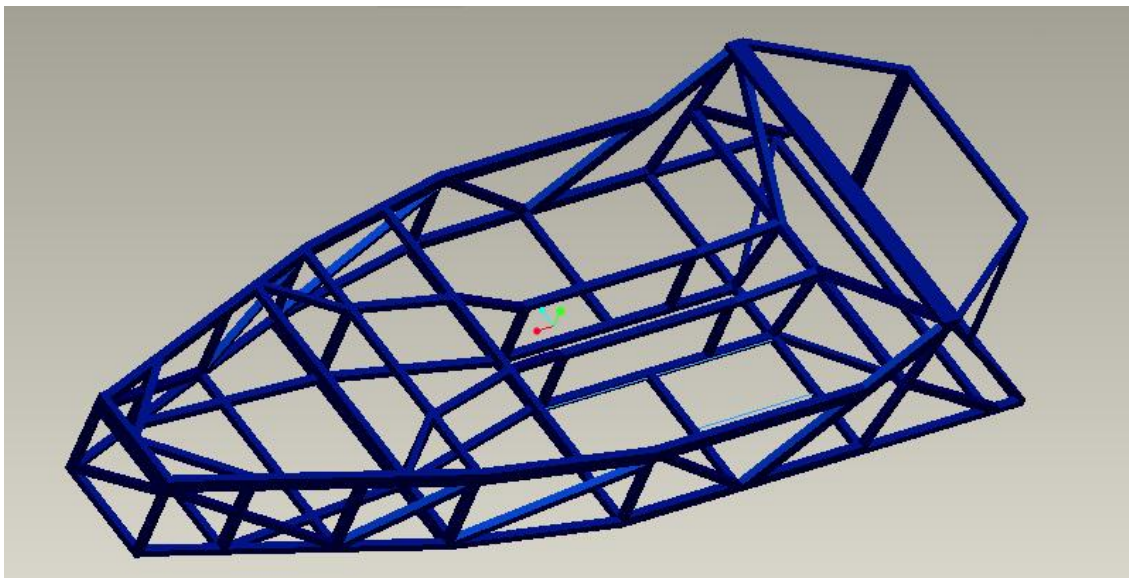


Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ CAD ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΠΑΤΣΙΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής
Γεώργιος Σταυρουλάκης
Χανιά 2012

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για τη βοήθεια που μου προσέφερε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας τον κ.Σταυρουλάκη Γεώργιο, Καθηγητή και Πρόεδρο του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την συνεργασία μας και την υποδειγματική του καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλες τις φάσεις της διεκπεραίωσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Επίσης την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πρόλογος

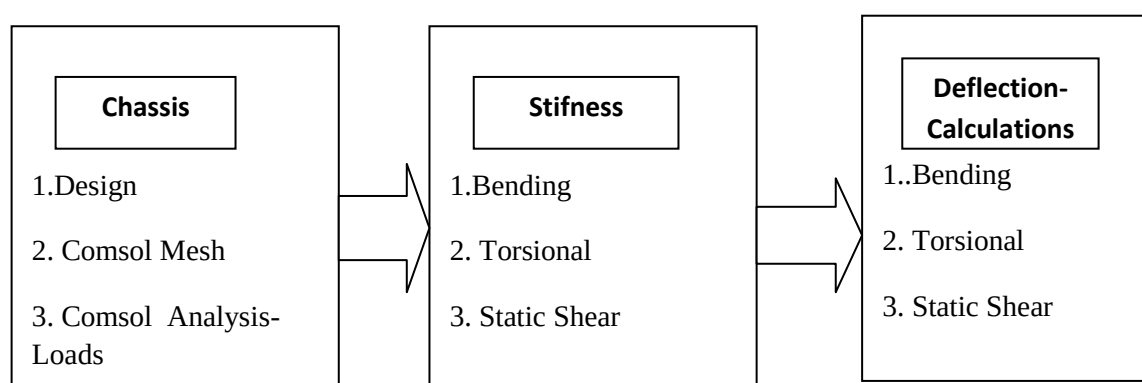
Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να σχεδιάσουμε σε ένα πρόγραμμα 3D ένα πλαίσιο αυτοκινήτου και συγκεκριμένα ένα πλαίσιο τύπου Locost όπως είναι γνωστά. Τα συγκεκριμένα πλαίσια αποτελούν ρεπλίκες γνωστών μοντέλων που κυκλοφορούν στην αγορά. Τα εν λόγω αυτοκίνητα όπως και το δικό μας είναι track day cars και για αυτό το λόγο έχουν μικρό βάρος, ενώ το πλαίσιο τους αποτελείται από λαμαρίνες διαφόρων διατομών και διαφόρων υλικών.

Σκοπός μας είναι εκτός από τον σχεδιασμό είναι να προχωρήσουμε και σε ανάλυση του πλαισίου που θα σχεδιάσουμε. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει τα αυτοκίνητα αυτά είναι αυτοκίνητα πίστας και για αυτό το λόγο πρέπει να είναι κατασκευασμένα με σωστό τρόπο ώστε να μεταφέρουν σωστά τη ιπποδύναμη τους στο δρόμο.

Αυτό επιτυγχάνεται με ένα αρκετά άκαμπτο πλαίσιο που θα επιτρέπει κάθε φορά στον οδηγό να μεγιστοποιεί την απόδοση του στο δρόμο και στη πίστα. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο θα αναλύσουμε το πλαίσιο μας με ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το Comsol Multiphysics ώστε να δούμε πόσο άκαμπτο έχει σχεδιαστεί.

Η κύρια παράμετρος είναι η στρεπτική ακαμψία και πόσο μεγάλη είναι αυτή τόσο καλύτερο είναι το πλαίσιο. Μαζί με την στρεπτική ακαμψία θα διερευνηθούν και άλλες μοντελοποιήσεις λιγότερο σημαντικές που θα μας οδηγήσουν στην τελική αξιολόγηση.

Διαδικασία Μεθοδολογίας



Περιεχόμενα

Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1	9
Πλαίσιο - Βασικοί Τύποι Πλαισίων	9
Εισαγωγή.....	9
1.1 Ladder frame (τύπου σκάλας πλαίσιο).....	9
1.2 Tubular Space Frame (Σωληνωτό πλαίσιο)	10
1.3 Monocoque(Μόνοκοκ).....	12
1.4 ULSAB Monocoque.....	14
1.5 Space Frame	16
1.6 Backbone frame (πλαίσιο τύπου κόκκαλο).....	20
1.7 Glass-Fiber Body.....	21
1.8 Carbon-Fiber Monocoque	23
1.9 Carbon-Fiber Panels VS Carbon-Fiber Monocoque Chassis	24
1.10 Lotus Elise Frame.....	27
1.11 Φορτίσεις Πλαισίων	34
1.12 Εκτίμηση Φορτίων	37
1.13 Επιλογή υλικού.....	38
1.14 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων	40
Κεφάλαιο 2	41
Θεωρία 3D CAD.....	41
2.1 Ορισμός σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή CAD.....	41
2.2 Συστήματα CAD	42
2.3. Προσομοίωση συμπεριφοράς μοντέλου.....	44
2.4 Στερεά Μοντέλα.....	45
2.5 Παραμετρική μοντελοποίηση με χαρακτηριστικά	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	49
Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	49
Εισαγωγή.....	49
3.1 Διαδικασία Ανάλυσης	51
3.1.1 Γενικές Έννοιες	51
3.1.2 Γεωμετρία	52
Κεφάλαιο 4	54

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Wildfire Pro-Engineer 2.0	54
Κεφάλαιο 5	61
Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων	61
5.1 Εισαγωγή αρχείου CAD σε Πεπερασμένα Στοιχεία	61
5.2 Εντολές μέσα στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων	66
Κεφάλαιο 6	71
Μοντελοποιήσεις	71
6.1 Μοντελοποίηση Καμπτικής Δυσκαμψίας ή Bending Stifness	71
6.2 Μοντελοποίηση Στατικής Ανάλυσης Διάτμησης ή Static Shear	72
Οι δυνάμεις που εφαρμόσαμε είναι	72
6.3 Μοντελοποίηση Στρεπτικής Ακαμψίας	72
Κεφάλαιο 7	74
Αποτελέσματα Μοντελοποιήσεων	74
7.1 Αποτελέσματα Στρεπτικής Ακαμψίας	74
7.2 Αποτελέσματα Καμπτικής Δυσκαμψίας	79
7.3 Αποτελέσματα Στατικής Διάτμησης	84
Κεφάλαιο 8	91
Υπολογισμοί Μοντελοποιήσεων	91
Κεφάλαιο 9	93
Βελτιστοποίηση πλαισίου	93
Κεφάλαιο 10	96
Αποτελέσματα Μοντελοποιήσεων πλαισίου 2.	96
10.1 Αποτελέσματα Στρεπτικής Ακαμψίας	96
10.2 Αποτελέσματα Καμπτικής Δυσκαμψίας	101
10.3 Αποτελέσματα Στατικής Διάτμησης	106
Κεφάλαιο 11	111
Υπολογισμός Στρεπτικής Ακαμψίας Πλαίσιο 2	111
Κεφάλαιο 12	112
Εναλλακτικές Ανάλυση Πλαίσιο.	113
Επεκτάσεις και μελλοντική εργασία	114
Βιβλιογραφία	115

Εισαγωγή

Η στρεπτική ακαμψία ενός πλαισίου αγωνιστικού αυτοκινήτου είναι η παράμετρος κλειδί που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά στο χειρισμό του. Η υπερστροφή και η υποστροφή μπορεί να προσαρμοστούν αλλάζοντας την κλίση του αμαξώματος από την μπροστινή ή πίσω ανάρτηση [1]. Οι προσαρμογές αυτών των παραμέτρων επηρεάζουν την κατανομή των φορτίων και ως εκ τούτου την έλξη κάθε τροχού κατά το στρίψιμο. Για τον ακριβή έλεγχο των χαρακτηριστικών χειρισμού του οχήματος, είναι σημαντικό το πλαίσιο να είναι αρκετά σκληρό για να διασφαλίσει ότι η κάμψη του δεν συμβιβάζει το στήσιμο της ανάρτησης. Αυτό είναι πολύ πιο σημαντικό σε υψηλής απόδοσης και αγωνιστικά οχήματα, όπου τα φορτία στην ανάρτηση είναι τα μέγιστα και οι προσαρμογές στην ανάρτηση είναι κρίσιμες. Η στρεπτική ακαμψία, K_T , σχετίζει την στρεπτική εκτροπή, θ της κατασκευής όταν σε αυτό εφαρμόζεται μια ροπή, T κατά τον διαμήκη άξονα του οχήματος. Δεν πρέπει να υπάρχει σύγχυση μεταξύ της καμπτικής δυσκαμψίας (bending stiffness), K_B , που σχετίζει τη συμμετρική κάθετη εκτροπή ενός σημείου κοντά στο κέντρο της βάσης του τροχού σε πολλαπλάσια των συνολικών στατικών φορτίων πάνω στο όχημα. Η στρεπτική ακαμψία συχνά χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για να προσδιορίσει την αποτελεσματικότητα της δομής του οχήματος. Τυπικά Formula 1 αγωνιστικά μονοποσώα αυτοκίνητα (συνήθως κατασκευασμένα από ανθρακόνημα) έχουν στρεπτική ακαμψία 30.000 Nm/deg μόνο για το σύνθετο tub (πλαίσιο τύπου μπανιέρα), χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η μηχανή και το κιβώτιο ταχυτήτων, τα οποία φέρουν φορτία. Ένα τυπικό Formula SAE πλαίσιο έχει ως στόχο στρεπτική ακαμψία 1500 Nm/degree.

Η ελίτ του μηχανοκίνητου αθλητισμού και οι κατασκευαστές αυτοκινήτων μπορούν να αντέξουν οικονομικά τις πιο εξελιγμένες δοκιμές χρησιμοποιώντας πολλές φορές και δικά τους λογισμικά που εξυπηρετούν τον σκοπό αυτό. Οι περισσότεροι όμως μικρότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δικές τους εξέδρες δοκιμών τεχνολογικά κατώτερες οι οποίες, μεταξύ πολλών άλλων χαρακτηριστικών συνδέονται με την πλήρη κλίμακα δυναμικής δοκιμής του οχήματος, προσφέροντας έλεγχο δυναμικής στρεπτικής φόρτισης ολόκληρου του αυτοκινήτου. Αυτές οι εγκαταστάσεις ωστόσο, δεν είναι εύκολα διαθέσιμες σε μικρότερους κατασκευαστές και ομάδες φοιτητών οι οποίες ασχολούνται με την μέτρηση των χαρακτηριστικών

ενός αυτοκινήτου. Μία μοντέρνα εναλλακτική είναι να χρησιμοποιείται λογισμικό εικονικής προτυποποίησης (virtual prototyping software). Ένα εικονικό πρότυπο βασίζεται σε ένα τρισδιάστατο στερεό μοντέλο, τα ατομικά συστατικά του οποίου μοντελοποιούνται με διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας. Αυτά τα multi-body δυναμικά μοντέλα συνήθως παράγονται από CAD μοντέλα από τη γεωμετρία του οχήματος, όπου βασικά χαρακτηριστικά όπως η μάζα, η στρεπτική ακαμψία και η καμπτική δυσκαμψία πρέπει προσεχτικά να αναπαραχθούν. Συχνά υποτίθεται ότι το πλαίσιο είναι απολύτως άκαμπτο και ότι κάθε κίνηση του κέντρου βαρύτητας του οχήματος σε σχέση με το δρόμο οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην ανάρτηση (suspension) και όχι στο πλαίσιο.

Η ιδέα ενός πλαισίου φέρει πολλές διαφορετικές υποδηλώσεις, ανάλογα με την αναφερόμενη πηγή. Για το σκοπό αυτής της εργασίας, το σασί θα θεωρηθεί ως μια δομή που μεταφέρει και συνδέει όλα τα βασικά εξαρτήματα συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα, του οδηγού, το σύστημα κίνησης και άλλα συστήματα του οχήματος. Η δομή του πλαισίου πρέπει να υποστηρίζει με ασφάλεια το βάρος των εξαρτημάτων του οχήματος και να διαβιβάζει τα φορτία που προκύπτουν από διαμήκης, εγκάρσιες και κατακόρυφες επιταχύνσεις, που είναι έμπειρες σε ένα αγωνιστικό ή μη περιβάλλον, χωρίς αποτυχία. Υπάρχουν πολλές πτυχές που εξετάζονται κατά το σχεδιασμό ενός πλαισίου, συμπεριλαμβανομένης της συσκευασίας του εξαρτήματος (συμπεριλαμβανομένου και του οδηγού), επιλογή υλικών κατασκευής, αντοχή, ακαμψία και βάρος. Ο πρωταρχικός στόχος του πλαισίου είναι η παροχή μιας δομής η οποία συνδέει την εμπρός και πίσω ανάρτηση χωρίς υπερβολική παραμόρφωση. Κατά την εξέταση ενός πλαισίου αυτοκινήτου, ένα πλαίσιο που εύκολα γέρνει (easily twisted) θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά προβλήματα χειρισμού. Η ρύθμιση της ανάρτησης βασίζεται στη παραδοχή ότι και οι τέσσερις γωνίες του οχήματος είναι συνδεδεμένες με ένα απείρως άκαμπτο σώμα. Εάν το πλαίσιο δεν είναι αρκετά σκληρό, η δομή είναι απλώς μια άλλη μεταβλητή του συστήματος, καθώς δρα ως στρεπτικό ελατήριο (torsional Spring). Αυτή η μεταβλητότητα μέσα στη δομή του πλαισίου καθιστά πολύ δύσκολο να επιλεγεί μια ρύθμιση της ανάρτησης που θα δημιουργήσει τα απαραίτητα επίπεδα πλευρικής πρόσφυσης που θα είναι ανταγωνιστικές. Σε γενικές γραμμές, ένα πλαίσιο που είναι σε θέση να αντιστέκεται σε στρεπτικά φορτία ως αποτέλεσμα των αδρανών

επιταχύνσεων των εξαρτημάτων δοκιμασμένα στις στροφές ή από εφαρμοζόμενα φορτία σε μία ή σε αντίθετες γωνίες του οχήματος θα είναι σχεδόν πάντα ισχυρό.

Η αυξημένη στρεπτική ακαμψία ενός πλαισίου αυτοκινήτου βελτιώνει τη συμπεριφορά του οχήματος επιτρέποντας την αναστολή των εξαρτημάτων για τον έλεγχο μεγαλύτερου ποσοστού της κινηματικής του οχήματος, δηλαδή, ο προβλέψιμος χειρισμός μπορεί καλύτερα να επιτευχθεί εάν το πλαίσιο είναι αρκετά άκαμπτο, ώστε η κλίση του αμαξώματος (roll stiffness) να ενεργεί μεταξύ της αναρτημένης και μη αναρτημένης μάζας, οφείλεται εξ ολοκλήρου στην ανάρτηση (suspension). Επιπλέον ένα πλαίσιο αγωνιστικού αυτοκινήτου πρέπει να διαθέτει επαρκή στρεπτική ακαμψία έτσι ώστε η δυναμική δομή του πλαισίου να μην επηρεάζει την λειτουργία της ανάρτησης.

Ενώ σχεδιάζουμε ένα νέο πλαίσιο τα διαθρωτικά μέλη θα πρέπει στρατηγικά να τοποθετούνται, προκειμένου να μειωθεί η συστροφή του πλαισίου και να ελαχιστοποιηθούν οι τοπικές εκτροπές των σημείων στήριξης της ανάρτησης. Προκειμένου να μειωθεί η συστροφή και η εκτροπή, ένα ελάχιστο επίπεδο ακαμψίας στο πλαίσιο πρέπει να επιτευχθεί, ενώ ταυτόχρονα διατηρείτε το βάρος του πλαισίου και το κέντρο βάρους χαμηλά.

Συμπερασματικά κάθε καλό σασί πρέπει να κάνει πολλά πράγματα [21]:

- Να είναι δομικά σταθερό, με κάθε τρόπο κατά τη διάρκεια της αναμενόμενης ζωής του οχήματος και πέρα. Αυτό σημαίνει ότι τίποτα δε θα σπάσει ποτέ υπό κανονικές συνθήκες.
- Διατήρηση των υποδοχέων της ανάρτησης σε σταθερή θέση τοποθέτησης, ώστε ο χειρισμός να είναι ασφαλής και συνεπής σε στροφές υψηλών ταχυτήτων και κάθετων φορτίων υπό κάθε συνθήκη.
- Να παρέχει ικανοποιητική στήριξη στα πάνελ του αμαξώματος και οποιοδήποτε εξάρτημα που σχετίζεται με τους επιβάτες έτσι ώστε οτιδήποτε να παραμένει ισχυρό και να δημιουργεί αίσθημα ασφαλείας και να έχει μια μακροχρόνια, αξιόπιστη ζωή .
- Προστασία των επιβατών από οποιαδήποτε εξωτερική διείσδυση και σύγκρουση.

Κεφάλαιο 1

Πλαίσιο - Βασικοί Τύποι Πλαισίων

Εισαγωγή

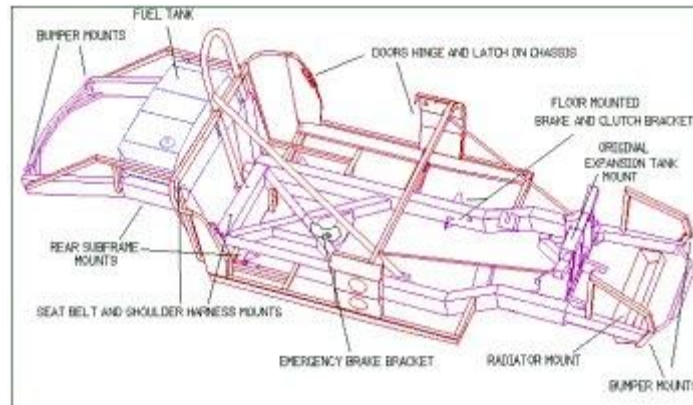
Βασική αρχή για την κατασκευή ενός αυτοκινήτου αποτελεί το πλαίσιο. Πάνω σε αυτό στηρίζονται όλα τα μηχανικά μέρη του αυτοκινήτου όπως ο κινητήρας και οι αναρτήσεις και γενικά όλο το αμάξωμα [4]. Το μη αυτοφερόμενο πλαίσιο ή σασί ή τύπου σκάλας, όπως συνηθίζεται να λέγεται λόγω του σχήματός του, επικράτησε για πολλά χρόνια στα επιβατικά αυτοκίνητα μέχρι τη δεκαετία του 1970 ενώ σήμερα χρησιμοποιείται αποκλειστικά μόνο σε μερικά εκτός δρόμου οχήματα. Το πιο διαδεδομένο υλικό κατασκευής των πλαισίων είναι ο χάλυβας. Η χρήση "εξωτικών" υλικών όπως ανθρακονήματα, κέβλαρ και μαγνήσιο αποτελεί βασικό "συστατικό" κατασκευής των μονοθέσιων της F1. Το αλουμίνιο ξεκίνησε τα πρώτα του βήματα στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή спор και πολυτελών αυτοκινήτων για να περάσει πλέον στις μέρες μας σε αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής.

Καθοριστικοί παράγοντες των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων, οι οποίες εμφανίζονται στη φόρτιση του πλαισίου σε κάμψη ως προς τον κατακόρυφο άξονα και σε στρέψη, είναι οι κόμβοι σύνδεσης των δοκών, που συνθέτουν το πλαίσιο. Η διερεύνηση των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη μεταφορά κόμβων πλαισίων σε κατάλληλα μοντέλα, τα οποία υπολογίζονται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Συγκεκριμένα διερευνάται η επίδραση στον υπολογισμό της δυσκαμψίας των πλαισίων και των τάσεων στην περιοχή κοχλιοσυνδεδεμένων κόμβων της προσομοίωσης μεταφοράς δυνάμεων διαμέσου των ευρισκόμενων σε επαφή ελασμάτων.

1.1 Ladder frame (πλαίσιο τύπου σκάλας)

Το τύπου σκάλας είναι το πρώτο είδος πλαισίου που εμφανίστηκε τόσο για τα επιβατικά αυτοκίνητα όσο και για τα φορτηγά ως η πιο ισχυρή λύση [16]. Αποτελείται από δύο κύριες δοκούς που είναι ενωμένες μεταξύ τους με μικρότερες, σχηματίζοντας έτσι μια πλατφόρμα. Επάνω σε αυτή στηρίζονται οι αναρτήσεις, το μοτέρ και το σασμάν, ενώ σε επιπλέον βάσεις υπάρχει βιδωμένο το αμάξωμα του

οχήματος. Το πάτωμα του αυτοκινήτου είναι ξεχωριστό από το πλαίσιο και υπάρχει η δυνατότητα να ανυψωθεί με τη χρήση αποστατών (body-lift). Αρχικά, το εν λόγω πλαίσιο ήταν ξύλινο και χρησιμοποιείτο στα κάρα, ενώ από το 1930 και μετά άρχισε να χρησιμοποιείται σε όλα τα οχήματα, έχοντας ως βασικό στοιχείο του το ατσάλι.



Εικόνα 1.1.1: Πλαίσιο τύπου σκάλας

Πλεονεκτήματα

- Εύκολο σε σχεδιασμό, κατασκευή και μετασκευή (τροποποίηση).
- Ιδανικό για βαριά χρήση σε σκληρές συνθήκες και με μεγάλη αντοχή.
- Δυνατότητα εύκολης επισκευής.
- Καλύτερη στρεπτική ακαμψία.

Μειονεκτήματα

- Βαριά κατασκευή, με αποτέλεσμα χειρότερες επιδόσεις και μεγαλύτερη κατανάλωση.
- Ψηλότερο κέντρο βάρους που θυσιάζει το κράτημα και τη σταθερότητα.
- Λόγω ακαμψίας, σε περίπτωση ατυχήματος υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες τραυματισμού των επιβατών.

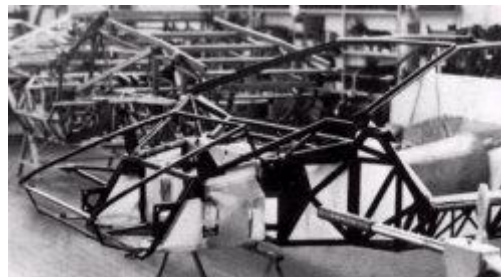
Ποιοι το χρησιμοποιούν

- Οχήματα ελεύθερου χρόνου (SUV) και κλασικά αυτοκίνητα όπως Ac Cobra.

1.2 Tubular Space Frame (Σωληνωτό πλαίσιο)

Τα σασί τύπου σκάλας δεν είναι αρκετά ισχυρά, έτσι οι μηχανικοί αυτοκινήτων αγώνων έχουν αναπτύξει ένα τριών διαστάσεων - σωληνωτό πλαίσιο.

Ένα από τα πρώτα παραδείγματα ήταν η μεταπολεμική αγωνιστική Maserati Tipo 61 "Birdcage". Κάνει χρήση σωληνωτού πλαισίου χωροδικτυώματος που αποτελείται από δεκάδες κυκλικής διατομής σωλήνες (ορισμένοι μπορούν να χρησιμοποιούν σωλήνες τετραγωνικής διατομής για ευκολότερη σύνδεση με το πάνελ του σώματος, αν και οι κυκλικές διατομές παρέχουν τη μέγιστη δύναμη), που τοποθετούνται σε διάφορες κατευθύνσεις για την παροχή μηχανικής αντοχής έναντι των δυνάμεων της από οπουδήποτε αυτές και αν προέρχονται. Αυτοί οι σωλήνες είναι συγκολλημένοι μεταξύ τους και δημιουργούν μια πολύ περίπλοκη δομή, όπως μπορείτε να δείτε στις παραπάνω εικόνες.



Εικόνα 1.2.1: *Lamborghini Countach*



Εικόνα 1.2.2: Σωληνωτό πλαίσιο

Τα αγωνιστικά αυτοκίνητα υψηλών προδιαγραφών τα οποία απαιτούν υψηλότερα επίπεδα μηχανικής δύναμης κάνουν χρήση σωληνωτών πλαισίων, χωροδικτυωμάτων που ενσωματώνουν συνήθως μια ισχυρή δομή κάτω από τις δύο πόρτες (βλέπε *εικόνα 1.2.1* της Lamborghini Countach) με αποτέλεσμα αυτό να οδηγήσει σε ασυνήθιστα υψηλά μαρσπιέ θυρών και επιπρόσθετα στη δύσκολη πρόσβαση στην καμπίνα.

Στις αρχές της δεκαετίας του '50, η Mercedes-Benz δημιούργησε ένα 300SLR αγωνιστικό αυτοκίνητο με σωληνωτό πλαίσιο. Αυτό, επίσης, έφερε στον κόσμο το πρώτο σωληνωτό πλαίσιο αυτοκινήτων δρόμου, το 300SL Gullwing. Δεδομένου ότι τα μαρσπιέ βρίσκονταν αρκετά ψηλά αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί δραματικά

η προσβασιμότητα στη καμπίνα, η Mercedes σκέφτηκε να επεκτείνει τις πόρτες πιο πάνω από την οροφή και έτσι δημιουργήθηκαν οι περίφημες πόρτες ‘Gullwings’.



Εικόνα 1.2.3: Mercedes SL300

Από τα μέσα της δεκαετίας του '60, πολλά σπορ αυτοκίνητα άρχισαν να χρησιμοποιούν σωληνωτά πλαίσια για όσο το δυνατόν καλύτερο πηλίκo ακαμψίας βάρους. Ωστόσο, πολλοί από αυτούς χρησιμοποιούν στην πραγματικότητα σωληνωτά πλαίσια για την εμπρός και πίσω δομή και έφτιαχναν την καμπίνα από monocoque για τη μείωση του κόστους κάτι που γίνεται μέχρι σήμερα.

Πλεονεκτήματα

- Πολύ ισχυρά σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (εν σύγκριση με σασί τύπου σκάλας και monocoque σασί του ίδιου βάρους)

Μειονεκτήματα

- Πολύ περίπλοκα, δαπανηρά και χρονοβόρα για να κατασκευαστούν. Αδύνατο για αυτόματη παραγωγή.
- Υψηλό πλαϊνό μαρσπιέ με αποτέλεσμα δυσκολία πρόσβασης σε καμπίνα.

1.3 Monocoque(Μόνοκοκ)

Σήμερα, το 99% των αυτοκινήτων που παράγονται σε αυτόν τον πλανήτη χρησιμοποιούν monocoque σασί από χάλυβα, χάρη στο χαμηλό κόστος παραγωγής και την καταλληλότητά του για αυτόματη παραγωγή.

Το Monocoque σασί είναι μία δομή ενός κομματιού η οποία καθορίζει το συνολικό σχήμα του αυτοκινήτου. Τα τύπου σκάλας, τα σωληνωτά πλαίσια και το πλαίσιο ραχοκοκκαλιάς παρέχουν μόνο τα φορτιζόμενα μέρη τους και πρέπει να χτίσει το κέλυφος γύρω από αυτά, σε αντίθεση με τα τύπου μόνοκοκ πλαίσια τα οποία είναι ήδη ενσωματωμένα με το σώμα σε ένα ενιαίο κομμάτι, όπως μπορείτε να δείτε στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.3.1: Volvo V70

Στην πραγματικότητα, το σασί δημιουργήθηκε από συγκόλληση αρκετών κομματιών μαζί. Το πάτωμα, το οποίο είναι το μεγαλύτερο κομμάτι και τα υπόλοιπα έχουν ενωθεί από μεγάλες μηχανές σφράγισης. Είναι συγκολλημένα μεταξύ τους με πονταρίσματα που εκτελούνται από ρομπότ (μερικά ακόμη και με τη χρήση συγκόλλησης λέιζερ) σε μια γραμμή παραγωγής. Η όλη διαδικασία διαρκεί λίγα μόνο λεπτά. Μετά από αυτό, μερικά εξαρτήματα όπως πόρτες, καπό, πορτμπαγκάζ, πλαϊνά τοιχώματα και η οροφή έρχονται και προστίθενται και δημιουργούν ένα ολόκληρο πλαίσιο.

Τα Monocoque σασί παρέχουν επίσης προστασία από ενδεχόμενη συντριβή-σύγκρουση. Επειδή χρησιμοποιούν πολλά μέρη από μέταλλο, η ελεγχόμενη ζώνη παραμόρφωσης μπορεί να οικοδομηθεί στη δομή. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η εκμετάλλευση χώρου. Η όλη δομή είναι στην πραγματικότητα ένα εξωτερικό περίβλημα, σε αντίθεση με άλλα είδη σασί, και δεν υπάρχει μεγάλο τούνελ μετάδοσης, υψηλά μαρσπιέ, ρολλ μπαρ κλπ.

Προφανώς υπάρχουν και πολλά μειονεκτήματα. Είναι πολύ βαριά χάρη στη χρήση μεγάλης ποσότητας μετάλλων. Δεδομένου ότι το κέλυφος είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να επωφεληθούν από την αποδοτικότητα χώρου και όχι από την αντοχή μηχανικής δύναμης, η λαμαρίνα δεν είναι τόσο ισχυρή όσο οι μεταλλικοί σωλήνες ενώ το πηλίκo ακαμψία-προς βάρος είναι επίσης το χαμηλότερο μεταξύ όλων των ειδών σασί εκτός από το σασί τύπου σκάλας. Επιπλέον όλο το monocoque είναι κατασκευασμένο από χάλυβα, σε αντίθεση με κάποιες άλλες δομές σασί που συνδυάζουν χάλυβα και ένα σώμα από αλουμίνιο ή ίνες από γυαλί, κάνοντας το να είναι απελπιστικά βαρύτερο από άλλα.

Παρά το γεγονός ότι το σασί monocoque είναι κατάλληλο για μαζική παραγωγή από ρομπότ, είναι σχεδόν ασύμφορο για μικρής κλίμακα παραγωγή. Το κόστος εγκατάστασης για τα εργαλεία είναι πάρα πολύ ακριβό, μεγάλες μηχανές σφράγισης και ακριβά καλούπια. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η Porsche είναι η μόνη που ειδικευόταν στη δημιουργία σπορ αυτοκινήτων και ο όγκος της παραγωγής της παρότι μικρός μπορούσε να αντεπεξέλθει οικονομικά σε αυτό σε σχέση με τις υπόλοιπες εταιρείες.

Πλεονεκτήματα

- Φτηνό για μαζική παραγωγή. Εγγενώς καλή προστασία συντριβή-σύγκρουσης.
- Αποτελεσματική εκμετάλλευση χώρου

Μειονεκτήματα

- Πολύ βαριά.
- Πολύ ακριβά για παραγωγή αυτοκινήτων μικρού όγκου.

Ποιοι το χρησιμοποιούν

- Τα περισσότερα μοντέλα που υπάρχουν από τη δεκαετία 70 και έπειτα. Σχεδόν όλες οι Porsche.

1.4 ULSAB Monocoque (Πολύ ελαφρύ πλαίσιο από κράμα σιδήρου)

Εισερχόμενοι στη δεκαετία του '90, οι αυστηρότεροι κανονισμοί που επεβλήθησαν και αφορούσαν την ασφάλεια των επιβατών είχε ως αποτέλεσμα την επιτακτική ανάγκη δημιουργίας ακόμα πιο άκαμπτων σασί. Το γεγονός αυτό οδήγησε

με τη σειρά του σε ακόμα πιο βαριά παραδοσιακά μονοκόκ σασί που γίνονταν από χάλυβα. Ως αποτέλεσμα, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων αναγκάστηκαν να στραφούν σε εναλλακτικά υλικά για την αντικατάσταση του χάλυβα, με πιο διαδεδομένη τη χρήση του αλουμινίου. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει ακόμη αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής, εκτός από το Audi A8 και το A2, στα οποία το αλουμίνιο έχει αντικαταστήσει πλήρως τον χάλυβα στην κατασκευή του σασί, όλο και περισσότερα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν αλουμίνιο σε πολλά μέρη του αμαξώματος, όπως στο καπό και το πορτμπαγκάζ, στην ανάρτηση και στα υποπλάισια ανάρτησης.

Ως εκ τούτου, οι Αμερικανοί κατασκευαστές χάλυβα προσέλαβαν ανθρώπους από το τμήμα Porsche Engineering Services για να αναπτύξει ένα νέο είδος χάλυβα με στόχο τη χρήση του σε monocoque σασί νέας τεχνολογίας που το ονόμασαν Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB).



Εικόνα 1.4.1: Audi A8

Όπως φαίνεται στην *εικόνα 1.4.1*, ουσιαστικά έχει την ίδια δομή με ένα συμβατικό monocoque. Αυτό που διαφέρει από τον δότη του είναι σε μικρές λεπτομέρειες - τη χρήση των τμημάτων "Hydroform", χάλυβα σάντουιτς και συγκόλληση με λέιζερ δέσμης.

Hydroform είναι μια νέα τεχνική για τη διαμόρφωση των μετάλλων στο επιθυμητό σχήμα. Η συμβατική μέθοδος χρησιμοποιεί μια μεγάλου βάρους μηχανή, για να πιέσει ένα μεταλλικό φύλλο, και δημιουργεί αναπόφευκτα ανομοιογενές πάχος, όπου οι άκρες και οι γωνίες είναι πάντα πιο λεπτές από τις επιφάνειες. Για να διατηρηθεί ένα ελάχιστο πάχος εκεί, προς όφελος της ακαμψίας, οι σχεδιαστές αυτοκινήτων πρέπει να επιλέξουν παχύτερη λαμαρίνα από ό, τι αρχικά χρειάζεται. Η τεχνική Hydroform είναι πολύ διαφορετική. Αντί να χρησιμοποιεί λαμαρίνα, μορφοποιεί λεπτές σωλήνες από χάλυβα, με αποτέλεσμα, οι σχεδιαστές να μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ελάχιστο πάχος του χάλυβα και να μειώνετε το βάρος.

Ο χάλυβας σάντουιτς είναι κατασκευασμένος από έναν θερμοπλαστικό (πολυπροπυλένιο) πυρήνα ανάμεσα σε δύο πολύ λεπτά φύλλα χάλυβα. Αυτός ο συνδυασμός είναι έως και 50% ελαφρύτερος σε σχέση με ένα κομμάτι ομοιογενούς χάλυβα χωρίς ποινές στην απόδοση. Επειδή δείχνει εξαιρετική ακαμψία, εφαρμόζεται σε τομείς που απαιτούν υψηλή καμπτική ακαμψία. Ωστόσο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί παντού επειδή χρειάζεται κόλλα συγκόλλησης ή πριτσίνωμα.

Συγκρινόμενα με τα συμβατικά μονοκόκ, η Porsche Engineering ισχυρίστηκε ότι είναι 36% ελαφρύτερο και πάνω από 50% πιο άκαμπτο. Αν και η ULSAB εισήχθη στις αρχές του 1998, το νέο Opel Astra και η BMW 3-Series το έχει χρησιμοποιήσει ήδη σε ορισμένα μέρη.

1.5 Space Frame (Χωροδικτύωμα)

Θεωρείται από τις καλύτερες μεθόδους σασί που μπορεί να αποφέρει πολύ καλά αποτελέσματα στρεπτικής ακαμψίας, εκμετάλλευσης βάρους και προστασία αντίδρασης καθώς επίσης είναι εύκολο στο σχεδιασμό και μέτριας δυσκολίας στην κατασκευή. Αυτό το καθιστά ιδανικό για πολλές εφαρμογές όπως για διαγωνισμούς Formula Sae. Πρόκειται βασικά για ένα πλαίσιο “κλωβό” που αποτελείται από ένα χωροδικτύωμα (space-frame) και περικλείει μέσα του τα σημεία-μέρη για την τοποθέτηση των μηχανικών μερών, καθώς και το χώρο του πληρώματος-επιβατών. Η κατασκευή του αποτελείται από χαλύβδινους ή αλουμινένιους σωλήνες τοποθετούμενοι σε διασταυρωθέντες μορφές για την υποστήριξη των φορτίων από την αναστολή, τον κινητήρα, τον οδηγό και την αεροδυναμική.

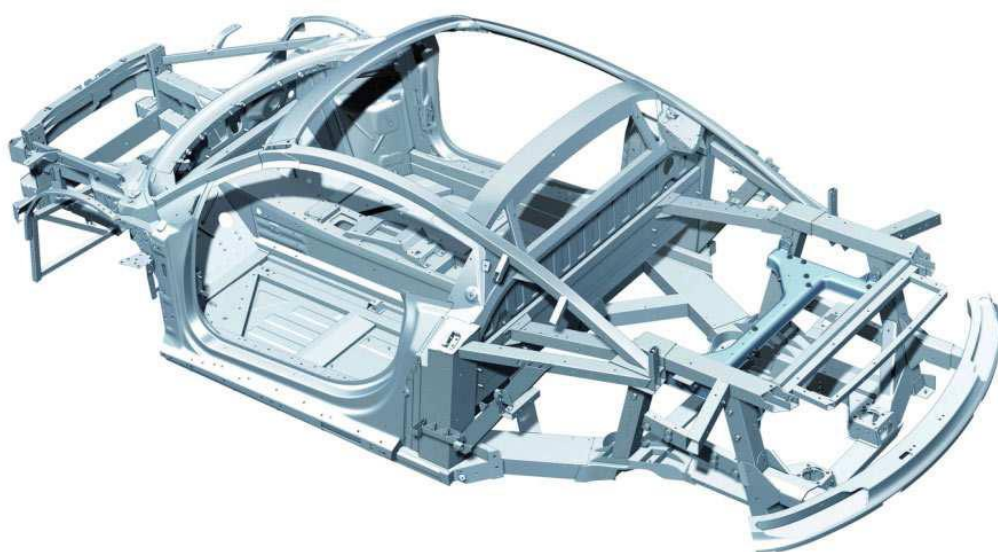
Τα space frames είναι πολύ δημοφιλή στο ερασιτεχνικό motorsport λόγω της απλότητάς τους. Η δυνατότητα κατασκευής του σε επιθυμητές διαστάσεις, κάνει πολλούς να το προτιμούν. Η ελαφριά κατασκευή του το καθιστά ιδανικό για χρήση σε αγώνες τύπου Baja. Γνωστότερη μορφή του σε αγωνιστική χρήση είναι τα οχήματα Buggy και τα extreme rock-crawlers στις Η.Π.Α. Επίσης, τελευταία το συναντάμε και στις ελαφριές κατασκευές τύπου buggy.

Κάπου ανάμεσα σε ένα αυτοφερόμενο (monocoque) και ένα space frame κατατάσσεται το αλουμινένιο spaceframe της Audi όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.5.2* και *1.5.3*. Δεν ακολουθεί κατ’ ανάγκην τους ίδιους κανόνες όπου τα περισσότερα

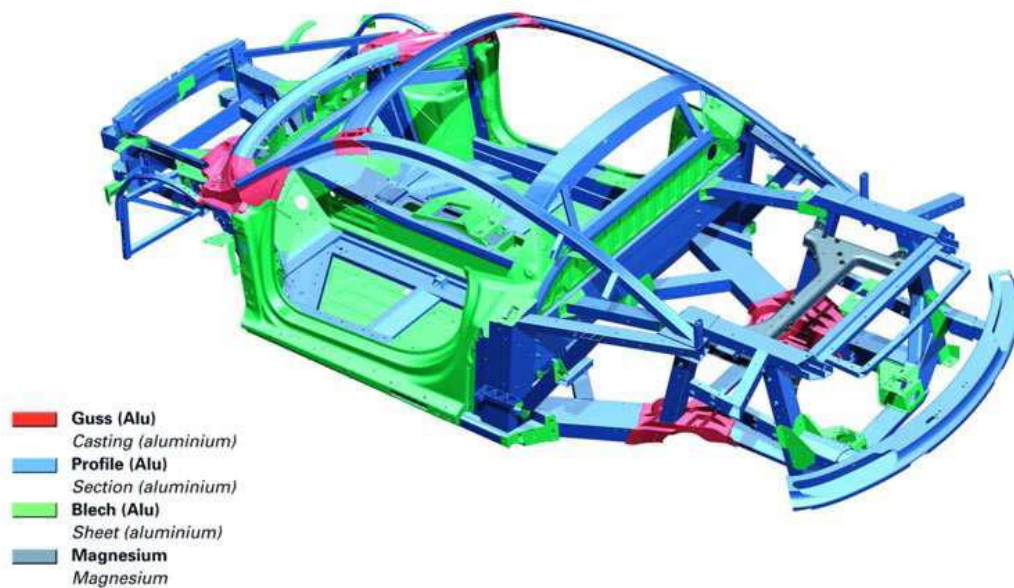
spaceframes ακολουθούν, όπως πλήρη τριγωνισμό (full triangulation) και καθόλου καμπτικές στιγμές (bending moments) σε οποιαδήποτε δοκάρια. Στην πραγματικότητα αν δει κανείς το πλαίσιο του Audi R8 θα παρατηρήσει ότι τα σημεία ανάρτησης (suspension points) υπόκεινται σε δυνάμεις κάμψης. Το αλουμινένιο spaceframe της Audi είναι ένας συνδυασμός υδρομορφοποιημένων μερών, (tubular extrusions) σωληνοειδής extrusions και άλλα τμήματα που μπορεί να φανούν στο σχήμα 1.5.1. Συνδέονται με σημειακή συγκόλληση, συγκόλληση ραφής και κάρφωμα.



Εικόνα 1.5.1: *Space Frame of FSAE car*



Εικόνα 1.5.2: *Audi R8 ASF*



Σχήμα 1.5.3.: Audi R8 ASF τμήματα

Skinned space frame

Η skinned space frame είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείτε για τη μετάβαση από το space frame (χωροδικτύωμα) σε monocoque (αυτοφερόμενο). Ένα φύλλο λαμαρίνας (δέρμα) τοποθετείται πάνω στο χωροδικτύωμα και συγκολλείται ή καρφώνεται πάνω σε αυτό. Αυτό προσθέτει το υλικό μακριά από τον ουδέτερο άξονα πολύ εύκολα. Οι πρόοδοι στην στρεπτική ακαμψία μπορεί εύκολα να γίνουν στο κόστος βάρους (cost of weight). Είναι ένα εύκολος τρόπος για να αυξηθεί η απόδοση με μικρό κόστος βάρους αλλά μπορεί να βελτιωθεί με την αφαίρεση ορισμένων τριγωνισμένων μελών και αφήνοντας μόνο τα προσανατολισμένα μέλη ασφάλειας στη θέση τους.

Πλεονεκτήματα

- Ελαφρύτερο από πλαίσια κατασκευασμένα από ατσάλι
- Αποτελεσματική εκμετάλλευση χώρου

Μειονεκτήματα

- Πολύ ακριβό για μαζική παραγωγή ειδικότερα σε αυτοκίνητα με χαμηλό κόστος.

Ποιος το χρησιμοποιεί

- Audi R8,A2,A8,Lamborghini

1.6 Backbone frame (πλαίσιο τύπου κόκκαλο)

Ο Colin Chapman, ο ιδρυτής της Lotus, είναι ο εφευρέτης του σασί τύπου ραχοκοκαλιάς που χρησιμοποιούσε στην αρχή η κάμπριο (roadster) Elan. Αφού απέτυχε στο πείραμα του monocoque με ίνες από γυαλί, ο Chapman ανακάλυψε ένα συμπαγές, αλλά φτηνό σασί το οποίο προϋπήρχε εδώ και εκατομμύρια χρόνια – τη ραχοκοκαλιά. Το σασί Backbone είναι πολύ απλό: ένα ισχυρό σωληνωτό δίκτυο κορμού (συνήθως σε ορθογώνιο τμήμα), συνδέει το εμπρός και πίσω άξονα και παρέχει σχεδόν όλη τη μηχανική δύναμη, εντός των οποίων υπάρχει χώρος για τον άξονα κίνησης σε περίπτωση με κινητήρα εμπρός, πλήρης διάταξη κίνησης στους πίσω τροχούς, όπως το Elan. Το όλο σύστημα μετάδοσης του κινητήρα και οι αναρτήσεις είναι συνδεδεμένα με τα δύο άκρα της σπονδυλικής στήλης. Το σώμα είναι χτισμένο στην σπονδυλική στήλη, συνήθως κατασκευασμένο από ίνες γυαλιού. Είναι αρκετά ισχυρό για μικρότερα σπορ αυτοκίνητα, αλλά όχι για αυτοκίνητα μεγαλύτερων επιδόσεων. Στην πραγματικότητα, το πρωτότυπο De Tomaso Mangusta χρησιμοποίησε τέτοιο πλαίσιο το οποίο παρείχε η Lotus. Τα σασί της εταιρείας TVR έχουν προσαρμοστεί από αυτό το σχέδιο - αντί για μια άκαμπτη σπονδυλική στήλη, χρησιμοποιούν ένα πλέγμα ραχοκοκαλιάς από σωληνωτά πλαίσια. Αυτό το γεγονός τα καθιστά να είναι ελαφρύτερα και ισχυρότερα (κυρίως επειδή το τούνελ μετάδοσης είναι ευρύτερο και μεγαλύτερο). Το backbone (τύπου κόκαλου ή H) είναι ένα από τα πρώτα σασί που δημιουργήθηκαν, με βασικό εκπρόσωπο τον σκαραβαίο της Volkswagen. Είναι χαρακτηριστικό σχεδιασμού των τσέχικων βαριών φορτηγών Tatra, καθώς και άλλων μικρών αυτοκινήτων.



Εικόνα 1.6.1: Lotus Elan chassis

Πλεονεκτήματα

- Εύκολο σε σχεδιασμό, κατασκευή και μετασκευή (τροποποίηση).
- Ελαφρότερη κατασκευή από το τύπου σκάλας.
- Καλή ακαμψία.
- Πολύ καλή εκμετάλλευση-εξοικονόμηση χώρου

Μειονεκτήματα

- Ψηλότερο κέντρο βάρους που θυσιάζει το κράτημα και τη σταθερότητα.
- Λόγω απουσίας ισχυρών δοκών στα πλαϊνά, σε πλάγιες συγκρούσεις υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες τραυματισμού των επιβατών.

Ποιοι το χρησιμοποιούν

- Lotus Esprit, Elan Mk II, TVR, Marcos.

1.7 Glass-Fiber Body (Αμάξωμα από ίνες γυαλιού)

Για τους ειδικούς των σπορ αυτοκινήτων, οι ίνες υάλου αποτελούν ένα τέλειο υλικό. Είναι ελαφρύτερο από το ατσάλι και το αλουμίνιο, εύκολο να διαμορφωθεί και ανθεκτικό στην σκουριά. Επιπλέον, το πιο σημαντικό είναι ότι είναι φτηνό να παραχθεί σε μικρές ποσότητες - το μόνο που χρειάζεται είναι απλά εργαλεία και ένα ζευγάρι έμπειρα χέρια. Υπάρχουν μερικά μειονεκτήματα, 1) μεγαλύτερα διάκενα στη συναρμολόγηση των μερών του πλαισίου που οδηγούν σε κακή οπτική ποιότητα. 2) πρόβλημα εικόνας. Πολλοί άνθρωποι δεν συμπαθούν τα "πλαστικά αυτοκίνητα" όπως τα έχουν ονομάσει.



