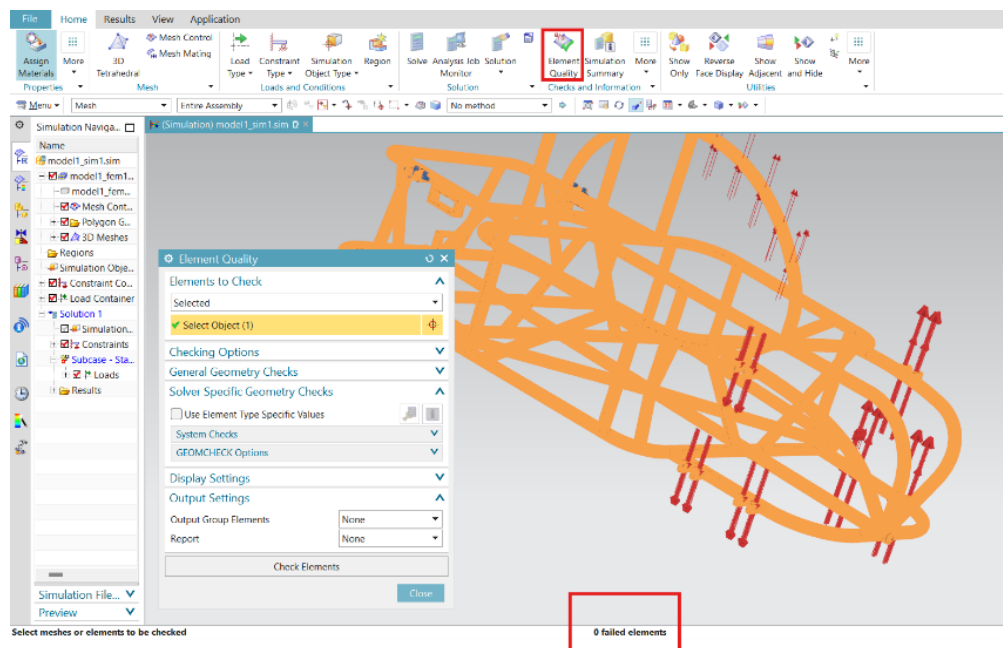
στοιχείων αντικατοπτρίζουν την ανάγκη για ακριβή μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς του σασί χωρίς περιττές υπολογιστικές δαπάνες. Επιπλέον, η ποιότητα του δικτύου παρακολουθήθηκε και βελτιστοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα ενσωματωμένα εργαλεία του λογισμικού, για να διασφαλιστεί ότι τα στοιχεία ήταν καλοσχηματισμένα και ότι το συνολικό δίκτυο ανταποκρινόταν στις γεωμετρικές λεπτομέρειες του σχεδίου του σασί. Αυτή η προσέγγιση συνέβαλε στη διατήρηση της αξιοπιστίας της προσομοίωσης, διασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης FEA θα είναι αξιόπιστα και ακριβή



Εικ. 29. Δημιουργία του δικτύου (Mesh)

- **Ποιότητα Στοιχείων (Element Quality)**

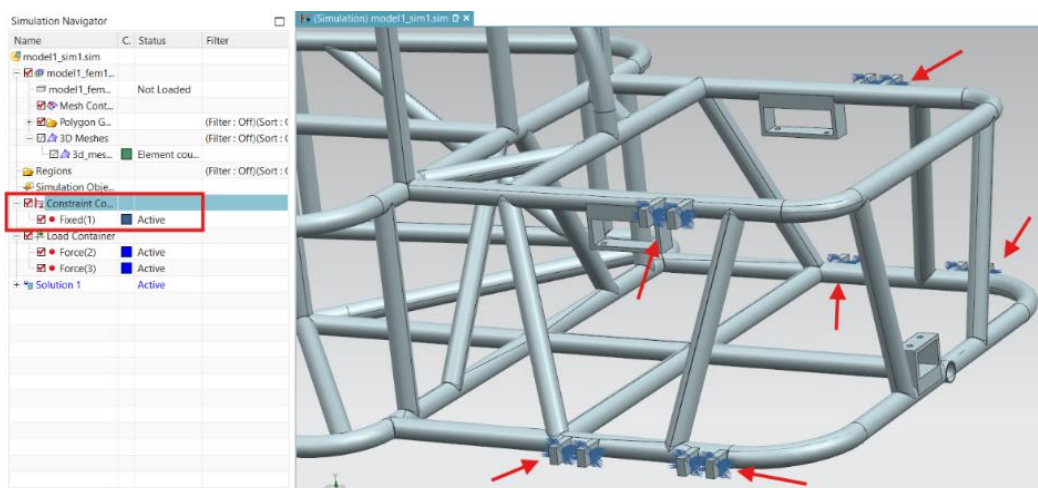
Ο έλεγχος της ποιότητας των στοιχείων γίνεται με την εντολή Element Quality και στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) αξιολογείται με βάση τη γεωμετρική τους καταλληλότητα, η οποία επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια και την αξιοπιστία των προσομοιώσεων. Σημαντικοί παράγοντες που εξετάζονται περιλαμβάνουν το μέγεθος, το σχήμα και την αναλογία των πλευρών κάθε στοιχείου. Στοιχεία με υψηλή ποιότητα είναι ιδανικά διαμορφωμένα και ομοιόμορφα κατανεμημένα, παρέχοντας έτσι αυξημένη αξιοπιστία στα αποτελέσματα της προσομοίωσης και εξασφαλίζοντας την ακριβή δυνατότητα της μηχανικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Στην επόμενη φωτογραφία φαίνεται η έλλειψη σφαλμάτων κατά τον έλεγχο.



Εικ. 30. Εντολή Element Quality

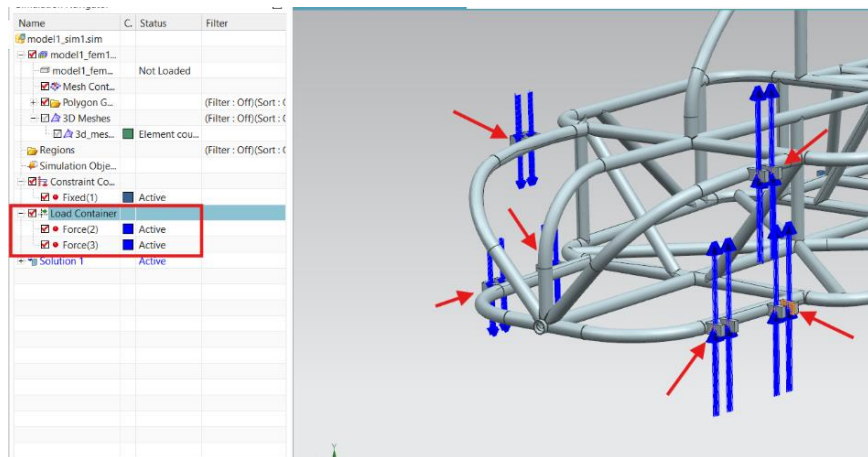
- Ορισμός Συνοριακών Συνθηκών και Φορτίων

Καθορίζονται τα σημεία στήριξης (Constraint type. Εικ.32) του σασί και οι τύποι των φορτίων (Load type. Εικ.32). Για την παρούσα ανάλυση, επιλέγεται να δοθεί έμφαση στα στατικά φορτία, δηλαδή φορτία που παραμένουν σταθερά στην ένταση και τη διεύθυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης.



