

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΜΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΚΑΡΤ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

ΑΕΜ: 2215

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΡΑΪΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΔΟΜΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΚΑΡΤ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΒΑΜΒΑΚΑΣ

ΑΕΜ: 2215

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΡΑΪΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ ΙΟΥΛΙΟΣ 2024

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το δομικό σύστημα ενός αγωνιστικού kart. Αρχικώς, μέσω του CAD προγράμματος Inventor, σχεδιάζεται ένα τυπικό μοντέλο σκελετού kart, το οποίο έχει προδιαγραφές ώστε, εάν κατασκευαστεί, να έχει δυνατότητα συμμετοχής σε αγώνες ταχύτητας. Το μοντέλο αυτό εισέρχεται στο πρόγραμμα Inspire, όπου εφαρμόζονται στατικά φορτία για τρεις περιπτώσεις φόρτισης, οι οποίες αντιστοιχούν σε περιπτώσεις κρούσης υπό ορισμένη ταχύτητα. Για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις πραγματοποιείται τοπολογική βελτιστοποίηση στο μοντέλο με στόχο τη βέλτιστη μείωση του βάρους του. Στη συνέχεια, συνδυάζονται τα νέα σχέδια που δημιούργησε το πρόγραμμα, ώστε να προκύψει το νέο επανασχεδιασμένο μοντέλο. Έπειτα, προετοιμάζεται καταλλήλως η γεωμετρία και δημιουργείται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο CAE πρόγραμμα ANSA, ώστε στη συνέχεια να εισαχθεί στο CAE πρόγραμμα HyperWorks. Στο περιβάλλον του HyperWorks πραγματοποιούνται οι δυναμικές αναλύσεις προσομοίωσης κρούσεων για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν προκαταρκτικά. Τέλος, μελετώνται τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων και αξιολογείται το βελτιστοποιημένο μοντέλο.

Σκοπός της μελέτης αυτής, είναι η βελτιστοποίηση της τοπολογίας του δομικού συστήματος του kart, ως προς το βάρος του, ώστε κατά τα σενάρια κρούσης υπό την ορισμένη ταχύτητα να διατηρείται η ασφάλεια του οδηγού χωρίς τραυματισμό του.

Abstract

In this thesis, the structural system of a racing kart is studied. Initially, through the Inventor CAD program, a typical kart frame model is designed, which, if built, is capable of racing. This model enters the Inspire program, where static loads are applied for three load cases, which correspond to maximum velocity impact cases. For each of these cases, a topological optimization is performed on the model with the aim of optimally reducing its weight. The new designs created by the program are then combined to produce the new redesigned model. The geometry is then properly prepared and the finite element model is created in the CAE program ANSA, so that it can then be imported into the CAE program HyperWorks. In the HyperWorks environment, the dynamic impact simulation analyzes are carried out for the three preliminary studied cases. Finally, the results of dynamic analyzes are studied and the optimized model is evaluated.

The purpose of this study is to optimize the topology of the kart's structural system, in terms of its weight, so that during impact scenarios at maximum speed, the safety of the driver is maintained without injury.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου, η οποία με στήριξε, σε ό,τι πρόβλημα αντιμετώπισα, καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Έπειτα, τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κ. Αραϊλόπουλο, ο οποίος μου παρείχε τις κατάλληλες γνώσεις και συμβουλές που χρειάστηκα, αλλά και με βοήθησε στο να επιλύσω διάφορα ζητήματα κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, τους φίλους μου, που με βοήθησαν με τον δικό τους τρόπο, όπου είχα ανάγκη.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	7
2. Αρχικός σχεδιασμός.....	9
3. Επιλογή υλικού.....	12
4. Τοπολογική Βελτιστοποίηση.....	13
4.1. Τρόπος λειτουργίας τοπολογικής βελτιστοποίησης-Μέθοδος SIMP.....	15
4.2. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης στο σασί του kart.....	19
4.2.1. Εφαρμογή στατικών φορτίων σε κάθε σενάριο πρόσκρουσης.....	22
4.3. Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	24
4.4. Στατική ανάλυση.....	28
4.5. Επανασχεδιασμός μοντέλου.....	34
5. Δυναμική ανάλυση πρόσκρουσης.....	37
5.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	41
5.1.1. Εισαγωγή.....	41
5.1.2. Ανάλυση της μεθόδου.....	42
5.1.3. Διακριτοποίηση της δομής.....	44
5.2. Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	45
5.3. Ορισμός υλικού και ιδιοτήτων του.....	47
5.4. Ορισμός συνθηκών φόρτισης.....	48
5.5. Ορισμός παραμέτρων επίλυσης.....	53
5.6. Αποτελέσματα ανάλυσης.....	54
5.7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	60
6. Συμπεράσματα.....	62
7. Βιβλιογραφία.....	63

1. Εισαγωγή

Τα αγωνιστικά karts είναι μικρά, ελαφριά και ανοιχτά οχήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για αγώνες σε ειδικές πίστες. Είναι ένα από τα πιο δημοφιλή αθλήματα μηχανοκίνητου αθλητισμού και αποτελεί συχνά το πρώτο βήμα για όσους θέλουν να ξεκινήσουν μια καριέρα στους αγώνες αυτοκινήτων. Πολλοί γνωστοί οδηγοί της Formula 1 και άλλων αγωνιστικών κατηγοριών ξεκίνησαν την καριέρα τους από αγώνες kart, όπως οι Michael Schumacher, Lewis Hamilton, και Sebastian Vettel.



Εικόνα 1.1 Αγώνας kart κατηγορίας Senior

Το σασί του αγωνιστικού kart είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του οχήματος, καθώς επηρεάζει άμεσα την απόδοση, τη σταθερότητα και την ασφάλεια του kart. Κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής και αποτελείται από σωλήνες που είναι συγκολλημένοι μαζί ώστε να σχηματίσουν ένα ενιαίο πλαίσιο. Αυτή η κατασκευή επιτρέπει στο σασί να απορροφά τους κραδασμούς και τις καταπονήσεις από την πίστα, βελτιώνοντας την πρόσφυση και την άνεση του οδηγού.

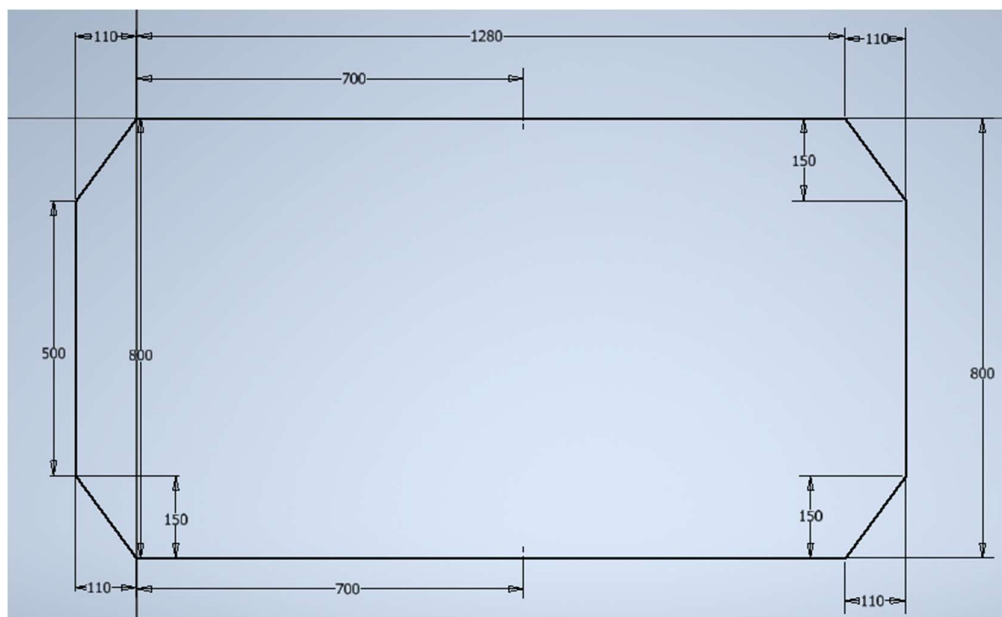
Ωστόσο, η ασφάλεια του οδηγού είναι η πιο σημαντική προτεραιότητα στον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός σασί για αγωνιστικό kart. Η σημασία της ασφάλειας που προσφέρεται από το σασί έγκειται κυρίως στην πρόληψη σοβαρών τραυματισμών και στην ακεραιότητα του οδηγού έπειτα από οποιαδήποτε σύγκρουση. Επίσης, ένας οδηγός που γνωρίζει ότι το σασί του kart του είναι ασφαλές, αποκτά αυτομάτως μεγαλύτερη αυτοπεποίθηση στην οδήγηση και σημαντική μείωση του άγχους για τραυματισμούς, με αποτέλεσμα να αποδίδει καλύτερα στον αγώνα.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια, το σασί πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις που καθορίζονται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Αυτοκινήτου (FIA: Federation Internationale de l'Automobile), η οποία εκδίδει το πιστοποιητικό έγκρισης ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επίσημους αγώνες. Η διαδικασία πιστοποίησης αποτελείται από διάφορα στάδια ελέγχου και δοκιμών στα οποία περιλαμβάνονται οι δοκιμές πρόσκρουσης, τα υλικά, οι διαστάσεις, συνδέσεις και άλλα. Στις δοκιμές πρόσκρουσης περιλαμβάνονται η μετωπική και η πλευρική πρόσκρουση, ώστε να διαπιστωθεί ότι προστατεύεται ο οδηγός σε αυτά τα σενάρια. Προκειμένου να εγκριθούν οι δοκιμές αυτές, αρχικά πρέπει να εξασφαλιστεί η ελάχιστη παραμόρφωση της περιοχής όπου βρίσκεται ο οδηγός μετά τη πρόσκρουση και ότι θα παραμείνει σχετικά αμετάβλητη. Επίσης, κατά τη πρόσκρουση δεν πρέπει κανένα δομικό μέρος του σασί να εισχωρήσει στον χώρο του οδηγού ώστε να μην υπάρξει τραυματισμός.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφού δημιουργηθεί το βελτιστοποιημένο μοντέλο, θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις για τις μετωπικές και πλευρικές προσκρούσεις. Σκοπός είναι τα αποτελέσματα των αναλύσεων να δείξουν ότι το σασί είναι ασφαλές για τον οδηγό, και ότι εάν κατασκευαστεί και συναρμολογηθεί με τους προφυλακτήρες και τα λειτουργικά συστήματα, να έχει μέγιστη πιθανότητα να εγκριθεί από τις δοκιμές ασφαλείας και να λάβει πιστοποίηση.[1],[2]

2. Αρχική σχεδίαση

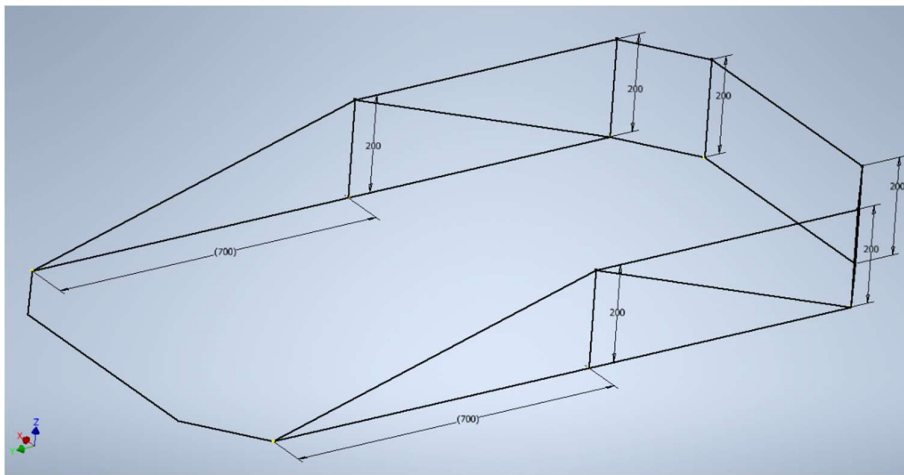
Ο σχεδιασμός ενός σασί για ένα αγωνιστικό kart είναι μια διαδικασία που απαιτεί προσοχή στη λεπτομέρεια και τεχνική γνώση. Για τον αρχικό σχεδιασμό, επιλέγεται το CAD πρόγραμμα Inventor Professional 2022 της AutoDesk με χρήση της άδειας που παρέχεται σε σπουδαστές. Αρχικά, γίνεται η κατάλληλη προετοιμασία με ανάλυση υπαρχόντων σχεδίων για καλύτερη κατανόηση και έμπνευση. Έπειτα, επιλέγεται το σχήμα του πλαισίου του κυρίως σκελετού του σασί και εφαρμόζονται οι κατάλληλες διαστάσεις (Εικόνα 2.1) ώστε να είναι εντός ορίων των γεωμετρικών προδιαγραφών της FIA.



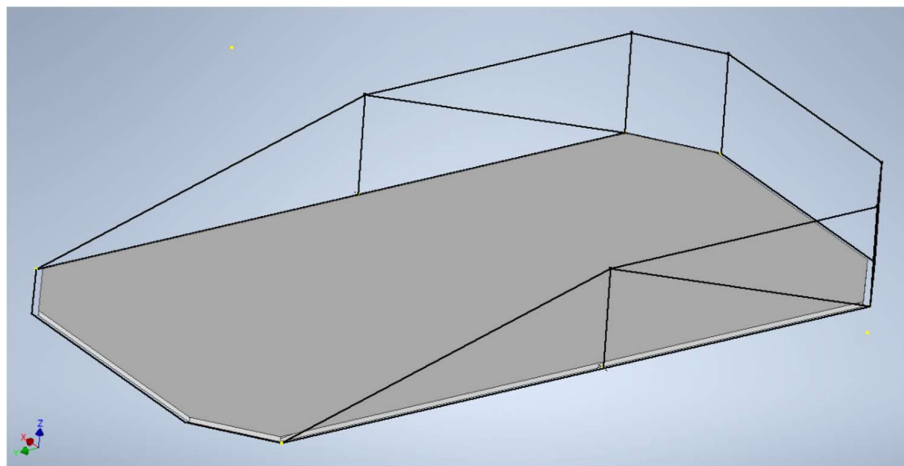
Εικόνα 2.1 Διαστάσεις πλαισίου-Άνοψη

Στη συνέχεια, επιλέγεται η διαμόρφωση του σκελετού δημιουργώντας έτσι το 3D σχέδιο με τις διαστάσεις που αναγράφονται στην Εικόνα 2.2, και προστίθεται το στερεό μέρος του σασί στο οποίο πρόκειται να εφαρμοστεί η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης (Εικόνα 2.3). Το πάχος επιλέγεται 1 cm ως μία μέση τιμή, έτσι ώστε να μην επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό στο βάρος του μοντέλου στις αναλύσεις στη συνέχεια.

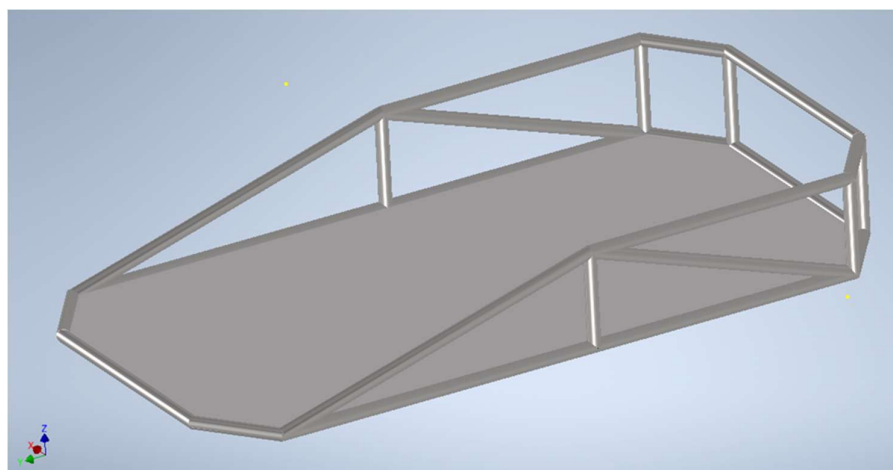
Η δομή του σασί που δεν θα μεταβληθεί, επιλέγεται να αποτελείται από σωλήνες κυκλικής διατομής τυποποιημένες από το πρότυπο ISO 10799-2 με εξωτερική διάμετρο 26.9 mm και πάχος 2.5 mm. Στο σχέδιο εφαρμόστηκαν μέσω του Frame Generator και της επιλογής Round Tubes. Έτσι δημιουργήθηκε το τελικό Assembly (Εικόνα 2.4). Τέλος, γίνεται έλεγχος εάν παρεμβάλλεται κάποιο στερεό μέσα σε άλλο ώστε να μην προκύψουν ανακριβή αποτελέσματα στις αναλύσεις (Εικόνα 2.7).



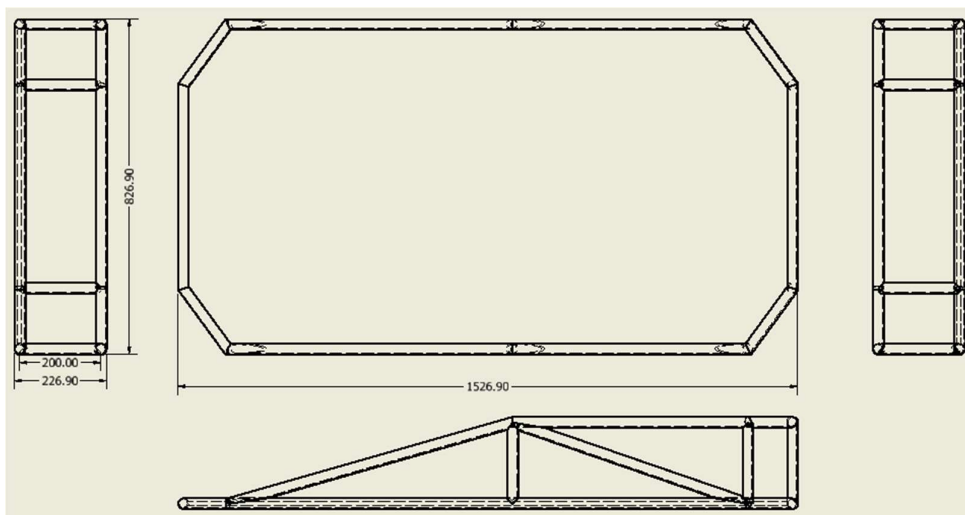
Εικόνα 2.2 Τρισδιάστατη όψη διαστάσεων



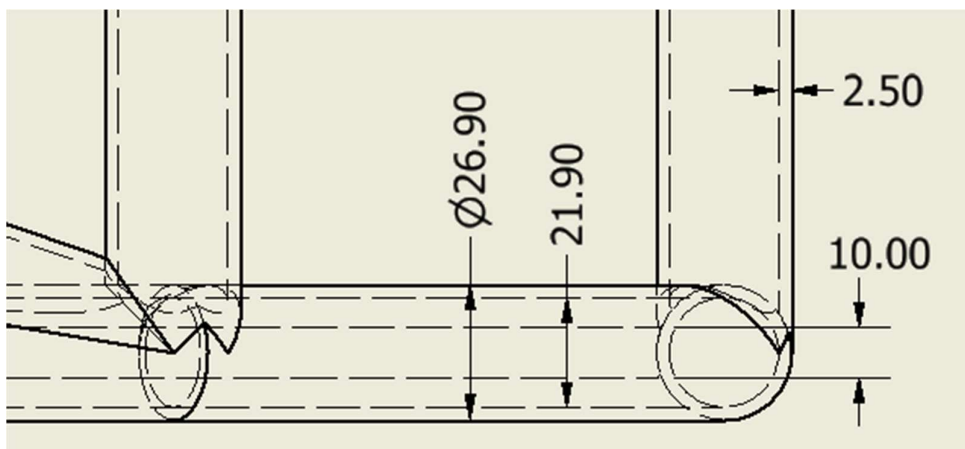
Εικόνα 2.3 Στερεό μέρος προς βελτιστοποίηση



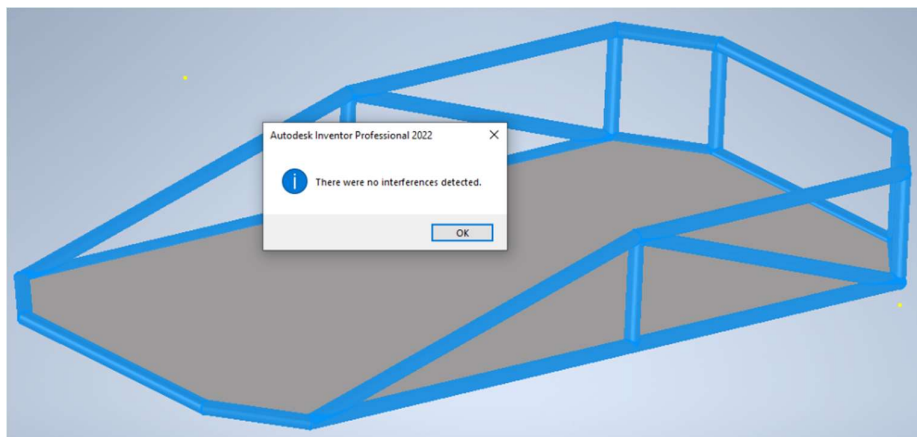
Εικόνα 2.4 Τρισδιάστατη όψη μοντέλου



Εικόνα 2.5 Όψεις μηχανολογικού σχεδίου



Εικόνα 2.6 Διαστάσεις σωλήνων



Εικόνα 2.7 Έλεγχος τομής στερεών

3. Επιλογή υλικού

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για το σασί ενός αγωνιστικού kart είναι κρίσιμη λόγω των απαιτήσεων για αντοχή, ελαφρότητα και ευκαμψία. Ένα σασί κατασκευασμένο από υψηλής ποιότητας υλικά, εξασφαλίζει την αντοχή στις καταπονήσεις και τους κραδασμούς που υφίσταται κατά την αγωνιστική οδήγηση, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί το βάρος σε χαμηλά επίπεδα για καλύτερες επιδόσεις. Η ευκαμψία του υλικού επιτρέπει την βέλτιστη πρόσφυση και σταθερότητα στις στροφές, βελτιώνοντας έτσι τον έλεγχο και την ταχύτητα του kart. Συνολικά, το σωστό υλικό συμβάλλει στην ασφάλεια, την αποδοτικότητα και την ανταγωνιστικότητα του αγωνιστικού kart.

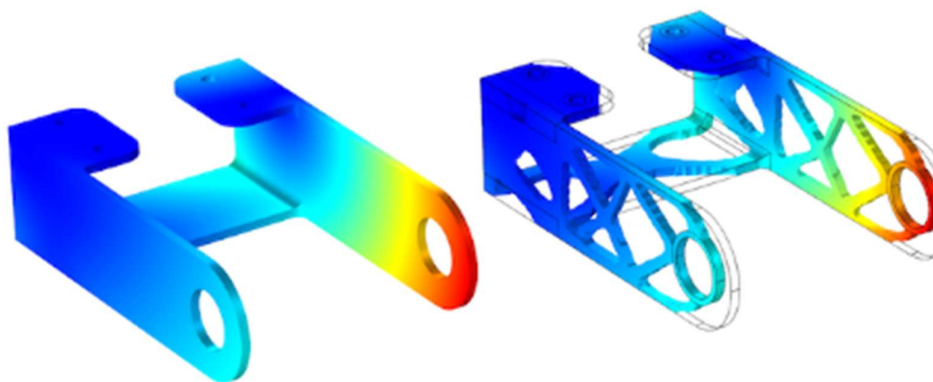
Στον τομέα του μηχανοκίνητου αθλητισμού υπάρχει πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε κατασκευής. Η επιλογή του υλικού AISI 1018 για την κατασκευή ενός σασί αγωνιστικού kart προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, καθώς είναι ένας ανθρακούχος χάλυβας μεσαίου άνθρακα, γνωστός για την καλή ισορροπία μεταξύ αντοχής και ανθεκτικότητας. Διαθέτει υψηλή αντοχή και σκληρότητα, καθιστώντας το ικανό να αντέχει στις έντονες καταπονήσεις και τις δυνάμεις που ασκούνται κατά την αγωνιστική οδήγηση. Επίσης, έχει καλές ιδιότητες κατεργασίας, επιτρέποντας την εύκολη διαμόρφωση και συγκόλληση, γεγονός που διευκολύνει την κατασκευή του σασί. Προσφέρει μια καλή ισορροπία μεταξύ ευκαμψίας και δυσκαμψίας, επιτρέποντας στο σασί να απορροφά τους κραδασμούς και τις δονήσεις ενώ διατηρεί τη σταθερότητα και την ακρίβεια στις στροφές[20]. Ακόμη, είναι συγκριτικά πιο οικονομικό από άλλα υλικά υψηλότερης ποιότητας, προσφέροντας μια καλή επιλογή για όσους επιθυμούν να διατηρήσουν το κόστος κατασκευής χαμηλό χωρίς να θυσιάζουν την ποιότητα και τις επιδόσεις.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χάλυβα AISI 1018 που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια είναι[3]:

Όριο διαρροής	370 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	210000 MPa
Πυκνότητα	7870 kg/m ³
Λόγος Poisson	0.29

4. Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια εξελιγμένη μέθοδος που έχει κερδίσει σημαντική προσοχή στις κατασκευές λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Επιτρέπει τη δημιουργία δομών που χρησιμοποιούν το ελάχιστο δυνατό υλικό χωρίς να θυσιάζεται η αντοχή και η ασφάλεια. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται το κόστος των υλικών και των κατασκευών, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μεγάλες και σύνθετες κατασκευές. Επίσης, η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη σχεδίαση δομών που είναι βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένα φορτία και συνθήκες λειτουργίας. Αυτό οδηγεί σε ανθεκτικότερες και πιο αξιόπιστες κατασκευές, που αντέχουν καλύτερα στις καταπονήσεις και στις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Εικόνα 4.1 Τοπολογική βελτιστοποίηση εξαρτήματος κατασκευής

Με την τοπολογική βελτιστοποίηση, οι κατασκευές μπορούν να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, τη βελτίωση της αεροδυναμικής ή τη μείωση των κραδασμών. Επίσης, επιτρέπεται στους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες να εξερευνήσουν νέες και καινοτόμες μορφές και σχέδια που δεν ήταν εφικτά με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό ανοίγει νέους ορίζοντες στη δημιουργικότητα και στην ανάπτυξη πρωτοποριακών κατασκευών. Ακόμη, εξοικονομούνται χρόνος και ανθρώπινοι πόροι, επιτρέποντας την ταχύτερη ολοκλήρωση των έργων, καθώς η τοπολογική βελτιστοποίηση επιταχύνει τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής με τη χρήση προηγμένων υπολογιστικών εργαλείων και αλγορίθμων. Η μέθοδος αυτή, είναι εφαρμόσιμη σε ένα ευρύ φάσμα κατασκευών, από μικρά εξαρτήματα έως μεγάλα κτίρια και υποδομές. Η ευελιξία της μεθόδου την καθιστά ιδανική για διάφορες βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, και η πολιτική μηχανική. Επιπλέον, μια από τις κύριες προκλήσεις στον σχεδιασμό κατασκευών είναι η αντιμετώπιση περιορισμών όπως οι γεωμετρικοί, οι μηχανικοί και οι λειτουργικοί περιορισμοί. Η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματική διαχείριση αυτών των περιορισμών και στην εύρεση βέλτιστων λύσεων που πληρούν τις απαιτήσεις σε όλους τους τομείς. Επιπροσθέτως, οι προηγμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται επιτρέπουν την ακριβή μοντελοποίηση των

φυσικών φαινομένων και την αξιολόγηση πολλαπλών σεναρίων σχεδίασης. Αυτό οδηγεί σε σχέδια που είναι πιο προβλέψιμα και αξιόπιστα στην πραγματική εφαρμογή. Τέλος, ενθαρρύνεται η καινοτομία στον τομέα των κατασκευών, καθώς δίνεται η δυνατότητα στους μηχανικούς να εξερευνούν νέες ιδέες και σχέδια που μπορεί να μην ήταν εφικτά πριν. Αυτό ενισχύει την επιστημονική έρευνα και την ανάπτυξη τεχνολογιών που μπορούν να έχουν ευρύτερες εφαρμογές σε διάφορους τομείς.