Εικόνα 1.7.1: Lotus Elite

Οι ίνες υάλου έχουν γίνει υποχρεωτικές για τους ειδικούς των Βρετανικών σπορ αυτοκινήτων, διότι είναι ο μόνος τρόπος για κατασκευή μικρής ποσότητας οικονομικών σπορ αυτοκινήτων. Το 1957, η Lotus ήταν πρωτοπόρος στη δημιουργία σασί με ίνες υάλου στο Elite. Όλη η μηχανική δομή ήταν φτιαγμένη από ίνες από γυαλί, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ελαφρύ όπως επίσης και πολύ καλή ακαμψία η οποία συγκρίνεται με σασί μονοκόκ από ανθρακονήματα σημερινής εποχής. Ο Κινητήρας, η μετάδοση και τα υποπλαίσια αναρτήσεων ήταν βιδωμένα πάνω στο σασί. Ως αποτέλεσμα, όλο το αυτοκίνητο ζύγιζε το πολύ 660 kg.

Ωστόσο, αυτή η ριζοσπαστική προσπάθεια προκάλεσε πάρα πολλά προβλήματα στον Κόλιν Τσάπμαν. Τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα στο σώμα από υαλόνημα και τα σημεία στήριξης της ανάρτησης / μηχανής που απαιτούσαν είχαν πολύ μικρές ανοχές, οι οποίες ήταν δύσκολο να δημιουργηθούν από ίνες γυαλιού. Η Lotus έθεσε σε αχρηστία πάρα πολλά αυτοκίνητα αφού βρίσκονταν εκτός προδιαγραφών, ο λόγος τα μεγάλα διάκενα στη συναρμολόγηση. Άλλα έπρεπε να διορθωθούν με την εντατική φροντίδα των ειδικών της εταιρίας. Ως αποτέλεσμα, κάθε Elite άρχισε σιγά σιγά να εξαφανίζεται λόγω αστοχιών. Από τότε, σε κανένα άλλο αυτοκίνητο δεν προσπάθησε ποτέ κάποιος να εφαρμόσει αυτή την ιδέα και πάλι.

Σήμερα, ανεξάρτητα από το Lotus, TVR, Markos, Corvette της GM / Camaro / Firebird, Venturi και περισσότερο, χρησιμοποιούν ίνες από γυαλί στα πάνω μέρη του σώματος. Με άλλα λόγια, λειτουργεί μόνο ως ένα όμορφο περίβλημα και παρέχει αεροδυναμική απόδοση. Οι chassises είναι συνήθως ραχοκοκαλιά, σωληνωτά χώρο-πλαίσιο, αλουμίνιο χώρο διαστήματος ή ακόμα και monocoque.

Πλεονεκτήματα

- Οικονομικό για μικρή παραγωγή αυτοκινήτων.
- Αντοχή στη σκουριά

Μειονεκτήματα

- Κακή ποιότητα κατασκευής λόγω μεγάλων διάκενων μεταξύ των μερών συναρμολόγησης.

Ποιοι τα χρησιμοποιούν

- Lotus, TVR, Marcos, Corvette, Camaro, Firebird .

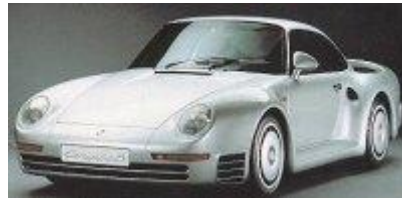
1.8 Carbon-Fiber Monocoque(Πλαίσιο από ανθρακονήματα)

Τα ανθρακονήματα είναι τα πιο εξελιγμένα υλικά που χρησιμοποιούν στα διαστημόπλοια, στα αεροσκάφη, και στα αγωνιστικά οχήματα, λόγω της υψηλής αναλογίας της ακαμψία προς βάρος. Στις αρχές της δεκαετίας του '80, η FIA έθεσε τις βάσεις ώστε να δημιουργηθεί η Ομάδα Β που αφορούσε αγωνιστική κατηγορία αγώνων αυτοκινήτου. Στη κατηγορία αυτή επιτράπη η όποια χρήση σχεδόν κάθε διαθέσιμης τεχνολογίας που υπήρχε αρκεί να δίνονταν άδεια για κατασκευή τουλάχιστον 200 αυτοκινήτων δρόμου. Ως αποτέλεσμα, τα αυτοκίνητα δρόμου που χρησιμοποιούσαν ανθρακονήματα στο αμάξωμα άρχισαν να εμφανίζονται, όπως η Ferrari 288GTO και η Porsche 959. Υπάρχουν αρκετές ίνες άνθρακα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία αυτοκινήτων. Το Kelvar, το οποίο αναπτύχθηκε από την Du Pont, προσφέρει την υψηλότερη αναλογία ακαμψίας προς βάρος μεταξύ αυτών. Εξαιτίας αυτού, τα κράνη του Αμερικανικού στρατού κατασκευάζονται από Kelvar. Το Kelvar μπορεί επίσης να βρεθεί στο πάνελ σώματος σε πολλά εξωτικά αυτοκίνητα, αν και οι περισσότεροι κατασκευαστές από αυτούς χρησιμοποιούν ταυτόχρονα και άλλα είδη από ανθρακονήματα σε ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό.

Η διαδικασία παραγωγής

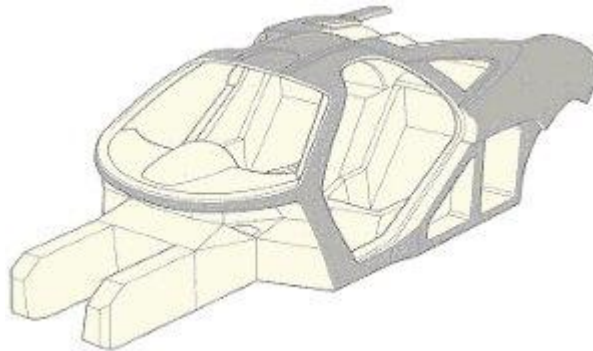
Τα ανθρακονημάτινα πάνελ κατασκευάζονται από φύλα ανθρακονήματος που μοιάζουν σαν ύφασμα. Το τελικό φύλλο, το οποίο καθορίζει το σχήμα της κατασκευής αποτελείται από πολλές στρώσεις φύλλων από ίνες άνθρακα εμποτισμένα με ρητίνη, τα οποία στη συνέχεια τοποθετούνται σε ένα μεγάλο φούρνο για τρεις ώρες στους 120 °C, με πίεση 90 psi. Μετά από αυτό, τα στρώματα από ανθρακονήματα, θα λιώσουν και θα σχηματίσουν ένα ενιαίο-ενωμένο, άκαμπτο πάνελ του σώματος.

1.9 Carbon-Fiber Panels VS Carbon-Fiber Monocoque Chassis



Εικόνα 1.9.1: *Porsche 959*

Η Porsche 959, που χρησιμοποιεί στη κατασκευή της πάνελ από ανθρακονήματα, είναι προφανώς κατώτερη κατασκευαστικά από το πλαίσιο μονοκόκ από ανθρακονήματα που χρησιμοποιεί η McLaren F1. Αυτή η δομή, όχι μόνο στηρίζει τον κινητήρα/μετάδοση, ανάρτηση, αλλά χρησιμεύει επίσης ως ένας πολύ άκαμπτος κλωβό επιβίωσης σε περίπτωση σύγκρουσης.



Εικόνα 1.9.2: *Μονοκόκ σασί από ανθρακόνημα σε McLaren F1*

Οι κατασκευαστές εξωτικών αυτοκινήτων συχνά αναφέρουν πως τα αυτοκίνητα τους χρησιμοποιούν ανθρακονήματα στην κατασκευή τους. Αυτό ακούγεται πολύ προχωρημένο, αλλά θα πρέπει να αναζητήσουμε ένα ακόμη ερώτημα -πού είναι το ανθρακόνημα και που χρησιμοποιείται; Στα τοιχώματα του αμαξώματος (πάνελ) ή στη δομή του πλαισίου;

Τα περισσότερα λεγόμενα "supercars" ισχυρίζονται ότι κάνουν χρήση ανθρακονημάτων αλλά μόνο σε πάνελ σώματος, όπως η Porsche 959, η Ferrari 288GTO, η Ferrari F40 και ακόμη και το αγωνιστικό Porsche 911 GT1. Επειδή τα πάνελ στο αμάξωμα δεν κάνουν τίποτα για να παρέχουν μηχανική αντοχή, η χρήση των ινών άνθρακα αντί για αλουμίνιο μπορεί να σώσει μόνο βάρος. Το μηχανικό μέλος παραμένει να είναι το σασί, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από το

βαρύτερο και πιο αδύναμο χάλυβα από τον οποίο αποτελείται το σωληνωτό πλαίσιο τους.

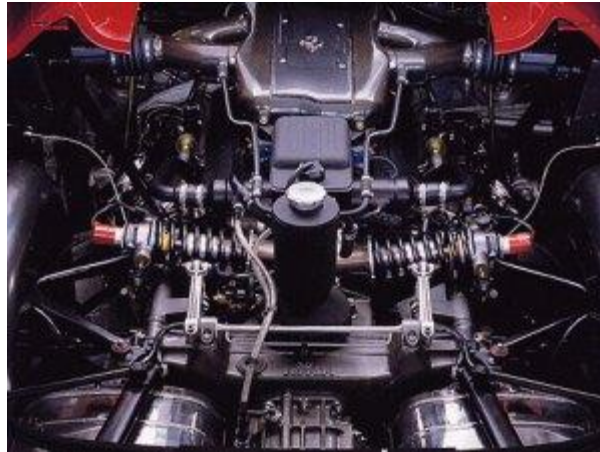
Αυτό που πραγματικά είναι εξελιγμένο από ανθρακονήματα είναι το σασί μονοκόκ, το οποίο πρωτοεμφανίστηκε στην McLaren F1, Bugatti EB110SS και Ferrari F50. Το σασί παρέχει κορυφαία ακαμψία και ακόμα μικρότερο βάρος. Κανένα άλλο πλαίσιο δε θα μπορούσε να είναι καλύτερο.

Το μονοκόκ σασί από ανθρακόνημα έκανε το ντεμπούτο του το 1981 με της McLaren MP4 Φόρμουλα 1. Ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο, σχεδιασμένο από τον John Barnard. Δεν υπάρχει αμφιβολία λοιπόν για ποιο λόγο η McLaren F1 ήταν το πρώτο αυτοκίνητο δρόμου που είχε αυτό για το χαρακτηριστικό.

Ακολουθεί ένας πίνακας με αυτοκίνητα επιδόσεων της εποχής και τη χρήση του ανθρακονήματος που κάνει ο κάθε κατασκευαστής.

Πίνακας 1.1

Car	Body	Chassis
Ferrari 288GTO (1985)	carbon fiber panels	steel tubular space frame
Porsche 959 (1987)	carbon fiber panels	steel monocoque
Ferrari F40 (1988)	carbon fiber panels + doors	steel tubular space frame
McLaren F1 (1993)	carbon fiber panels	carbon fiber monocoque
Ferrari F50 (1996)	carbon fiber panels + doors	carbon fiber monocoque
Lamborghini Diablo SV (1998)	mostly aluminium panels, with carbon fiber bonnet + engine lid	steel tubular space frame
Lamborghini Diablo GT (1999)	mostly carbon fiber panels + aluminium doors	steel tubular space frame



Εικόνα 1.9.3:*Ferrari F50 Engine*

Όταν ο κινητήρας θεωρείται ενεργό μέλος - Ferrari F50-Κινητήρας και υποπλαίσιο πίσω ανάρτησης

Σε αντίθεση με τη McLaren F1, το υπό-πλαίσιο της πίσω ανάρτησης της Ferrari F50 είναι άμεσα συνδεδεμένο με το συγκρότημα κινητήρα/κιβωτίου ταχυτήτων. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας γίνεται ενεργό μέλος που υποστηρίζει τα φορτία από τον πίσω άξονα. Στη συνέχεια, το σύνολο κινητήρα/κιβωτίου ταχυτήτων/πίσω δομή είναι συνδεδεμένο στο πλαίσιο από ανθρακονήματα με ένα ελαφρύ κράμα. Αυτό είναι κάτι που έγινε για πρώτη φορά και αφορούσε ένα αυτοκίνητο δρόμου.

Πλεονέκτημα: ακόμη ελαφρύτερο

Μειονέκτημα: η δόνηση του κινητήρα μεταφέρεται απευθείας στο σώμα και το πιλοτήριο.

Το 1963, μια επαναστατική δομή του πλαισίου εμφανίστηκε στη Formula 1, δηλαδή το πρωτάθλημα, κερδίζοντας η Lotus 25. Για άλλη μια φορά, ήταν πρωτοποριακή από την Colin Chapman. Η Chapman χρησιμοποιείται στον κινητήρα/κιβωτίου ταχυτήτων ως σημεία στήριξης για την πίσω ανάρτηση, ώστε να μειωθεί το πλάτος του αυτοκινήτου του καθώς και να μειωθεί το βάρος. Ειδικότερα, η μείωση του πλάτους οδήγησε σε μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης. Σήμερα, τα F1 αυτοκίνητα εξακολουθούν να χρησιμοποιούν αυτή τη βασική δομή.

Πλεονέκτημα

- Το ελαφρύτερο και πιο άκαμπτο σασί.

Μειονέκτημα

- Με διαφορά η πιο ακριβή.

Ποιος το χρησιμοποιεί

- *McLaren F1, Bugatti EB110SS, Ferrari F50.*

1.10 Lotus Elise Frame

Το επαναστατικό σασί της Lotus Elise είναι κατασκευασμένο από αλουμινένια τμήματα που προέρχονται από διέλαση όσον αφορά τον τρόπο κατασκευής και είναι ενωμένα μεταξύ τους με κόλλα και καρφιά. Η νέα τεχνολογία της διέλασης μπορεί να κάνει τα αλουμινένια τμήματα όσο καμπυλωτά θέλουμε όπως φαίνεται και στα πλαϊνά μέρη της κάτω εικόνας. Αυτό επιτρέπει μεγάλα τμήματα να γίνονται ένα κομμάτι περιορίζοντας έτσι τα σημεία που να χρειάζονται συγκόλληση και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιείται και το συνολικό βάρος.



Εικόνα 1.10.1: Lotus Elise frame

Για την Lotus και άλλες εταιρείες-βιομηχανίες χαμηλού όγκου κατασκευής σπορ αυτοκινήτων, η τεχνολογία της Audi ASF (Audi Space Frame) είναι πραγματικά ανέφικτη γιατί απαιτεί μεγάλα πιεστικά μηχανήματα για την παραγωγή των αλουμινένιων τμημάτων. Αλλά υπάρχει μια εναλλακτική λύση: η εξώθηση. Η εξώθηση είναι πολύ φθηνή και μπορεί να παράγει τμήματα αλουμινίου σε οποιοδήποτε πάχος. Το ερώτημα είναι: πώς να συνδέσεις τα αλουμινένια τμήματα ώστε μαζί να σχηματίσουν ένα άκαμπτο πλαίσιο. Η Renault Sport χρησιμοποιεί την σημειακή συγκόλληση για να τα ενώσει, ενώ η Lotus χρησιμοποιεί κόλλα και

πριτσίνια για να κάνει το ίδιο πράγμα. Συγκρίνοντας τις προδιαγραφές των δύο εταιρειών στο παρακάτω πίνακα καταλαβαίνουμε πώς η τεχνολογία της Lotus που χρησιμοποιείται στην Elise είναι ανώτερη:

Πίνακας 1.2

	Renault Sport Spider	Lotus Elise
Weight of chassis	80 kg	65 kg
Torsional stiffness	10,000 Nm/degree	11,000 Nm/degree
Thickness of extrusion	3 mm	1.5 mm

Η τεχνολογία της Lotus προέρχεται από τον προμηθευτή της, την εταιρεία Hydro Aluminium της Δανίας. Η Hydro ανακάλυψε ότι τα τμήματα αλουμινίου μπορούν επιτυχώς να ενωθούν μεταξύ τους με εποξική ρητίνη (κόλλα), εάν οι επιφάνειες που επρόκειτο να ενωθούν είναι επαρκώς προετοιμασμένες από ειδική χημική ουσία στην επιφάνεια συγκόλλησης. Παραδόξως, η κόλλα μπορεί να συνδέσει τα τμήματα μαζί δυνατά και αξιόπιστα. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι, τα τμήματα διέλασης αλουμινίου μπορεί να γίνουν πολύ λεπτότερα από την παραδοσιακή τεχνική της συγκόλλησης, γιατί τα συγκολλημένα σημεία αρμών είναι αδύναμα, έτσι το πάχος του υλικού θα πρέπει να αυξηθεί σε ολόκληρο το μέλος για να το καταστήσει αρκετά ισχυρό. Ως εκ τούτου το σασί της Elise μπορεί να είναι ελαφρύτερο αλλά ταυτόχρονα ακόμα πιο σκληρό-άκαμπτο.



Εικόνα 1.10.2: Η κόλλα μπορεί να φανεί καθαρά κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

Αναμφισβήτητα, το αλουμινένιο σασί της Lotus Elise είναι μια επανάσταση. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι περισσότεροι Βρετανοί και άλλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων θα αποκτήσουν τεχνογνωσία για την κατασκευή αυτοκινήτων με αυτόν τον τρόπο.

Πλεονεκτήματα

- Φτηνά για χαμηλού όγκου παραγωγής.
- Προσφέρει την υψηλότερη ακαμψία-προς βάρος, εκτός από μονοκόκ από ανθρακονήματα.

Μειονεκτήματα

- Δεν έχει πολύ αποτελεσματική εκμετάλλευση χώρου.
- Υψηλά μαρσπιέ θυρών άρα δύσκολη πρόσβαση.

Ποιοι τα χρησιμοποιούν

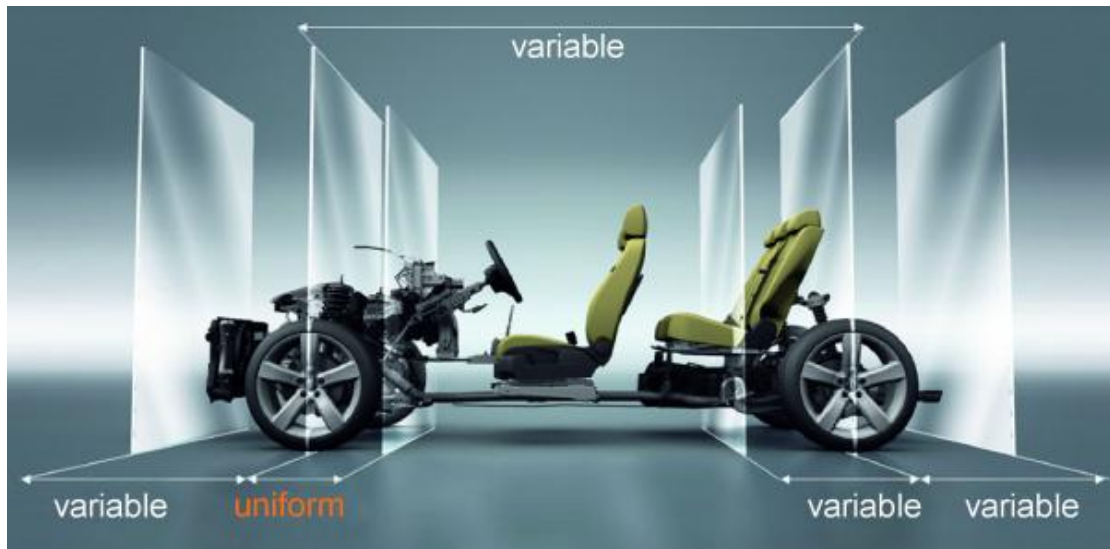
- Lotus Elise, Lotus M250, Opel Speedster



Σχήμα 1.10.3.: Elise Chassis

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότεροι κατασκευαστές προκειμένου να εναρμονιστούν με κανόνες ασφαλείας ρύπων, καταβάλουν κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε να κάνουν τα πλαίσια τους πιο ελαφριά, στιβαρά και ταυτόχρονα πιο οικονομικά. Μπορούμε να πούμε ότι σε ότι αφορά αυτοκίνητα μικρής και μεσαία

κλίμακας ο στόχος έχει επιτευχθεί, όλο και περισσότεροι κατασκευαστές συνεργάζονται πλέον με κοινές πλατφόρμες για μείωση κόστους εξέλιξης αλλά και χρήση της ίδιας πλατφόρμας σε πολλά μοντέλα τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η VW η οποία έχει αναπτύξει μια πλατφόρμα την οποία τοποθετεί στα περισσότερα μοντέλα που κατασκευάζει όπως επίσης και στα μοντέλα των εταιρειών που βρίσκονται υπό το καθεστώς της όπως Audi, Seat, Skoda, Lamborghini, Bentley, Porsche. Η εταιρία μάλιστα αρκετά πρόσφατα ανακοίνωσε την δημιουργία πλατφόρμας που θα υιοθετηθεί σε πάνω από 50 μοντέλα αφού ανάλογα με τη διαμόρφωση του μεταξονίου και μετατροχίου θα χρησιμοποιείται σε μία ευρεία γκάμα μοντέλων. Η εταιρεία Volkswagen αποκάλυψε τη νέα πλατφόρμα "Modularer Querbaukasten" ή MQB platform ή modular Transverse Matrix[15].



Εικόνα 1.10.4: MQB platform

Όπως βλέπουμε στη παραπάνω εικόνα η παραμετροποίηση σε μεταξόνιο, μετατρόχιο, μπροστά πρόβολο και πίσω πρόβολο θα επιτρέψει στην εταιρεία να κατασκευάσει τα περισσότερα μοντέλα της σε μία πλατφόρμα με μοναδικό πλεονέκτημα ότι θα μπορούν να κατασκευάζονται ακόμα και στην ίδια γραμμή παραγωγής.

Οι κατασκευαστές σπορ αυτοκινήτων όμως δε μπορούν να εξελίσσουν πλαίσια που να είναι φθηνά. Ανταγωνιζόμενοι μεταξύ τους αναγκάζονται να εφευρίσκουν νέες τεχνολογίες σε ότι αφορά τα σασί τους, με αποτέλεσμα το τελικό σασί να είναι πανάκριβο. Αν σκεφτούμε επίσης πως η εξέλιξη γίνεται για ένα και μόνο μοντέλο

κάθε φορά μπορούμε να καταλάβουμε γιατί τα λεγόμενα Supercars είναι τόσο ακριβά.

Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι εταιρίες σπορ αυτοκινήτων είναι ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν πολλές φορές γίνονται στο σπίτι τους και δεν τις προμηθεύονται από κάποιον προμηθευτή, με αποτέλεσμα το κόστος να αυξάνεται ακόμα περισσότερο αφού πόροι δίνονται τόσο για τη χρηματοδότηση αγοράς νέων μηχανημάτων όσο και νέων τεχνολογιών που κοστίζουν αρκετά.

Επίσης πολλές είναι οι εταιρίες που εκμεταλλεύονται τη τεχνολογία που χρησιμοποιούν στη Formula 1 σαν προπομπό αυτών που θα έρθουν αργότερα στα αυτοκίνητα τους όπως οι Ferrari και οι McLaren. Παρόλα αυτά είναι περίεργο που μία εταιρεία σαν τη Ferrari δεν χρησιμοποιεί μονοκόκ από ανθρακονήματα σε αυτοκίνητα της παρόλο που έχει και τη τεχνογνωσία αλλά και την εμπειρία από τους αγώνες ενώ παράλληλα τα μοντέλα που παράγει είναι αρκετά και το κόστος τους θα ήταν σαφώς μικρότερο. Το ίδιο ισχύει και για την Porsche. Βέβαια στο παρελθόν και οι δύο κατασκευαστές χρησιμοποίησαν σασί μονοκόκ από ανθρακόνημα σε μοντέλα όπως η Enzo Ferrari και η Porsche Carrera GT με τρομερή επιτυχία όσον αφορά την ακαμψία του σασί και το πολύ μικρό βάρος τους.



Εικόνα 1.10.5: *Enzo Ferrari chassis [23]*



Εικόνα 1.10.6: *Porsche Carrera Gt chassis [24]*

Γενικότερα οι περισσότεροι κατασκευαστές σπορ αυτοκινήτων έχουν κατασταλάξει στη χρήση μονοκόκ από ανθρακόνημα για το πλαίσιο και τμήματα αλουμίνιου για τα υποπλαίσια πίσω ανάρτησης και μπροστά ανάρτησης. Μία τεχνολογία προερχόμενη από τη Formula 1. Αυτός ο συνδυασμός συναντάται σε πολύ μικρές εταιρίες που το κόστος της κατασκευής δεν αποτελεί πρόβλημα για τους πελάτες και μιλάμε για χειροποίητη παραγωγή αφού και η δημιουργία των εξαρτημάτων είναι αρκετά περίπλοκη αφού ένα ρομπότ δε μπορεί να φτιάξει μόνο του τμήματα ανθρακονήματος. Παραδείγματα αποτελούν τα Zonda, Koenigsegg, ένα μοντέλο της Aston Martin και άλλοι μικρότεροι κατασκευαστές. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η Lamborghini χρησιμοποιεί σασί μονοκόκ από ανθρακόνημα στην τελευταία κατασκευή της το μοντέλο Aventador. Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες των σασί μοντέλων των εταιρειών που αναφέραμε πιο πριν.



Εικόνα 1.10.7: *Lamborghini Aventador LP 700-4 chassis [25]*



Εικόνα 1.10.8: *Bugatti Veyron chassis [26]*



Εικόνα 1.10.9: Koenigsegg chassis [27]

1.11 Φορτίσεις Πλαισίων

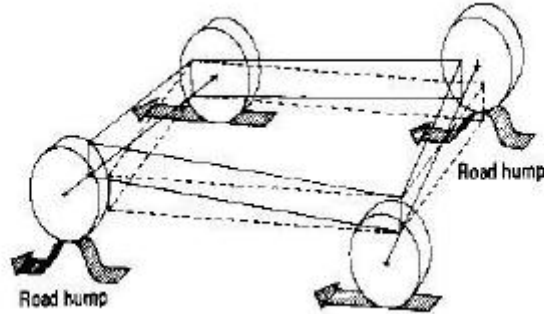
Ως πλαίσιο ορίζεται μια διαθρωτική συναρμολογημένη κατασκευή που στηρίζει όλα τα λειτουργικά συστήματα του οχήματος [5], [8],[13]. Αυτή η σύνθεση μπορεί να είναι μια ενιαία συγκολλημένη κατασκευή, πολλαπλές συγκολλημένες κατασκευές ή ένας συνδυασμός σύνθετων και συγκολλημένων κατασκευών. Ανάλογα με την εφαρμογή των φορτίων και την κατεύθυνση τους, το πλαίσιο παραμορφώνεται με έναν αντίστοιχο τρόπο που συνοψίζεται παρακάτω.

- Διαμήκης στρέψη - Longitudinal Torsion
- Κάθετη κάμψη - Vertical Bending
- Πλευρική κάμψη - Lateral Bending
- Οριζόντια ρομβοειδής παραμόρφωση-Horizontal Lozengeing

➤ Διαμήκης στρέψη - Longitudinal Torsion

Τα στρεπτικά φορτία είναι αποτέλεσμα των εφαρμοσμένων φορτίων που ενεργούν από τη μία ή από δύο αντίθετα αντιταγμένες γωνίες του αυτοκινήτου. Το πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ελατήριο στρέψης που συνδέει τις δύο άκρες εκεί όπου δρουν τα φορτία της ανάρτησης. Η στρεπτική φόρτιση και η συνοδευτική

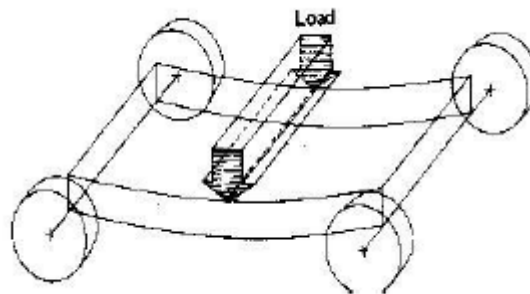
παραμόρφωση του πλαισίου και τα εξαρτήματα της ανάρτησης μπορεί να επηρεάσουν το χειρισμό και την απόδοση του οχήματος. Η αντίσταση στη στρεπτική παραμόρφωση συχνά αναφέρεται ως ακαμψία σε j/degree .



Σχήμα 1.11.1: Διαμήκη στρέψη - Longitudinal Torsion

➤ **Κάθετη κάμψη - Vertical Bending**

Το βάρος του οδηγού και τα εξαρτήματα που είναι τοποθετημένα στο πλαίσιο, όπως ο κινητήρας και άλλα μέλη, υπόκεινται σε κάμψη διαμέσου του πλαισίου του αυτοκινήτου. Οι αντιδράσεις λαμβάνονται πάνω στους άξονες. Εγκάρσιες επιταχύνσεις μπορεί να μειώσουν ή να αυξήσουν το μέγεθος αυτών των δυνάμεων.

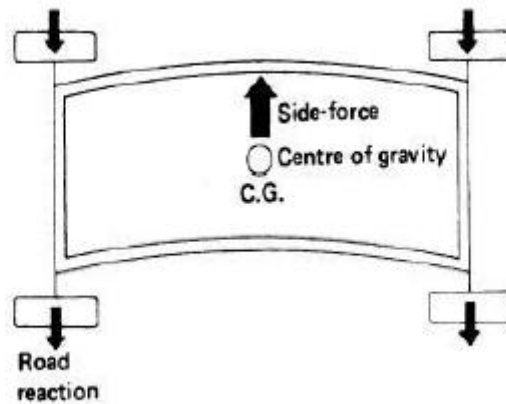


Σχήμα 1.11.2: Κάθετη κάμψη - Vertical Bending

➤ **Πλευρική κάμψη - Lateral Bending**

Τα πλευρικά φορτία κάμψης προκαλούνται στο πλαίσιο από διαφόρους λόγους, όπως το κύρτωμα του δρόμου, τα πλευρικά φορτία ανέμου, και φυγόκεντρες δυνάμεις που προκαλούνται από τις στροφές. Οι πλευρικές δυνάμεις

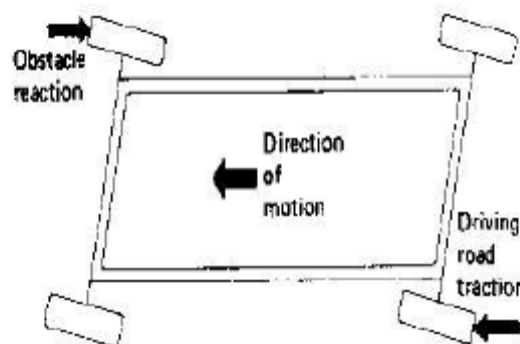
θα ενεργούν σε όλο το μήκος του αυτοκινήτου και θα αντιστέκονται στις ρόδες. Αυτά προκαλούν πλευρική καταπόνηση και επακολουθεί η κάμψη.



Σχήμα 1.11.3: Πλευρική κάμψη - *Lateral Bending*

➤ **Οοριζόντια ρομβοειδής παραμόρφωση (Horizontal Lozenging)**

Οι εμπρός και οι πίσω δυνάμεις που ασκούνται στους αντίθετους τροχούς είναι η αιτία αυτής της παραμόρφωσης. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να προκαλούνται από κατακόρυφες μεταβολές στο πεζοδρόμιο ή από αντίδραση του δρόμου κατά την οδήγηση του αυτοκινήτου προς τα εμπρός. Αυτές οι δυνάμεις τείνουν να διαστρεβλώσουν το πλαίσιο σε ένα παραλληλόγραμμο σχήμα, όπως φαίνεται στην εικόνα.



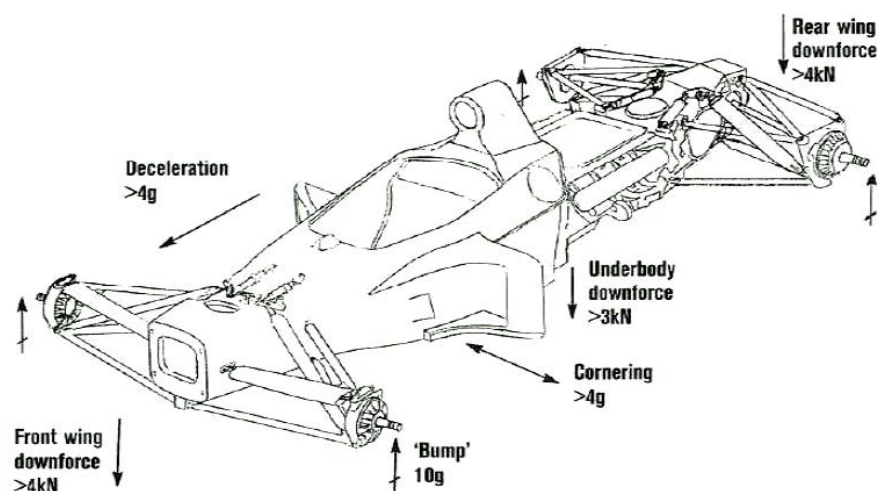
Σχήμα 1.11.4: Οοριζόντια ρομβοειδής παραμόρφωση -**Horizontal Lozenging**

Είναι γενικά αποδεκτό ότι, εάν η στρεπτική και εγκάρσια καμπτική δυσκαμψία είναι ικανοποιητικές τότε και η δομή είναι γενικά ικανοποιητική. Η στρεπτική

ακαμψία είναι γενικά η πιο σημαντική καθώς η συνολική πρόσφυση στις στροφές είναι μια λειτουργία της πλευρικής μεταφοράς βάρους.

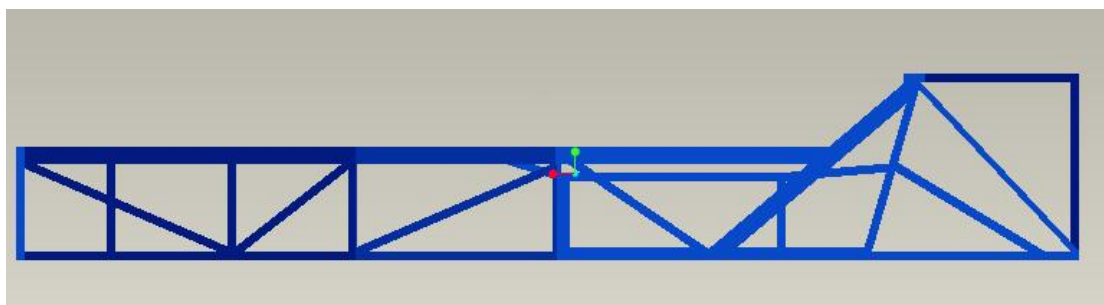
1.12 Εκτίμηση Φορτίων

Μετά από ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι τα τμήματα ενός Formula 1 αυτοκινήτου είναι σχεδιασμένα να αντέχουν χτυπήματα 10 g, 4 g δυνάμεις πέδησης και 4 g πλευρικές δυνάμεις[6]. Τα φορτία αυτά πρέπει να εξετάζονται μεμονωμένα αλλά και σε συνδυασμό. Ο προσδιορισμός των μεγεθών, των τύπων και του κέντρου βάρους (cg) είναι υποχρεωτική για τη βέλτιστη δομή του πλαισίου η οποία είναι σαν ένα επαναλαμβανόμενο έργο. Η κατανόηση των διαφορετικών φορτίων στις αντίστοιχες κατευθύνσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αναφορικά με τα αυτοκίνητα της Formula 1.



Σχήμα 1.12.1: Δυνάμεις που δρουν σε όχημα Formula 1

Για τον υπολογισμό ενός μεμονωμένου και συνολικού φορτίου των διαφόρων στοιχείων και του αυτοκινήτου συνολικά, δημιουργήθηκε ένας πίνακας που δείχνει συνολικά ενδεικτικές τιμές για τα βάρη των εξαρτημάτων, όπως φαίνεται στο *πίνακα 3*[17],[18].



Σχήμα 1.12.2: Πλάγια όψη του αυτοκινήτου.

Πίνακας 3: Κατά προσέγγιση οι μάζες των κυρίων εξαρτημάτων

C.G	Εξαρτήματα	Μάζα (kg)
1	Οδηγός	75
2	Κινητήρας	80-100
3	Drive-train	70
4	Τιμόνι	30
5	Μπαταρία	5
6	Πλαίσιο	70
	Σύνολο	330

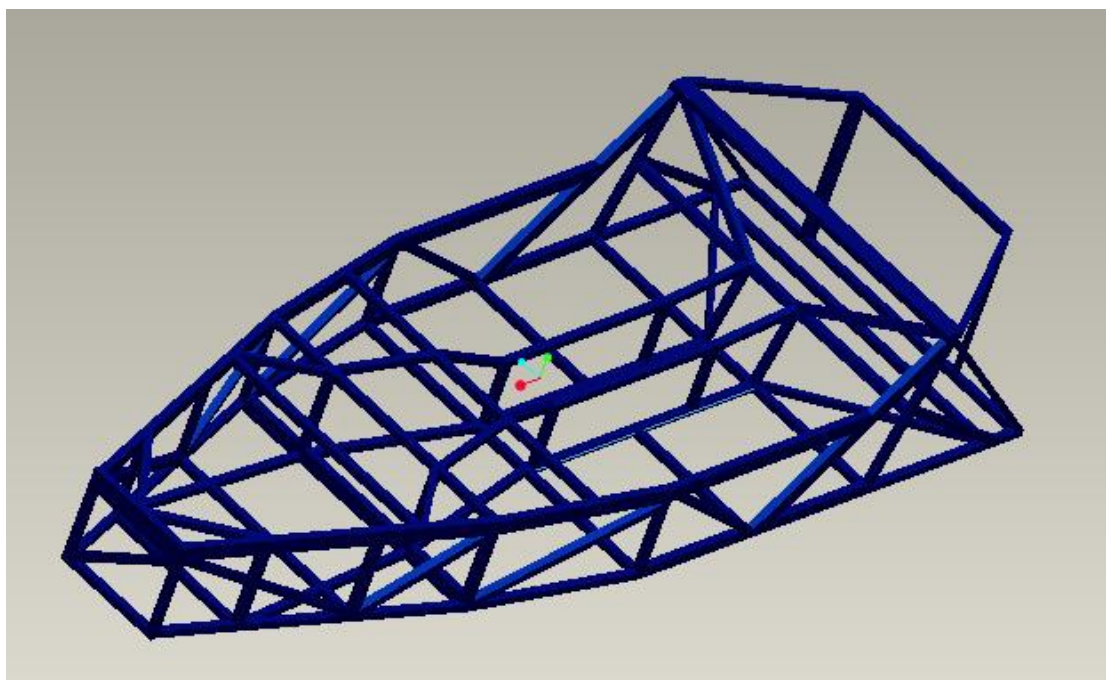
1.13 Επιλογή υλικού

Μετά την προσέγγιση των φορτίων που θα χρησιμοποιήσουμε, το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή του υλικού για την κατασκευή ενός σασί. Η διαθεσιμότητα είναι ένας από τους παράγοντες που κυριαρχούν στη διαδικασία επιλογής υλικού. Σε αυτό το σημείο και μετά από έρευνα εξετάστηκαν κατάλογοι διαφορετικών, επιθυμητών και διαθέσιμων υλικών. Τα υλικά αφορούσαν κράματα χάλυβα και αλουμινίου που είναι πάντα η επιλογή όλων των βιομηχανιών αλλά και των μικρότερων ομάδων. Μετά την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων, τη διαθεσιμότητα, το κόστος και άλλους σημαντικούς παράγοντες, επιλέχθηκε το παρακάτω υλικό.

Πίνακας 4: Μηχανικές ιδιότητες του υλικού του πλαισίου

STEEL GRADE		
No	Properties	Values
1	Young's modulus	2e+010 N/m ²
2	Poisson ratio	0.266
3	Density	7860 kg/m ³
4	Yield Strength	3.73e+008 N/m ²

Μετά την προσέγγιση του φορτίου και την επιλογή υλικών, η προετοιμασία του μοντέλου CAD του σασί ήταν ένα επόμενο βήμα. Το Pro Engineer είναι το εργαλείο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό ενώ το Comsol χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Το μοντέλο φαίνεται παρακάτω



Ολόκληρο το μοντέλο του σασί αποτελείται από σωλήνες τετραγωνικής διατομής υλικού χάλυβα κατά μήκος όλου του σασί. Σωλήνες από δύο διαφορετικά μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό. Το σύνολο της δομής αποτελείται από σωλήνα 25x25mm(εξωτερική διάμετρος) και 1,6 πάχος τοιχώματος σε mm. Επίσης

κατά τον σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε και διατομή 25x50mm (εξωτερική διάμετρος) και 1,6 πάχος τοιχώματος σε mm. Όλη η βιομηχανία χρησιμοποιεί για τον σχεδιασμό παρόμοιων σασί, τετραγωνικές διατομές οπότε και εμείς κάναμε το ίδιο κατά τον σχεδιασμό.

1.14 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Ο σχεδιασμός του πλαισίου δοκιμάστηκε με διάφορα τεστ ώστε να γίνει έλεγχος στα διάφορα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν. Για να προσδιοριστεί η ακαμψία μιας προτεινόμενης σχεδίασης πλαισίου πριν από την κατασκευή η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων εξυπηρετεί ακριβώς αυτό το σκοπό. Ενώ η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια επιστήμη, η δημιουργία των μοντέλων αποτελεί μία τέχνη. Συμβατικά στο FEA, το πλαίσιο υποδιαιρείται σε στοιχεία. Οι κόμβοι τοποθετούνται όπου οι σωλήνες του πλαισίου ενώνονται μεταξύ τους. Υπάρχουν πολλοί τύποι στοιχείων που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για μια δομή και κάθε επιλογή που κάνει ο αναλυτής μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Ο αριθμός, ο προσανατολισμός και το μέγεθος των στοιχείων, καθώς και τα φορτία και οι οριακές συνθήκες είναι όλα κρίσιμα για την απόκτηση ουσιαστικών αξιών της ακαμψίας πλαισίου.

Καθώς μοντελοποιείς την συνεισφορά της ακαμψίας για κάθε μέρος του πλαισίου, η μέθοδος για την εφαρμογή των φορτίων, περιορίζοντας ταυτόχρονα το πλαίσιο παίζει σημαντικό ρόλο για μια ακριβή ανάλυση. Η ακριβής ανάλυση σημαίνει να προβλέψουν την ακαμψία του πλαισίου κοντά στην πραγματική δυσκαμψία, όπως όταν το πλαίσιο λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες. Το πρόβλημα εδώ είναι κατά κανόνα πως να περιορίσεις ένα πλαίσιο και να εφαρμόσεις δυνάμεις, για να λάβεις πολλαπλά φορτία από την ανάρτηση. Για πρακτικούς λόγους, συνιστάται ότι τα φορτία στο πλαίσιο του αμαξώματος, καθώς και το βάρος του θα πρέπει να εφαρμόζεται στις ενώσεις (κόμβοι) των δομικών στοιχείων.

Κεφάλαιο 2

Θεωρία 3D CAD

2.1 Ορισμός σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή CAD

Ως σχεδιομελέτη και παραγωγή με χρήση υπολογιστή ορίζεται η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος και ιδιαίτερα στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση της μορφής και τον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών του προϊόντος[11]. Στηρίζεται κυρίως στην τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου των δεδομένων, και αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος, που περιγράφει όλο τον κύκλο ανάπτυξης και εισαγωγής του προϊόντος στην αγορά. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία της σχεδιομελέτης είναι η δημιουργία του γραφικού μοντέλου του προϊόντος, με τα συστήματα μοντελοποίησης με υπολογιστή (Computer Aided Design – CAD), που στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά από κάθετες εφαρμογές, όπως:

- Παρουσίαση του προϊόντος στον πελάτη με χρήση τεχνικών φωτορεαλισμού
- Προγραμματισμός των παραγωγικών διαδικασιών, κυρίως σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (Computer Numerical Control – CNC), με χρήση των συστημάτων σχεδιασμού παραγωγής με χρήση υπολογιστή (Computer Aided and Manufacture – CAM).
- Ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής και λειτουργίας με χρήση των συστημάτων μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Computer Aided Engineering – CAE, Finite Elements Modeling – FEM) για μια πληθώρα εφαρμογών, όπως τον έλεγχο της αντοχής, τη συμπεριφορά σε ροή, τη κατεργασιμότητα, κ.λ.π.
- Ταχεία παραγωγή προτύπου και παραγωγή του προϊόντος (Rapid Prototyping and Manufacturing).
- Επικοινωνία μεταξύ των συνεργαζόμενων ομάδων σε τοπικό ή σε απομακρυσμένο δίκτυο.

- Ανάλυση της μεθόδου παραγωγής, με χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας (εικονικό ή πλασματικό πρότυπο- Virtual Prototype).
- Ανάλυση της μεθόδου παραγωγής, με χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας (εικονική ή πλασματική παραγωγή και συναρμολόγηση, virtual manufacturing and virtual assembly), όπου μπορεί να γίνει προσομοίωση όλης της γραμμής παραγωγής ή της γραμμής συναρμολόγησης, για την αξιολόγηση της μεθόδου παραγωγής.

Βασικός σκοπός της χρήσης όλων των συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής με υπολογιστή είναι η ανάπτυξη των «σωστών» προϊόντων από την αρχή, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο ανάπτυξης. Η χρήση τους σε συνδυασμό, με τις συγγενείς προς αυτά τεχνολογίες και μεθοδολογίες για την ανάπτυξη του προϊόντος, μπορεί να μειώσει τον αριθμό των σφαλμάτων και των μη επιθυμητών διορθώσεων και επαναλήψεων σε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης, να βελτιώσει τον έλεγχο του προϊόντος σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, πριν από την εισαγωγή του στην αγορά και τη χρήση του από τον πελάτη, συνδυάζοντας μείωση του κόστους και του χρόνου ανάπτυξης. Αποτελούν ίσως την πιο σημαντική και απαραίτητη τεχνολογία για την ανάπτυξη κάθε προϊόντος.

2.2 Συστήματα CAD

Τα σύγχρονα συστήματα σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ στηρίζονται στη χρήση της τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Η τρισδιάστατη απεικόνιση είναι απαραίτητη για τις περισσότερες από τις κάθετες εφαρμογές που θα ακολουθήσουν την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, όπως είναι η ανάλυση της συμπεριφοράς του αντικειμένου, η παραγωγή του, κ.α.

Όλα τα αντικείμενα είναι τριών διαστάσεων και μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες, σε σχέση με τη γεωμετρική τους κατασκευή. Τα μοντέλα 2 ½ διαστάσεων (απλά ή σύνθετα) και τα αμιγώς 3 διαστάσεων. Τα 2 ½ διαστάσεων μοντέλα έχουν μια σταθερή διατομή και το πάχος τους, που ορίζεται κάθετα προς τη διατομή, είναι σταθερό. Τα αξονοσυμμετρικά αντικείμενα είναι επίσης 2 ½ διαστάσεων. Τα μοντέλα αυτά δημιουργούνται πολύ εύκολα με εντολές σάρωσης (extrude) ή περιστροφής (revolve). Τα σύνθετα μοντέλα 2 ½ διαστάσεων

δημιουργούνται από περισσότερα του ενός στερεά $2 \frac{1}{2}$ διαστάσεων. Τα αμιγώς 3 διαστάσεων (3D) μοντέλα δεν έχουν ομοιόμορφη διατομή και/ή δεν έχουν σταθερό πάχος. Τα μοντέλα αυτά δημιουργούνται από το συνδυασμό διαφόρων λειτουργιών μοντελοποίησης.

Για την μοντελοποίηση των τρισδιάστατων αντικειμένων αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες, με διαφορετικές δυνατότητες μοντελοποίησης, ανάλυσης και ποικιλίας αντικειμένων που καλύπτουν. Αυτές είναι:

- **Μοντέλα ακμών ή σύρματος** - wire frame models, κατάλληλα για αντικείμενα $2 \frac{1}{2}$ διαστάσεων.
- **Μοντέλα επιφανειών** – surface models, για πολύπλοκες μορφές αντικειμένων
- **Μοντέλα στερεών**– solid models, για πλήρη μοντέλα.
- **Στερεά παραμετρικά μοντέλα με μορφολογικά χαρακτηριστικά** – solid parametric and feature based models, για κάλυψη ομάδων αντικειμένων.

Σήμερα τα περισσότερα συστήματα τρισδιάστατης απεικόνισης βασίζονται στα στερεά μοντέλα, ή στα μοντέλα επιφανειών. Τα στερεά μοντέλα αποδίδουν μοναδιαία αναπαράσταση κατασκευάσιμων αντικειμένων, αλλά παρόλο που οι δυνατότητες των συστημάτων συνεχώς βελτιώνονται, οι μορφές που αποδίδονται μπορεί να είναι περιορισμένες. Τα μοντέλα των επιφανειών μπορούν να αποδώσουν σχεδόν κάθε δυνατή μορφή του αντικειμένου ακόμη και οργανικές μορφές, αλλά το παραγόμενο μοντέλο μπορεί να έχει ατέλειες.