Εικ. 31. Σημεία στήριξης





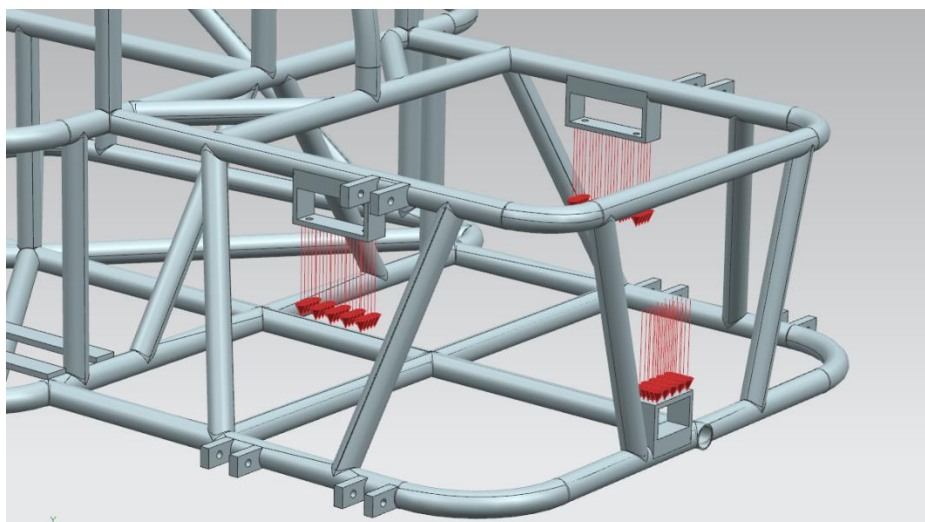
Εικ. 32. Τύποι των φορτίων

Στην παρούσα ανάλυση, εξετάζονται δύο βασικοί τύποι φορτίων για την αξιολόγηση της αντοχής και της ακαμψίας του σασί: η στρεπτική φόρτιση και η μετωπική φόρτιση. Η στρεπτική φόρτιση αξιολογεί την ικανότητα του σασί να αντιστέκεται σε δυνάμεις στρέψης και παραμορφώσεις, παρέχοντας σημαντικές ενδείξεις για τη στρεπτική του ακαμψία. Από την άλλη, η ανάλυση κρούσης εστιάζει στη συμπεριφορά του σασί υπό την επίδραση μετωπικών δυνάμεων, όπως αυτές που προκύπτουν σε ατυχήματα, αποκαλύπτοντας τις πιθανές μετωπικές παραμορφώσεις και την ικανότητα του σασί να τις αντέξει. Οι αναλύσεις αυτές θα παρουσιαστούν λεπτομερώς στο 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Επιπλέον, στις βάσεις στήριξης του κινητήρα-κιβωτίου θα προστεθούν οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στο βάρος του. Η ανάλυση των δυνάμεων βάρους του κινητήρα-κιβωτίου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τρεις ζυγαριές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 34 και 35.

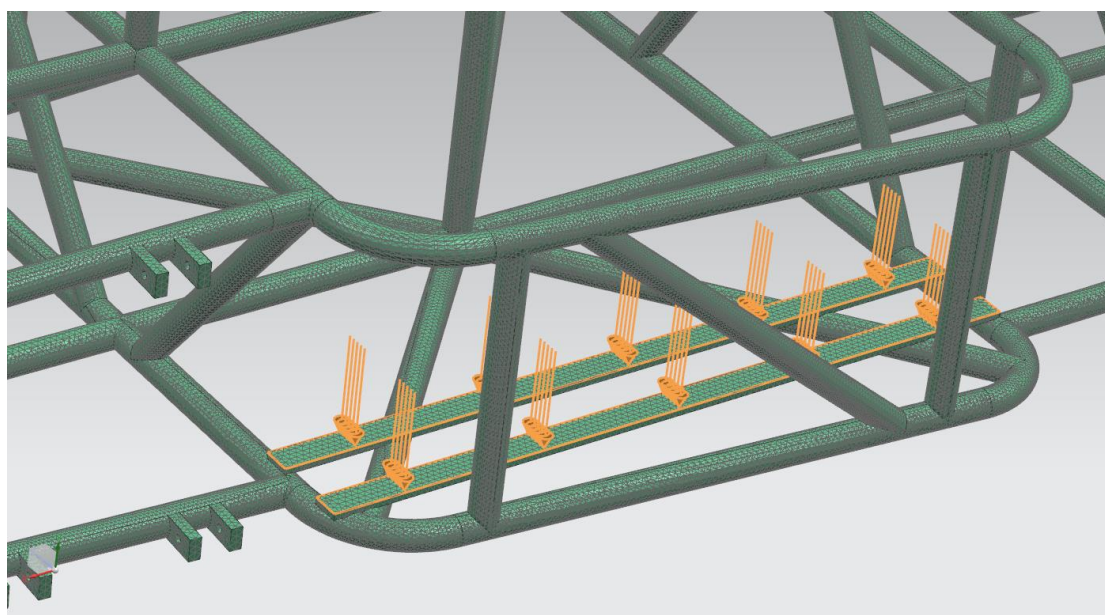


Εικ. 33. Ανάλυση δυνάμεων βάρους στις 3 βάσεις



Εικ. 34. Ανάλυση δυνάμεων βάρους στις 3 βάσεις

Επίσης, θα προστεθούν οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στο βάρος του οδηγού και του καθίσματος (Εικ.36), καταναμημένες σε δυο οριζόντιες και παράλληλες μεταξύ τους επιφάνειες συνδεδεμένες με το σωληνωτό σασί. Αυτές οι δυνάμεις θα ληφθούν υπόψη στην ανάλυση για την αξιολόγηση της συνολικής αντοχής και ακαμψίας του σασί.



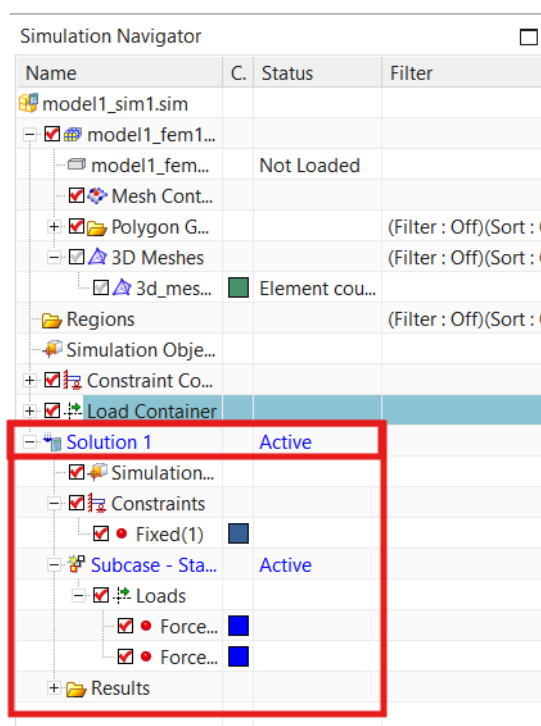
Εικ. 35. Δυνάμεις βάρους οδηγού και θέσης οδήγησης



### 2.3.3 Αναλυτικά βήματα επίλυσης

- Δημιουργία Solution

Κατά την ανάλυση FEA μέσω του λογισμικού, η δημιουργία ενός λειτουργικού περιβάλλοντος ή "Solution" αποτελεί το αρχικό και κρίσιμο βήμα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον ορισμό και την παραμετροποίηση όλων των απαραίτητων μεταβλητών για την επιθυμητή ανάλυση. Ορίζονται οι τύποι των φορτίων που θα εξεταστούν, είτε αυτά είναι στατικά, είτε δυναμικά, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που θα επηρεάσουν την απόκριση του μοντέλου. Συνεπώς, ορίζονται επίσης οι στόχοι της ανάλυσης, προκειμένου να καθοδηγήσουν την έρευνα και να διασφαλίσουν ότι οι υπολογισμοί και η μελέτη θα είναι περιεκτικοί και εστιασμένοι στις κύριες μηχανικές παραμέτρους που απαιτούνται.



