



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Παραμετρική ανάλυση συμπεριφοράς αμαξώματος
τροχοφόρου οχήματος**

ΓΙΟΛΔΑΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΜ: 18392108

Επιβλέπων:

ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Αθήνα, Μάρτιος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

**Παραμετρική ανάλυση συμπεριφοράς αμαξώματος
τροχοφόρου οχήματος**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	
2	ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ	
3	ΡΑΠΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γιολλάσης Βασίλειος Του Χριστοφόρου, με αριθμό μητρώου 18392108 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα



Πίνακας περιεχομένων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1: Πλαίσια οχημάτων	7
Ορισμός και ιστορία	7
1.1 Τύποι πλαισίων	7
1.2 Πλαίσιο τύπου σκάλας	7
1.3 Αυτοφερόμενο πλαίσιο.....	8
1.4 Σωληνωτό πλαίσιο.....	9
1.5 Πλαίσιο Monocoque.....	9
1.6 Υβριδικό πλαίσιο	10
1.7 Σύγκριση τύπων πλαισίου	11
1.8 Υλικά κατασκευής πλαισίων.	11
1.8.1 Ατσάλι.....	11
1.8.2 Αλουμίνιο	12
1.8.3 Σύνθετα υλικά.....	12
1.9 Κριτήρια επιλογής υλικού.	12
1.10 Μέθοδοι παραγωγής.	13
1.10.1 Μηχανική άρθρωση.....	13
1.10.2 Συγκόλληση.....	13
Κεφάλαιο 2: Ακαμψία πλαισίου	15
2.1 Στρεπτική ακαμψία.....	15
2.2 Δυναμικά φορτία οφειλόμενα στις ανωμαλίες του δρόμου.....	15
2.2.1 Διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής του πλαισίου σε κόπωση	16
2.3 Μέτρηση στρεπτικής ακαμψίας πλαισίου	17
2.3.1 Υπολογισμός στρεπτικής ακαμψίας	18
2.4 Μέγεθος στρεπτικής ακαμψίας.....	19
2.4.1 Σχεδιασμός για υψηλή στρεπτική ακαμψία.....	20
2.4.2 Μέθοδοι αύξησης στρεπτικής ακαμψίας.....	20
2.5 Καμπτική δυσκαμψία	21
Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός πλαισίου	22
3.1 Υπολογισμός διατομών πλαισίου	22
3.2 Προσδιορισμός ακαμψίας πλαισίων	26
3.3 Formula Student πλαίσιο 1 (“base geometry”).....	28

3.4 Formula Student πλαίσιο 2 (“geometry”).....	37
3.5 Πλαίσιο τύπου Ladder (“Ladder”)	44
3.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων	48
Μελλοντικά πλάνα	49
Έργα που αναφέρονται.....	50

Εισαγωγή

Η στρεπτική ακαμψία αποτελεί ένα ουσιώδες κριτήριο στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των πλαισίων και συστημάτων μεταφοράς φορτίου όπου η ελαχιστοποίηση του βάρους και η αύξηση της απόδοσης αποτελούν απαραίτητους παράγοντες επιτυχίας. Η ορθή μελέτη και ανάλυση της στρεπτικής ακαμψίας επιτρέπει την βελτιστοποίηση της δομικής απόδοσης, ενώ παράλληλα διασφαλίζει την ασφάλεια και την αξιοπιστία των μηχανοκίνητων οχημάτων.

Σε αυτή την διπλωματική εργασία, εξετάζουμε την στρεπτική ακαμψία σε δύο διακριτές κατηγορίες πλαισίων: αυτά του τύπου Formula Student και του τύπου Ladder. Τα πλαίσια αυτά αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές και εφαρμογές, με τα πρώτα να είναι ειδικά σχεδιασμένα για τον αγώνα της Formula Student, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία και την κατασκευή.

Η προσέγγιση συνίσταται στην συστηματική ανάλυση και σύγκριση των δύο τύπων πλαισίων, με στόχο την εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν τη στρεπτική ακαμψία και την πρόταση βελτιώσεων για κάθε κατηγορία. Με την αξιοποίηση προηγμένων μεθόδων ανάλυσης και προσομοίωσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα που αποκαλύπτουν τις δυνατότητες και τις περιορισμούς των διαφόρων προσεγγίσεων στον σχεδιασμό των πλαισίων.

Τέλος, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ενίσχυση της κατανόησης της στρεπτικής ακαμψίας ως κρίσιμης παραμέτρου στον μηχανικό σχεδιασμό, προσφέροντας πρακτικές κατευθυντήριες γραμμές για τη βελτιστοποίηση των πλαισίων των δύο εν λόγω κατηγοριών και έγινε με την βοήθεια και συνεργασία του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών και Οχημάτων.

Κεφάλαιο 1: Πλαίσια οχημάτων

Ορισμός και ιστορία

Με την εμφάνιση των αυτοκινήτων στα τέλη του 18ου αιώνα, χρειάστηκε ένας αξιολογούμενος αιώνας για να τελειοποιηθούν και να τελειοποιηθούν τα αυτοκίνητα εξοπλισμένα με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Το 1895, οι Ηνωμένες Πολιτείες φιλοξένησαν τον εναρκτήριο αγώνα αυτοκινήτου τους, μια εκδήλωση που θα διαμόρφωσε το μέλλον της ανάπτυξης αυτοκινήτων. Πράγματι, οι αγώνες αυτοκινήτων χρησίμευσαν ως ισχυρός καταλύτης για την καινοτομία, αναγκάζοντας τους κατασκευαστές να προσπαθούν συνεχώς για μεγαλύτερη δύναμη, ταχύτητα και ασφάλεια. Στην καρδιά αυτών των εξελίξεων βρίσκεται το πλαίσιο, ένα κρίσιμο στοιχείο που παίζει πολύπλευρο ρόλο. Λειτουργώντας ως ενοποιητική δύναμη, το πλαίσιο συγκεντρώνει διάφορα στοιχεία του οχήματος, παρέχοντας παράλληλα ένα ασφαλές καταφύγιο για τους οδηγούς. Η ανθεκτικότητά του είναι υψίστης σημασίας, καθώς πρέπει να αντέχει σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας κατά τη διάρκεια της αναμενόμενης «διάρκειας ζωής» του, ωστόσο πρέπει επίσης να είναι ελαφρύ για βελτιστοποίηση της ταχύτητας. Επιπλέον, το πλαίσιο φέρει την ευθύνη στέγασης του συστήματος ανάρτησης, καθιστώντας απαραίτητο ένα πλαίσιο που ελαχιστοποιεί την κάμψη και τη συστροφή του αμαξώματος προς κάθε κατεύθυνση. Αυτή η ακαμψία επηρεάζει άμεσα τη δυναμική απόδοση του οχήματος, ενισχύοντας τόσο τη σταθερότητά του όσο και την αίσθηση ελέγχου του οδηγού ενώ βρίσκεται σε κίνηση. (1)

1.1 Τύποι πλαισίων

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και των αγώνων, έχει χρησιμοποιηθεί μια σειρά τύπων σασί, προσαρμοσμένων ώστε να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς, τις απαιτήσεις εφαρμογής και τα πρότυπα ασφαλείας και απόδοσης. Χάρη στη συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία και τις προόδους στις μεθόδους ανάλυσης και παραγωγής, το αγωνιστικό πλαίσιο γίνεται όλο και πιο αποτελεσματικό και περίπλοκο. Αυτή η ενότητα στοχεύει να διερευνήσει και να συγκρίνει τους διαφορετικούς τύπους σασί, ενώ επισημαίνει τα σχετικά κριτήρια επιλογής για τον καθένα. (1)

1.2 Πλαίσιο τύπου σκάλας

Το πλαίσιο τύπου σκάλας είναι το παλαιότερο είδος πλαισίου για οχήματα. Είναι πολύ απλό και βασικό στο σχεδιασμό. Πολλά οχήματα δεν χρησιμοποιούν πλέον αυτόν τον τύπο πλαισίου. Μοιάζει με μια σκάλα με δύο μακριά μέρη που συγκρατούν το μεγαλύτερο μέρος του βάρους του οχήματος. Αυτά τα μέρη βοηθούν επίσης το όχημα να παραμένει σταθερό όταν επιταχύνει ή επιβραδύνει. Αλλά τα πλαίσια σκάλας είναι αδύναμα όταν πρόκειται για την στρεπτική ακαμψία του πλαισίου. Υπάρχουν και άλλα μέρη που ονομάζονται εγκάρσια μέλη που βοηθούν το όχημα να παραμένει σταθερό από πλευρά σε πλευρά. (2) Το καλό με τα κουφώματα σκάλας είναι ότι είναι εύκολα και φθηνά στην κατασκευή τους. Επειδή όμως δεν έχουν μια τρισδιάστατη δομή, δεν είναι τόσο δυνατά ενάντια σε στρεπτική ακαμψία. (1)



Εικόνα 1.2.1: Πλαίσιο τύπου σκάλας

1.3 Αυτοφερόμενο πλαίσιο

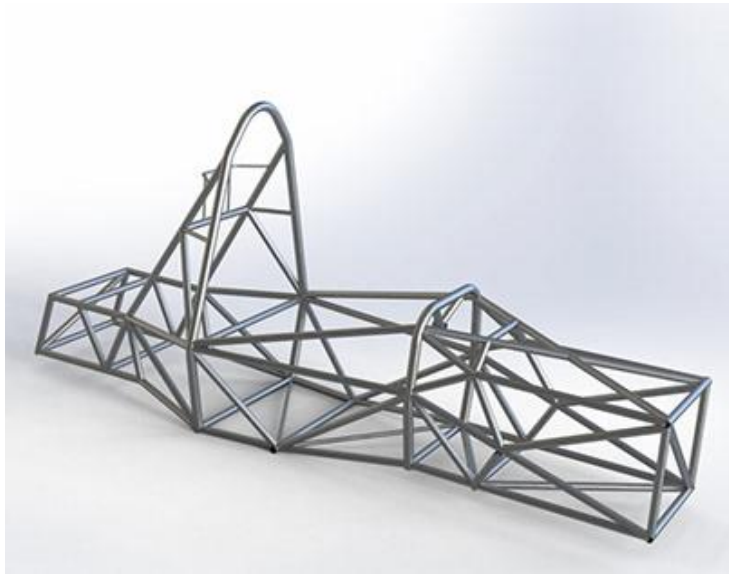
Το αυτοφερόμενο πλαίσιο, γνωστό και ως "unibody chassis", είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους πλαισίων σήμερα. Χρησιμοποιείται ευρέως κυρίως στα επιβατικά αυτοκίνητα. Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου πλαισίου αποτελείται από μια κύρια συμπαγή δομή που συνδυάζει το πλαίσιο και το αμάξωμα. Ολόκληρο το αμάξωμα του οχήματος αποτελείται από ένα χυτευμένο μεταλλικό πλαίσιο. Σε σύγκριση με το συμβατικό πλαίσιο και το αμάξωμα, η συγκόλληση είναι ευκολότερη. Το πλαίσιο είναι αυτοφερόμενο και έχει το πλεονέκτημα της υψηλής φέρουσας ικανότητας. Λόγω του πλήρως ολοκληρωμένου σχεδιασμού, το πλαίσιο κατανέμει τέλεια το φορτίο. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι η εξοικονόμηση χώρου και βάρους. Η ελαχιστοποίηση της σπατάλης υλικών και διαδικασιών παραγωγής είναι η δικαιολογία για τη μαζική παραγωγή. (3)



Εικόνα 1.3.1: Αυτοφερόμενο πλαίσιο

1.4 Σωληνωτό πλαίσιο

Τα σωληνωτά πλαίσια αποτελούνται από σωλήνες χάλυβα ή αλουμινίου που συνδέονται με αντίστοιχα τρίγωνα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι η τρισδιάστατη φύση του. Αυτός ο σχεδιασμός αυξάνει σημαντικά τη στρεπτική ακαμψία του οχήματος. Στην τριγωνική μορφή λαμβάνουν χώρα μόνο εφελκυσμός και συμπίεση. Τα στοιχεία αυτού του πλαισίου δεν υπόκεινται σε φορτία κάμψης και στρέψης. (4) Η χρήση του ανάγλυφου αυξάνει τις δυνατότητες απόδοσης του οχήματος. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη μιας πολύ άκαμπτης δομής προς όλες τις κατευθύνσεις ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση του αμαξώματος του οχήματος υπό την πίεση λειτουργίας. Αυτή η πτυχή βοηθά τη γεωμετρία της ανάρτησης να διατηρεί τη σωστή λειτουργία της για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

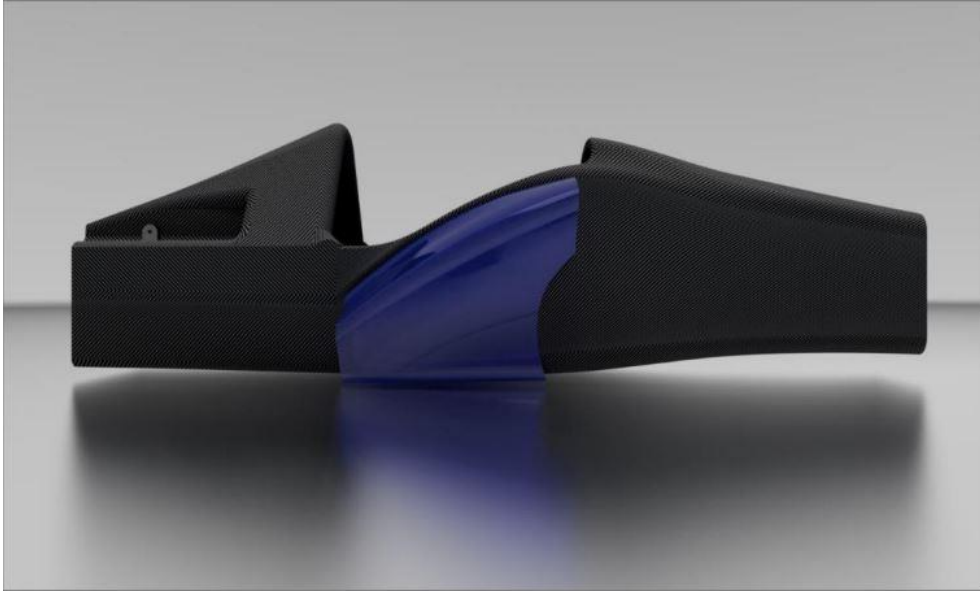


Εικόνα 1.4.1: Σωληνωτό πλαίσιο

1.5 Πλαίσιο Monocoque

Το πλαίσιο Monocoque είναι ένα ενιαίο πλαίσιο κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά και αποτελείται από μία κύρια δομή που χρησιμεύει ως αμάξωμα και πλαίσιο του οχήματος. Αποτελεί επίσης το εξωτερικό σχήμα του οχήματος. Αυτός ο τύπος πλαισίου έχει υψηλό λόγο ακαμψίας προς βάρος. Είναι συνήθως μια πολύ ελαφριά δομή, η οποία βελτιώνει επίσης τις επιδόσεις του οχήματος. Τα πλαίσια τύπου monocoque κατασκευάζονται από πολλαπλά σύνθετα στρώματα και απαιτούν ειδικές διαδικασίες κατασκευής.

Απαιτούν ειδικές διαδικασίες κατασκευής για την παραγωγή τους. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου πλαισίου είναι το υψηλό κόστος του.

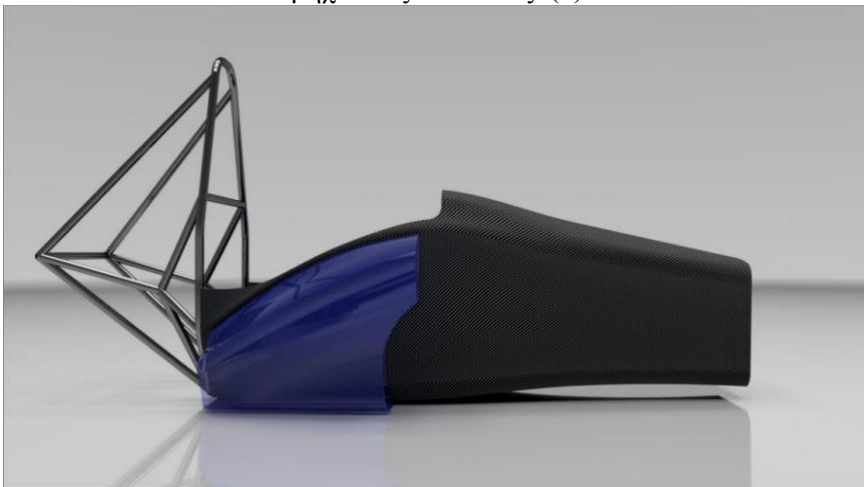


Εικόνα 1.5.1: Πλαίσιο τύπου Monocoque

1.6 Υβριδικό πλαίσιο

Στον διαγωνισμό Formula Student , οι έμπειρες ομάδες τείνουν να χρησιμοποιούν υβριδικά πλαίσια για να βελτιστοποιήσουν το βάρος και τα χαρακτηριστικά ακαμψίας των αυτοκινήτων τους. Ορισμένες ομάδες προτιμούν ένα υβριδικό σασί επειδή μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ένα αμάξωμα κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά (monocoque σασί). Μπροστινό μέρος.