2.2.1 Διασύνδεση με βιομηχανική παραγωγή βάσει του πλήθους και των κάθετων εφαρμογών που υποστηρίζουν.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εργαλείων CAD που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος. Τα εργαλεία αυτά κατατάσσονται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες.

- Εργαλεία σύλληψης του προϊόντος: **βιομηχανικός σχεδιασμός** και **αντίστροφη σχεδίαση** (CAID ή CAS). Εφαρμόζοντας κυρίως για σχεδίαση, μοντελοποίηση και προσομοίωση χωρίς να μας ενδιαφέρει η ακρίβεια του δημιουργούμενου μοντέλου και χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για κάθετες εφαρμογές.

- Εργαλεία για **σχεδίαση, μοντελοποίηση με απόδοση της ακριβούς μορφής των αντικειμένων, δημιουργίας συναρμολογήσεων, και προσομοίωσης**. Αποτελούν και τον κύριο κορμό των συστημάτων σχεδιομελέτης και είναι αυτά που ονομάζονται και συστήματα CAD. Η έμφαση στα συστήματα αυτά είναι στην ακρίβεια και στην πληρότητα του μοντέλου, γιατί το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σε όλες τις κάθετες εφαρμογές.
- Εργαλεία για **ανάλυση συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας**. Είναι τα συστήματα μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM και FEA). Ονομάζονται και συστήματα ανάλυσης (Computer Aided Engineering – CAE).
- Εργαλεία για **μελέτη και προσομοίωση παραγωγής**. Οι κατεργασίες για την παραγωγή του προϊόντος προγραμματίζονται με τα συστήματα σχεδιασμούκατεργασιών με χρήση υπολογιστή (Computer Aided Process Planning – CAPP) και ο προγραμματισμός των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης με τα συστήματα παραγωγής με χρήση υπολογιστή (CAM).
- Εργαλεία για **ειδικές εφαρμογές**, όπως μελέτη ανοχών, επικοινωνίας με άλλα συστήματα σχεδιασμού, συστήματα διαχείρισης του κύκλου ζωής, και συστήματα συνεργατικής σχεδίασης.
- Εργαλεία δημιουργίας του **πλασματικού πρωτοτύπου** και της **πλασματικής παραγωγής** που συνδυάζουν τα συστήματα σχεδιομελέτης και παραγωγής με τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας. Κάνουν χρήση ειδικού εξοπλισμού και λογισμού, και χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το πρωτότυπο ή την παραγωγή και τη συναρμολόγηση του προϊόντος.

2.3. Προσομοίωση συμπεριφοράς μοντέλου

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στη λεπτομερή μελέτη του προϊόντος που περιλαμβάνει τη δημιουργία της τελικής μορφής του προϊόντος σε ψηφιακή μορφή, τη συναρμολόγηση του και την κινηματική ανάλυση. Στο στάδιο αυτό απαιτείται να έχουμε ακριβή και έγκυρη μοντελοποίηση του προϊόντος. Η έμφαση εδώ είναι στην ακρίβεια των υπολογισμών και σε θέματα όπως ανοχές, πάχος τοιχωμάτων, γωνίες κλίσης, αποστάσεις ασφαλείας, κ.λ.π. Η γεωμετρία πρέπει να είναι κλειστή στα περισσότερα αντικείμενα. Η απεικόνιση είναι συνήθως με στερεά

και λιγότερο με επιφάνειες, με δυνατότητα δημιουργίας συναρμολόγησης, απόδοση της κίνησης, καλά γραφικά και σύνδεση με κάθετες εφαρμογές. Αποτελούν και την πλειοψηφία των εμπορικών εφαρμογών και στον τομέα αυτό έχουμε και τα περισσότερα συστήματα.

Το κάθε εξάρτημα ενός τελικού προϊόντος σχεδιάζεται ανεξάρτητα. Στη συνέχεια ορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων. Οι σχέσεις αυτές μπορεί να είναι μεταξύ των διαστάσεων, των σχετικών θέσεων, των συνδέσμων που υπάρχουν μεταξύ τους κ.λ.π. Σήμερα όλα τα συστήματα είναι παραμετρικά και ο ορισμός αυτών των σχέσεων είναι εύκολος. Στη συνέχεια δημιουργείται η συναρμολόγηση των υποσυστημάτων και του τελικού προϊόντος. Τα σημερινά συστήματα έχουν τη δυνατότητα να διαχειριστούν πολύ μεγάλες συναρμολογήσεις (μερικές χιλιάδες εξαρτήματα). Το πλεονέκτημα χρήσης των συστημάτων CAD είναι ότι υλοποιείται εύκολα μια αλλαγή σε ένα εξάρτημα και αυτόματα η αλλαγή αυτή περνάει σε όλα τα συνδεδεμένα (μέσω των σχέσεων που έχουν οριστεί) εξαρτήματα και σε όλη τη συναρμολόγηση.

2.4 Στερεά Μοντέλα

Τα στερεά μοντέλα- Solid Models, αποτελούν τη σύγχρονη τάση στα συστήματα σχεδιομελέτης με χρήση H/Y για μηχανολογικές εφαρμογές και είναι ιδιαίτερα απαραίτητα στη μελέτη συναρμολογήσεων. Μοντελοποιούν τα αντικείμενα με κλειστούς όγκους, τα στερεά, και όχι όπως γίνεται στα μοντέλα ακμών ως ένα σύνολο ακμών, ή στα μοντέλα επιφανειών ως ένα σύνολο επιφανειών. Σε ένα στερεό μοντέλο έχουμε την ταξινόμηση του χώρου, δηλαδή ένα σημείο του χώρου μπορεί να είναι εσωτερικό, εξωτερικό ή πάνω στο στερεό. Οι λειτουργίες δημιουργίας στερεού μοντέλου είναι διαφορετικές από αυτές που εφαρμόζονται στα μοντέλα ακμών, μοιάζουν αρκετά με τα μοντέλα επιφανειών, αλλά έχουν λιγότερες δυνατότητες από αυτά και συνήθως η χρήση και η εξοικείωση με ένα τέτοιο σύστημα είναι πιο εύκολη. Τα στερεά μοντέλα παρέχουν πλήρη, έγκυρη, και αναμφίβολη αναπαράσταση των αντικειμένων, που επιτυγχάνεται με την καταχώρηση τόσο των γεωμετρικών στοιχείων, όσο και στοιχείων της τοπολογίας. Τα γεωμετρικά στοιχεία είναι κοινά με τα συστήματα επιφανειών, δηλαδή σημεία, καμπύλες και επιφάνειες. Τα στοιχεία τοπολογίας ορίζονται από τα γεωμετρικά στοιχεία και είναι κορυφές, ακμές, βρόχοι,

έδρες, κελύφη και στερεά, που αποτελούν ένα μοντέλο. Η γεωμετρία είναι μια απτή έννοια ενώ η τοπολογία είναι πιο αφηρημένη και περιγράφει την πληροφορία της ένωσης και γειτνίασης των γεωμετρικών στοιχείων. Ο μηχανισμός δημιουργίας της τοπολογίας είναι πολύ απλός.

- Ένα σημείο στο χώρο αντιστοιχεί με μία κορυφή
- Μια γραμμή ή μια καμπύλη, στην οποία συνδέονται δύο γεωμετρικές επιφάνειες, αντιστοιχεί σε μία ακμή
- Ένα κλειστό όριο που αποτελείται από σειρά καμπυλών και σημείων αντιστοιχεί σε μία έδρα, δηλαδή μια έδρα περικλείεται από βρόχο και
- Μία επιφάνεια που περικλείεται από σειρά καμπυλών και σημείων αντιστοιχεί σε μία έδρα, δηλαδή μία έδρα περικλείεται από ένα βρόχο

Στη βάση δεδομένων τοπολογίας καταχωρούνται οι πληροφορίες που αφορούν τις σχέσεις (σύνδεση και γειτνίαση) μεταξύ αυτών των στοιχείων, δηλαδή:

- Οι κορυφές στις οποίες συντρέχουν διάφορες ακμές
- Οι ακμές στις οποίες τέμνονται γειτονικές έδρες
- Οι ακμές που ορίζουν ένα βρόχο
- Οι βρόχοι που περιβάλλει μια έδρα
- Οι βρόχοι που είναι εσωτερικοί σε μία έδρα
- Οι έδρες που περιβάλλουν ένα κελύφος, κ.λ.π.

Έχουν προταθεί διάφορα σχήματα δημιουργίας, επεξεργασίας και καταχώρησης των στοιχείων τοπολογίας. Διαφορετικά μοντέλα περιγράφονται από το ίδιο μοντέλο τοπολογίας εάν έχουν τον ίδιο αριθμό επιφανειών και καμπυλών τομής. Μια μετατροπή σε μία επιφάνεια ή σε μία καμπύλη συχνά απαιτεί και μετατροπές στις ακμές και στις επιφάνειες που γειτονεύουν με τη καμπύλη ή επιφάνεια που μεταβάλλεται. Ο χρήστης δημιουργεί μόνο τη γεωμετρία του στερεού αλλά το σύστημα εσωτερικά δημιουργεί και την τοπολογία και ελέγχει πάντα εάν οι διάφορες λειτουργίες διαχείρισης του στερεού δίνουν ένα έγκυρο στερεό αντικείμενο από την άποψη τοπολογίας. Όλα όμως τα σημερινά εμπορικά ζητήματα στηρίζονται σε έναν περιορισμένο αριθμό πυρήνων στερεάς μοντελοποίησης. Ο πυρήνας αυτός αποτελεί κυρίως ένα σύστημα διαχείρισης της βάσης δεδομένων (γεωμετρία και τοπολογία) και εκτελεί και τις περισσότερες από τις λειτουργίες της παραμετρικής στερεάς μοντελοποίησης. Συνεπώς από τον προγραμματιστή μηχανικό απαιτείται μόνο να

δημιουργήσει λειτουργίες ανωτέρου επιπέδου, επικοινωνία με το χρήστη, κ.λ.π., για τη δημιουργία του τελικού συστήματος μοντελοποίησης. Οι πυρήνες αυτοί είναι: Acis από την Spatial Technology, Parasolid από την EDS, Granite/1 από την PTC.

2.5 Παραμετρική μοντελοποίηση με χαρακτηριστικά

Η παραμετρική μοντελοποίηση με χαρακτηριστικά -parametric and feature based modeling, έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται ένα μοντέλο CAD και παρέχει απεριόριστες δυνατότητες δημιουργίας ομάδων αντικειμένων. Στη παραμετρική μοντελοποίηση οι διαστάσεις είναι παράμετροι του μοντέλου. Με τη δημιουργία του μοντέλου, σε κάθε διάσταση που απαιτείται για τον ορισμό του μοντέλου αντιστοιχεί και μια πραγματική τιμή (όπως μετρίεται από την κλίμακα του σχεδίου στην οθόνη). Αυτή την τιμή της κάθε διάστασης μπορεί να αλλάξει ο χρήστης και αντίστοιχα μεταβάλλεται και η γεωμετρία του μοντέλου. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει νέες τιμές στις διάφορες διαστάσεις και το σύστημα αναδημιουργεί τη νέα μορφή του αντικειμένου. Το σύστημα εσωτερικά ελέγχει τις νέες τιμές των διαστάσεων για να επαληθεύσει ότι οι τιμές είναι έγκυρες με την αρχική τοπολογία, ή ότι δεν αναιρούν άλλες τιμές, και στη συνέχεια αναδημιουργεί το μοντέλο. Η διόρθωση και η προσαρμογή ενός μοντέλου είναι πολύ πιο εύκολη. Συνεπώς, αλλαγές στη σχεδίαση ή προσαρμογή των σχεδίων για μια άλλη εφαρμογή είναι πιο άμεση.

Βασικό στοιχείο των συστημάτων παραμετρικής μοντελοποίησης είναι η σχεδίαση με μορφολογικά χαρακτηριστικά (features). Στη μοντελοποίηση με χαρακτηριστικά, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, αντιπροσωπεύουν μια ανωτέρου επιπέδου απεικόνιση ομάδας γεωμετρικών στοιχείων και ιδιοτήτων του στερεού. Σήμερα, όλα τα συστήματα είναι του τύπου σχεδίασης με μορφολογικά χαρακτηριστικά και κάθε γεωμετρικό στοιχείο που θα προστεθεί στο μοντέλο ορίζεται ως ένα νέο μορφολογικό χαρακτηριστικό. Συνεπώς, κάθε λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός χαρακτηριστικού στο τελικό αντικείμενο. Με τη χρήση τους, επίσης, έχει γίνει και πιο εύκολη η αυτόματη απόδοση γεωμετρίας σε αρκετά σύνθετα στοιχεία, όπως είναι οι διαφόρου τύπου οπές, εσοχές, κ.λ.π.

Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιείται σε μία σειρά από βήματα που είναι ανεξάρτητα από το σύστημα που χρησιμοποιείται. Αυτά είναι:

- Δημιουργία διατομής (sketch) στο σχεδιαστικό (sketcher)
- Ορισμός παραμέτρων
- Απόδοση διαστάσεων στις παραμέτρους
- Καθορισμός και εφαρμογή των σχέσεων (relations)
- Καθορισμός και εφαρμογή των περιορισμών (constraints)
- Δημιουργία μορφολογικών χαρακτηριστικών

Η παραμετρική σχεδίαση βασίζεται στις σχέσεις και στους περιορισμούς που προσδιορίζονται μεταξύ των γεωμετρικών στοιχείων και των διαστάσεων. Μια σχέση είναι ο μαθηματικός τρόπος περιγραφής των σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων της διατομής. Περιγράφονται με μεταβλητές, με απόδοση ονομάτων στις διαστάσεις (κάθε διάσταση είναι και μία μεταβλητή), με εκφράσεις μεταξύ μεταβλητών και ονομάτων διαστάσεων και με αλγεβρικές εξισώσεις, όπου μια μεταβλητή ορίζεται με βάση άλλες μεταβλητές ή διαστάσεις. Μία σχέση ή μια εξίσωση δημιουργείται γραφικά ή μέσω ενός επεξεργαστή σχέσεων. Οι περιορισμοί προσθέτουν μια μορφή ευφυΐας σε ένα σχέδιο και αποσκοπούν να διατηρήσουν το σκοπό του σχεδίου ανεξάρτητα από τις αλλαγές που κάνει ο σχεδιαστής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής [10]. Η ανάπτυξή της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design).

Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Αρχικά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτέλεσε μια ενεργειακή μέθοδο για την επίλυση δισδιάστατων φορέων όπως οι μέθοδοι Rayleigh-Ritz και Galerkin, τις οποίες μετέφερε ουσιαστικά από το χώρο των συνεχών συστημάτων στα διακριτά συστήματα. Στη συνέχεια επεκράτησαν οι αρχές των ισοπαραμετρικών στοιχείων που εξασφαλίζουν ακρίβεια στους υπολογισμούς και βελτιώνουν σημαντικά τον ενιαίο προγραμματισμό της μεθόδου.

Τέλος, η ανάπτυξη των προγραμμάτων προ- και μετά-επεξεργασίας (pre- and post-processing) των δεδομένων και αποτελεσμάτων καθιέρωσαν τη μέθοδο και τα αντίστοιχα προγράμματα που αναπτύχθηκαν. Έτσι σήμερα, χρησιμοποιώντας προγράμματα που στηρίζονται στις αρχές του CAD ο χρήστης είναι σε θέση να μορφώσει, να τροποποιήσει το προσομοίωμα του και να καθορίσει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις κατά τρόπο απλό και εύκολα ελέγξιμο. Μετά την επίλυση του προβλήματος, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται άμεσα και εποπτικά ενώ σε πολλά συστήματα παρέχεται η δυνατότητα αναζήτησης των αποτελεσμάτων με τη μορφή βάσεων δεδομένων (databases).

Η επόμενη γενιά των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αναμένεται να περιλάβει και τη συγκροτημένη διαστασιολόγηση κατασκευών κατά τρόπο που να ενσωματώνει ισχύοντες κανονισμούς αλλά και εμπειρία από το σχεδιασμό διαφόρων κατηγοριών κατασκευών. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται και στα άλλα χαρακτηριστικά

της μεθόδου και κυρίως στη τελική αντιμετώπισή της ως ενιαίου εργαλείου ανάλυσης και σχεδιασμού των κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως προσεγγιστική μέθοδος επιδέχεται βελτιώσεις και προσφέρεται για διαρκή έρευνα με σκοπό τη βελτίωση της. Έτσι παρά τα είκοσι πέντε χρόνια ζωής που διανύει, πολλά θέματα που σχετίζονται με τη μέθοδο δεν έχουν βρει ακόμη ευρύτερα αποδεκτές λύσεις. Έτσι, πληθώρα πεπερασμένων στοιχείων διατίθενται για γενική ή ειδική εφαρμογή, ειδικές φορτίσεις κλπ., ενώ τα θέματα των βασικών κριτηρίων που κάθε αναπτυσσόμενο στοιχείο θα πρέπει να ικανοποιεί δεν είναι ακόμη πλήρως διευκρινισμένα και παραπέμπουν σε σύνθετες μαθηματικές αντιμετωπίσεις. Για την συστηματοποίηση της έρευνας στη περιοχή έχουν θεσπιστεί χαρακτηριστικά παραδείγματα (benchmark tests) που διευκολύνουν και προωθούν σημαντικά την έρευνα για τη συμπεριφορά των στοιχείων.

Σημαντική συμβολή στην ανάπτυξη της μεθόδου αποτελούν και οι αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση των συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων ή προβλημάτων ιδιοτιμών στα οποία καταλήγει η επίλυση στατικών και δυναμικών προβλημάτων. Οι μέθοδοι αυτές, άμεσες ή επαναληπτικές αν και αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της μεθόδου και εμπλέκονται σε όλες τις φάσεις της ανάπτυξης της.

Η ανάπτυξη της μεθόδου γίνεται με την εξής σειρά. Στην αρχή παρουσιάζονται στοιχεία του λογισμού των μεταβολών (calculus of variations) για την κατανόηση και μαθηματικό χειρισμό των σχέσεων των παραλλακτικών αρχών (variational principles). Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι ενεργειακές αρχές και οι μέθοδοι των μαθηματικών που απαιτούνται για τη διατύπωση των εξισώσεων και των συνοριακών συνθηκών που περιγράφουν τα διάφορα προβλήματα. Με βάση τις αρχές αυτές παράγονται οι εξισώσεις ισορροπίας δοκού, επίπεδης ελαστικότητας, θεωρίας πλακών κλπ. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις παραδοχές των διαφόρων θεωριών της Αντοχής των Υλικών που αποδίδουν τη συμπεριφορά των μελών των κατασκευών και επισημαίνονται τα ιδιαίτερα στοιχεία που πρέπει να εστιάζεται η προσοχή του χρήστη κατά τη προσομοίωση των κατασκευών με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.1 Διαδικασία Ανάλυσης

3.1.1 Γενικές Έννοιες

Η ανάλυση ενός σύνθετου στοιχείου σε δυνάμεις μπορεί να είναι ένα πολύ δύσκολο έργο.[22] Η θεωρητική ανάλυση λειτουργεί πραγματικά καλά σε για πολύ απλά σχήματα (για παράδειγμα, ορθογώνια ή κυλινδρικά τεμάχια). Τα πεπερασμένα στοιχεία λειτουργούν παίρνοντας ένα σύνθετο και το διαιρεί σε μεγάλο αριθμό πολύ απλών σχημάτων (στοιχεία). Κάθε ένα από αυτά τα σχήματα μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν χρησιμοποιώντας βασικές τεχνικές ανάλυσης πίεσης (stress analysis). Εάν οι πιέσεις από κάθε στοιχείο μπορούν στη συνέχεια να συγκριθούν με τα παρακείμενα στοιχεία, ένα αποτέλεσμα για την πλήρη σύνθετη μορφή μπορεί να προβλεφθεί.

Παρά το γεγονός ότι οι υπολογισμοί των πιέσεων για κάθε στοιχείο είναι σχετικά απλοί, το συνολικό πρόβλημα είναι περίπλοκο λόγω του μεγάλου αριθμού στοιχείων που εμπλέκονται, καθώς και η ανάγκη να συγκριθούν όλες οι πιέσεις όλων των στοιχείων μεταξύ τους. Εδώ είναι που επωφελούμαστε από τους υπολογιστές. Έχουν την ικανότητα να εκτελούν αυτή τη σύγκριση αποτελεσματικά και γρήγορα. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι μια τεχνική που υπάρχει μόνο λόγω της δύναμης και της διαθεσιμότητας του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Στις περισσότερες FEA εφαρμογές υπάρχουν τρία στάδια σε κάθε ανάλυση. Αυτές είναι η προ-επεξεργασία, η επεξεργασία και η μετα-επεξεργασία. Η φάση της προ-επεξεργασίας λαμβάνει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα για να το θέσει για FEA ανάλυση. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό του αντικειμένου που αναλύεται ως ένα λεπτό ογκομετρικό πλέγμα και εφαρμόζοντας φορτία και περιορισμούς για να αντιπροσωπευθούν οι συνθήκες που δρουν πάνω σε ένα πραγματικό στοιχείο. Αυτές οι πληροφορίες χρειάζεται να αποθηκευτούν σε μία μορφή αποδεκτή από την FEA (Solver). Η επιλογή της λεπτότητας του πλέγματος είναι, διότι ένα πολύ χοντρό πλέγμα θα παράγει ανακριβή αποτελέσματα. Τα φορτία είναι οι δυνάμεις που ενεργούν σε ένα αντικείμενο. Οι περιορισμοί είναι οι όροι που αποτρέπουν ένα αντικείμενο από την κίνηση. Μια δύναμη χωρίς οποιουδήποτε περιορισμούς θα σημάνει ότι το αντικείμενο που αναλύεται είναι ελεύθερο να κινηθεί όταν εφαρμόζεται η δύναμη.

Η φάση επεξεργασίας περιλαμβάνει το τρέξιμο του επεξεργαστή FEA χρησιμοποιώντας τα αρχεία δεδομένων εισόδου που δημιουργούνται στη φάση προ-

επεξεργασίας. Αυτό μπορεί να πάρει χρόνο και ο επεξεργαστής τυπικά θα εκτυπώνει περιστασιακά γραμμές πληροφοριών κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Η επεξεργασία μπορεί να διαρκέσει λεπτά ή ώρες ανάλογα με την πολυπλοκότητα της του αντικειμένου που αναλύεται. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης οι πληροφορίες θα γραφτούν στα αρχεία δεδομένων εξόδου για την μετέπειτα ανάλυση.

Η φάση μετα-επεξεργασίας περιλαμβάνει τη λήψη των αρχείων δεδομένων που παράγονται από τον επεξεργαστή FEA και την εξέταση τους. Τα δεδομένα που παράχθηκαν είναι σε μορφή αριθμών και δύσκολα να τα κατανοήσει κανείς. Ο Post-Processor παίρνει αυτούς τους αριθμούς και τους παρουσιάζει με τα διάφορα χρωματισμένα γραφικά σχήματα για να καταστήσει την ερμηνεία πολύ απλή.

3.1.2 Γεωμετρία

Στο στάδιο αυτό εισάγεται η γεωμετρία του στερεού μας. Αυτό γίνεται με τη δημιουργία ενός πεπερασμένου πλέγματος για το στερεό. Το πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί αυτόματα από μια αναπαράσταση CAD του στερεού. Επίσης οι ιδιότητες του υλικού.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Η ανάγκη για επίλυση περισσότερων πολύπλοκων προβλημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων προσεγγιστικών μεθόδων. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων. Είναι μια προσεγγιστική μέθοδος, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια εξέλιξη των μητρώικων μεθόδων που έγινε από επιστήμονες όπως ο Αργύρης Ι., ο Clough, ο Ritz και άλλοι. Οι βασικές ιδέες προήλθαν στις αρχές της δεκαετίας του 40, από εξελίξεις στην δομική ανάλυση αεροσκαφών. Αρχικά ο Hrenikoff χρησιμοποίησε τη “Μέθοδο των δικτυωμάτων”, αργότερα Ο Turner δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Ο όρος Πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το 1960. Οι μαθηματικές, βέβαια, βάσεις για την σημερινή μορφή της μεθόδου μπήκαν την δεκαετία του 70. Πλέον αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος

προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, κ.α. Με την εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων και των συστημάτων CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Με αυτή τη μέθοδο μια πολύπλοκη περιοχή, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements). Μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία θεωρεί φορτία και περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η επίλυση αυτών, δίνει κατά προσέγγιση(με αρκετά μεγάλη ακρίβεια) τη συμπεριφορά του αρχικού πολύπλοκου μοντέλου.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος απαιτούνται τα εξής στάδια:

- Εισαγωγή της γεωμετρίας της κατασκευής
- Χωρίζεται το μοντέλο σε Πεπερασμένα Στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης με ταυτόχρονη εισαγωγή επιπλέον δεδομένων (pre processor πρόγραμμα)
- Γίνεται η επίλυση του προβλήματος με αριθμητικές μεθόδους (solver πρόγραμμα) Εδώ με την βοήθεια της σχέσης $K * u = p$, επιλύουμε ένα σύνολο εξισώσεων της μορφής $u = K^{-1} * p$, όπου u η μετακίνηση κάποιου κόμβου.
- Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor, για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 4

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Wildfire Pro-Engineer 2.0

Όσον αφορά την μοντελοποίηση της εργασίας υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αναλυθεί το μοντέλο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα Comsol είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι, που είναι γνωστές από την εμπειρία και έπρεπε να διερευνηθούν:

Η πρώτη μέθοδος αφορά την είσοδο του μοντέλου από το ProEngineer σαν ένα STEP αρχείο, να οριστούν οι δυνάμεις-φορτίσεις και έπειτα να επιλυθεί στο Comsol. Η μέθοδος αυτή είναι επιτυχής στην εξοικονόμηση χρόνου, αλλά δυσκολεύει κάθε φορά που η γεωμετρία αλλάζει και το μοντέλο πρέπει να ξανά εισαχθεί στο πρόγραμμα με νέα διακριτοποίηση και νέες εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

Η δεύτερη μέθοδος αναφέρεται στη δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου μέσα στο Comsol μαζί με τη διακριτοποίηση και τα φορτία. Η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα αφού θα έπρεπε να σχεδιάσουμε στο Draw Tool του Comsol τη διάταξη μας, χωρίς προηγουμένως να έχουμε κάποια γνώση πάνω σε αυτό.

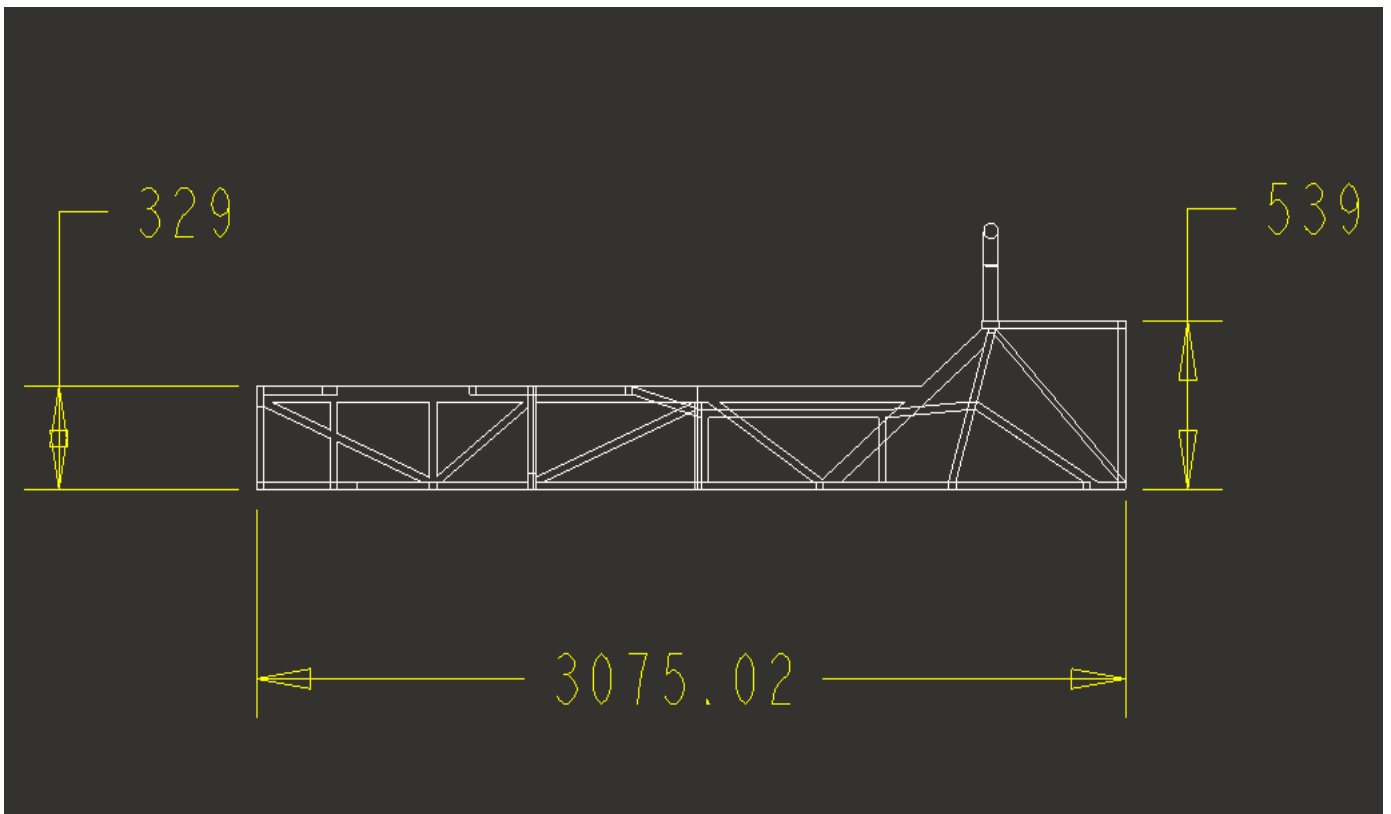
Η τρίτη επιλογή είναι να γραφεί ένα αρχείο εισόδου σε οποιοδήποτε πρόγραμμα κειμένου όπως για παράδειγμα το σημειωματάριο και η μετέπειτα εισαγωγή του στο Comsol. Με αυτόν τον τρόπο ο κώδικας για τη χάραξη της γεωμετρίας, η διακριτοποίηση, οι φορτίσεις και η επίλυση του μοντέλου δεν χρειάζεται να αλλάζει για κάθε ανάλυση (εκτός και αν αλλάζουν οι συνθήκες φόρτισης όπου αλλάζουν με απλή αλλαγή στο κώδικα). Το μόνο που χρειάζεται να αλλάξει όταν ένα σημείο στο πλαίσιο αλλάζει, είναι η εισαγόμενη γεωμετρία. Όταν ο κώδικας τελειοποιηθεί και η γεωμετρία είναι επίσης έτοιμη για να γίνει η ανάλυση τότε εισάγεται ο φάκελος στο πρόγραμμα.

Προτιμήσαμε την πρώτη μέθοδο αφού γνωρίζαμε από πριν το σχεδιαστικό πρόγραμμα Pro Engineer.

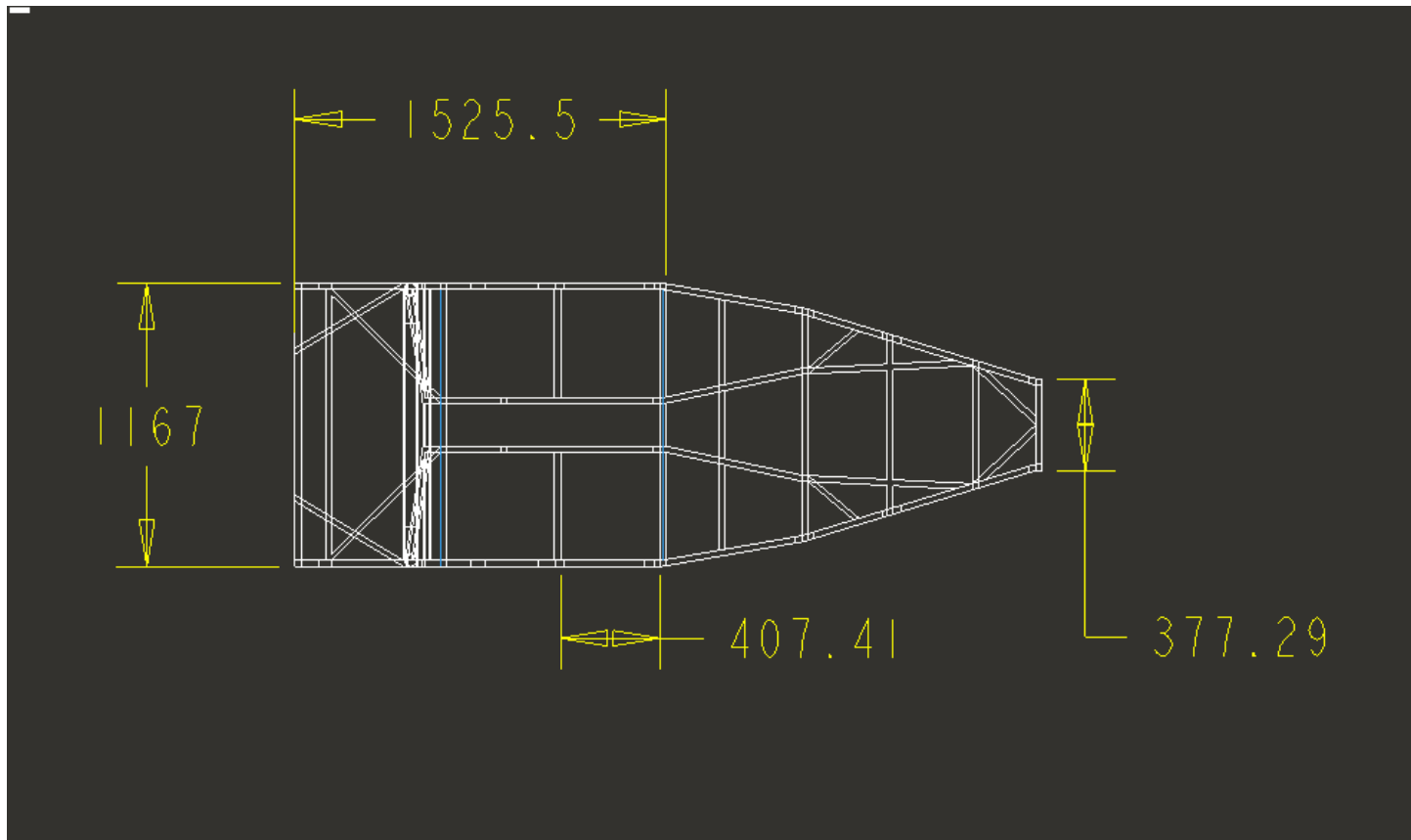
Παραδοχές επίλυσης: Επειδή το μοντέλο που σχεδιάσαμε περιέχει πολύπλοκες εσωτερικές γεωμετρίες οι οποίες δημιουργούν προβλήματα κατά τη

μεταφορά από το αποφασίσαμε να προχωρήσουμε σε σχεδιασμό με σωλήνες χωρίς εσωτερικό πάχος. Δηλαδή οι σωλήνες μας έχουν διαστάσεις που προαναφέραμε σελίδα 38 χωρίς το εσωτερικό πάχος. Για αυτό το λόγο το Young's modulus που έχουμε επιλέξει είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που αναφέρεται σελίδα 37. Για την ακρίβεια είναι $0.46e+010 \text{ N/m}^2$. Τα άλλα νούμερα παρέμειναν ως έχουν.

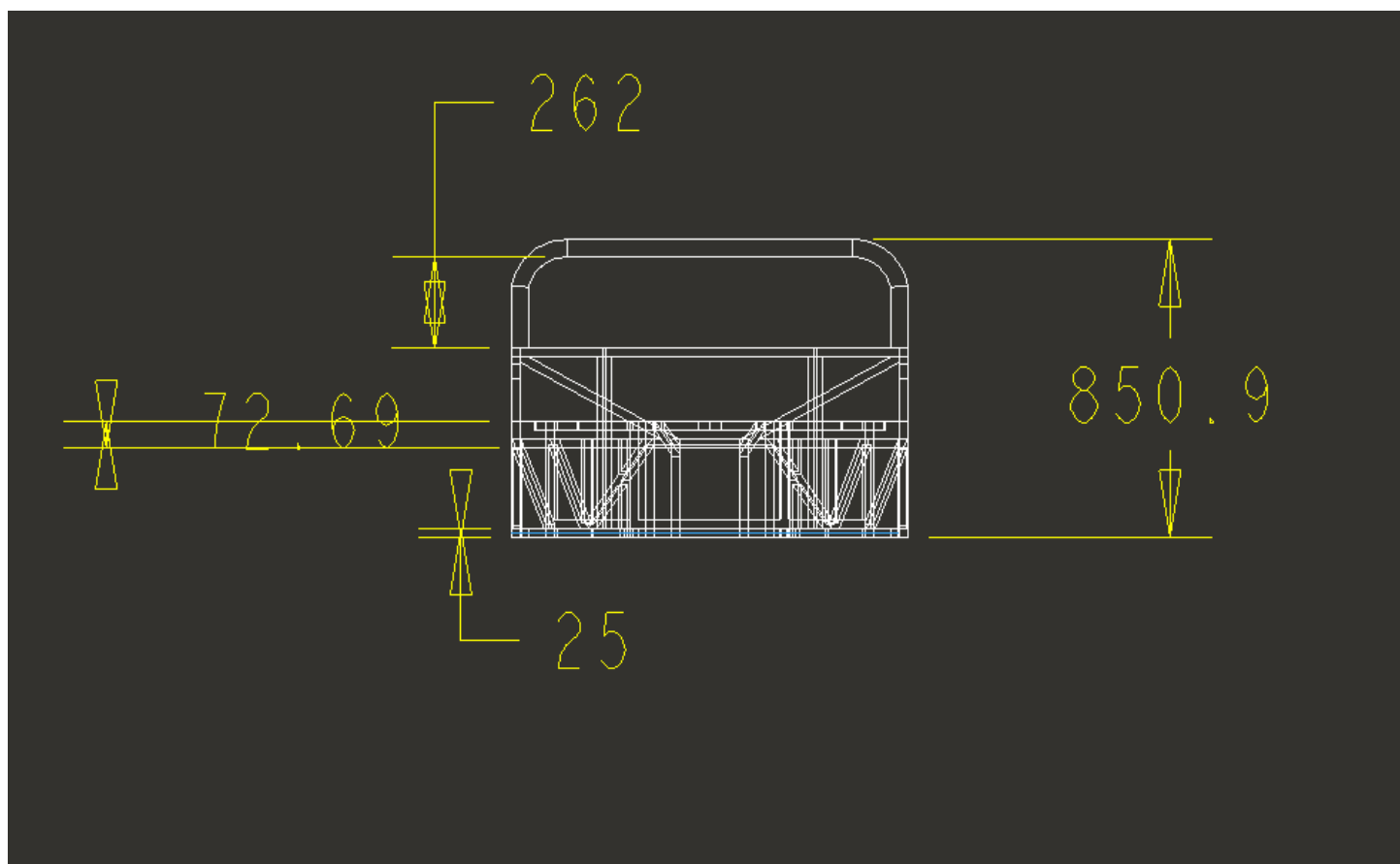
Για τη γεωμετρική προσομοίωση του πειράματός μας, δημιουργήσαμε μέσω του προγράμματος Pro-Engineer 2.0 το σχέδιο που μας ενδιαφέρει με την παρακάτω διαστασιολόγηση σε mm.



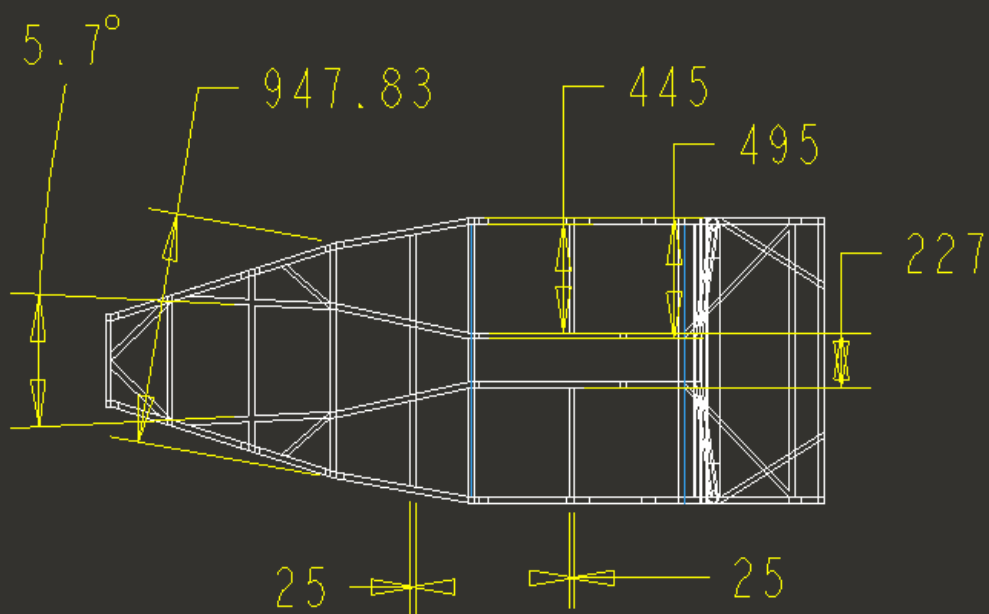
Εικόνα 4.1: Πίσω όψη



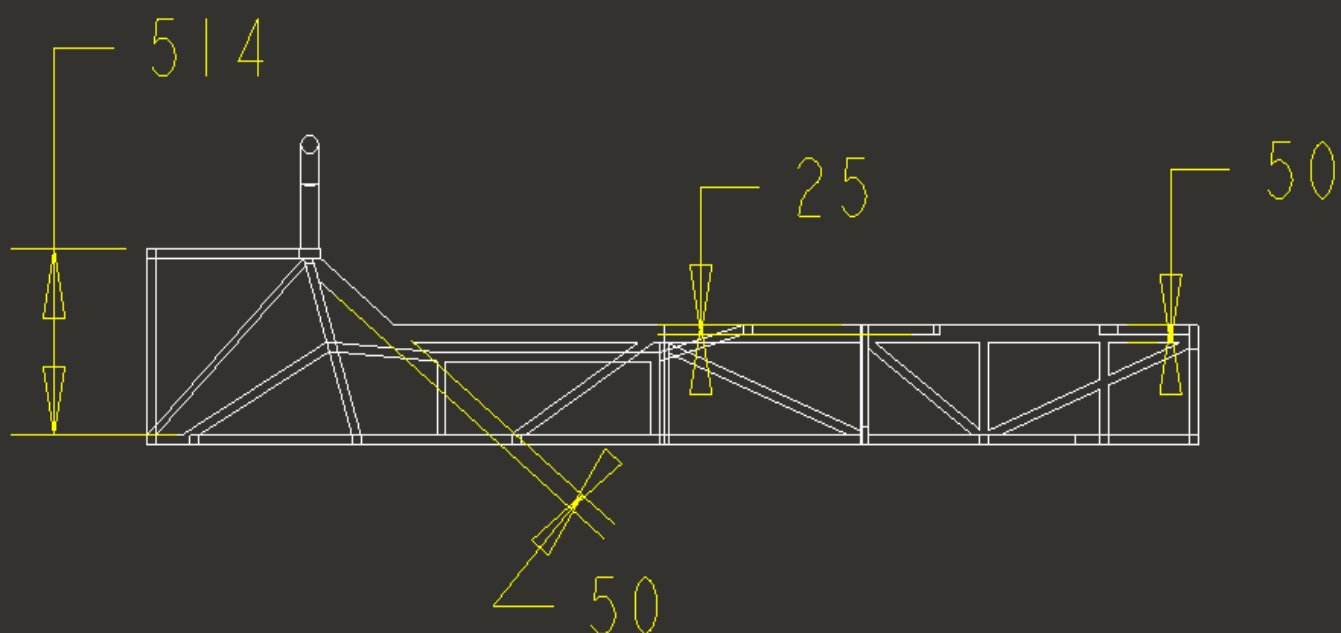
Εικόνα 4.2:Κάτοψη



Εικόνα 4.3:Δεξιά όψη

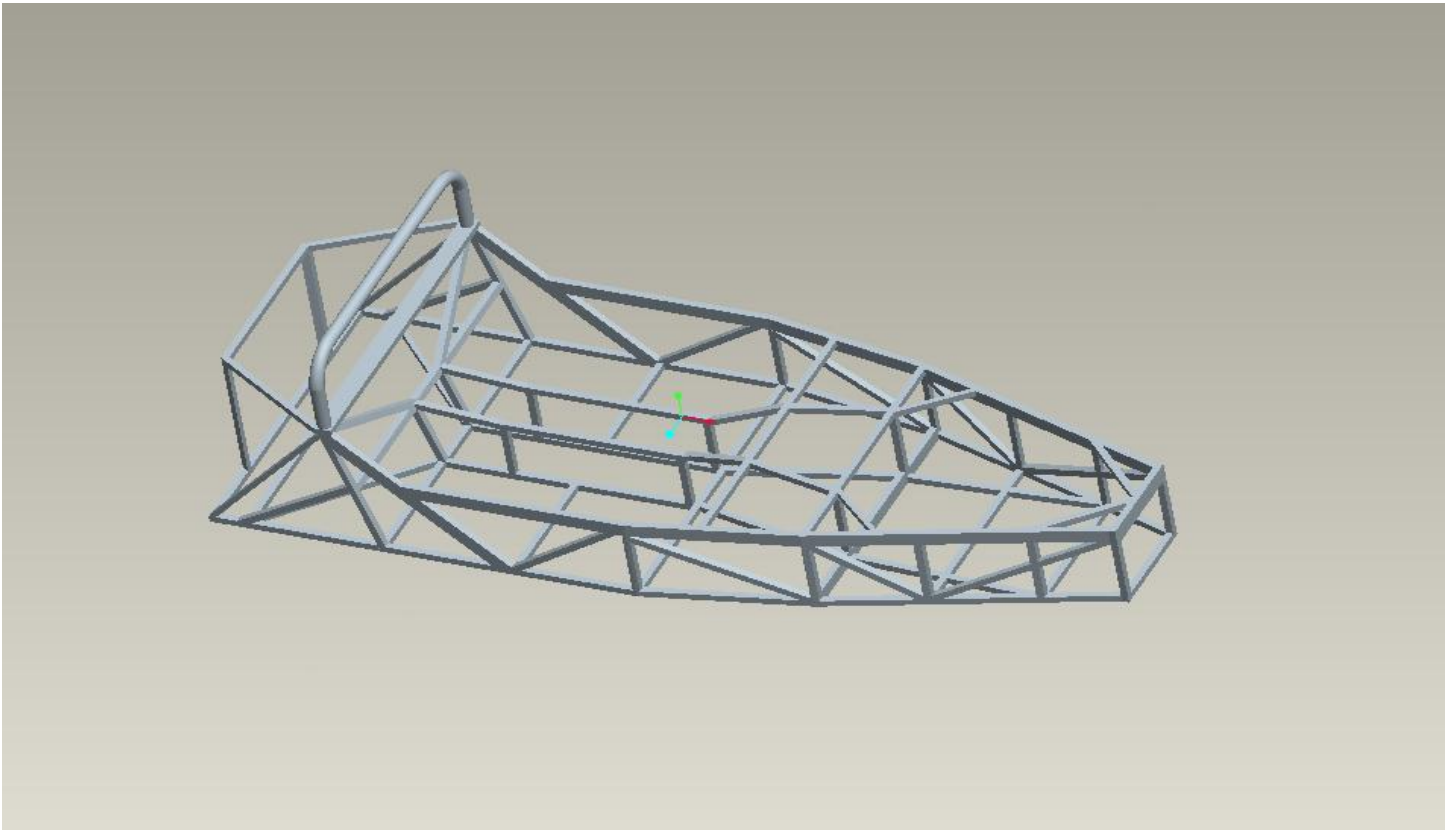


Εικόνα 4.4: Κάτοψη από κάτω

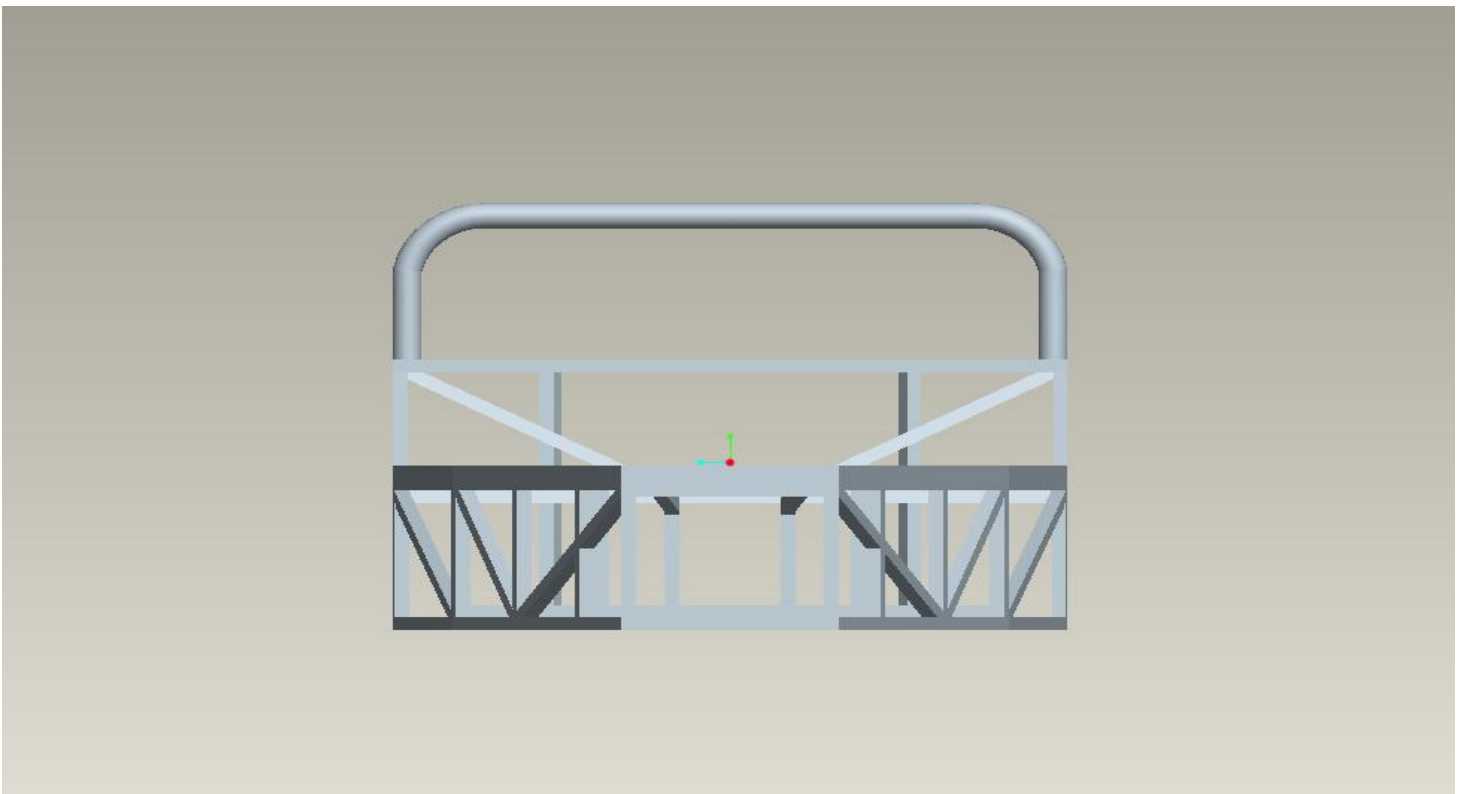


Εικόνα 4.5: Μπροστινή όψη

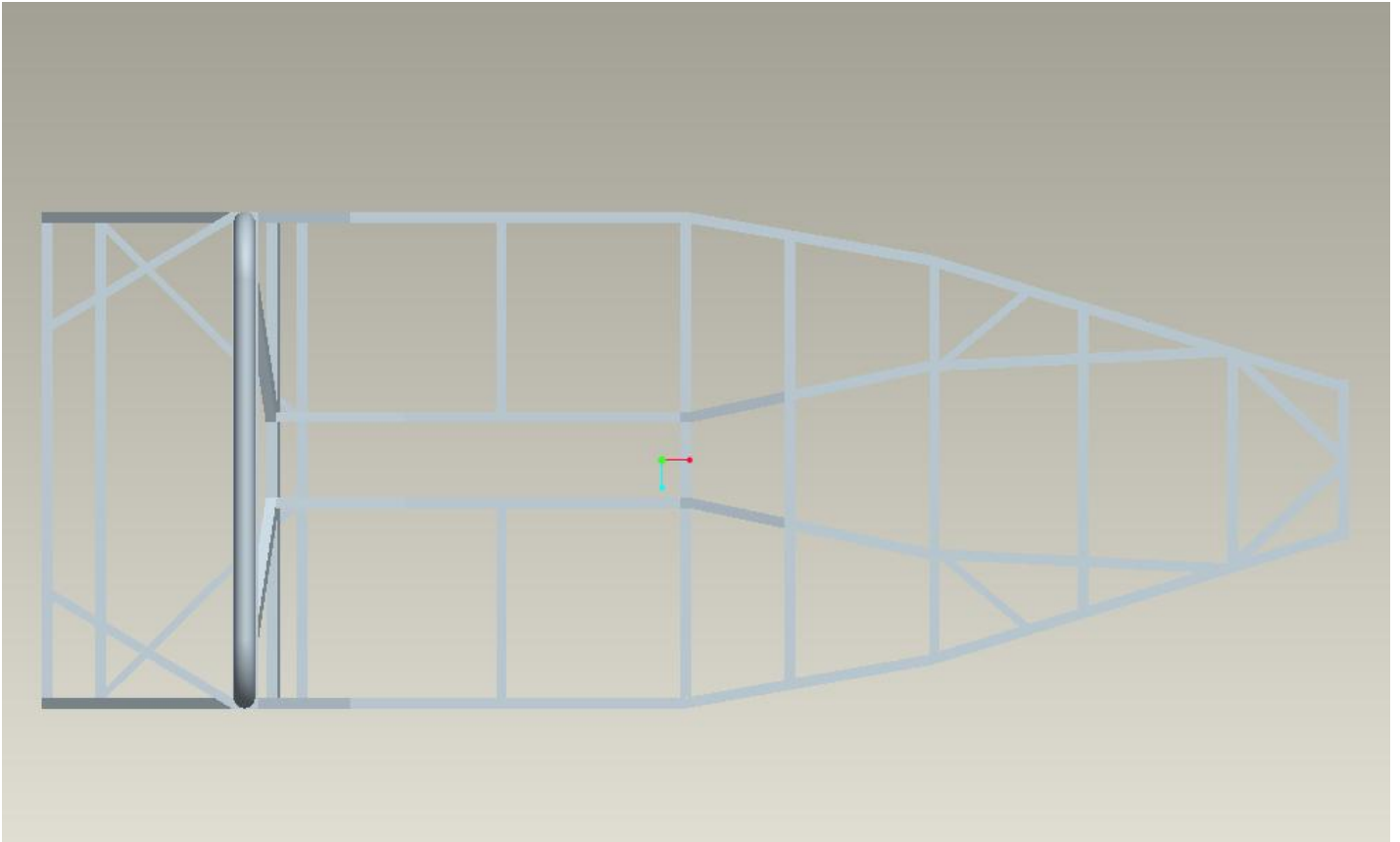
Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό σχέδιο μέσα στο πρόγραμμα Pro-Engineer 2.0