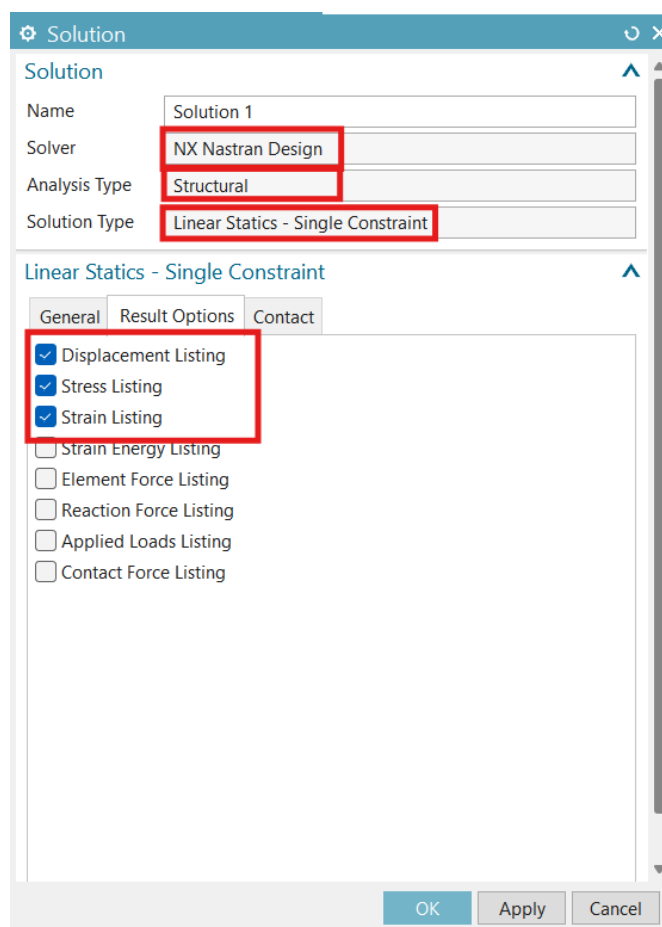
Εκ. 36. Solution

- Επιλογή επιλυτή (solver)

Κατά την επιλογή του επιλυτή (solver) στο Siemens NX, επιλέγεται ο κατάλληλος αλγόριθμος για την εκτέλεση της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Ο "Nastran" αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς και ευρέως χρησιμοποιούμενους επιλυτές, γνωστός για την ικανότητά του να διαχειρίζεται σύνθετες μηχανικές αναλύσεις με

υψηλή ακρίβεια και αποδοτικότητα. Επιπλέον, κατά την επιλογή του Nastran ως επιλυτή, διαμορφώνονται και οι παράμετροι των αποτελεσμάτων, ώστε να περιλαμβάνουν λίστες με μετατοπίσεις (displacement listing), τάσεις (stress listing) και παραμορφώσεις (strain listing), διασφαλίζοντας ότι τα απαραίτητα δεδομένα θα είναι διαθέσιμα για περαιτέρω ανάλυση μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επίλυσης.

Ακόμα, ο τύπος ανάλυσης (Analysis type) έχει οριστεί ως "Structural", που σημαίνει ότι η ανάλυση επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς του μοντέλου υπό τις εφαρμοσμένες δυνάμεις και τα φορτία. Ο τύπος λύσης (Solution Type) έχει επιλεγεί ως Linear Statics - Single Constraint, που σημαίνει ότι η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί υπό στατικά φορτία με γραμμική απόκριση. Αυτή η επιλογή είναι κατάλληλη όταν οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης παραμένουν γραμμικές και η συμπεριφορά του υλικού δεν υπερβαίνει τα όρια της ελαστικότητας. Ο όρος "Single Constraint" αναφέρεται στον περιορισμό της ανάλυσης σε μία κύρια συνθήκη στήριξης ή ένα συγκεκριμένο σύστημα περιορισμών.



Εικ. 37. Solver

### Κεφάλαιο 3. Αποτελέσματα και ανάλυση

Το παρόν κεφάλαιο, επικεντρώνεται στη διεξαγωγή ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) του σχεδιασμένου αγωνιστικού σασί, με στόχο την αξιολόγηση της στρεπτικής ακαμψίας και της αντοχής σε μετωπική κρούση. Αυτή η ανάλυση αποτελεί κρίσιμο βήμα για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας του σασί, καθώς και για τη βελτίωση του τελικού σχεδιασμού.

Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση δύο διαφορετικών υλικών: **Χρωμιούχου Χάλυβα 4340 (Chromoly 4340)** και **Χάλυβα 1005 (SAE 1005)**. Η επιλογή αυτών των υλικών βασίζεται στις εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες τα καθιστούν ιδανικά για την κατασκευή αγωνιστικών σασί. Το Chromoly 4340 είναι ένα υλικό υψηλής αντοχής, που προσφέρει εξαιρετική στρεπτική ακαμψία, ενώ ο χάλυβας SAE 1005 είναι γνωστός για την ευκολία κατεργασίας και την αντοχή του σε εφελκυστικές δυνάμεις. Η συγκριτική ανάλυση αυτών των δύο υλικών επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσής τους υπό τις συνθήκες που θα αντιμετωπίσει το σασί.

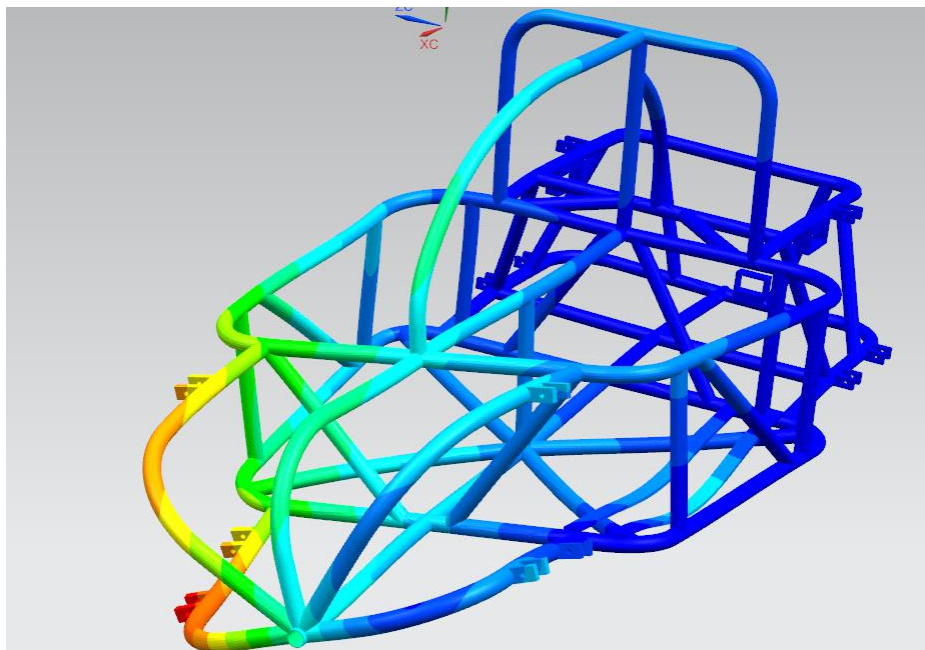
Η πρώτη ανάλυση επικεντρώνεται στη **στρεπτική ακαμψία**, όπου το σασί υποβάλλεται σε δυνάμεις στρέψης για να εξεταστεί η αντοχή του σε παραμορφώσεις. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι απαραίτητη για να διαπιστωθεί κατά πόσο το σασί μπορεί να διατηρήσει τη δομική του ακεραιότητα υπό στρεπτικές φορτίσεις.