Το μπροστινό μέρος του πλαισίου είναι σχεδιασμένο ως monocoque, ενώ το πίσω μέρος, όπου είναι τοποθετημένος ο κινητήρας, είναι σχεδιασμένο ως σωληνωτό πλαίσιο. Αυτοί οι δύο διαφορετικοί τύποι κατασκευής ενσωματώνονται με μηχανικές συνδέσεις. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις ομάδες που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ακόμη και αν το πλαίσιο είναι μια πλήρως μονοκόκ κατασκευή, η κύρια στεφάνη κύλισης πρέπει να είναι ένας συνεχής χαλύβδινος σωλήνας. Σε κάθε περίπτωση, οι ομάδες πρέπει να χρησιμοποιούν μηχανικές συνδέσεις. (1)



Εικόνα 1.6.1: Υβριδικό πλαίσιο

1.7 Σύγκριση τύπων πλαισίου

Λαμβάνοντας υπόψη τους δύο πιο βολικούς τύπους πλαισίου για αυτά τα χειροποίητα αυτοκίνητα, δηλαδή το σωληνωτό πλαίσιο και το πλαίσιο Monocoque, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πλαίσιο Monocoque προσφέρει εξαιρετική ακαμψία και είναι εξαιρετικά ελαφρύ. Ωστόσο, η πολύπλοκη δομή του και το υψηλότερο κόστος είναι σημαντικά μειονεκτήματα. Από την άλλη πλευρά, τα σωληνωτά πλαίσια είναι ελαφρώς βαρύτερα από τα πλαίσια Monocoque, αλλά εξακολουθούν να θεωρούνται ελαφριά και προσφέρουν μια πιο βιώσιμη λύση για αγώνες τύπου πανεπιστημίου. Κατά την αξιολόγηση των διαφορετικών τύπων πλαισίων και τη διεξαγωγή μιας ενδελεχούς ανάλυσης, γίνεται προφανές ότι το πλαίσιο σωληνωτού τύπου είναι η βέλτιστη επιλογή για ομάδες μαθητών τύπου. Αυτό οφείλεται στις εγγενείς αδυναμίες των πλαισίων τύπου σκάλας όσον αφορά τη στρέψη. Ενώ το αυτοφερόμενο πλαίσιο μπορεί να είναι κατάλληλο για μαζική παραγωγή, δεν είναι η πιο πρακτική επιλογή για χειροποίητα αυτοκίνητα όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε διαγωνισμούς μαθητικού τύπου. Σε τέτοιους αγώνες αγώνων, η επιτάχυνση παίζει καθοριστικό ρόλο και η ικανότητα του οχήματος να χειρίζεται διάφορες συνθήκες δρόμου είναι υψίστης σημασίας. Λαμβάνοντας υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες, γίνεται προφανές ότι το σωληνωτό πλαίσιο είναι η καταλληλότερη επιλογή για φοιτητικά οχήματα τύπου formula. Το συνοδευτικό γράφημα εμφανίζει τους βασικούς σχεδιαστικούς συνδυασμούς όσον αφορά την επιλογή πλαισίου και το μέγεθος του τροχού, με κοινές τιμές μονάδας ισχύος που χρησιμοποιούνται ως προσεγγίσεις. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές του πλαισίου μπορεί να διαφέρουν ελαφρώς, καθώς και το βάρος των τροχών, συμπεριλαμβανομένων των ελαστικών, αλλά αυτές οι διακυμάνσεις είναι ελάχιστες. Συμπερασματικά, το σωληνωτό πλαίσιο αποτελεί την πιο κομψή και πειστική επιλογή για φοιτητικά οχήματα τύπου formula, προσφέροντας την ιδανική ισορροπία βάρους, απόδοσης και οικονομικής τιμής.

1.8 Υλικά κατασκευής πλαισίων.

1.8.1 Ατσάλι

Το ατσάλι αποτελεί το υλικό που είναι περισσότερο χρησιμοποιούμενο στη βιομηχανία των αυτοκινήτων. Υπάρχουν διάφορα εξαρτήματα που παράγονται από ατσάλι. Η διαθεσιμότητά του και το σχετικά χαμηλό κόστος το καθιστούν πολύ κατάλληλο για την κατασκευή πλαισίων, μερικών τμημάτων του αμαξώματος και άλλων εξαρτημάτων. (5)

Εκτός από το χαμηλό κόστος, το ατσάλι έχει και άλλα πλεονεκτήματα. Είναι εύκολο στο να λάβει διάφορες μορφές, να κατασκευαστεί και να συγκολληθεί. Από την άλλη πλευρά, μια θετική ιδιότητα είναι ότι δεν προκύπτει τόσο εύκολα εύθραυστη περιοχή λόγω της θερμικής ζώνης που προκύπτει από την συγκόλληση.

Είναι αξιοσημείωτο ότι για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα οχήματα τύπου Formula Student, υπάρχουν κάποιες προδιαγραφές. Η ελάχιστη αντοχή στην τάση του υλικού πρέπει να είναι 305 MPa και η ελάχιστη αντοχή στην εφελκυστική δύναμη να είναι 365 MPa. Ο νέος συντελεστής ολίσθησης πρέπει να είναι τουλάχιστον 200 GPa. Επίσης, το ατσάλι πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 0,1% άνθρακα.

Κυρίως, υπάρχουν δύο τύποι ατσαλιού που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα Formula Student. Το AISI 4130 ατσάλι έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ το μαλακό ατσάλι έχει σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Τα ατσάλια υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι πιο ανθεκτικά, αλλά είναι ακριβά και εμφανίζουν ορισμένες δυσκολίες στην παραγωγή και τη συγκόλληση. Αντίθετα, τα χαμηλού άνθρακα ατσάλια όπως τα AISI 1010, 1020, είναι ευκολότερο να συγκολληθούν και δεν απαιτούν αναγκαία θερμική επεξεργασία.

Επιπλέον, είναι ευκολότερο να βαφούν και να επισκευαστούν τα ατσάλια χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. (6)

1.8.2 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο αποτελεί το δεύτερο πιο δημοφιλές υλικό στην αυτοκινητοβιομηχανία. Το τελευταίο διάστημα, η χρήση του αλουμινίου στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει αυξηθεί σημαντικά. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το αλουμίνιο έχει πολύ μικρότερο βάρος από το χάλυβα, καθώς είναι σχεδόν τρεις φορές ελαφρύτερο. Επιπλέον, το αλουμίνιο είναι εύπλαστο και ελαστικό ως υλικό. Παράλληλα, διακρίνεται για την ανθεκτικότητά του στη διάβρωση και το γεγονός ότι δεν υποστηρίζει σκουριά.

Αν και το αλουμίνιο δεν είναι τόσο σκληρό όσο ο χάλυβας, προσφέρει επαρκή αντοχή σε ποικίλες εφαρμογές. Ωστόσο, βάσει των γενικών χαρακτηριστικών του αλουμινίου, απαιτούνται μεγαλύτερες διαστάσεις για να εξασφαλιστεί η αναγκαία ακαμψία. Σημαντικό αρνητικό στοιχείο του αλουμινίου είναι η υψηλή τιμή του, καθώς είναι ακριβότερο από το χάλυβα. Αυτό μπορεί να μην αποτελεί πρόβλημα για αγωνιστικά αυτοκίνητα ή πολυτελή αθλητικά αυτοκίνητα, αλλά δεν είναι κατάλληλο για τη μαζική παραγωγή οχημάτων. Επιπλέον, η συγκόλληση του αλουμινίου είναι πιο περίπλοκη διαδικασία. (3)

1.8.3 Σύνθετα υλικά

Στον γενικό όρο, τα σύνθετα υλικά δημιουργούνται με τη χρήση δύο ή περισσότερων στοιχείων, και αποκτούν τις ιδιότητες και τις προδιαγραφές τους μέσω μιας συνδυαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, διαφέρουν από κάθε ένα από τα συστατικά τους. Η χρήση των σύνθετων υλικών αυξάνεται σταθερά καθημερινά. Τα σύνθετα πλαίσια κυρίως χρησιμοποιούνται σε υψηλού επιπέδου εφαρμογές, όπως στη Formula 1, σε ορισμένες σειρές αγώνων, και σε υψηλής κλάσης αυτοκίνητα. Έχουν εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής και είναι ελαφριά σε σχέση με τα μέταλλα. Επιπλέον, είναι δυνατό να παραχθούν σύνθετα υλικά που είναι κατάλληλα για ειδικές εφαρμογές, και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά είναι προσαρμόσιμα. Η εσωτερική δομή τους προσφέρει εξαιρετική αντοχή στον προσδιορισμένο κατευθυντήρα. Ωστόσο, το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι η υψηλή τιμή και η ανάγκη για περίπλοκες διαδικασίες παραγωγής.

1.9 Κριτήρια επιλογής υλικού.

Στον διαγωνισμό των φοιτητών Formula, το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι ο χάλυβας, με τους κανόνες να ορίζουν τις προδιαγραφές για τους κραματοποιημένους χάλυβες. Παράλληλα, είναι εφικτή η εξεταστική χρήση άλλων υλικών, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι εναλλακτικοί κανόνες πλαισίου. Υπάρχει σημαντικός αριθμός κανόνων και απαιτούμενων δοκιμών για τη χρήση εναλλακτικών υλικών.

Οι συνηθέστερες επιλογές υλικού πλαισίου στις ομάδες φοιτητών Formula είναι ο χάλυβας και τα σύνθετα υλικά. Καθώς η χρήση των σύνθετων υλικών αυξάνεται, περισσότερο από το ήμισυ των ομάδων προτιμούν τον χάλυβα για το πλαίσιο τους. Το αλουμίνιο προσφέρει το πλεονέκτημα της ελαφρότητας σε σχέση με τον χάλυβα και της χαμηλότερης τιμής από τα σύνθετα υλικά. Ωστόσο, η επιλογή αλουμινίου δυσκολεύεται από την ανάγκη εκπλήρωσης των κανονισμών. Για να εξασφαλίσει επαρκή ακαμψία, απαιτείται το χρήση μεγαλύτερων διαστάσεων αλουμινίου, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί ιδανική επιλογή. Η αύξηση του όγκου του υλικού οδηγεί σε αυξημένη τιμή αγοράς.

Τα σύνθετα πλαίσια αποτελούν εξαιρετική επιλογή για τις ομάδες, καθώς συνδυάζουν ελαφρό βάρος και ανθεκτικότητα. Ωστόσο, τα σύνθετα πλαίσια Monocoque είναι απαιτητικά στην

παραγωγή και έχουν υψηλό κόστος. Η πιο οικονομική επιλογή είναι το πλαίσιο τύπου σωληνωτό από χάλυβα. Η διαδικασία κατασκευής και προετοιμασίας των σωληνών είναι ευκολότερη, και με τη χρήση των κατάλληλων υλικών δεν απαιτείται επιπλέον επεξεργασία. Εν κατακλείδι, ο χάλυβας είναι προσιτός και ευρέως διαθέσιμος, αν και παρουσιάζει μεγαλύτερο βάρος από το αλουμίνιο και υψηλότερες τιμές αντοχής και εφελκυσμού. (1)

1.10 Μέθοδοι παραγωγής.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του πλαισίου, είναι απαραίτητο το πλαίσιο να διαθέτει υψηλή ανθεκτικότητα και ακαμψία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σωστή επιλογή και εφαρμογή των μεθόδων παραγωγής, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του σχεδιασμού. Υπάρχει ποικιλία μεθόδων για την κατασκευή πλαισίων, ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου που επιλέγεται. Κατά την επιλογή της μεθόδου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όχι μόνο η αντοχή και η ακαμψία του πλαισίου, αλλά και οι διαδικασίες παραγωγής και οι δυνατότητες του οχήματος στη συνέχεια.

Καθώς ο σχεδιασμός εξελίσσεται, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι επιπτώσεις των επιλογών παραγωγής στην τελική απόδοση του οχήματος. Συγκεκριμένα, πρέπει να εξετάζεται η δύναμη και η ακαμψία του πλαισίου, καθώς και η ολοκλήρωση του σώματος του οχήματος. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διαδικασίες παραγωγής και οι δυνατότητες επισκευής του οχήματος μετά την παραγωγή.

Είναι εξίσου σημαντικό να εξετάζονται πτυχές όπως η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και επισκευής του οχήματος, καθώς αυτές επηρεάζουν τη συντηρησιμότητα και την οικονομική διαχείριση στην παρακολούθηση και συντήρηση του οχήματος. Συνοψίζοντας, ο σχεδιασμός του πλαισίου απαιτεί την ισορροπημένη επιλογή μεθόδων παραγωγής, ώστε να επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες ανθεκτικότητα, ακαμψία και ευκολία συντήρησης.

1.10.1 Μηχανική άρθρωση.

Η μηχανική άρθρωση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο ή περισσότερων μερών του πλαισίου με τρόπο που να επιτρέπει κίνηση ανάμεσα σε αυτά. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη όταν η ενσωμάτωση των μερών δεν είναι μόνιμη και πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης, αποσυναρμολόγησης ή ρύθμισης αυτών των μερών.

Ένα παράδειγμα είναι όταν υπάρχει ανάγκη να διατηρηθεί ένα κρίσιμο κομμάτι του πλαισίου αλώβητο, αλλά τα γύρω μέρη χρειάζονται ενδεχομένως να αντικατασταθούν ή να ρυθμιστούν. Σε αυτήν την περίπτωση, μια μηχανική άρθρωση μπορεί να επιτρέψει την κίνηση ανάμεσα στα μέρη, ενώ το κρίσιμο κομμάτι παραμένει ασφαλές και ακέραιο.

Η σχεδίαση της μηχανικής άρθρωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού. Συχνά, η άρθρωση σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι το ασθενέστερο σημείο του συστήματος, ώστε να αποτυγχάνει πρώτη σε περίπτωση υπερφόρτωσης. Αυτό προστατεύει τα πιο σημαντικά μέρη του πλαισίου από βλάβες. Επιπλέον, η μηχανική άρθρωση είναι συνήθως ευκολότερη και οικονομικότερη να αντικατασταθεί ή να επισκευαστεί σε σχέση με πιο σύνθετα μέρη του πλαισίου.

Συνολικά, η μηχανική άρθρωση είναι μια σημαντική σχεδιαστική επιλογή που μπορεί να προσφέρει ευελιξία, ασφάλεια και ευκολία συντήρησης στην κατασκευή και λειτουργία του πλαισίου.

1.10.2 Συγκόλληση

Η συγκόλληση αποτελεί σημαντική μέθοδο σύνδεσης στον τομέα του Formula Student. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πλαισίων των οχημάτων. Η MIG (Metal Inert Gas) συγκόλληση και η TIG (Tungsten Inert Gas) συγκόλληση είναι δύο κοινοί τύποι. Η MIG συγκόλληση προσφέρει γρήγορο ρυθμό

παραγωγής και είναι κατάλληλη για μεγάλες επιφάνειες. Από την άλλη, η TIG συγκόλληση είναι πιο ακριβής και δίνει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα, καθιστώντας την κατάλληλη για λεπτές και απαιτητικές συνδέσεις. Η επιλογή του τύπου συγκόλλησης εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κατασκευής, την ανθεκτικότητα και την ευκολία συντήρησης.

