



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ
ΧΩΡΟΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ – ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΕΠΙΒΑΤΗΓΟΥ ΤΡΟΧΟΦΟΡΟΥ
ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Κωνσταντίνος Ν. Σπέντζας

Εμμανουήλ Κ. Φουντουλάκης
ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εν πρώτης θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Κωνσταντίνο Ν. Σπέντζα, για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου μέσω της ανάθεσης της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας. Η καθοδήγηση, οι συμβουλές και οι υποδείξεις που μου παρείχε, καθώς και το άριστο πνεύμα συνεργασίας, αποτέλεσαν τους καθοριστικότερους παράγοντες για το αίσιο πέρας του παρόντος.

Ευχαριστώ επίσης ιδιαίτερω τους κ.κ. Κωστόπουλο, Αντωνιάδη και Σπιτά για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην τριμελή Εξεταστική Επιτροπή.

Επιπλέον, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του σε θέματα πλαστικότητας.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον Διδάκτορα κ. Δ. Βενετσάνο για τις πολύτιμες υποδείξεις του σε ζητήματα στατικής ανάλυσης και στο πρόγραμμα "Simulation" του λογισμικού Solidworks.

Εμμανουήλ Κ. Φουντουλάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπό της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η σχεδίαση και στατική ανάλυση πλαισίου οχήματος συνιστάμενο από χωροδικτύωμα (space frame) δοκών.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποτελεί συνέχεια προηγούμενης εργασίας [4] που αφορούσε σχεδίαση και στατική ανάλυση πλαισίου τύπου "unibody" και συνίστατο από χαλύβδινες μορφοδοκούς και ελάσματα.

Στο παρόν σχεδιάστηκε εκ νέου πλαίσιο που προορίζεται για υποθετικό επιβατηγό τροχοφόρο όχημα. Το πλαίσιο συνίσταται από χωροδικτύωμα χαλύβδινων δοκών – μία δομή που απαντά ευρέως σε συμβατικής τεχνολογίας οχήματα επιδόσεων κατασκευαστών περιορισμένης παραγωγής.

Το πλαίσιο εξετάστηκε (εξομοίωση σε H/Y) ως προς την **απόκρισή** του (παραμορφώσεις) σε **στατική κάμψη και στρέψη** – τις δύο κύριες μορφές καταπονήσεως που υφίσταται ένα πλαίσιο οχήματος. Η εν λόγω ανάλυση συνιστά μία θεμελιώδη δοκιμή που αποτελεί ένα εκ των κυρίων βημάτων που συνιστούν την εξέλιξη ενός οχήματος.

Για λόγους πληρότητας, στο Θεωρητικό Μέρος παρατίθεται – σε έκταση που επιτρέπεται από το κύριο αντικείμενο της παρούσης Εργασίας - η θεωρία που αφορά στην απόκριση ενός οχήματος και των επιβατών του σε κρούση (**crashworthiness**). Το εν λόγω ζήτημα είναι μείζονος σημασίας καθώς σχετίζεται με την ασφάλεια επιβατών και πεζών ενώ παράλληλα διέπεται από αυστηρές προδιαγραφές και νομοθεσία. Επισημαίνεται ότι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός οχήματος και των επιβατών του σε κρούση συνιστά ένα ιδιαίτερος εκτενές, χρονοβόρο και δαπανηρό στάδιο εξέλιξης ενός οχήματος.

Τέλος, για λόγους πληρότητας σχεδιάστηκε και ένα αμάξωμα (body) για το εν λόγω όχημα. Το αμάξωμα είναι φτιαγμένο από κοινό εμπορικό κράμα αλουμινίου, δεν αποτελεί φορέα φορτίων (πλην των αεροδυναμικών δυνάμεων που δεν έχουν ληφθεί υπ'όψη) και περιβάλλει όλο το δικτύωμα και τους τροχούς εξασφαλίζοντας την προστασία των επιβατών και των μηχανικών μερών, καθώς και καλύτερα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για το όχημα. Η αισθητική του είναι η τυπική των επιβατηγών οχημάτων του είδους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Θεωρητικό Μέρος.....σελ.1	σελ.1
Γενικά.....σελ.1	σελ.1
Χωροδικτύωμα.....σελ1	σελ1
Σχεδίαση.....σελ.2	σελ.2
Πλαίσιο.....σελ.3	σελ.3
Στατική ανάλυση.....σελ.3	σελ.3
Καμπτική καταπόνηση (Bending Case - Symmetric Vertical Load).....σελ.3	σελ.3
Στρεπτική καταπόνηση (Torsion case ή Vertical Asymmetric Load).....σελ.5	σελ.5
Διαμήκης φόρτιση (Longitudinal loads).....σελ.7	σελ.7
Εγκάρσια φόρτιση (Lateral load case).....σελ.8	σελ.8
Κόπωση.....σελ.10	σελ.10
Συγκεντρωμένα φορτία.....σελ.10	σελ.10
Καταπόνηση πλαισίου.....σελ.11	σελ.11
Στρέψη.....σελ.11	σελ.11
Κάμψη.....σελ.12	σελ.12
Κρούση.....σελ.13	σελ.13
Κρουστικοί παλμοί (Crash pulse).....σελ.13	σελ.13
Τύποι πρόσκρουσης.....σελ.14	σελ.14
Επιταχυνσιόμετρα.....σελ.17	σελ.17
Επεξεργασία πρωτογενούς σήματος μετρήσεως.....σελ.18	σελ.18
Ψηφιακά φίλτρα.....σελ.20	σελ.20