Η δεύτερη ανάλυση αφορά τη **μετωπική κρούση**. Σε αυτή την περίπτωση, το σασί υποβάλλεται σε δυνάμεις που προσομοιώνουν την επίδραση μιας μετωπικής σύγκρουσης-πρόσκρουσης, επιτρέποντας την αξιολόγηση της αντίστασής του στις παραμορφώσεις που προκύπτουν από τέτοιου είδους ακραία φορτία. Αυτή η ανάλυση βοηθά στην κατανόηση της αντοχής του σασί και στον εντοπισμό πιθανών αδυναμιών στη δομή του.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων από αυτές τις τέσσερις αναλύσεις παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την απόδοση των δύο υλικών. Τα ευρήματα αναλύονται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4, παρέχοντας σαφή εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε υλικού στον σχεδιασμό αγωνιστικών οχημάτων.

### 3.1 Στρεπτική Ακαμψία

Η στρεπτική ακαμψία, όπως έχει αναφερθεί, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του σασί να αντέχει τις δυνάμεις στρέψης που δέχεται κατά τη λειτουργία του οχήματος. Ένα σασί με υψηλή στρεπτική ακαμψία μειώνει τις παραμορφώσεις στο ελάχιστο, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την προβλέψιμη συμπεριφορά του οχήματος στο δρόμο, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα αγωνιστικά οχήματα. Η αντίσταση στις στρεπτικές δυνάμεις είναι ουσιαστική για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας του οχήματος και την αποδοτική κατανομή των φορτίων στο σασί. Με τη μείωση της παραμόρφωσης, η ακαμψία του σασί επιτρέπει στις αναρτήσεις να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, βελτιώνοντας την πρόσφυση των ελαστικών στο δρόμο και ενισχύοντας τη σταθερότητα του οχήματος.



Εικ. 38. Αναπαράσταση Στρεπτικής παραμόρφωσης

Για την εκτέλεση της ανάλυσης της στρεπτικής ακαμψίας, είναι ζωτικής σημασίας να καθοριστούν σωστά οι συνοριακές συνθήκες και τα φορτία που θα εφαρμοσθούν στο σασί. Στην ανάλυση αυτή, οι δυνάμεις στρέψης προσομοιώνονται με την εφαρμογή ροπών στα σημεία που συνδέονται οι αναρτήσεις. Το πίσω τμήμα του σασί συγκρατείται σταθερά στα σημεία στήριξης των αναρτήσεων και των βραχιόνων τροχών, ενώ στο μπροστινό τμήμα εφαρμόζονται αντίρροπες δυνάμεις για να

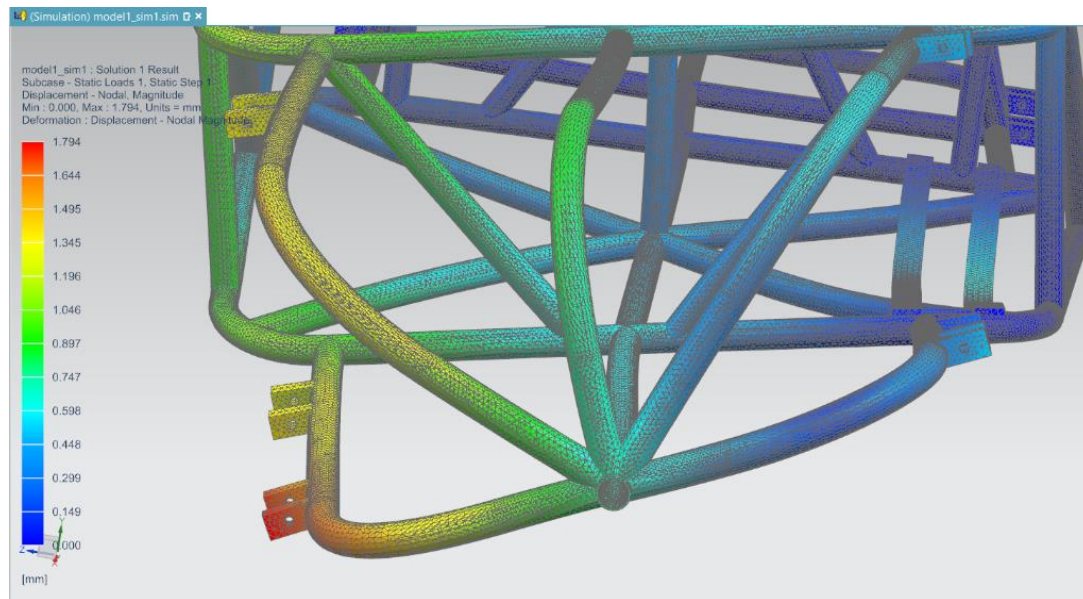
αναπαραχθεί το σενάριο στρέψης. Επιπλέον, για να διασφαλιστεί ότι η προσομοίωση αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματική κατανομή των φορτίων, λαμβάνονται υπόψη και τα φορτία που προκύπτουν από το βάρος του κινητήρα και του οδηγού.

Κατά την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας, το υλικό του σασί ακολουθεί γραμμική ελαστική συμπεριφορά και η σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ροπής στρέψης και της γωνιακής μετατόπισης (ή στρέψης) είναι γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι αν αυξήσουμε τη ροπή στρέψης, η γωνιακή μετατόπιση θα αυξηθεί αναλογικά.

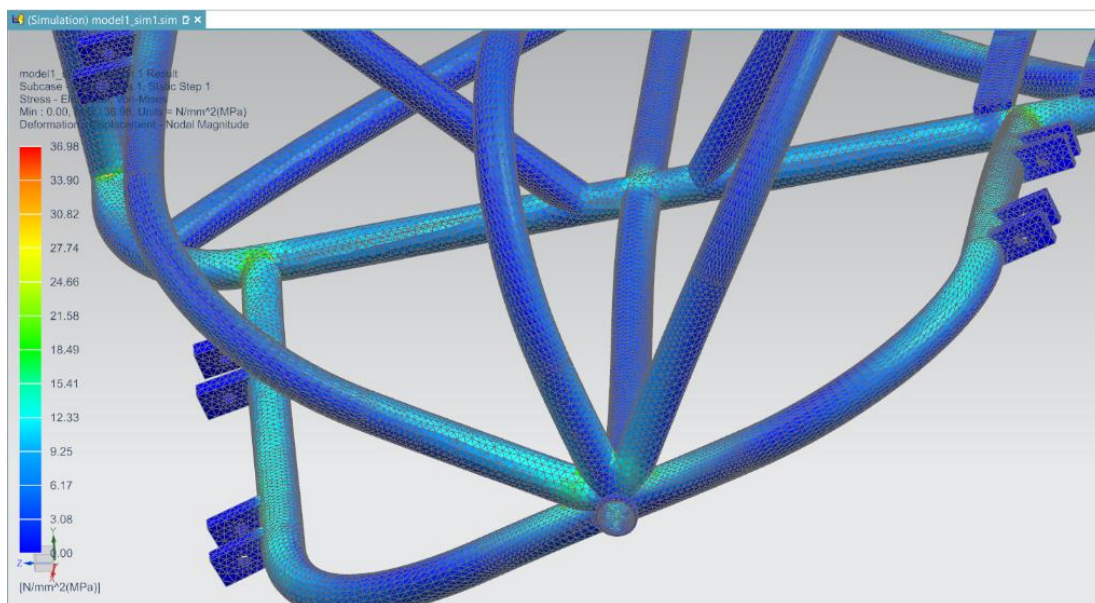
Για παράδειγμα, αν διπλασιάσουμε τη ροπή στρέψης που εφαρμόζεται σε ένα γραμμικά ελαστικό σύστημα, η γωνιακή μετατόπιση θα διπλασιαστεί. Αυτή η γραμμική σχέση ισχύει όσο το υλικό παραμένει εντός του ελαστικού του ορίου και δεν εισέρχεται στη μη γραμμική ή πλαστική περιοχή συμπεριφοράς.