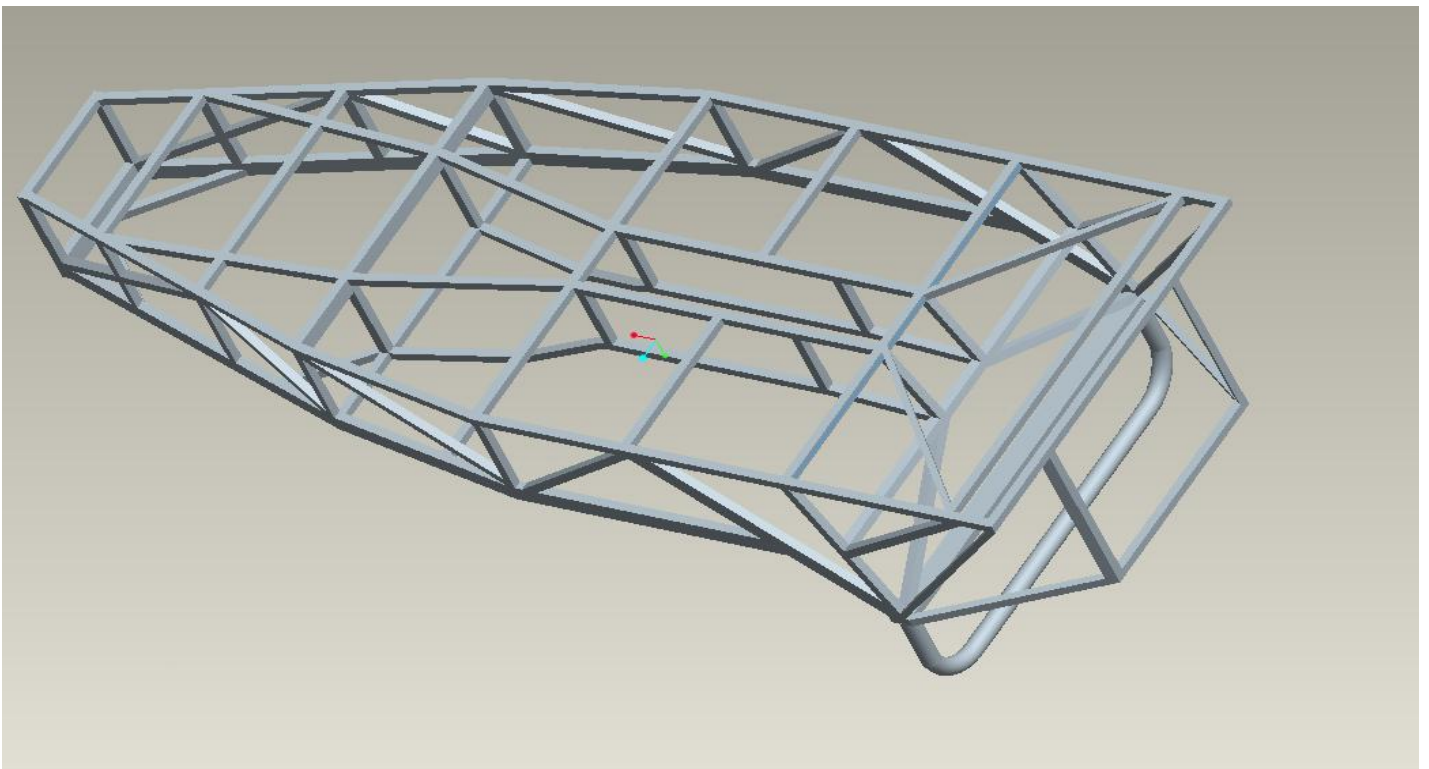
Εικόνα 4.6: Τυχαία όψη



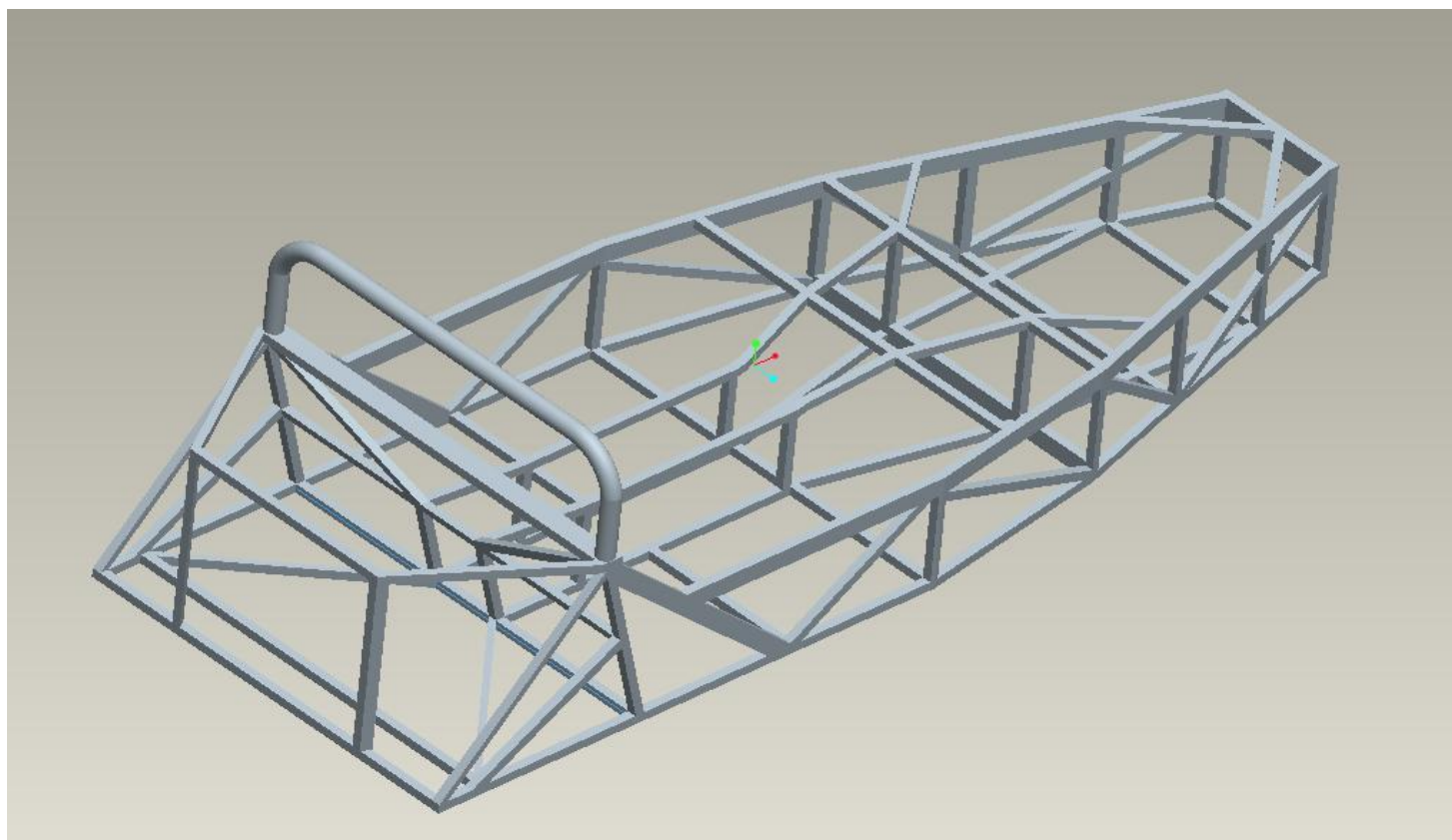
Εικόνα 4.7: Δεξιά όψη



Εικόνα 4.8: *Κάτοψη*



Εικόνα 4.9: *Τυχαία όψη*



Εικόνα 4.10: Τυχαία όψη

Κεφάλαιο 5

Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Εισαγωγή αρχείου CAD σε Πεπερασμένα Στοιχεία

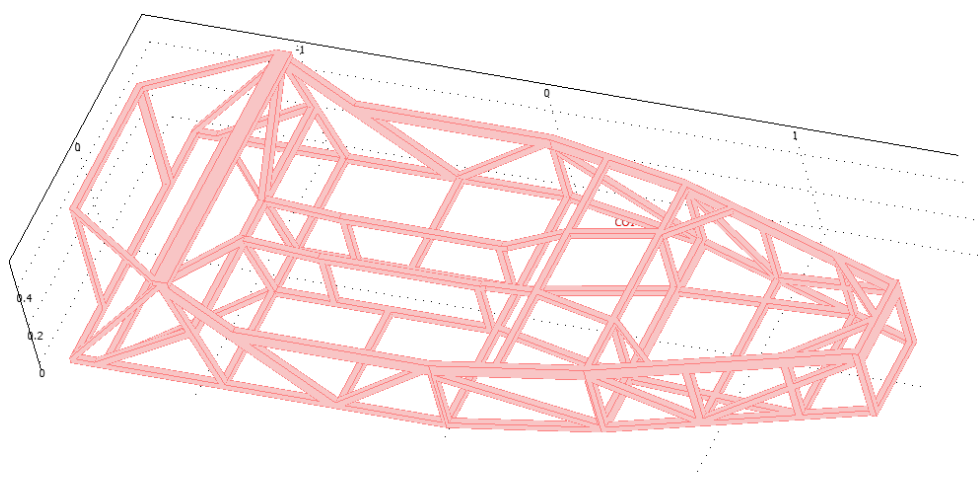
Αφού γίνανε οι απαραίτητες τροποποιήσεις όσον αφορά τα νούμερα μέτρησης των διαστάσεων της κατασκευής, το αρχείο το αποθηκεύσαμε με κατάλληλο format τύπου step. Για την εισαγωγή στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων ανοίγουμε το πρόγραμμα και διαλέγουμε με την κατάλληλη σειρά:

New-
Space dimension-
3D-
Structural Mechanics Module-
Solid, Stress-Strain-
Static Analysis-

Αφού ανοίξει το πρόγραμμα επιλέγουμε με κατάλληλη σειρά τις εξής εντολές:

File-
Import-
CAD Data from file-
Chassis 1-Frame.stp

Παρακάτω φαίνεται το αρχείο CAD μέσα στο Comsol Multiphysics.

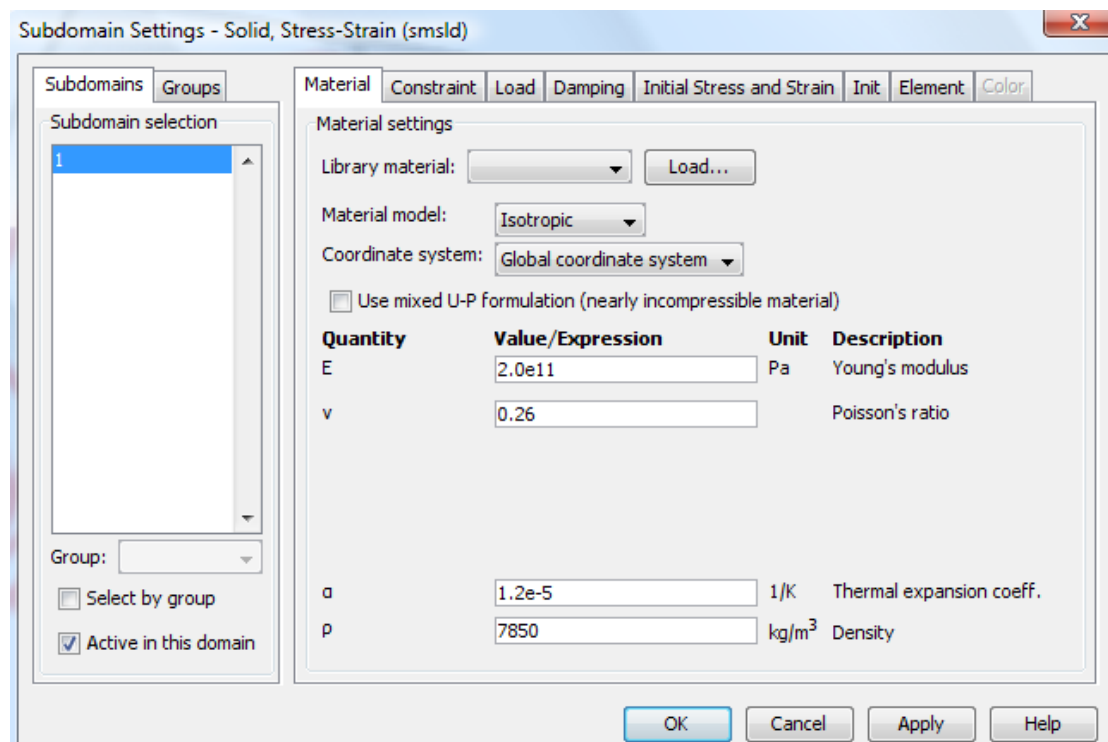


Εικόνα 5.1.1: Αρχείο CAD μέσα σε Comsol Multiphysics

Παρακάτω ακολουθούν οι εντολές με τις οποίες επιλέγουμε το υλικό που έχουμε επιλέξει και τις ιδιότητες που αυτό έχει

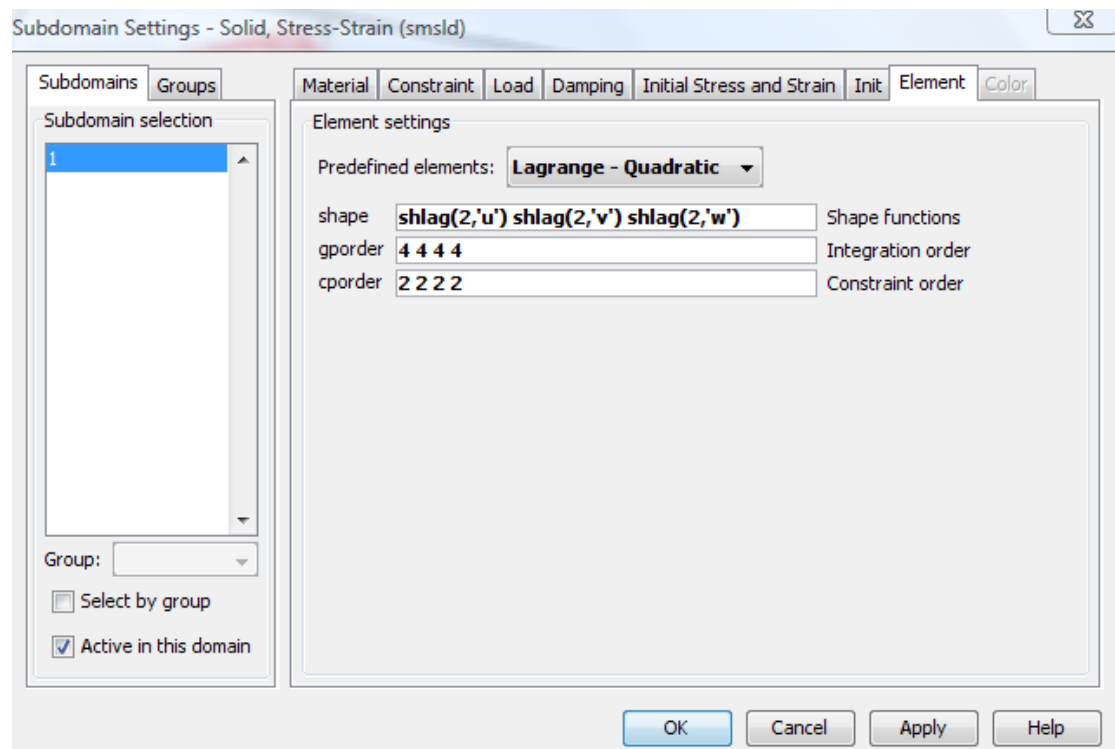
Physics-
Subdomain Settings-
Subdomains-
Subdomain Section-
1-
Material-
Apply-
Ok

Τώρα συμπληρώνουμε τις κατάλληλες τιμές για το υλικό που έχουμε επιλέξει και έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 5.1.2

Επίσης επιλέγοντας την ενότητα Element επιλέγουμε το είδος των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία θα κάνουμε την ανάλυση μας.



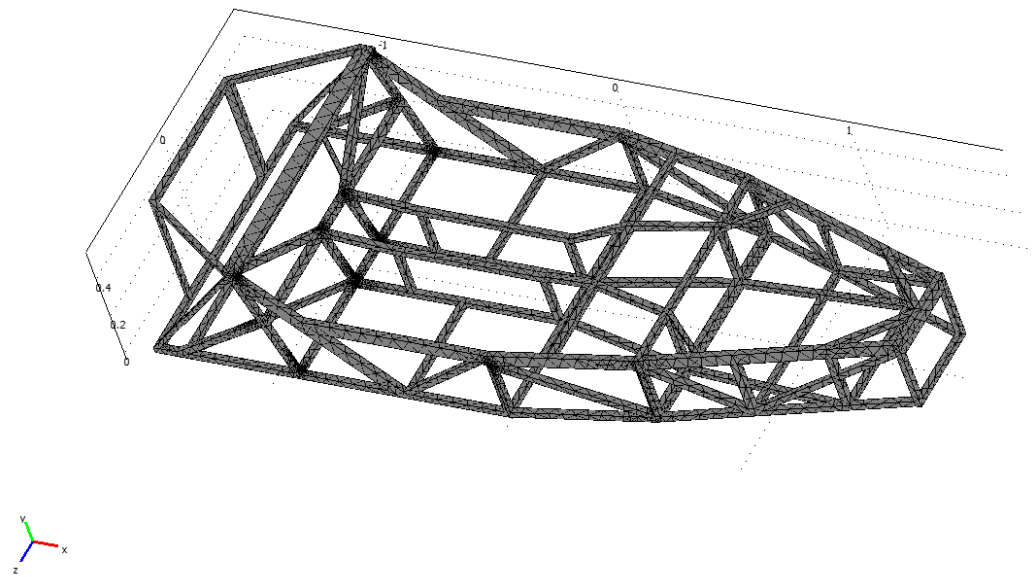
Εικόνα 5.1.3

Apply-
Ok

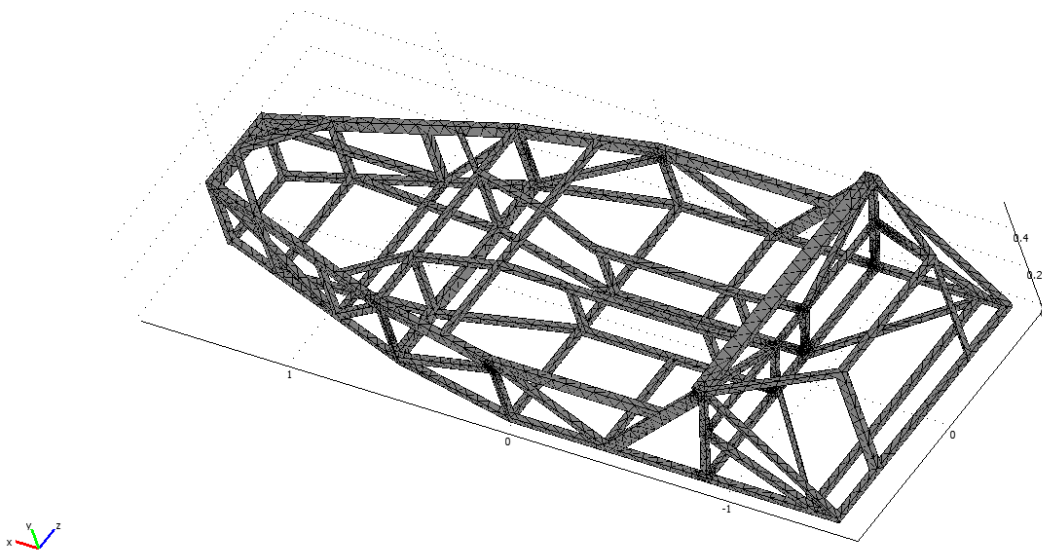
Στη συνέχεια ακολουθούν οι εντολές με τις οποίες γίνεται η διακριτοποίηση της κατασκευής.

Mesh-
Initialize Mesh-

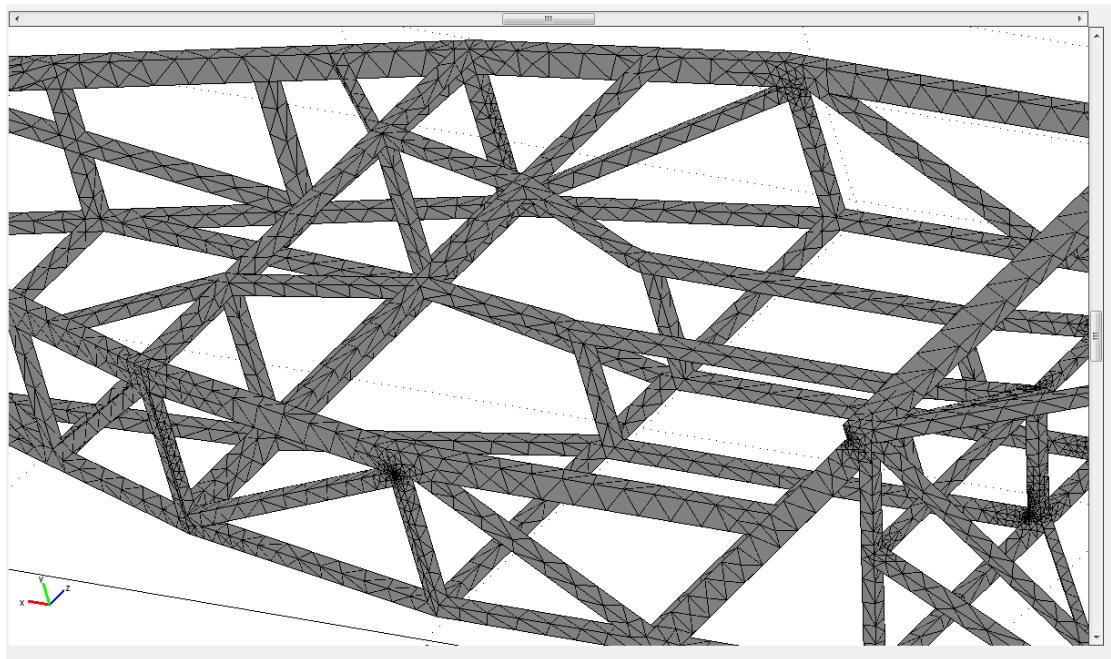
Παρακάτω παρουσιάζεται το πλαίσιο μας μετά την διακριτοποίηση



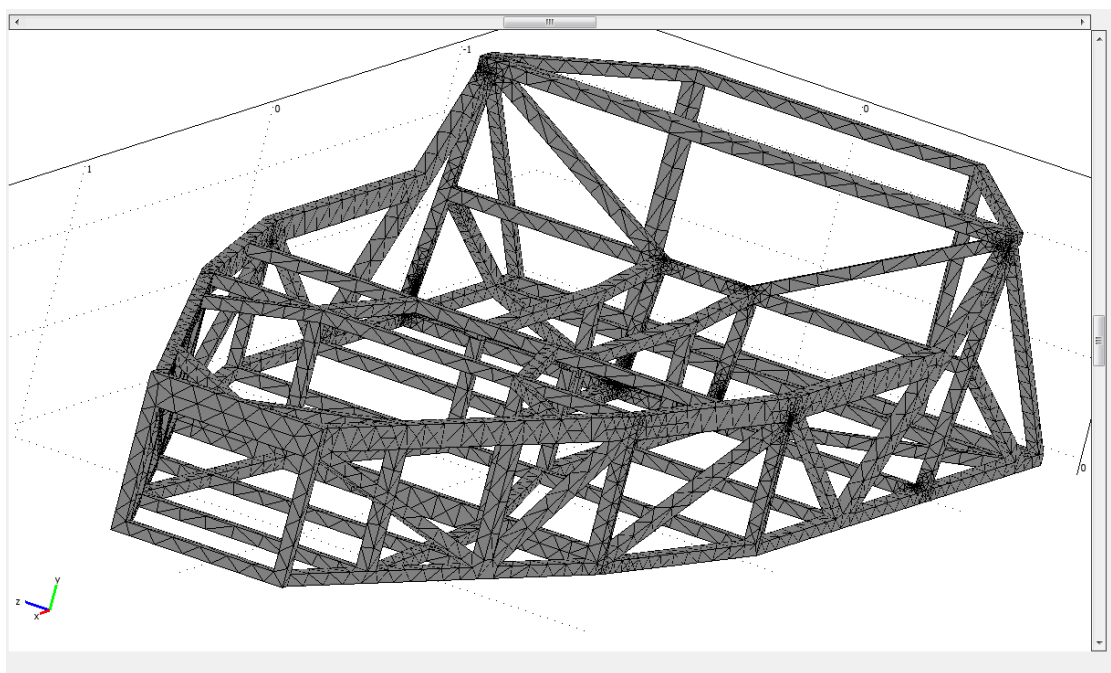
Εικόνα 5.1.4: Απεικόνιση μπροστά



Εικόνα 5.1.5: Απεικόνιση πίσω



Εικόνα 5.1.6: Απεικόνιση κοντινή πλάγια



Εικόνα 5.1.7: Απεικόνιση κοντινή μπροστά

5.2 Εντολές μέσα στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων

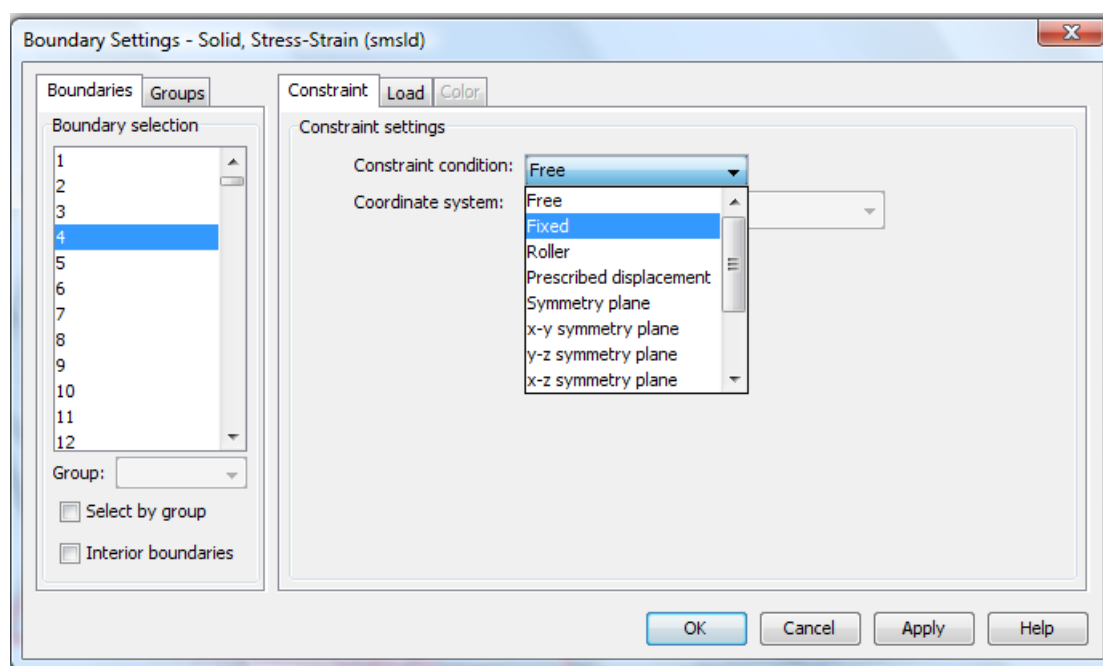
Αφού προηγουμένως έχουμε περάσει το πλαίσιο μας μέσα στα πεπερασμένα στοιχεία και έχουμε κάνει την διακριτοποίηση θα παρουσιάσουμε παρακάτω τις εντολές με τις οποίες μοντελοποιούμε κάθε φορά την ανάλυση που μας ενδιαφέρει. Ενώ βρισκόμαστε στο κύριο παράθυρο με το πλαίσιο να έχει ήδη διακριτοποιηθεί ακολουθούμε τις παρακάτω εντολές για να εφαρμόσουμε δυνάμεις ή στηρίξεις ή και τα δύο μαζί ανάλογα τη μοντελοποίηση. Επιλέγουμε λοιπόν με κατάλληλη σειρά τις παρακάτω εντολές:

Physics-

Boundary Settings-

Boundaries(επιλέγουμε επιθυμητή επιφάνεια)-

Constrain-



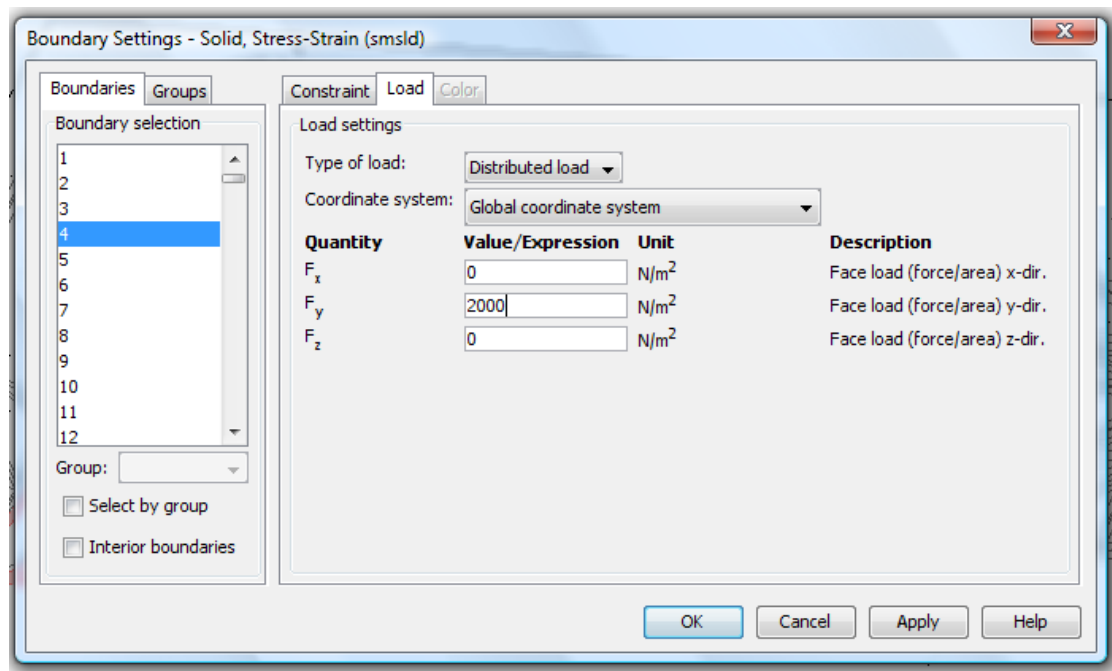
Εικόνα 5.1.8

Constrain condition-

Επιλέγουμε είτε free είτε fixed

Διαφορετικά επιλέγουμε

Load-



Εικόνα 5.1.9

Διαλέγουμε κατάλληλη δύναμη για παράδειγμα δύναμη 2000N/m^2 και επιλέγουμε

Apply-

Ok

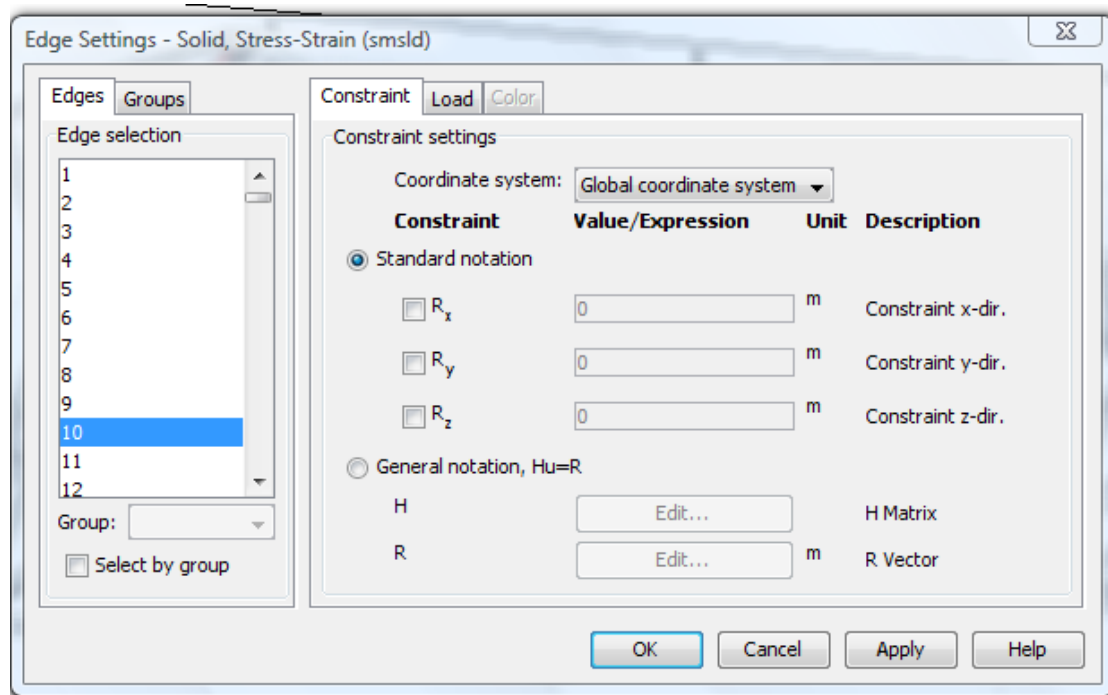
Εάν θέλουμε να εφαρμόσουμε δυνάμεις ή στηρίξεις σε ακμές τότε ακολουθούμε τις παρακάτω εντολές.

Physics-

Edge Settings-

Edges(επιλέγουμε κατάλληλη ακμή)-

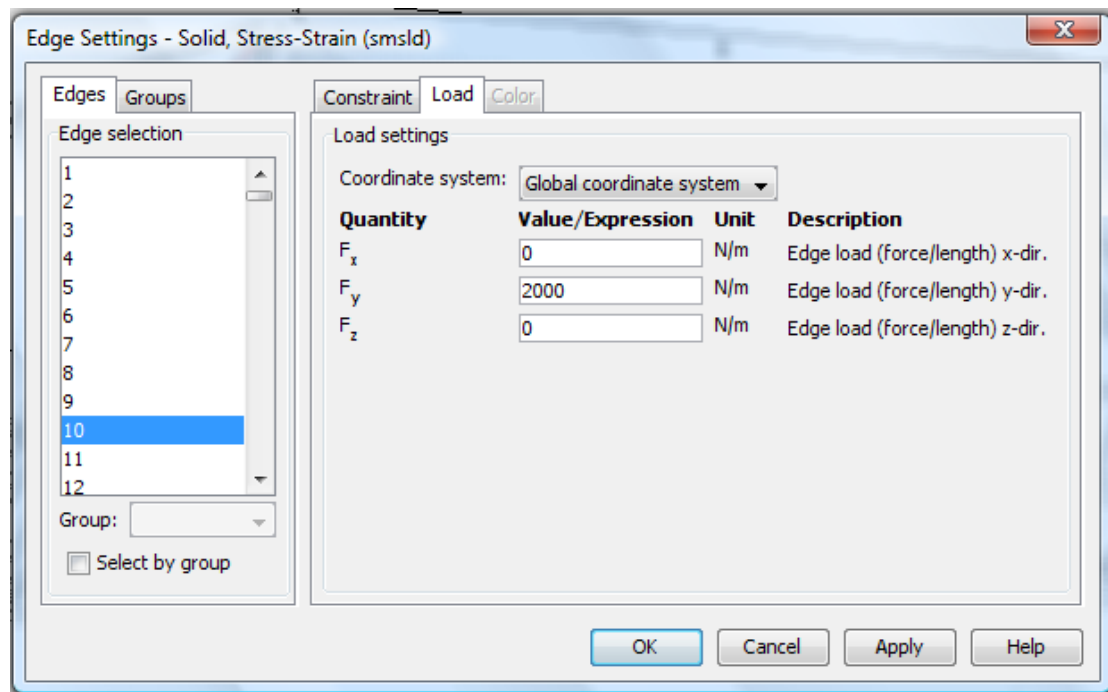
Constrain-



Εικόνα 5.1.10

Standard Rotation-

Επιλέγουμε ανάλογα τον άξονα που μας ενδιαφέρει που θα υπάρχει στήριξη και που όχι, διαφορετικά:



Εικόνα 5.1.11

Επιλέγουμε δύναμη για παράδειγμα 2000N/m εκεί που έχουμε επιλέξει.

Επιλέγουμε Apply-

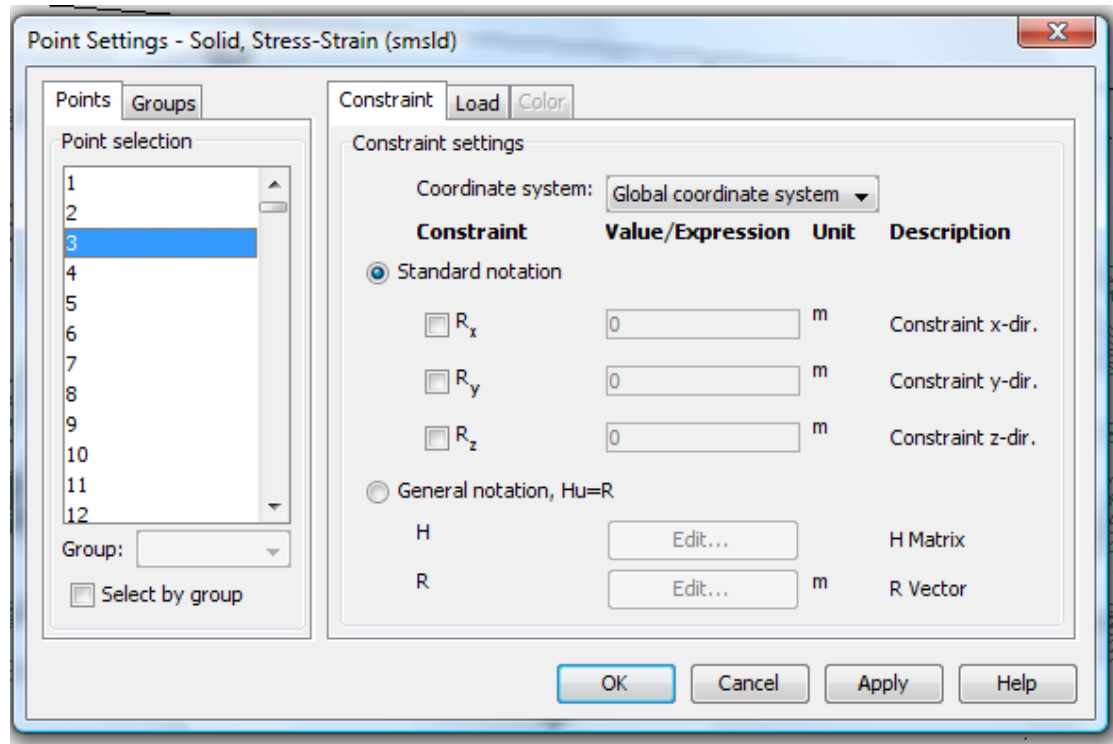
Ok

Τέλος εάν επιλέξουμε σημεία για την μοντελοποίηση μας ακολουθούμε τις παρακάτω εντολές:

Physics-

Point settings-

Constrain-

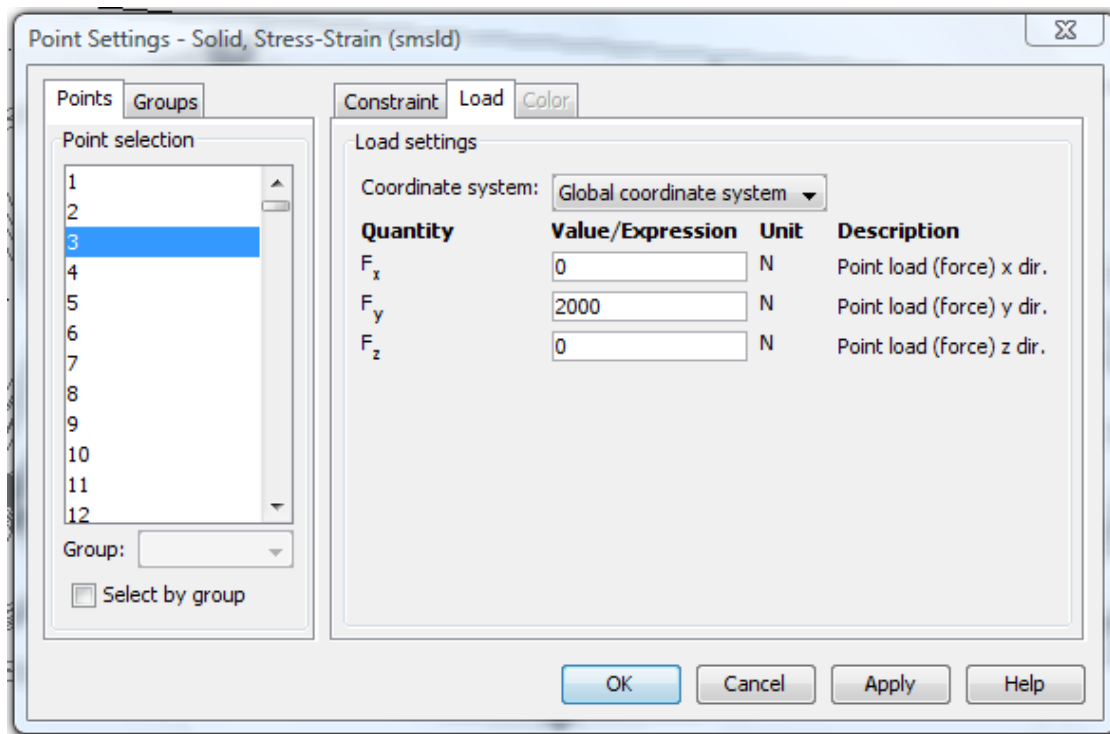


Εικόνα 5.1.12

Standard Rotation-

Επιλέγουμε ανάλογα τα σημεία που μας ενδιαφέρουν εάν θα έχουν στήριξη ή όχι.

Διαφορετικά



Εικόνα 5.1.13

Εφαρμόζουμε δύναμη στα σημεία που μας ενδιαφέρουν για παράδειγμα δύναμη 2000N.

Επιλέγουμε

Apply-
Ok.

Μετά από την παραπάνω διαδικασία επιλέγουμε:

Solve-
Solve problem

Και εμφανίζονται τα αποτελέσματα κάθε φορά ανατρέχοντας κάθε φορά στο μενού:

Post-Processing.