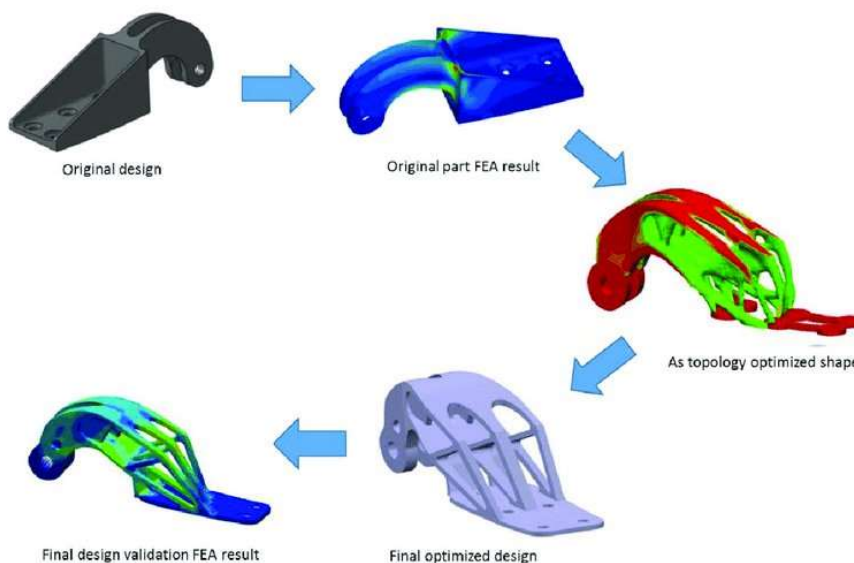
Εικόνα 4.2 Τοπολογική βελτιστοποίηση σε σασί μοτοσυκλέτας

Συνολικά, η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί μια ισχυρή μέθοδο που συνδυάζει την επιστημονική ακρίβεια με την καινοτομία, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στις σύγχρονες κατασκευές. Η εφαρμογή της μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλέστερα, πιο αποδοτικά και οικονομικά βιώσιμα έργα, καθιστώντας την πολύτιμο εργαλείο για τους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες του σήμερα και του αύριο. Αναδεικνύεται ως μια προηγμένη τεχνική σχεδιασμού που ξεπερνά τα παραδοσιακά πλαίσια, προσφέροντας ολοκληρωμένες και βελτιστοποιημένες λύσεις για τις προκλήσεις των σύγχρονων κατασκευών. Η συνεχής ανάπτυξη και η εφαρμογή της σε νέους τομείς επιβεβαιώνουν τη σημαντική της συμβολή στην επιστήμη και στην τεχνολογία.[4]

4.1. Τρόπος λειτουργίας τοπολογικής βελτιστοποίησης – Μέθοδος SIMP

Η τοπολογική βελτιστοποίηση είναι μια μέθοδος σχεδιασμού που στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης διάταξης υλικών μέσα σε ένα δεδομένο χώρο, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης μιας δομής υπό συγκεκριμένους περιορισμούς και φορτία. Για να ξεκινήσει να εφαρμοστεί η μέθοδος πρέπει πρώτα να οριστεί ο σχεδιαστικός χώρος, ο οποίος μπορεί να είναι ένα δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο μέρος της κατασκευής. Ο μηχανικός πρέπει να καθορίσει τα όρια του χώρου και τυχόν απαγορευμένες περιοχές όπου δεν μπορεί να μεταβληθεί το υλικό. Επίσης, πρέπει να καθοριστούν τα φορτία που θα ασκηθούν στη δομή, όπως δυνάμεις, ροπές ή πιέσεις, και οι περιορισμοί σχεδίασης, οι οποίοι μπορεί να περιλαμβάνουν όρια μετακίνησης, αντοχής, σκληρότητας, και άλλες μηχανικές ιδιότητες.

Αφού δοθεί η εντολή να εκκινήσει η μέθοδος, γίνεται μία αρχική κατανομή υλικού στον σχεδιαστικό χώρο, που μπορεί να είναι ομοιογενής ή να βασίζεται σε αρχικές υποθέσεις. Αυτή η κατανομή είναι το σημείο εκκίνησης για τη βελτιστοποίηση. Έπειτα, πραγματοποιείται η ανάλυση για να υπολογιστούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι καταπονήσεις στη δομή για την τρέχουσα κατανομή υλικού, ώστε να αξιολογηθεί η δομική απόδοση και η κατανομή των φορτίων. Η ανάλυση αυτή συνήθως γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Έτσι, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για να προσαρμόσει την κατανομή του υλικού με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης της δομής. Με βάση τον αλγόριθμο αυτό και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενημερώνεται η κατανομή του υλικού, αφαιρώντας υλικό από τις περιοχές χαμηλών τάσεων και προσθέτοντας υλικό στις περιοχές υψηλών τάσεων.

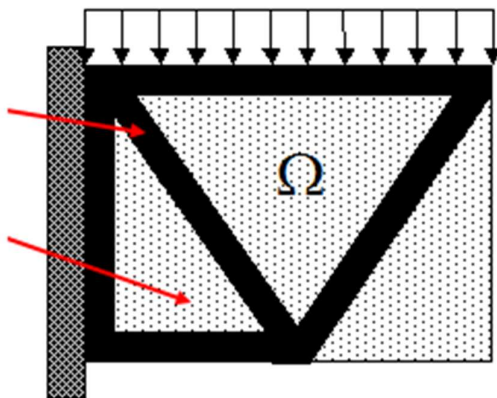


Εικόνα 4.1.1 Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή του υλικού ή μέχρις ότου ικανοποιηθούν συγκεκριμένα κριτήρια σύγκλισης. Κάθε επανάληψη περιλαμβάνει την ανανέωση του μοντέλου και την εκ νέου ανάλυση των τάσεων και των καταπονήσεων. Μόλις η διαδικασία βελτιστοποίησης ολοκληρωθεί, το τελικό σχέδιο αξιολογείται για να διασφαλιστεί ότι πληροί όλους τους καθορισμένους περιορισμούς και προδιαγραφές. Σε αυτή τη φάση μπορεί να γίνουν μικρές προσαρμογές ή βελτιώσεις για να επιτευχθεί η τελική μορφή της δομής.

Ο αλγόριθμος της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι μια επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και βελτιστοποιητικών τεχνικών για την επίτευξη της βέλτιστης κατανομής υλικών. Ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους για τοπολογική βελτιστοποίηση είναι η μέθοδος SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization). Το μαθηματικό μοντέλο αυτής της μεθόδου μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, όπου η πυκνότητα του υλικού κάθε στοιχείου στον σχεδιαστικό χώρο προσαρμόζεται για να ελαχιστοποιηθεί η κατανομή υλικού της δομής, ενώ παράλληλα πληρούνται οι περιορισμοί στον όγκο του υλικού.[4],[5]

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου SIMP, αρχικά γίνεται η διακριτοποίηση του σχεδιαστικού χώρου σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και ορίζεται η πυκνότητα κάθε στοιχείου ρ_e , όπου ρ_e ανήκει στο διάστημα $[0,1]$. Η τιμή $\rho_e = 0$ δηλώνει ότι το στοιχείο είναι πλήρως κενό και η τιμή $\rho_e = 1$ δηλώνει ότι το στοιχείο είναι πλήρως υλικό.



Εικόνα 4.1.2 Παράδειγμα εφαρμογής μεθόδου SIMP [6]

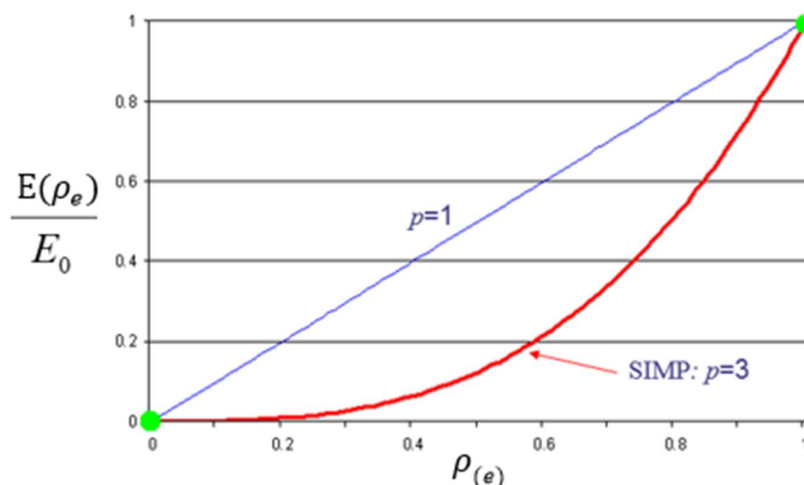
Για το κάθε στοιχείο εφαρμόζεται ένας νόμος ποινής (Σχέση 4.1).

$$E(\rho_e) = E_0 \cdot \rho_e^p \quad (4.1)$$

Όπου:

- $E(\rho_e)$: το μέτρο ελαστικότητας του κάθε στοιχείου
- E_0 : το μέτρο ελαστικότητας του συνολικού υλικού
- p : ο συντελεστής ποινής, για τον οποίο συνήθως ισχύει $p \geq 3$

Σκοπός του νόμου αυτού είναι να κατευθύνει τον αλγόριθμο σε λύσεις όπου περιλαμβάνουν μόνο στοιχεία με πυκνότητες $\rho_e = 0$ και $\rho_e = 1$, ώστε να είναι πιο ρεαλιστικά τα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.1.3 Διάγραμμα νόμου ποινής [6]

Καθώς μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας του κάθε στοιχείου αναλόγως μειώνεται και η στιβαρότητα του. Σύμφωνα με τη μέθοδο SIMP η ολική στιβαρότητα του υλικού ορίζεται από τη Σχέση 4.2.

$$K_{SIMP(p)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \rho_e^p] K_e \quad (4.2)$$

Όπου:

- K_e : το μητρώο στιβαρότητας για κάθε στοιχείο
- ρ_{\min} : η ελάχιστη πυκνότητα ρ_e για τα στοιχεία που δεν έχουν $\rho_e = 0$
- p : ο συντελεστής ποινής
- N : ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων στον σχεδιαστικό χώρο

Προκειμένου να επιτευχθεί μία δομή όσον το δυνατόν πιο στιβαρή με την ελάχιστη δυνατή χρήση υλικού, χρησιμοποιείται το μέγεθος Compliance (Ευκαμψία) ως μια συνάρτηση ελαχιστοποίησης (Σχέση 4.3). Το μέγεθος αυτό εκφράζει την ευκαμψία της δομής και απαιτείται για να αξιολογηθεί η απόδοση της δομής.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (4.3)$$

Όπου:

- $[u_e]$: το διάνυσμα μετατόπισης για κάθε στοιχείο
- $[K_e]$: το μητρώο στιβαρότητας για κάθε στοιχείο
- $\{\rho_e\}$: διάνυσμα που αποτελείται από τις πυκνότητες ρ_e για κάθε στοιχείο
- N : ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων στον σχεδιαστικό χώρο

Η ελαχιστοποίηση του Compliance αντιστοιχεί σε μεγιστοποίηση της στιβαρότητας του υλικού, καθώς χαμηλό Compliance δηλώνει μια πιο άκαμπτη δομή η οποία παρουσιάζει μικρές παραμορφώσεις υπό τα εφαρμοζόμενα φορτία. Οπότε, το μέγεθος αυτό θεωρείται ως κύριος δείκτης απόδοσης της τοπολογικής βελτιστοποίησης με τη μέθοδο SIMP.

Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας, πρέπει να τηρείται ο περιορισμός της μάζας στόχου σύμφωνα με τη Σχέση 4.4.

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{\text{target}} \quad (4.4)$$

Όπου:

- v_e : το διάνυσμα όγκου για κάθε στοιχείο
- M_{target} : η μάζα στόχου

Επίσης, ισχύει η Σχέση 4.5.

$$[K\{\rho_e\}] \{u\} = \{F\} \quad (4.5)$$

Όπου:

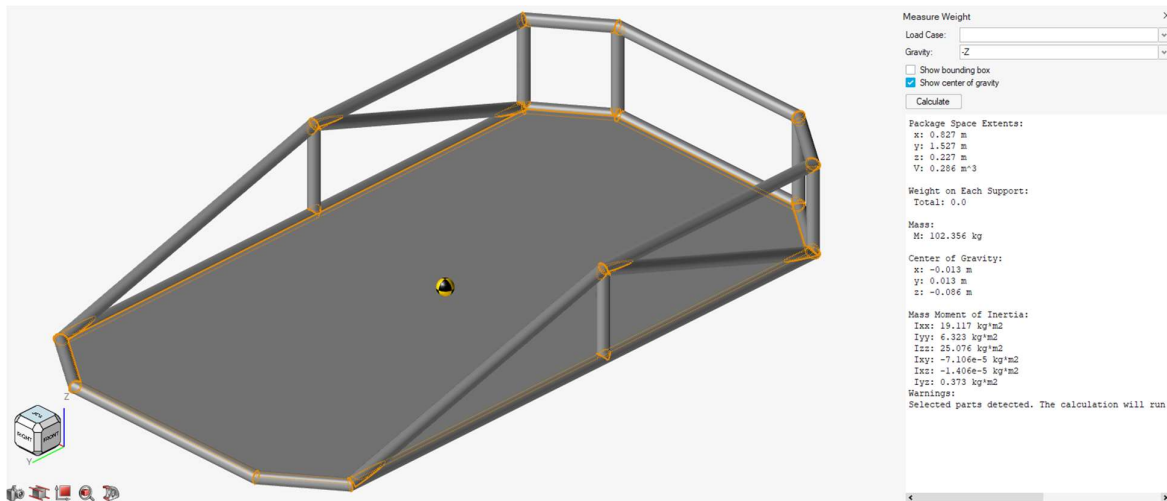
- $[K\{\rho_e\}]$: το μητρώο στιβαρότητας ανάλογο της πυκνότητας ρ_e
- $\{u\}$: το διάνυσμα μετατόπισης
- $\{F\}$: το διάνυσμα εξωτερικών δυνάμεων

Συμπερασματικά, η μέθοδος SIMP αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία τοπολογικής βελτιστοποίησης. Προσφέρει απλότητα και αποδοτικότητα καθώς είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή και μπορεί να αποδώσει γρήγορα με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα. Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλες εφαρμογές με διαφορετικούς περιορισμούς και φορτία, παρέχοντας σταθερά αποτελέσματα και συγκλίνοντας γρήγορα σε βέλτιστες λύσεις για διάφορες δομικές διατάξεις. Ακόμη, η μέθοδος SIMP εφαρμόζεται επαναληπτικά, βελτιώνοντας έτσι συνεχώς την κατανομή υλικού μέχρι τη βέλτιστη και προσαρμόζοντας σε μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ή νέα δεδομένα. Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου, είναι η ακριβής αναπαράσταση της βελτιστοποιημένης δομής του υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι ότι οι δομές που σχεδιάζονται είναι ρεαλιστικές και κατασκευάσιμες. [6],[7],[19]

4.2. Εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης στο σασί του kart

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την εφαρμογή τοπολογικής βελτιστοποίησης στο σασί του kart είναι το Inspire 2022 της Altair Engineering, με άδεια χρήσης που παρέχεται σε σπουδαστές. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τη μέθοδο SIMP και είναι μία από τις πιο αξιόπιστες επιλογές βελτιστοποίησης κατασκευών.

Αρχικά, εισάγεται στο λογισμικό η γεωμετρία που σχεδιάστηκε ως CAD αρχείο και επιλέγεται ως υλικό ολόκληρου του μοντέλου ο χάλυβας AISI 1018 από τη λίστα υλικών (Material Library). Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική μάζα του μοντέλου $M_{\sigma} = 102,35$ kg. (Εικόνα 4.2.1).



Εικόνα 4.2.1 Κέντρο βάρους

Για τους υπόλοιπους υπολογισμούς, εκτός από τη μάζα του σασί, θα πρέπει να συνυπολογιστούν και οι μάζες που συμβάλουν στο συνολικό βάρος του kart. Οπότε με βάση τα δεδομένα των αγωνιστικών kart υπολογίζονται προσεγγιστικά:

- $M_1 = 80$ kg : η μάζα του οδηγού
- $M_2 = 30$ kg : η μάζα του οπίσθιου συστήματος ανάρτησης-τροχών και του συστήματος κίνησης
- $M_3 = 10$ kg : η μάζα του εμπρόσθιου συστήματος ανάρτησης-τροχών

Οπότε, η συνολική μάζα του kart υπολογίζεται ως: $M_{\text{total}} = M_{\sigma} + M_1 + M_2 + M_3 = 222.35$ kg.

Προκειμένου να ξεκινήσει η βελτιστοποίηση της τοπολογίας του μοντέλου θα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες φόρτισης, οι οποίες είναι στατικές. Οπότε, για κάθε σενάριο φόρτισης που μελετάται, υπολογίζεται θεωρητικά η δύναμη που ασκείται στο σασί κατά τη χρονική στιγμή της πρόσκρουσης, η οποία εφαρμόζεται ως στατικό φορτίο.

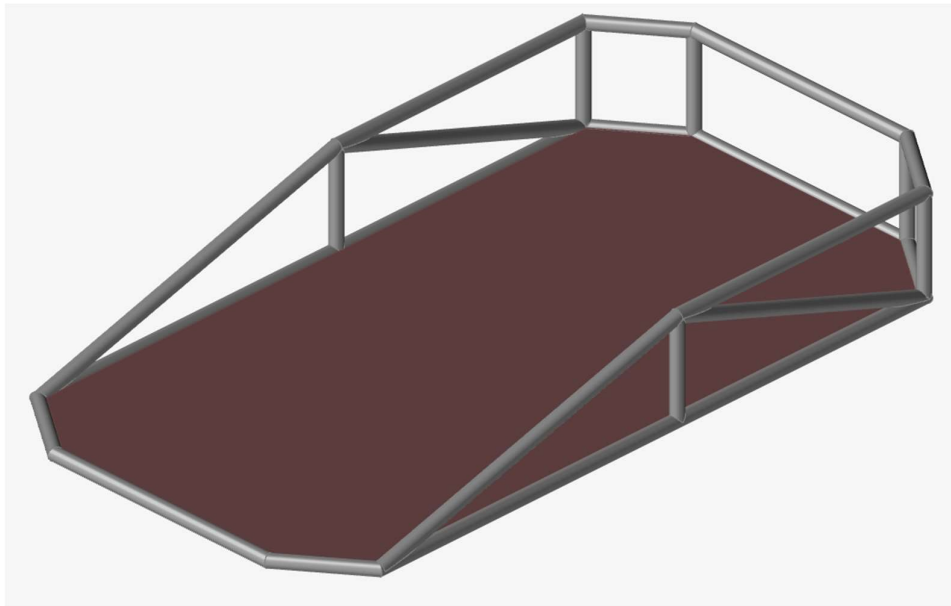
Για τον υπολογισμό αυτό, λαμβάνεται ότι ο χρόνος πρόσκρουσης είναι $t = 0.15 \text{ sec}$, δηλαδή ο χρόνος που η ταχύτητα του kart γίνεται στιγμιαία $v = 0$. Η ταχύτητα με την οποία προσκρούεται λαμβάνεται ως $u = 20 \text{ m/s}$. Οπότε, μέσω της Σχέσης 4.6 υπολογίζεται η επιτάχυνση πρόσκρουσης $a = 133.33 \text{ m/s}^2$. [8]

$$a = (u - v) / t \quad (4.6)$$

Με δεδομένη την επιτάχυνση a , υπολογίζεται η δύναμη πρόσκρουσης ως $F = 29645.92 \text{ N}$ μέσω του νόμου του Νεύτωνα (Σχέση 4.7), λαμβάνοντας ως μάζα την ολική μάζα του kart M_{total} όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

$$F = m \cdot a \quad (4.7)$$

Αφού έγιναν οι αρχικοί θεωρητικοί υπολογισμοί, ορίζεται ο χώρος σχεδίασης (Design Space) του μοντέλου (Εικόνα 4.2.2), στον οποίο θα πραγματοποιηθεί τοπολογική βελτιστοποίηση.



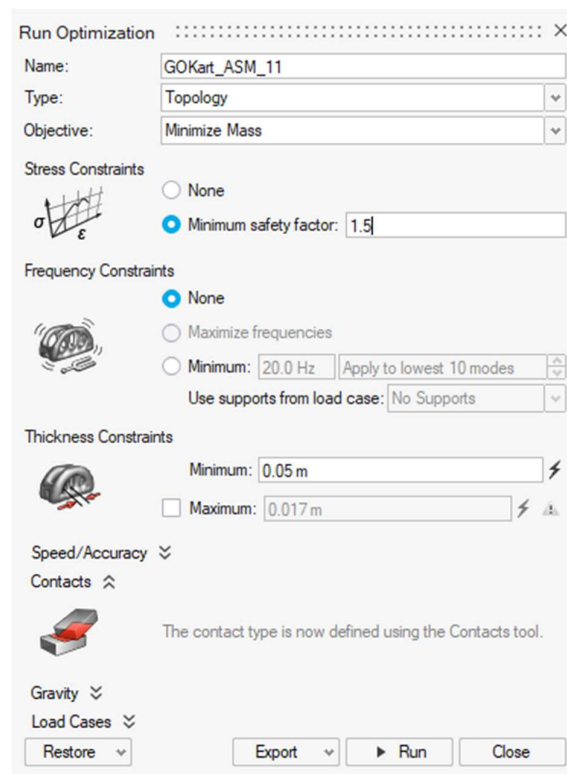
Εικόνα 4.2.2 Χώρος Σχεδιασμού

Στη συνέχεια, θα πρέπει να εφαρμοστούν τα στατικά φορτία που αντιστοιχούν στα φορτία που ασκούνται στο σασί υπό τα εξής σενάρια πρόσκρουσης:

- Εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση
- Οπίσθια μετωπική πρόσκρουση
- Δεξιά πλευρική πρόσκρουση
- Αριστερή πλευρική πρόσκρουση

Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η στατική δύναμη F εφαρμόζεται στο πλαίσιο του σασί και με κατεύθυνση αντίθετη από τη κατεύθυνση του kart τη στιγμή της πρόσκρουσης. Στον σχεδιαστικό χώρο δεν επιτρέπεται η επιβολή φορτίων. Σε κάθε σενάριο, η δύναμη F επιμερίζεται σε συνιστώσες, όπου είναι απαραίτητο, και εφαρμόζεται στις ράβδους του πλαισίου που έρχονται σε επαφή κατά τη πρόσκρουση. Σε κάθε ράβδο, κάθε συνιστώσα της F εφαρμόζεται ως ένα καταναμημένο φορτίο σε όλο το μήκος της ράβδου, και με κατεύθυνση τη κατεύθυνση της συνισταμένης F. Η στήριξη του μοντέλου γίνεται με πακτώσεις οι οποίες εφαρμόζονται στις ανάλογες ράβδους του πλαισίου για κάθε σενάριο, δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας, και θεωρείται ότι κάθε ράβδος συγκρατείται σε όλο το μήκος της. Οι δυνάμεις και οι στηρίξεις ορίζονται μέσω της εντολής Loads από τη καρτέλα Structure.

Αφού έχουν οριστεί οι συνθήκες φόρτισης σε κάθε σενάριο, μπορεί να ξεκινήσει η τοπολογική βελτιστοποίηση στο λογισμικό. Αρχικά, πρέπει να οριστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης προς επίλυση, μέσω της εντολής Optimize στη καρτέλα Structure (Εικόνα 4.2.3). Επιλέγεται ως τύπος βελτιστοποίησης η τοπολογική (Type: Topology) και ως στόχος η ελαχιστοποίηση της μάζας (Objective: Minimize Mass). Έπειτα, ορίζονται οι περιορισμοί για τη βελτιστοποίηση, ώστε να επιλυθεί με όσο το δυνατόν πιο επιθυμητά και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ως περιορισμός στις τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό ορίζεται ο συντελεστής ασφαλείας να μην υπερβαίνει την τιμή 1.5. Ως περιορισμός για το πάχος της γεωμετρίας που θα σχεδιάσει το λογισμικό, ορίζεται να μην είναι κατώτερο από 0.005 m. Τέλος, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης ως προς τα πιο ακριβή αποτελέσματα (Accuracy) και δίνεται η εντολή Run ώστε να ξεκινήσει η επίλυση.

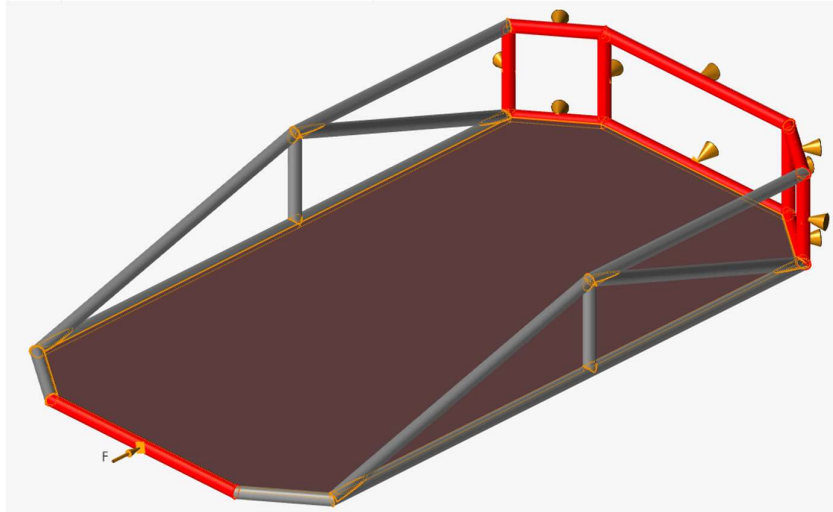


Εικόνα 4.2.3 Optimize-Structure-Inspire

4.2.1. Εφαρμογή στατικών φορτίων σε κάθε σενάριο πρόσκρουσης

I) Εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση

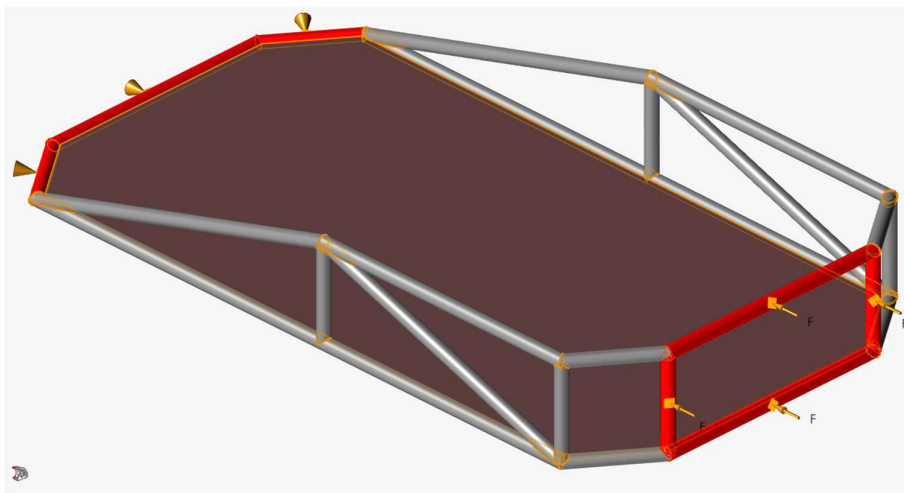
Σε αυτό το σενάριο πρόσκρουσης, η δύναμη F εφαρμόζεται εξολοκλήρου σε μία ράβδο του πλαισίου στο εμπρόσθιο τμήμα και πακτώνονται οι ράβδοι του οπίσθιου τμήματος.