Για την ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας του σασί, η επιλογή της ροπής έγινε με βάση το βάρος του οχήματος και τις τυπικές συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσει ένα αγωνιστικό σασί κατά τη λειτουργία του. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα αυτά, επιλέχθηκε μια ροπή που κυμαίνεται μεταξύ 1.000 Nm και 3.000 Nm, τιμή που αντιπροσωπεύει τις δυνάμεις που αναμένεται να επηρεάσουν το σασί κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Αυτή η προσέγγιση μας επιτρέπει να προσομοιώσουμε ρεαλιστικά τις συνθήκες στρέψης και να αξιολογήσουμε την ακαμψία του σασί υπό τα αναμενόμενα φορτία.

- Αποτελέσματα στρεπτικής ακαμψίας με **Chromoly 4340**.



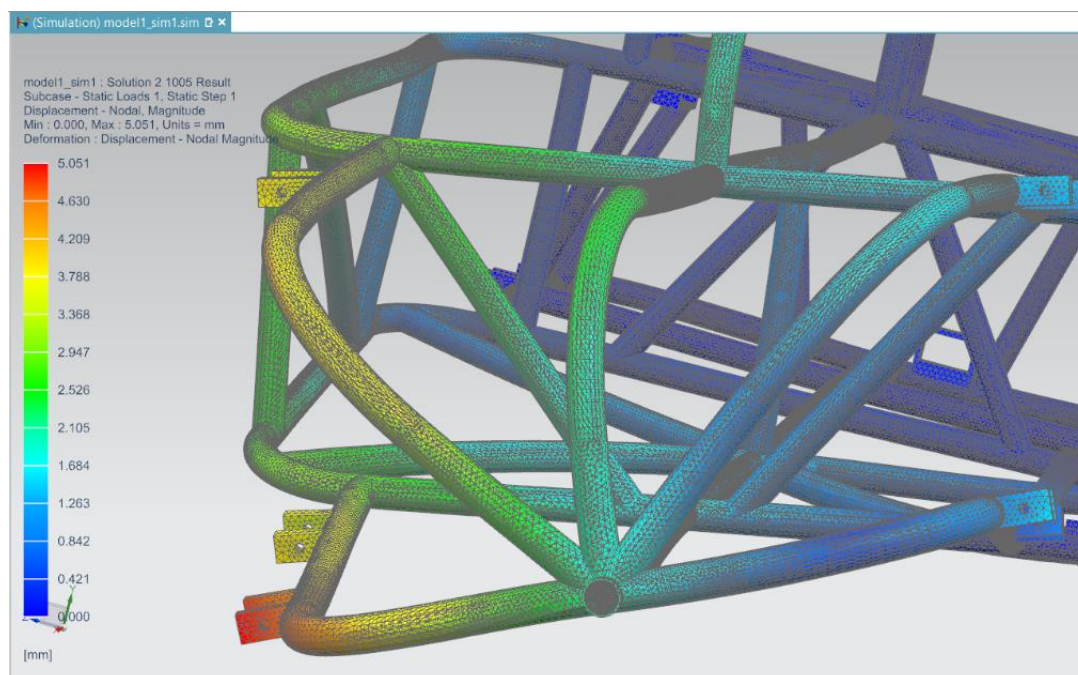
Εικ. 39. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 1,794mm



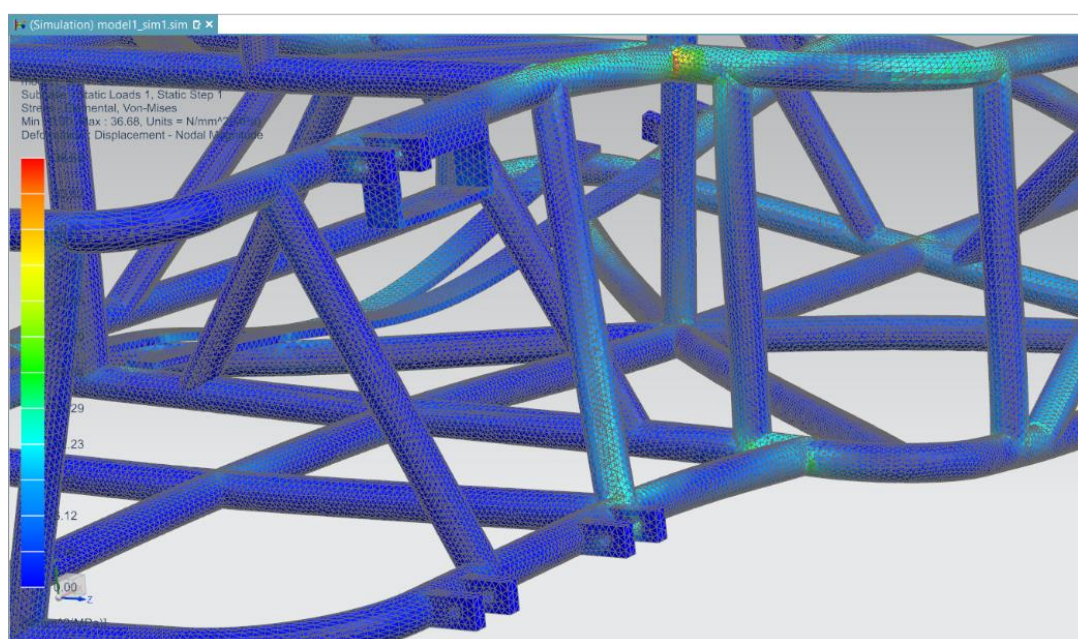
Εικ.40. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 36,98 MPa



- Αποτελέσματα στρεπτικής ακαμψίας με Χάλυβα SAE 1005.



Εικ. 41. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 5,051mm



Εικ. 42. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 36,98 Μpa

### 3.2 Μετωπική Κρούση

Η μετωπική κρούση αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς και κρίσιμους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την ανάλυση ενός αγωνιστικού οχήματος. Σε μια μετωπική σύγκρουση-πρόσκρουση, το σασί του οχήματος, το οποίο αποτελεί τη θεμελιώδη δομή του, καλείται να απορροφήσει και να διαχειριστεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η διαδικασία είναι ύψιστης σημασίας για την προστασία των επιβατών και τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας του οχήματος.