Κεφάλαιο 6

Μοντελοποιήσεις

6.1 Μοντελοποίηση Καμπτικής Δυσκαμψίας ή Bending Stiffness

Με τον όρο καμπτική δυσκαμψία αναφερόμαστε στην δυσκαμψία του πλαισίου να λυγίσει όταν αυτό υπόκειται δυνάμεις κάθετες προς το έδαφος συνήθως στο κέντρο του πλαισίου η κάπου εκεί κοντά, ενώ παράλληλα το πλαίσιο είναι περιορισμένο σε κατάλληλα σημεία[7].

Το πλαίσιο θα πρέπει να είναι περιορισμένο σε τέσσερα σημεία, στα μετατρόχια του αυτοκινήτου εκεί που υπάρχουν οι υποδοχείς που θα δέχονται την ανάρτηση του αυτοκινήτου δηλαδή στις δύο μπροστινές θέσεις της μπροστά ανάρτησης και αντίστοιχα στις δύο πίσω θέσεις της ανάρτησης. Ένα σχεδιάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω.

Loading Condition:

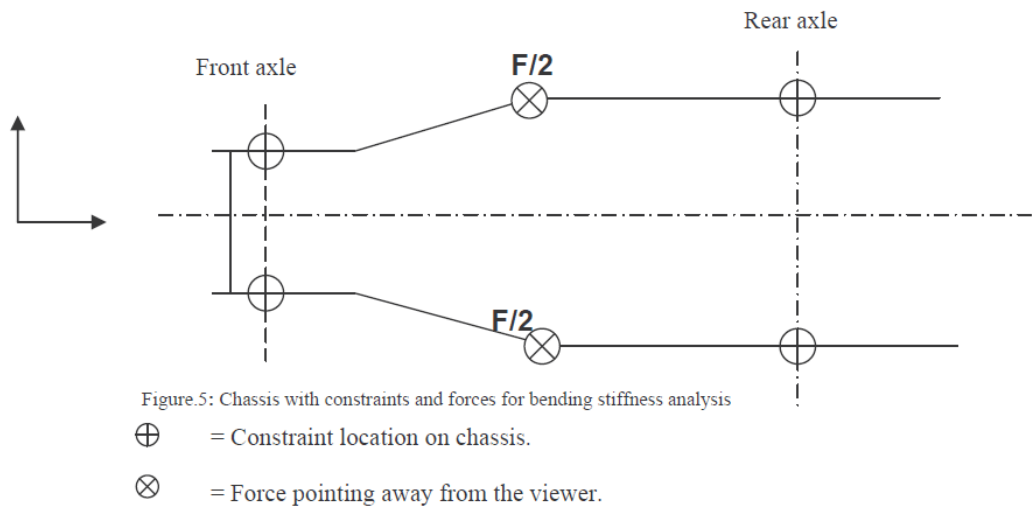


Figure.5: Chassis with constraints and forces for bending stiffness analysis

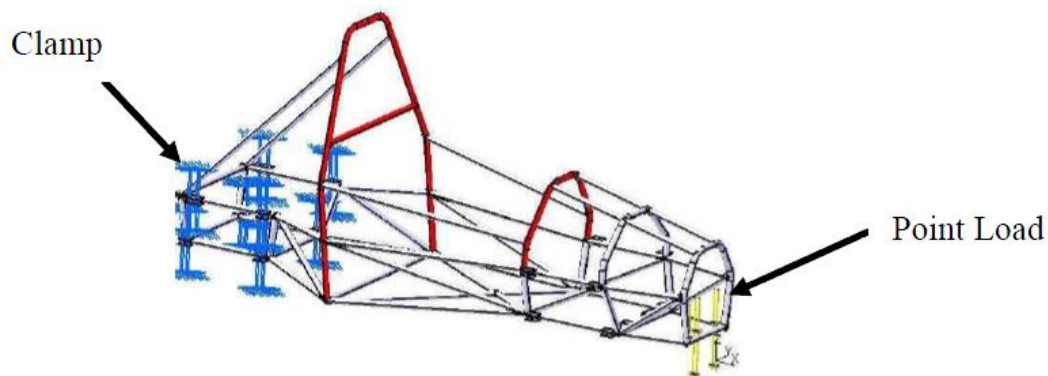
Εικόνα 6.1.1

Παρατηρούμε ότι το πλαίσιο είναι πακτωμένο (μετακίνηση μηδέν) σε τέσσερα σημεία της ανάρτησης και μια συνολική δύναμη μοιράζεται σε δυο ίσες υποδιπλάσιες σχεδόν στο κέντρο του πλαισίου. Οι δυνάμεις που εφαρμόζουμε κατευθύνονται μακριά από εμάς.

Για τη δική μας μοντελοποίηση εφαρμόσαμε δυνάμεις 3000N σε κάθε πλευρά όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1.1.

6.2 Μοντελοποίηση Στατικής Ανάλυσης Διάτμησης ή Static Shear

Στην ανάλυση Στατικής Διάτμησης υποθέτουμε ότι το πλαίσιο μας δρα σαν μία δοκός της οποίας το πίσω μέρος είναι πακτωμένο (μετακίνηση μηδέν) ενώ το μπροστά μέρος του πλαισίου υπόκειται δυνάμεις κάθετες ως προς τον διαμήκη άξονα του όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παρακάτω[6].



Εικόνα 6.2.1

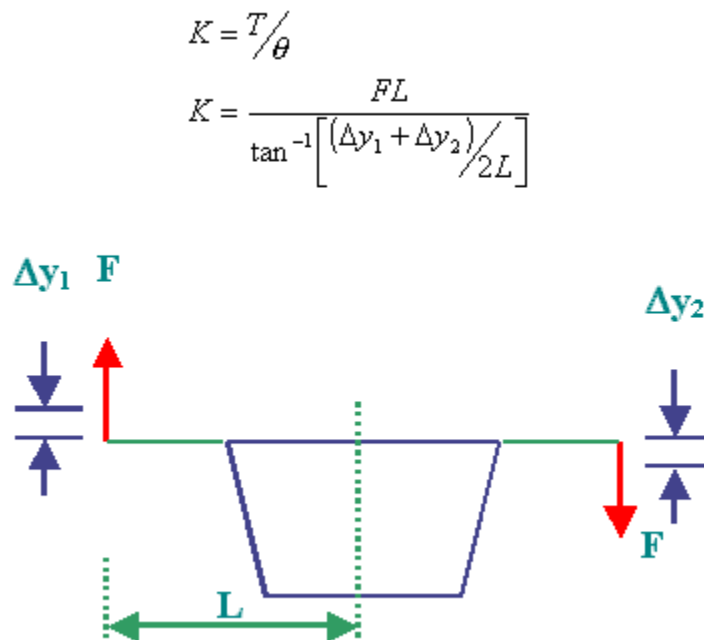
Οι δυνάμεις που εφαρμόσαμε είναι 4000N συγκεντρωμένες όπως δείχνει η εικόνα 6.2.1

6.3 Μοντελοποίηση Στρεπτικής Ακαμψίας

Η Στρεπτική Ακαμψία αφορά τη δυνατότητα του πλαισίου να αντιστέκεται σε στρεπτικά φορτία(φορτία που το στρέφουν) όταν το πίσω μέρος βρίσκεται υπό περιορισμό[6],[9],[12].

Η Στρεπτική Ακαμψία υπολογίζεται βρίσκοντας τις ροπές που εφαρμόζονται στο πλαίσιο, διαιρώντας με τηνγωνιώδη μετακίνηση. Το αποτέλεσμα παραδοσιακά είναι ένας αριθμός που μετράται σε πόδια-κιλά ανά βαθμό(foot-pounds per degree). Ο ακριβής υπολογισμός γίνεται με τον παρακάτω τρόπο ενώ το διάγραμμα παρακάτω

δείχνει πως εφαρμόζονται οι δυνάμεις στο μπροστά μέρος του πλαισίου στα σημεία της ανάρτησης.



Εικόνα 6.3.1

Η ροπή που περιγράφεται στον τύπο παραπάνω είναι αποτέλεσμα της δύναμης που εφαρμόζεται στη μία άκρη της ανάρτησης και της απόστασης από το σημείο εφαρμογής της το οποίο βρίσκεται στην κεντρική γραμμή που χωρίζει το πλαίσιο στα δύο. Ο λόγος για τον οποίο οι δύο μετακινήσεις υπάρχουν στον τύπο είναι γιατί παίρνουμε το μέσο όρο της δεξιάς και της αριστερής μετακίνησης ώστε να παράγουμε ένα πιο ακριβές νόμμο γωνιώδους μετακίνησης.

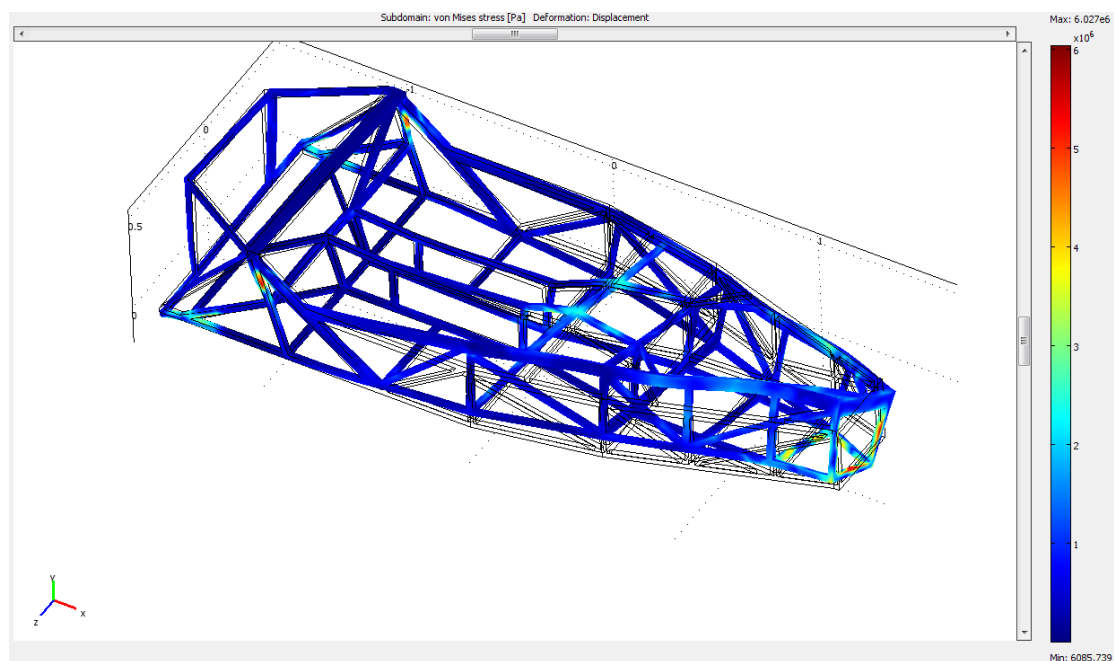
Οι δυνάμεις που εφαρμόσαμε είναι 2000N σε κάθε πλευρά όπως φαίνεται στο σχήμα 6.31.

Κεφάλαιο 7

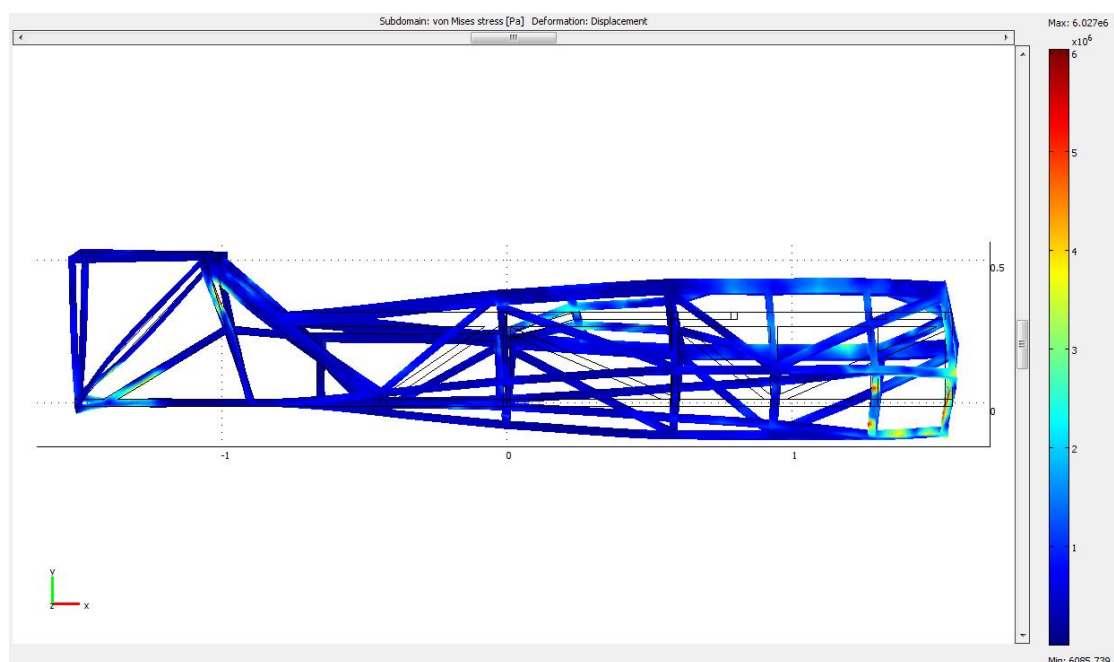
Αποτελέσματα Μοντελοποιήσεων

7.1 Αποτελέσματα Στρεπτικής Ακαμψίας

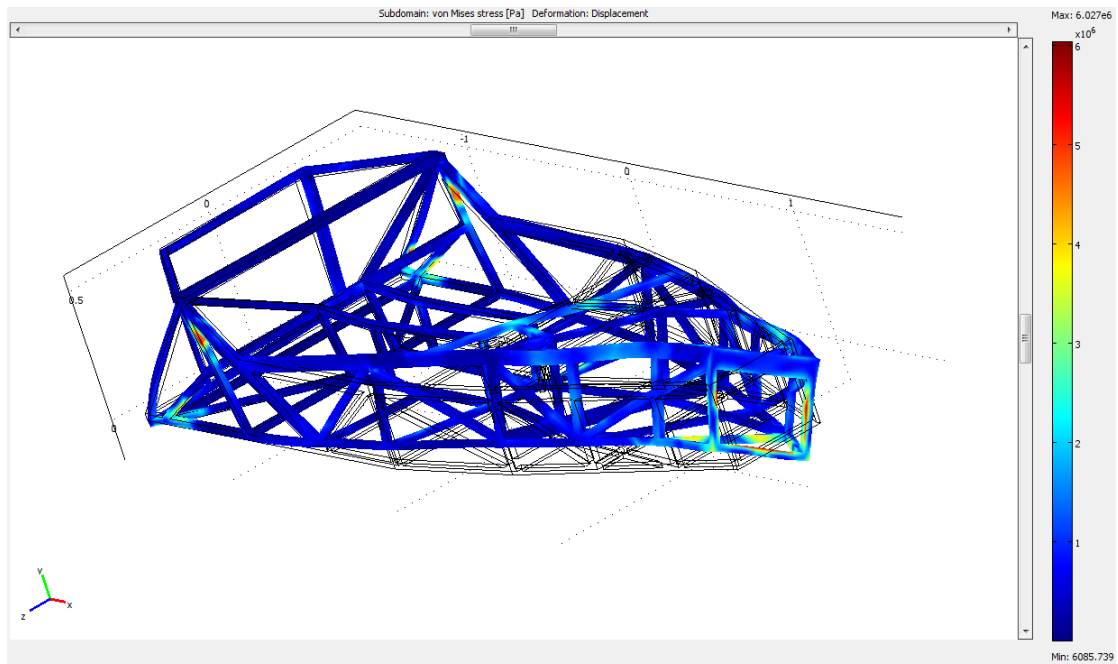
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα για την μοντελοποίηση.



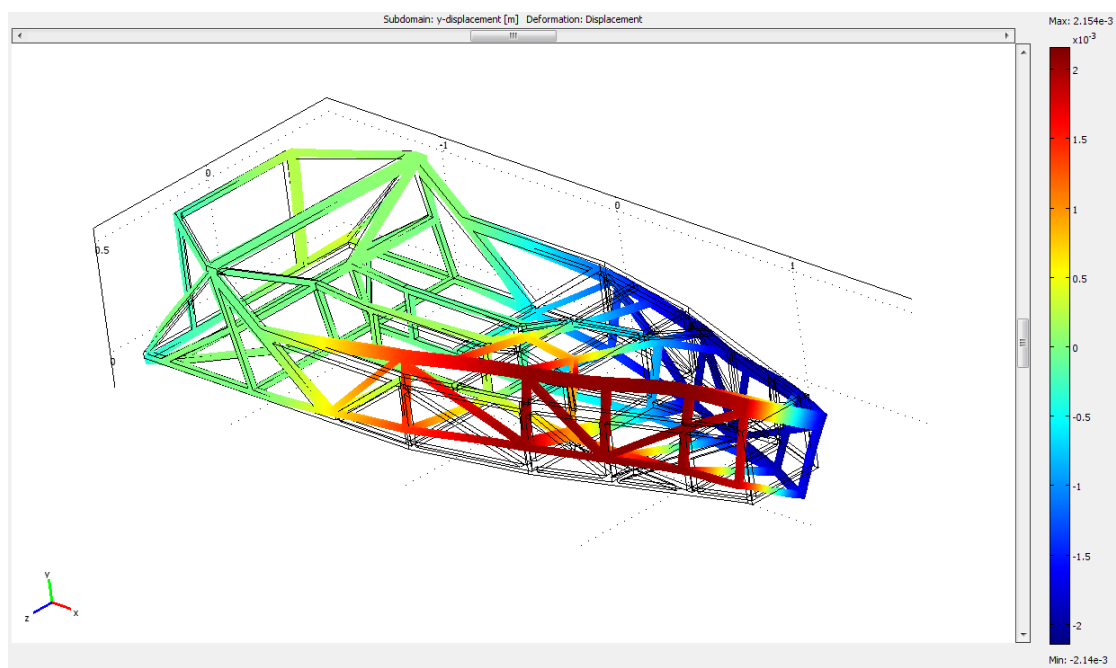
Εικόνα 7.1.1: Μέγιστη καταπόνηση=6.027 10^6 Pa, Ελάχιστη καταπόνηση=6085.739Pa



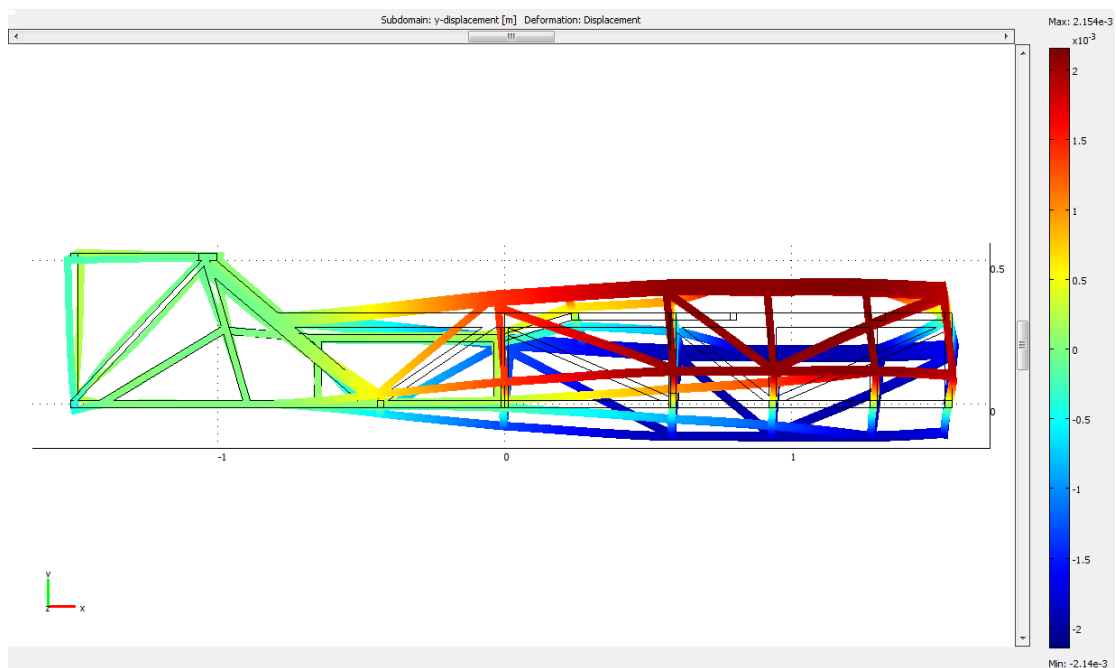
Εικόνα 7.1.2: Μέγιστη καταπόνηση=6.027 10^6 Pa, Ελάχιστη καταπόνηση=6085.739Pa



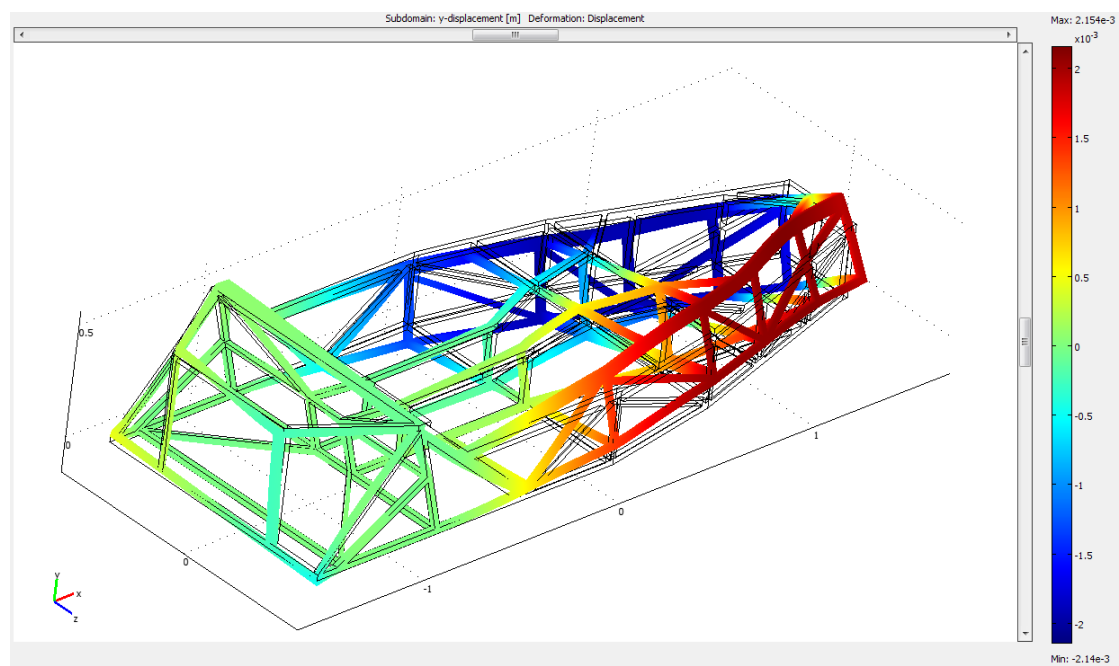
Εικόνα 7.1.3: Μέγιστη καταπόνηση= $6.027 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= 6085.739 Pa



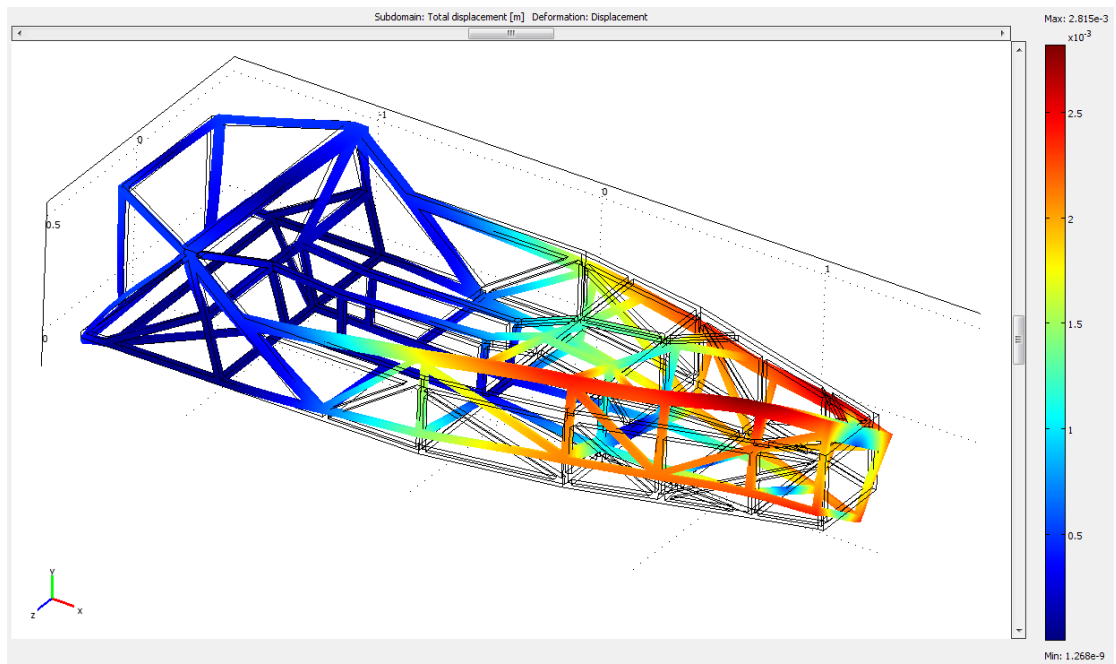
Εικόνα 7.1.4: Μέγιστη μετατόπιση= $2.154 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $2.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



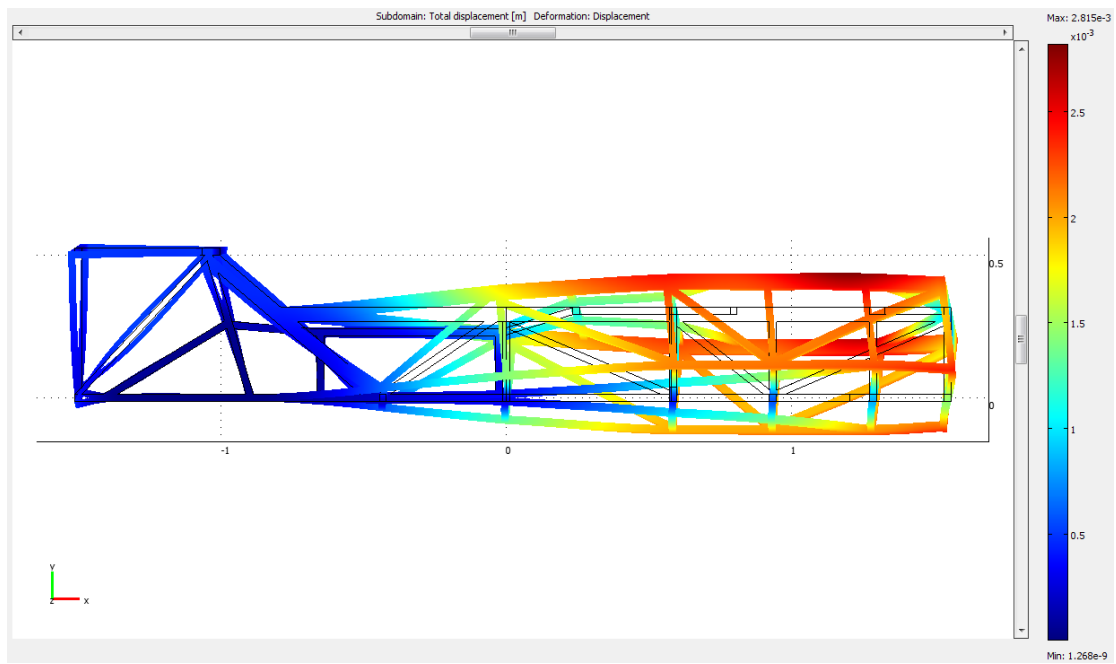
Εικόνα 7.1.5: Μέγιστη μετατόπιση= $2.154 \cdot 10^{-3} \text{m}$ Ελάχιστη μετατόπιση= $2.14 \cdot 10^{-3} \text{m}$



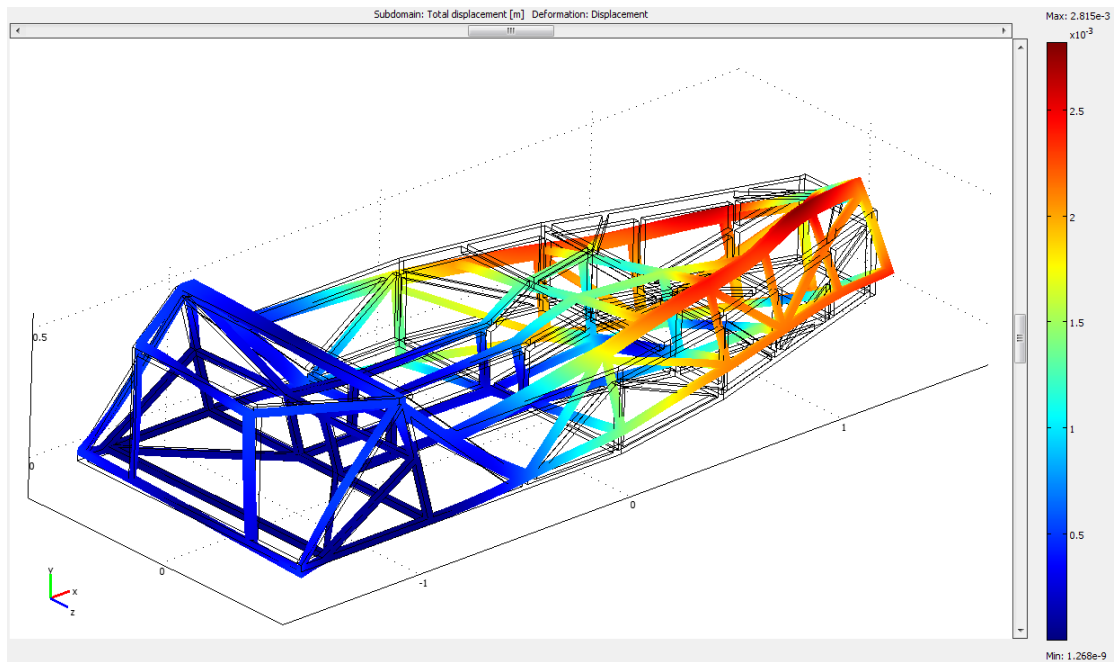
Εικόνα 7.1.6: Μέγιστη μετατόπιση= $2.154 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $2.14 \cdot 10^{-3} \text{m}$



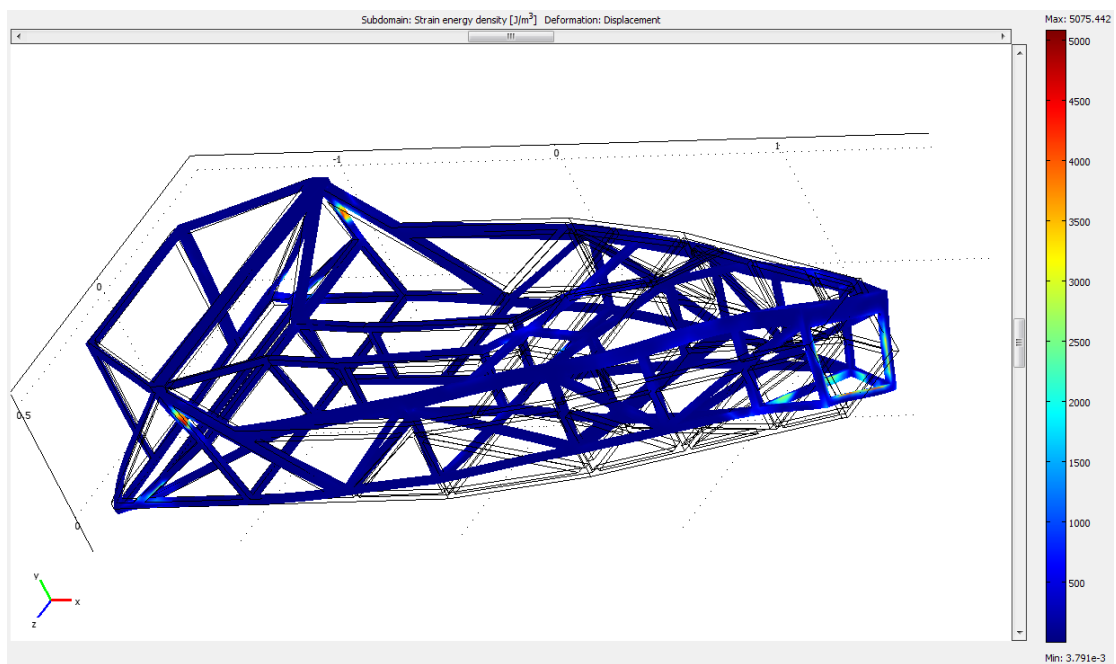
Εικόνα 7.1.7: Μέγιστη μετατόπιση= $2.815 \cdot 10^{-3}\text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $1.268 \cdot 10^{-9}\text{m}$



Εικόνα 7.1.8: Μέγιστη μετατόπιση= $2.815 \cdot 10^{-3}\text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $1.268 \cdot 10^{-9}\text{m}$

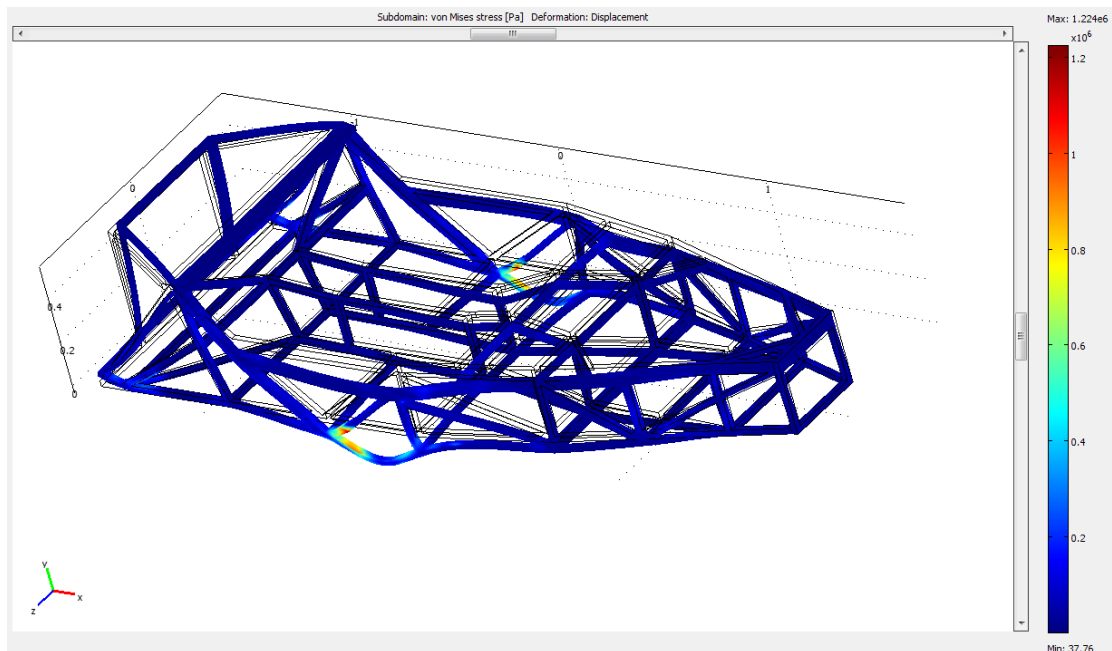


Εικόνα 7.1.9: Μέγιστη μετατόπιση= $2.815 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $1.268 \cdot 10^{-9} \text{m}$

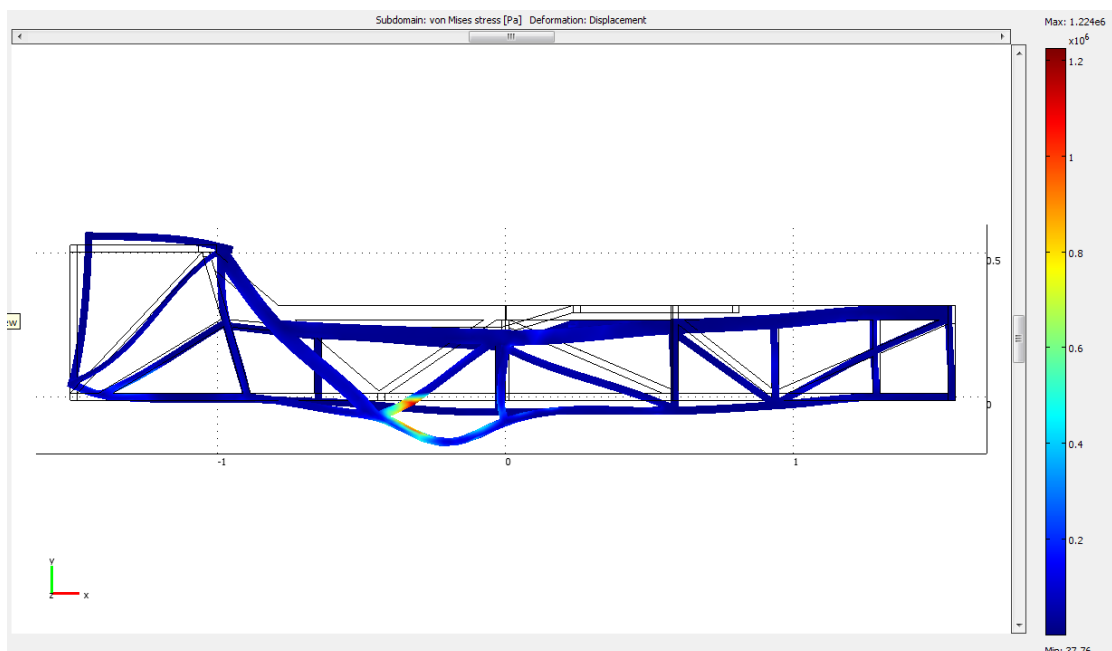


Εικόνα 7.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας= 5075.442J/m^3 , Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας= $3.791 \cdot 10^{-3} \text{J/m}^3$

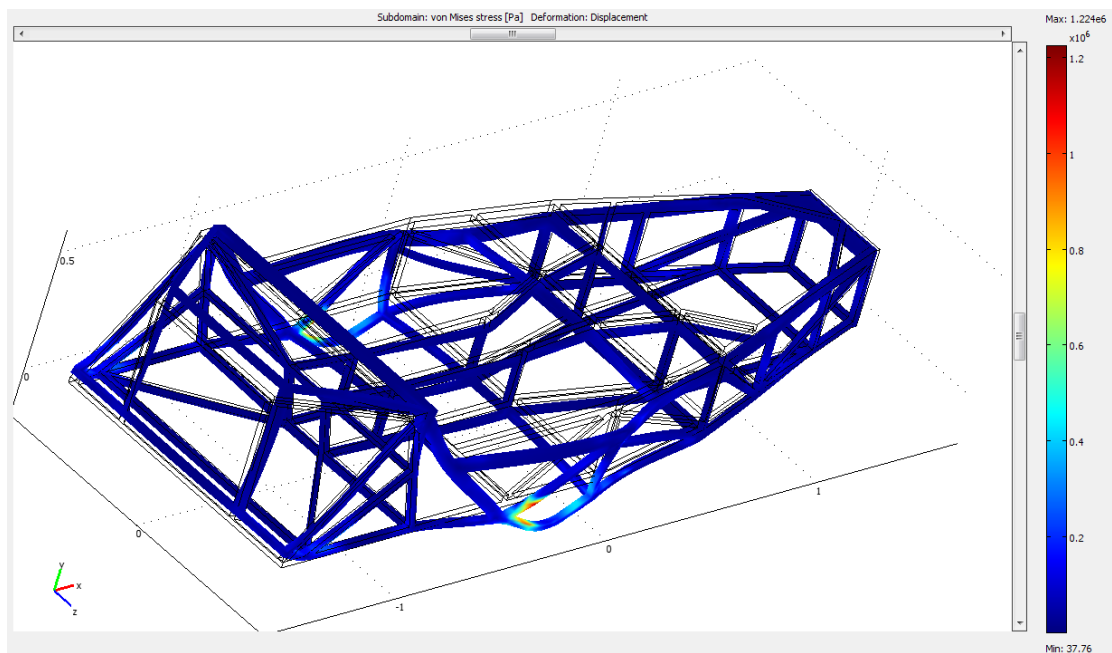
7.2 Αποτελέσματα Καμπτικής Δυσκαμψίας



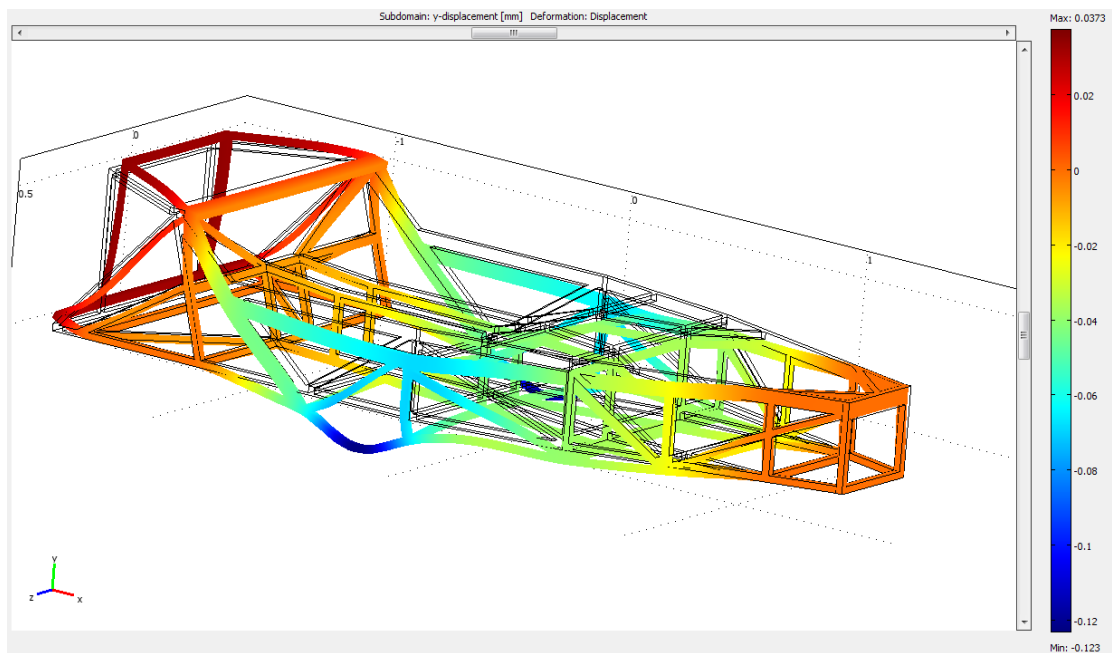
Εικόνα 7.2.1: Μέγιστη καταπόνηση= $1.22 \cdot 10^6 \text{Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= 37.76Pa



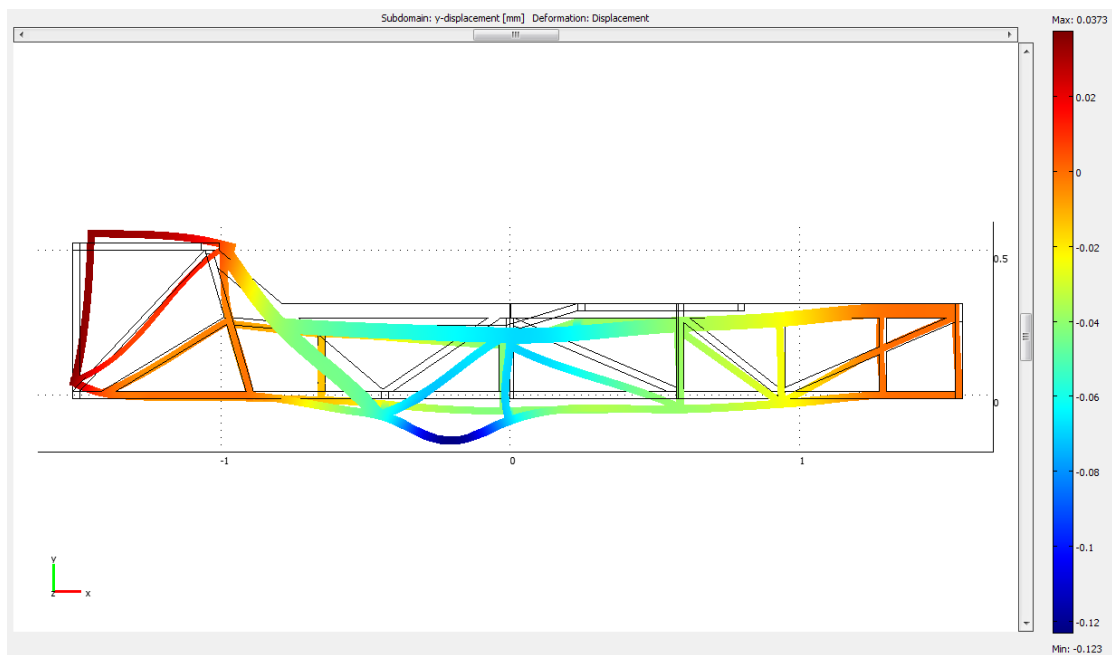
Εικόνα 7.2.2: Μέγιστη καταπόνηση= $1.22 \cdot 10^6 \text{Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= 37.76Pa



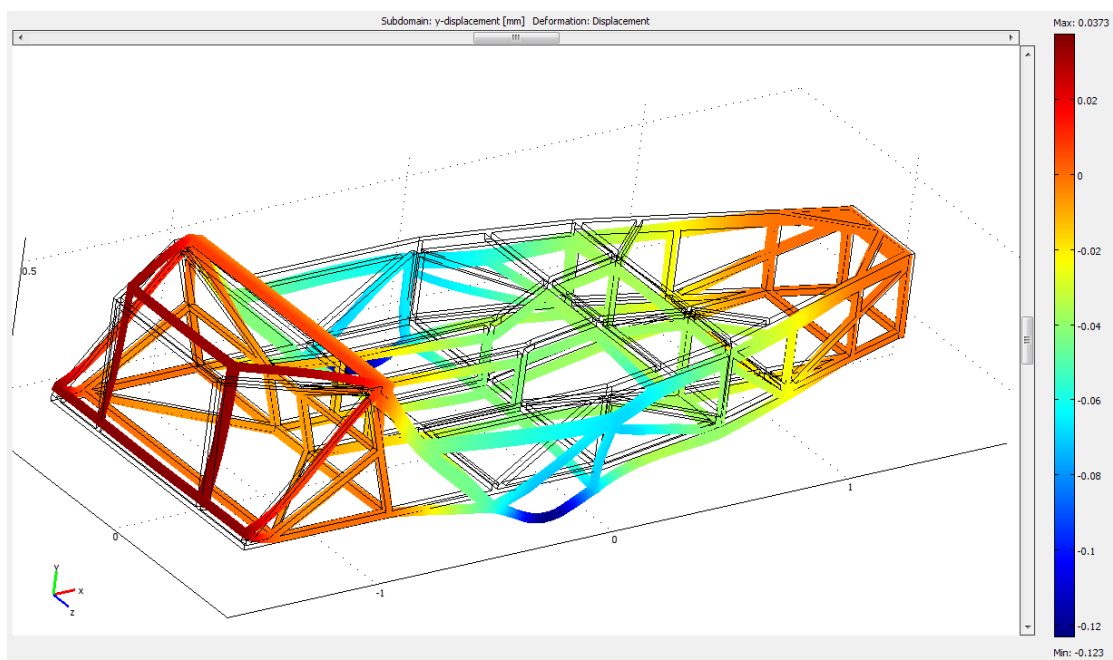
Εικόνα 7.2.3: Μέγιστη καταπόνηση= $1.22 \cdot 10^6 \text{Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= 37.76Pa



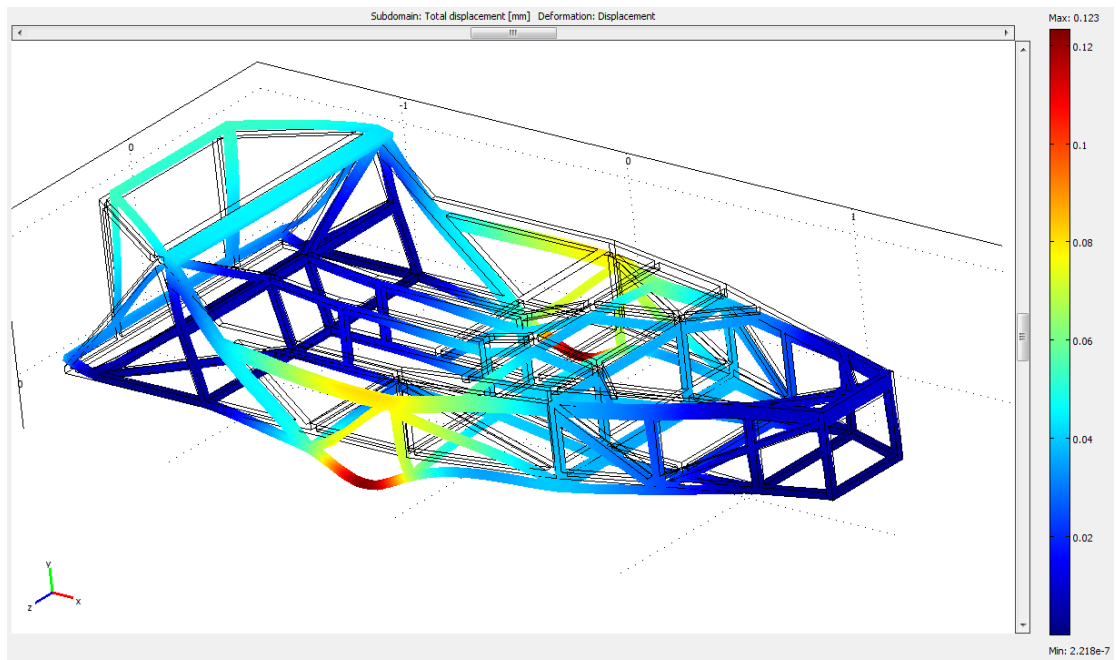
Εικόνα 7.2.4: Μέγιστη μετατόπιση= 0.0373mm , Ελάχιστη μετατόπιση= -0.123mm