Κεφάλαιο 2: Ακαμψία πλαισίου

2.1 Στρεπτική ακαμψία

Στην περίπτωση της κάμψης από το μέγιστο βέλος κάμψης και τη γωνία περιστροφής κατά το μήκος του μεταξονίου, η ικανότητα του πλαισίου να αντιστέκεται στα μεταβαλλόμενα φορτία περιγράφεται. Παρόλα αυτά, οι τιμές που προκύπτουν από υπολογισμούς ή πειράματα του μέγιστου βέλους και της γωνίας περιστροφής δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση με άλλα αυτοκίνητα που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Γι' αυτό εισάγονται οι έννοιες της στρέψης, της κάμψης και των ειδικών δυσκαμψιών.

Η **στρεπτική δυσκαμψία** αναφέρεται στη ροπή που απαιτείται για να στραφεί ένα σύστημα κατά μία μοναδιαία γωνία γύρω από τον άξονα του μεταξονίου ή, αλλιώς, είναι ο λόγος της ροπής προς τη λαμβανόμενη γωνία περιστροφής.

Η **καμπτική δυσκαμψία** αντιστοιχεί στο φορτίο που απαιτείται για να προκληθεί κάμψη στο πλαίσιο κατά μία μοναδιαία μονάδα βύθισης, ή αλλιώς είναι ο λόγος του φορτίου προς το μέγιστο βέλος κάμψης.

Η **ειδική στρεπτική δυσκαμψία** αναφέρεται στη ροπή που απαιτείται για να περιστρέψει ένα τμήμα του πλαισίου με μοναδιαίο μήκος κατά μία μοναδιαία γωνία, ή αλλιώς είναι ο λόγος της περιστροφής προς την γωνία περιστροφής γύρω από τον άξονα του μεταξονίου του αυτοκινήτου, πολλαπλασιασμένος με το μεταξόνιο.

Η **ειδική καμπτική δυσκαμψία** (αντιστοιχεί στο γινόμενο EI της δοκού) αναφέρεται στο φορτίο που απαιτείται για να προκληθεί κάμψη σε ένα τμήμα ενός συστήματος με μοναδιαίο μήκος, έτσι ώστε το βέλος κάμψης να είναι μια μονάδα. Διαφορετικά, αντιστοιχεί στον λόγο του φορτίου που απαιτείται για την μέγιστη κάμψη, πολλαπλασιασμένος με το τρίτη δύναμη του υψωμένου μεταξονίου.

Πίνακας 2-1-1: Μονάδες μέτρησης ειδών δυσκαμψίας

Στρεπτική Δυσκαμψία	Nm/deg
Καμπτική Δυσκαμψία	N/mm
Ειδική Στρεπτική Δυσκαμψία	Nm ² /deg
Ειδική Καμπτική Δυσκαμψία	Nm ³ /mm

Βάσει των παραπάνω, κατά την κατασκευή ενός οχήματος, είτε αυτό περιλαμβάνει πλαίσιο και αμάξωμα, είτε αποτελείται μόνο από πλαίσιο, είτε είναι αυτοφερόμενο, απαιτείται η διασφάλιση του κατάλληλου επιπέδου δυσκαμψίας (ή ευκαμψίας) για να εξασφαλιστεί η απαραίτητη μακροζωία του οχήματος. (7)

2.2 Δυναμικά φορτία οφειλόμενα στις ανωμαλίες του δρόμου

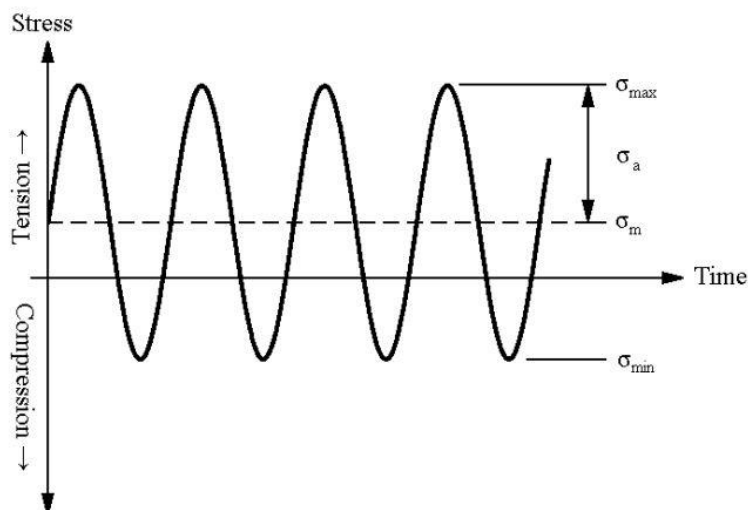
Η κίνηση του οχήματος συνεπάγεται συνεχείς αλλαγές στις δυνάμεις που ασκούνται ανάμεσα στους τροχούς και τον δρόμο. Αυτές οι αλλαγές εξαρτώνται από την αδράνεια και την

ελαστικότητα των δομικών στοιχείων του αυτοκινήτου, καθώς και από το σχήμα και τις διαστάσεις των ανωμαλιών του δρόμου. Η πρόκληση σε αυτήν την ανάλυση πηγάζει από την αδυναμία να αποτυπωθούν με ακρίβεια οι ανωμαλίες του δρόμου. Ωστόσο, σήμερα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί μέσω της χρήσης στοχαστικών διαδικασιών. Προς την κατεύθυνση μιας πιο ακριβούς ανάλυσης, πραγματοποιείται η προσομοίωση ενός τετάρτου του οχήματος με κάθε τροχό (περιλαμβανομένου του οδοστρώματος, των ελαστικών, των ελατηρίων, των αποσβεστήρων και της αναρτημένης μάζας). (7)

2.2.1 Διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής του πλαισίου σε κόπωση

Τα δομικά στοιχεία ενός αυτοκινήτου υποστηρίζουν δυναμικά φορτία, που είναι δηλαδή δυνάμεις που αλλάζουν στον χρόνο. Έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά ότι τα υλικά υπό τέτοιου είδους φόρτιση υποχωρούν λόγω κόπωσης μετά από έναν αριθμό κύκλων φόρτισης, ακόμη κι αν οι εφαρμοζόμενες τάσεις είναι μικρότερες από το όριο αντοχής. Αυτό σημαίνει πως ένα στοιχείο έχει διαφορετική μηχανική συμπεριφορά όταν υποβάλλεται σε δυναμικές ή στατικές φορτίσεις. Οι πρώτες ενδείξεις κόπωσης μπορεί να εκδηλωθούν με μικρορωγμές σε διάφορα σημεία. Καθώς ο χρόνος προχωρά, η δυναμική απόκριση των μεταλλικών μερών στις μεταβαλλόμενες τάσεις συνεπάγεται τη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού και μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό ρωγμών. Ο ανάπτυξη και η τελική αποτυχία του υλικού αποκαλούνται κόπωση του υλικού. Η αντοχή στην κόπωση επηρεάζεται από τον τύπο της παραμόρφωσης (κάμψη ή στρέψη) και τις μεταβολές των τάσεων με τον χρόνο. (7)

Η απλούστερη εναλλακτική φόρτιση μπορεί να παρουσιαστεί σε μορφή ενός ημιτονοειδούς κύματος. Μπορεί να επιβληθεί μια μέση τάση, συμβολικά σημειούμενη ως σ_m , στο στοιχείο, λειτουργώντας ως προένταση γύρω από την οποία πραγματοποιείται μια ταλάντωση με πλάτος κύματος σημειούμενο ως σ_a . Η τάση μεταβάλλεται μεταξύ μιας μέγιστης τιμής σ_{max} και μιας ελάχιστης τιμής σ_{min} , διατηρώντας την ακόμη έγκυρη την εξίσωση:



Σχήμα 2.2.1.1: Αρμονική ταλάντωση κόπωσης

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2}$$

Χαρακτηριστική περίπτωση δυναμικής φόρτισης αποτελεί η επαναλαμβανόμενη φόρτιση σε εφελκυσμό και θλίψη, η οποία χαρακτηρίζεται με $\sigma_{min}=0$ και

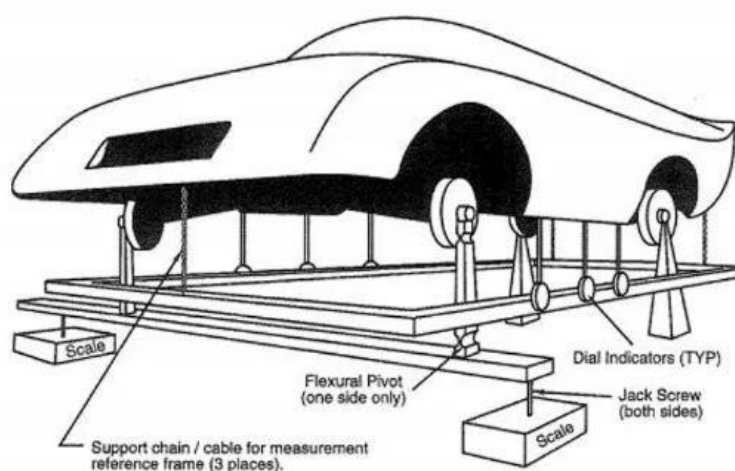
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2} = \sigma_a$$

η εναλλακτική φόρτιση η οποία χαρακτηρίζεται με $\sigma_m=0$ και

$$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \sigma_a$$

2.3 Μέτρηση στρεπτικής ακαμψίας πλαισίου

Η στρεπτική δυσκαμψία μπορεί να μετρηθεί με διάφορους τρόπους. Μία μέθοδος τεκμηριώνεται στην αναφορά του “William F.Milliken & Douglas L.Milliken” και φαίνεται στο Σχήμα 2.3.1 η οποία θα συνοψιστεί παρακάτω:



Σχήμα 2.3.1: Διάταξη πλαισίου για έλεγχο στρεπτικής ακαμψίας

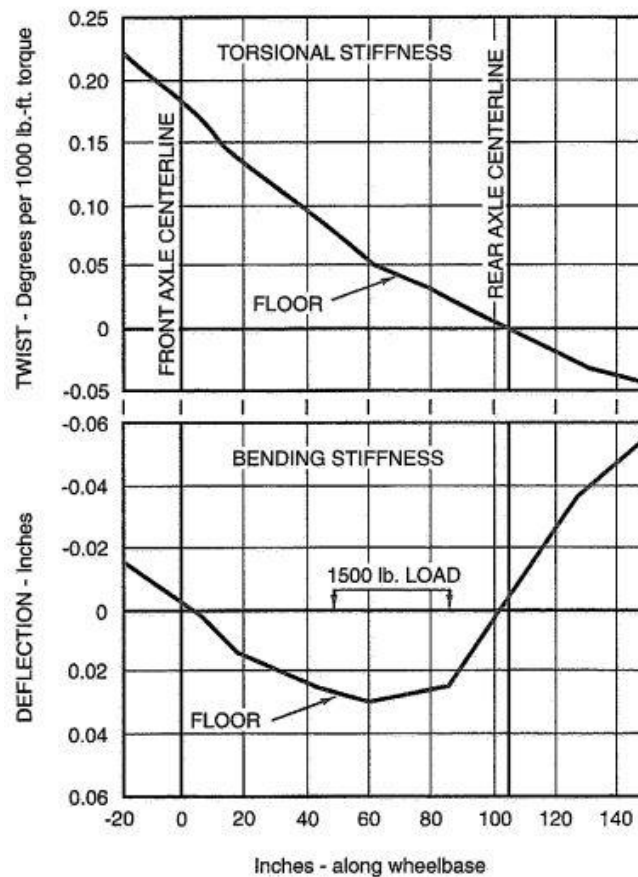
Για τη διεξαγωγή αυτού του πειράματος τοποθετούνται αντιδράσεις στήριξης στον εμπρός και πίσω άξονα αντίστοιχα. Το πίσω μέρος του οχήματος συνδέεται πλήρως με το έδαφος ή με μια άλλη ενδιάμεση πλάκα που είναι επίσης συνδεδεμένη με το έδαφος. Αν το όχημα χρησιμοποιεί ελλειψοειδή ελατήρια, αυτά αντικαθίστανται από άκαμπτες ράβδους στα σημεία σύνδεσης με το πλαίσιο. Εάν χρησιμοποιεί σπειροειδή ελατήρια, οι βάσεις πάκτωσης τοποθετούνται στα ανώτερα σημεία στήριξης της ανάρτησης.

Στο εμπρόσθιο μέρος του οχήματος, τοποθετούνται ράβδοι που συνδέονται στα σημεία κάτω από τον άξονα. Αυτές οι ράβδοι είναι τύπου ρυθμιζόμενου κοχλία και χρησιμοποιούνται για να εφαρμόσουν ροπή μέσω αυτών. Ένα από τα εμπρόσθια σημεία στήριξης είναι πλήρως συνδεδεμένο με το έδαφος, ενώ το άλλο μπορεί να ρυθμιστεί με την συσφιγκτική κίνηση του κοχλία. Όπως και στο πίσω μέρος, και μπροστά, οι αναρτήσεις αντικαθίστανται με άκαμπτους αποστάτες.

Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης κατά τη στρέψη, τοποθετούνται όργανα σε ένα άκαμπτο υποπλαίσιο κάτω από το όχημα. Αυτά τα όργανα τοποθετούνται σε ζεύγη αριστερά και δεξιά σε σημεία ενδιαφέροντος κατά μήκος των πλευρών του οχήματος. Το άκαμπτο πλαίσιο κρέμεται από το όχημα σε τρία σημεία: ένα ανάμεσα στους μπροστινούς τροχούς και δύο στο επίπεδο του πίσω άξονα. Το πλαίσιο έρχεται σε επαφή για να διατηρήσει και τα τέσσερα άκρα

τα οποία συνδέονται με τους άξονες σε επαφή, καθώς είναι παραμορφωμένο λόγω στρέψης. (2)

Οι μετρήσεις κλίμακας πραγματοποιούνται πριν και μετά την εφαρμογή της ροπής, και η εφαρμοζόμενη ροπή υπολογίζεται ως η μισή διαφορά ανάγνωσης της κλίμακας πάνω στην απόσταση μεταξύ των μπροστινών άκρων. Εάν η απόσταση είναι σε πόδια (ft) και οι μετρήσεις κλίμακας είναι σε λίβρες (lb), τότε η ροπή υπολογίζεται σε λίβρες-πόδια (lb-ft). Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η υστέρηση, η δοκιμή ξεκινά με μηδενική ροπή (ισορροπία των μετρήσεων κλίμακας) και στη συνέχεια αυξάνεται συσφίγγοντας τον ένα κοχλία μέχρι να εφαρμοστεί η μέγιστη ροπή. Στη συνέχεια, η διαδικασία αντιστρέφεται έως ότου εφαρμοστεί η μέγιστη ροπή στην αντίθετη κατεύθυνση και, τελικά, επιστρέφει πίσω στο μηδέν. (2)



Σχήμα 2.3.2: Στρεπτική δυσκαμψία και καμπτική δυσκαμψία, τοποθετημένη κατά μήκος του πλαισίου

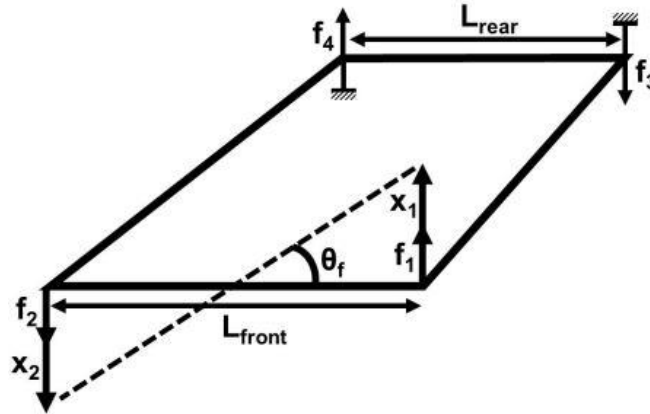
2.3.1 Υπολογισμός στρεπτικής ακαμψίας

Για τον καθορισμό της στρεπτικής ακαμψίας ενός σώματος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την απόσταση (L) στην οποία εφαρμόζουμε μια δύναμη (f_1 , f_2), είτε με ρυθμιζόμενο κοχλία είτε με άλλο τρόπο, για να υπολογίσουμε τη ροπή που ασκείται για τη στρέψη του σώματος.