Εικόνα 4.2.1.1 Συνθήκες εμπρόσθιας μετωπικής πρόσκρουσης

II) Οπίσθια μετωπική πρόσκρουση

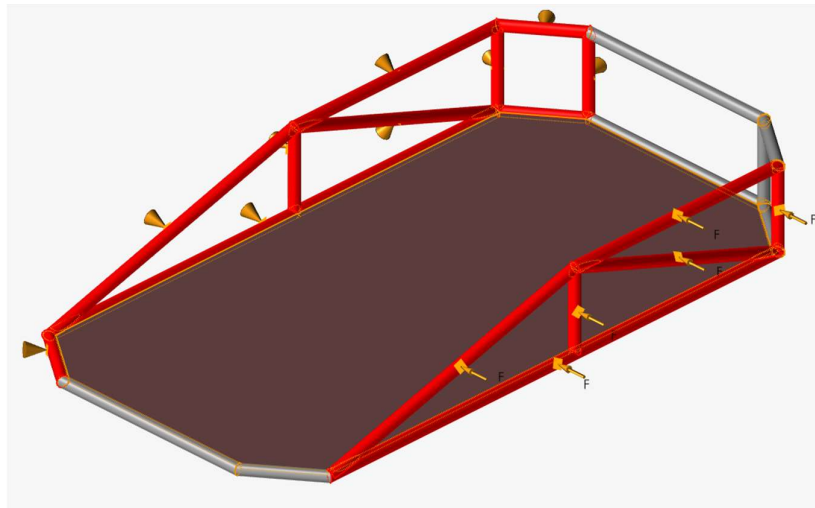
Σε αυτό το σενάριο πρόσκρουσης η δύναμη F εφαρμόζεται διαμοιρασμένη σε τέσσερις συνιστώσες στις τέσσερις ράβδους του οπίσθιου τμήματος του πλαισίου, παραλαμβάνοντας η κάθε μια $F/4 = 7411.48 \text{ N}$. Οι πακτώσεις εφαρμόζονται στις ράβδους του εμπρόσθιου μέρους.



Εικόνα 4.2.1.2 Συνθήκες οπίσθιας μετωπικής πρόσκρουσης

III) Αριστερή πλευρική πρόσκρουση

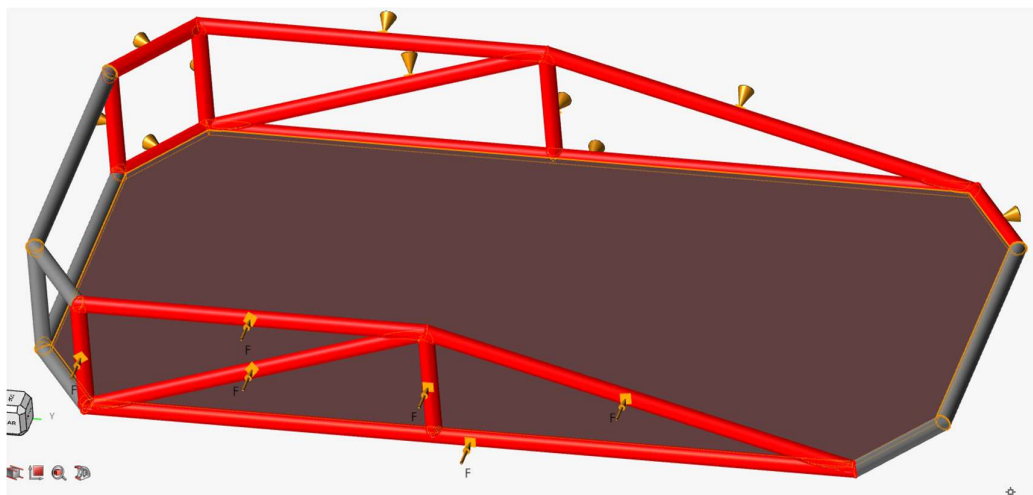
Σε αυτό το σενάριο πρόσκρουσης η δύναμη F εφαρμόζεται διαμοιρασμένη σε έξι συνιστώσες στις έξι ράβδους του αριστερού τμήματος του πλαισίου. Η μεγάλη ράβδος του κάτω μέρους παραλαμβάνει 9881.96 N, οι δύο μικρές κατακόρυφες ράβδοι 2470,49 N η κάθε μία, και οι υπόλοιπες τρεις ράβδοι από 4940,98 N η κάθε μία. Οι πακτώσεις εφαρμόζονται στις ράβδους του δεξιού τμήματος.



Εικόνα 4.2.1.3 Συνθήκες αριστερής πλευρικής πρόσκρουσης

IV) Δεξιά πλευρική πρόσκρουση

Σε αυτό το σενάριο πρόσκρουσης η δύναμη πρόσκρουσης F και οι πακτώσεις ορίζονται αντιστοίχως με το σενάριο III καθώς το μοντέλο είναι συμμετρικό.

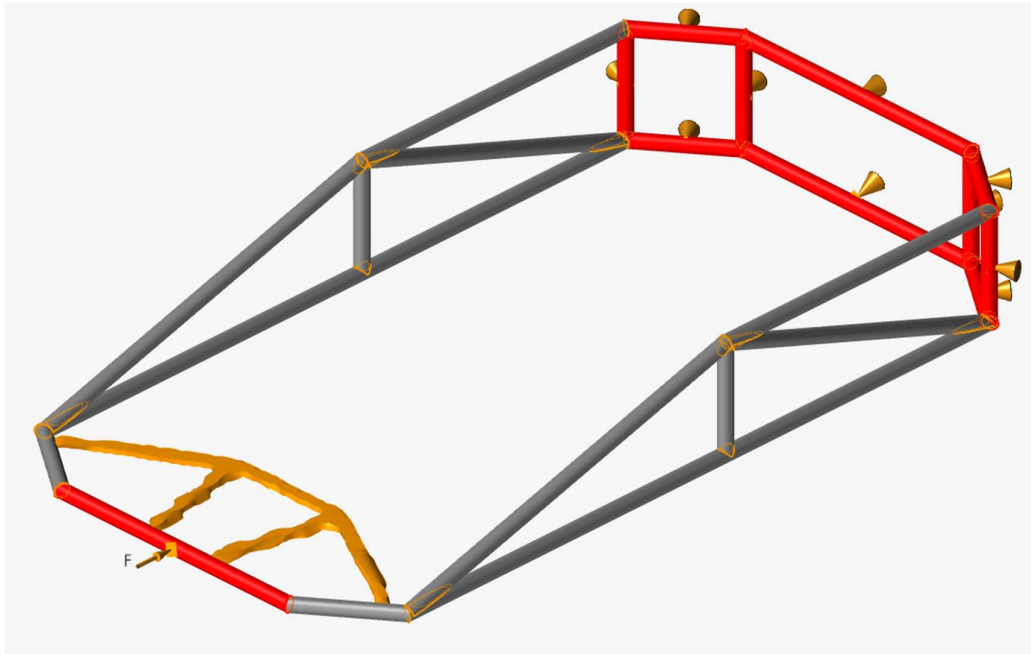


Εικόνα 4.2.1.4 Συνθήκες δεξιάς πλευρικής πρόσκρουσης

4.3. Αποτελέσματα τοπολογικής βελτιστοποίησης

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης για κάθε σενάριο πρόσκρουσης.

I) Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης υπό φορτίο εμπρόσθιας μετωπικής πρόσκρουσης

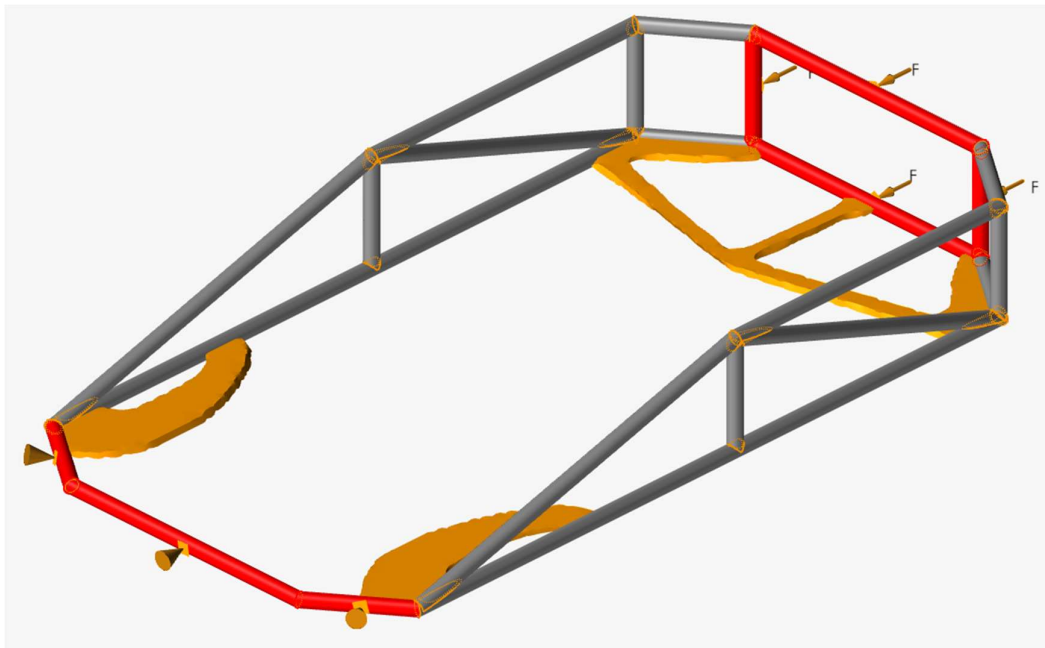


Εικόνα 4.3.1 Βελτιστοποιημένη γεωμετρία σεναρίου I

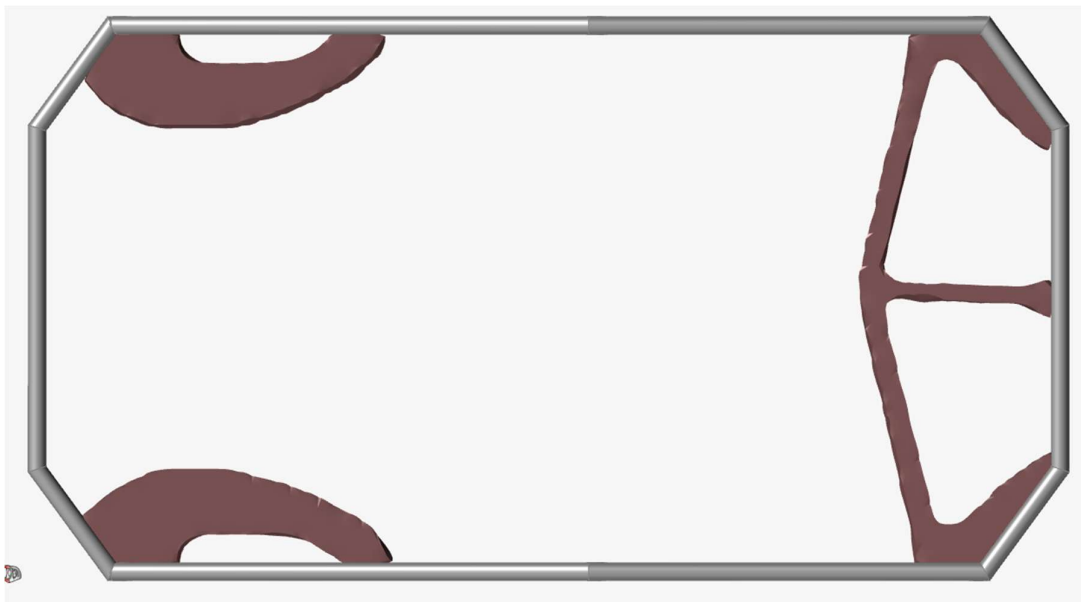


Εικόνα 4.3.2 Άνοψη βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σεναρίου I

II) Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης υπό φορτίο οπίσθιας μετωπικής πρόσκρουσης

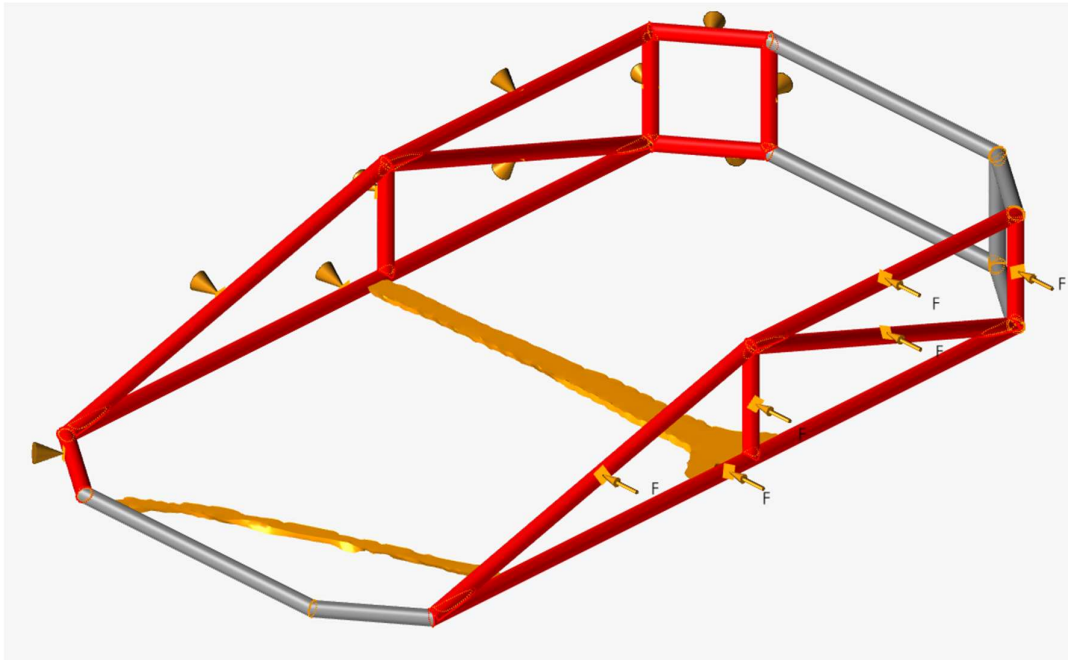


Εικόνα 4.3.3 Βελτιστοποιημένη γεωμετρία σεναρίου II

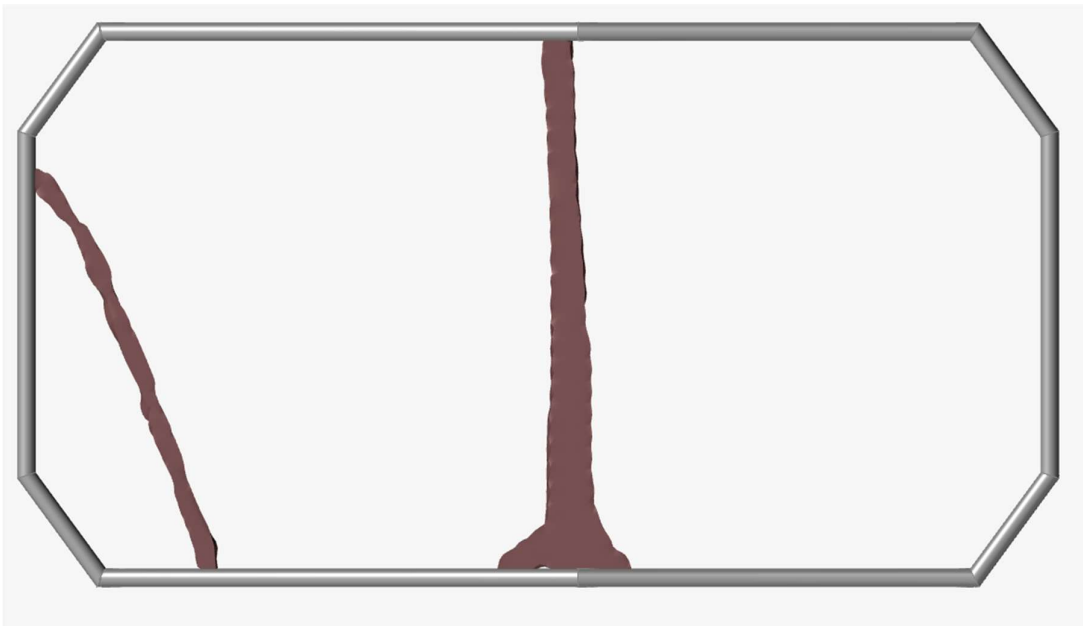


Εικόνα 4.3.4 Άνοψη βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σεναρίου II

III) Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης υπό φορτίο αριστερής πλευρικής πρόσκρουσης

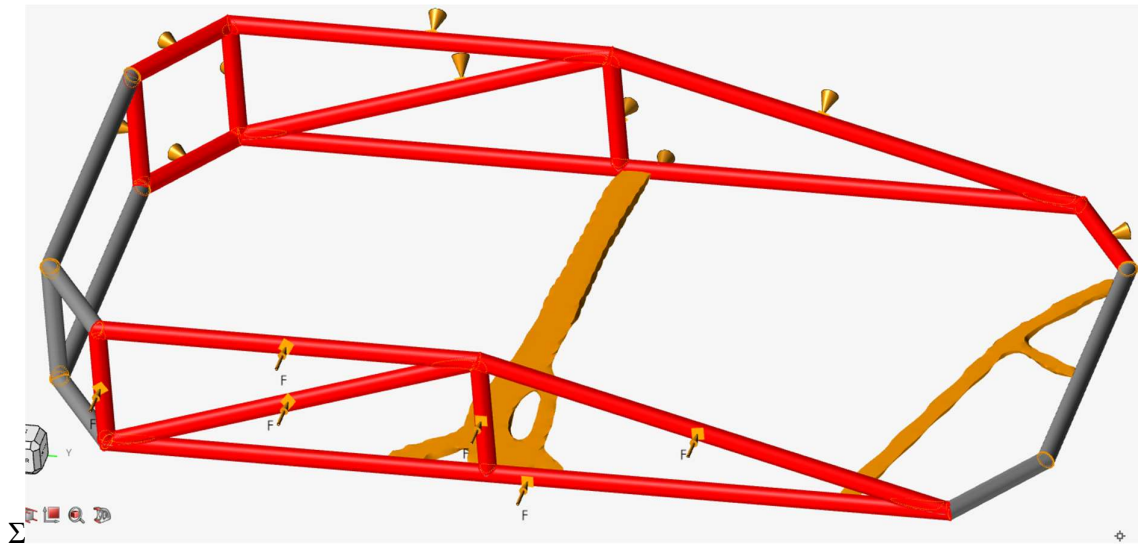


Εικόνα 4.3.5 Βελτιστοποιημένη γεωμετρία σεναρίου III

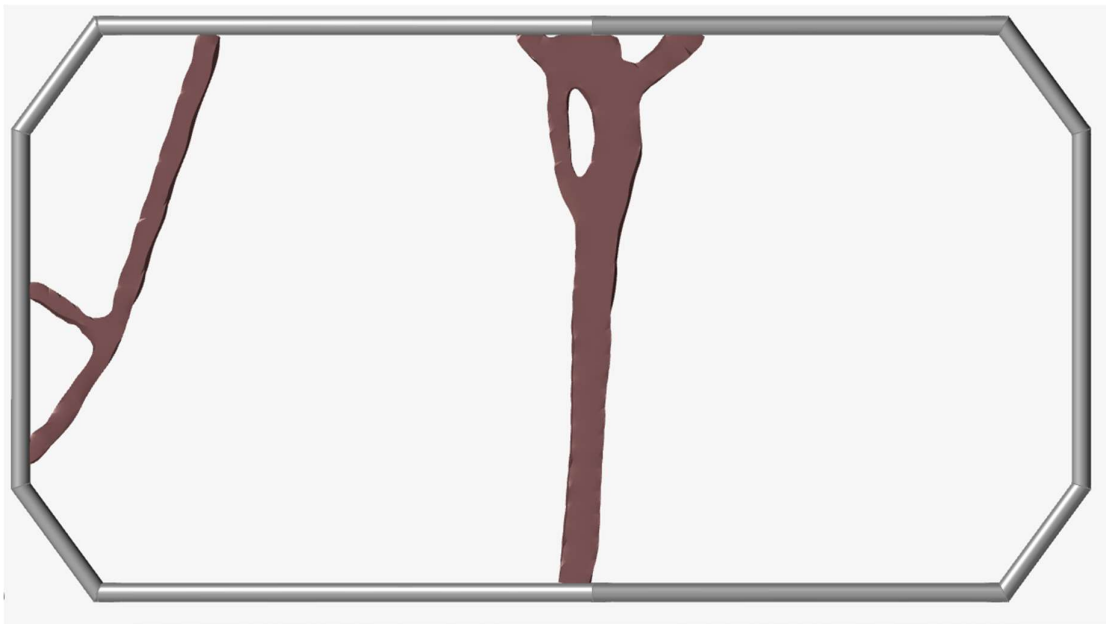


Εικόνα 4.3.6 Άνοψη βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σεναρίου III

IV) Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης υπό φορτίο δεξιάς πλευρικής πρόσκρουσης



Εικόνα 4.3.7 Βελτιστοποιημένη γεωμετρία σεναρίου IV

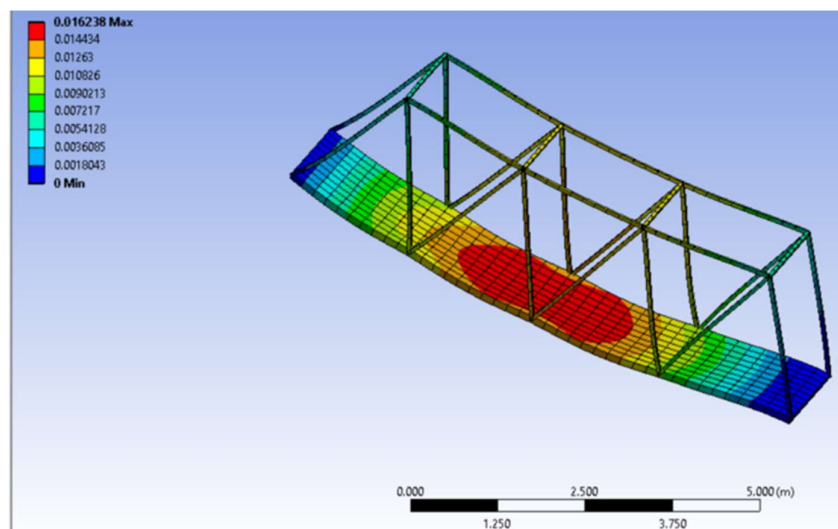


Εικόνα 4.3.8 Άνοψη βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σεναρίου IV

4.4. Στατική ανάλυση

Η στατική ανάλυση στις κατασκευές είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι δυνάμεις, οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται σε μια κατασκευή υπό την επίδραση διάφορων φορτίων. Αυτός ο τύπος ανάλυσης πραγματοποιεί υπολογισμούς που δεν επηρεάζονται από τη μεταβολή του χρόνου επιτρέποντας να ελεγχθεί εάν η κατασκευή παραμορφώνεται με ανεπιθύμητο τρόπο και εάν υπάρχουν σημεία στη γεωμετρία με κρίσιμες τάσεις. Είναι ένα κρίσιμο βήμα στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των κατασκευών, επιτρέποντας στους μηχανικούς να προβλέπουν την απόκριση της κατασκευής υπό διάφορες συνθήκες και να εξασφαλίζουν την ασφάλεια και την αντοχή της.

Η διαδικασία της στατικής ανάλυσης ορίζεται από τους μηχανικούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα και σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία που βασίζονται σε αρχές μαθηματικών και μηχανικής αντοχής των υλικών. Πριν ξεκινήσει η επίλυση, εισάγεται στο λογισμικό η γεωμετρία που αποτελείται από όλα τα δομικά στοιχεία και τις διαστάσεις της κατασκευής, και επιλέγεται το υλικό προσδιορίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του. Έπειτα, πρέπει να οριστούν τα εξωτερικά φορτία που εφαρμόζονται στη κατασκευή και να καθοριστούν οι συνθήκες φόρτισης υπό τις οποίες ασκούνται τα φορτία, συμπεριλαμβανομένων του τρόπου και των σημείων εφαρμογής. Επίσης, πρέπει να οριστούν οι οριακές συνθήκες, εφαρμόζοντας στηρίξεις και συνδέσεις μεταξύ των δομικών στοιχείων, προσδιορίζοντας έτσι τους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε σημείο. Αφού έχουν οριστεί όλοι οι αρχικοί παράμετροι, γίνεται η διακριτοποίηση (Meshing) του μοντέλου εφαρμόζοντας ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για την ευκολότερη επίλυση των εξισώσεων. Η επίλυση γίνεται με χρήση αριθμητικών μεθόδων (Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων-FEM) προσδιορίζοντας έτσι τις εσωτερικές δυνάμεις, τις τάσεις και παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται αποτελούνται από ποσοτικά αριθμητικά αποτελέσματα και γραφικά απεικόνισης της συμπεριφοράς της κατασκευής υπό τα εφαρμοζόμενα φορτία.

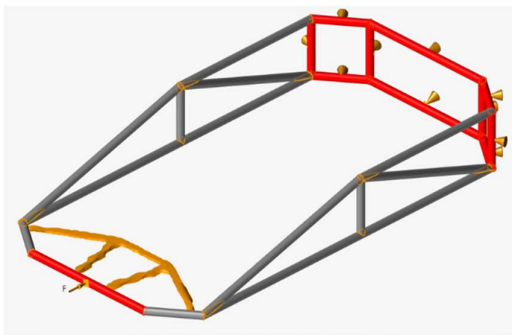


Εικόνα 4.4.1 Παράδειγμα στατικής ανάλυσης σε γέφυρα

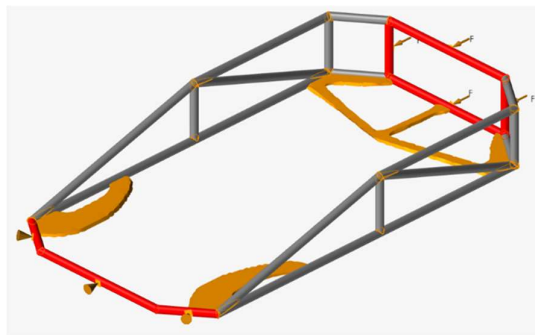
Οι στατικές αναλύσεις που θα μελετηθούν στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιούνται στην σχεδιασμένη γεωμετρία του kart από το λογισμικό έπειτα από την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Σκοπός των αναλύσεων αυτών είναι η προκαταρκτική αξιολόγηση του αποτελέσματος της βελτιστοποίησης, για κάθε σενάριο πρόσκρουσης. Οι αναλύσεις θα λάβουν χώρα στο περιβάλλον του Inspire με τις ίδιες συνθήκες φόρτισης που περιεγράφηκαν στα κεφάλαια 4.2 και 4.2.1, υπολογίζοντας όμως εκ νέου τη δύναμη πρόσκρουσης F (Σχέση 4.7) ανάλογα με το νέο βελτιστοποιημένο βάρος του σασί (M_{σ}).