Μέσω αυτής της ανάλυσης, μπορούν να προσδιοριστούν οι περιοχές του σασί που χρειάζονται ενίσχυση, καθώς και να αξιολογηθεί η απόδοση των ζωνών παραμόρφωσης, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να απορροφούν την ενέργεια της κρούσης και να μειώνουν τις καταστροφικές συνέπειες για τους επιβάτες.

Η μετωπική κρούση προσομοιώνεται εφαρμόζοντας δυνάμεις στο μπροστινό μέρος του σασί, ενώ το πίσω μέρος παραμένει πακτωμένο για να προσομοιωθεί η σταθερότητα του οχήματος κατά τη σύγκρουση. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση της ικανότητας του σασί να απορροφά την ενέργεια της κρούσης και να προστατεύει τους επιβάτες, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η παραμόρφωση και η κατανομή των δυνάμεων περιορίζονται στο μπροστινό τμήμα του οχήματος. Μέσα από την ανάλυση αυτή, θα αναδειχθούν οι διαφορές στην απόδοση μεταξύ των δύο υλικών, παρέχοντας σαφή εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός στον σχεδιασμό αγωνιστικών οχημάτων.

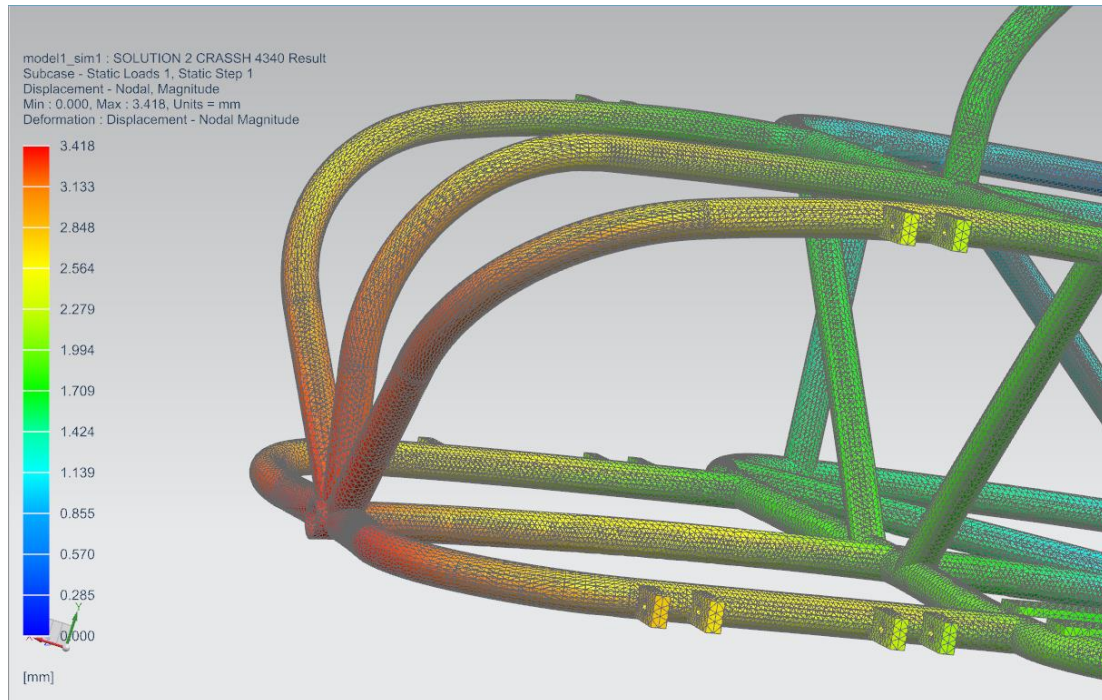
Η μετωπική δύναμη που θα ασκηθεί στο σασί θα είναι ίση με πέντε φορές το συνολικό βάρος του οχήματος. Αυτή η τιμή επιλέχθηκε για να προσομοιώσει μια ακραία συνθήκη σύγκρουσης-πρόσκρουσης, στην οποία το σασί θα υποβληθεί σε φορτίο που υπερβαίνει σημαντικά τις τυπικές συνθήκες λειτουργίας. Η εφαρμογή αυτής της δύναμης θα επιτρέψει την αξιολόγηση της ικανότητας του σασί να απορροφά την ενέργεια της κρούσης.



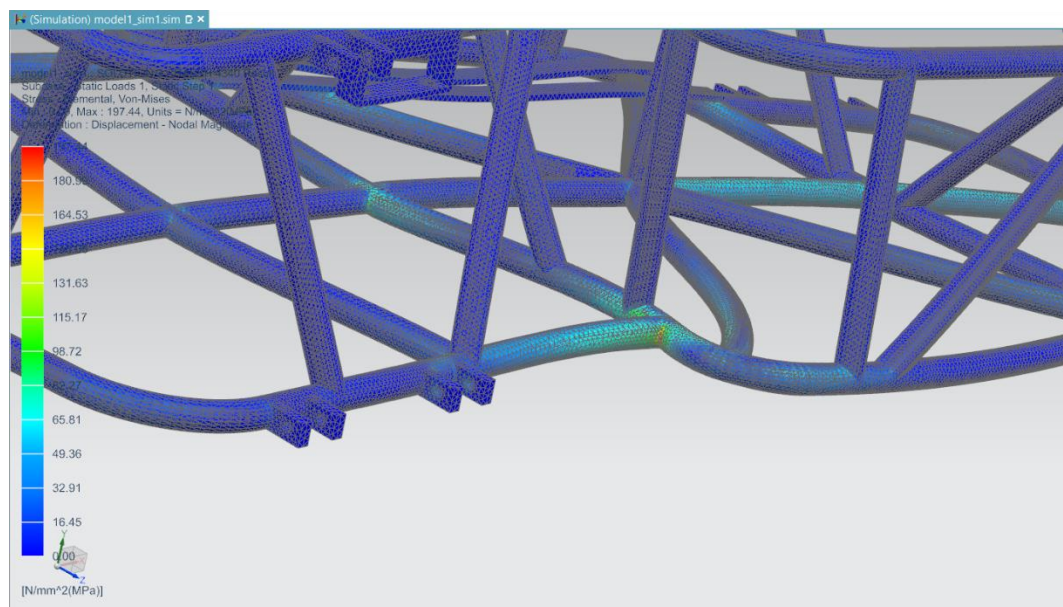
Ο υπολογισμός της μετωπικής στατικής δύναμης που εφαρμόστηκε στην δική μας περίπτωση έγινε ως εξής:

$(\text{Δυνάμη Βάρους Κινητήρα} + \text{Δυναμη Βάρους Σασί} + \text{Δύναμη Βάρους Οδηγού}) * 5 =$   
 $(2334 + 1829 + 980) * 5 = \mathbf{25.715\text{ N}}$