Εάν γνωρίζουμε τις παραμορφώσεις (x_1 , x_2) του σώματος υπό την επίδραση των δυνάμεων f_1 και f_2 , μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνία στρέψης του πλαισίου γύρω από τον διαμήκη

άξονά του. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας τη ροπή στρέψης και τη γωνία στρέψης, μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο της στρεπτικής ακαμψίας

Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να καθορίσουμε τη στρεπτική ακαμψία του σώματος με βάση τη ροπή που ασκείται και τη γωνία στρέψης που προκύπτει από τις παραμορφώσεις. (8)

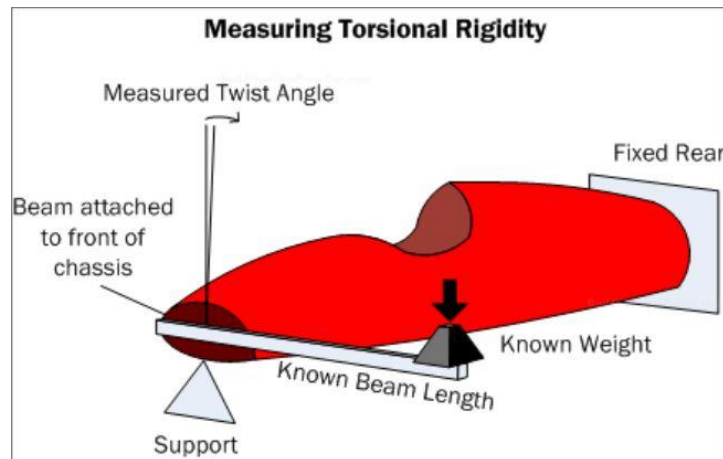


Σχήμα 2.3.1.1: Μεγέθη υπολογισμού στρεπτικής ακαμψίας

$$M = \frac{(f1 + f2) * Lf}{2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x1 + x2}{Lf}$$

$$Kt = \frac{M}{\theta}$$



Σχήμα 2.3.1.2: Δημιουργία ροπής με την εφαρμογή βάρους

2.4 Μέγεθος στρεπτικής ακαμψίας.

Τα συνηθισμένα αυτοκίνητα τύπου sedan έχουν εύρος από 4000 έως 10.000 λίβρες-πόδια / μοίρα. Τα τρέχοντα μικρά αυτοκίνητα τύπου formula μπορεί να κυμαίνονται στις 3000 λίβρες-πόδια / μοίρα, ενώ τα πλαίσια που κατασκευάζονται με τα πολύπλοκα υλικά της Formula 1 μπορεί να φτάνουν τις 12.000 λίβρες-πόδια / μοίρα και περισσότερο. Να

σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές πιθανώς αναφέρονται σε σωληνωτά πλαίσια ή monopocque, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των συνδέσμων της ανάρτησης ή των διάφορων βάσεων που απαιτούνται για την τοποθέτησή τους. Συνήθως, η επίτευξη υψηλής ακαμψίας είναι η επιθυμητή κατάσταση, εκτός αν το όχημα έχει υπερβολικό βάρος κατά την αναζήτηση δυσκαμψίας, όμως αυτό μπορεί να αλλάξει με την προσαρμογή του συστήματος ελατηρίων, αντιστρεπτικών ράβδων και άλλων στοιχείων.

Ο κύριος λόγος για την ανάγκη υψηλής στρεπτικής ακαμψίας είναι να διευκολυνθεί η μεταφορά των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα προς το πλαίσιο του. Επιπλέον, η στρεπτική ακαμψία συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή αυτών των δυνάμεων στο εμπρόσθιο και οπίσθιο μέρος του οχήματος μέσω του συστήματος αναρτήσεων. Συγκρίνοντας τις ακαμψίες των αναρτήσεων του μπροστινού και του πίσω μέρους σε σχέση με το πλαίσιο, το πλαίσιο πρέπει περίπου να αντιστέκεται στη διαφορά μεταξύ των στρεπτικών ακαμψιών των δύο αναρτήσεων. (2)

2.4.1 Σχεδιασμός για υψηλή στρεπτική ακαμψία

Η στρεπτική ακαμψία που μπορεί να αναμένεται από ένα πλαίσιο καθορίζεται από τον τύπο κατασκευής και τον πραγματικό σχεδιασμό του. Στις μέρες μας, τα πλαίσια που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ακαμψία είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, γνωστά και ως "monopocque". Υπάρχουν όμως και άλλοι τύποι πλαισίων που είναι λιγότερο αποδοτικοί, δηλαδή παρουσιάζουν λιγότερη στρεπτική ακαμψία για το ίδιο βάρος. Αυτοί περιλαμβάνουν:

- Πλαίσια με ελάσματα από αλουμίνιο και ατσάλι, όπως συναντώνται σε πολλά αγωνιστικά αυτοκίνητα και σε πολλά σύγχρονα επιβατικά οχήματα.
- Το σωληνωτό πλαίσιο, το οποίο αποτελείται από σωλήνες και χρησιμοποιείται σε πολλά οχήματα παραγωγής. Σε αυτό τον τύπο πλαισίου, η δομή είναι παρόμοια με ένα κυλινδρικό κλουβί, με τους σωλήνες να είναι διατεταγμένοι έτσι ώστε να σχηματίζουν τρίγωνα. Αυτό το στρώμα των τριγώνων βοηθά στην αποτελεσματική απορρόφηση των φορτίων που δημιουργούνται στις διασταυρώσεις των σωλήνων. Αν δεν γίνει σωστή διατεταγμένη, το πλαίσιο θα υφίσταται καμπτικά φορτία, κάτι που μπορεί να μειώσει την αποδοτικότητά του κατά την συμπίεση των μελών κατά τη φόρτιση.
- Τα πλαίσια τύπου "σκάλας", όπως χρησιμοποιούνται σε πολλά αυτοκίνητα παλαιότερης γενιάς, μπορεί να θεωρηθούν ως από τους λιγότερο ανθεκτικούς τύπους πλαισίων. Σε αυτόν τον τύπο πλαισίου, υπάρχουν δύο κύρια μέλη που διατεταγμένα κατά μήκος του οχήματος συνδέονται με διάφορα σημεία μέσω εγκάρσιων μελών. Το σκοπός αυτής της δομής είναι να μεταφέρει τον κινητήρα, την ανάρτηση και το αμάξωμα του οχήματος. (2)

2.4.2 Μέθοδοι αύξησης στρεπτικής ακαμψίας

Ορισμένες τεχνικές για την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας περιλαμβάνουν:

- Προσθήκη διαγώνιων μελών στη δομή του σωληνωτού πλαισίου. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη εάν το όχημα έχει ήδη κατασκευαστεί και διαπιστωθεί ότι είναι υπερβολικά ελαστικό. Τα διαγώνια μέλη λειτουργούν καλύτερα όταν συνδέονται σε σημεία μεγάλων φορτίων, όπως η ανάρτηση.
- Χρήση του κινητήρα ως ακαμπτού μέρους του πλαισίου, υπό την προϋπόθεση ότι τα φορτία δεν είναι αρκετά υψηλά για να προκαλέσουν παραμόρφωση. Ορισμένοι

κινητήρες σχεδιάζονται ειδικά για αυτόν τον σκοπό, όπως ο κινητήρας Cosworth DFV F.1.

- Σε περιπτώσεις που οι σωλήνες πρέπει να αντέχουν δυνάμεις κάμψης (σε αντίθεση με τις δυνάμεις συμπίεσης σε τριγωνικά πλαίσια), λεπτά ελάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις αρθρώσεις για να μεταφέρουν το φορτίο αποτελεσματικότερα από έναν σωλήνα στον άλλο.
- Προσθήκη επιπλέον διασταυρώσεων στο πλαίσιο. Σε αυτοκίνητα βασισμένα σε παραγωγή, μπορεί να βελτιωθεί ο μπροστινός θάλαμος του κινητήρα με την προσθήκη μιας αντιστρεπτικής ράβδου που συνδέει τις δύο κορυφαίες βάσεις των αναρτήσεων. (2)

2.5 Καμπτική δυσκαμψία

Η καμπτική δυσκαμψία του πλαισίου συνήθως δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία όσο η στρεπτική δυσκαμψία. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό. Πρώτον, η στατική κάμψη του πλαισίου δεν θα επηρεάσει σημαντικά τις φορτίσεις των τροχών ή την ισορροπία τους. Δεύτερον, και πιο σημαντικό, ο Platt έχει αποδείξει ότι ένα πλαίσιο με καλή στρεπτική δυσκαμψία είναι επίσης πιθανό να έχει επαρκή κάμψη. Εάν ληφθούν μέτρα για να εξασφαλιστεί η καλή στρεπτική δυσκαμψία, τότε η κάμψη δεν αναμένεται να προκαλέσει προβλήματα. Συνολικά, η καμπτική δυσκαμψία δεν αποτελεί τόσο σημαντική ανησυχία όπως η στρεπτική δυσκαμψία. (2)

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός πλαισίου

3.1 Υπολογισμός διατομών πλαισίου

Όσον αφορά τις διατομές για τον σχεδιασμό του πλαισίου, για να είναι έγκυρες βάση της παραπάνω προδιαγραφής, γίνεται υπολογιστικός έλεγχος του μεγέθους της διατομής και της ροπής αδρανείας. Η διάσταση αυτή αφορά τα roll hoops (main roll hoop & front hoop) και η διατομή που εξετάζεται είναι κυκλική.

Πίνακας 3-1-1: Μέγεθος των Roll Hoops

Dout	Th	Din	A	I	Amin	Imin
Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	Εμβαδόν διατομής (mm ²)	Ροπή αδρανείας (mm ⁴)	Κατώτερο όριο εμβαδόν διατομής (mm ²)	Κατώτερο όριο ροπής αδρανείας (mm ⁴)
25	2,5	20	176,7	11320,8	175	11320

$$A = \pi * \frac{25^2}{4} - \pi * \frac{20^2}{4} = 176.7 \text{ mm}^2 > A_{min}$$

$$I = \pi * \frac{25^4 - 20^4}{64} = 11320.8 \text{ mm}^4 > I_{min}$$

Η διάσταση αυτή αφορά το side impact structure, roll hoop bracing και η διατομή που εξετάζεται είναι κυκλική.

Πίνακας 3-1-2: Μέγεθος του Side Impact Structure

Dout	Th	Din	A	I	Amin	Imin
Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	Εμβαδόν διατομής (mm ²)	Ροπή αδρανείας (mm ⁴)	Κατώτερο όριο εμβαδόν διατομής (mm ²)	Κατώτερο όριο ροπής αδρανείας (mm ⁴)
25,4	1,651	22,1	123,18	8722,2	119	8509

$$A = \pi * \frac{25.4^2}{4} - \pi * \frac{22.1^2}{4} = 123.18 \text{ mm}^2 > A_{min}$$

$$I = \pi * \frac{25.4^4 - 22.1^4}{64} = 8722.2 \text{ mm}^4 > I_{min}$$

Η διάσταση αυτή αφορά το front bulkhead support και main hoop bracing support και η διατομή που εξετάζεται είναι κυκλική.

Πίνακας 3-1-3: Μέγεθος των Supports

Dout	Th	Din	A	I	Amin	Imin
Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	Εμβαδόν διατομής (mm ²)	Ροπή αδρανείας (mm ⁴)	Κατώτερο όριο εμβαδόν διατομής (mm ²)	Κατώτερο όριο ροπής αδρανείας (mm ⁴)
25,4	1,245	22,91	94,48	6908,8	91	6695

$$A = \pi * \frac{25.4^2}{4} - \pi * \frac{22.91^2}{4} = 94.48 \text{ mm}^2 > A_{min}$$

$$I = \pi * \frac{25.4^4 - 22.91^4}{64} = 6908.8 \text{ mm}^4 > I_{min}$$

Η διάσταση αυτή αφορά το front bulkhead και η διατομή που εξετάζεται είναι τετραγωνική.

Πίνακας 3-1-4: Μέγεθος του Front Bulkhead

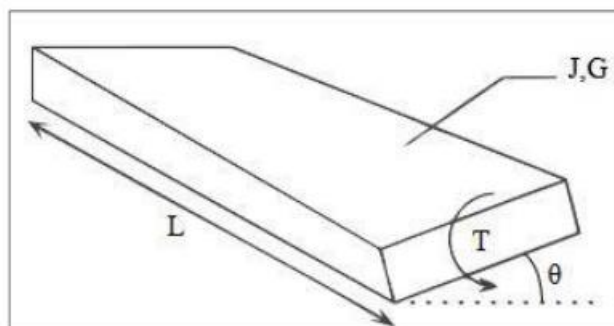
S (mm)	Th	Din	A	I	Amin	Imin
Πλευρά A,B (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	Εμβαδόν διατομής (mm ²)	Ροπή αδρανείας (mm ⁴)	Κατώτερο όριο εμβαδόν διατομής (mm ²)	Κατώτερο όριο ροπής αδρανείας (mm ⁴)
25,4	1,245	22,91	120,3	36846,9	119	8509

$$A = 25,4^2 - 22,91^2 = 120,3 \text{ mm}^2 > A_{min}$$

$$I = \pi * \frac{25,4^4 - 22,91^4}{12} = 36846,9 \text{ mm}^4 > I_{min}$$

Για την συγκεκριμένη κατηγορία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κυλινδρική διατομή η οποία και αυτή πληροί τα ελάχιστα όρια που θέτει ο διαγωνισμός.

Για αυτόν τον λόγο θα εφαρμοστεί μια κοινή ροπή 100Nm και σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις. Το μήκος 1m. Το μέτρο διάτμησης έχει οριστεί ως 79Mpa.



Σχήμα 3.1.1: Ράβδος υπό καταπόνηση στρέψης

Πίνακας 3-1-5: Κυκλική διατομή 25,4 x 1.651 mm

Dout	Th	Din	L	T	G	J	GL	θ
Εξωτερική διάμετρος (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική διάμετρος σωλήνωσης (mm)	Μήκος (m)	Ροπή στρέψης (Nm)	Μέτρο διάτμησης (Pa)	Πολική ροπή αδρανείας (m ⁴)	Στρεπτική ακαμψία (Nm/deg)	Γωνία στρέψης (deg)
25,4	1,651	22,1	1	100,0	7,93E+10	1,75E-08	24,2	4,14

Πολική ροπή αδρανείας για κυκλική διάτρητη διατομή:

$$J = \frac{\pi * (D_{out}^4 - D_{in}^4)}{32} = \frac{\pi * (25,4^4 - 22,1^4)}{32} = 17500 \text{ mm}^4$$

Γωνία στρέψης:

$$\theta = \frac{T * L}{G * J} = \frac{100}{(7,93E + 10) * (1,75E - 08)} = 4,14 \text{ deg}$$

Στρεπτική ακαμψία:

$$GJ = \frac{T * L}{\theta} = \frac{100}{4,14} = 24,2 \frac{\text{Nm}}{\text{deg}}$$

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα παραπάνω μεγέθη και για την περίπτωση της τετραγωνικής διατομής.

Πίνακας 3-1-6: Τετραγωνική διατομή 25.4 x 1.245 mm

Sout	Th	Sin	L	T	G	J	GL	θ
Πλευρά Α,Β (mm)	Πάχος σωλήνωσης (mm)	Εσωτερική πλευρά (mm)	Μήκος (m)	Ροπή στρέψης (Nm)	Μέτρο διάτμησης (Pa)	Πολική ροπή αδρανείας (m ⁴)	Στρεπτική ακαμψία (Nm/deg)	Γωνία στρέψης (deg)
25,4	1,245	22,9	1	100,0	7,93E+10	2,35E-08	32,5	3,081

Πολική ροπή αδρανείας για κυκλική διάτρητη διατομή:

$$J = \frac{S_{out}^4}{6} - \frac{S_{in}^4}{6} = 23450 \text{ mm}^4$$

Γωνία στρέψης:

$$\theta = 3,081 \text{ deg}$$

Στρεπτική ακαμψία:

$$GJ = 32.5 \text{ Nm/deg}$$

Από αυτόν τον έλεγχο διαπιστώνουμε ότι η τετραγωνική διατομή, σε σύγκριση με την κυκλική, έχει μεγαλύτερη στρεπτική ακαμψία, όπως φαίνεται και από τη γωνία θ υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης. Η κυκλική διατομή παρουσιάζει γωνία στρέψης 4,14 μοίρες, ενώ η αντίστοιχη τετραγωνική διατομή έχει γωνία στρέψης 3,081 μοίρες. Προφανώς, το μέτρο της στρεπτικής ακαμψίας είναι μεγαλύτερο για την κυκλική διατομή, έχοντας 34% μεγαλύτερη τιμή για την ίδια φόρτιση, το ίδιο υλικό και το ίδιο μήκος. Συνεπώς, το συμπέρασμα είναι ότι σε περιοχές όπου είναι εφικτή η κατασκευή με τετραγωνική διατομή, αυτή πρέπει να προτιμάται έναντι της κυκλικής, με το όφελος τόσο της μείωσης του βάρους όσο και της αύξησης της στρεπτικής ακαμψίας.