Οι υπολογισμοί γίνονται ως εξής:

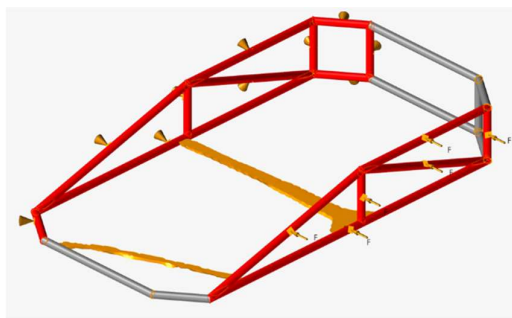
- Σενάριο I : $M_{\sigma} = 12.73 \text{ kg}$, $M_{\text{total}} = 132.73 \text{ kg}$, $F = 17696.89 \text{ N}$
- Σενάριο II : $M_{\sigma} = 14.21 \text{ kg}$, $M_{\text{total}} = 134.21 \text{ kg}$, $F = 17894.21 \text{ N}$
- Σενάριο III : $M_{\sigma} = 13.15 \text{ kg}$, $M_{\text{total}} = 133.15 \text{ kg}$, $F = 17752.88 \text{ N}$
- Σενάριο IV : $M_{\sigma} = 13.87 \text{ kg}$, $M_{\text{total}} = 133.87 \text{ kg}$, $F = 17848.88 \text{ N}$



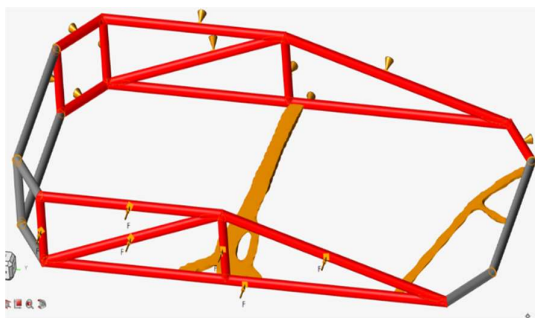
Εικόνα 4.4.2 Σενάριο I



Εικόνα 4.4.3 Σενάριο II



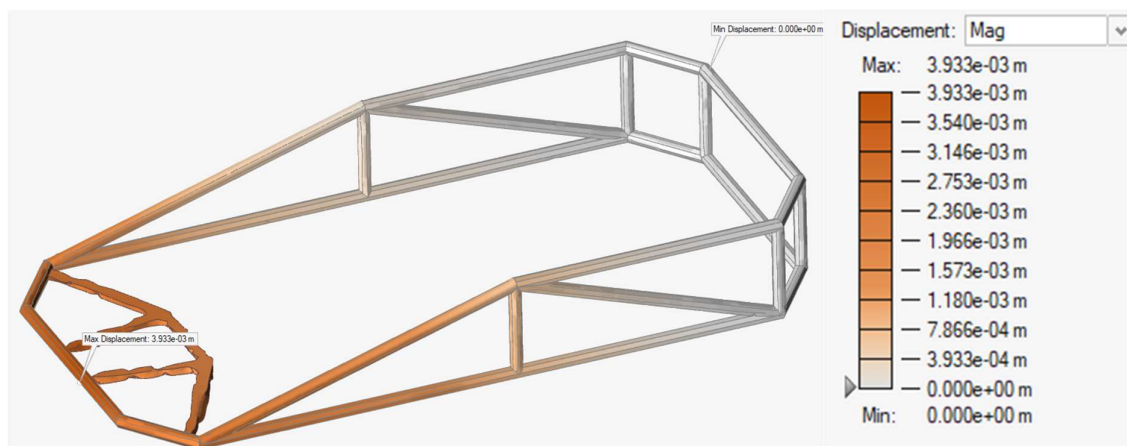
Εικόνα 4.4.4 Σενάριο III



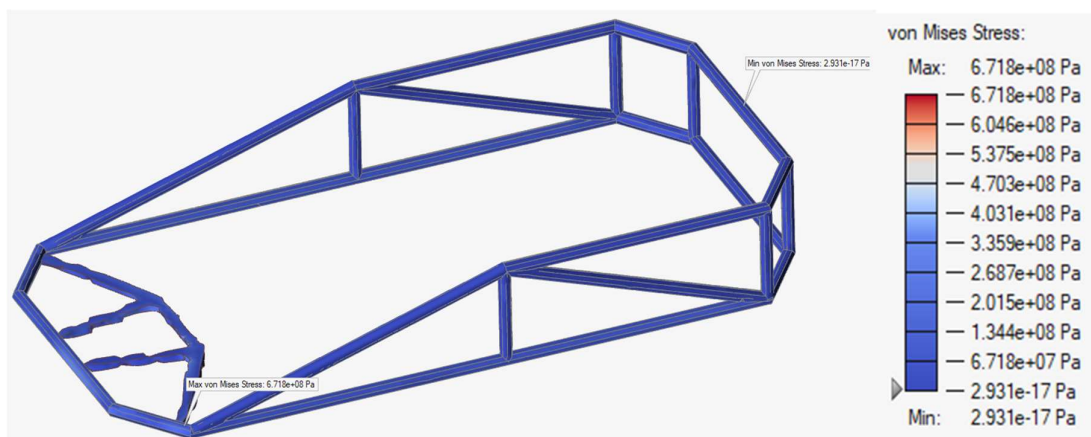
Εικόνα 4.4.5 Σενάριο IV

Αφού καθορίστηκαν οι νέες τιμές των φορτίων και οι συνθήκες φόρτισης, μπορεί να ξεκινήσει η επίλυση. Από τη καρτέλα Structure δίνεται η εντολή Analyze και χρησιμοποιείται ο επιλυτής OptiStruct. Επιλέγεται το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος που θα δημιουργηθεί (Element size) ως 0.005 m και η επιλογή των πιο ακριβή αποτελεσμάτων (Accuracy). Τα αποτελέσματα που θα αξιολογηθούν είναι οι μετατοπίσεις της γεωμετρίας, οι τάσεις Von Mises και το ποσοστό διαρροής του υλικού, έτσι ώστε να διερευνηθεί εάν και σε ποια σημεία υπάρχει κίνδυνος αστοχίας.[9]

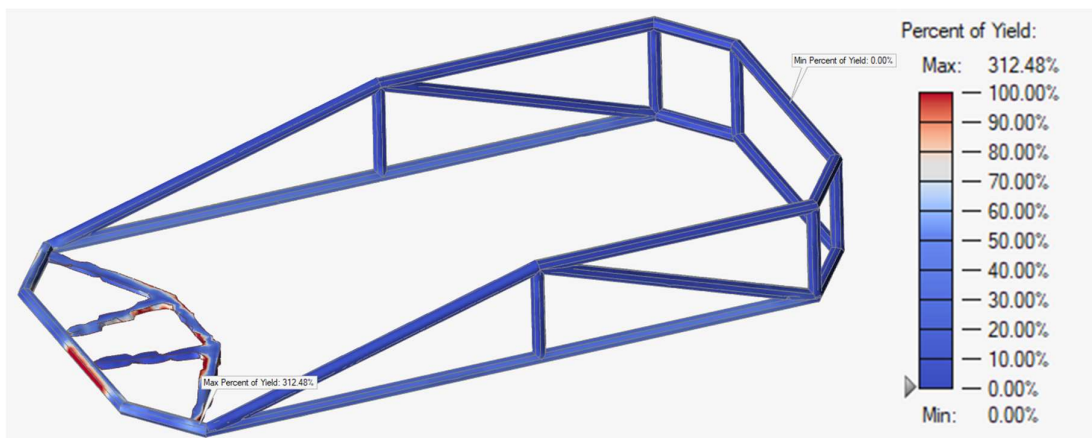
Αποτελέσματα σεναρίου πρόσκρουσης I



Εικόνα 4.4.6 Μετατοπίσεις I

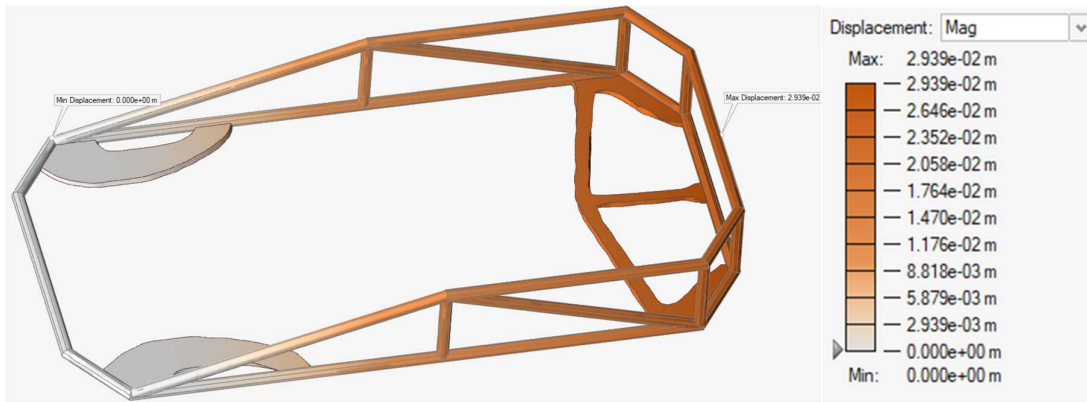


Εικόνα 4.4.7 Τάσεις Von Mises I

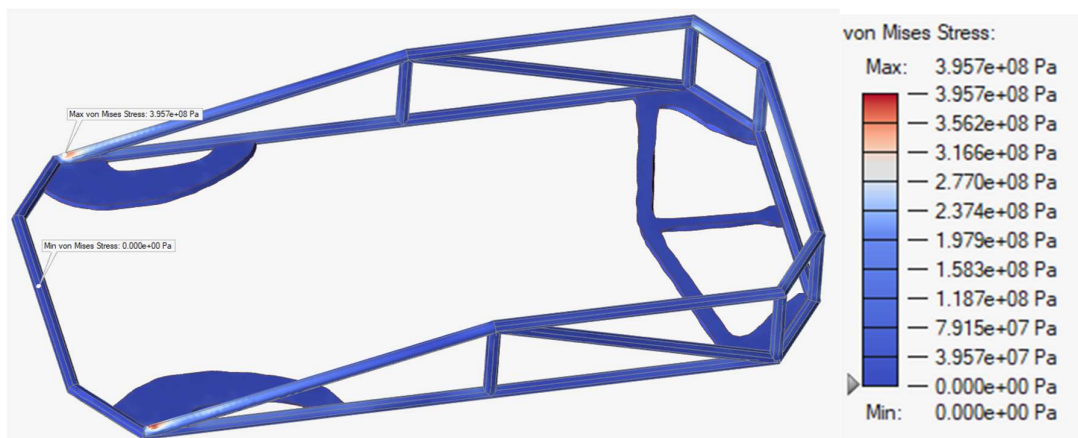


Εικόνα 4.4.8 Ποσοστό διαρροής I

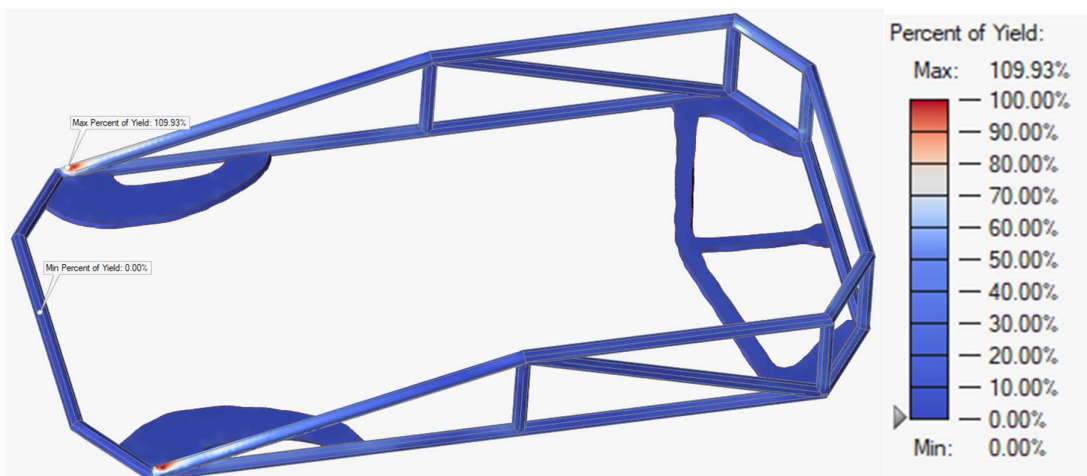
Αποτελέσματα σεναρίου πρόσκρουσης II



Εικόνα 4.4.9 Μετατοπίσεις II

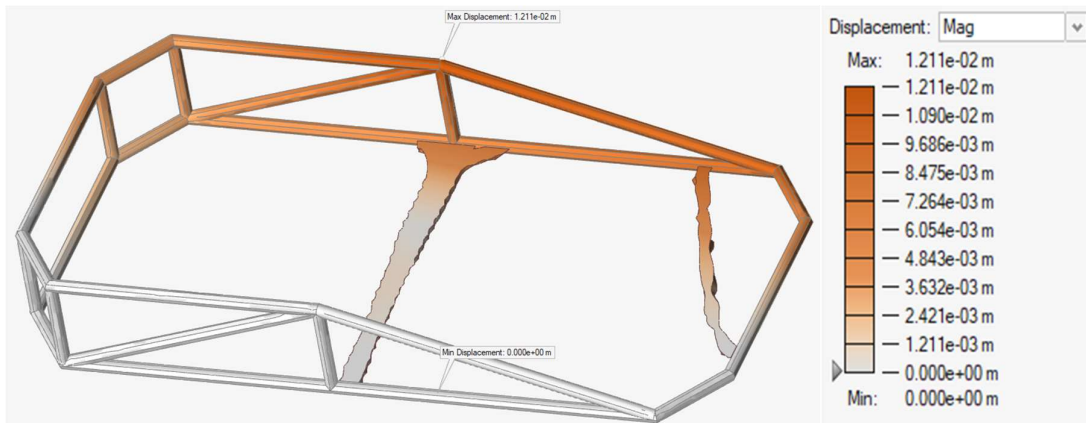


Εικόνα 4.4.10 Τάσεις Von Mises II

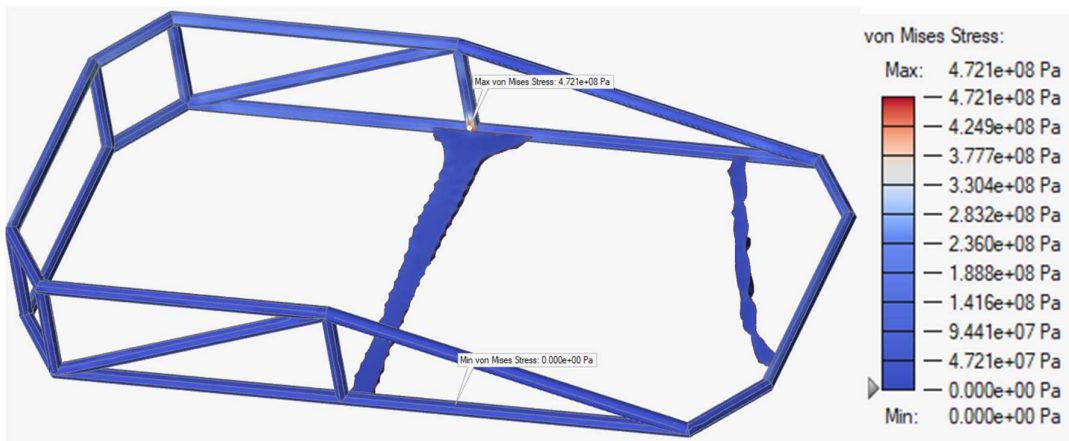


Εικόνα 4.4.11 Ποσοστό διαρροής II

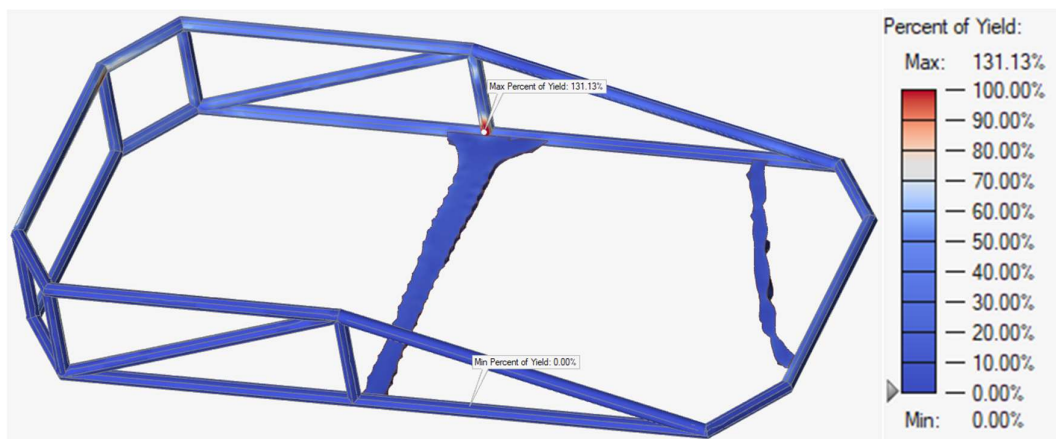
Αποτελέσματα σεναρίου πρόσκρουσης III



Εικόνα 4.4.12 Μετατοπίσεις III

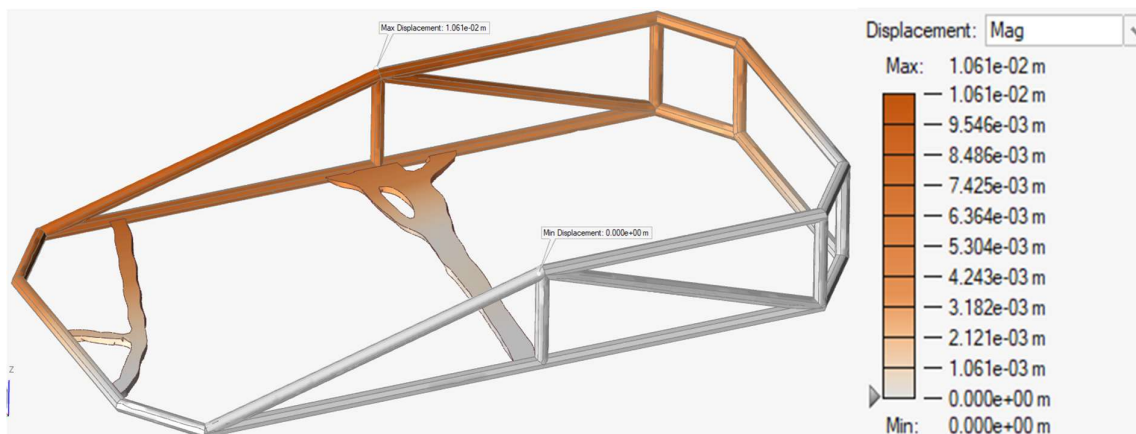


Εικόνα 4.4.13 Τάσεις Von Mises III

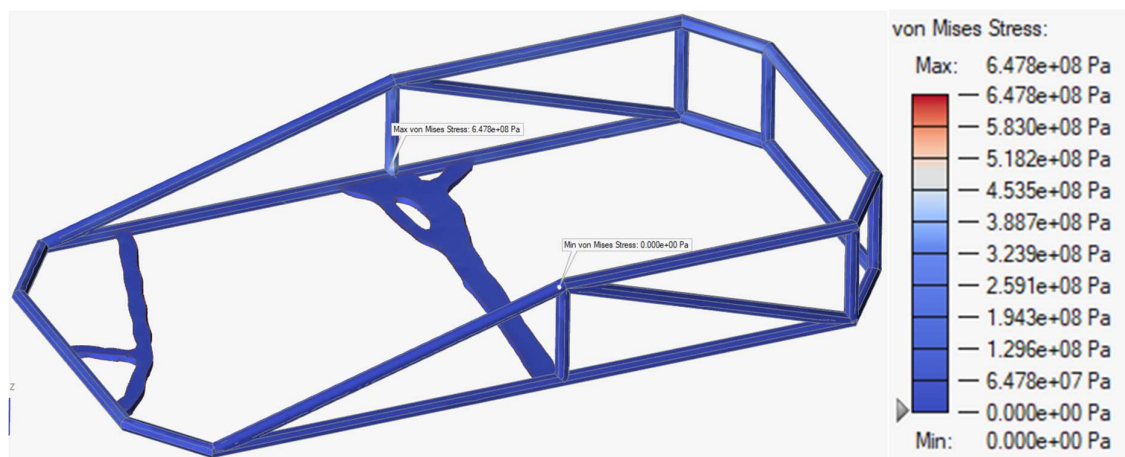


Εικόνα 4.4.14 Ποσοστό διαρροής III

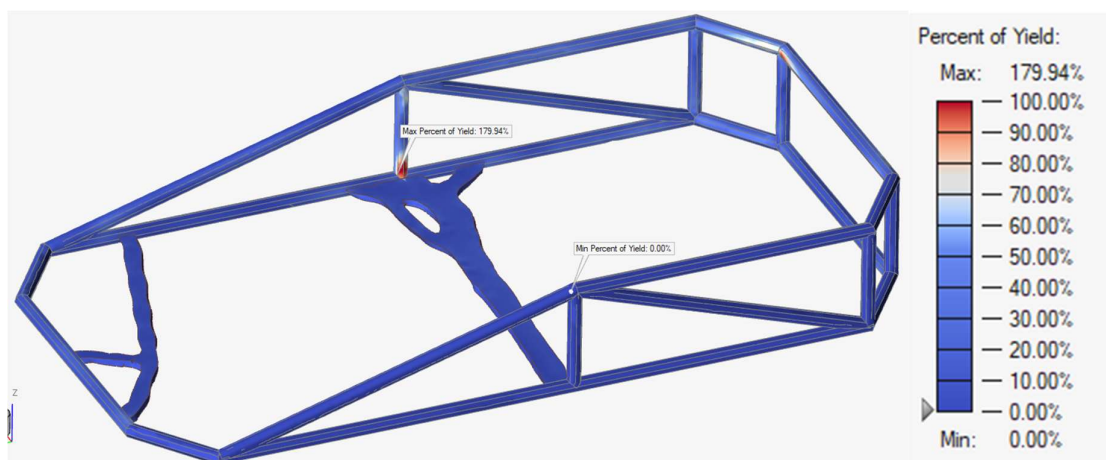
Αποτελέσματα σεναρίου πρόσκρουσης IV



Εικόνα 4.4.15 Μετατοπίσεις IV



Εικόνα 4.4.16 Τάσεις Von Mises IV

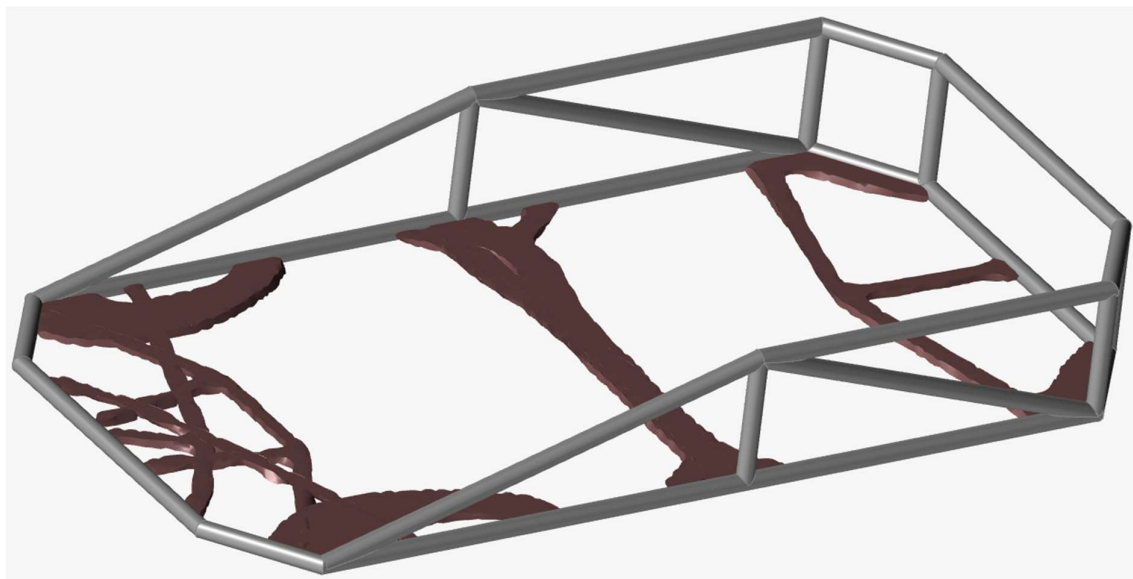


Εικόνα 4.4.17 Ποσοστό διαρροής IV

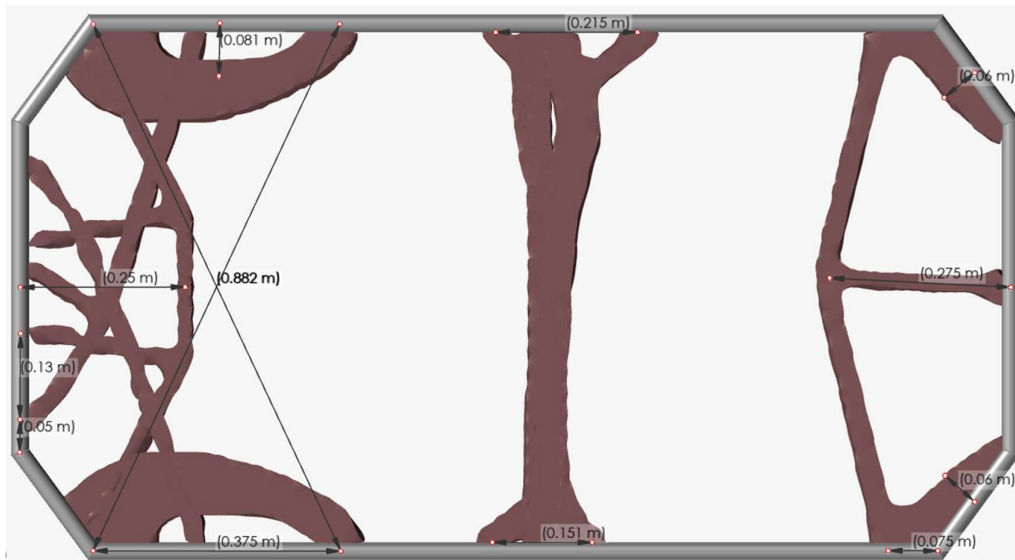
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, στο μεγαλύτερο ποσοστό της γεωμετρίας οι τάσεις κυμαίνονται κάτω ή και στη περιοχή του ορίου διαρροής, εκτός από κάποια σημεία. Σε αυτά τα σημεία υπάρχει αρκετά μεγάλη συγκέντρωση τάσεων επειδή παραβιάζεται ο περιορισμός της βελτιστοποίησης λόγω κάποιου σφάλματος και η νέα τοπολογία του μοντέλου δεν δημιουργείται σωστά τοπικά σε αυτά τα σημεία. Επίσης, ένας λόγος που εμφανίζονται αυτές οι τάσεις μπορεί να είναι η έλλειψη υλικού στη διεύθυνση y στον χώρο σχεδιασμού, καθώς ο αλγόριθμος δεν έχει τη δυνατότητα να προσθέσει επιπλέον υλικό, όπως στο σημείο μέγιστης τάσης στη περίπτωση πρόσκρουσης IV (Εικόνα 4.4.16). Συνεπώς, η νέα βελτιστοποιημένη τοπολογία, συμπεριλαμβανομένου του λόγου της πολυπλοκότητας του σχήματος της, δεν επιτρέπει την κατασκευή της με τις συγκεκριμένες διαστάσεις. Οπότε, θα πρέπει να τροποποιηθεί και να επανασχεδιαστεί με γνώμονα τη κατεύθυνση του υλικού και τα σημεία στα οποία είναι απαραίτητη η στήριξη του πλαισίου του σασί.

4.5. Επανασχεδιασμός μοντέλου

Προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία επανασχεδιασμού, πρέπει να σχηματιστεί το μοντέλο το οποίο είναι βέλτιστο τοπολογικά, λαμβάνοντας υπόψη όμως και τα τέσσερα σενάρια πρόσκρουσης. Οπότε, πρέπει να σχηματιστεί το μοντέλο το οποίο θεωρητικά αντέχει τις καταπονήσεις από κάθε σενάριο πρόσκρουσης. Αυτό αρχικά πραγματοποιείται με την ένωση των τεσσάρων τοπολογικά βελτιστοποιημένων σχεδιαστικών χώρων σε ένα μοντέλο (Εικόνα 4.5.1). Αξιολογώντας το αποτέλεσμα, παρατηρούνται τα σημεία στα οποία είναι απαραίτητη η ύπαρξη υλικού και υπολογίζονται οι διαστάσεις, μέσω της εντολής Measure στο περιβάλλον του Inspire (Εικόνα 4.5.2).