- Αποτελέσματα μετωπικής κρούσης με **Chromoly 4340**

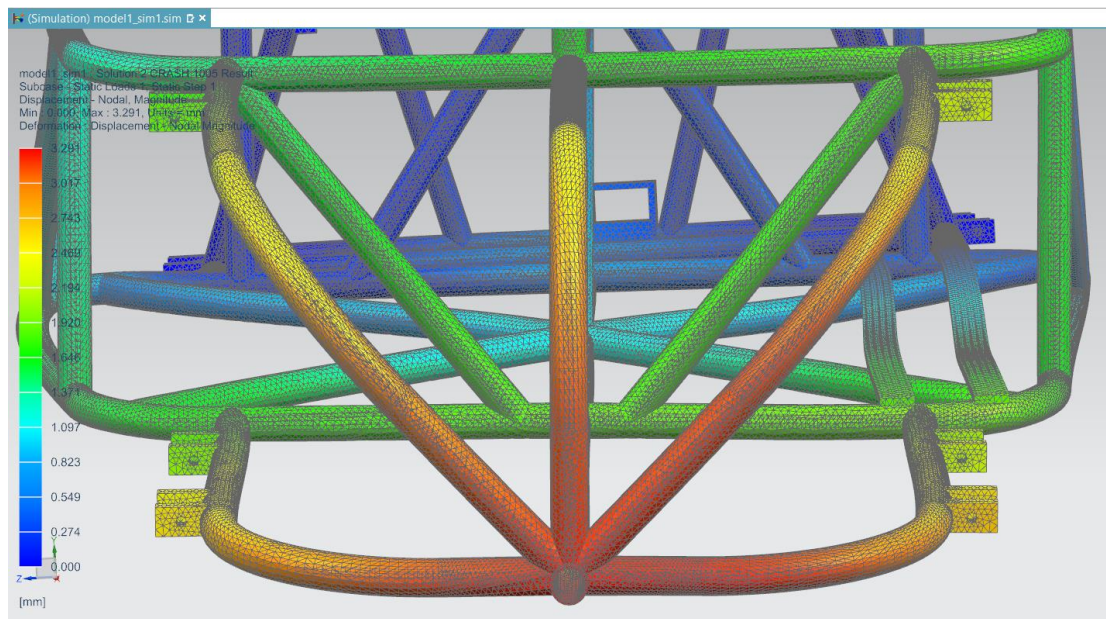


Εικ. 43. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 3,418mm

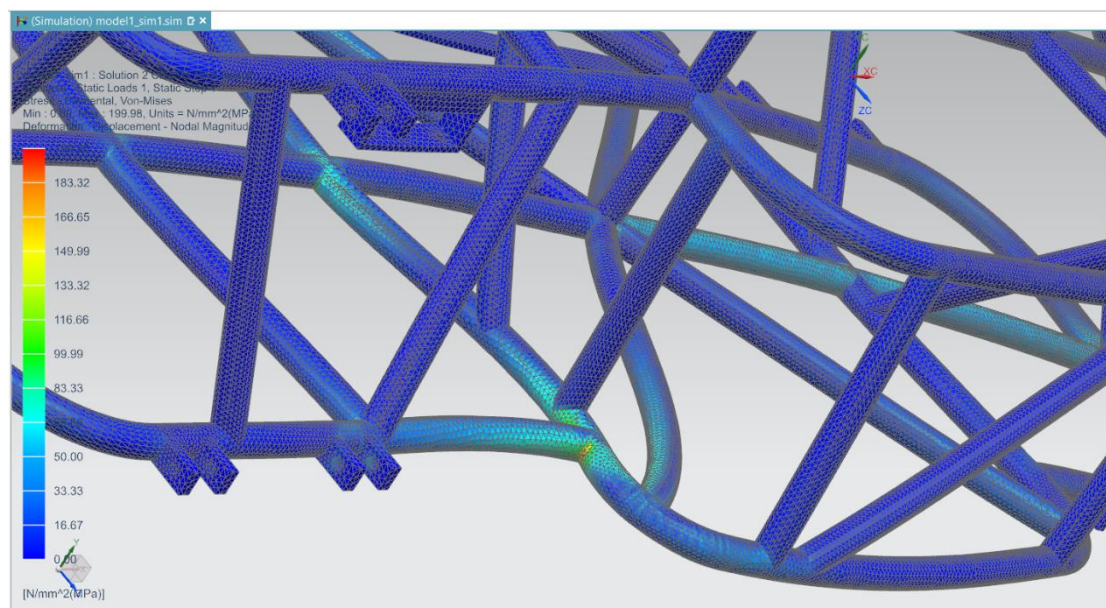


Εικ. 44. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 197,44 MPa

- Αποτελέσματα μετωπικής κρούσης με χάλυβα SAE 1005.



Εικ. 45. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 3,291mm



Εικ. 46. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 199,98 MPa

### 3.3 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

#### • Στρεπτική Ακαμψία:

- Για το υλικό Chromoly 4340, η μετατόπιση που καταγράφηκε ήταν 1,794 mm.
- Για το υλικό SAE 1005, η μετατόπιση που καταγράφηκε ήταν 5,051 mm.
- Και τα δύο υλικά παρουσίασαν τάση 36,98 MPa.
- Το ποσοστό της τάσης ως προς την αντοχή διαρροής για το Chromoly 4340 ήταν 5,21%.
- Το ποσοστό της τάσης ως προς την αντοχή διαρροής για τον χάλυβα SAE 1005 ήταν 14%.

#### • Μετωπική Κρούση :

- Για το υλικό Chromoly 4340, η μετατόπιση που καταγράφηκε ήταν 3,418 mm.
- Για το υλικό SAE 1005, η μετατόπιση που καταγράφηκε ήταν 3,291 mm.
- Η τάση που καταγράφηκε για το Chromoly 4340 ήταν 197,44 MPa.
- Η τάση που καταγράφηκε για τον χάλυβα SAE 1005 ήταν 199,98 MPa.
- Το ποσοστό της τάσης ως προς την αντοχή διαρροής για το Chromoly 4340 ήταν 28%.
- Το ποσοστό της τάσης ως προς την αντοχή διαρροής για τον χάλυβα SAE 1005 ήταν 77%.

	Displacement(mm)	Stress(Mpa)	% for yield strenght
Torsional stiffness			
Chromoly 4340	1,794	36,98	5,21%
steel 1005	5,051	36,98	14%

	Displacement(mm)	Stress(Mpa)	% for yield strenght
Frontal force			
Chromoly 4340	3,418	197,44	28%
steel 1005	3,291	199,98	77%

(MPa)	Chromoly 4340	steel 1005
Ultimate Tensile Strength	1100	330
Yield Strength	710	260

Εικ. 47. Αποτελέσματα και ιδιότητες υλικών



## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν για τη στρεπτική ακαμψία και τη μετωπική κρούση του αγωνιστικού σασί, αναφορικά με τα υλικά που ελέγχθηκαν, καθίσταται σαφές ότι το υλικό Chromoly 4340 παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον χάλυβα SAE 1005. Το Chromoly 4340 επιδεικνύει υψηλή στρεπτική ακαμψία, καθώς η μικρότερη μετατόπιση που καταγράφηκε σε συνδυασμό με το χαμηλό ποσοστό της τάσης ως προς την αντοχή διαρροής, υποδηλώνει ότι το υλικό είναι ικανό να αντέχει σε στρεπτικές δυνάμεις χωρίς να παραμορφώνεται σημαντικά. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας και της σταθερότητας του οχήματος κατά τη διάρκεια αγωνιστικών συνθηκών.