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με βάση τα ελάχιστα όρια που παρέχει ο διαγωνισμός και παρουσιάζονται στην επόμενη εικόνα.

T3 General Chassis Design

T3.2 Minimum Material Requirements

T3.2.1 Table 4 shows the minimum requirements for the members of the primary structure if made from steel tubing.

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm ²	11 320 mm ⁴
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm ²	6695 mm ⁴

Table 4: Minimum Material Requirements

T3.2.2 Steel tubing has to be made from unalloyed carbon steel with a maximum content of 0.3 % carbon, 1.7 % manganese and 0.6 % of any other element. All other steel grades are considered alternative materials and require additional testing and documentation (see T3.3).

T3.2.3 Except for inspection holes, any holes drilled in any part which is a member of the primary structure must be considered in the SES.

T3.2.4 The steel properties used for the calculations in the SES must be:

Εικόνα 3.1.1: Ελάχιστα όρια διατομών

3.2 Προσδιορισμός ακαμψίας πλαισίων

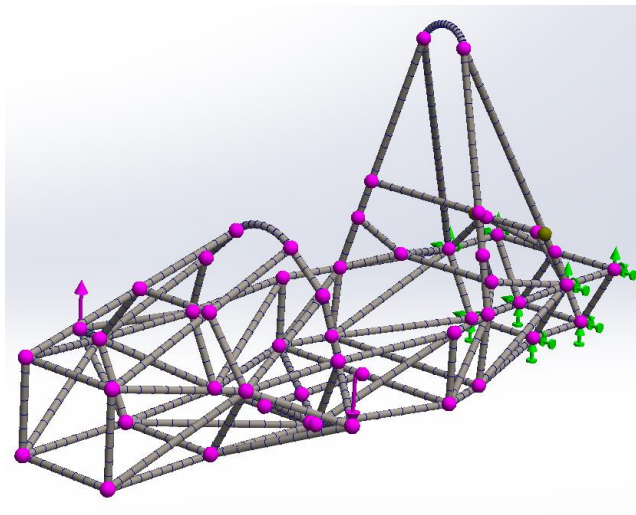
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζουμε την στρεπτική ακαμψία δύο σωληνωτών πλαισίων τύπου Formula Student και ενός τύπου Ladder.

Η διαδικασία προσδιορισμού της ακαμψίας έγινε μέσω του solidworks .

Ο προσδιορισμός της στρεπτικής ακαμψίας ενός εξαρτήματος στο SolidWorks περιλαμβάνει συνήθως την εκτέλεση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

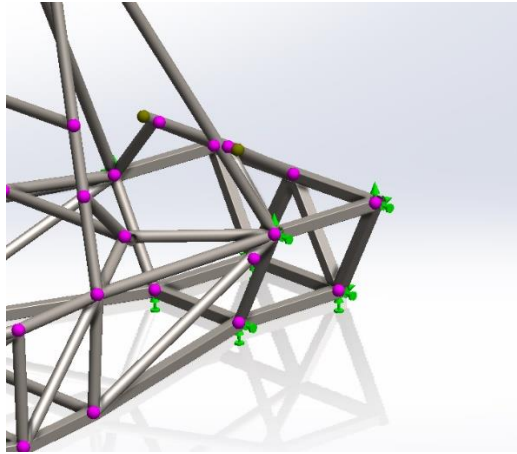
Ακολουθεί μια γενική διαδικασία για την εκτίμηση της στρεπτικής δυσκαμψίας με χρήση του SolidWorks Simulation:

- Δημιουργία ή εισαγωγή του μοντέλου
- Εφαρμογή υλικών
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Steel AISI 4130.
- Δημιουργία πλέγματος (mesh the model)
Το πλέγμα στην συγκεκριμένη μελέτη δημιουργήθηκε αυτόματα από το λογισμό καθώς επρόκειτο για ένα είδος 2d ανάλυσης που κυρίως μας ενδιαφέρει η μεταφορά των δυνάμεων στο πλαίσιο.



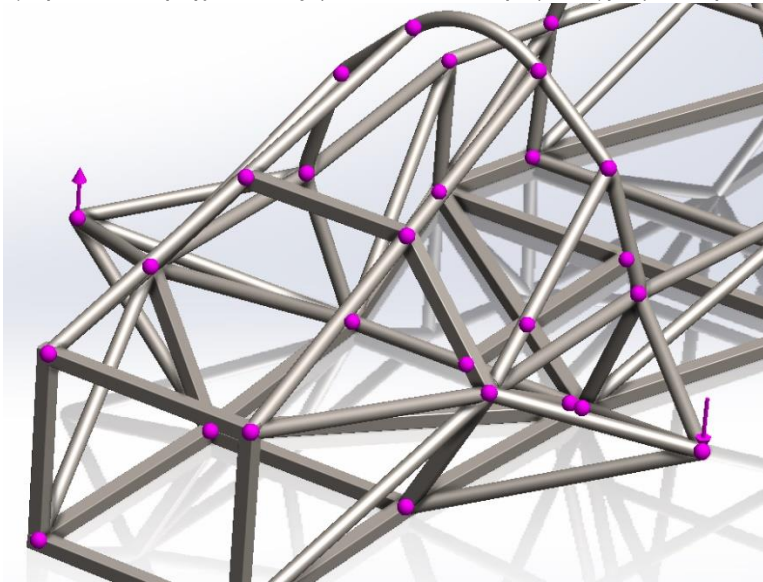
Εικόνα 3.2.1: Mesh πλαισίου

- Καθορισμός πακτώσεων
Οι πακτώσεις εφαρμόστηκαν στα πίσω σημεία όπου εδράζονται τα ψαλίδια του μονοθέσιου.



Εικόνα 3.3.2: Εφαρμογή πακτώσεων

- Εφαρμογή δυνάμεων
Οι δυνάμεις που ασκήθηκαν είχαν μέτρο 1000 N και εφαρμόστηκαν στα κέντρα των εμπρόσθιων τροχών όπως φαίνεται και στην φωτογραφία παρακάτω.

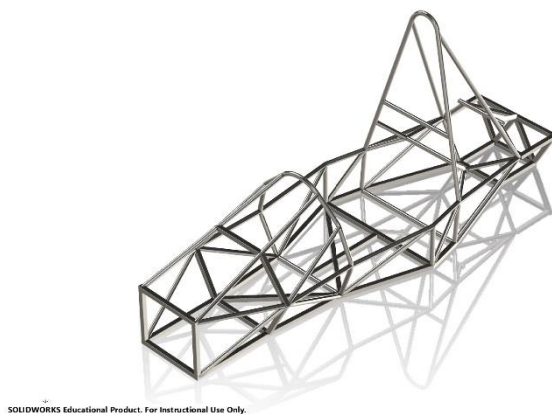


Εικόνα 3.2.3: Εφαρμογή δυνάμεων

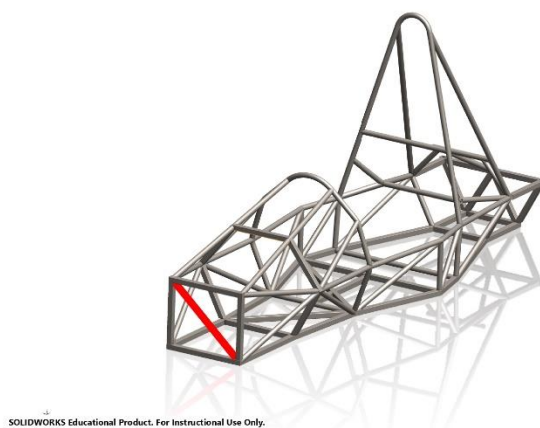
- Εκτέλεση ανάλυσης

3.3 Formula Student πλαίσιο 1 (“base geometry”)

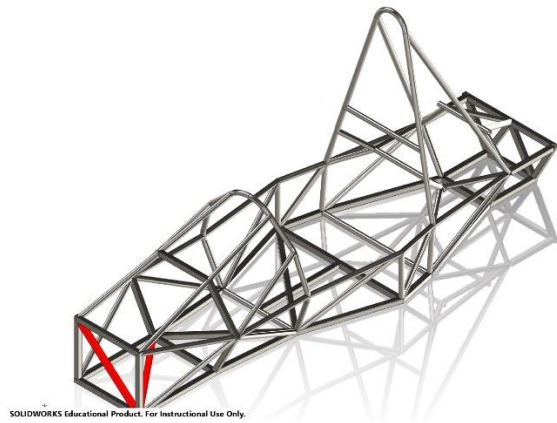
Σε αυτήν την ενότητα εξετάζουμε την ακαμψία του πλαισίου σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος γεωμετριών. Για την διαπίστωση της συμπεριφοράς του πλαισίου και την αναγνώριση του τμήματος το οποίο χρειάζεται ενίσχυση και πιο όχι, το πλαίσιο χωρίζεται σε 3 τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι από το front bulkhead έως το front hoop, το δεύτερο τμήμα είναι από το front hoop έως το main hoop και το τρίτο από το main hoop μέχρι το οπίσθιο τμήμα του πλαισίου. Τα τμήματα τα οποία παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την στρεπτική ακαμψία συνδυάζονται και προκύπτουν νέες γεωμετρίες. Οι συνθήκες της προσομοίωσης τέθηκαν με σκοπό την δημιουργία στρεπτικού φαινομένου με την πάκτωση του οπίσθιου μέρους στις αρθρώσεις των ψαλιδιών και την εφαρμογή ροπής στο εμπρόσθιο μετατρόχιο. Τα εμπρόσθια μέλη τα οποία μεταβιβάζουν την ροπή στο πλαίσιο είναι άκαμπτα μέλη και εφαρμόζεται δύναμη 1000N στα άκρα τους με κοινή φορά και αντίθετη διεύθυνση. Όσον αφορά το κομμάτι του κινητήρα χρησιμοποιείται και εκεί άκαμπτα μέλη καθώς ο κινητήρας είναι ένα στοιχείο το οποίο έχει πολύ μεγαλύτερη ακαμψία από το πλαίσιο και είναι πρακτικά άκαμπτο.



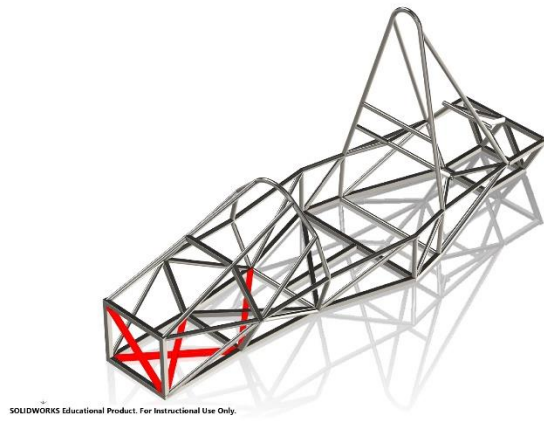
Εικόνα 3.3.1: base geometry 1



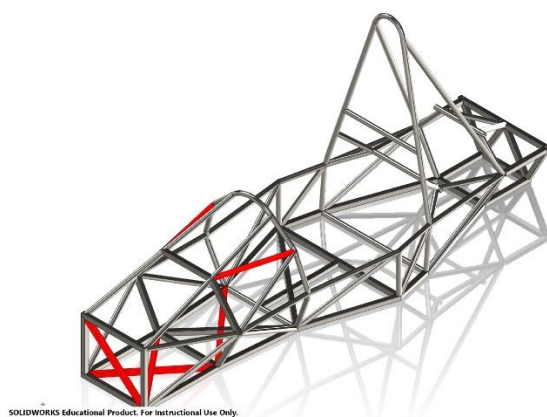
Εικόνα 3.3.2: base geometry 2



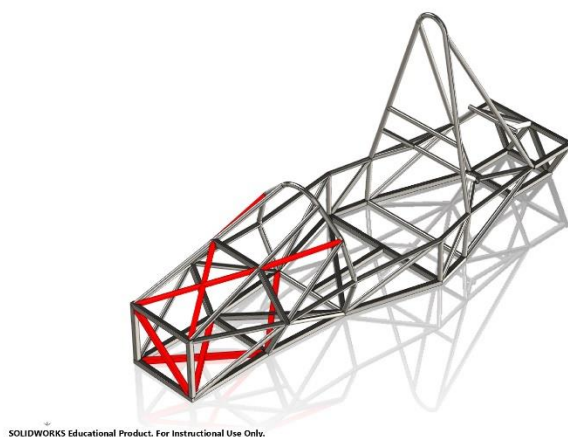
Εικόνα 3.3.3: base geometry 3



Εικόνα 3.3.4: base geometry 4

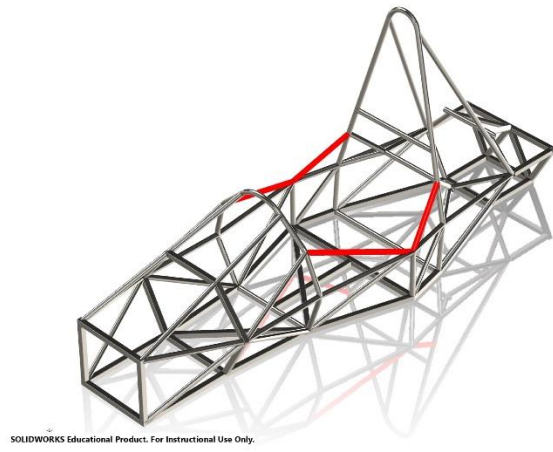


Εικόνα 3.3.5: base geometry 5

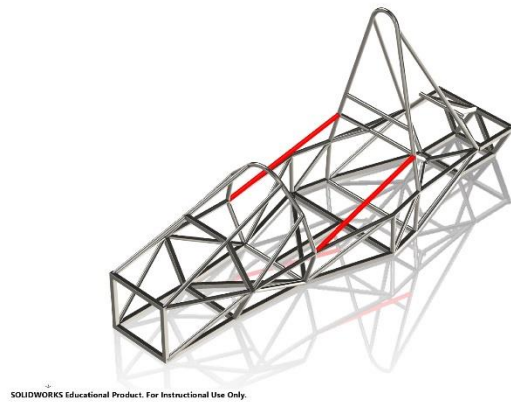


Εικόνα 3.3.6: base geometry 6

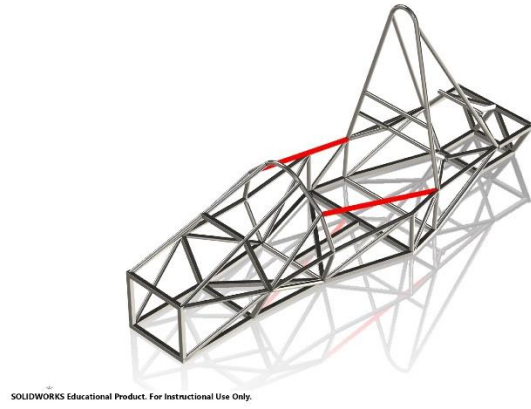
Η γεωμετρία 1 είναι από τις πιο απλές γεωμετρίες οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν. Στο εμπρόσθιο τμήμα του πατώματος μέχρι και το οπίσθιο μέρος της καμπίνας υπάρχουν διαγώνιοι ενίσχυσης του και όλο το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο με κυκλικής διατομής σωληνώσεις εκτός του πατώματος που επιλέχθηκε τετραγωνικής όπως ορίζουν οι κανονισμοί. Η γεωμετρία συνδυάζει χαμηλό βάρος αλλά και σχετικά χαμηλή στρεπτική ακαμψία συγκριτικά με τις επόμενες γεωμετρίες. Για τις γεωμετρίες 2, 3 και 4 ενισχύθηκε το front bulkhead και το πάτωμα τοποθετώντας διαγώνιες τετραγωνικές μπάρες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας κατά 12% και αύξηση του βάρους κατά 6,3%. Στις γεωμετρίες 5, 6 δόθηκε έμφαση στις άνω μπάρες του πλαισίου κλείνοντας στην ουσία όλο το εμπρόσθιο μέρος του πλαισίου. Αυτό έφερε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ακαμψίας κατά 33% αλλά με επιπλέον αύξηση του βάρους κατά 10,3%.