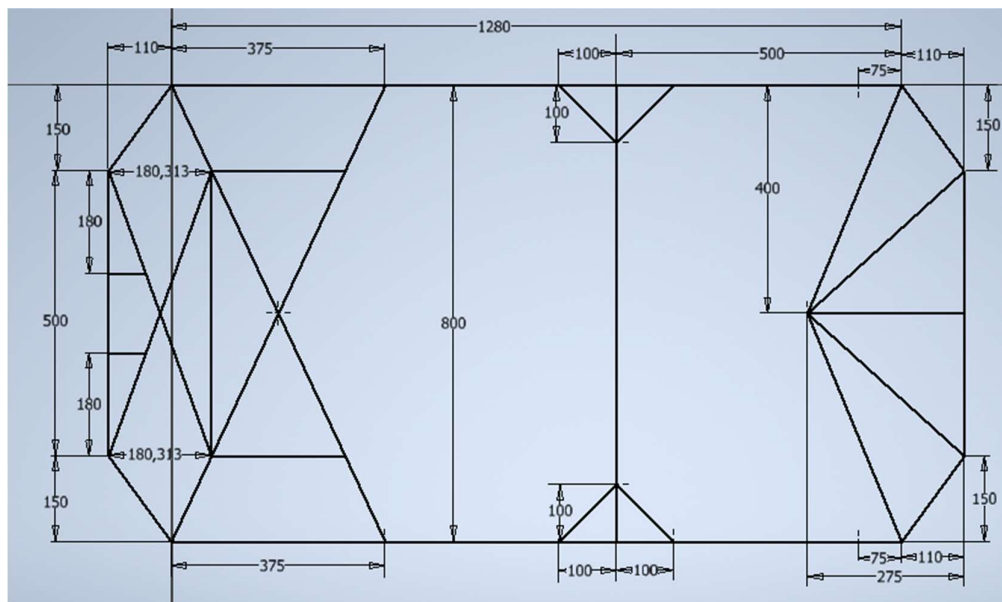


Εικόνα 4.5.1 Ενοποιημένη βέλτιστη τοπολογία

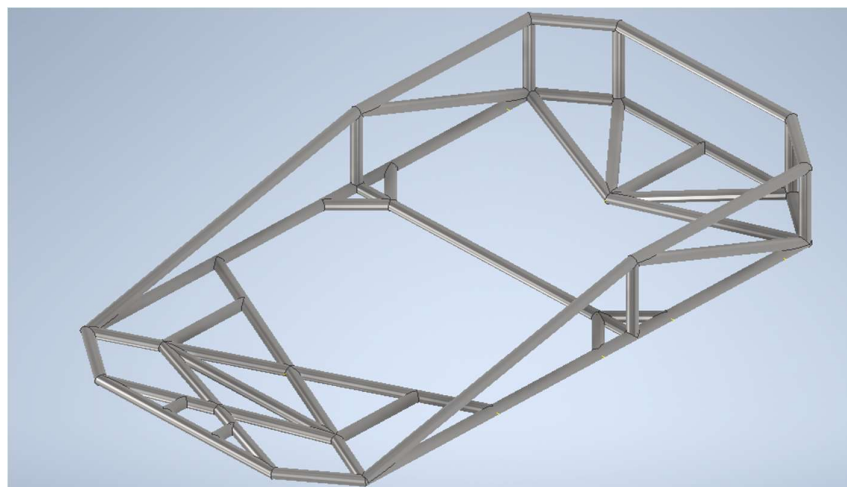


Εικόνα 4.5.2 Άνοψη βέλτιστης τοπολογίας – Διαστάσεις

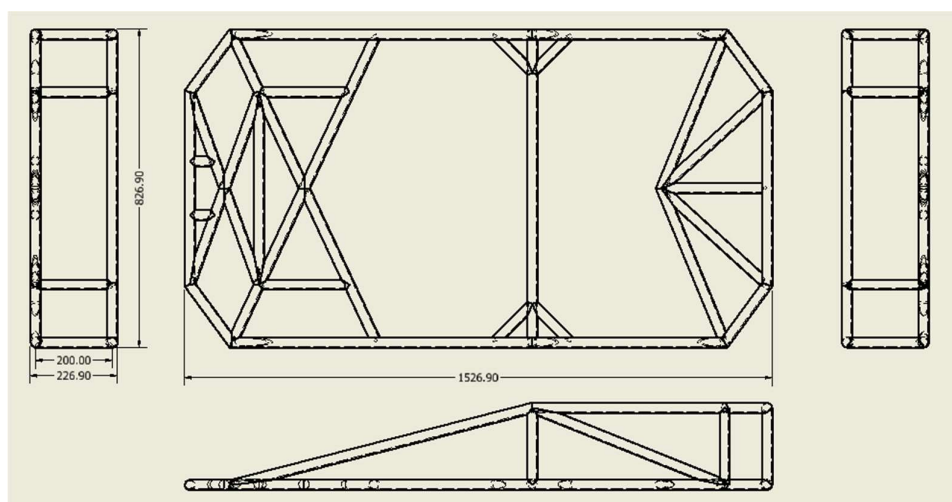
Με βάση τη γεωμετρία και τις διαστάσεις της Εικόνας 4.5.2, γίνεται η προσέγγιση επανασχεδιασμού του μοντέλου στο λογισμικό Inventor. Για την πιο ομοιόμορφη απόδοση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας στο νέο μοντέλο θα τροποποιηθούν σε ένα μικρό βαθμό οι διαστάσεις και τα σημεία τομής του υλικού, έτσι ώστε να μην δημιουργείται ανεπιθύμητη συσσώρευση τάσεων αλλά και να υπάρχει συμμετρία. Ο τρόπος με τον οποίο θα σχεδιαστεί είναι με τη προσθήκη των τυποποιημένων σωλήνων (ISO 10799-2/26.9mm/2.5mm) που χρησιμοποιήθηκαν και το πλαίσιο. Αρχικά, σχεδιάζονται οι νέες διαστάσεις (Εικόνα 4.5.3) και έπειτα σχεδιάζεται το στερεό με τη χρήση της εντολής Frame Generator (Εικόνα 4.5.4).



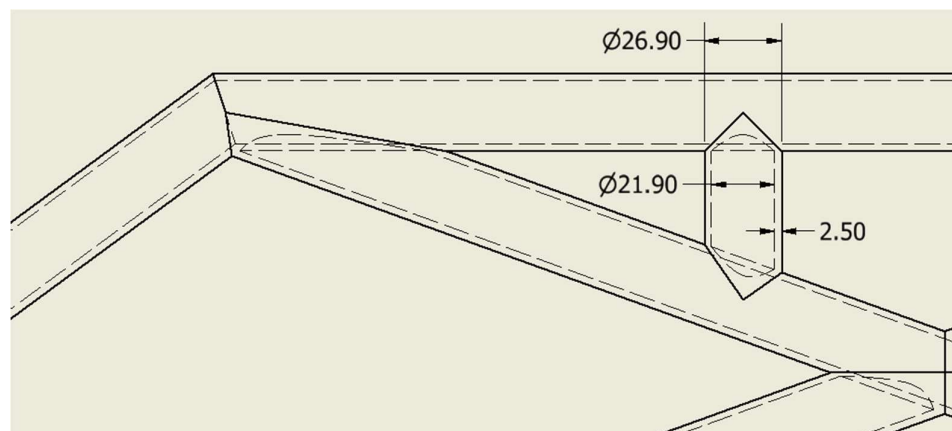
Εικόνα 4.5.3 Τροποποιημένες διαστάσεις-Άνοψη



Εικόνα 4.5.4 Τρισδιάστατη όψη μοντέλου



Εικόνα 4.5.5 Όψεις μηχανολογικού σχεδίου



Εικόνα 4.5.6 Διαστάσεις σωλήνων

5. Δυναμική ανάλυση πρόσκρουσης

Η δυναμική ανάλυση στις κατασκευές είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να μελετηθεί η αντίδραση των κατασκευών υπό δυναμικές φορτίσεις, όπως σεισμοί, άνεμοι, εκρήξεις, ή κρούσεις. Σε αντίθεση με τη στατική ανάλυση, όπου οι φορτίσεις θεωρούνται σταθερές ή αργά μεταβαλλόμενες, η δυναμική ανάλυση λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ του χρόνου, της μάζας, της στιβαρότητας και της απόσβεσης της κατασκευής. Αυτό αποτυπώνεται από τη δυναμική εξίσωση κίνησης (Σχέση 5.1).

$$f(t) = m\ddot{u} + c\dot{u} + ku \quad (5.1)$$

Όπου:

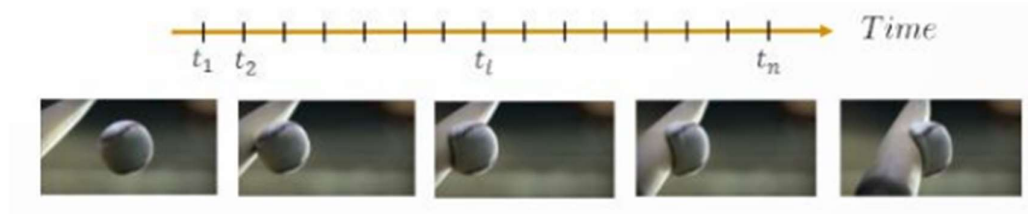
- f : το φορτίο συναρτήσει του χρόνου t
- m : η μάζα
- \ddot{u} : η επιτάχυνση
- c : η απόσβεση
- \dot{u} : η ταχύτητα
- k : η στιβαρότητα
- u : η μετατόπιση.

Το μέγεθος $m\ddot{u}$ εκφράζει τη κινητική ενέργεια (Αδράνεια), το $c\dot{u}$ την ενέργεια που διαχέεται (Απόσβεση) και το ku τη δυναμική ενέργεια (Στιβαρότητα). Σε περίπτωση που δεν ληφθεί υπόψη η απόσβεση και η στιβαρότητα, η Σχέση 5.1 παίρνει τη μορφή της εξίσωσης του νόμου του Νεύτωνα: $f(t) = m\ddot{u}$.

Ως αδράνεια ορίζεται η αντίσταση ενός σώματος σε οποιαδήποτε αλλαγή της ταχύτητας του και είναι μια ιδιότητα του υλικού να παραμένει σε κατάσταση ηρεμίας ή ομοιόμορφης κίνησης, αποθηκεύοντας κινητική ενέργεια. Στις δοκιμές προσκρούσεων, είναι ανάγκη ο υπολογισμός της αδράνειας των επιβατών για την πρόληψη των τραυματισμών. Με τον όρο στιβαρότητα εκφράζεται η σκληρότητα ενός υλικού και η δυσκολία στη παραμόρφωση του. Εάν το υλικό που μελετάται είναι μη παραμορφώσιμο τότε η Σχέση 5.1 παίρνει τη μορφή $f(t)=m\ddot{u}+c\dot{u}$ και πρόκειται για δυναμική άκαμπτου σώματος. Η απόσβεση συμβάλλει σε ένα δυναμικό σύστημα στο να μειώσει την ενέργεια του υπό τον περιορισμό της ταλάντωσης.

Ωστόσο, ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη δυναμική ανάλυση είναι ο χρόνος και ασκεί επιρροή σε κάθε περίπτωση φόρτισης. Έχει τη δυνατότητα να διαιρεθεί σε απεριόριστα χρονικά μέρη συμβάλλοντας έτσι στην αποδοτικότερη μελέτη της συμπεριφοράς κάποιας κατασκευής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα από τις αναλύσεις σε κάθε χρονικό φάσμα απαιτείται πολλαπλή επίλυση της Σχέσης 5.1, το οποίο είναι εξαιρετικά χρονοβόρο.

Προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί, ο χρόνος διαιρείται σε ένα αριθμό χρονικών βημάτων ώστε να μελετηθεί η ανάλυση σε κάθε χρονική στιγμή. Όσο πιο μικρό είναι το χρονικό βήμα που εφαρμόζεται τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.1 Χρονικός βηματισμός

Υπάρχουν δύο κατηγορίες για τον καταμερισμό του χρόνου, η Implicit μέθοδος και η Explicit, και η επιλογή τους γίνεται με βάση το είδος φόρτισης της κατασκευής, την ακρίβεια και τα υπολογιστικά χαρακτηριστικά. Η Implicit ανάλυση επιλέγεται όταν οι συνθήκες φόρτισης της κατασκευής απαιτούν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (≥ 1 sec) χωρίς απότομες εναλλαγές, και έτσι ο χρόνος μπορεί να διαιρεθεί σε μεγαλύτερα βήματα. Η Explicit ανάλυση επιλέγεται για συνθήκες φόρτισης στις οποίες η κατασκευή καταπονείται δυναμικά άμεσα (≤ 1 sec). Το χρονικό βήμα που εφαρμόζεται σε αυτή τη περίπτωση είναι πολύ μικρότερο ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να είναι ακριβέστερα και να μελετηθεί πιο έγκυρα η ταχεία εναλλασσόμενη συμπεριφορά της κατασκευής σε κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 5.2 Implicit & Explicit ανάλυση

Στην Explicit ανάλυση ο καταμερισμός του χρόνου εξαρτάται από το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που εφαρμόζεται στη κατασκευή, το μέτρο ελαστικότητας και τη πυκνότητα του υλικού. Το μέγεθος του βήματος που ακολουθεί ο χρόνος εξαρτάται από τη ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ένα κύμα πρόσκρουσης μέσω ενός πεπερασμένου στοιχείου. Οπότε, το χρονικό βήμα πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το μήκος ενός στοιχείου προς τη μεταφορά του ελαστικού κύματος μέσω αυτού (Σχέση 5.2).[10]

$$\Delta t \leq f * \left[\frac{h}{c} \right]_{\min} \quad (5.2)$$

Όπου:

- $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
- f: συντελεστής ασφαλείας (≤ 1)
- c: η ταχύτητα ήχου του υλικού
- E: το μέτρο ελαστικότητας
- ρ: η πυκνότητα

Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανικοί αντιμετωπίζουν την μελέτη των κατασκευών είναι το είδος του προβλήματος προς επίλυση, δηλαδή αν είναι Γραμμικό (Linear) ή Μη Γραμμικό (Non Linear). Τα γραμμικά και μη γραμμικά προβλήματα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση των κατασκευών και των υλικών, και καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι μηχανικοί προσεγγίζουν το έργο, καθώς και τις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα της κατασκευής.

Τα γραμμικά προβλήματα χαρακτηρίζονται από γραμμική συμπεριφορά των συστημάτων, όπου οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων, των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων είναι γραμμικές. Σε γραμμικά προβλήματα, οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι γραμμικές διαφορικές ή αλγεβρικές εξισώσεις, και τα φορτία που μελετώνται προκαλούν τόσο πολύ μικρές παραμορφώσεις που το υλικό μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ελαστικό. Η γραμμικότητα επιτρέπει απλοποιημένες αναλύσεις και παραδοχές, με επιλύσεις βάση σχετικά απλών μαθηματικών μεθόδων, διευκολύνοντας έτσι τη διαδικασία σχεδιασμού. Ωστόσο, αν και οι γραμμικές αναλύσεις είναι γρήγορες και απλές, ενδέχεται να μην αποτυπώνουν ακριβώς τη συμπεριφορά των κατασκευών υπό μεγάλες φορτίσεις ή παραμορφώσεις, και να οδηγήσουν σε ελλιπή διαδικασία μελέτης. Για αυτό τον λόγο οι περισσότερες κατασκευές μελετώνται ως μη γραμμικά προβλήματα.

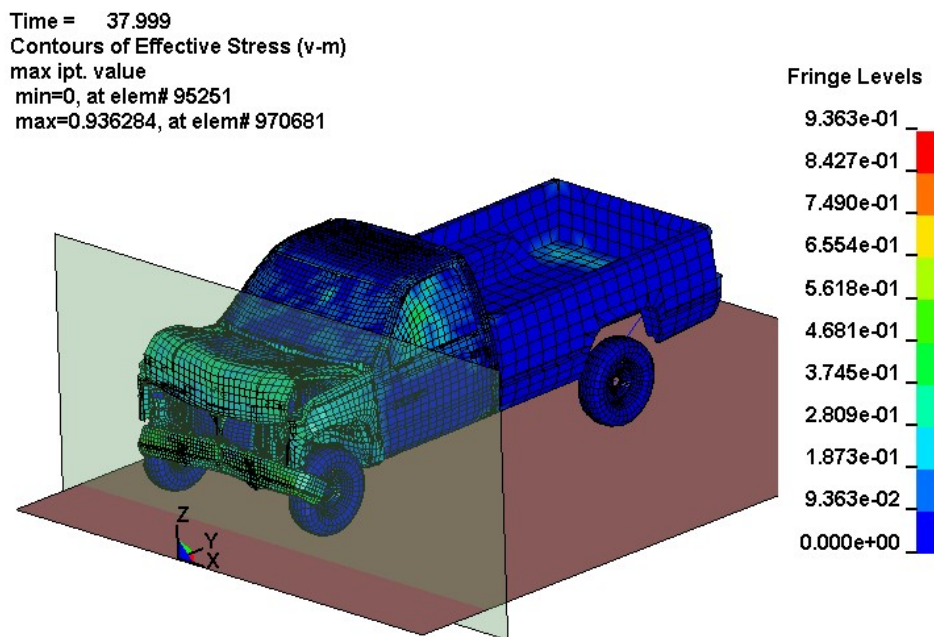
Τα μη γραμμικά προβλήματα αφορούν συστήματα όπου οι σχέσεις μεταξύ δυνάμεων, παραμορφώσεων και εκτοπισμάτων είναι μη γραμμικές. Αυτά τα προβλήματα είναι πολύπλοκα και απαιτούν πιο προηγμένες μεθόδους ανάλυσης και επίλυσης. Χαρακτηρίζονται από μεγάλες παραμορφώσεις που προκαλούν σημαντικές μετατοπίσεις και μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού. Επίσης, οι μη γραμμικές αναλύσεις επιτρέπουν μια πιο ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς των υλικών και των κατασκευών υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου και εξετάζουν παραμορφώσεις και δυνάμεις που δεν μπορούν να αποτυπωθούν με γραμμικά μοντέλα. Οι αναλύσεις αυτές απαιτούν πιο σύνθετα μαθηματικά μοντέλα και προηγμένα λογισμικά CAE (Computer Aided Analysis), παράγοντας προσομοιώσεις που είναι πιο υπολογιστικά απαιτητικές και χρονοβόρες, αλλά παρέχουν πιο αξιόπιστα και λεπτομερή αποτελέσματα. Λαμβάνοντας υπόψη τα μη γραμμικά φαινόμενα, βελτιώνεται η ανθεκτικότητα και η ασφάλεια, καθώς οι κατασκευές που αναλύονται με αυτή τη μέθοδο είναι πιο πιθανό να

αντέξουν σε ακραίες συνθήκες φορτίου, όπως πρόσκρουση, σεισμικά γεγονότα, υψηλοί άνεμοι ή άλλες δυναμικές φορτίσεις.

Για τους παραπάνω λόγους, οι κατασκευές που υπόκεινται σε συνθήκες φόρτισης που αντιστοιχούν σε συνθήκες πρόσκρουσης αναλύονται με μη γραμμικές μεθόδους. Οι περιπτώσεις αυτές είναι εξαιρετικά σύνθετες και αφορούν τη μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών κατά την επαφή και την αλληλεπίδραση με άλλα σώματα ή αντικείμενα, προκαλώντας μεγάλες ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις της γεωμετρίας. Η πρόσκρουση είναι ένα δυναμικό φαινόμενο που περιλαμβάνει ταχύτατες αλλαγές στις δυνάμεις που ασκούνται στο υλικό, μέσω των κυμάτων κρούσης που προκαλούνται.

Οι μέθοδοι ανάλυσης των φαινομένων αυτών περιέχουν μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων μέσω λογισμικών CAE που διαθέτουν ειδικούς επιλυτές με κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα. Οι προσομοιώσεις που παράγονται περιλαμβάνουν την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η ενέργεια της πρόσκρουσης κατανέμεται και απορροφάται από τα υλικά, αποτυπώνοντας τα κύματα κρούσης και τις δυναμικές αντιδράσεις που προκαλούνται.

Όπως είναι αναμενόμενο, οι αναλύσεις αυτές έχουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς στους οποίους προκαλούνται φαινόμενα πρόσκρουσης όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και ο μηχανοκίνητος αθλητισμός. Σε αυτούς τους τομείς θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές καθώς είναι επιτακτική ανάγκη η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των οχημάτων και της ασφάλειας των επιβατών μέσω προσομοιώσεων σύγκρουσης (Crash Tests). Οι αναλύσεις αυτές περιλαμβάνουν την εξέταση της απορρόφησης ενέργειας από τις ζώνες παραμόρφωσης (Crumble Zones) των οχημάτων.



Εικόνα 5.3 Προσομοίωση μετωπικής πρόσκρουσης οχήματος [11]

5.1. Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής και φυσικής που περιλαμβάνουν πολύπλοκες γεωμετρίες, φορτία, υλικά και ιδιότητες. Εφαρμόζεται ευρέως στις κατασκευές για την ανάλυση και το σχεδιασμό δομών.

Η εξέλιξη της μεθόδου ξεκινά από τις βασικές αρχές της μηχανικής και της μαθηματικής ανάλυσης και εξελίσσεται σε μια από τις πιο σημαντικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες αριθμητικές μεθόδους στη μηχανική και τις φυσικές επιστήμες. Αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και οι πρώτες προσπάθειες σχετίζονται με την ανάγκη επίλυσης προβλημάτων στατικών και δυναμικών καταστάσεων σε αεροδιαστημικές κατασκευές. Ο Ray W. Clough και οι συνεργάτες του είναι συχνά αναφερόμενοι ως πρωτοπόροι της FEM. Ο Clough χρησιμοποίησε τον όρο "πεπερασμένα στοιχεία" το 1960 και παρουσίασε τη μέθοδο σε συνέδριο, αναδεικνύοντας τη δυναμική της. Έπειτα, αναπτύχθηκε και θεμελιώθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, καθώς επεκτάθηκε με τις μελέτες πολλών ερευνητών, όπως οι J.H. Argyris και O.C. Zienkiewicz, που ανέπτυξαν και βελτίωσαν τη θεωρητική βάση της μεθόδου, και έτσι βρήκε εφαρμογή όχι μόνο στην αεροδιαστημική, αλλά και στην πολιτική μηχανική, τη μηχανική των υλικών και άλλες επιστήμες μηχανικής.

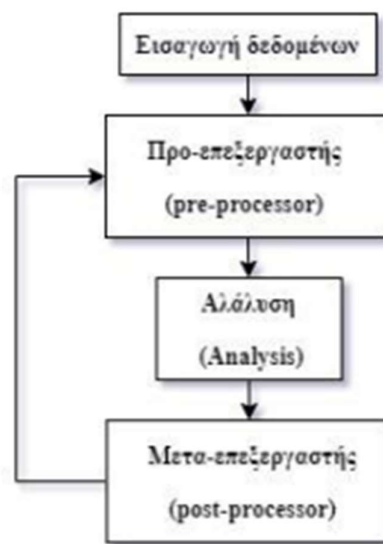
Με την πρόοδο των υπολογιστών και την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έγινε πιο προσιτή και εφαρμόσιμη σε πιο πολύπλοκα προβλήματα. Αναπτύχθηκαν εμπορικά λογισμικά όπως το ANSYS, το ABAQUS και το NASTRAN, που ενσωματώνουν την μέθοδο και παρέχουν εργαλεία για ανάλυση μηχανικών κατασκευών, μεταφορά θερμότητας, ρευστομηχανικής, και άλλες ανάγκες. Τα τελευταία χρόνια, συνεχίζει να εξελίσσεται με την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών, όπως η μη γραμμική ανάλυση, η δυναμική ανάλυση, και η πολυφυσική προσομοίωση, και η ενσωμάτωση της με άλλες μεθόδους, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method) και η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method), προσφέρει λύσεις για πιο σύνθετα προβλήματα. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές στην ανάλυση βιολογικών συστημάτων, στην ιατρική, στη ναυτοτεχνολογία και σε άλλα αναδυόμενα πεδία δείχνοντας την ευελιξία και την ικανότητα της μεθόδου να προσαρμόζεται σε νέα πεδία εφαρμογών.

Συνεπώς, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει εξελιχθεί από μια θεωρητική προσέγγιση σε ένα ισχυρό και ευέλικτο εργαλείο ανάλυσης που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλά επιστημονικά και μηχανικά πεδία. Η συνεχής βελτίωση της μεθόδου και η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και τεχνικών εξασφαλίζουν τη συνεχή της ανάπτυξη και εφαρμογή σε ακόμη πιο πολύπλοκα και εξειδικευμένα προβλήματα.[12]

5.1.2. Ανάλυση της μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο που διακριτοποιεί ένα συνεχές πρόβλημα σε ένα πεπερασμένο αριθμό μικρών και απλών υποπροβλημάτων. Αυτά τα υποπροβλήματα, που αναφέρονται ως πεπερασμένα στοιχεία, συνδυάζονται για να προσεγγίσουν τη λύση του αρχικού προβλήματος.

Μέσω των ειδικών λογισμικών CAE που εφαρμόζουν τη μέθοδο, αρχικά δημιουργείται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προ-επεξεργαστή και στην συνέχεια, με τη χρήση του κατάλληλου επιλυτή (solver) που παρέχει το λογισμικό, γίνεται η ανάλυση. Αφού παραχθούν τα αποτελέσματα, μπορούν να απεικονισθούν μέσω αριθμητικών μεγεθών και προσομοίωσης στο μετα-επεξεργαστή του λογισμικού. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.2.1.



Εικόνα 5.1.2.1 Ροή λειτουργίας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Αρχικά, στο προ-επεξεργαστή το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης είναι η εισαγωγή της γεωμετρίας που έχει σχεδιαστεί σε ένα λογισμικό CAD. Έπειτα, γίνεται η διακριτοποίηση της δομής του υλικού, εφαρμόζοντας ένα πλέγμα το οποίο διασπάει τη δομή σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία (elements) τα οποία ενώνονται μεταξύ τους μέσω κόμβων (nodes). Επιπλέον, ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού οι οποίες χαρακτηρίζουν κάθε πεπερασμένο στοιχείο, όπως το μέτρο ελαστικότητας, η πυκνότητα, το όριο διαρροής και άλλες. Έπειτα, προσδιορίζονται οι συνοριακές συνθήκες όπου υπάρχουν, οι οποίες καθορίζουν τους βαθμούς ελευθερίας σε κάθε στοιχείο του πλέγματος. Τέλος, ορίζονται οι συνθήκες φόρτισης και το μέγεθος των φορτίων που εφαρμόζονται στο μοντέλο, έτσι ώστε να καθοριστεί ο τύπος ανάλυσης (στατική ή δυναμική) και να προετοιμαστεί για επίλυση.[13]

Στη συνέχεια, αφού ο χειριστής του λογισμικού έχει επιλέξει τον κατάλληλο επιλυτή ανάλογα με το είδος ανάλυσης, διαβάζονται τα δεδομένα του προ-επεξεργαστή και ξεκινάει η επίλυση. Η γενική εξίσωση κίνησης που επιλύεται κατά τους υπολογισμούς είναι η Σχέση 5.3.

$$[M] \cdot \ddot{u} + [C] \cdot \dot{u} + [K] \cdot u = F \quad (5.3)$$

Όπου:

- [M]: το μητρώο μάζας
- [C]: το μητρώο απόσβεσης
- [K]: το μητρώο στιβαρότητας
- \ddot{u} : το διάνυσμα επιτάχυνσης
- \dot{u} : το διάνυσμα ταχύτητας
- u: το διάνυσμα μετατόπισης
- F: το διάνυσμα διέγερσης

Η Εξίσωση 5.3 αρχικά εφαρμόζεται σε κάθε ένα πεπερασμένο στοιχείο του πλέγματος συνθέτοντας τα τοπικά μητρώα μάζας [M], απόσβεσης [C], στιβαρότητας [K], με γραμμές και στήλες ανάλογα τους κόμβους και τους βαθμούς ελευθερίας του στοιχείου. Με δεδομένα τα τοπικά μητρώα του κάθε στοιχείου, συνδυάζονται καταλλήλως και προκύπτουν τα ολικά μητρώα [M],[C],[K], το οποία εφαρμόζονται στη Σχέση 5.3 η οποία μετατρέπεται στην ολική εξίσωση κίνησης.