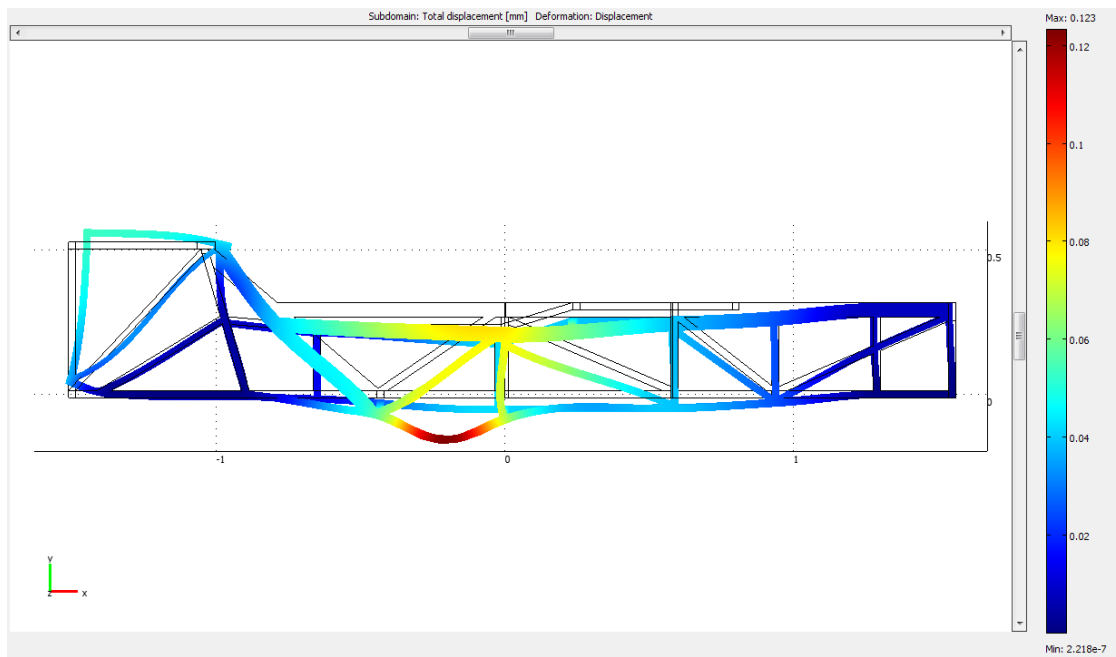
Εικόνα 7.2.5: Μέγιστη μετατόπιση=0.0373mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-0.123mm



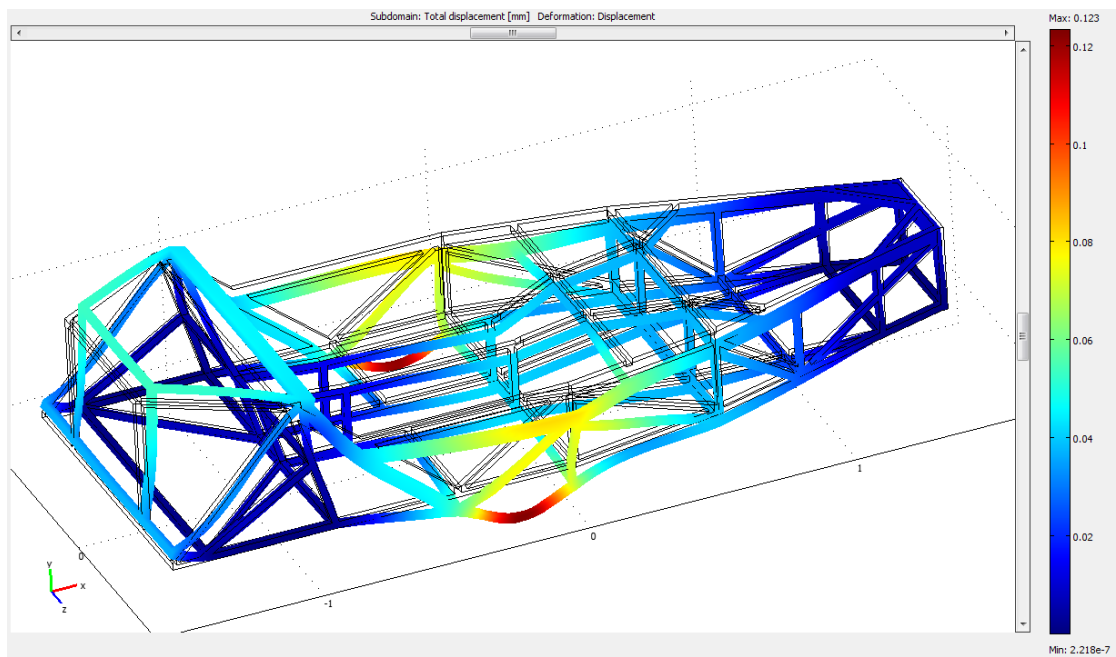
Εικόνα 7.2.6: Μέγιστη μετατόπιση=0.0373mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-0.123mm



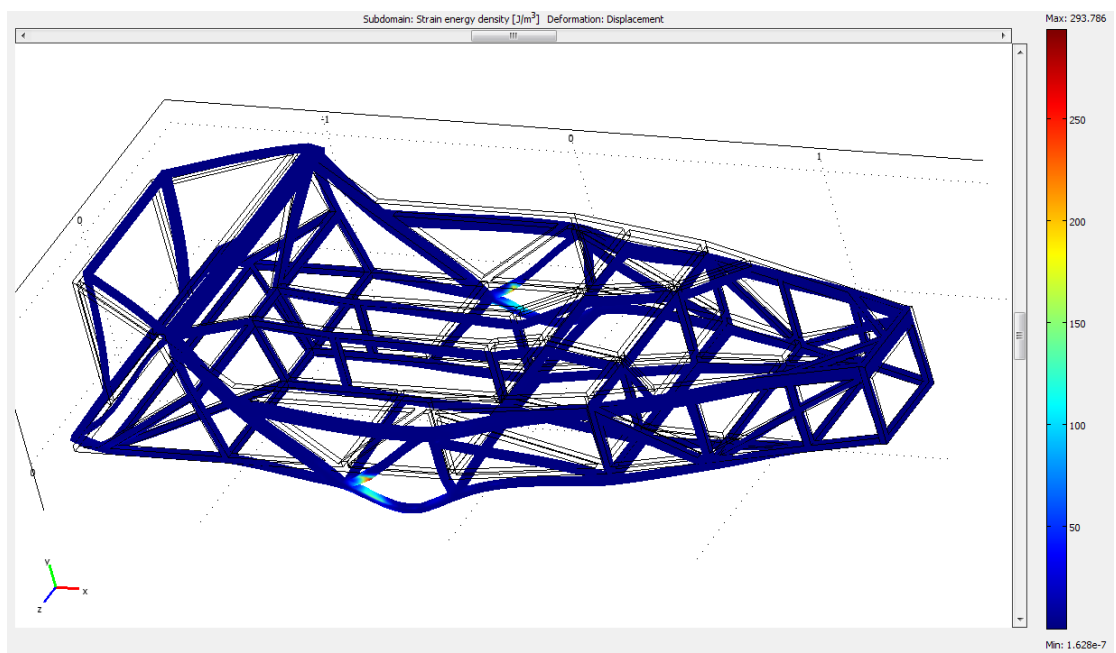
Εικόνα 7.2.7: Μέγιστη μετατόπιση=0.123mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.218 10⁻⁷mm



Εικόνα 7.2.8: Μέγιστη μετατόπιση=0.123mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.218 10⁻⁷mm

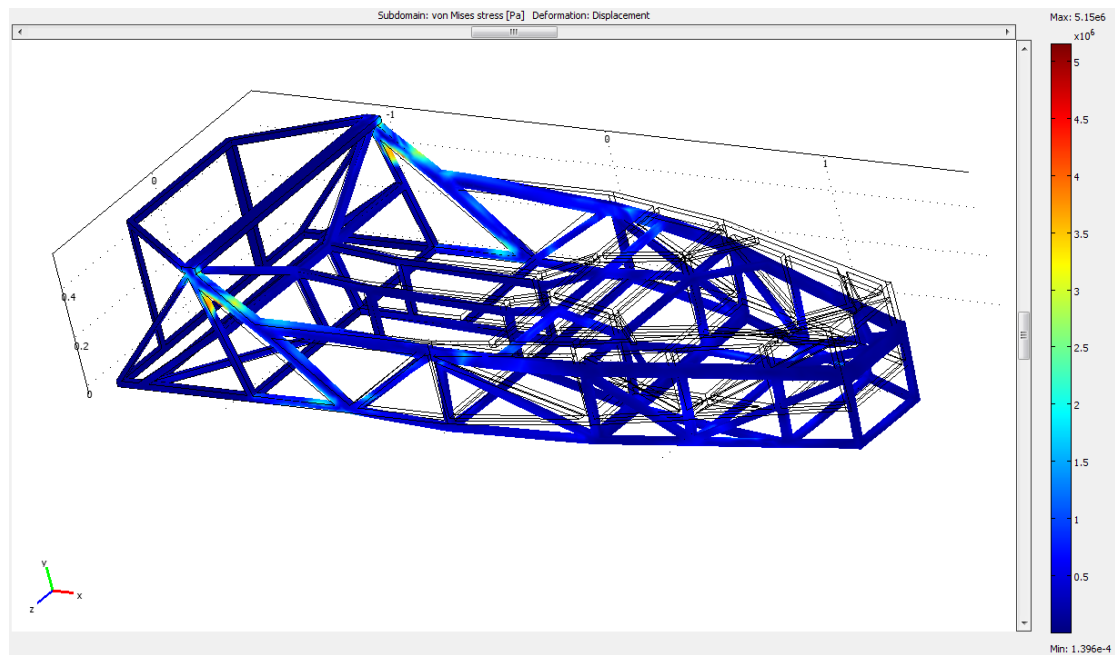


Εικόνα 7.2.9: Μέγιστη μετατόπιση=0.123mm, Ελάχιστη μετατόπιση= $2.218 \cdot 10^{-7}$ mm

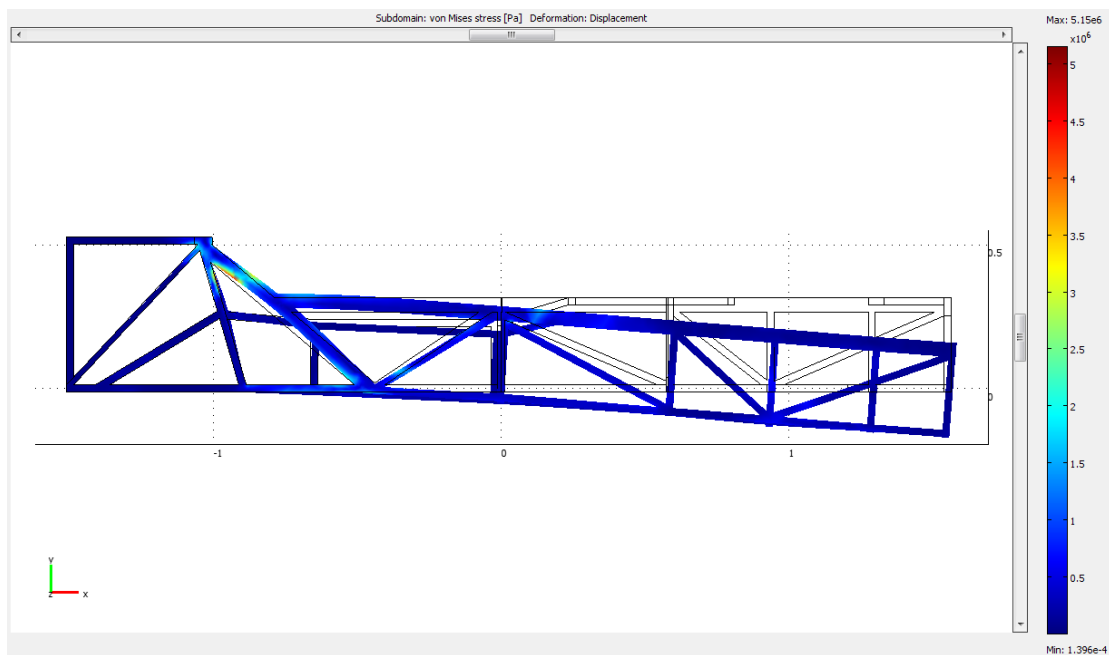


Εικόνα 7.2.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας=293.786j/m³ ,Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας= $1.628 \cdot 10^{-7}$ j/m³

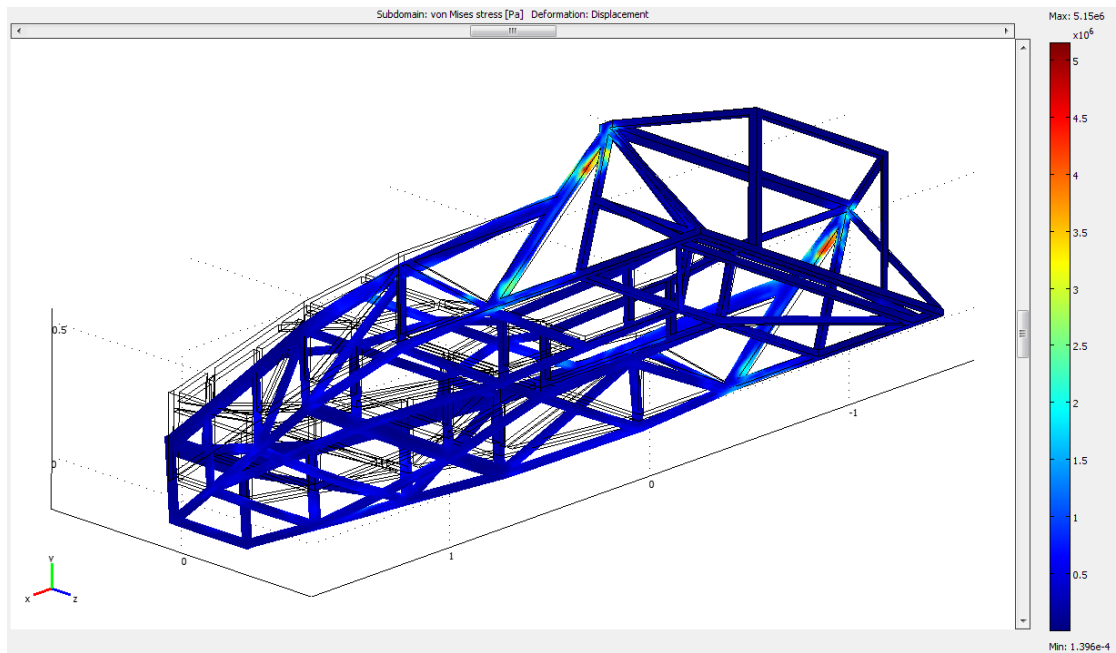
7.3 Αποτελέσματα Στατικής Διάτμησης



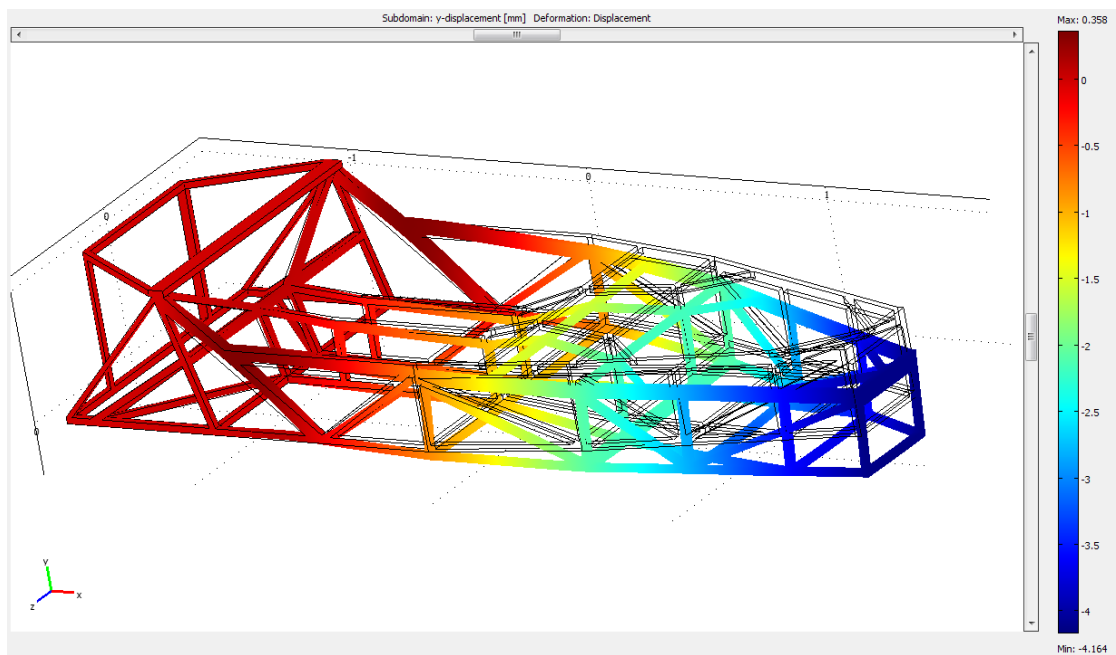
Εικόνα 7.3.1: Μέγιστη καταπόνηση= $5.15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.396 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$



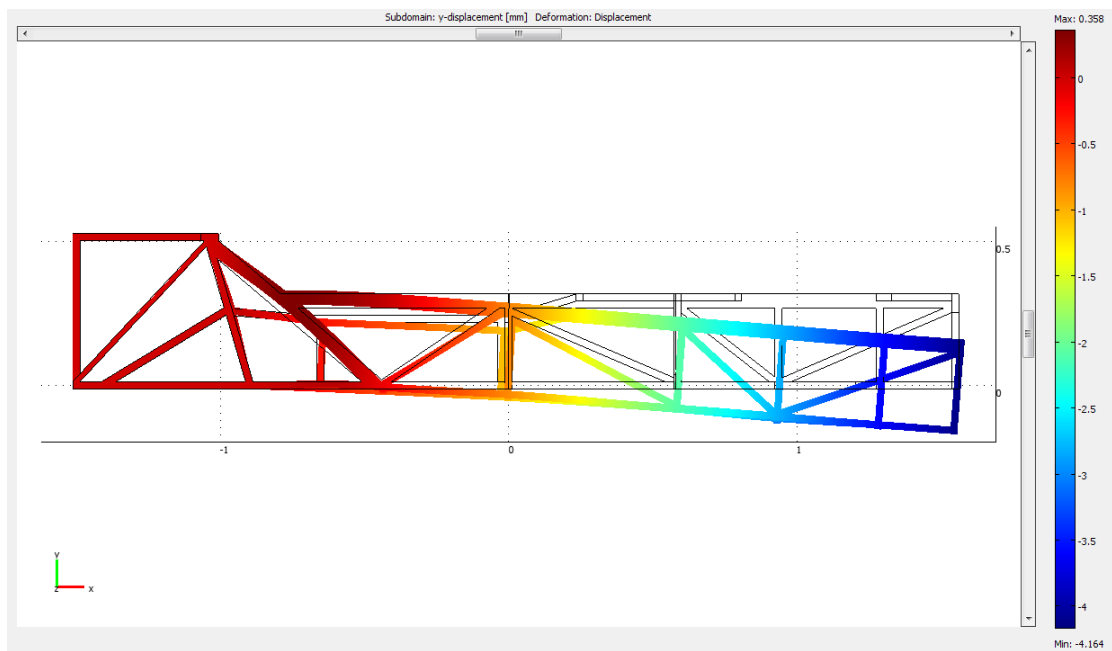
Εικόνα 7.3.2: Μέγιστη καταπόνηση= $5.15 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.396 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$



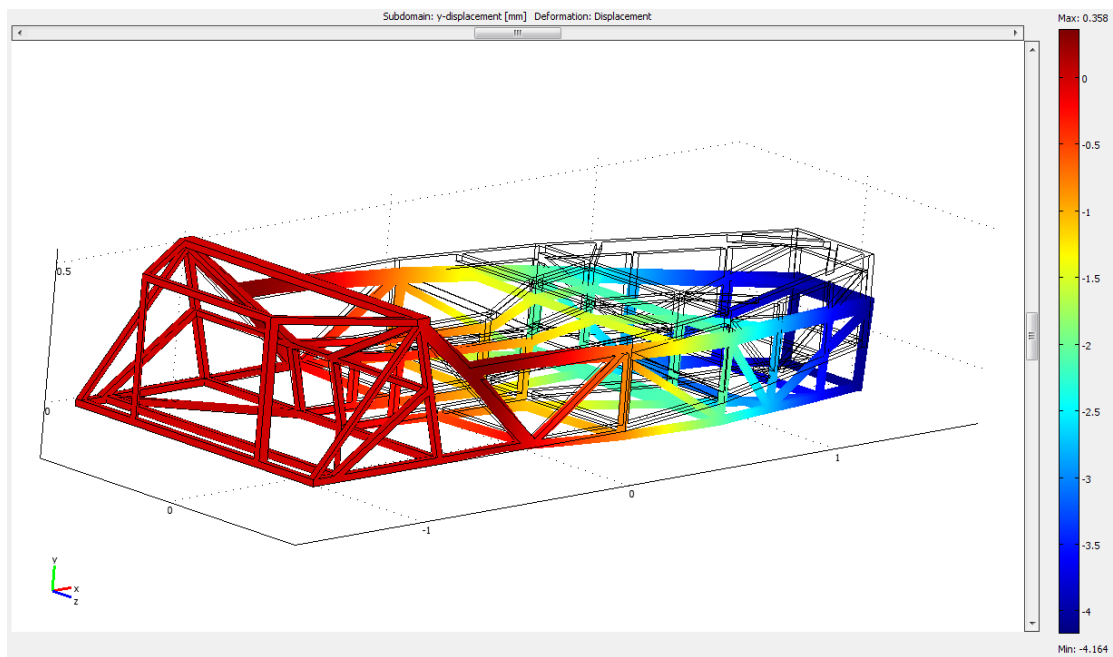
Εικόνα 7.3.3: Μέγιστη καταπόνηση= $5.15 \cdot 10^6 \text{Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.396 \cdot 10^{-4} \text{Pa}$



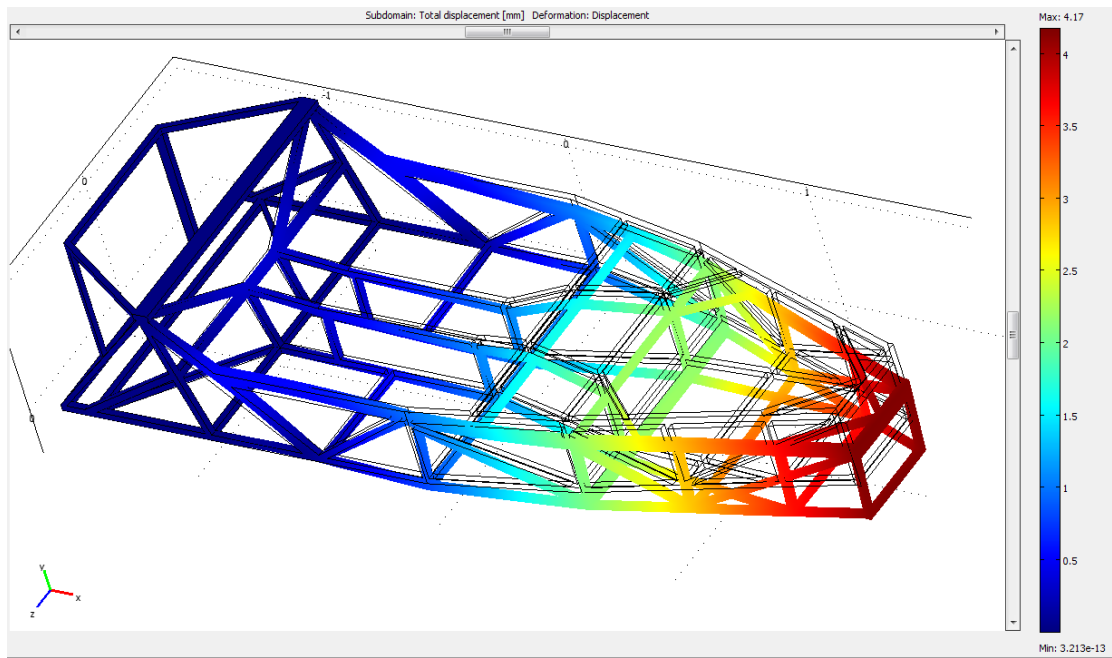
Εικόνα 7.3.4: Μέγιστη μετατόπιση= 0.358mm , Ελάχιστη μετατόπιση= -4.164mm



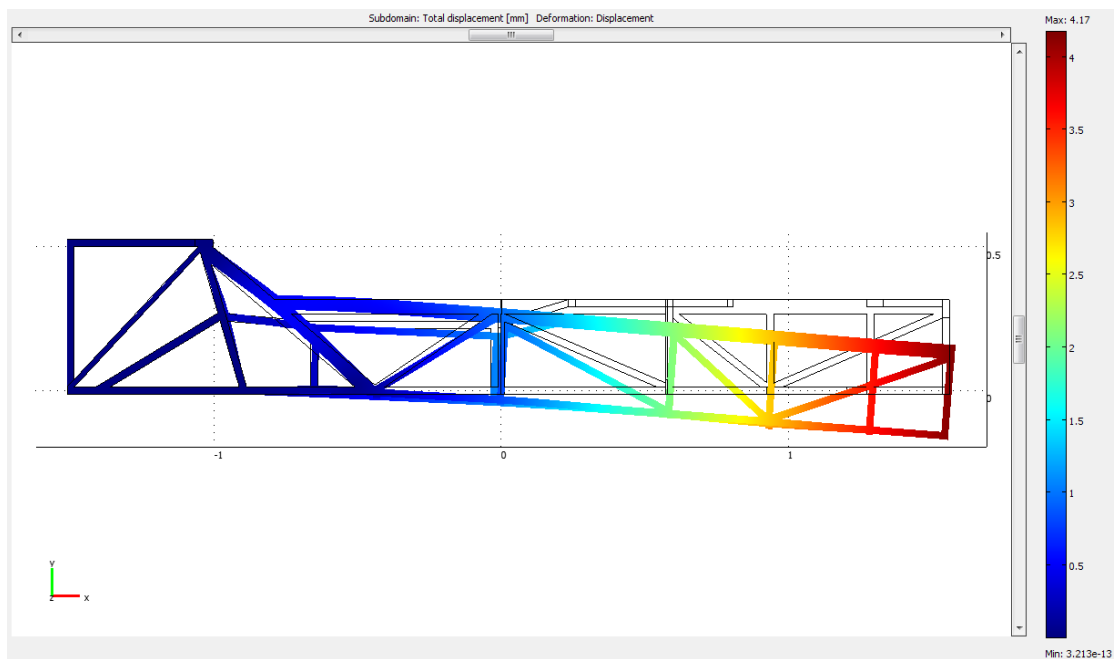
Εικόνα 7.3.5: Μέγιστη μετατόπιση=0.358mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-4.164mm



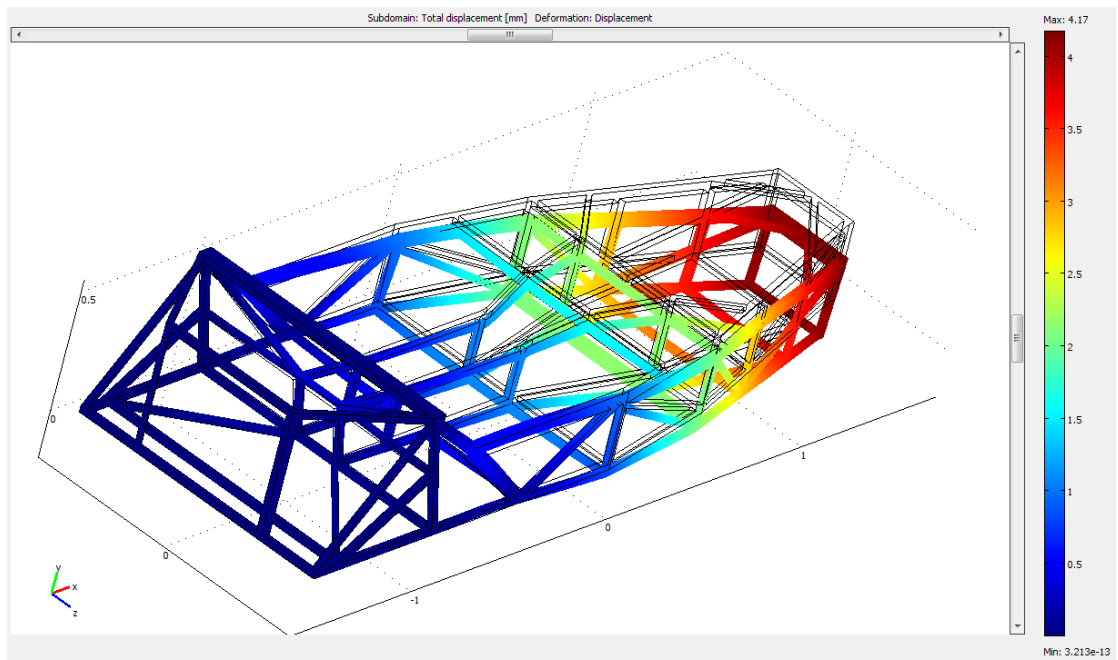
Εικόνα 7.3.6: Μέγιστη μετατόπιση=0.358mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-4.164mm



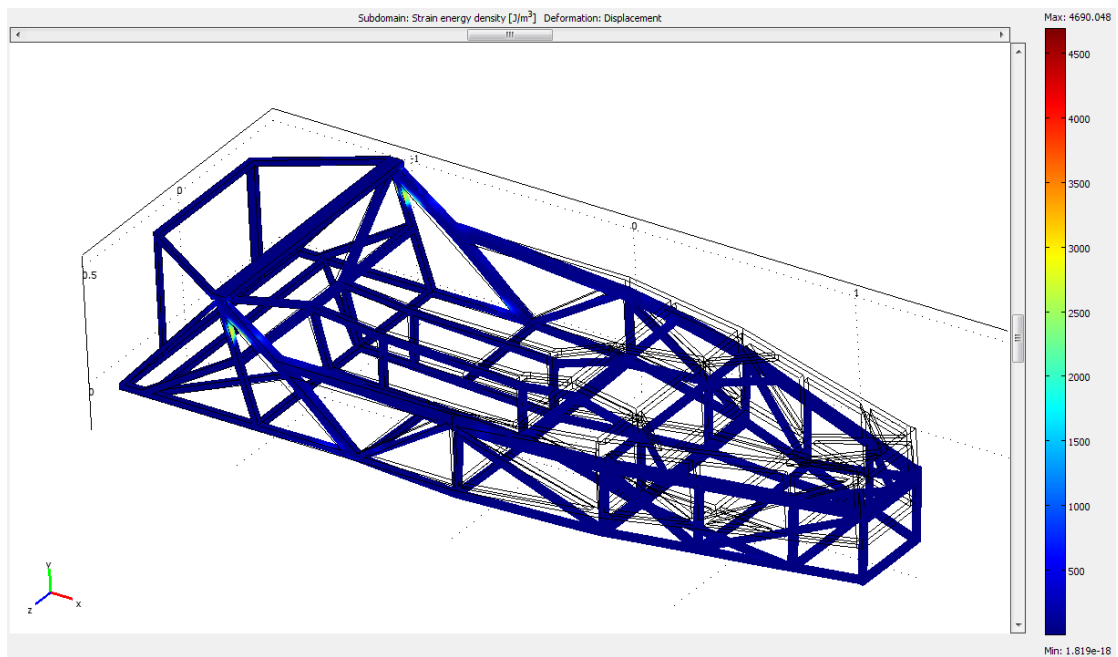
Εικόνα 7.3.7: Μέγιστη μετατόπιση=4.17mm, Ελάχιστη μετατόπιση=3.213 10^{-13} mm



Εικόνα 7.3.8: Μέγιστη μετατόπιση=4.17mm, Ελάχιστη μετατόπιση=3.213 10^{-13} mm



Εικόνα 7.3.9: Μέγιστη μετατόπιση=4.17mm, Ελάχιστη μετατόπιση=3.213 10^{-13} mm



Εικόνα 7.3.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας=4690.048j/m³ ,Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας=1.81910⁻¹⁸ j/m³

Οι εικόνες που έχουμε παρουσιάσει είναι αποτέλεσμα των μοντελοποιήσεων που έχουν περιγραφεί σε άλλο κεφάλαιο. Όπως έχουμε αναφέρει τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Για να έχουμε πρόσβαση στα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν κάθε φορά ακολουθούμε τις παρακάτω οδηγίες.

Ανοίγουμε το μενού Postprocessing-

Plot Parameters-

General-

Plot type-

Στο σημείο αυτό επιλέγουμε Geometry Edges ώστε να φαίνονται οι γραμμές του σασί του αρχικού ενώ παράλληλα επιλέγουμε Deformed Shape ώστε να φαίνεται το παραμορφωμένο σασί ξεκάθαρα και να μπορούμε να δούμε τις διαφορές μεταξύ των δύο σασί μετά την επιβολή των φορτίων που έχουμε επιλέξει.

Το πρόγραμμα μας δίνει δυνατότητες να επιλέξουμε εμφάνιση αποτελεσμάτων εξειδικευμένες όπως το Slice που παρουσιάζει τομές του σασί δείχνοντας μας τις δυνάμεις σε διάφορες τομές που εμείς έχουμε επιλέξει για παράδειγμα.

Αυτό που μας ενδιαφέρει εμάς όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι να παρουσιάσουμε τις δυνάμεις που υπάρχουν πάνω στο σασί(τη διακύμανση τους δηλαδή) χρησιμοποιώντας ολόκληρο το σασί.

Για αυτό το λόγο επιλέγουμε Subdomain που περιέχει όλη τη γεωμετρία που έχουμε και μετά επιλέγουμε Subdomain Plot διαλέγουμε τι θέλουμε να εμφανίσουμε κάθε φορά.

Subdomain-

Subdomain Plot-

Predefined Quantities-

Von mises stress-

Οκ-

Apply

Στην επιλογή Predefined Quantities επιλέξαμε επίσης τα για να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα. Εάν θέλουμε να εμφανίσουμε δυνάμεις η οτιδήποτε άλλο σε μία συγκεκριμένη επιφάνεια η σε σύνολο αυτών τότε μπορούμε να το κάνουμε επιλέγοντας τις επιθυμητές επιφάνειες μαζί.

Το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα είτε αναλύοντας μόνο σημεία η ακμές και σύνολα αυτών. Μπορούμε δηλαδή να επιλέξουμε να βρούμε μετατόπιση σε ένα μόνο σημείο που μας ενδιαφέρει.

Τέλος μία ακόμα δυνατότητα που έχουμε μέσα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι να απομονώσουμε στην απεικόνιση ένα συγκεκριμένο διάστημα καθορισμένης ιδιότητας που εξετάζουμε κάθε φορά. Για παράδειγμα μπορούμε να επιλέξουμε να απεικονίσουμε ένα διάστημα δυνάμεων που επιλέγουμε εμείς εστιάζοντας κάθε φορά μόνος στις τιμές που μας ενδιαφέρουν.

Κεφάλαιο 8

Υπολογισμοί Μοντελοποιήσεων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφέραμε μαθηματικά τον τύπο με τον οποίο υπολογίζουμε την Στρεπτική Ακαμψία.

$$K = \frac{T}{\theta}$$

$$K = \frac{F * L}{\tan^{-1}[\frac{\Delta_{y1} + \Delta_{y2}}{2L}]} \text{ Nm/deg}$$

Όπου K= Στρεπτική Ακαμψία

T= Ροπή

T=F*L

θ= Γωνιώδης μετακίνηση

F= Δύναμη, Φορτίο

Δy1, Δy2=Μετατοπίσεις αριστερής και δεξιά πλευράς.

L=Απόσταση Εφαρμογής Δύναμης από το κέντρο της κάθετης γραμμής που χωρίζει το πλαίσιο στα δύο.

Υπολογισμός Μετατοπίσεων

$$\Delta_{y1}=2.15 \cdot 10^{-3}m$$

$$\Delta_{y2}=2.14 \cdot 10^{-3}m$$

$$MO=2.145 \cdot 10^{-3}m$$

$$\text{Άρα } \Delta_{y1}=\Delta_{y2}=2.145 \cdot 10^{-3}m$$

$$F=2000Nm$$

$$L=0.3m$$

$$K = \frac{2000 * 0,310}{\tan^{-1}[\frac{0,002145 + 0,002145}{2 * 0,300}]} = \frac{600}{0,409} = 1466 \text{ Nm/deg}$$

Αυτή η τιμή αφορά και το μετατρόχιο που έχουμε επιλέξει και επηρεάζει τον αριθμό L οπότε οποιαδήποτε αλλαγή του αλλάζει και την Στρεπτική Ακαμψία μας.

Υπολογισμός Καμπτικής Δυσκαμψίας

Σε παλαιότερο κεφάλαιο έχουμε αναφέρει τον μαθηματικό τύπο που μετράει την Καμπτική Δυσκαμψία[2].

Ο τύπος είναι ο εξής

$$K = \frac{F}{deflection} \left(\frac{N}{m} \right)$$

Όπου:

K=καμπτική Δυσκαμψία

F=Δύναμη

Deflection=Μετατόπιση του σημείου που εφαρμόστηκε η δύναμη.

Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός αναλυτικά.

F=3000N

Deflection=0.123mm

K=3000/0.123=24.390 (N/mm)

Κεφάλαιο 9

Βελτίωση πλαισίου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να βελτιώσουμε το πλαίσιο μας από τι στιγμή που έχουμε υπολογίσει στρεπτική ακαμψία και καμπτική δυσκαμψία.

Είναι γνωστό πως όταν θέλουμε να αυξήσουμε την ακαμψία σε ένα πλαίσιο ειδικότερα στο εμπρός μέρος όταν πρόκειται για αυτοκίνητα με τοποθετημένο τον κινητήρα εμπρός η πρώτη προσθήκη αφορά την τοποθέτηση μιας θολόμπαρας μεταξύ των άκρων της μπροστινής ανάρτησης. Στο δικό μας πλαίσιο η τοποθέτηση θα γίνει αφού καθοριστούν τα μετατρόχια και όλη η γεωμετρία της ανάρτησης μπροστά κάτι το οποίο δεν εξετάζεται στη διπλωματική αυτή.

Η θολόμπαρα δεν είναι τίποτε άλλο από μία μπάρα που γεφυρώνει τους δύο εμπρός θόλους αυξάνοντας την δυσκαμψία του αμαξώματος. Κάτι τέτοιο μπορεί να βελτιώσει ορισμένα οδικά χαρακτηριστικά του αυτοκινήτου αλλά να αλλοιώσει κάποια άλλα. Επίσης, μια μπροστινή θολόμπαρα μπορεί να δημιουργήσει τεράστιο πρόβλημα σε περίπτωση ατυχήματος (ανάλογα με το πώς ακριβώς θα χτυπήσει το αμάξι). Ο λόγος είναι ότι όχι μόνον αλλάζει τελείως τα δεδομένα ελεγχόμενης στρέβλωσης και παραμόρφωσης του αμαξώματος όπως τα έχει υπολογίσει ο κατασκευαστής, αλλά και ότι πρακτικά αν υπάρχει θολόμπαρα ένα απλό στράβωμα που θα μπορούσε να επανέλθει στην καλίμπρα μπορεί να αχρηστέψει ολόκληρο το αυτοκίνητο αφού η οποιαδήποτε παραμόρφωση σε ράμφη κα θόλους θα επηρεάσει και τις δύο πλευρές του. Λύση δίνουν οι αλουμιένιες θολόμπαρας οι οποίες θεωρητικά «σπάνε» στην περίπτωση βίαιης παραμόρφωσης.

Η θολόμπαρα είναι μία λύση σχετικά φθηνή και αποτελεί το πρώτο πράγμα που προστίθεται σε ένα αμάξι για αύξηση της ακαμψίας όταν ήδη ένα πλαίσιο έχει μεγιστοποιηθεί σε ακαμψία από το εργοστάσιο. Στα επιβατικά αυτοκίνητα συναντάται μόνο σε αμάξια επιδόσεων ενώ στο δικό μας πλαίσιο που αφορά αυτοκίνητο πίστας είναι μια βασική προσθήκη.



Εικόνα 9.1: θολόμπαρα

Επίσης ένας τρόπος να βελτιώσουμε την ακαμψία είναι να αλλάξουμε τα δικτυώματα που υπάρχουν στη κατασκευή μας κάνοντας τα πιο πυκνά προσθέτοντας έτσι παραπάνω υλικό η και αφαιρώντας κάνοντας αναδιαμόρφωση. Στη δική μας περίπτωση τα πλευρικά δικτυώματα είναι ικανοποιητικά αφού πριν το σχέδιο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο είχαν ακολουθήσει και άλλα και η πύκνωση των δικτυωμάτων έγινε σταδιακά.

Στο εμπρός μέρος θα προστεθεί μία ράβδος που θα ενώνει το τετράγωνο που δημιουργεί το πάνω υποπλαίσιο με το κάτω. Ουσιαστικά δημιουργούμε ακόμα ένα δικτύωμα που αποδεδειγμένα έχει θετικά αποτελέσματα στη βελτίωση της κατασκευής μας ως προς τα στοιχεία που εμείς μελετάμε. Επίσης θα τοποθετηθεί μία μπάρα που θα ενώσει την αριστερή με τη δεξιά πλευρά εκεί που ακριβώς που υπάρχουν δύο τρίγωνα, ένα σε κάθε πλευρά.

Τέλος πρέπει να αναφέρουμε πως για το εμπρός μέρος που αφορά τον κινητήρα δε θα γίνει καμία τροποποίηση όσον αφορά το κάτω πλαίσιο που είναι και το πιο σημαντικό αφού στο κάτω μέρος στηρίζεται ο κινητήρας. Στα αυτοκίνητα τύπου Locost σαν το δικό μας ο κινητήρας είναι αυτός που καθορίζει εάν και τι αλλαγές θα γίνουν στις δοκούς που βρίσκονται κάτω από τον κινητήρα. Οπότε οποιαδήποτε τροποποίηση γίνεται εύκολα όταν γνωρίζουμε ακριβώς τον κινητήρα που θα τοποθετηθεί.

Στο δικό μας σχέδιο έχουμε ακολουθήσει τη βασική διαστασιολόγηση που μπορεί να υποδεχτεί πολλούς διαφορετικούς κινητήρες ενώ το ίδιο ισχύει και για το τούνελ μετάδοσης που θα υποδεχτεί το κιβώτιο ταχυτήτων. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφέρουμε πως ανάλογα με τον κινητήρα που διαλέγουμε επιλέγουμε και κιβώτιο ταχυτήτων που συνεργάζεται με αυτό τον κινητήρα όπως και τα υπόλοιπα

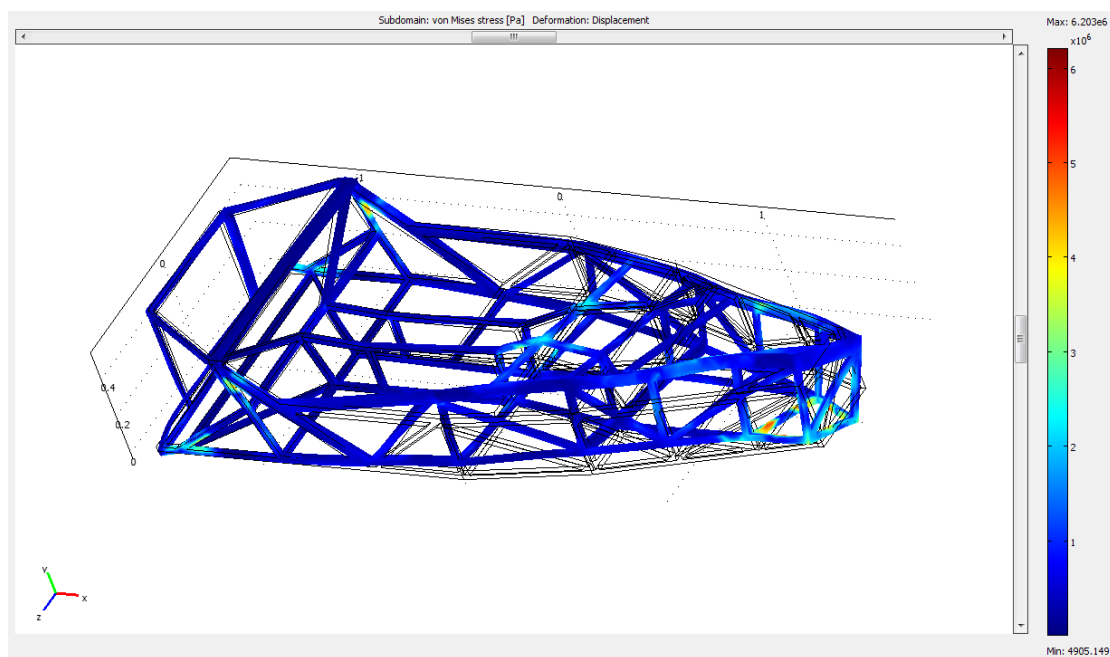
ηλεκτρονικά που συνοδεύουν ένα κινητήρα και ονομάζεται πλεξούδα. Τα αυτοκίνητα σαν το δικό μας λόγω του σχεδίου τους είναι εύκολο να τοποθετήσεις ουσιαστικά ότι κινητήρα θέλεις βρίσκοντας τον κατάλληλο δότη και η επιλογή έγκειται καθαρά στην επιθυμία του κατασκευαστή. Δεν πρέπει να ξεχνάμε όμως ότι κάθε επιλογή σε κινητήρα επηρεάζει διαφορετικά την κατανομή βάρους μπροστά αλλά και συνολικά οπότε κάθε επιλογή που γίνεται πρέπει να λάβει υπόψη πολλές παραμέτρους πριν ξεκινήσει τη σχεδίαση του σασί για το εμπρός μέρος αφού αυτό είναι το σημαντικότερο μέρος που επηρεάζει τη σχεδίαση του υπόλοιπου πλαισίου.

Το πίσω μέρος δεν έχει δεχτεί καμία αλλαγή αφού το πίσω μέρος είναι ο χώρος που μετέχει λιγότερο στην ακαμψία και εκεί βρίσκεται ο χώρος αποσκευών οπότε οποιαδήποτε τροποποίηση για περαιτέρω βελτίωση ακαμψίας του πίσω μέρους γίνεται εύκολα όταν οι απατήσεις μας αυξάνονται. Ο τρόπος να γίνει είναι πολύ εύκολος χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του X Bracing.

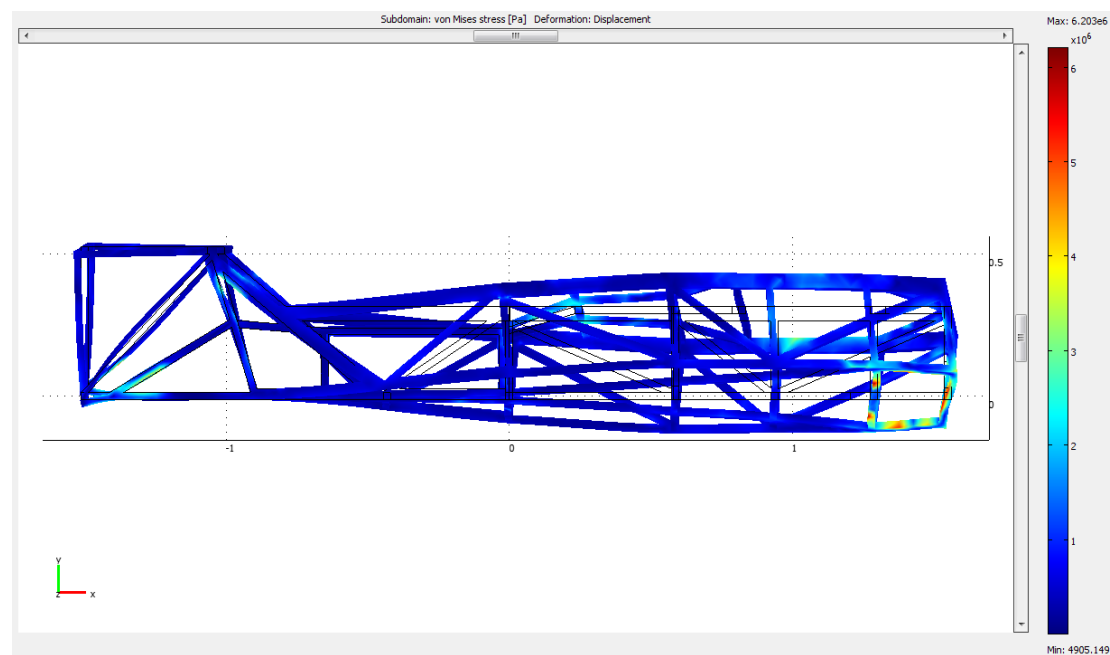
Κεφάλαιο 10

Αποτελέσματα Μοντελοποιήσεων βελτιωμένου πλαισίου (πλαίσιο 2).