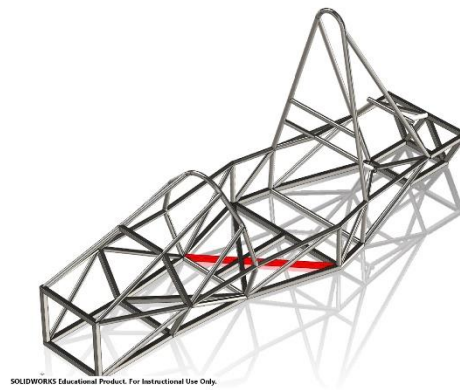
Εικόνα 3.3.7: base geometry 7



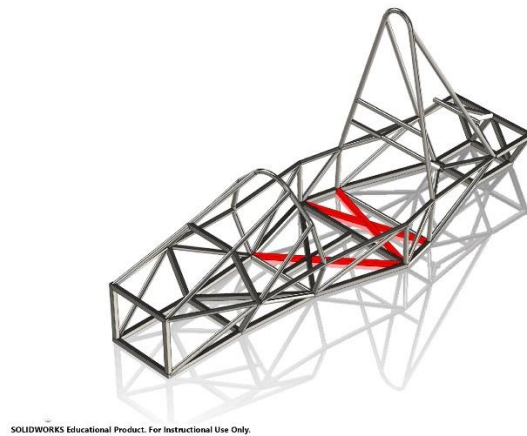
Εικόνα 3.3.8: base geometry 8



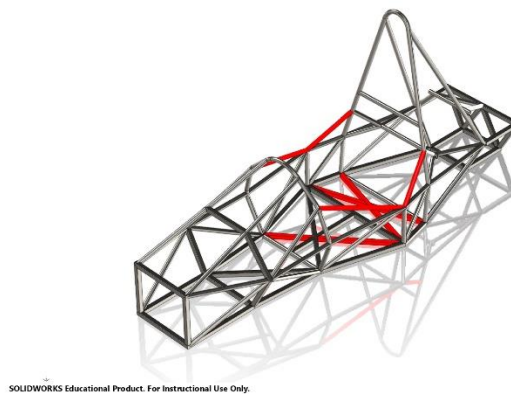
Εικόνα 3.3.9: base geometry 9



Εικόνα 3.3.10: base geometry 10



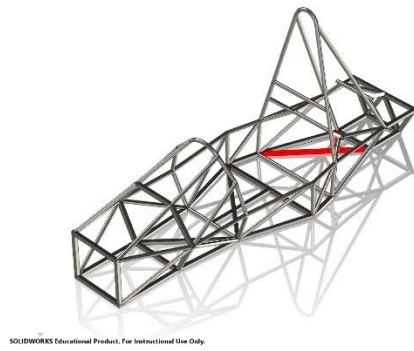
Εικόνα 3.3.11: base geometry 11



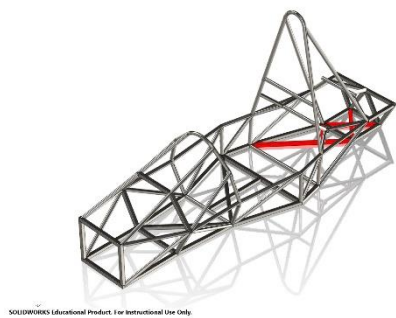
Εικόνα 3.3.12: base geometry 12

Στις γεωμετρίες 7, 8 και 9 ενισχύθηκε το άνω μέρος του Side Impact Structure με διαφορετικούς τρόπους έτσι ώστε να βρεθεί ο καλύτερος. Παρατηρήθηκε ότι στην γεωμετρία 7 είχαμε υψηλότερη στρεπτική ακαμψία με μια μικρή αύξηση στο βάρος συγκριτικά με τις άλλες δύο γεωμετρίες. Για την γεωμετρίες 10 και 11 ενισχύθηκε το πάτωμα στην περιοχή ανάμεσα από τα roll hoops. Και στις δύο περιπτώσεις υπήρξε μια αύξηση της ακαμψίας με ποσοστό μικρότερο από 5% και για τις δύο περιπτώσεις.

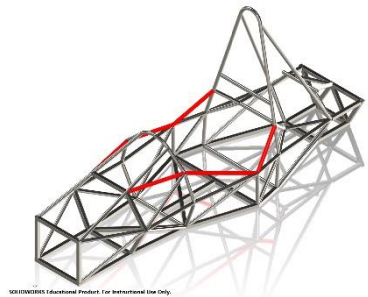
Τέλος η γεωμετρία 12 είναι ένας συνδυασμός της 11 και της 7 προσδίδοντας την υψηλότερη ακαμψία συγκριτικά με τις παραπάνω γεωμετρίες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ακαμψίας κατά 107,7% και το βάρος κατά 9,8%.



Εικόνα 3.3.13: base geometry 13



Εικόνα 3.3.14: base geometry 14

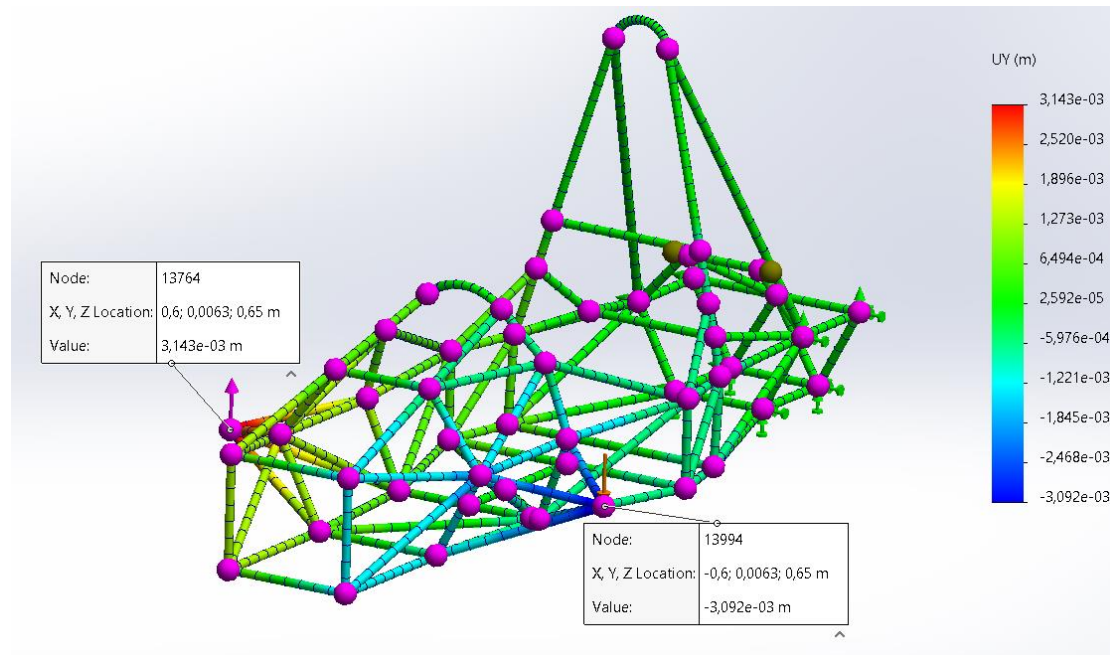


Εικόνα 3.3.15: base geometry 15

Για τις γεωμετρίες 13 και 14 ενισχύθηκε το πάτωμα στον χώρο του κινητήρα φέροντας μια αύξηση της ακαμψίας κοντά στο 5% με αντίστοιχο ποσοστό και για την αύξηση του βάρους.

Η γεωμετρία 15 είναι η τελική γεωμετρία που δημιουργήθηκε με βάση τις παραπάνω μελέτες. Τα μέρη που ενισχύθηκαν είναι αυτά στο άνω μέρος του Side Impact Structure και το άνω μέρος στην περιοχή μεταξύ του Front Hoop και του Front Bulkhead. Αυτό που παρατηρήθηκε

είναι μια ραγδαία αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας κατά 147,2% με μόλις 6,3% αύξηση βάρους προσδίδοντας έτσι στην τελική γεωμετρία ένα σχετικά χαμηλό βάρος για σωληνωτό πλαίσιο με μια πολύ υψηλή στρεπτική ακαμψία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

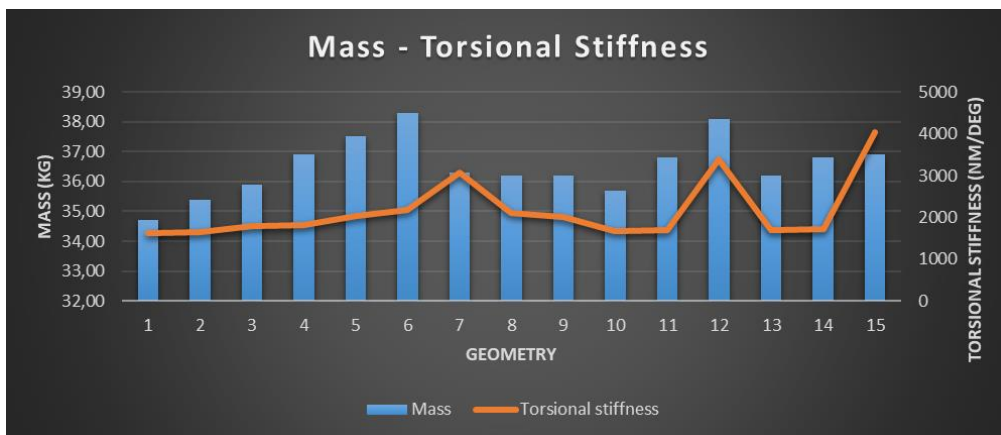


Εικόνα 3.3.16: Αποτελέσματα ανάλυσης F.E.A. της “base geometry 15”

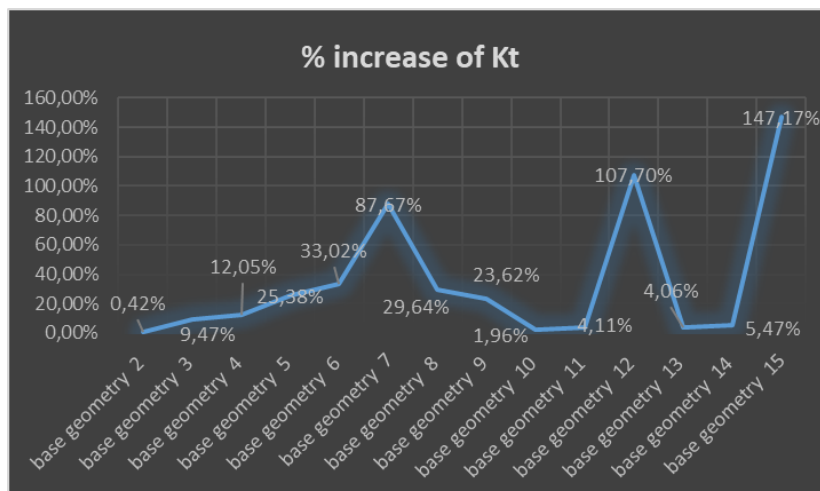
Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της μελέτης.

Formula student car 1																
	base geometry	base geometry 2	base geometry 3	base geometry 4	base geometry 5	base geometry 6	base geometry 7	base geometry 8	base geometry 9	base geometry 10	base geometry 11	base geometry 12	base geometry 13	base geometry 14	base geometry 15	
Material	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	
Mass (kg)	34,7	35,4	35,9	36,9	37,5	38,3	36,3	36,2	36,2	35,7	36,8	38,1	36,2	36,8	36,9	
F1 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
F2 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
X1 (m)	0,007714	0,007682	0,007049	0,006885	0,006136	0,005759	0,004145	0,005935	0,00624	0,007549	0,007389	0,003714	0,007402	0,007313	0,003143	
X2 (m)	0,007698	0,007666	0,00703	0,00687	0,006156	0,005827	0,004067	0,005953	0,006227	0,007566	0,007414	0,003706	0,007409	0,007299	0,003092	
Lf (m)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
M (Nm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	
Θ (deg)	0,74	0,73	0,67	0,66	0,59	0,55	0,39	0,57	0,60	0,72	0,71	0,35	0,71	0,70	0,30	
Kt (Nm/deg)	1630,82	1637,61	1785,20	1827,25	2044,71	2169,30	3060,54	2114,20	2016,01	1662,86	1697,90	3387,21	1696,98	1720,09	4030,95	
Kt/mass	47,00	46,26	49,73	49,52	54,53	56,64	84,31	58,40	55,69	46,58	46,14	88,90	46,88	46,74	109,24	
Percentage increase of stiffness from the initial one	-	0,42%	9,47%	12,05%	25,38%	33,02%	87,67%	29,64%	23,62%	1,96%	4,11%	107,70%	4,06%	5,47%	147,17%	
Percentage increase of mass from the initial	-	2,02%	3,46%	6,34%	8,07%	10,37%	4,61%	4,32%	4,32%	2,88%	6,05%	9,80%	4,32%	6,05%	6,34%	

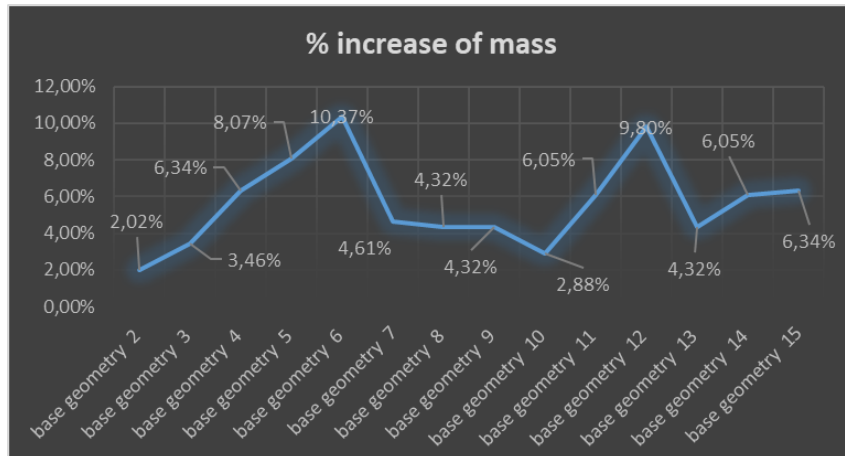
Εικόνα 3.3.17: Δεδομένα και αποτελέσματα των πλαισίων “base geometry”



Γράφημα 3-3-1: Γράφημα μάζας – στρεπτικής ακαμψίας “base geometry”



Γράφημα 3-3-2: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης της στρεπτικής ακαμψίας του “base geometry”



Γράφημα 3-3-3: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης βάρους του “base geometry”

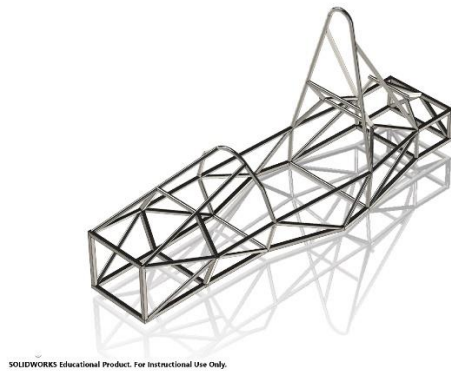
Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται αυτά του Βάρους – Ακαμψίας , της ποσοστιαίας αύξησης της στρεπτικής ακαμψίας από την αρχική γεωμετρία και της ποσοστιαίας αύξησης του βάρους από την αρχική γεωμετρία.

Παρατηρώντας όλα τα γραφήματα το προφανές είναι ότι σε όλες τις ενισχύσεις που έγιναν στο μπροστά μέρος του μονοθεσίου είχαμε μικρή αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας αλλά μεγάλη αύξηση του βάρους. Το ίδιο ακριβώς παρατηρήθηκε και για το πίσω μέρος του μονοθεσίου καθώς επίσης και στην ενίσχυση του πατώματος στον χώρο της καμπίνας.

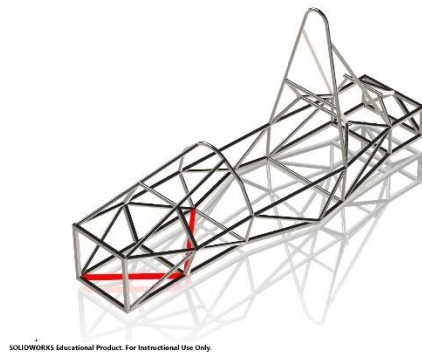
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καταλήξουμε στο γεγονός ότι με την ένωση από το Main Hoop έως και το άνω μέρος του Front Bulkhead Support και με κατάλληλη τριγωνοποίηση είναι εφικτή η υψηλότερη στρεπτική ακαμψία που μπορεί να παραχθεί από το συγκεκριμένο πλαίσιο με την χαμηλότερη αύξηση του βάρους.