Επιπλέον, στη μετωπική κρούση, παρόλο που οι μετατοπίσεις των δύο υλικών ήταν παρόμοιες, το Chromoly 4340 εμφάνισε χαμηλότερη τάση και, κατά συνέπεια, μεγαλύτερη αντοχή στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Το γεγονός ότι το Chromoly 4340 λειτουργεί σε σημαντικά χαμηλότερο ποσοστό της αντοχής διαρροής του σε σύγκριση με τον χάλυβα SAE 1005 υποδηλώνει ότι έχει μεγαλύτερα περιθώρια αντοχής και αξιοπιστίας σε καταστάσεις υψηλής φόρτισης. Αυτό καθιστά το Chromoly 4340 καλύτερη επιλογή για εφαρμογές όπου η αντοχή σε κρούση και η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας είναι ζωτικής σημασίας.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το Chromoly 4340 αποτελεί την καλύτερη επιλογή υλικού για την κατασκευή ενός αγωνιστικού σασί που πρέπει να αντέχει σε μεγάλες στρεπτικές και κρουστικές δυνάμεις, παρέχοντας αυξημένα επίπεδα ασφάλειας και απόδοσης. Ωστόσο, ο χάλυβας SAE 1005, παρά τα μειονεκτήματά του, θα μπορούσε να εξεταστεί για εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις σε αντοχή δεν είναι τόσο υψηλές και η οικονομική αποδοτικότητα αποτελεί προτεραιότητα.

Η τελική επιλογή του υλικού εξαρτάται από την ειδική χρήση του οχήματος και τις προτεραιότητες που έχουν τεθεί, είτε αυτές αφορούν την απόλυτη απόδοση, είτε τη βελτιστοποίηση του κόστους.

## Βιβλιογραφία

1. Armin Gruen, *Development and Status of Image matching in Photogrammetry*, Institute of Conservation and Building Research, ETH Zurich, 2010
2. Doriot Furnea, Silviu Butnariu, *New Approaches in Designing a Race Car Chassis for Formula Student Engineering Competition*, Transilvania University of Brasov, Romania, 2018
3. Jazar N. Reza, *Vehicle Dynamics. Theory and Application*, Springer, New York, 2008
4. Paul M. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers, Third Edition*, SAE International, 2022
5. Derek Seward, *Race Car Design*, Bloomsbury Academy, 2022
6. Milliken William F and Milliken Douglas L, *Race Car Vehicle Dynamics Society of Automotive Engineers*, SAE International, 1997
7. William B. Riley, Albert R. George, *Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis*, SAE Technical Paper 2002-01-3300
8. Nitin S. Gokhale, Sanjeev V. Bedekar, Sanjay S. Deshpande, Anand N. Thite, *Pactical Finite Element Analysis*, Finite to Infinite, 2008
9. R. L. Mott, E. M. Vavrek, J. Wang, *Machine elements in mechanical design*, Pearson, 2018
10. Δρ Π. Α. Βουθούνης, *Τεχνική Μηχανική-Αντοχή των Υλικών*, 2011
11. Sham Tickoo, *Siemens NX 2019 for Designers (12<sup>th</sup> Edition)*, CADCIM Technologies, 2019
12. Yogesh Sahu, Nikhil Ramachandran, Sham Pandhavl, Hrushikesh Deshmukh, Shubhangi Manvatkar, *Design and Analysis of Tubular Space Frame Chassis for Student Formula Race Car*, International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, 2018
13. Prajwal Kumar M. P, Vivek Muralidharan, G. Madhusudhana, *Design and Analysis of Tubular Space Frame Chassis of a High-Performance Race Car*, International Journal of Research in Engineering and Technology, 2014
14. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0, 2023
15. T. Schenk, *Introduction to Photogrammetry*, 2005
16. Ming C. Leu, Wenjin Tao, Amir Ghazanfari, Krishna Kolan, *NX 12 for Engineering Design*, 2019

## Πίνακας Εικόνων

Εικ. 2. Τοποθέτηση επαρκούς φωτισμού περιμετρικά του αντικειμένου και ανάρτηση αυτού με ιμάντες .....	12
Εικ. 3. Αριθμημένα φωτοσταθερά (coded targets) .....	13
Εικ. 4. Τοποθέτηση αριθμημένων στόχων στην κατάλληλη διάταξη. ....	13
Εικ. 5. Φωτογραφία του μοντέλου στο οποίο απεικονίζονται (ορθογώνιες διατομές με μπλε χρώμα) η γωνία και το σημείο της κάθε επιμέρους λήψης φωτογραφίας. ....	14
Εικ. 6. Φωτογραφία του μοντέλου μετά το στάδιο του Align (Tie points – Sparse point cloud) .....	17
Εικ. 7. Δημιουργία αναφορικών αποστάσεων (Scale bars) μεταξύ δύο σημείων .....	18
Εικ. 8. Τελικό προϊόν μετά το στάδιο της δημιουργίας πυκνού νέφους σημείων (dense cloud) .....	19
Εικ. 9. Τελικό τρισδιάστατο μοντέλο με την ολοκλήρωση όλων των σταδίων .....	22
Εικ. 10. Όλα τα datum planes που χρησιμοποιήθηκαν .....	26
Εικ. 11. Τα sketches στον χώρο .....	27
Εικ. 12. Ένα παράδειγμα Extrude.....	27
Εικ. 13. Simple Hole με την εντολή Hole.....	28
Εικ. 14. Mirror Feature με το Datum "mirror" .....	28
Εικ. 15. Ένα τυχαίο κομμάτι του σασί με την εντολή Tube .....	29
Εικ. 16. Ένωση δυο κομματιών σωλήνα σε έναν .....	30
Εικ. 17. Ομαδοποίηση εντολών .....	30
Εικ. 18. Συνολικό βάρος και κέντρο βάρους με την Measure Body.....	31
Εικ. 19. Μοντέλο κινητήρα-κιβωτίου .....	33
Εικ. 20. Βάσεις κινητήρα-κιβωτίου .....	34
Εικ. 21. Σχεδιασμός πίσω μέρους.....	34
Εικ. 22. Σχεδιασμός μεσαίου μέρους .....	35
Εικ. 23. Σχεδιασμός μπροστινού μέρους.....	35
Εικ. 24. Σχεδιασμός πάνω μέρους.....	36
Εικ. 25. Σχεδιασμός βάσεων στήριξης αναρτήσεων και βραχιόνων τροχών .....	36
Εικ. 26. Δημιουργία υπόλοιπου μισού.....	37
Εικ. 27. Έλεγχος Ολότητας Σχεδίου .....	43
Εικ. 28. Χρήση του Application Design .....	43
Εικ. 29. Εντολή 'Assign Materials' .....	44
Εικ. 30. Δημιουργία του δικτύου (Mesh).....	45
Εικ. 31. Εντολή Element Quality .....	46
Εικ. 32. Σημεία στήριξης.....	46
Εικ. 33. Τύποι των φορτίων .....	47
Εικ. 34. Ανάλυση δυνάμεων βάρους στις 3 βάσεις .....	47
Εικ. 35. Ανάλυση δυνάμεων βάρους στις 3 βάσεις .....	48

Εικ. 36. Δυνάμεις βάρους οδηγού και θέσης οδήγησης .....	48
Εικ. 37. Solution .....	49
Εικ. 38. Solver .....	50
Εικ. 39. Αναπαράσταση Στρεπτικής παραμόρφωσης .....	52
Εικ. 40. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 1,794mm .....	54
41. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 36,98 MPa .....	54
Εικ. 42. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 5,051mm .....	55
Εικ. 43. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 36,98 MPa.....	55
Εικ. 44. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 3,418mm .....	57
Εικ. 45. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 197,44 MPa.....	57
Εικ. 46. Μετατόπιση στοιχείων, μέγιστη τιμή 3,291mm .....	58
Εικ. 47. Ανάλυση τάσεων παραμόρφωσης, Μέγιστη τιμή 199,98 MPa.....	58
Εικ. 48. Αποτελέσματα και ιδιότητες υλικών .....	59