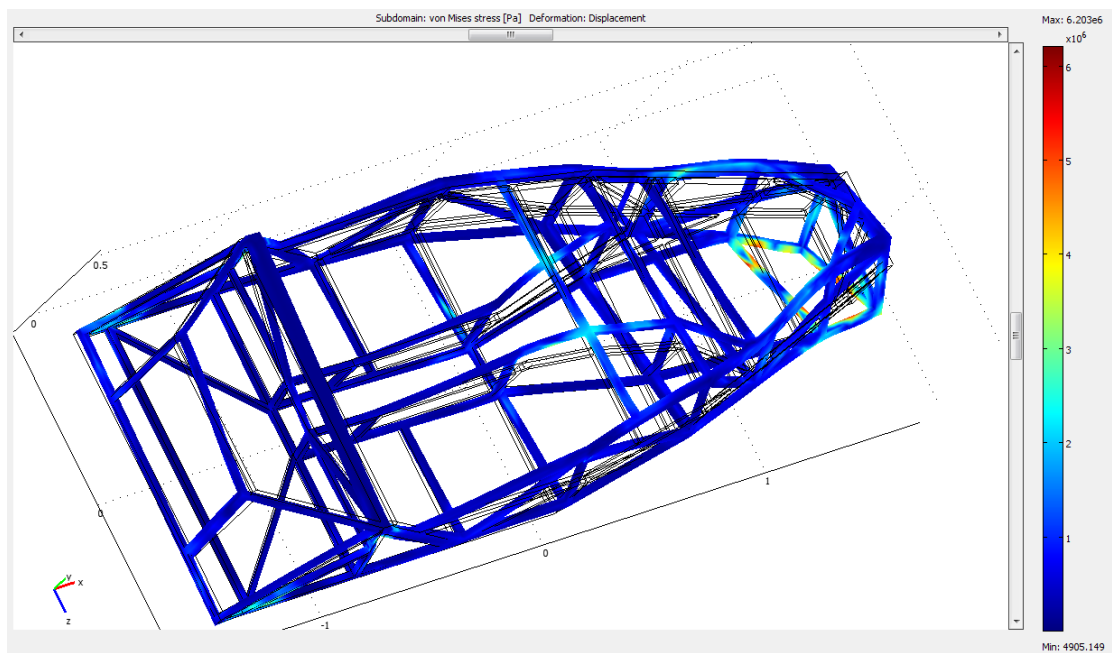
10.1 Αποτελέσματα Στρεπτικής Ακαμψίας



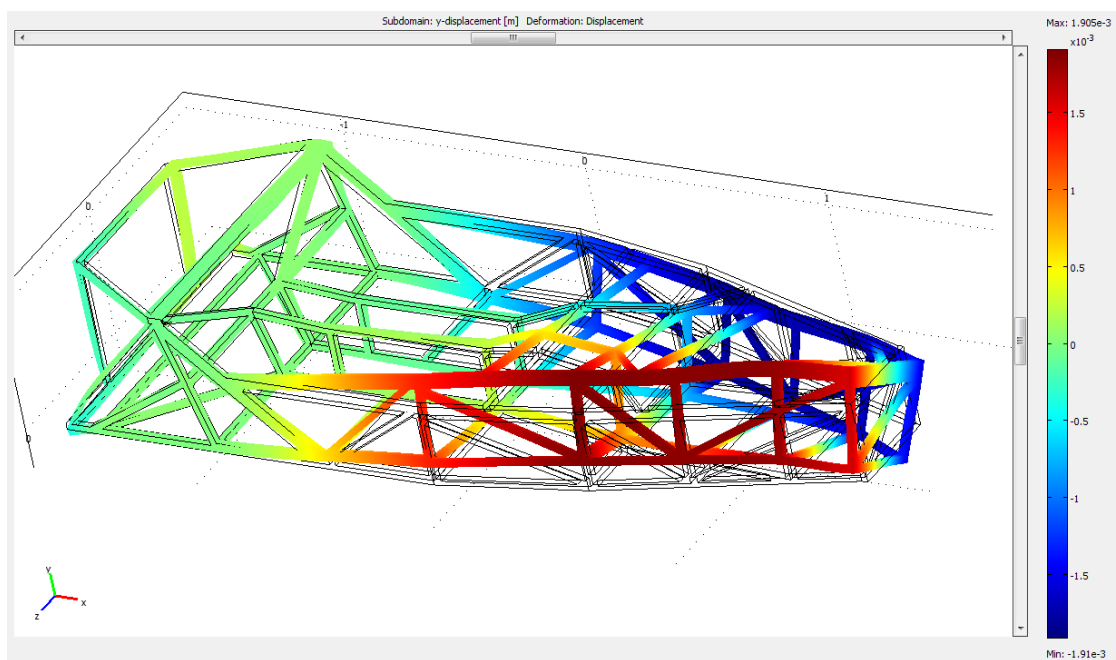
Εικόνα 10.1.1: Μέγιστη καταπόνηση = $6.203 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 4905.149 Pa



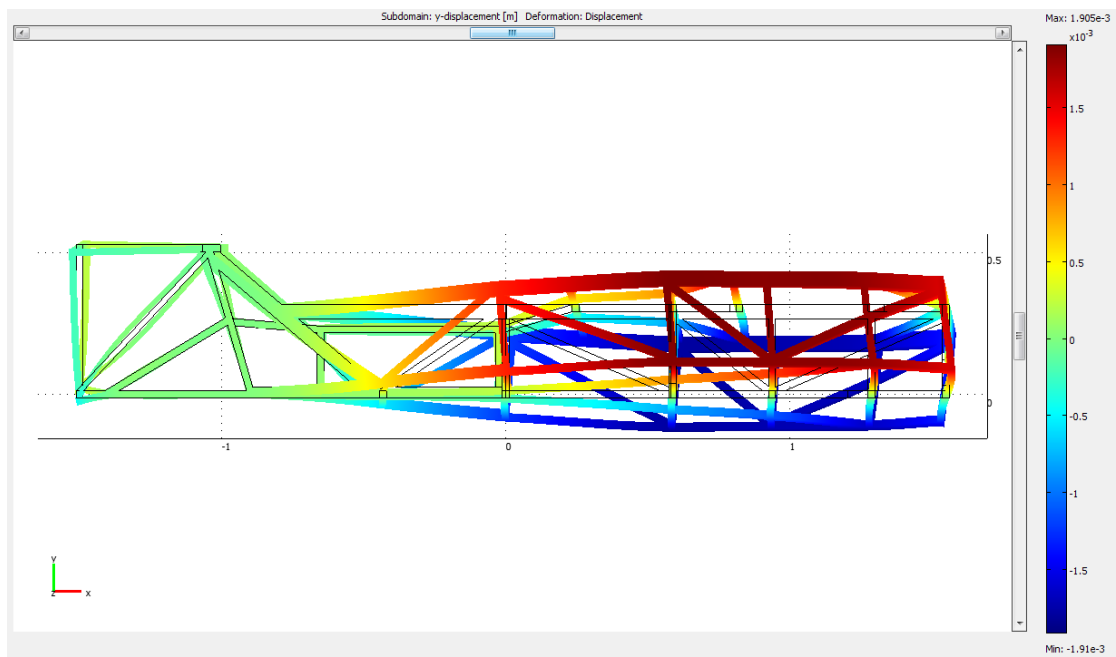
Εικόνα 10.1.2: Μέγιστη καταπόνηση = $6.203 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 4905.149 Pa



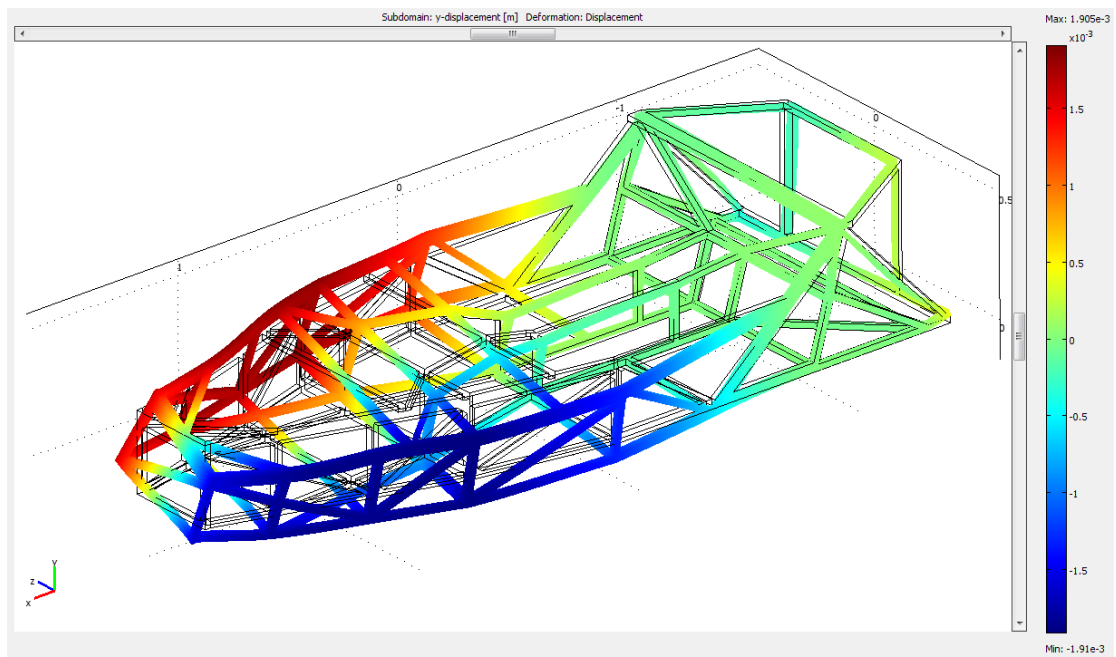
Εικόνα 10.1.3: Μέγιστη καταπόνηση = $6.203 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 4905.149 Pa



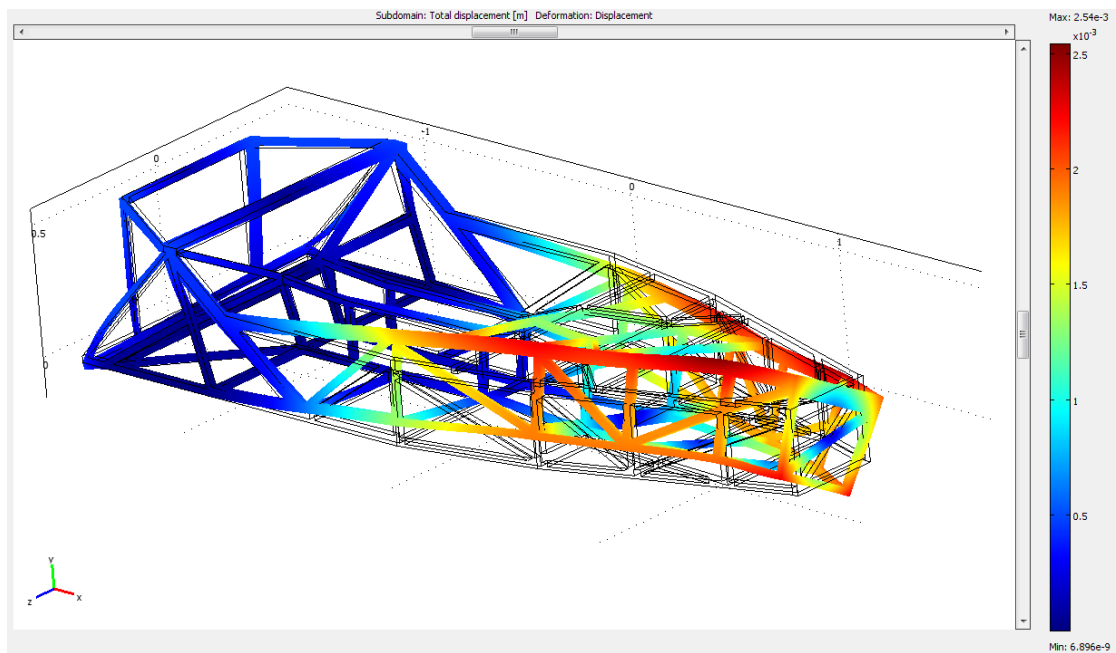
Εικόνα 10.1.4: Μέγιστη μετατόπιση = $1.905 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, Ελάχιστη μετατόπιση = $1.91 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



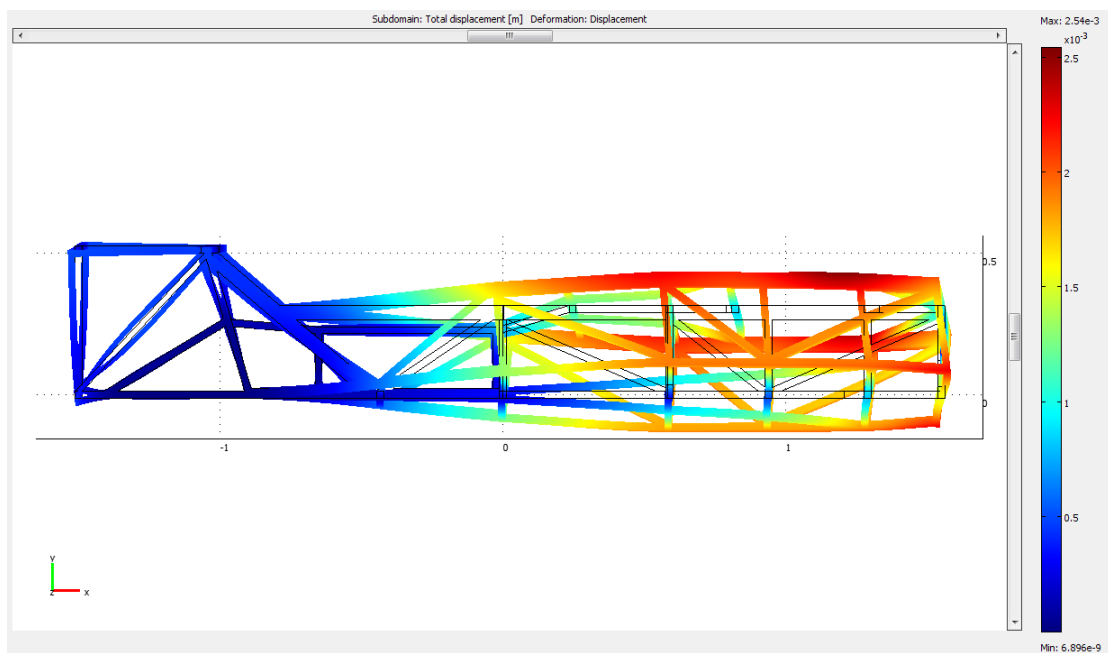
Εικόνα 10.1.5: Μέγιστη μετατόπιση = $1.905 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση = $1.91 \cdot 10^{-3} \text{m}$



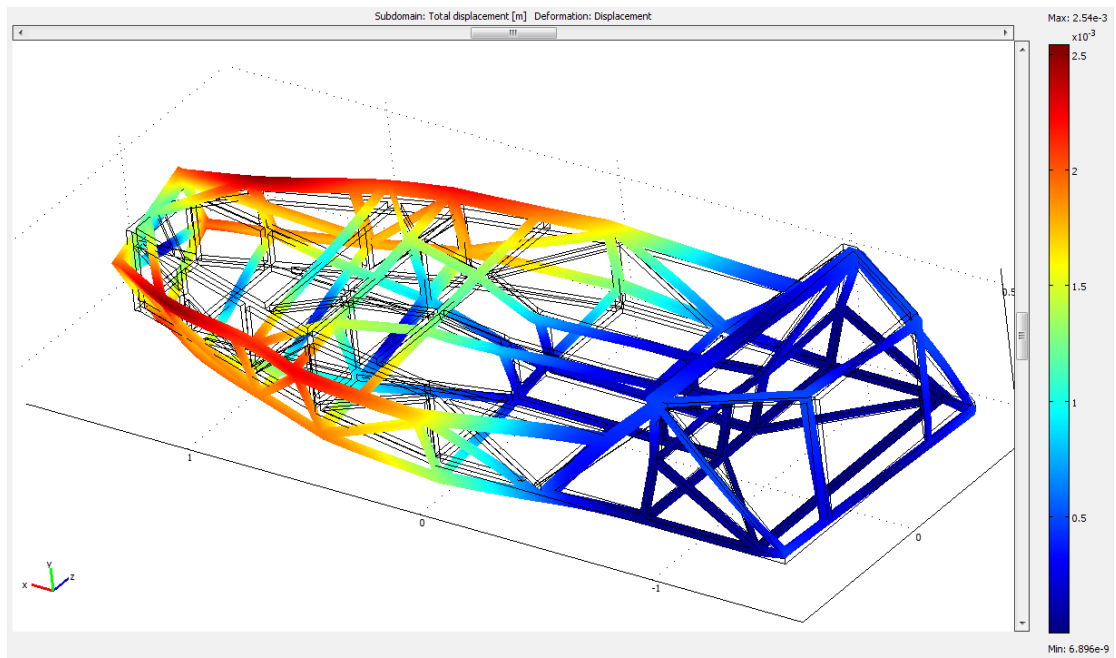
Εικόνα 10.1.6: Μέγιστη μετατόπιση = $1.905 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση = $1.91 \cdot 10^{-3} \text{m}$



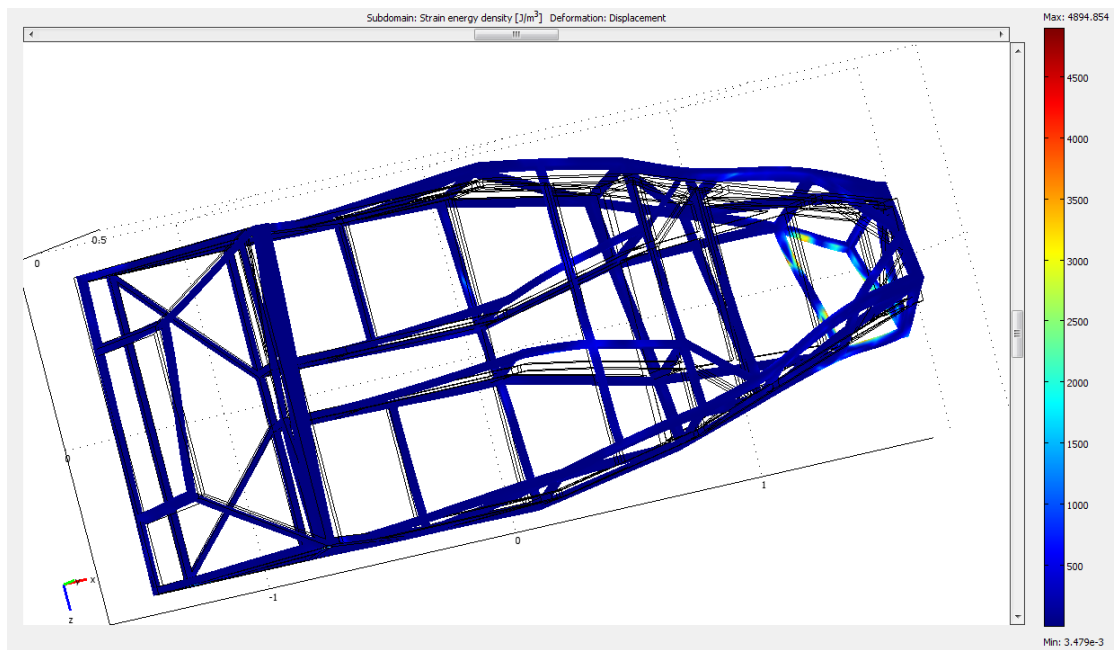
Εικόνα 10.1.7: Μέγιστη μετατόπιση= $2.54 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $6.896 \cdot 10^{-9} \text{m}$



Εικόνα 10.1.8: Μέγιστη μετατόπιση= $2.54 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $6.896 \cdot 10^{-9} \text{m}$

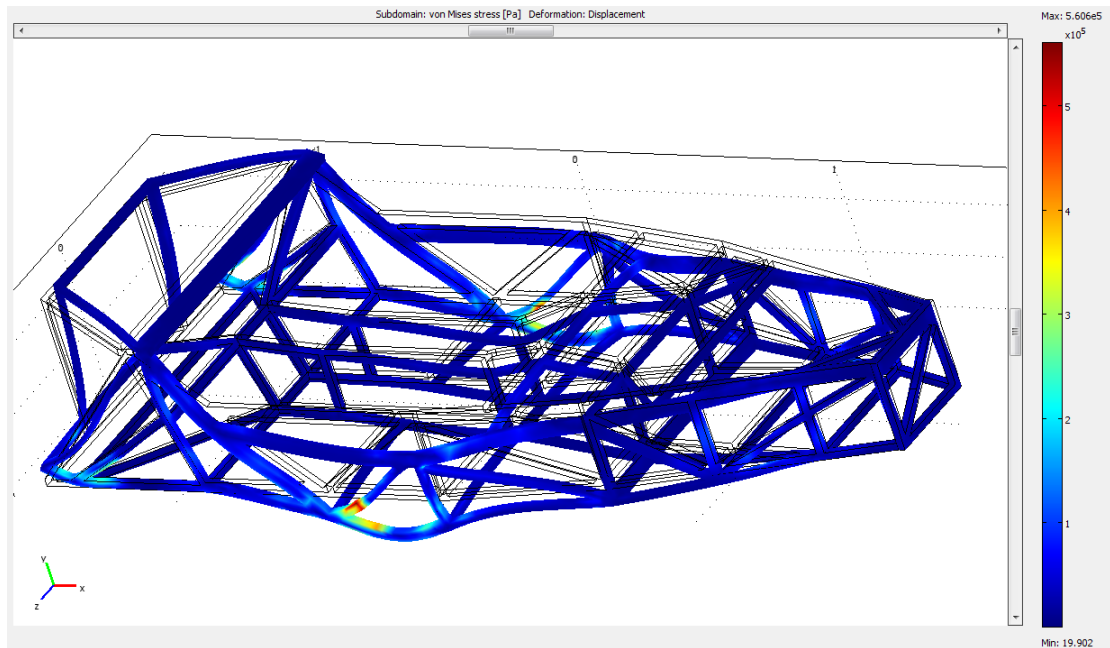


Εικόνα 10.1.9: Μέγιστη μετατόπιση= $2.54 \cdot 10^{-3} \text{m}$, Ελάχιστη μετατόπιση= $6.896 \cdot 10^{-9} \text{m}$

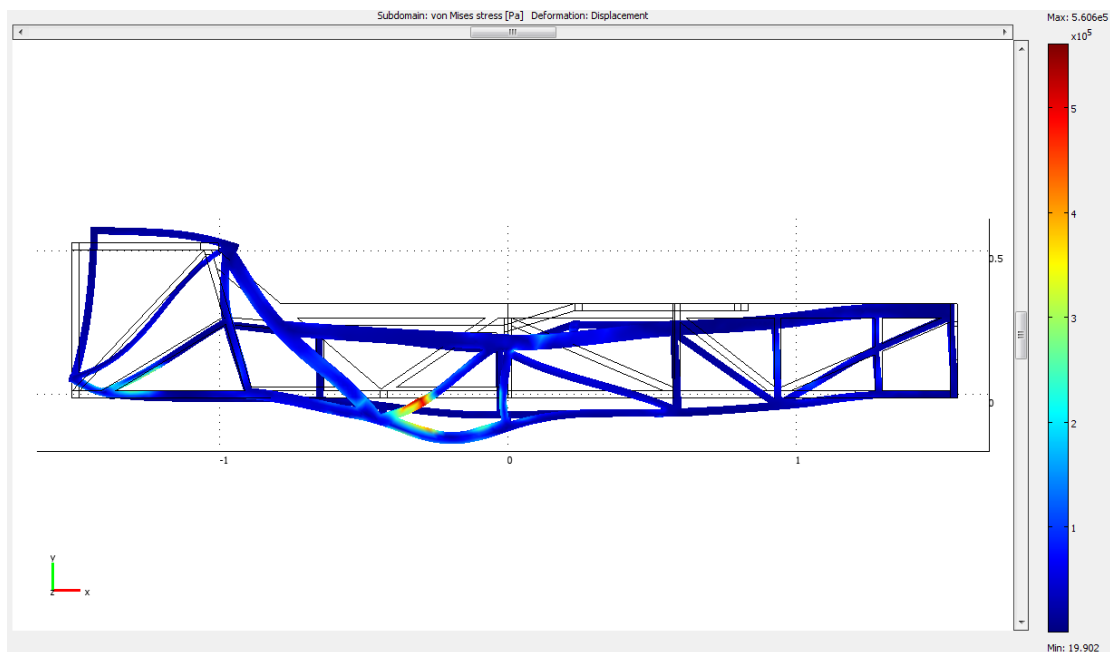


Εικόνα 10.1.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας= 4894.854J/m^3 , Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας= $3.479 \cdot 10^{-3} \text{J/m}^3$

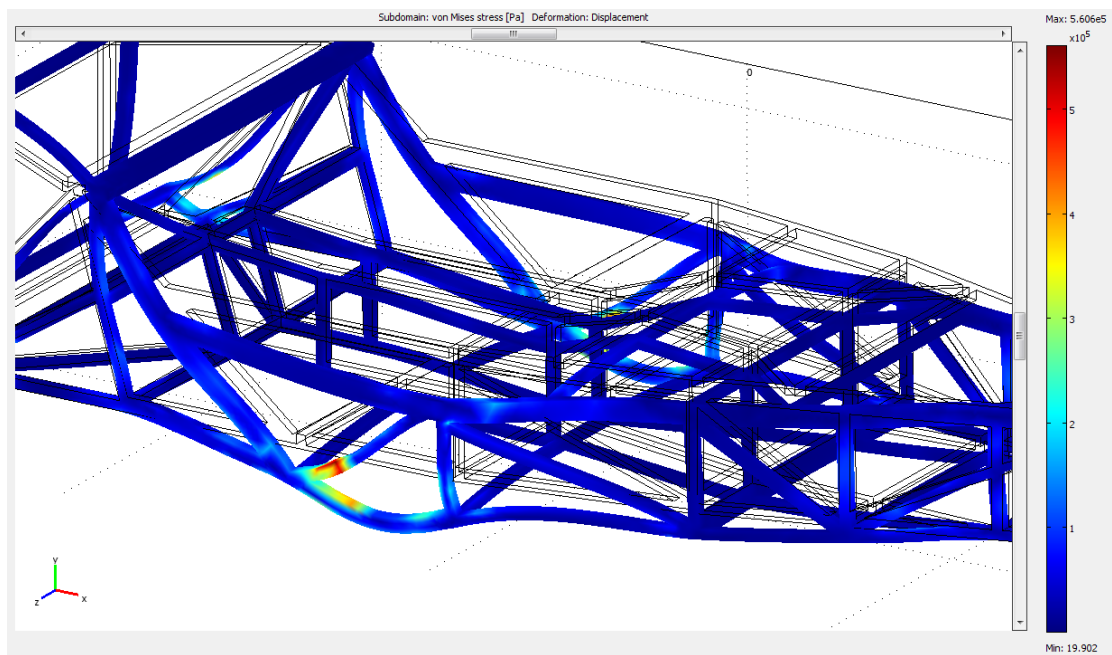
10.2 Αποτελέσματα Καμπτικής Δυσκαμψίας



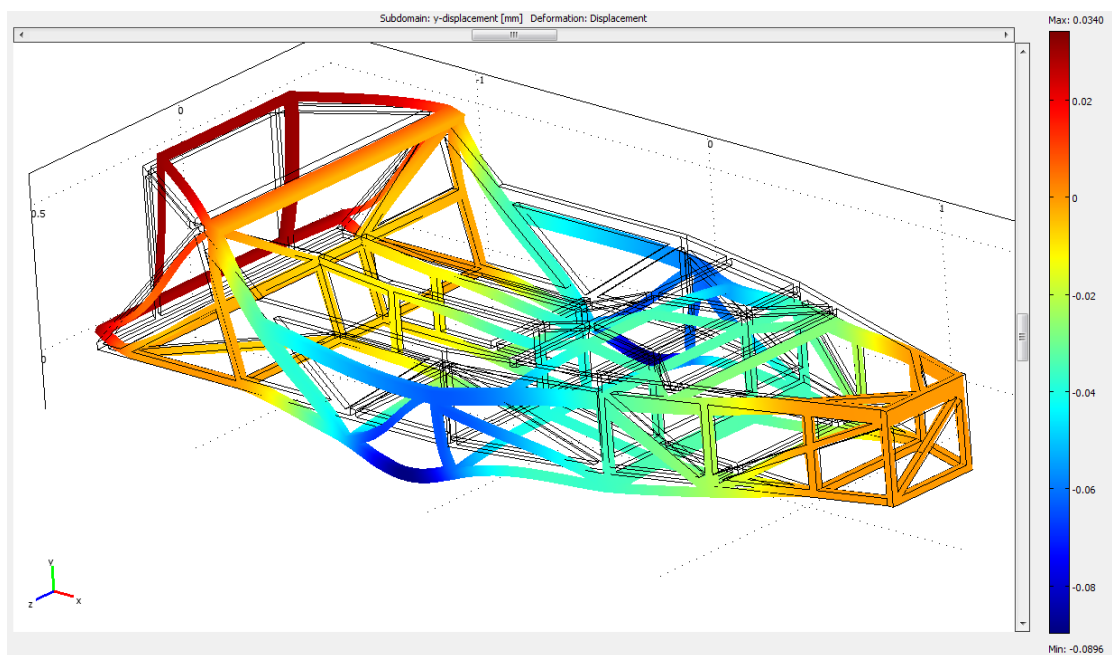
Εικόνα 10.2.1: Μέγιστη καταπόνηση = $5.606 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 19.902 Pa



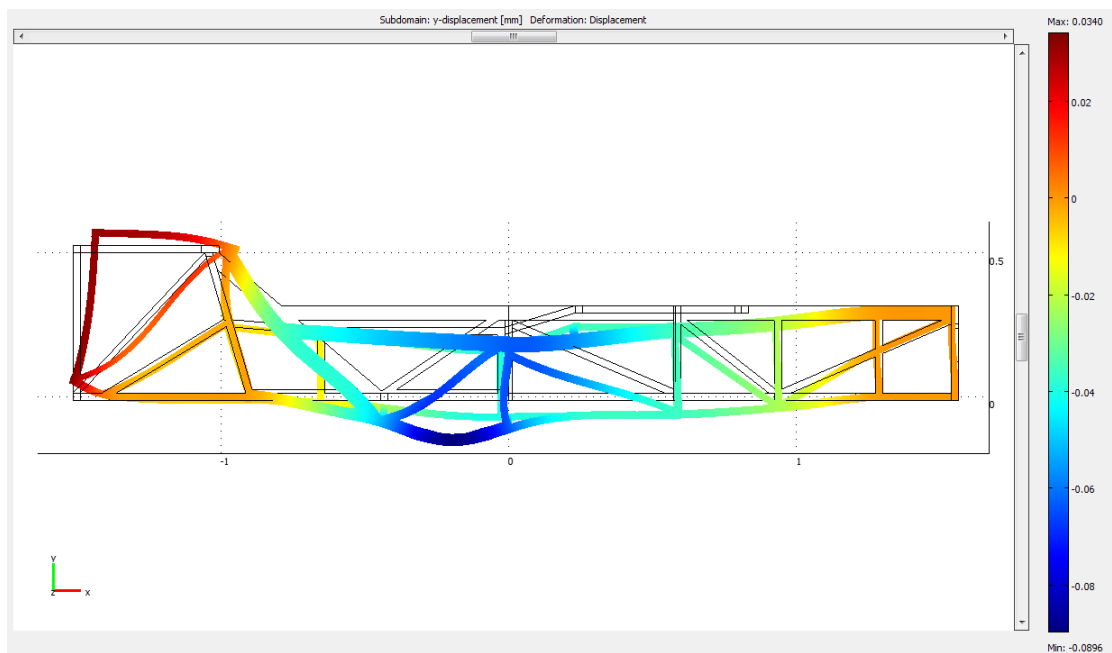
Εικόνα 10.2.2: Μέγιστη καταπόνηση = $5.606 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 19.902 Pa



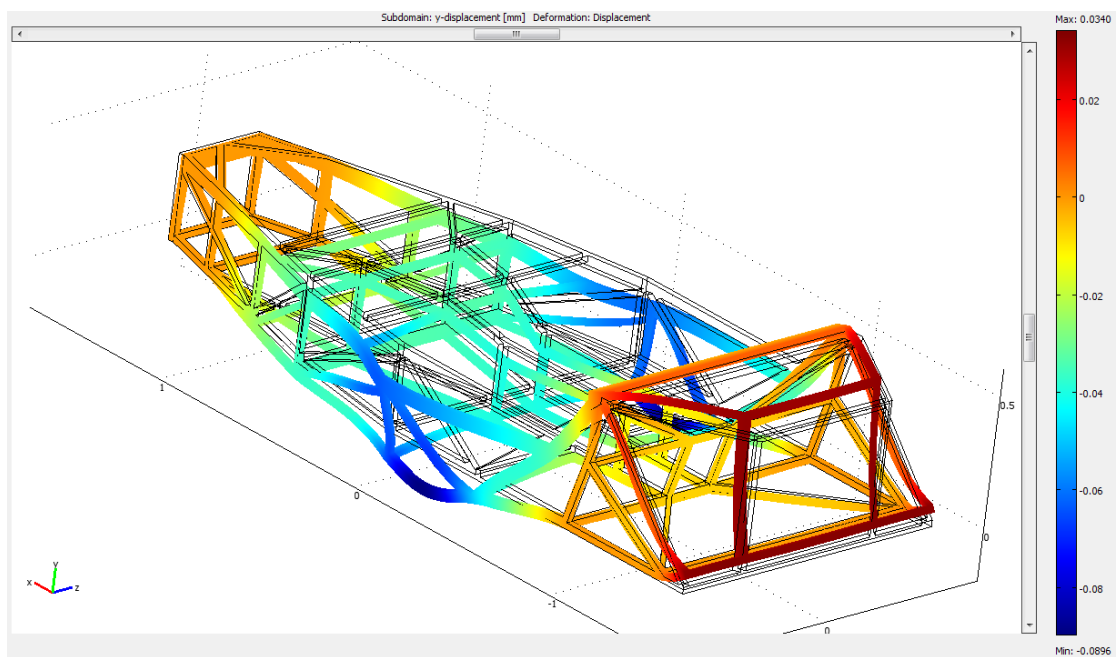
Εικόνα 10.2.3: Μέγιστη καταπόνηση = $5.606 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση = 19.902 Pa



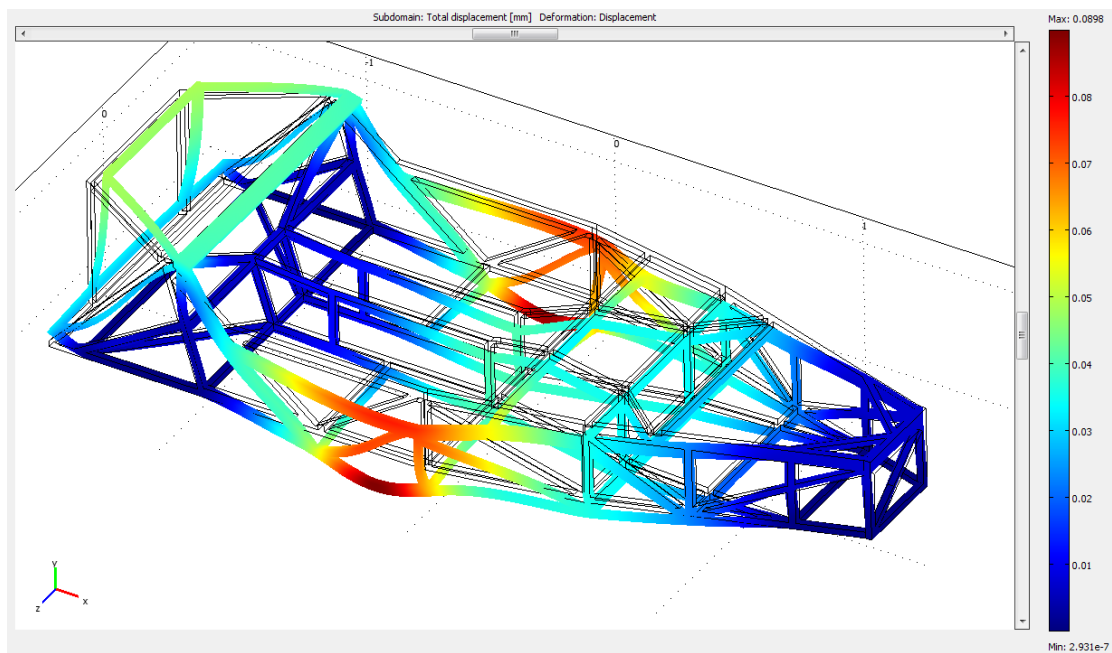
Εικόνα 10.2.4: Μέγιστη μετατόπιση = 0.0340 mm , Ελάχιστη μετατόπιση = 0.0896 mm



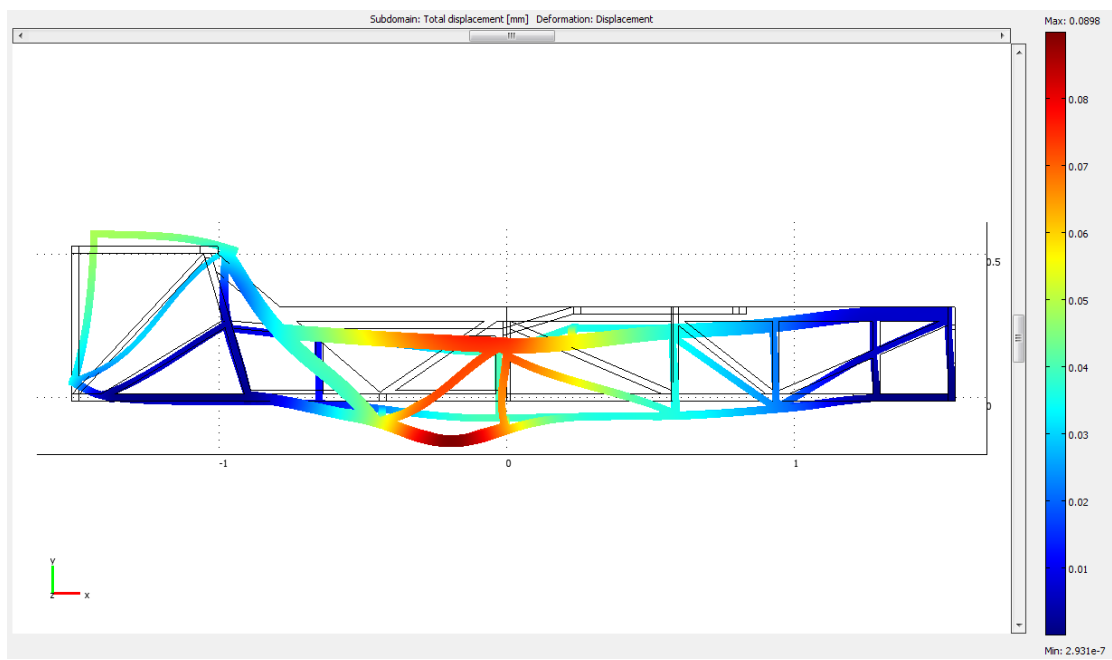
Εικόνα 10.2.5: Μέγιστη μετατόπιση=0.0340mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-0.0896mm



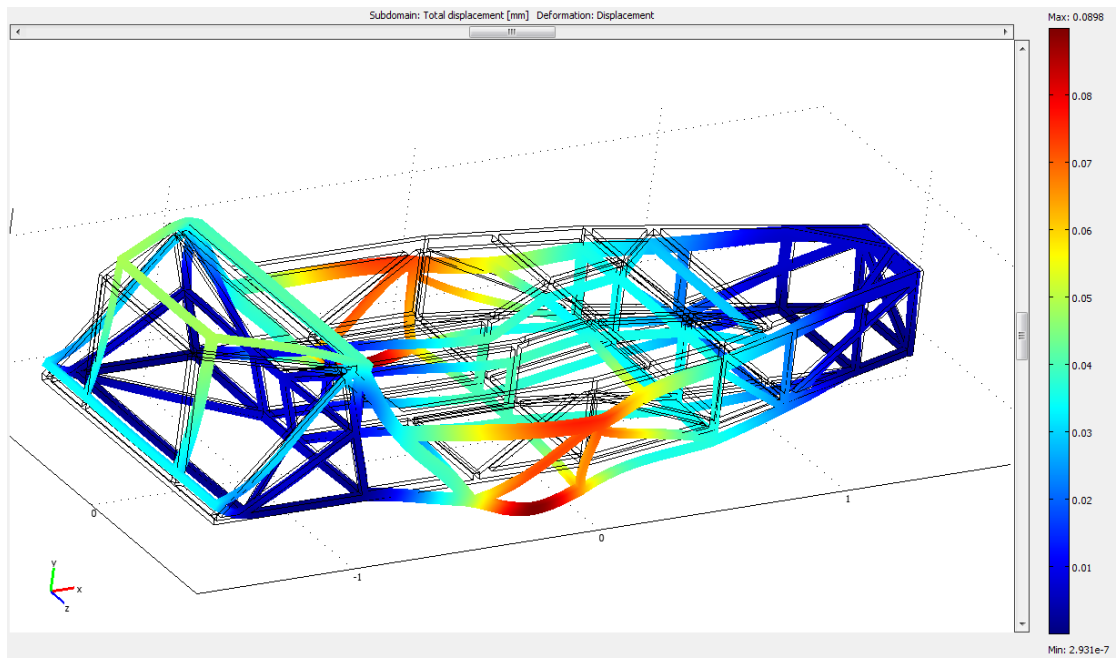
Εικόνα 10.2.6: Μέγιστη μετατόπιση=0.0340mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-0.0896mm



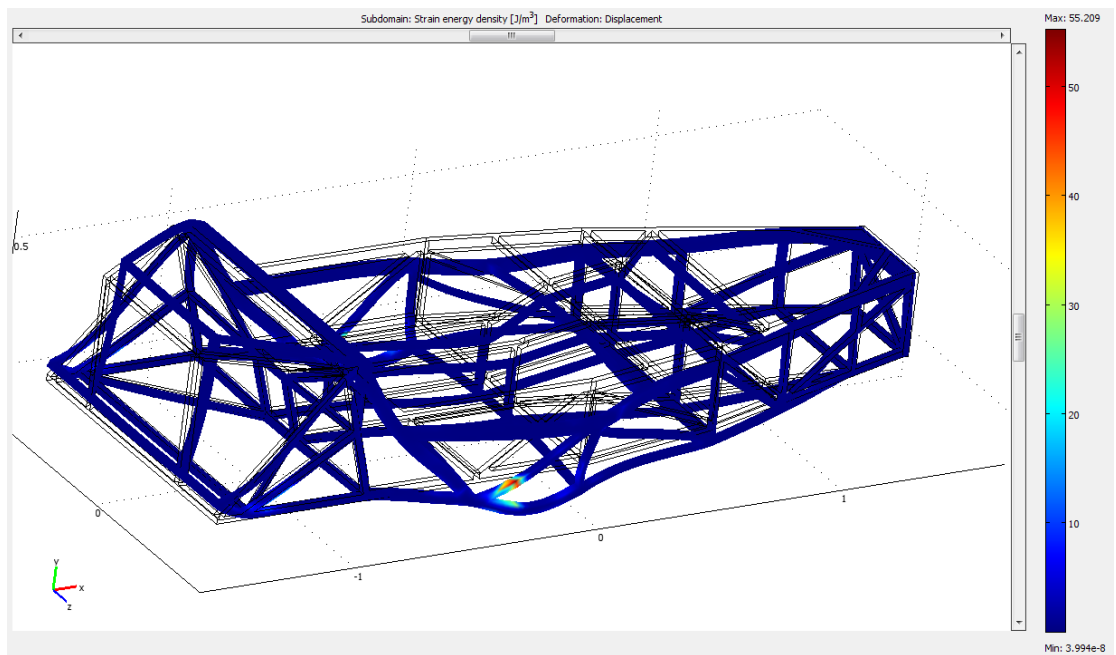
Εικόνα 10.2.7: Μέγιστη μετατόπιση=0.0898mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.931 10⁻⁷mm



Εικόνα 10.2.8: Μέγιστη μετατόπιση=0.0898mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.931 10⁻⁷mm

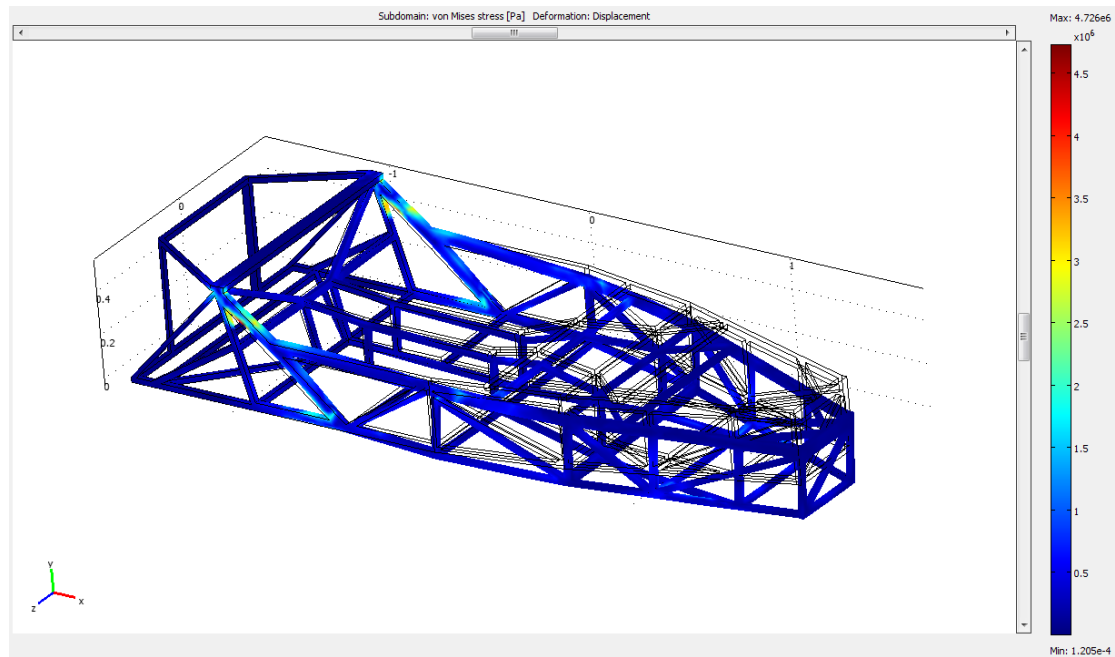


Εικόνα 10.2.9: Μέγιστη μετατόπιση=0.0898mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.931 10^{-7} mm

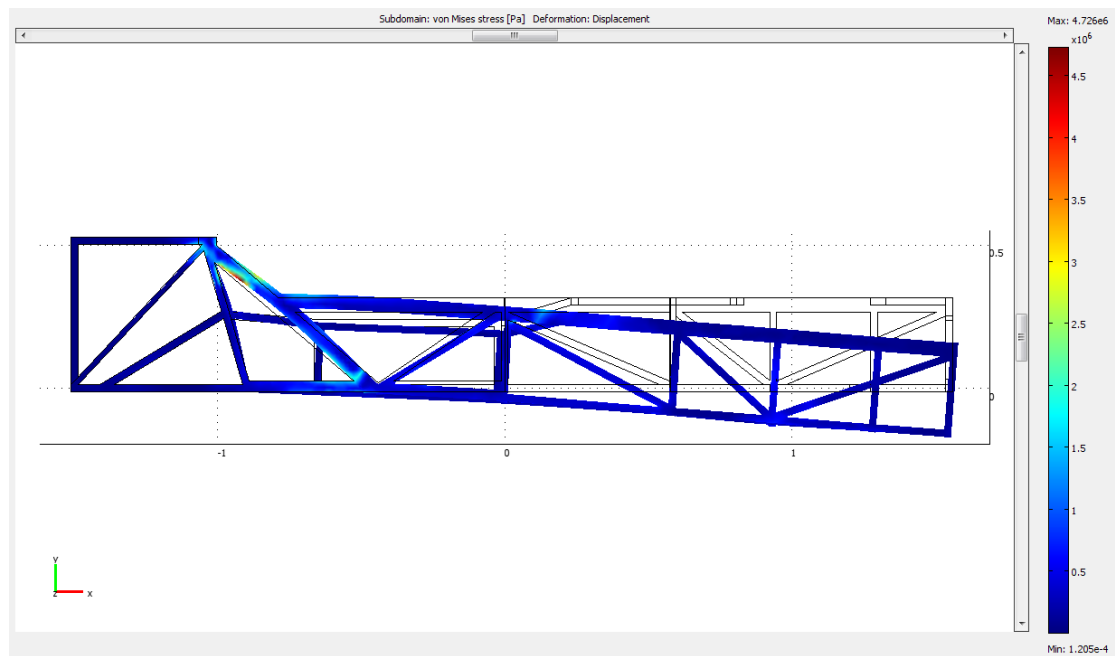


Εικόνα 10.2.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας=55.209j/m³ ,Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας=3.994 10^{-8} j/m³