3.4 Formula Student πλαίσιο 2 (“geometry”)

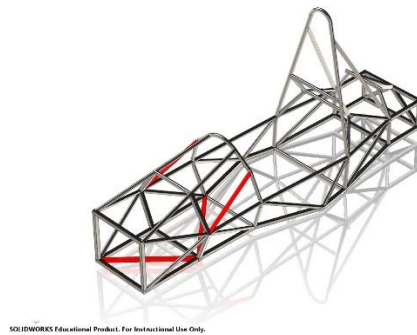
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί μια ακόμα γεωμετρία πλαισίου τύπου Formula Student με βασική αλλαγή να είναι μια υψομετρική διαφορά από το πάτωμα του μπροστινού μέρους και πίσω μέρος του πλαισίου συγκριτικά με την προηγούμενη γεωμετρία που είχε ένα επίπεδο πάτωμα.



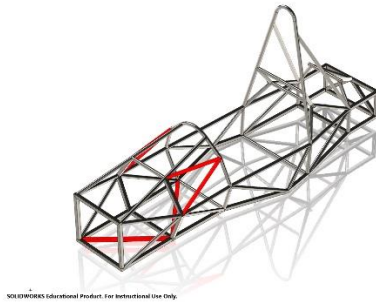
Εικόνα 3.4.1: geometry 1



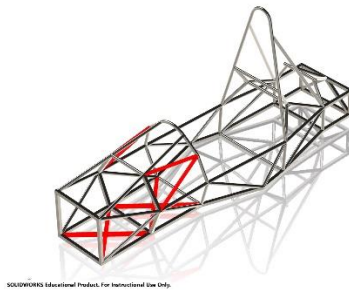
Εικόνα 3.4.2: geometry 2



Εικόνα 3.4.3: geometry 3



Εικόνα 3.4.4: geometry 4

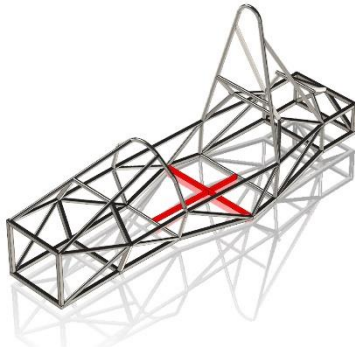


Εικόνα 3.4.5: geometry 5

Στην γεωμετρία 2 ενισχύθηκε το πάτωμα στο μπροστά μέρος του πλαισίου με ίδια νοοτροπία όπως και το προηγούμενο πλαίσιο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας κατά 12,5% και την αύξηση του βάρους κατά 3,4%.

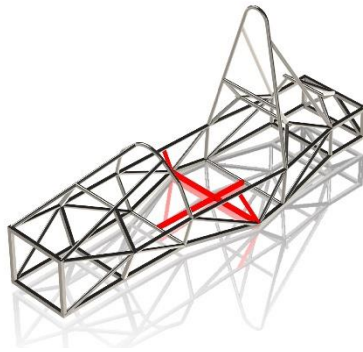
Στις γεωμετρίες 3 και 4 ενισχύθηκαν τα άνω μέρη του Front Bulkhead Support διατηρώντας το ήδη ενισχυμένο πάτωμα έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας κατά 13,6% και 23,2% αντίστοιχα. Το βάρος αυξήθηκε και αυτό κατά 5,3% και 7,2% αντίστοιχα.

Στην γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε η ήδη ενισχυμένη γεωμετρία 4 ενισχύοντας επιπλέον το πάτωμα στην ίδια περιοχή αυξάνοντας την ακαμψία κατά 25,4% και το βάρος κατά 10,3%.

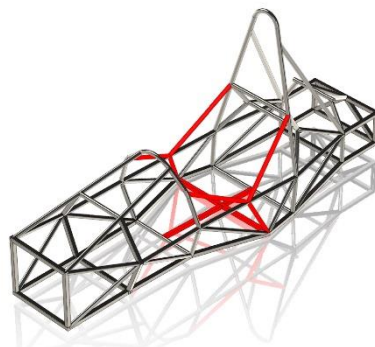


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Εικόνα 3.4.6: geometry 6



Εικόνα 3.4.7: geometry 7

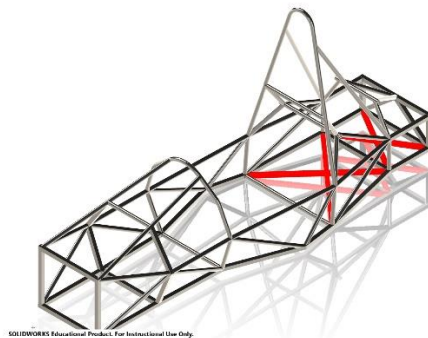


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

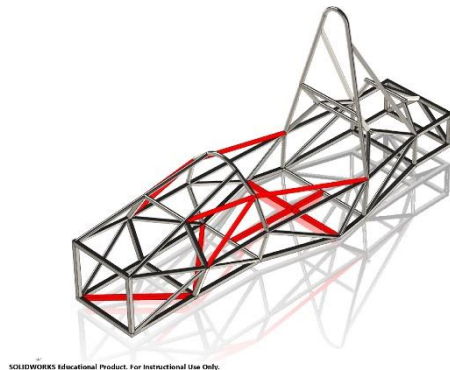
Εικόνα 3.4.8: geometry 8

Για την γεωμετρία 6 ενισχύθηκε το πάτωμα στην περιοχή της καμπίνας ενώ για τις 7 και 8 ενισχύθηκε η περιοχή του Side Impact Structure και τρόπο αντίστοιχο όπως του προηγούμενου πλαισίου που μελετήσαμε. Έτσι για την γεωμετρία 6 έχουμε αύξηση της ακαμψίας κατά 2,4% και αύξηση του βάρους κατά 4,1%.

Για την γεωμετρία 7 προστέθηκε μόνο μια μπάρα ανά πλευρά η αύξησε την ακαμψία και το βάρος ελάχιστα. Για την δημιουργία της γεωμετρίας 8 στηρίχτηκε με βάση τις άλλες δύο και ενισχύθηκε το άνω μέρος του Side Impact Structure ενώνοντας το Main Hoop και το Front Hoop. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα μια αύξηση ακαμψίας κατά 19,4% και αύξηση του βάρους κατά 10%.



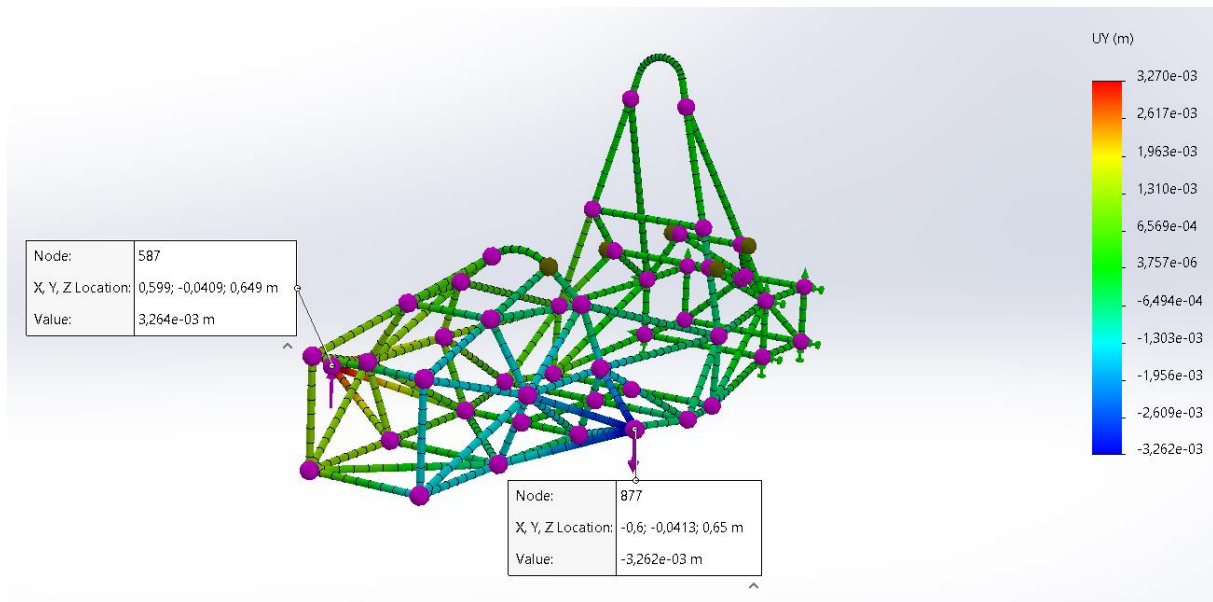
Εικόνα 3.4.9: geometry 9



Εικόνα 3.4.10: geometry 10

Για την γεωμετρία 9 ενισχύθηκε το πίσω μέρος του πατώματος του πλαισίου στην περιοχή του κινητήρα χωρίς όμως να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην ακμψία παρά μόνο αύξηση βάρους.

Τέλος η γεωμετρία 10 είναι η τελική γεωμετρία για την φιλοσοφία αυτού του πλαισίου και είναι ένας συνδυασμός από τα καλύτερα αποτελέσματα που έδωσαν οι παραπάνω μελέτες. Προσδίδοντας με αυτόν τον τρόπο μια αύξηση ακμψίας κατά 40,6% και αύξηση βάρους 6,9% από την αρχική γεωμετρία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

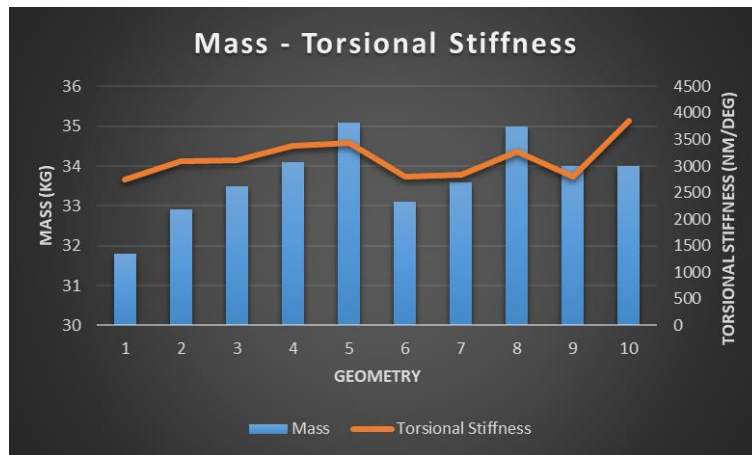


Εικόνα 3.4.11: Αποτελέσματα ανάλυσης F.E.A. της “geometry 10”

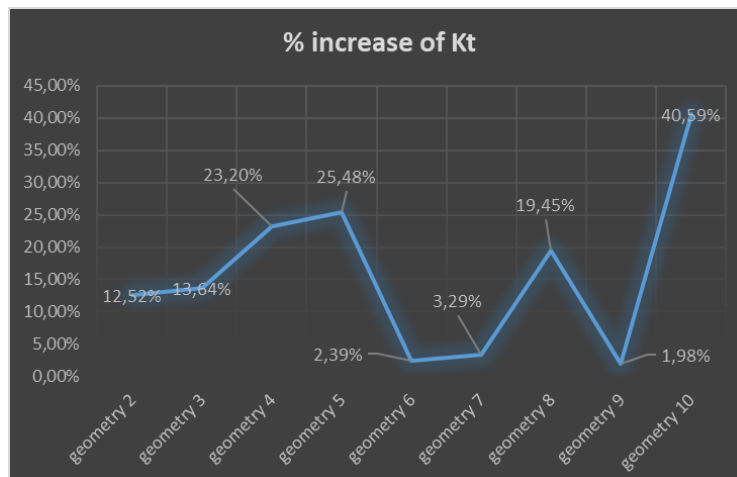
Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της μελέτης.

Formula student car 2										
	geometry 1	geometry 2	geometry 3	geometry 4	geometry 5	geometry 6	geometry 7	geometry 8	geometry 9	geometry 10
Material	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130
Mass (Kg)	31,8	32,9	33,5	34,1	35,1	33,1	33,6	35	34	34
F1 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
F2 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
X1 (m)	0,004588	0,004085	0,004049	0,003728	0,003653	0,004484	0,004448	0,003847	0,004507	0,003264
X2 (m)	0,004587	0,004069	0,004025	0,003719	0,003659	0,004477	0,004435	0,003834	0,00449	0,003262
Lf (m)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
M (Nm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Θ (deg)	0,44	0,39	0,39	0,36	0,35	0,43	0,42	0,37	0,43	0,31
Kt (Nm/deg)	2739,32	3082,31	3112,85	3374,92	3437,23	2804,73	2829,36	3272,11	2793,51	3851,21
Kt/mass	86,14	93,69	92,92	98,97	97,93	84,74	84,21	93,49	82,16	113,27
Percentage increase of stiffness from the intial one	-	12,52%	13,64%	23,20%	25,48%	2,39%	3,29%	19,45%	1,98%	40,59%
Percentage increase of mass from the intial one	-	3,46%	5,35%	7,23%	10,38%	4,09%	5,66%	10,06%	6,92%	6,92%

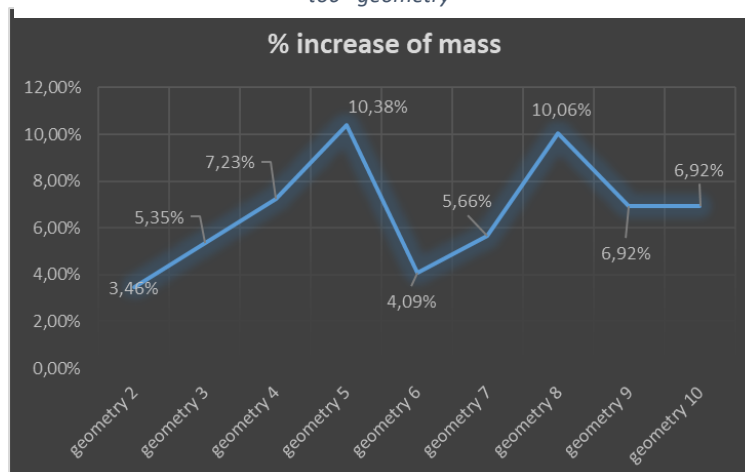
Εικόνα 3.4.12: Δεδομένα και αποτελέσματα των πλαισίων “geometry”



Γράφημα 3-4-1: Γράφημα μάζας – στρεπτικής ακαμψίας “geometry”



Γράφημα 3-4-2: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης της στρεπτικής ακαμψίας του “geometry”



Γράφημα 3-4-3: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης βάρους του “geometry”

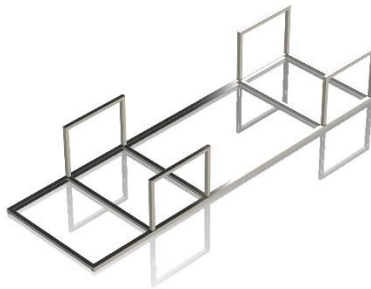
Από τα παραπάνω διαγράμματα αυτό που παρατηρείται είναι ότι παρόλο που υπήρξε μια αύξηση για τις πρώτες γεωμετρίες υπήρξε και μια μεγάλη και σταδιακή αύξηση του βάρους, ενώ η γεωμετρία που ξεχωρίζει είναι αυτή της 8 η οποία με μία προσθήκη στην περιοχή του Side Impact Structure

αύξησε αρκετά την στρεπτική ακαμψία του πλαισίου κάτι που βοήθησε σημαντικά και για τον καθορισμό της τελικής γεωμετρίας η οποία είχε στρεπτική ακαμψία 3851 Nm/deg.

3.5 Πλαίσιο τύπου Ladder (“Ladder”)

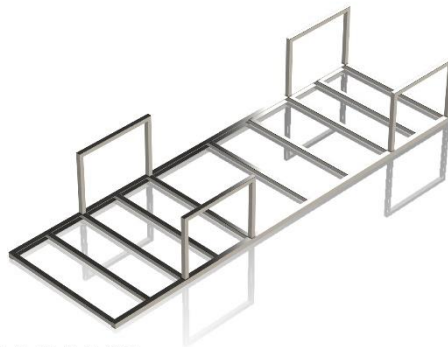
Στην τελευταία ενότητα μελετήθηκε ένα πλαίσιο τύπου Ladder στο οποίο οι διατομές των μπαρών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιου μεγέθους με των προηγούμενων πλαισίων.