Στην περίπτωση που η εξωτερική διέγερση είναι μηδενική η εξίσωση κίνησης προκύπτει ως:

$$[M] \cdot \ddot{u} + [C] \cdot \dot{u} + [K] \cdot u = 0 \quad (5.4)$$

Στην περίπτωση στατικής φόρτισης, η επιτάχυνση και η ταχύτητα δεν λαμβάνεται υπόψη, οπότε η Σχέση 5.3 προκύπτει ως:

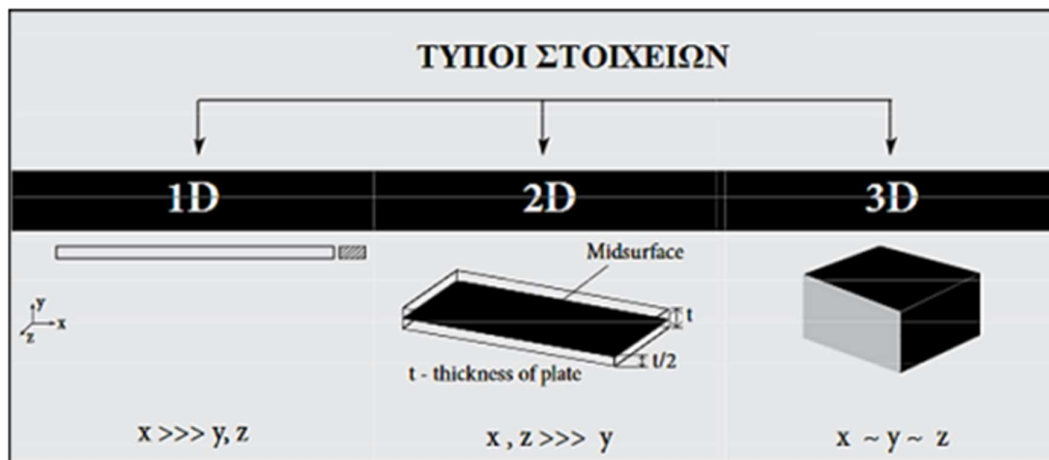
$$[K] \cdot u = F \quad (5.6)$$

5.1.3. Διακριτοποίηση δομής

Η διακριτοποίηση της δομής είναι το πρώτο και ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως δημιουργία πλέγματος (Meshing). Πριν τη διακριτοποίηση, πρέπει να οριστεί με σαφήνεια η γεωμετρία της δομής, η οποία μπορεί να είναι δύο ή τριών διαστάσεων, και περιλαμβάνει το συνολικό σχήμα, τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της δομής που πρέπει να αναλυθούν. [12],[13]

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με τη γεωμετρία και τη φύση του προβλήματος:

- i. Μονοδιάστατα στοιχεία: Διαθέτουν δύο κόμβους και χρησιμοποιούνται για ανάλυση προβλημάτων σε μία διάσταση, όπως ράβδοι και δοκοί. Κοινά 1D στοιχεία είναι τα γραμμικά στοιχεία (line elements).
- ii. Δισδιάστατα (Επιφανειακά) στοιχεία: Χρησιμοποιούνται για επίπεδες δομές, όπως πλάκες και μεμβράνες. Τυπικά 2D στοιχεία είναι τα τρίγωνα και τα τετράπλευρα (quadrilaterals).
- iii. Τρισδιάστατα (Χωρικά) στοιχεία: Χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατες δομές, όπως στερεά σώματα. Κοινά 3D στοιχεία είναι τα τετράεδρα (tetrahedra) και τα εξάεδρα (hexahedra).

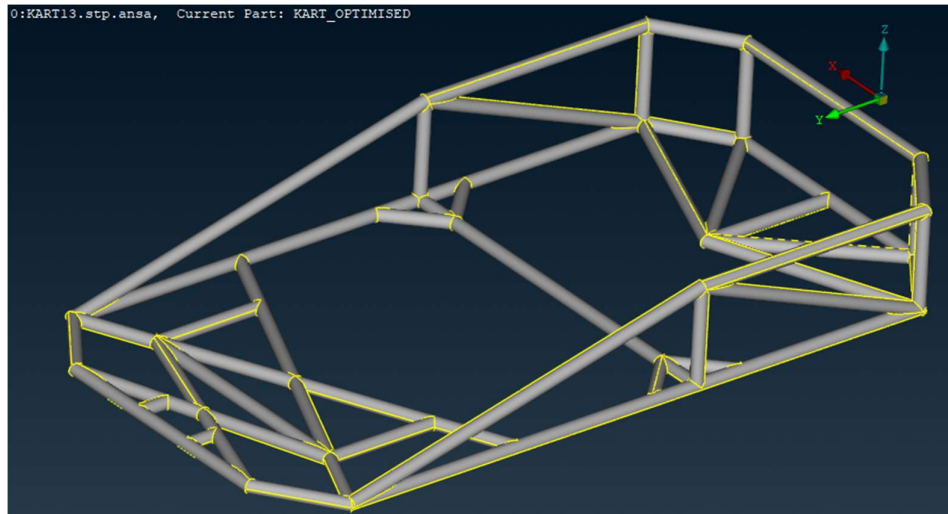


Εικόνα 5.1.3.1 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων

Ο καθορισμός του μεγέθους και της κατανομής των στοιχείων είναι κρίσιμος για την ακρίβεια της ανάλυσης. Η διακριτοποίηση μπορεί να είναι ομοιόμορφη, δηλαδή όλα τα στοιχεία να έχουν το ίδιο σχήμα και μέγεθος. Επίσης, μπορεί να είναι προσαρμοσμένη, με το μέγεθος των στοιχείων να ποικίλλει, χρησιμοποιώντας μικρότερα στοιχεία σε περιοχές υψηλής τάσης ή πολύπλοκης γεωμετρίας. Στη περίπτωση αυτή, η μετάβαση από τα μεγάλα στα μικρά στοιχεία πρέπει να είναι ομαλή. Ακόμη, το μέγεθος των στοιχείων πρέπει να κυμαίνεται εντός ορίων, καθώς πολύ μεγάλα στοιχεία δεν αποτυπώνουν σημαντικές λεπτομέρειες στη γεωμετρία και πολύ μικρά στοιχεία αυξάνουν πολύ τον υπολογιστικό χρόνο και τις υπολογιστικές απαιτήσεις.

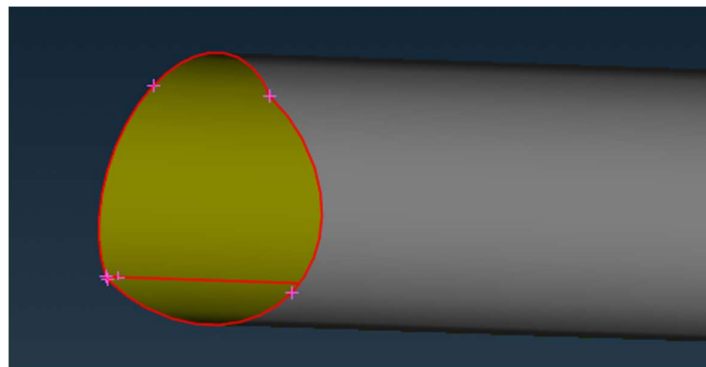
5.2. Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Αρχικά, επιλέγεται ο προ-επεξεργαστής ANSA v24.1.1 της BETA CAE Systems, με χρήση άδειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Στο περιβάλλον του ANSA εισάγεται το βελτιστοποιημένο σασί του kart σε μορφή αρχείου CAD. Επειδή, οι συνολικές διαστάσεις της κατασκευής είναι πολύ μεγαλύτερες από το πάχος σε κάθε διατομή της, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν δυσδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Shell Elements) για το σχηματισμό του πλέγματος.



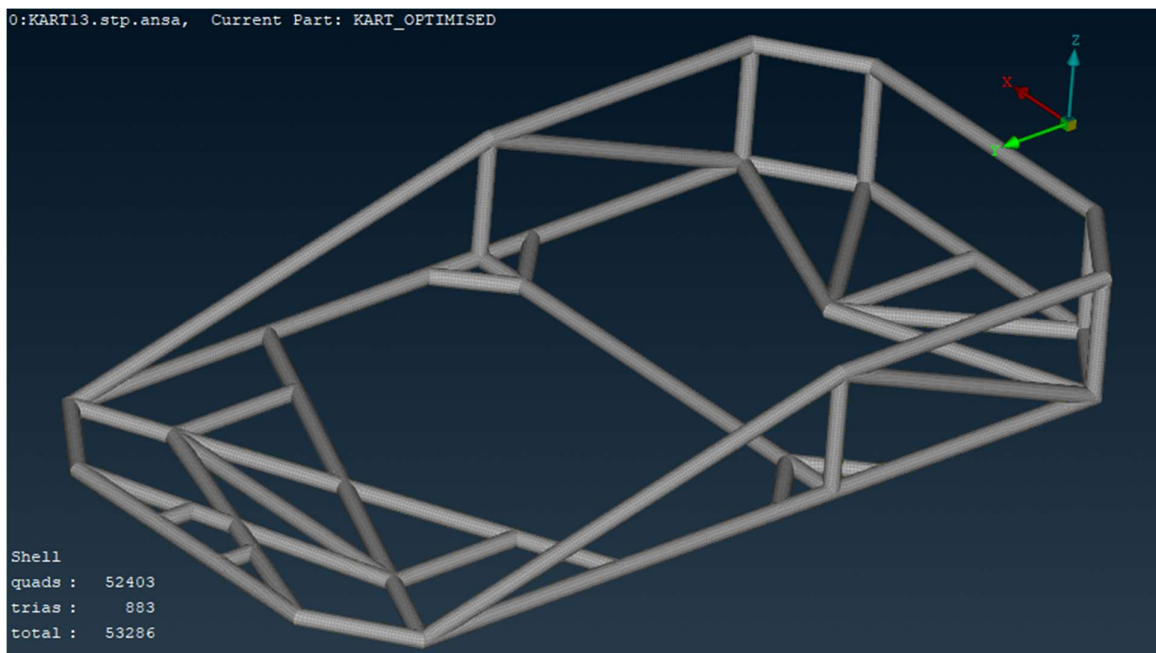
Εικόνα 5.2.1 Εισαγωγή γεωμετρίας στο περιβάλλον του ANSA

Πριν εφαρμοστεί το πλέγμα στις επιφάνειες, είναι απαραίτητη η τροποποίηση της γεωμετρίας με σκοπό την απλοποίηση της. Αρχικά, πρέπει να αφαιρεθούν οι εσωτερικές επιφάνειες των σωληνωτών ράβδων, ώστε να μην υπάρχουν διπλές επιφάνειες, μέσω της καρτέλας Classic Topo (Εικόνα 5.2.2), και μέσω της εντολής Geometry από τη καρτέλα Direct Edit ενώνονται όλες οι επιφάνειες ώστε να μην υπάρχουν σφάλματα.

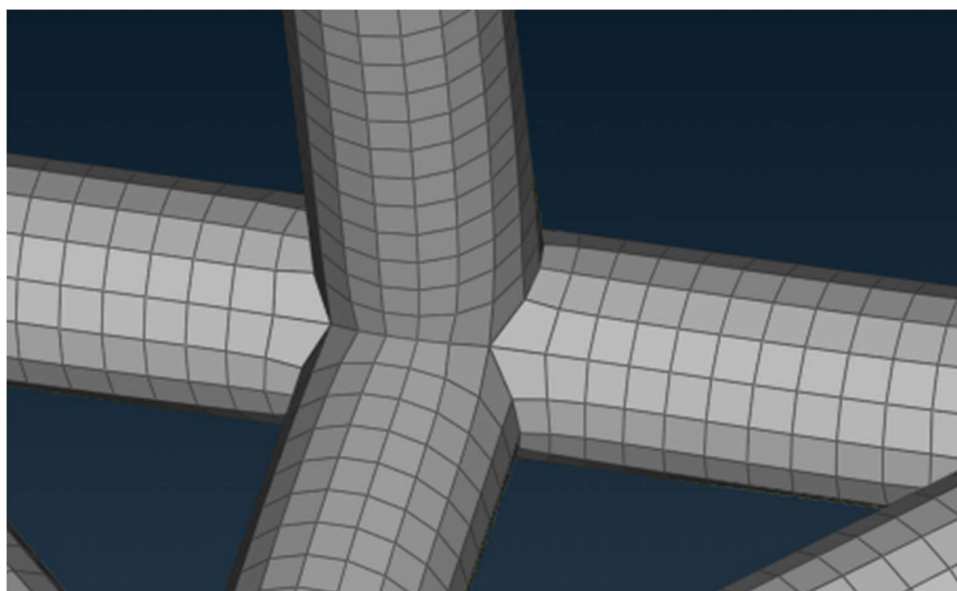


Εικόνα 5.2.2 Σωλήνας σασί σε τομή μετά από την απλοποίηση

Στη συνέχεια, μέσω της εντολής Mesh στη καρτέλα Shell Mesh δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που αποτελείται από δυοδιάστατα στοιχεία μήκους 5 mm το καθένα. Επίσης, μέσω της εντολής Properties ορίζεται το πάχος $T = 2.5$ mm, όσο δηλαδή είναι το πάχος των σωληνωτών ράβδων. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων είναι 53286.



Εικόνα 5.2.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

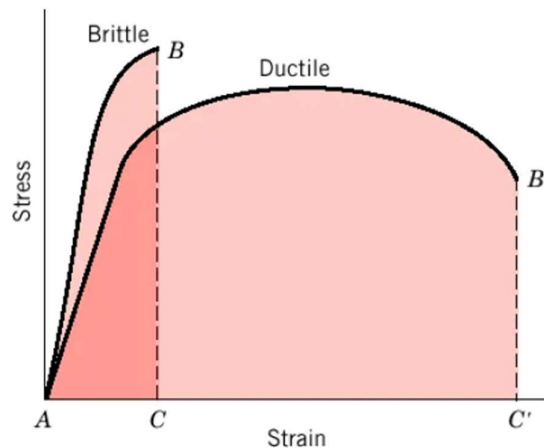


Εικόνα 5.2.4 Μοντέλο σε μεγέθυνση

5.3. Ορισμός υλικού και ιδιοτήτων

Αφού δημιουργήθηκε το πλέγμα στη γεωμετρία, μέσω της εντολής Output, εξάγεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σε αρχείο τύπου RADIOSS, το οποίο εισάγεται στο περιβάλλον του CAE λογισμικού HyperWorks της Altair Engineering. Η χρήση του λογισμικού γίνεται με άδεια που παρέχεται σε σπουδαστές.

Αρχικά, μέσω της καρτέλας Materials θα οριστεί το υλικό που έχει επιλεγεί με τις ιδιότητες του (χάλυβας AISI 1018). Επιλέγεται η κάρτα υλικού M2_PLAS_JOHNS_ZERIL και ο τύπος υλικού PLAS_JOHNS. Αυτός ο τύπος υλικού στο λογισμικό αντιπροσωπεύει ένα ισότροπο ελαστοπλαστικό υλικό χρησιμοποιώντας το μοντέλο υλικού Johnson-Cook. Αυτό το μοντέλο εκφράζει την καταπόνηση υλικού ως συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης και της θερμοκρασίας.[14]



Εικόνα 5.3.1 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης υλικού με βάση το μοντέλο Johnson-Cook[18]







Οι ιδιότητες του υλικού που εισάγονται στα δεδομένα του λογισμικού είναι οι εξής[3]:

Πυκνότητα (Rho Initial)	7.87e-9 Mg/mm ³
Μέτρο ελαστικότητας (E)	210000 MPa
Λόγος Poisson (Nu)	0.29
Όριο διαρροής (SIGY)	370 MPa

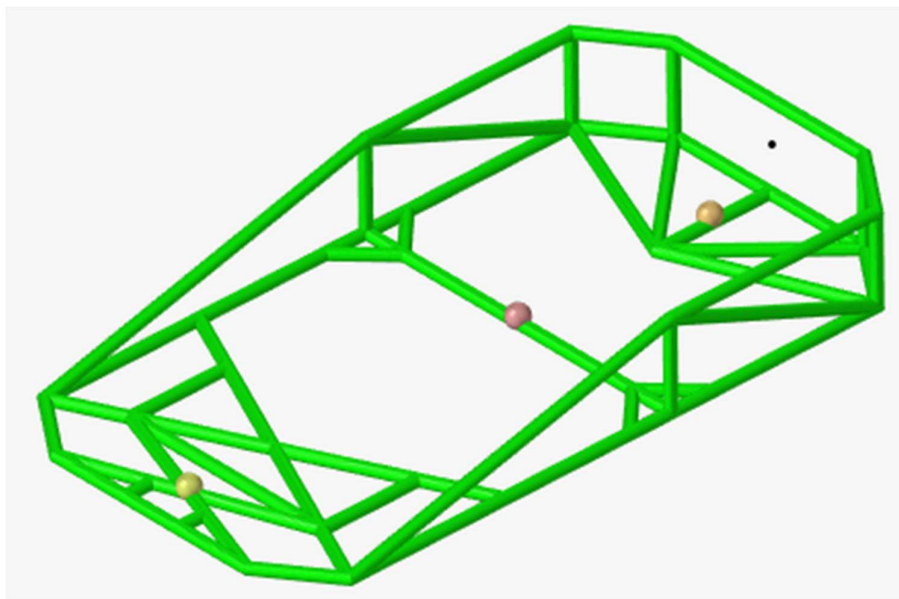
5.4. Ορισμός συνθηκών φόρτισης

Αρχικά, εφόσον οι αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν είναι δυναμικές αναλύσεις πρόσκρουσης, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ο επιλυτής Radioss2023 της Altair Engineering. Ο Radioss χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ανάλυσης μίας κατασκευής που αποτελεί μη γραμμικό πρόβλημα και υπόκειται σε δυναμικά φορτία. Χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, προσφέροντας έγκυρες αναλύσεις ασφάλειας, σύγκρουσης, πτώσης, κραδασμών, έκρηξης αλλά και σφοδρών συγκρούσεων υψηλής ταχύτητας.[15]

Πριν ξεκινήσει η επίλυση, αρχικά πρέπει να καθοριστούν τα φορτία βάρους από τον οδηγό, το σύστημα κίνησης, τα λειτουργικά συστήματα και τα συστήματα ανάρτησης τροχών. Αρχικά, μέσω της εντολής Sets, δημιουργούνται τρία σετ κόμβων (Εικόνα 5.4.1) τα οποία αποτελούν τα σημεία στήριξης του οδηγού, του συστήματος κίνησης-οπίσθιων τροχών-αναρτήσεων, και του συστήματος εμπρόσθιων τροχών-αναρτήσεων, στο μεσαίο τμήμα, στο οπίσθιο τμήμα και στο εμπρόσθιο τμήμα του σασί αντιστοιχώς. Σε κάθε σετ εφαρμόζεται η στήριξη της αντίστοιχης μάζας, όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4.2, μέσω της εντολής Solver Masses / ADMAS. Το κέντρο βάρους κάθε μάζας φαίνεται στην Εικόνα 5.4.2. Η μάζα στο εμπρόσθιο μέρος έχει τιμή 10 kg, στο μεσαίο τμήμα 80 kg, και στο οπίσθιο τμήμα 30 kg.

	Name	ID		Include	Card Image
	all	3		0	GRNOD
	driver	4		0	GRNOD
	drivetrain	5		0	GRNOD
	frontsuspension	6		0	GRNOD

Εικόνα 5.4.1 Σετ κόμβων

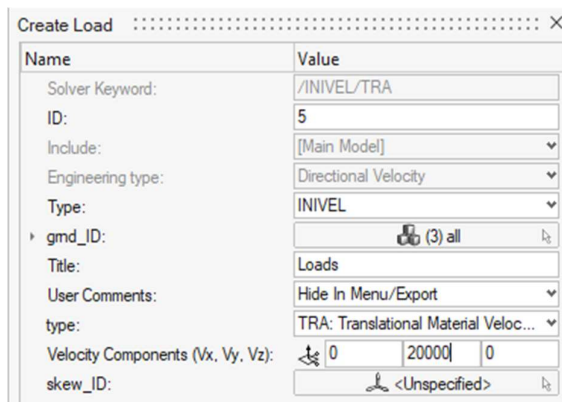


Εικόνα 5.4.2 Κέντρα βάρους μαζών

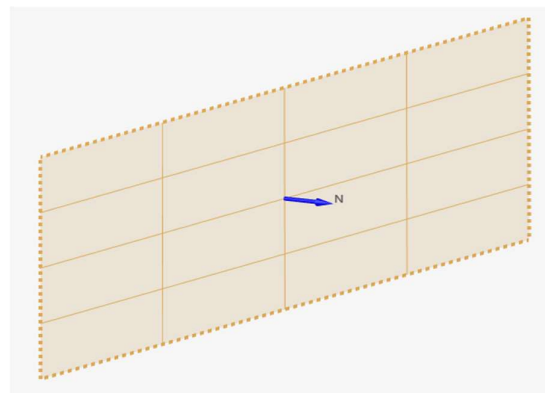
Στη συνέχεια, πρέπει να καθοριστούν οι συνθήκες πρόσκρουσης. Αρχικά, τα σενάρια πρόσκρουσης τα οποία θα μελετηθούν είναι η εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση, η οπίσθια μετωπική πρόσκρουση, και η πλευρική πρόσκρουση. Η ανάλυση της πλευρικής πρόσκρουσης πραγματοποιείται μία φορά καθώς το kart είναι συμμετρικό.

Η ταχύτητα και στις τρεις περιπτώσεις ορίζεται ως 20 m/s^2 . Στο λογισμικό εφαρμόζεται μέσω της εντολής Initial Conditions και την επιλογή INVEL, σε ένα σετ κόμβων που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του μοντέλου. Ανάλογα το σενάριο πρόσκρουσης, η κατεύθυνση της ταχύτητας ορίζεται δίνοντας τιμή στην αντίστοιχη συνιστώσα (V_y ή V_x). (Εικόνα 5.4.3)

Το σημείο στο οποίο προσκρούεται, σε κάθε περίπτωση, το kart, ορίζεται μέσω της εντολής Rigid Walls, και προσομοιώνει έναν άκαμπτο τοίχο. Προσδιορίζεται μέσω συντεταγμένων (XM, YM, ZM) και της κατεύθυνσης στην οποία είναι τοποθετημένο το επίπεδο που αποτελεί το σημείο πρόσκρουσης, το οποίο ορίζεται απείρων διαστάσεων (Infinite Plane), Επίσης ορίζεται η επιφάνεια του τοίχου μέσω της επιλογής Sliding with friction και ορίζοντας συντελεστή τριβής 0.3. (Εικόνα 5.4.4) Σε κάθε σενάριο πρόσκρουσης, ο τοίχος τοποθετείται σε απόσταση ελάχιστων χιλιοστών από την επιφάνεια επαφής με τη γεωμετρία, έτσι ώστε να μην σπαταληθεί υπολογιστικός χρόνος κατά την επίλυση.

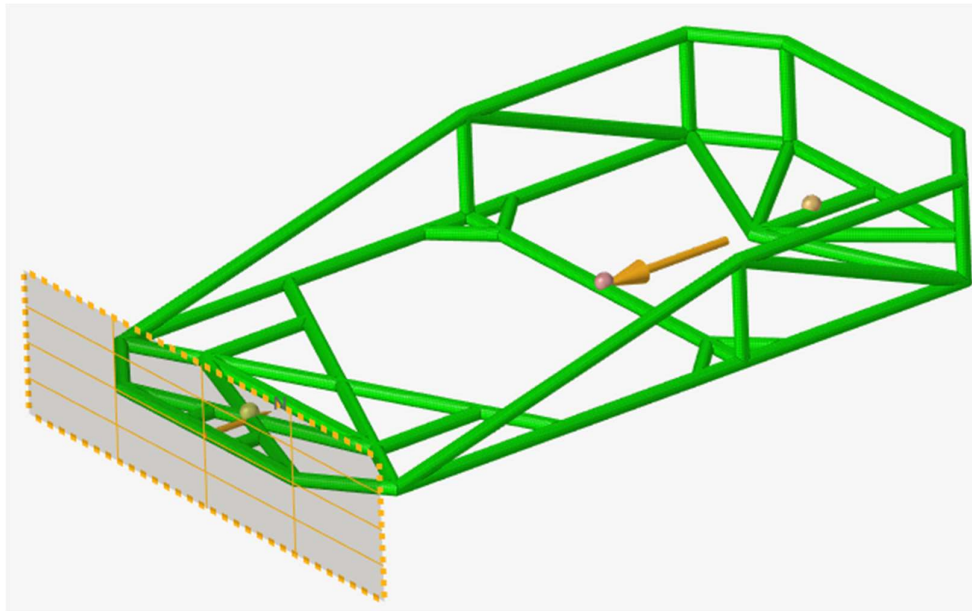


Εικόνα 5.4.3 Ορισμός ταχύτητας [mm/s^2]

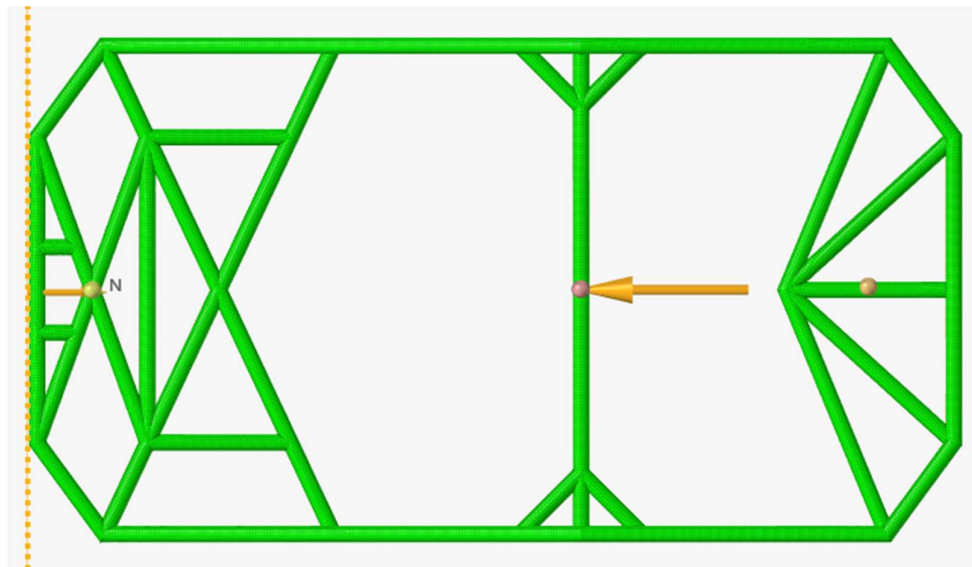


Εικόνα 5.4.4 Τοίχος πρόσκρουσης

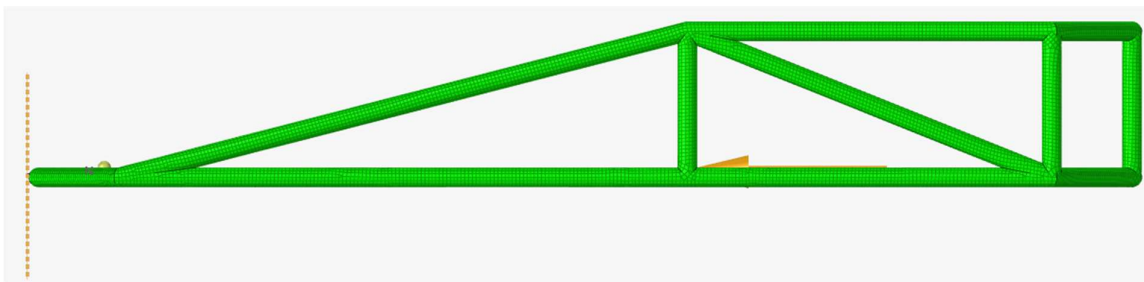
1) Εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση



Εικόνα 5.4.5

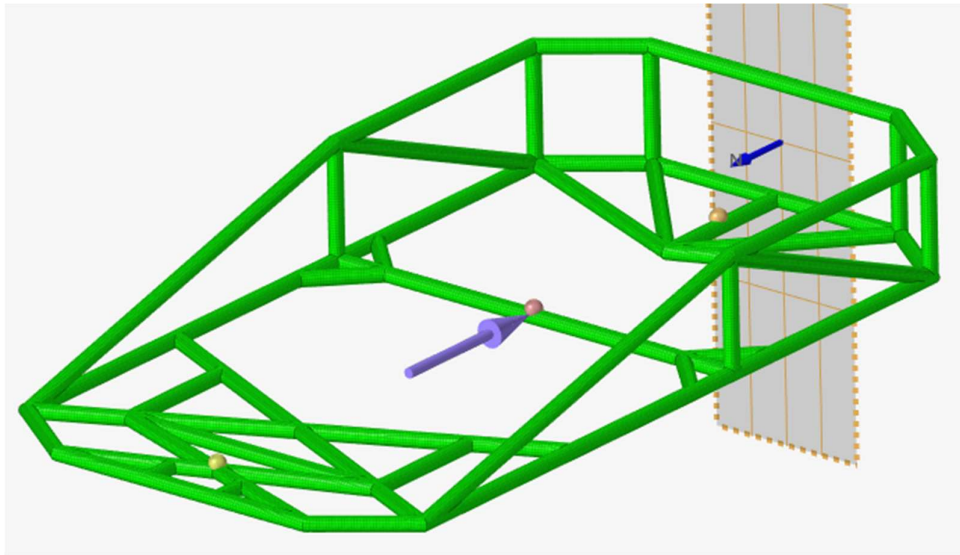


Εικόνα 5.4.6

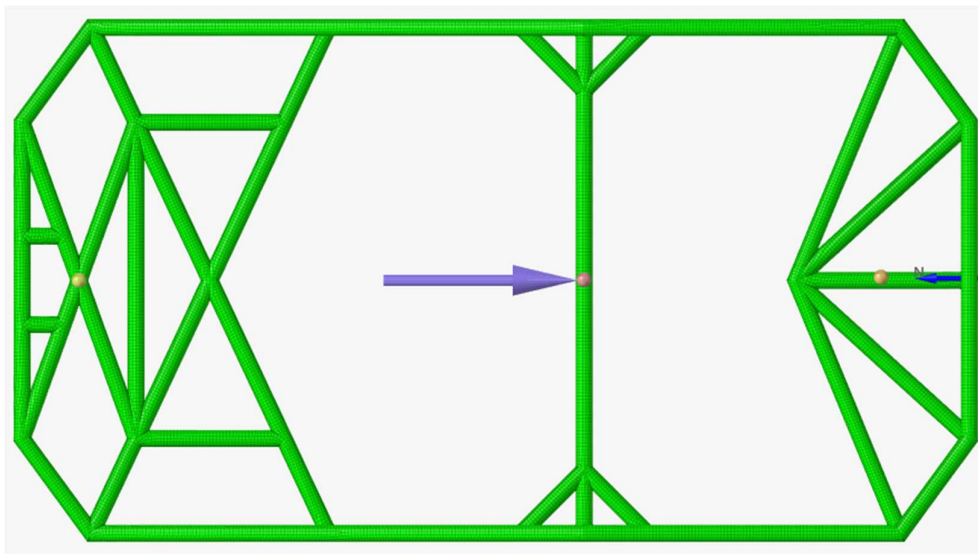


Εικόνα 5.4.7

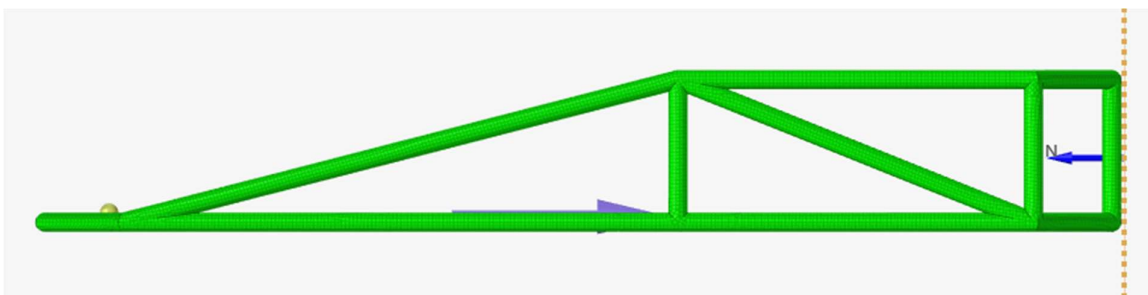
II) Οπίσθια μετωπική πρόσκρουση



Εικόνα 5.4.8

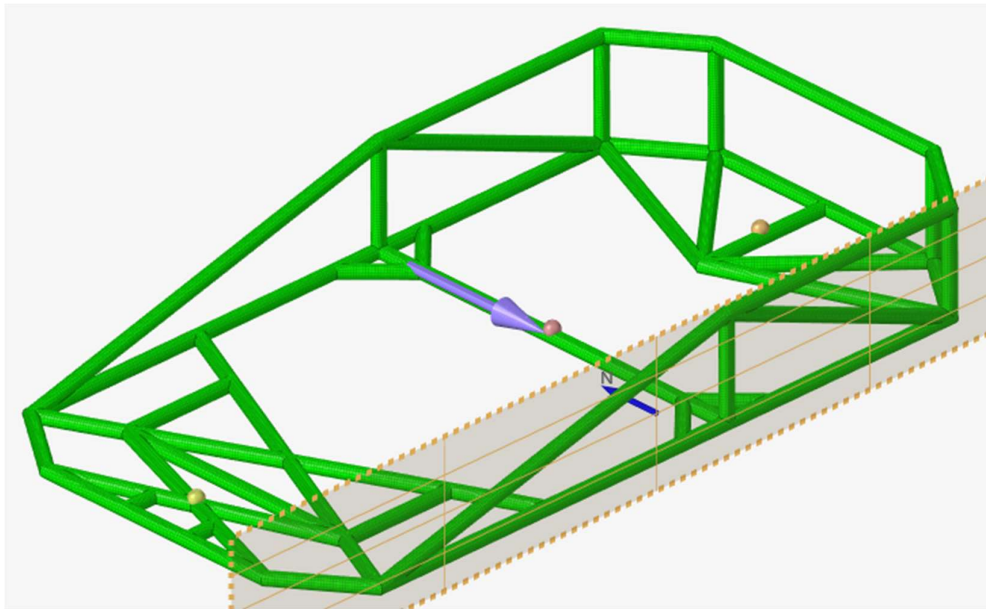


Εικόνα 5.4.8

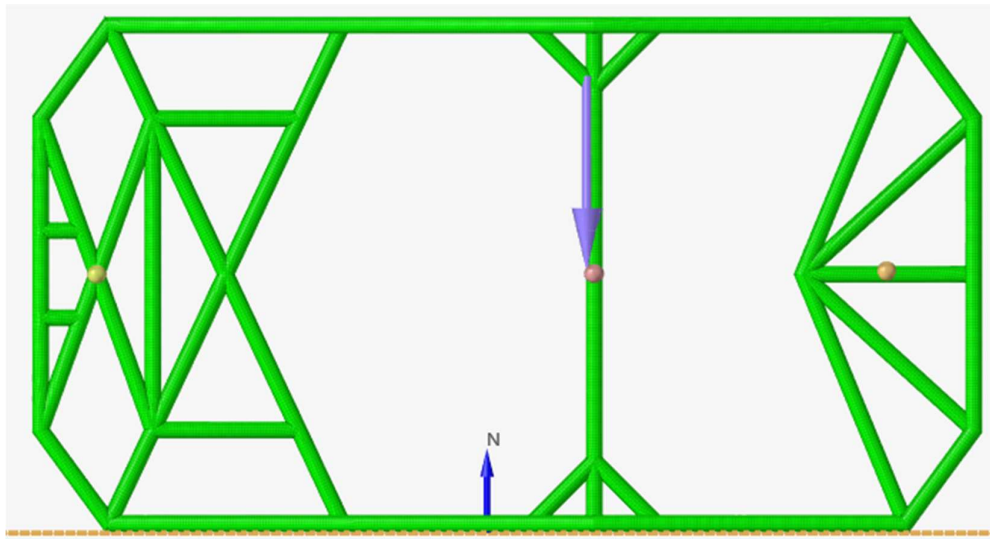


Εικόνα 5.4.9

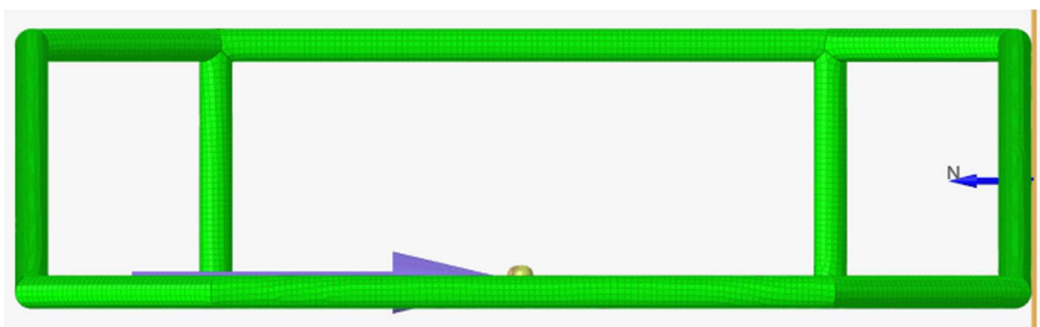
III) Πλευρική πρόσκρουση



Εικόνα 5.4.10



Εικόνα 5.4.11



Εικόνα 5.4.11

5.5. Ορισμός παραμέτρων επίλυσης

Εφόσον έχουν οριστεί πλήρως οι συνθήκες πρόσκρουσης, σε κάθε σενάριο πριν ξεκινήσει η επίλυση ορίζονται οι κατάλληλοι παράμετροι.

1) Αρχικά, στη κάρτα BEGIN_CARD ορίζονται οι μονάδες μέτρησης των υπολογισμών, ως Mg για τη μάζα, mm για το μήκος και sec για τον χρόνο, καθώς διαφορετικός συνδυασμός μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα ή σφάλματα (Εικόνα 5.5.1).[16]

	SI		
Length	m	mm	mm
Mass	kg	Mg(Ton)	kg
Time	s	s	ms
Plane angle	rad	rad	rad

Εικόνα 5.5.1 [16]

2) Μέσω της κάρτας ENG_TFILE ορίζεται η συχνότητα με την οποία καταγράφει τους υπολογισμούς ο επιλυτής ως 4e-5 sec (Time_frequency) με την επιλογή 0:Build in format of current Radioss version.

3) Μέσω της κάρτας ENG_ANIM_DT ορίζεται η συχνότητα με την οποία καταγράφεται το αποτέλεσμα στη προσομοίωση ως 8e-5 sec (Tfreq).

4) Μέσω της κάρτας ENG_MON επιλέγεται η τιμή ON, ώστε η προσομοίωση να απεικονιστεί σε πραγματικό χρόνο.

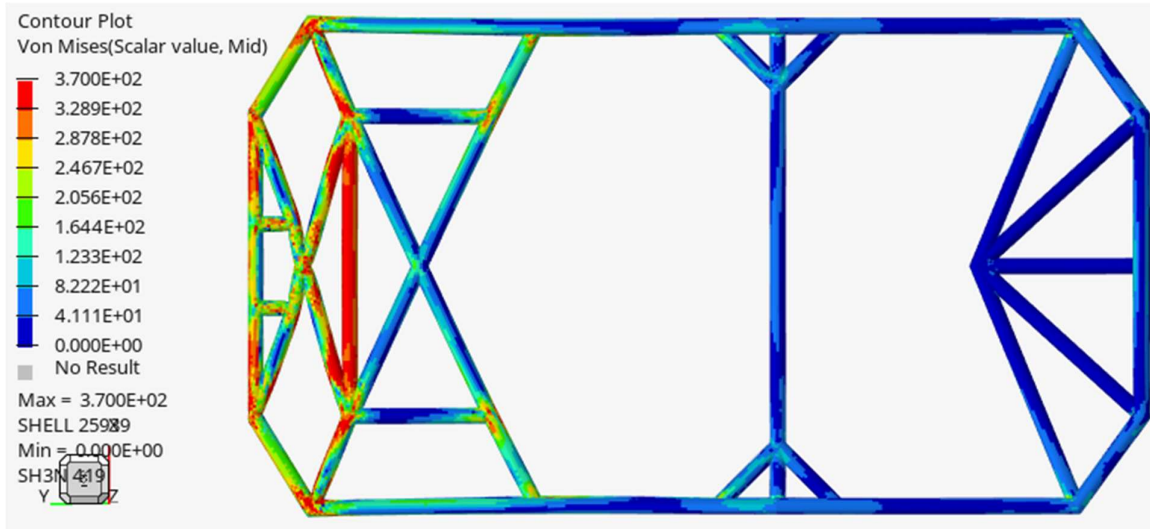
5) Μέσω της κάρτας ENG_RUN ορίζεται ο χρόνος στον οποίο θα σταματήσει η προσομοίωση ως 0.008 sec

6) Μέσω της κάρτας ENG_ANIM_ELEM επιλέγεται να υπολογιστούν ως αποτελέσματα στη προσομοίωση οι μετατοπίσεις και οι τάσεις Von Mises.[17]

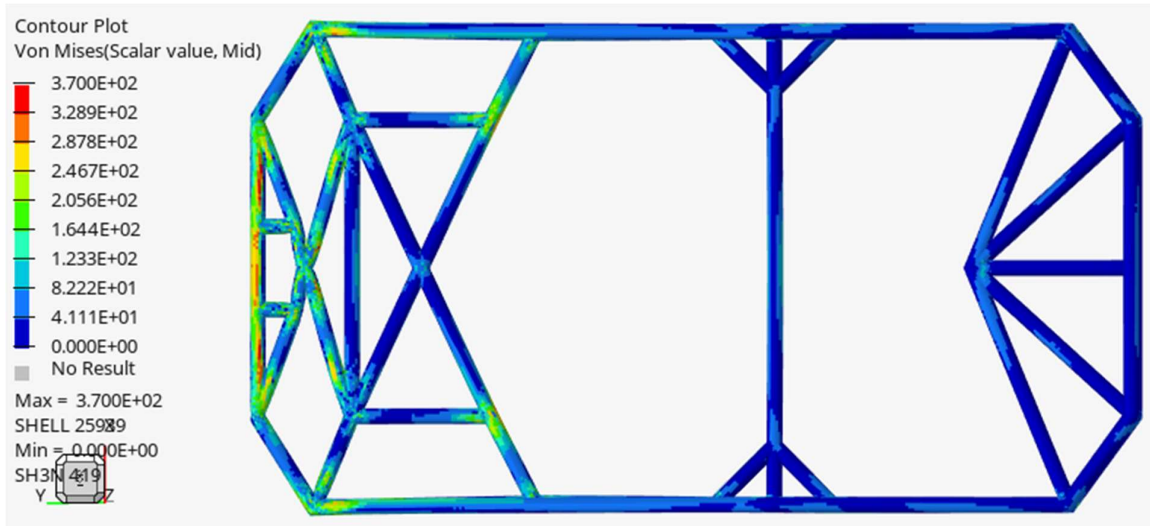
Στην καρτέλα Analyze και με την εντολή Radioss Solver ξεκινάει η επίλυση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο πρόσκρουσης, μέσω του HyperView.

5.6. Αποτελέσματα ανάλυσης

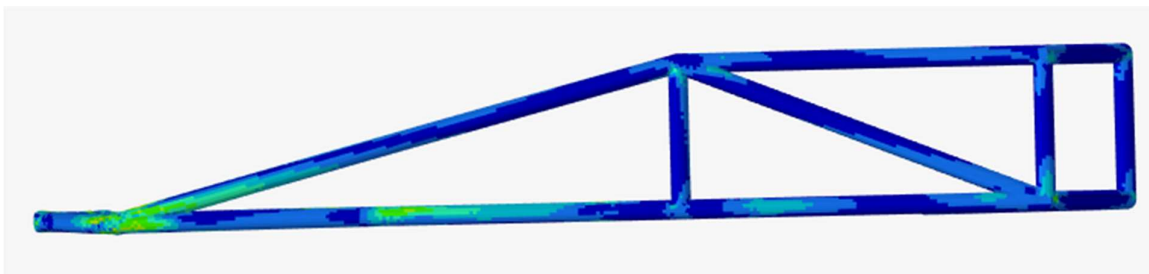
1) Εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση



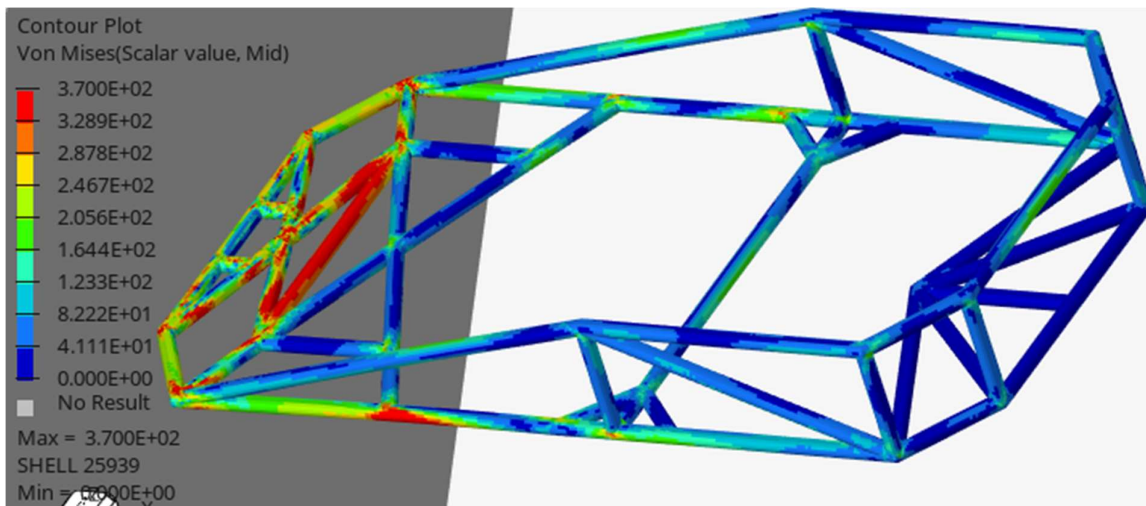
Εικόνα 5.6.1 Τάσεις Von Mises τη στιγμή της πρόσκρουσης – Άνοψη



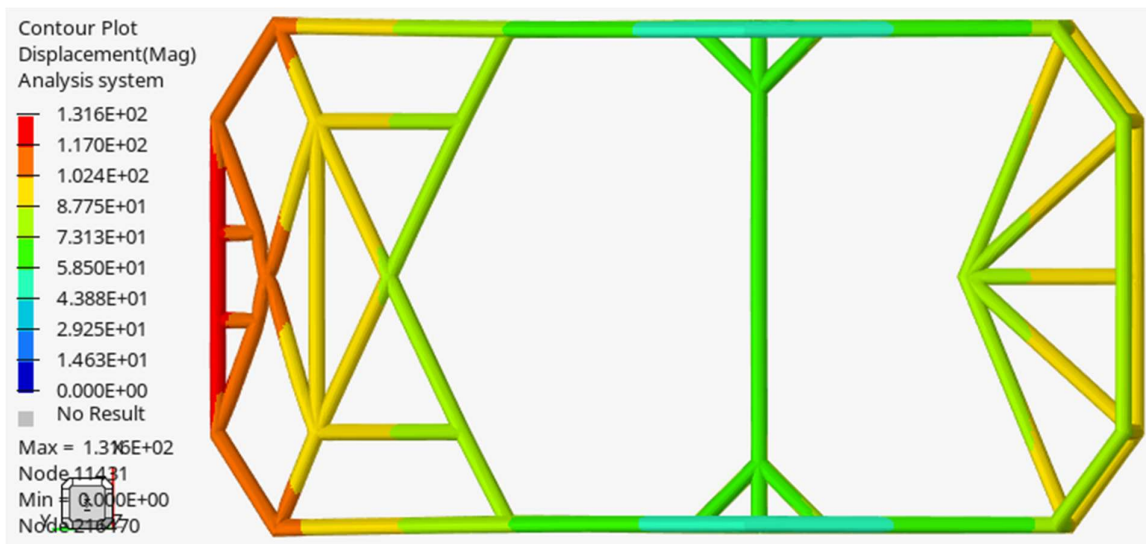
Εικόνα 5.6.2 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο - Άνοψη



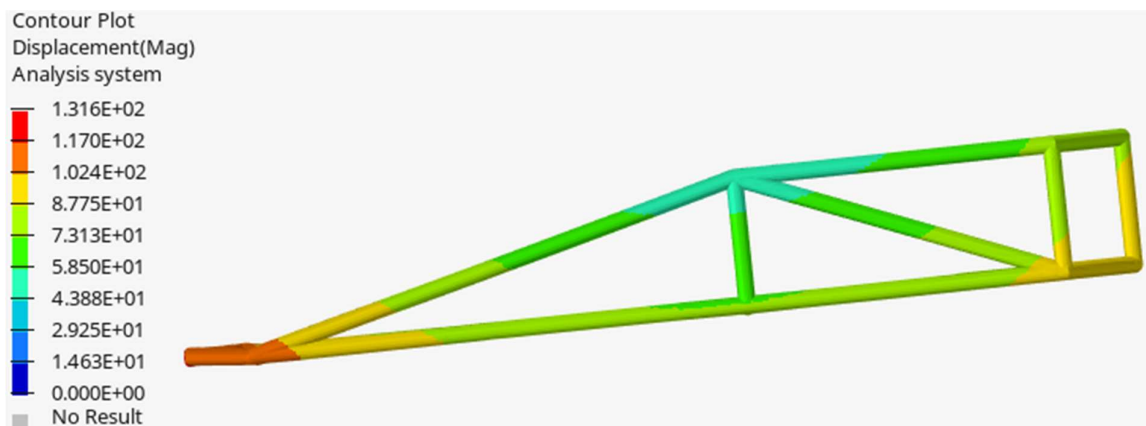
Εικόνα 5.6.3 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο - Πλάγια όψη



Εικόνα 5.6.4 Τάσεις Von Mises τη στιγμή της πρόσκρουσης – 3D όψη

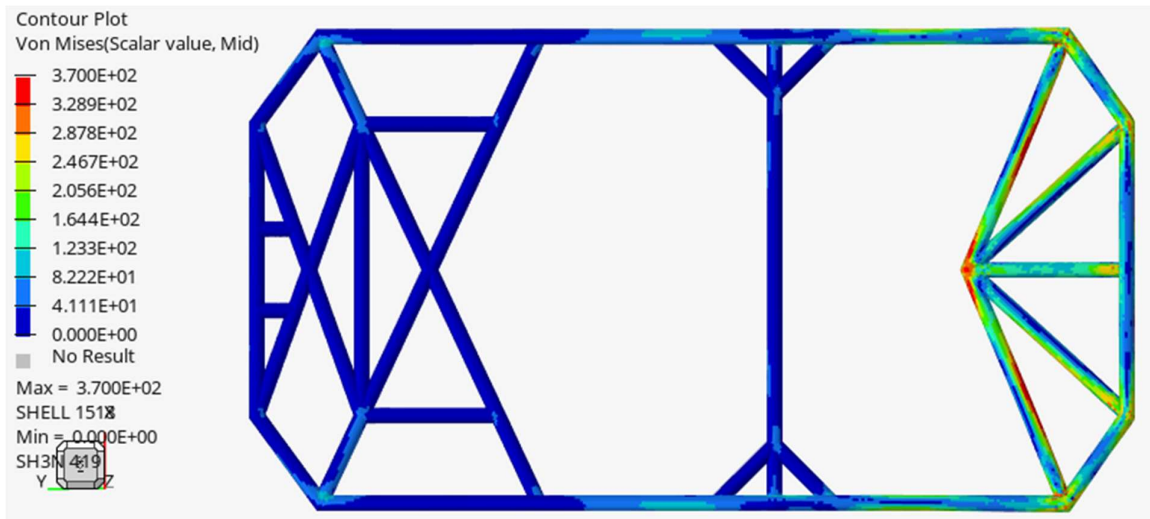


Εικόνα 5.6.5 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Άνοψη

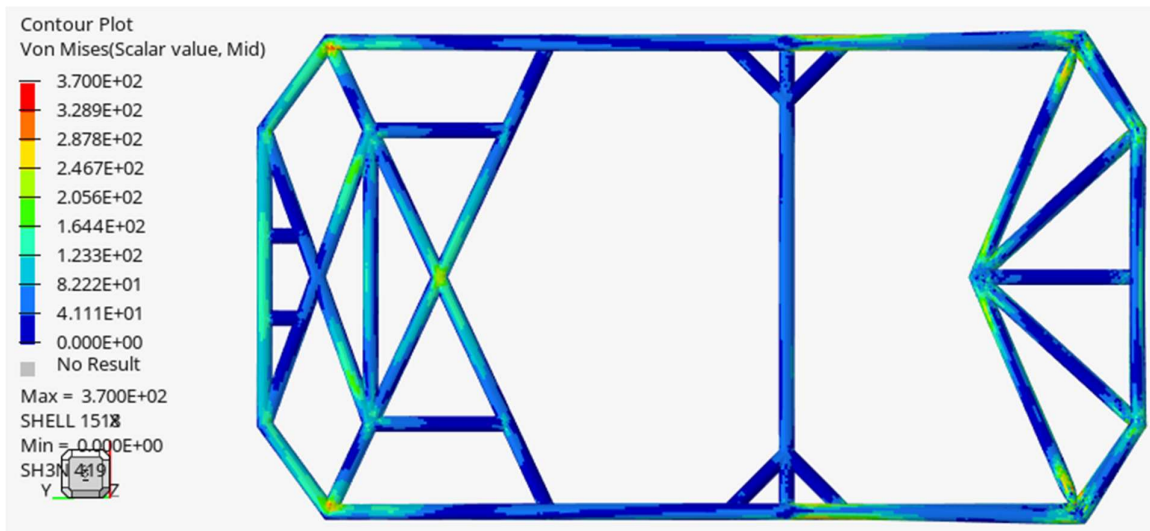


Εικόνα 5.6.6 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Πλάγια όψη

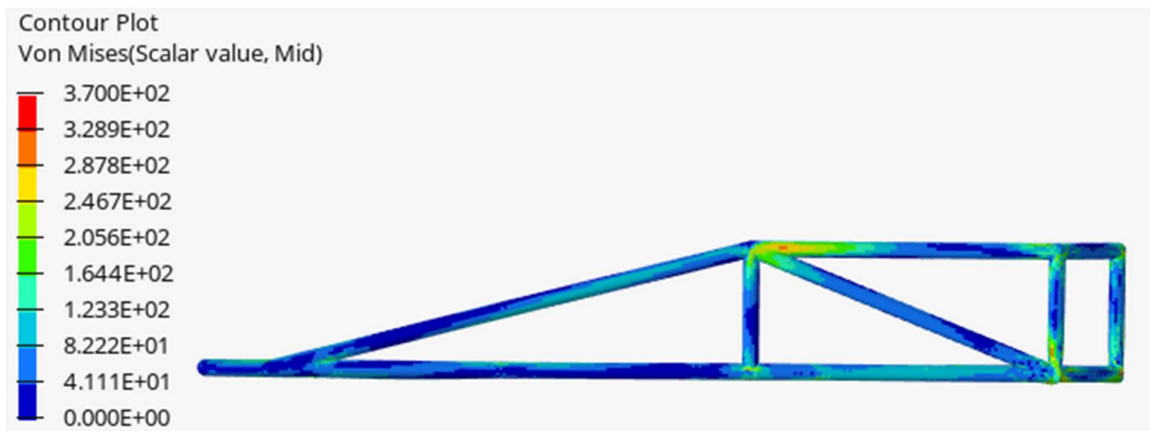
II) Οπίσθια μετωπική πρόσκρουση



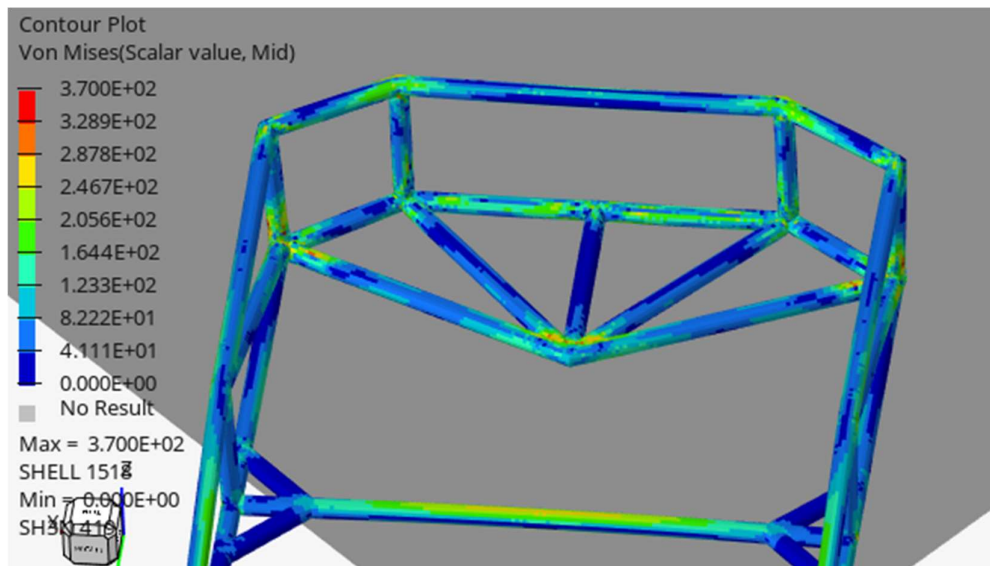
Εικόνα 5.6.7 Τάσεις Von Mises τη στιγμή της πρόσκρουσης - Ανοψη