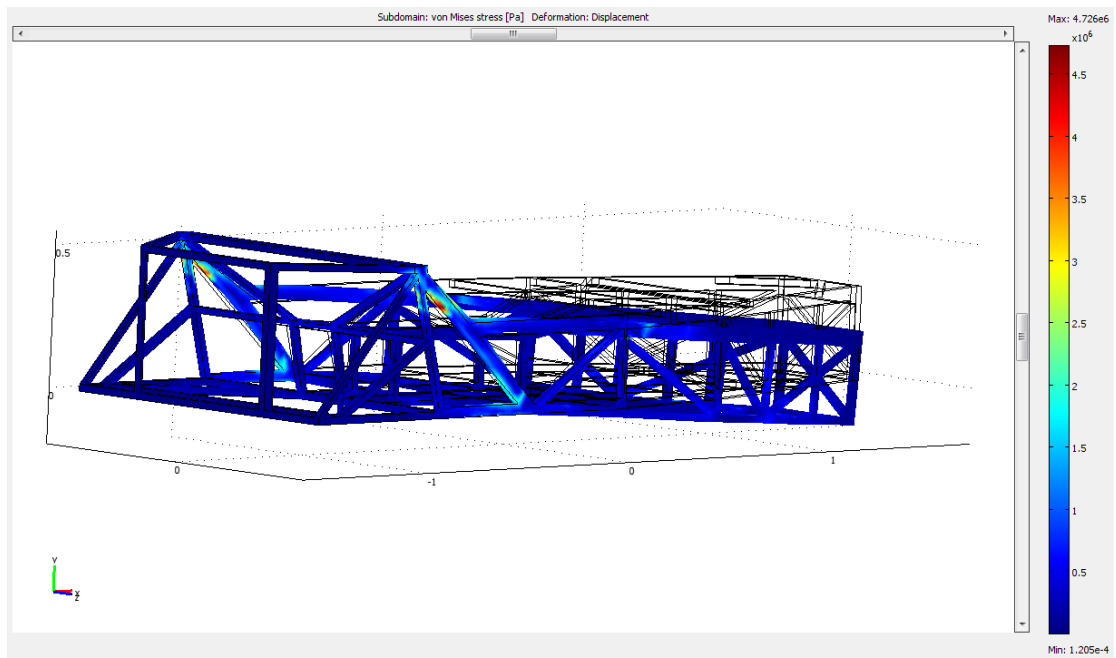
10.3 Αποτελέσματα Στατικής Διάτμησης



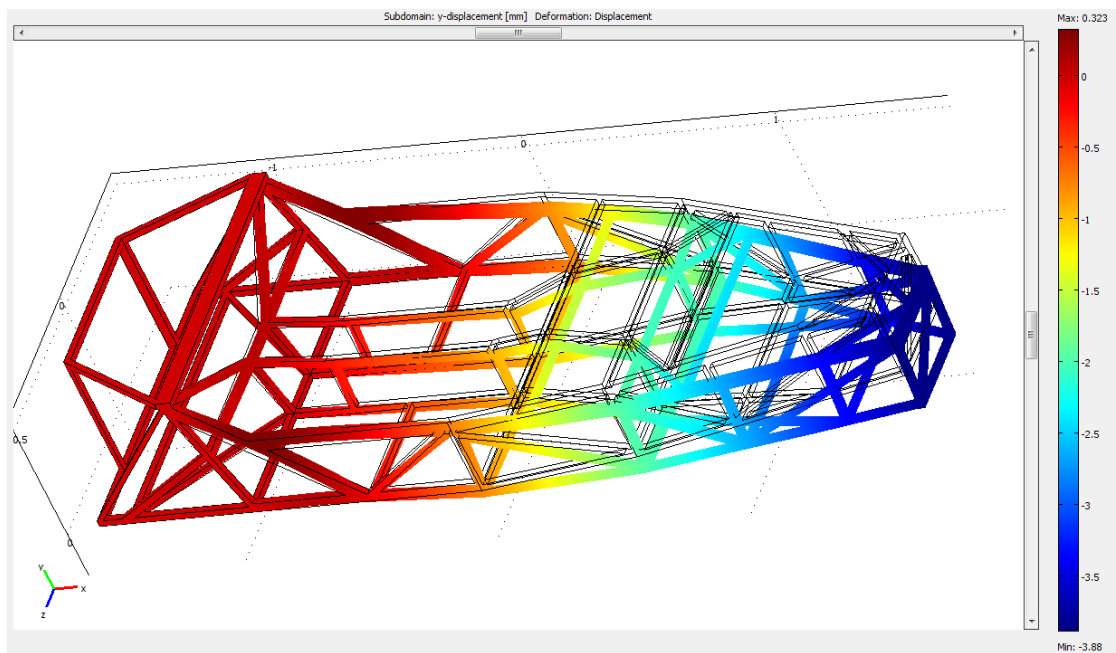
Εικόνα 10.3.1: Μέγιστη καταπόνηση= $4.726 \times 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.205 \times 10^{-4} \text{ Pa}$



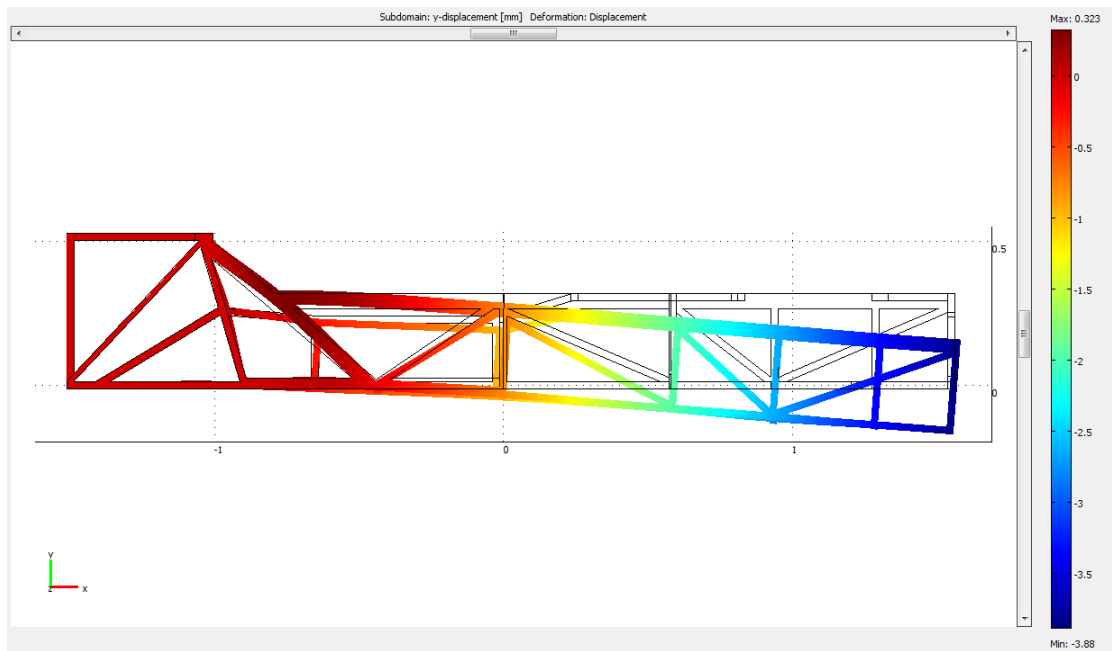
Εικόνα 10.3.2: Μέγιστη καταπόνηση= $4.726 \times 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.205 \times 10^{-4} \text{ Pa}$



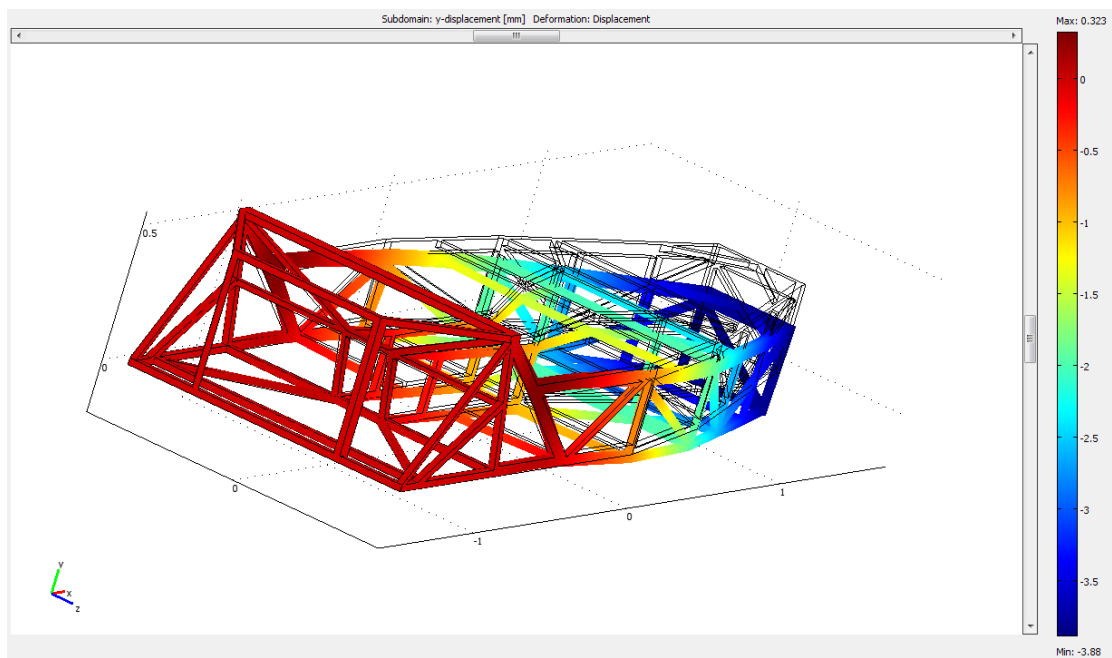
Εικόνα 10.3.3: Μέγιστη καταπόνηση= $4.726 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, Ελάχιστη καταπόνηση= $1.205 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$



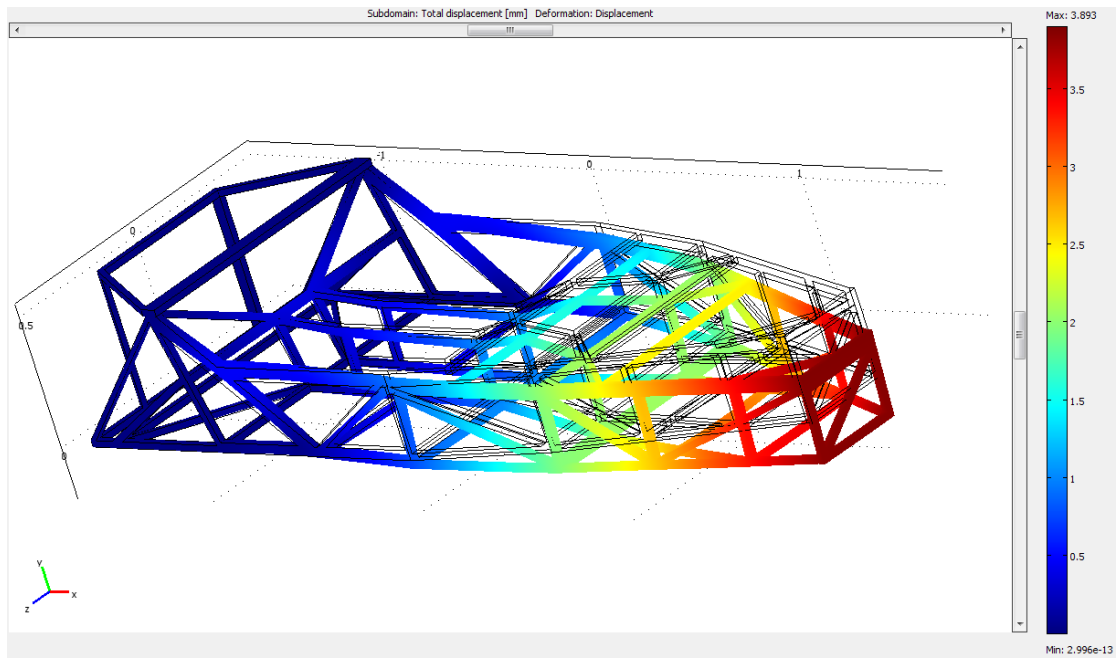
Εικόνα 10.3.4: Μέγιστη μετατόπιση= 0.323 mm , Ελάχιστη μετατόπιση= -3.88 mm



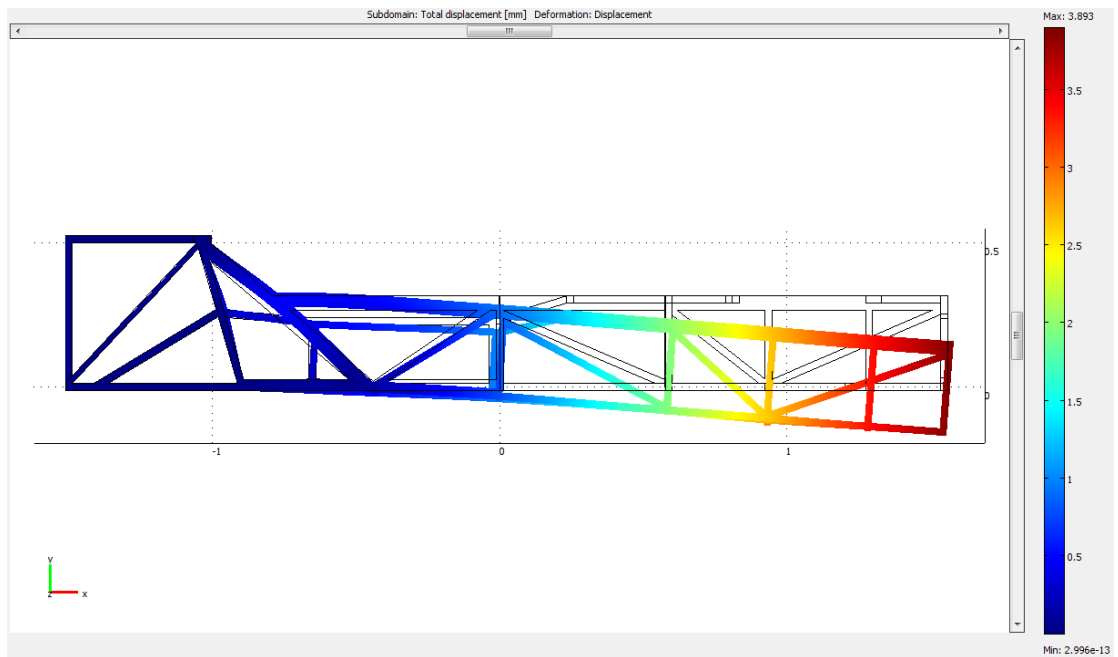
Εικόνα 10.3.5 : Μέγιστη μετατόπιση=0.323mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-3.88mm



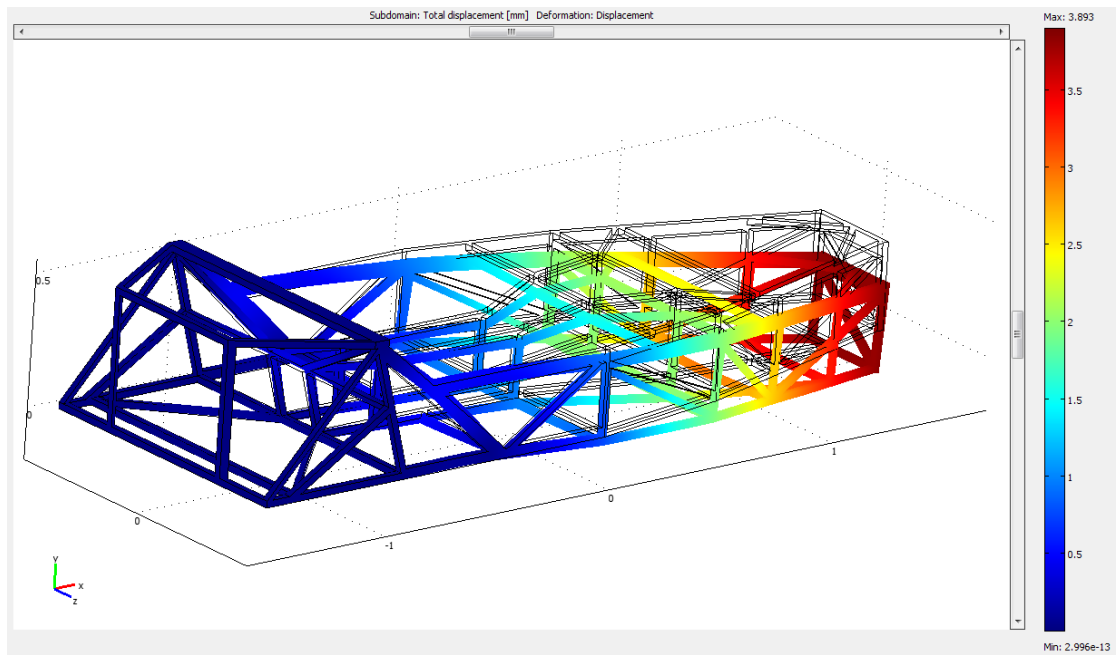
Εικόνα 10.3.6: Μέγιστη μετατόπιση=0.323mm, Ελάχιστη μετατόπιση=-3.88mm



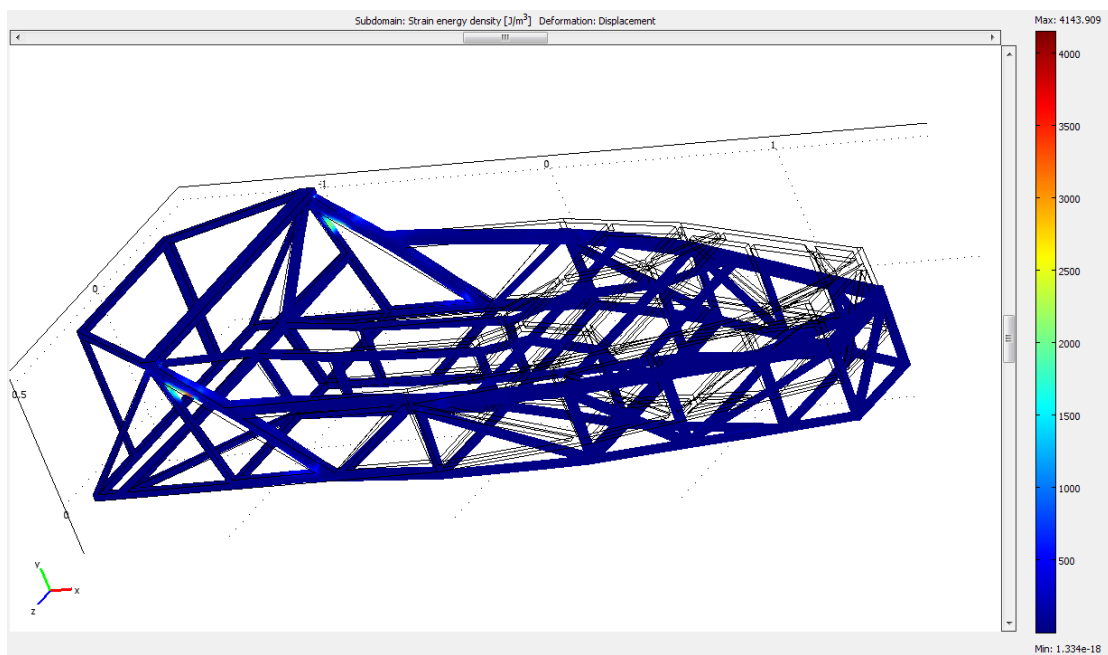
Εικόνα 10.3.7: Μέγιστη μετατόπιση=3.893mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.996 10^{-13} mm



Εικόνα 10.3.8: Μέγιστη μετατόπιση=3.893mm, Ελάχιστη μετατόπιση=2.996 10^{-13} mm



Εικόνα 10.3.9: Μέγιστη μετατόπιση=3.893mm, Ελάχιστη μετατόπιση= $2.996 \cdot 10^{-13}$ mm



Εικόνα 10.10.10: Μέγιστη πυκνότητα ενέργειας=4143.909j/m³ ,Ελάχιστη πυκνότητα ενέργειας= $1.334 \cdot 10^{-18}$ j/m³

Κεφάλαιο 11

Υπολογισμός Στρεπτικής Ακαμψίας Πλαίσιο 2

$$\Delta_{Y1}=1.90 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta_{Y2}=1.91 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$MO=1.905 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Άρα } \Delta_{Y1}=\Delta_{Y2}=1.905 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$F=2000 \text{ Nm}$$

$$L=0.3 \text{ m}$$

$$K = \frac{2000 * 0,310}{\tan^{-1}\left[\frac{0,001905 + 0,001905}{2 * 0,300}\right]} = \frac{600}{0,363} = 1652 \text{ Nm/deg}$$

Αυτή η τιμή αφορά και το μετατρόχιο που έχουμε επιλέξει και επηρεάζει τον αριθμό L οπότε οποιαδήποτε αλλαγή του αλλάζει και την *στρεπτική ακαμψία* μας.

Υπολογισμός Καμπτικής Δυσκαμψίας

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε αναφέρει τον μαθηματικό τύπο που μετράει την *καπτική δυσκαμψία*.

Ο τύπος είναι ο εξής

$$K = \frac{F}{\text{deflection}} \left(\frac{N}{m} \right)$$

Όπου K= Καμπτική Δυσκαμψία

F=Δύναμη

Deflection=Μετατόπιση του σημείου που εφαρμόστηκε η δύναμη.

Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός αναλυτικά.

$$F=3000 \text{ N}$$

$$\text{Deflection}=0.0896 \text{ mm}$$

$$K=3000/0.0896=33.482 \text{ (N/mm)}$$

Κεφάλαιο 12

Συμπεράσματα

Πίνακας Σύγκρισης Αποτελεσμάτων			
	Πλαίσιο 1	Πλαίσιο 2	Μεταβολές (Αυξήσεις- Μειώσεις)
Στρεπτική Ακαμψία	1466 Nm/degree	1652 Nm/degree	12% Αύξηση
Καμπτική Δυσκαμψία	24.390 N/mm	33.482 N/mm	37% Αύξηση
Στατική Ανάλυση Διάτμησης	4.170 mm	3.893 mm	6% Μείωση
Βάρος	70kg	72kg	2% Αύξηση

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι με τις στρατηγικές επιλογές που κάναμε στην τοποθέτηση επιπλέον υλικού είχαν ως αποτέλεσμα να αυξήσουμε την στρεπτική μας ακαμψία κατά 12% ,νούμερο αρκετά ικανοποιητικό αφού ήδη η βάση για το *πλαίσιο 1* ήταν αρκετά καλή.

Μπορούμε επίσης να παρατηρήσουμε ότι για τον ίδιο λόγο η καμπτική δυσκαμψία αυξήθηκε θεαματικά σε σχέση με το *πλαίσιο 1* αφού όντως η μέγιστη μετατόπιση ήταν πολύ μικρότερη στο *πλαίσιο 2*.

Τέλος στη στατική ανάλυση διάτμησης παρατηρούμε ξανά μικρότερη μετατόπιση στο *πλαίσιο 2* άρα και βελτίωση στη κατασκευή μας ενώ το βάρος αυξήθηκε αφού προσθέσαμε επιπλέον υλικό αλλά χωρίς αυτή η μεταβολή να θεωρείται κακή.

Κεφάλαιο 12

Εναλλακτικές Ανάλυσης Πλαισίου.

Μια πρωταρχική προϋπόθεση ενός κατασκευαστή στην ανάλυση ενός πλαισίου είναι το πηλίκο σκληρότητας του πλαισίου προς το βάρος του. Το πηλίκο αυτό είναι πολύ χρήσιμο για το σχεδιασμό του σασί, και υπαγορεύει ένα σχέδιο που μεγιστοποιεί την ακαμψία και μειώνει το βάρος[3]. Υψηλή ακαμψία βελτιώνει την απόκριση του οχήματος και επιτρέπει μεγαλύτερη πληροφόρηση του οδηγού, και το ελαφρύτερο σασί βελτιώνει το χειρισμό και τη συνολική απόδοση. Έτσι, μια υψηλή ακαμψία στην αναλογία βάρους σημαίνει ότι το πλαίσιο θα έχει καλή απόδοση. Η συμβατική μέθοδος για την αξιολόγηση της ακαμψίας στην αναλογία βάρους είναι η μέτρηση του βάρους του γυμνού πλαισίου και ο υπολογισμός της ακαμψίας, είτε σε κάμψη ή συστροφή. Η αναλογία αυτών των δύο αριθμών θα δώσει στη συνέχεια την ακαμψία στην αναλογία βάρους.

Μια δεύτερη μέθοδος με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η ακαμψία στην αναλογία βάρους ενός είναι η χρήση του παραπάνω πηλίκου όταν το σασί υπόκειται σε δόνηση. Όταν διαταράσσεται ένα στερεό σώμα θα δονείται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία είναι γνωστή ως φυσική συχνότητα του. Η φυσική συχνότητα ορίζεται ως εξής $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$: όπου ω_n είναι η φυσική συχνότητα, k είναι η ακαμψία του πλαισίου, και m είναι η μάζα του πλαισίου. Αυτό δείχνει ότι η φυσική συχνότητα είναι συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας της ακαμψίας στην αναλογία βάρους. Έτσι, μια υψηλότερη συχνότητα δείχνει μεγαλύτερη ακαμψία στην αναλογία βάρους. Επιπλέον, πολλοί οργανισμοί μπορούν να περιέχουν πολλαπλές φυσικές συχνότητες, που ονομάζονται συχνότητες συντονισμού, σε πολλαπλάσια της φυσικής συχνότητας, γνωστή ως αρμονικές, ανάλογα με τον τύπο δόνησης, ή "λειτουργία". Όταν ένας οργανισμός δονείται σε μια συχνότητα συντονισμού, θα κυμαίνονται σε πλάτος μεγαλύτερο από ό, τι άλλες συχνότητες, ακόμη και αυτών που μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τη φυσική συχνότητα. Το σώμα θα ταλαντώνονται με όλο και περισσότερο πλάτος, σε μια προσπάθεια να διαλύσει την ενέργεια που αποθηκεύεται μέσα σε αυτό. Από οποιοδήποτε πραγματικό αντικείμενο έχει ένα ορισμένο ποσό της απόσβεσης, το ποσό του εύρους είναι περιορισμένη. Ωστόσο, αυτό μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλέσει ζημιά ακόμα στο τμήμα.

Επεκτάσεις και μελλοντική εργασία

Η μελέτη που έγινε στη συγκεκριμένη εργασία έχει πολλά περιθώρια συνέχισης.

1. Το συγκεκριμένο μοντέλο με άλλους τρόπους θα μπορούσε να έδινε ακόμα ακριβέστερα αποτελέσματα. Διακριτοποιώντας με περισσότερα στοιχεία το μοντέλο μας και χρησιμοποιώντας και άλλα διαφορετικά στοιχεία.
2. Λαμβάνοντας υπόψη τις συγκολλήσεις μεταξύ των μερών.
3. Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο με την ακριβή γεωμετρία και λαμβάνοντας υπόψη και την εσωτερική γεωμετρία των σωλήνων.
4. Μπορεί να γίνει θερμική μελέτη πάλι με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
5. Μπορεί εφόσον δημιουργηθούν τα κατάλληλα τμήματα που θα καλύψουν το πλαίσιο να γίνει αεροδυναμική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γνωστό και ως CFD με το κατάλληλο λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.
6. Επίσης μπορεί να διερευνηθεί αναλυτικά ο σχεδιασμός και ολόκληρη η γεωμετρία της μπροστά και της πίσω ανάρτησης.
7. Μπορεί κάποιος διερευνώντας το πλαίσιο σε τόσο ολοκληρωμένο βαθμό να κάνει μια δυναμική ανάλυση και προσομοιώσεις σύγκρουσης χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα λογισμικά κάθε φορά.
8. Τοπολογική βελτιστοποίηση πλαισίου.

Εν κατακλείδι συμπεραίνουμε ότι ο σχεδιασμός ενός πλαισίου αφορά την δουλειά πολλών μηχανικών και σχεδιαστών μαζί που πρέπει να υλοποιηθεί μέσα σε διάστημα κάποιων μηνών αφού ο ανταγωνισμός είναι πολύ μεγάλος και η περαιτέρω ανάλυση ενός πλαισίου ξεφεύγει από τα πλαίσια της διπλωματικής αυτής και των μέσων που διαθέτουμε.

Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

1. C.A. Featherston, Karen M. Holford, C.A. Holt, D. Manning, A. Claisse «*Measuring the Torsional Stiffness of a Space Frame Chassis Using 3D Motion Capture Techniques*» Journal Applied Mechanics and Materials. Vol 3-4, pp423-428, (2006).
2. Dr Paul J.Aisopoulos «*Chassis Design*» Department of Vehicles Alexander Technological Educational Institute of Thessaloniki Greece.
3. Evans Jenkins, Dave Baker, Matt Grusenmeyer, Shane Marcks, Adam Baldan «*FSAE CHASSIS : PHASE IV REPORT*» 12-10-10
4. Keith J. Wakeham «*Introduction To Chassis Design Revision 1.0*» Memorial University of Newfoundland And Labrador, 2009
5. Lonny L. Thompson, Srikanth Raju and E. Harry Law «*Design of a Winston Cup Chassis for Torsional Stiffness*» 983053
6. Ravinder Pal Singh, «*STRUCTURAL PERFORMANCE ANALYSIS OF FORMULA SAE CAR*» Department of Mechanical Engineering, Chitkara Institute of Engineering and Technology, *Journal Mechanical December 2010, No. 31, 46 – 61*
7. Vishal Chaudhari, Deep Nidgalkar, Dinesh Channappa, «*Case Study of Process Automation : Chassis Stifness*» Altair CAE Users Conference 2005, August 11-13 ,Taj Westend, Bangalore
8. William B.Riley and Alebrt R. George «*Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis*» SAE TECHNICAL PAPERS SERIES 2002-01-3300
9. W. Charubhun and Supasit Rodwan «*Design of the Space Frame Racing Car Front Clip and Rear Clip for Torsional Rigidity*»

Ελληνική Βιβλιογραφία

10. Κουμούσης Β. Καθηγητής ΕΜΠ «*Ανάλυση Φορέων με Πεπερασμένα στοιχεία*» Σημειώσεις Μέρος Α, Αθήνα Μάρτιος 1998(http://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/MPD138/fem_part_1.pdf)
11. Μπιλάλης Ν. και Μαραβελάκης Ε. «*Συστήματα CAM/CAD και τρισδιάστατη μοντελοποίηση*» 2009

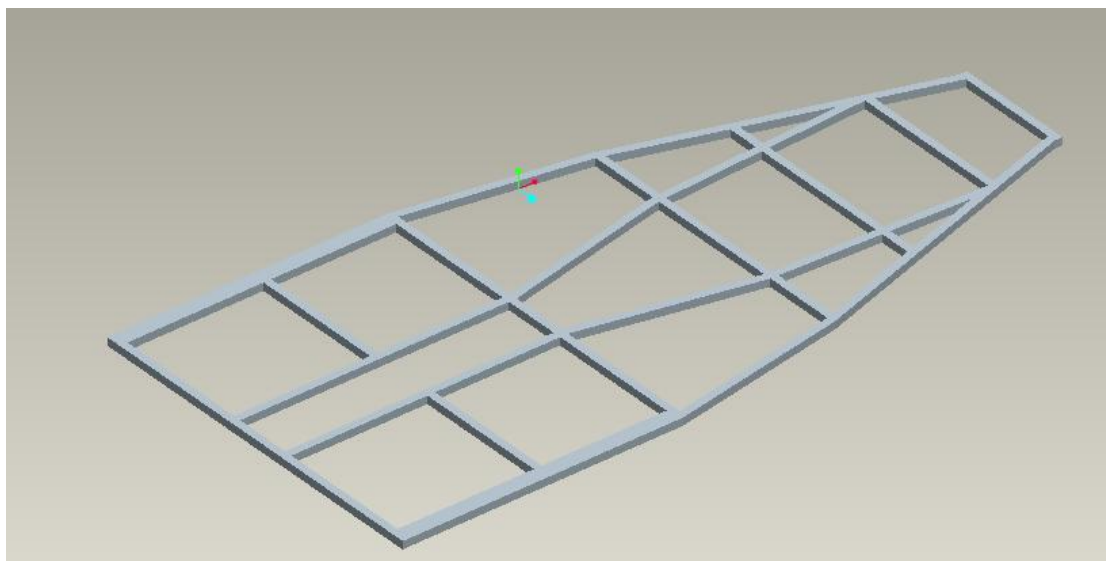
Ηλεκτρονικές Πηγές

12. rileydynamics.com/m-eng%20web/sec3.htm
13. <http://rileydynamics.com/m-eng%20web/sec2.htm>
14. www.ptc.com/support/proengineer.htm
15. carscoop.blogspot.com/2012/02/this-is-new-volkswagen-golf-mk7-mqb.html
16. www.autozine.org/technical_school/chassis/tech_chassis.htm
17. www.locostusa.com
18. www.locostbuilders.gr
19. www.comsol.com
20. www.comsol.com/products/tutorials
21. <http://www.erareplicas.com/misc/stress/deslogic.htm>
22. <http://www.car-stuff.info/Tetgen/FEAreport.Pdf>
23. https://www.google.gr/search?q=enzo+chassis&oe=utf-8&rls=org.mozilla:en-US:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&hl=el&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=18B-T4qJLPS4QSvi_3hBw&biw=1366&bih=576&sei=2sB-T6qHINH1sgaPua25BA
24. https://www.google.gr/search?q=carrera+gt+chassis&oe=utf-8&rls=org.mozilla:en-US:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&hl=el&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=Ocf-T-iSLNck4ASv_OnpBw&biw=1366&bih=576&sei=PMF-T_D9Bs7BtAbPstGeBA
25. https://www.google.gr/search?hl=el&sugexp=frgbld&pq=lamborghini+aventador&cp=22&gs_id=6x&xhr=t&q=lamborghini+aventador+price&client=f

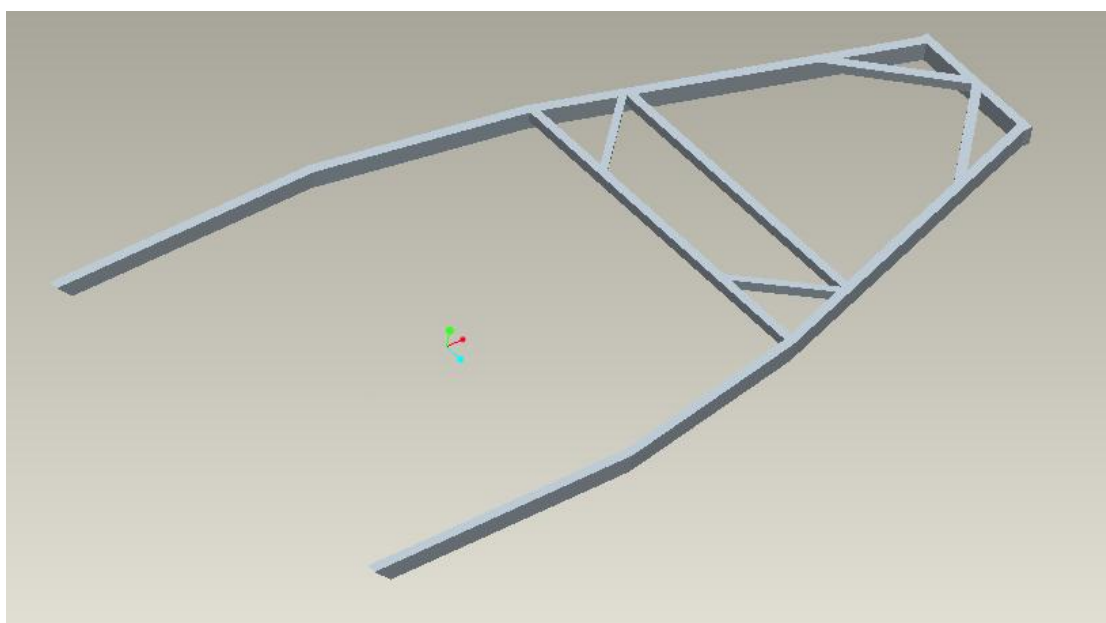
[irefox-a&hs=agm&rls=org.mozilla:en-US:official&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_cp.r_qf.,cf.osb&biw=1366&bih=576&um=1&ie=UTF-8&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=YsJ-T7roI5KN4gSeveDKBw#um=1&hl=el&client=firefox-a&hs=egm&rls=org.mozilla:en-US%3Aofficial&tbm=isch&sa=1&q=lamborghini+aventador+chassis&oq=lamborghini+aventador+ch&aq=0L&aqi=g-L2gsL1&aql=&gs_l=img.1.0.0i19l2j0i10i19.21773l25551l0l27689l7l7l0l0l0l3l245l1478l0j3j4l7l0.frgbld.&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_cp.r_qf.,cf.osb&fp=2c64c0645cbb3667&biw=1366&bih=576](#)

26. https://www.google.gr/search?q=bugati+veyron+chassis&oe=utf-8&rls=org.mozilla:en-US:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&hl=el&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=1MJ-T5LUIqrl4QSWzYmfBw&biw=1366&bih=576&sei=FcN-T9_IGIXAswbD69XdBA
27. <https://www.google.gr/search?q=koeniseg+chassis&oe=utf-8&rls=org.mozilla:en-US:official&client=firefox-a&um=1&ie=UTF-8&hl=el&tbm=isch&source=og&sa=N&tab=wi&ei=NMN-T6y3CKXk4QTpruTKCA&biw=1366&bih=576&sei=mcN-T4T0CYXOsga44JWsBA>

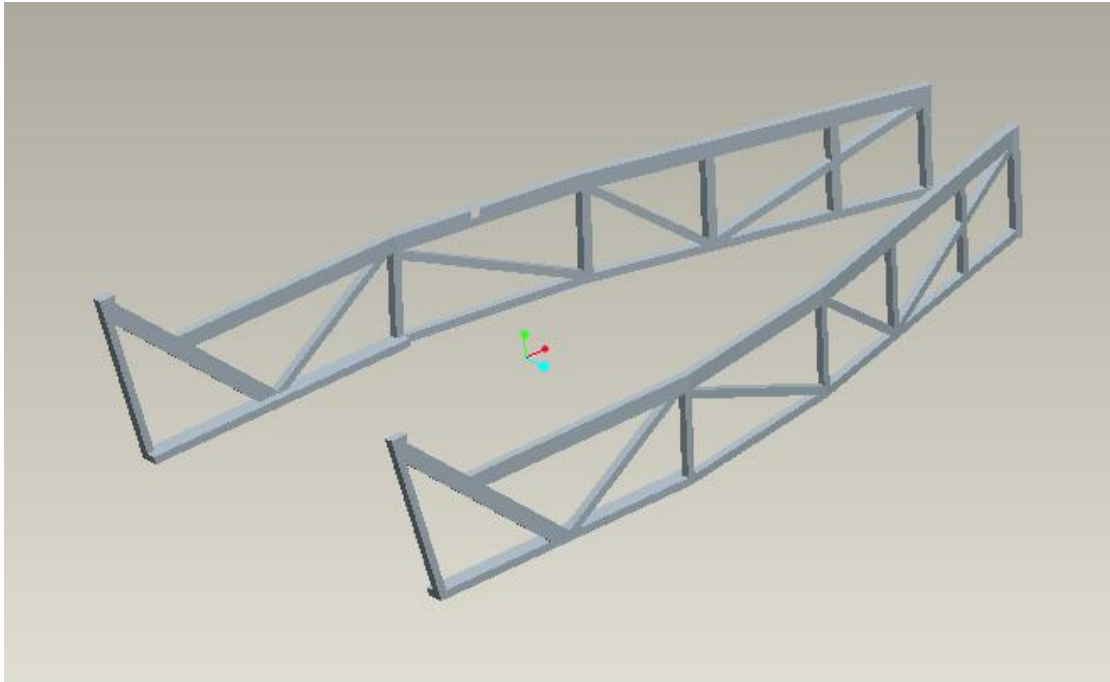
Παράρτημα κατασκευής



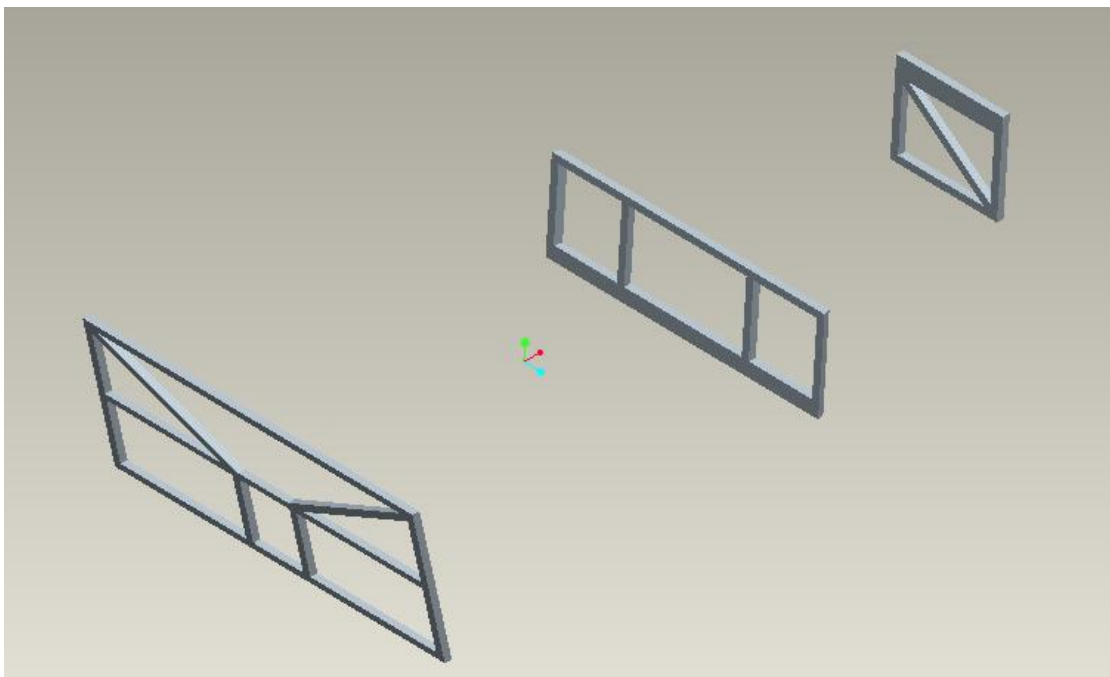
Bottom frame



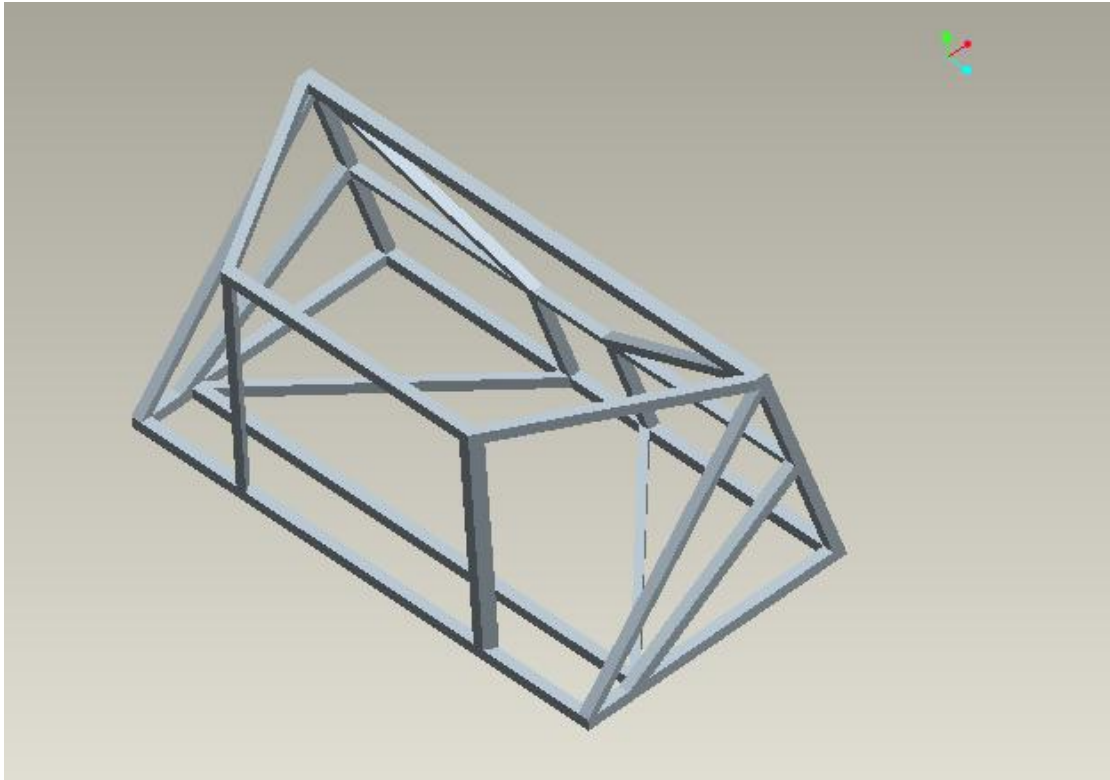
Top frame



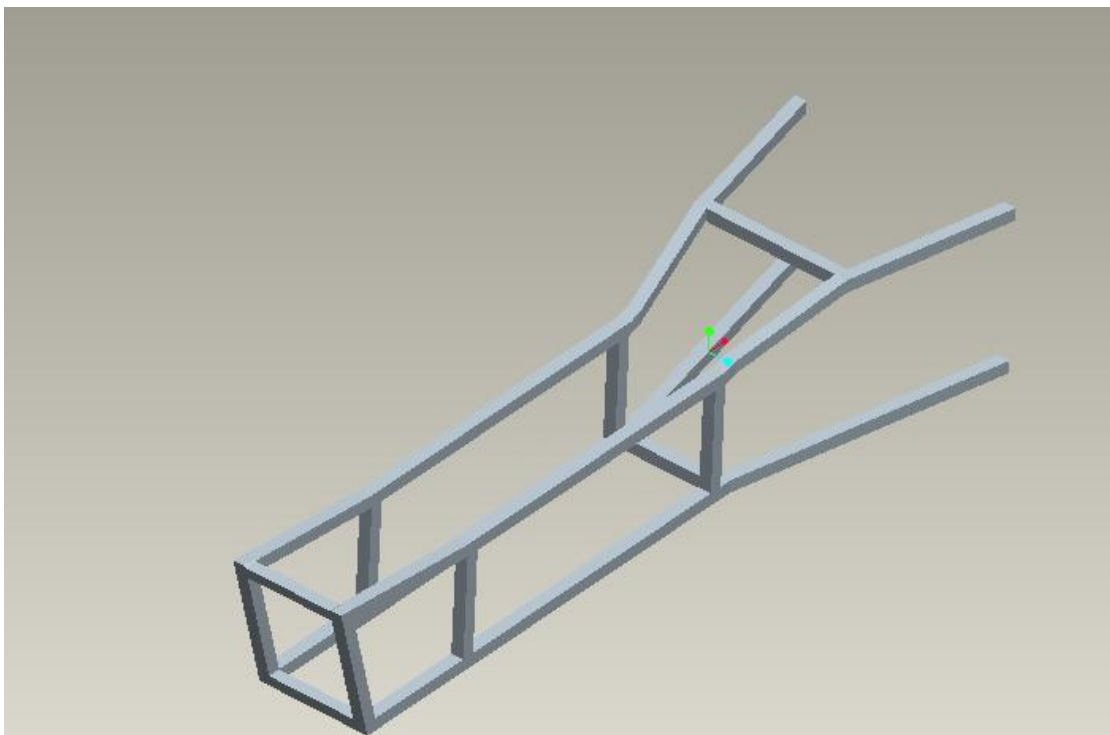
Side Frames



Transverse Frames



Rear Frame



Trasnmission Tounel