Επίσης χρησιμοποιήθηκε προφίλ τύπου C ,διαφορετικού πάχους κάθε φορά, εξωτερικά του πατώματος για την ενίσχυση του.



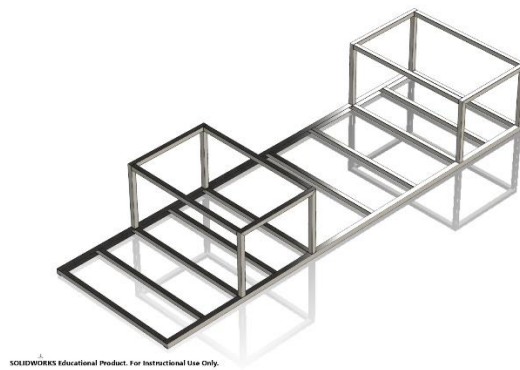
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Εικόνα 3.5.1: Ladder 1



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

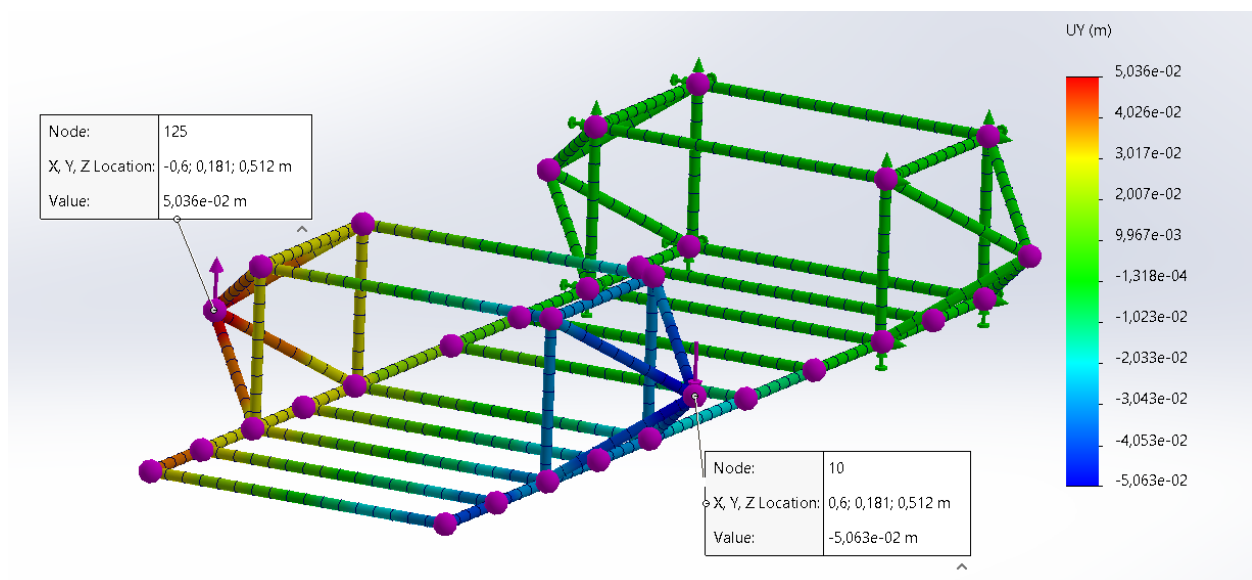
Εικόνα 3.5.2: Ladder 2



Εικόνα 3.5.3: Ladder 3

Η γεωμετρία 1 είναι η πιο απλή που θα μπορούσε να σχεδιαστεί. Το αρχικό πάχος του προφίλ C ήταν στα 1,5mm και στην συνέχεια ενισχύθηκε στα 2mm και 2,5mm. Αυτό πρόσφερε μια αύξηση στην ακαμψία του πλαισίου της τάξης των 22% και 43% αντίστοιχα.

Στην γεωμετρία 2 προστέθηκαν επιπλέον μπάρες στο πάτωμα και χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια προφίλ C για κάθε περίπτωση. Γενικότερα αυτές οι αλλαγές αύξησαν την ακαμψία του πλαισίου αλλά επίσης και σημαντικά το βάρος όπως θα δούμε και παρακάτω στα διαγράμματα. Τέλος για την γεωμετρία 3 ενώθηκαν τα άνω μέλη στήριξης των ψαλιδιών έτσι ώστε να μην είναι ελεύθερα χωρίς καμία στήριξη. Έτσι λοιπόν με το μεγαλύτερο σε πάχος προφίλ C πετύχαμε την μεγαλύτερη στρεπτική ακαμψία. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

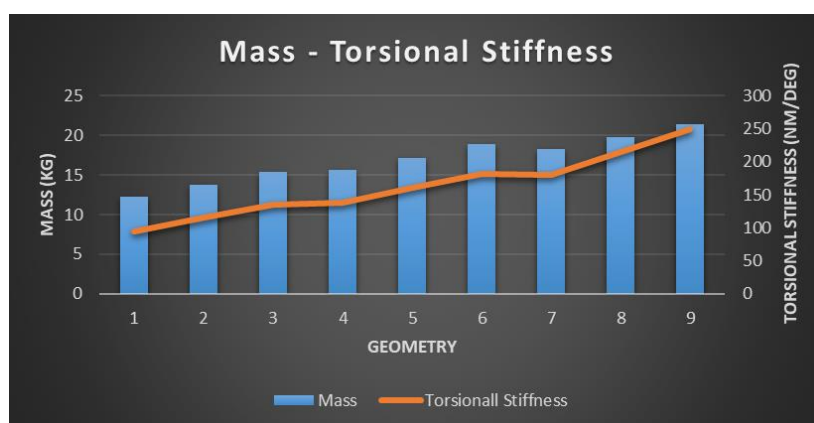


Εικόνα 3.5.4: Αποτελέσματα ανάλυσης F.E.A. του "ladder 3 – 2.5mm C Type"

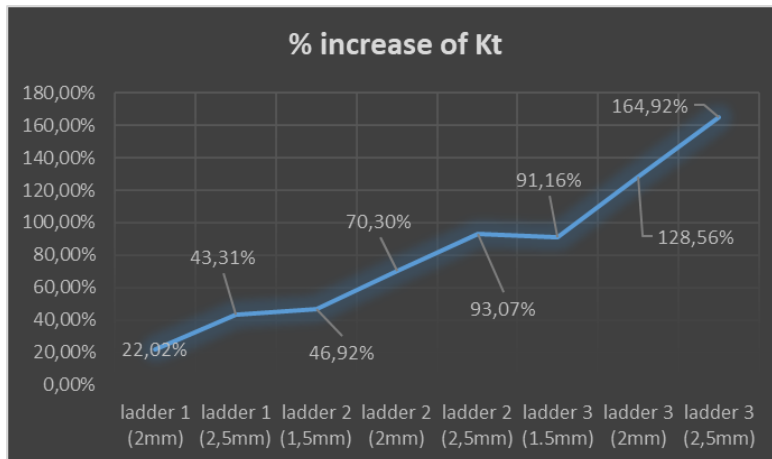
Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της μελέτης.

Ladder frame									
	ladder 1 (1,5mm)	ladder 1 (2mm)	ladder 1 (2,5mm)	ladder 2 (1,5mm)	ladder 2 (2mm)	ladder 2 (2,5mm)	ladder 3 (1,5mm)	ladder 3 (2mm)	ladder 3 (2,5mm)
Material	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130	AISI 4130
Mass (Kg)	12,2	13,8	15,4	15,7	17,2	18,9	18,3	19,8	21,4
F1 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
F2 (N)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
X1 (m)	0,1354	0,1104	0,09372	0,09127	0,07862	0,06927	0,06989	0,0584	0,05036
X2 (m)	0,136	0,1108	0,09404	0,0918	0,07901	0,06959	0,07037	0,05875	0,05063
Lf (m)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
M (Nm)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Θ (deg)	12,74	10,44	8,89	8,67	7,48	6,60	6,67	5,58	4,81
Kt (Nm/deg)	94,16	114,90	134,94	138,34	160,35	181,80	180,00	215,21	249,45
Kt/mass	7,72	8,33	8,76	8,81	9,32	9,62	9,84	10,87	11,66
Percentage increase of stiffness from the intial one	-	22,02%	43,31%	46,92%	70,30%	93,07%	91,16%	128,56%	164,92%
Percentage increase of mass from the intial one	-	13,11%	26,23%	28,69%	40,98%	54,92%	50,00%	62,30%	75,41%

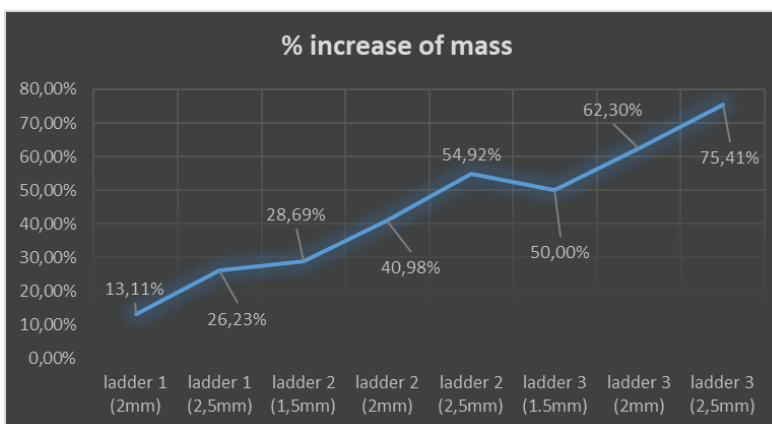
Εικόνα 3.5.5: Δεδομένα και αποτελέσματα των πλαισίων "ladder"



Γράφημα 3-5-1: Γράφημα μάζας – στρεπτικής ακαμψίας "ladder"



Γράφημα 3-5-2: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης της στρεπτικής ακαμψίας του "ladder"



Γράφημα 3-5-3: Γράφημα ποσοστιαίας αύξησης βάρους του "ladder"

Παρατηρώντας τα διαγράμματα είναι προφανές ότι επειδή τα πλαίσια τύπου Ladder έχουν πολύ χαμηλότερη στρεπτική ακαμψία από αυτά του Formula Student μικρές αλλαγές μπορούν να αυξήσουν κατά μεγάλο ποσοστό την ακαμψία, όπως για παράδειγμα στην τελική γεωμετρία όπου ενισχύθηκαν τα άνω μέλη των σημείων των ψαλιδιών. Η μεγάλη όμως διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους πλαισίων είναι αυτή της αναλογίας βάρους με στρεπτικής ακαμψίας. Για παράδειγμα στο δεύτερο πλαίσιο που μελετήθηκε τύπου Formula Student το πλαίσιο ζύγισε 34 κιλά και επέδιδε 3851 Nm/deg στρεπτική ακαμψία ενώ το πλαίσιο τύπου Ladder ζύγισε 21 κιλά και απέδιδε 249 Nm/deg στρεπτική ακαμψία.

3.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η μελέτη της στρεπτικής ακαμψίας ανέδειξε ότι τα πλαίσια τύπου Formula Student διαθέτουν υψηλότερη αντοχή σε στρεπτική παραμόρφωση σε σύγκριση με το πλαίσιο τύπου Ladder. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πιο εξειδικευμένη φύση του πρώτου, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για αγώνες της Formula Student, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται σε πιο γενικές βιομηχανικές και κατασκευαστικές εφαρμογές.

Επιπλέον, η ανάλυση αποκάλυψε ότι το πλαίσιο τύπου Formula Student επιδεικνύει μεγαλύτερη αποδοτικότητα ως προς τη σχέση μεταξύ βάρους και απόδοσης. Η ελαφρύτερη κατασκευή του συμβάλλει στην αύξηση της ευελιξίας και της απόδοσης του οχήματος, κάτι που είναι κρίσιμο σε αγώνες ταχύτητας.

Σε σύγκριση, το πλαίσιο τύπου Ladder εμφάνισε περιορισμένη απόδοση σε σχέση με το βάρος του. Αυτό οφείλεται κυρίως στη σχεδιαστική του φύση που δεν είναι βελτιστοποιημένη για αγωνιστικές συνθήκες.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την επιτυχία του πλαισίου τύπου Formula Student σε σχέση με τη στρεπτική ακαμψία και τη σχέση μεταξύ βάρους και απόδοσης, καθιστώντας τον έναν ιδανικό επιλογή για αγωνιστικές εφαρμογές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα αποτελέσματα είναι προϊόν της συγκεκριμένης μεθοδολογίας και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία μας και ενδέχεται να υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης ή περαιτέρω ερευνών.

Μελλοντικά πλάνα

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των πλαισίων τύπου Formula Student και τύπου Ladder αποτελεί μία σημαντική επέκταση της παρούσας έρευνας. Στο πλαίσιο αυτό, προβλέπεται η εκτεταμένη ανάλυση των αναρτήσεων και των αντιστρεπτικών μπαρών, προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η συμπεριφορά των πλαισίων υπό δυναμικές συνθήκες.

Συγκεκριμένα, σχεδιάζεται η διεξαγωγή πειραμάτων σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με τη χρήση εξελιγμένων μέσων ανάλυσης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι ακριβείς επιδράσεις των αναρτήσεων στην στρεπτική ακαμψία των πλαισίων. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθούν πειράματα που θα εστιαστούν στην εξέταση της επίδρασης των αντιστρεπτικών μπαρών στην συμπεριφορά του συστήματος.

Οι πειραματικές μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν υπό ποικίλες συνθήκες φορτίου και ταχύτητας, αναδεικνύοντας την απόκριση των πλαισίων σε πραγματικές καταστάσεις. Η συγκέντρωση αυτών των δεδομένων θα διευκολύνει την εκ νέου αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την υποβολή προτάσεων για πιθανές βελτιώσεις των δυνατοτήτων των πλαισίων.

Με αυτές τις διευρυμένες μελέτες, στοχεύουμε στην απόλυτη κατανόηση και βελτίωση των δυνατοτήτων των πλαισίων τύπου Formula Student και τύπου Ladder, με έμφαση στις αναρτήσεις και τις αντιστρεπτικές μπάρες, προκειμένου να προσφέρουμε πρακτικές κατευθυντήριες γραμμές για τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό των συγκεκριμένων πλαισίων.

Έργα που αναφέρονται

1. **Kale, A.** *DESIGN OF FORMULA STUDENT Submitted by MECHANICAL*. 2016.
2. **Milliken, William F. Milliken and Douglas L.** *Race car vehicle dynamics*. s.l. : SAE , 1994.
3. **Maareddygari, A. B. Y. P. Kumar and P. K.** *Design and Construction of Chassis for Uniti L7e vehicle*. 2016.
4. **Waterman, B. J.** *“Design and Construction of a Space-frame Chassis*. 2011.
5. **Pritchard, Derek.** *Soldering, Brazing & Welding*. 2001.
6. **Jeffus, L. F.** *Welding and Metal Fabrication*. 2012.
7. **Χόνδρος, Θωμάς Γ.** *Δυναμική Ανάλυση Οχημάτων*. 2007.
8. **Young, Alexander.** *Validating Automotive Frame Torsion Stiffness Measurement Techniques*. 2016.
9. **Germany, Formula Student.** *Formula Student Rules 2023*. [Ηλεκτρονικό] 2023. https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf.
10. **Κουκλάκης, Φίλιππος.** *ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΟΥ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΤΥΠΟΥ FORMULA STUDENT*. 2021.
11. **Angga Kengkongan Ary, Yuwana Sanjaya, Aditya Rio Prabowo*, Fitriani Imaduddin, Nur Azmah, Binti Nordin, Iwan Istanto, and Joung Hyung Cho.** *Numerical estimation of the torsional stiffness characteristics on urban Shell Eco-Marathon (SEM) vehicle design*. 2021.
12. **R.K. Kawade, Mohan N.** *Chassis Frame Torsional Stiffness Analysis*. 2015.
13. **Amy Elizabeth Chambers, Sergio Anibal Rodriguez, Robert Michael Walsh, David Wootton.** *Development of a Test Stand for Determining the Torsional Rigidity of a formula SAE Space Frame*. 2016.
14. **EUA.** *Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry*. 2013.
15. **Oshinibosi, A.** *Chassis and Impact Attenuator design for Formula student Race car*. 2012.
16. **Davis, G.** *Materials for Automobile Bodies*. 2013.