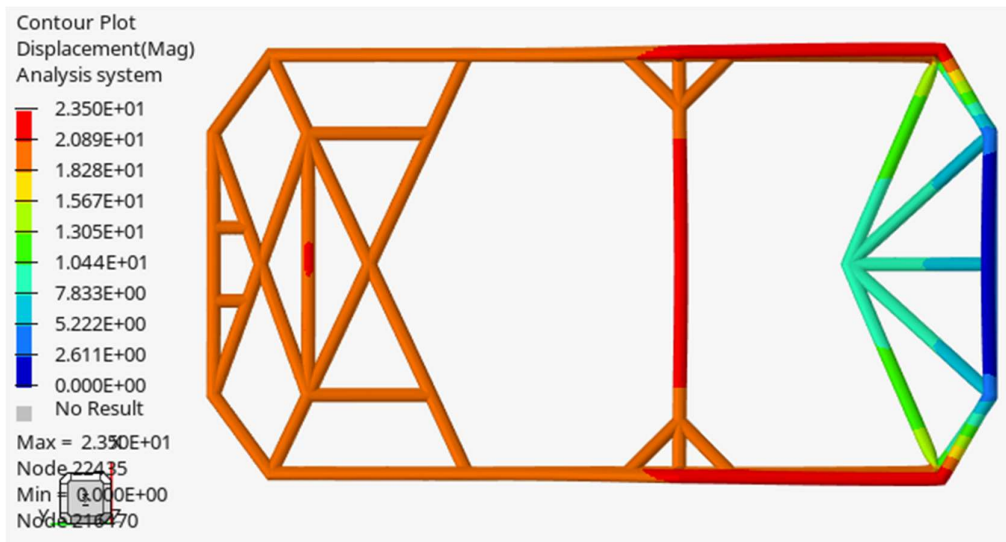
Εικόνα 5.6.8 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο – Ανοψη



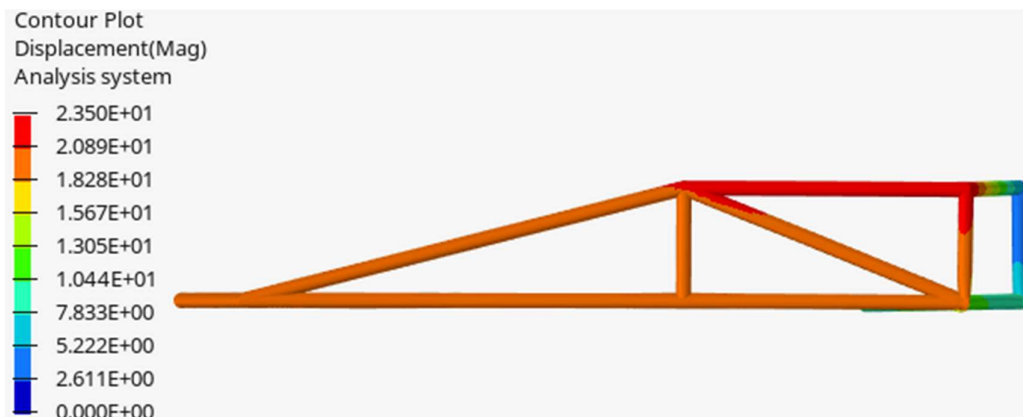
Εικόνα 5.6.9 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο - Πλάγια όψη



Εικόνα 5.6.10 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο – 3D όψη

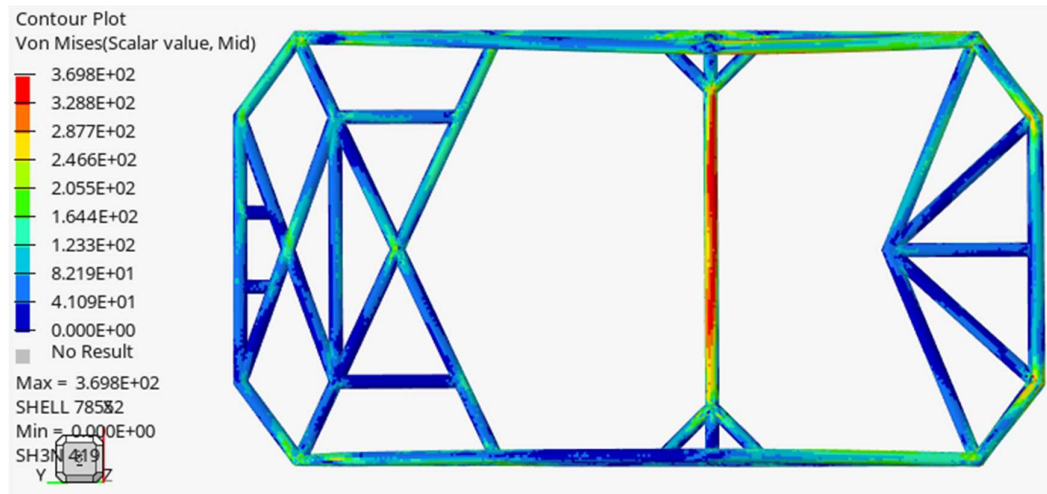


Εικόνα 5.6.11 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Άνοψη

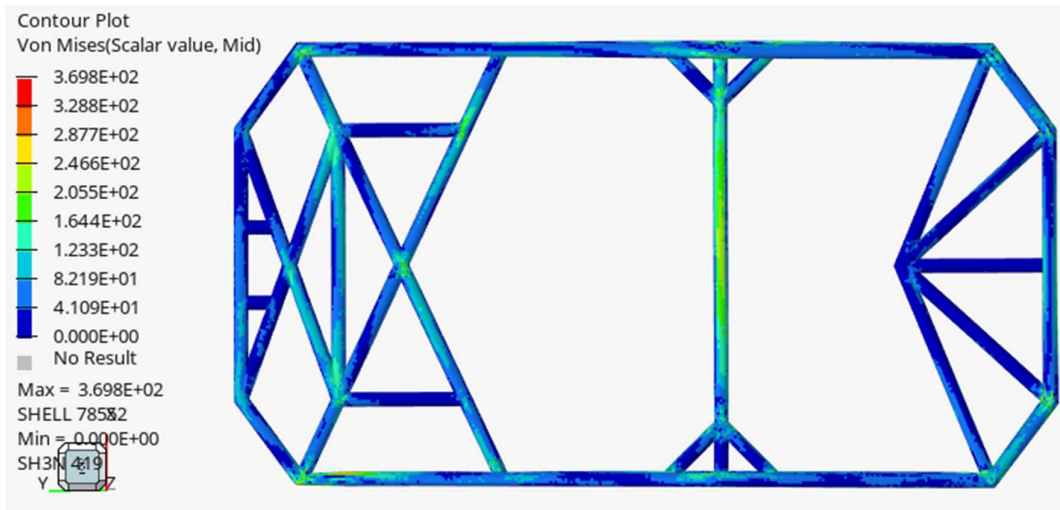


Εικόνα 5.6.12 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Πλάγια όψη

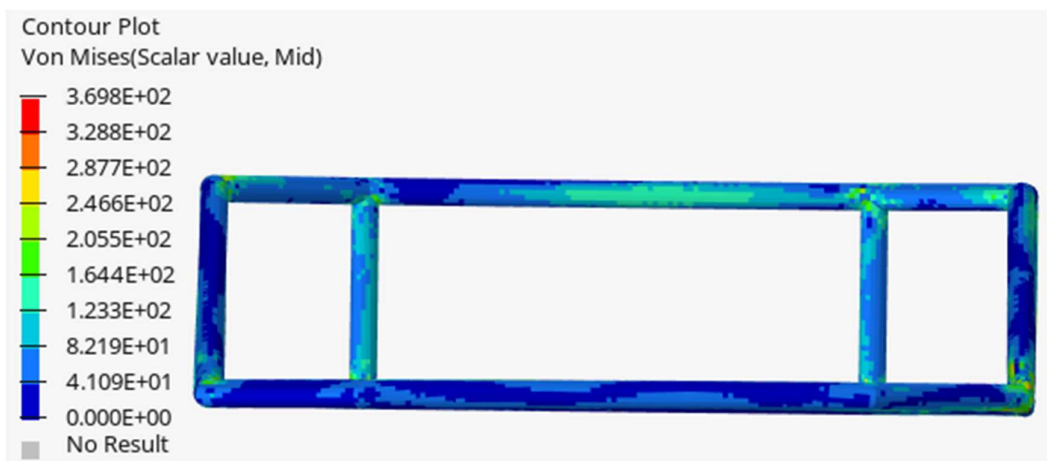
III) Πλευρική πρόσκρουση



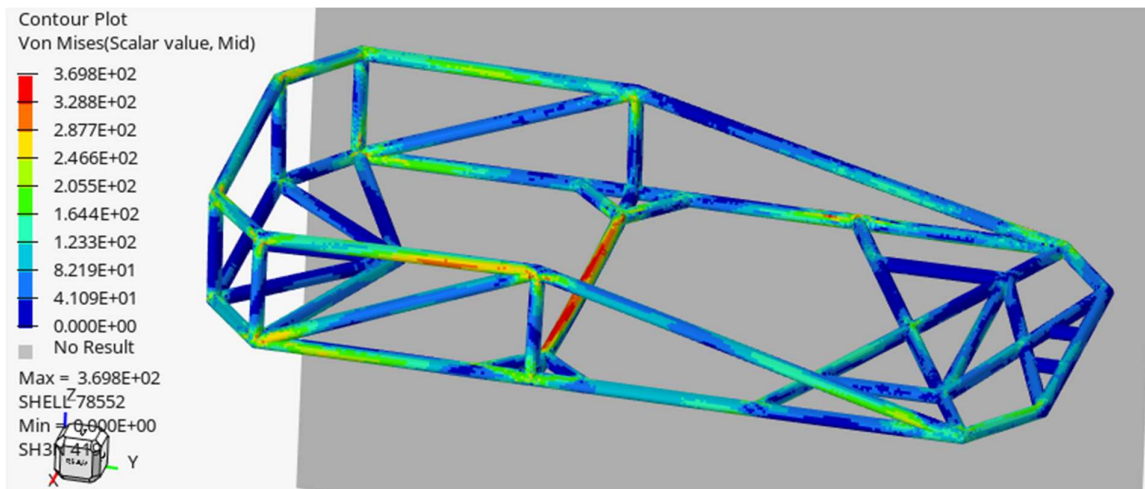
Εικόνα 5.6.13 Τάσεις Von Mises τη στιγμή της πρόσκρουσης - Άνοψη



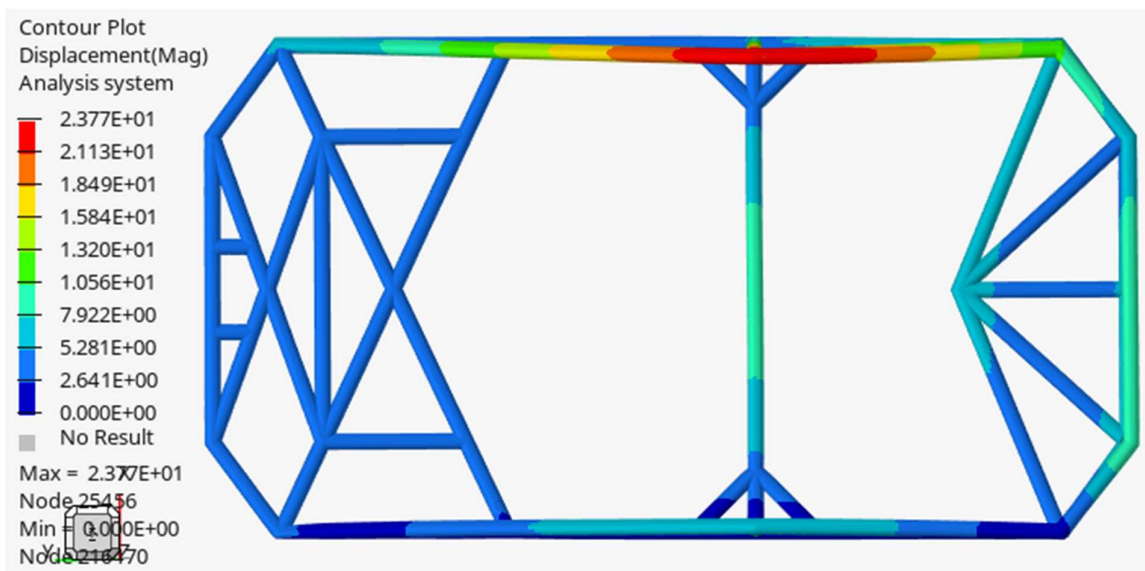
Εικόνα 5.6.14 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο – Άνοψη



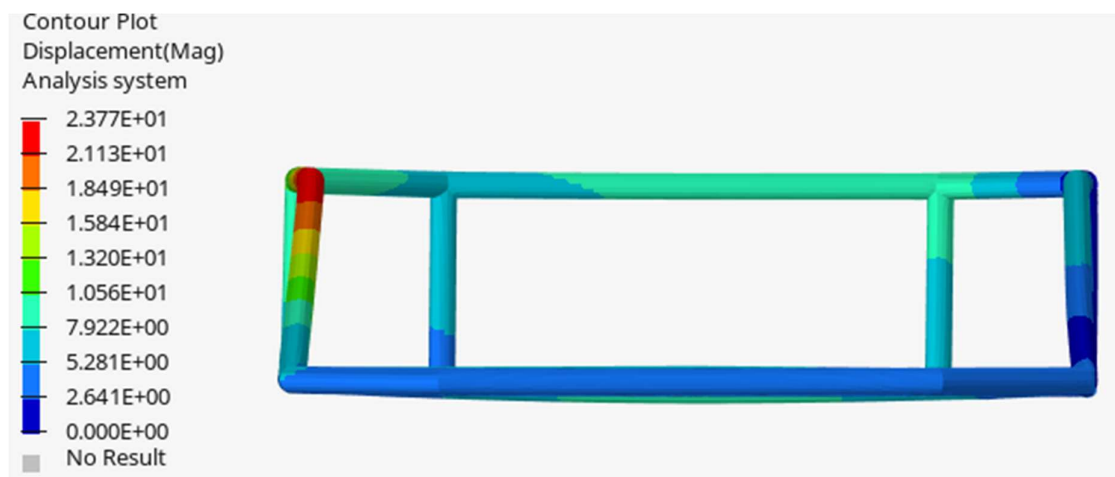
Εικόνα 4.6.15 Τάσεις Von Mises τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο – Πρόοψη



Εικόνα 5.6.16 Τάσεις Von Mises τη στιγμή της πρόσκρουσης – 3D όψη



Εικόνα 5.6.17 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Άνοψη

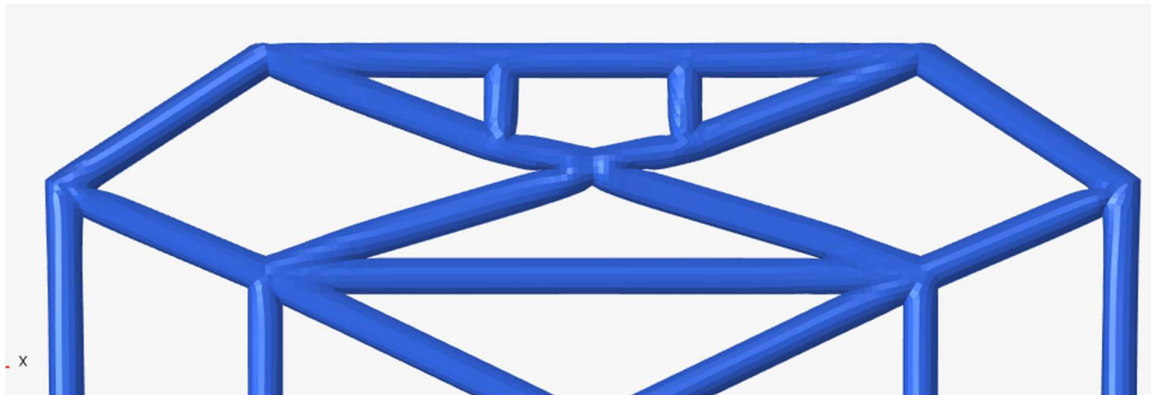


Εικόνα 5.6.18 Μετατοπίσεις τη στιγμή της πρόσκρουσης – Πρόσψη

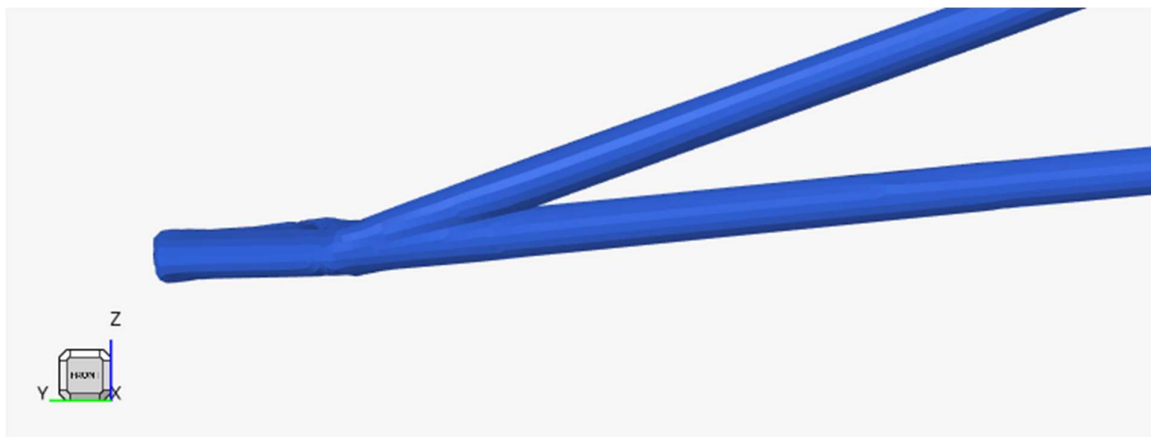
5.7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

1) Εμπρόσθια μετωπική πρόσκρουση

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επίλυσης, οι τάσεις Von Mises έχουν μέγιστη τιμή 370 MPa. Αυτό υποδεικνύει ότι έχει ξεπεραστεί το όριο διαρροής του υλικού (370 MPa) και έχει δημιουργηθεί πλαστική παραμόρφωση της γεωμετρίας. Όπως είναι φανερό στις προσομοιώσεις, τη στιγμή που χάνει επαφή με τον τοίχο, το σασί έχει υποστεί μια μικρής κλίμακας πλαστική παραμόρφωση στα δομικά μέρη του εμπρόσθιου τμήματος. Ωστόσο, η παραμόρφωση αυτή δεν θεωρείται επικίνδυνη για την ακεραιότητα του kart και την ασφάλεια του οδηγού, καθώς δεν προκαλείται αστοχία και η περιοχή όπου είναι εγκατεστημένος ο οδηγός είναι αμετάβλητη.



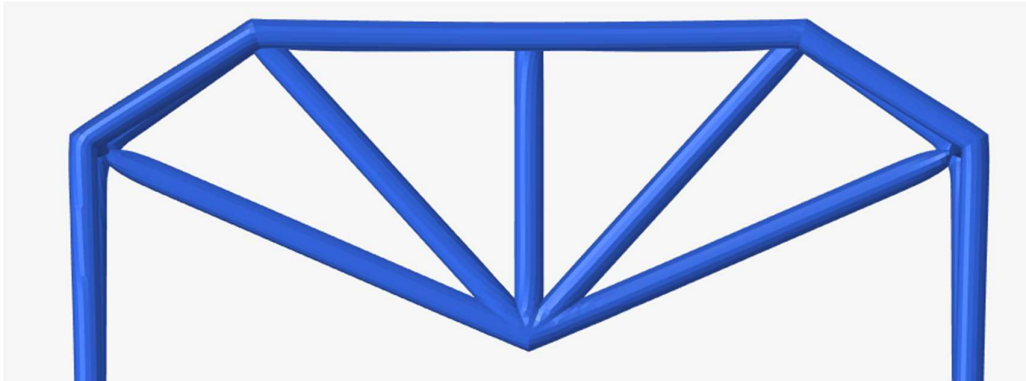
Εικόνα 5.7.1 Άνοψη εμπρόσθιου μέρους μετά τη πρόσκρουση



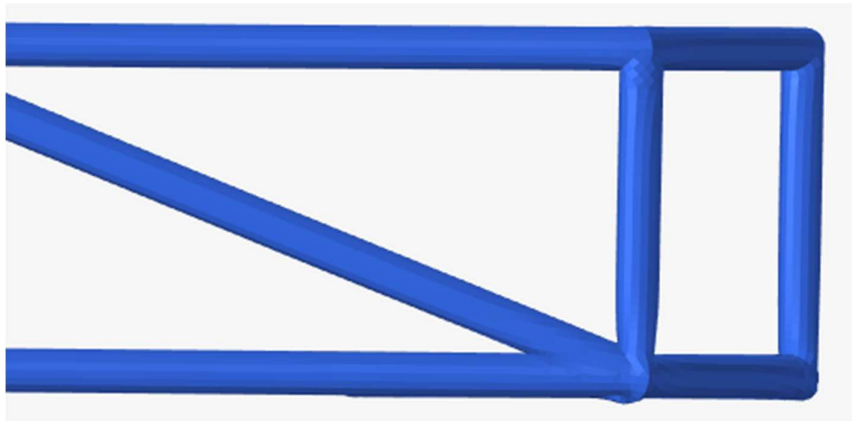
Εικόνα 5.7.2 Πλάγια όψη εμπρόσθιου μέρους μετά τη πρόσκρουση

II) Οπίσθια μετωπική πρόσκρουση

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο πρόσκρουσης, έτσι και σε αυτό, η μέγιστη τιμή των τάσεων Von Mises είναι 370 MPa. Το όριο διαρροής ξεπερνάται από τις τάσεις και η παραμόρφωση μετατρέπεται σε πλαστική. Η παραμόρφωση η οποία προκαλείται, παρατηρείται και σε αυτή τη περίπτωση στα γραφικά των προσομοιώσεων, και δεν προκαλεί μεγάλη στρέβλωση, Οπότε, δεν παραβιάζεται σημαντικά η σταθερότητα της δομής και η επικινδυνότητα του οδηγού.



Εικόνα 5.7.2 Άνοψη οπίσθιου μέρους μετά τη πρόσκρουση



Εικόνα 5.7.3 Πάγια όψη οπίσθιου μέρους μετά τη πρόσκρουση

III) Πλευρική πρόσκρουση

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, σε αυτή τη περίπτωση η μέγιστη τιμή των τάσεων Von Mises είναι 369.8 MPa, ελάχιστα κάτω από το όριο διαρροής του υλικού. Αυτό υποδεικνύει ότι η παραμόρφωση της πρόσκρουσης ήταν πλήρως ελαστική, και η γεωμετρία παραμένει πλήρως αμετάβλητη μετά τη χρονική στιγμή της πρόσκρουσης.

6. Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια τυπική εφαρμογή της μεθόδου της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αρχικά σχεδιάστηκε η γεωμετρία σε πρόγραμμα CAD και έπειτα αφού ορίστηκαν οι κατάλληλες συνθήκες φόρτισης και οι κατάλληλοι περιορισμοί στο λογισμικό βελτιστοποίησης Inspire, επιλύθηκε το πρόβλημα και αναδημιουργήθηκε η βέλτιστη τοπολογία της γεωμετρίας. Έπειτα, μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων επιβεβαιώθηκαν τα αποτελέσματα, και έτσι αποδεικνύεται εμπράκτως ότι η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι πράγματι ένα ισχυρό εργαλείο σχεδιασμού κατασκευών οι οποίες υπόκεινται είτε σε δυναμικά είτε σε στατικά φορτία.

Επίσης, μέσω της δυναμικής ανάλυσης πρόσκρουσης, επιτεύχθηκε ο στόχος τη μελέτης του σασί του αγωνιστικού kart, καθώς τα αποτελέσματα είναι επιθυμητά και διασφαλίζεται ότι δεν αστοχεί το υλικό της κατασκευής και ότι η ασφάλεια του οδηγού παραμένει στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο.

Ακόμη, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης θέτουν μια σημαντική βάση στη προοπτική της κατασκευής του μοντέλου που σχεδιάστηκε. Εφόσον τα αποτελέσματα των αναλύσεων εγκρίνονται, εάν το μοντέλο κατασκευαστεί και συναρμολογηθεί με τα λειτουργικά συστήματα ενός kart, τότε θέτει μέγιστη πιθανότητα να λάβει θετικά αποτελέσματα από τις δοκιμές ασφαλείας και συνεπώς να λάβει πιστοποίηση από τη Διεθνή Ομοσπονδία Αυτοκινήτου (FIA).

Τέλος, εάν υπάρχει δυνατότητα εξέλιξης της παρούσας διπλωματικής με περαιτέρω μελέτες, τότε θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον να αναλυθεί η βελτιστοποιημένη γεωμετρία υπό δυναμικά φορτία κάμψης και στρέψης. Τα φορτία αυτά ασκούνται λόγω απότομων στροφών και πέδησης, κατά τη διάρκεια αγώνων. Επίσης, με τη κατάλληλη υπολογιστική ισχύ υπάρχει η δυνατότητα σύνθεσης και επίλυσης προβλήματος πολλαπλών σωμάτων, κατά το οποίο θα αξιολογείται η συμπεριφορά του kart σε πιο εξειδικευμένα σενάρια φόρτισης.

7. Βιβλιογραφία

- [1].FIA / <https://www.fiakarting.com/page/homologation>
- [2].FIA - KARTING TECHNICAL REGULATIONS
- [3].https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=3a9cc570fbb24d119f08db22a53e2421
- [4].Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Martin P. Bendsøe, Ole Sigmund.
- [5].An Introduction to Structural Optimization, Peter W. Christensen, Anders Klarbring.
- [6].https://help.solidworks.com/2019/english/solidworks/cworks/c_simp_method_topology.htm
- [7].Analysis and use of SIMP method in optimization of a car hood design, Valeria Antonova, Stanislav Alekseev*, Aleksei Tarasov, Natalia Scheglova, Oleg Klyavin and Aleksei Borovkov, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195220 Saint Petersburg, Russia
- [8].Buggy Role Cage – Analysis and Design, Anil Babu Seelam, Ayub Khan Aaqif Ahmed, Krishnamurthy H. Sachidananda*, School of Engineering and IT, Manipal Academy of Higher Education
- [9].https://2022.help.altair.com/2022/inspire/en_us/topics/inspire/structure/analysis_results_view_t.htm
- [10].ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ, Διπλωματική εργασία, Καραγάλιου Βασιλική, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα 2022
- [11].https://www.researchgate.net/figure/An-example-vehicle-crash-simulation-with-finite-element-modeling_fig1_30859061
- [12].Χ. Γ. Προβατίδης, ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [13].Κ. Lee, Βασικές αρχές CAD / CAM / CAE, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2009.
- [14].https://2021.help.altair.com/2021/hwdesktop/hm/topics/pre_processing/entities/materials_r.htm
- [15].<https://altair.com/radioss>
- [16].https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/rad/topics/solvers/rad/unit_consistency_debug_r.htm
- [17].https://2021.help.altair.com/2021.2/hwdesktop/hwx/topics/pre_processing/entities/control_cards_r.htm
- [18].<https://getwelsim.medium.com/johnson-cook-model-and-its-curve-fitting-e2bce9c9094c>

[19].Rozvany, G. I. N. (2001). "A critical review of established methods of structural topology optimization." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(3), 164-175.

[20].Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών, Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης-Δημήτρης Ι. Παντελής, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.