Moving window averaging.....σελ.23	σελ.23
Κινηματική οχήματος και επιβατών κατά την πρόσκρουση.....σελ.25	σελ.25
Rigid Barrier Test.....σελ.26	σελ.26
Κινηματική οχήματος.....σελ.26	σελ.26
Κινηματική επιβάτη – Ενεργοποίηση αερόσακου.....σελ.28	σελ.28
Front Center Pole Test.....σελ.31	σελ.31
Hyge Sled Test.....σελ.31	σελ.31
Ειδική ενέργεια οχήματος (Vehicle energy density).....σελ.33	σελ.33
Σύνοψη Κινηματικών Μεταβλητών.....σελ.34	σελ.34
Μαθηματικά μοντέλα συστήματος οχήματος-επιβάτη-εμποδίου.....σελ.35	σελ.35
Δυναμική συμπεριφορά συνδέσμων αμαξώματος – πλαισίου κατά την πρόσκρουση οχήματος.....σελ.39	σελ.39
Προσέγγιση/Χαρακτηρισμός κρουστικών παλμών.....σελ.41	σελ.41

Υπολογιστικό Μέρος.....	σελ.44
Γενικά.....	σελ.44
Λογισμικό SolidWorks.....	σελ.45
Κριτήρια Σχεδίασης.....	σελ.46
Χωροταξικά/εργονομικά κριτήρια.....	σελ.47
Καμπτική και στρεπτική ακαμψία.....	σελ.48
Επιλογή Υλικών.....	σελ.48
Πλαίσιο.....	σελ.48
Αμάξωμα.....	σελ.54
Εσωτερικά Φορτία.....	σελ.58
Ίδιον βάρος δικτυώματος.....	σελ.58
Επιβάτες.....	σελ.58
Κινητήρας / Μειωτήρας.....	σελ.58
Δεξαμενή καυσίμων.....	σελ.60
Στατική Ανάλυση.....	σελ.64
Σημεία στηρίξεως πλαισίου.....	σελ.64
Κάμψη λόγω ιδίου βάρους.....	σελ.66
Αποτελέσματα.....	σελ.67
Μετατοπίσεις (URES).....	σελ.67
Κατανομή τάσεων.....	σελ.70
Δοκιμή Κάμψεως λόγω υπερκεράσεως εγκάρσιου εμποδίου (Bending Case - Symmetric Vertical Load).....	σελ.71
Αποτελέσματα.....	σελ.72
Μετατοπίσεις (URES).....	σελ.72
Κατανομή τάσεων.....	σελ.75

Δοκιμή Στρέψης.....σελ.76	σελ.76
Ενδεικτικές τιμές στρεπτικής δυσκαμψίας οχημάτων.....σελ.76	σελ.76
Δοκιμές μετρήσεως στρεπτικής δυσκαμψίας.....σελ.76	σελ.76
Δυσκαμψία δοκού σταθερής διατομής.....σελ.78	σελ.78
Δοκιμή Στρέψης λόγω ανύψωσης του ενός τροχού.....σελ.79	σελ.79
Αποτελέσματα.....σελ.80	σελ.80
Μετατοπίσεις (URES).....σελ.80	σελ.80
Κατανομή τάσεων.....σελ.84	σελ.84
Προσεγγιστική Εκτίμηση Στρεπτικής Δυσκαμψίας πλαισίου.....σελ.85	σελ.85
Αποτελέσματα.....σελ.88	σελ.88
Μετατοπίσεις (URES).....σελ.88	σελ.88
Υπολογισμός.....σελ.91	σελ.91
Σχολιασμός.....σελ.93	σελ.93

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γενικά

Το υποτιθέμενο όχημα που εξετάζεται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, είναι διαθέσιμο τροχοφόρο επιβατηγό όχημα επιδόσεων/αναψυχής ("sport").

Συνήθως τα οχήματα αυτού του τύπου παράγονται σε μικρούς αριθμούς από κατασκευαστές περιορισμένων βιομηχανικών δυνατοτήτων. Ως εκ τούτου, το πλαίσιο τους συνίσταται είτε από μεταλλικό (χαλύβδινο ή από κράματα Al) χωροδικτύωμα, ή σπανιότερα αποτελεί μονοκόμματη κατασκευή ("monocoque") συνιστάμενη από συγκολλημένα μεταλλικά μέρη (κυρίως κράματα Al), ή τις τελευταίες δεκαετίες συνίσταται από ένα ενιαίο τμήμα από πολυμερές ενισχυμένο με βιομηχανικές ίνες (κατά κανόνα ρητίνη ενισχυμένη με ίνες C ή αραμιδίου).

Οι εν λόγω κατασκευαστικές δομές δε δύνανται να παραχθούν μαζικά λόγω του υψηλού χρόνου κατασκευής και της δυσκολίας αυτοματοποίησης. Επιπλέον, έχουν αρκετά πλεονεκτήματα εν συγκρίσει προς το "αυτοφερόμενο" ("intergrated body" ή "unibody") πλαίσιο, όπως το χαμηλότερο βάρος, η πολύ υψηλή δυσκαμψία, η δυνατότητα κατασκευής χωρίς χρήση δαπανηρού εξοπλισμού κατεργασίας/μορφοποίησης και η μη απαίτηση εκτέλεσης (ή η λιγότερο δαπανηρή εκτέλεση) δευτερευουσών διεργασιών (πχ. Αντιδιαβρωτική προστασία – γαλβανισμός, φωσφάτωση κλπ) στην περίπτωση πολυμερικών ή αλουμινένιων κατασκευών.

Χωροδικτύωμα

Το χωροδικτύωμα (space frame ή truss) αποτελεί μία κατασκευαστική δομή που συνίσταται από δοκούς διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μήκος, σχήμα και εμβαδόν διατομής) που συνδέονται μεταξύ τους με κολλήσεις (joints). Το βασικό πλεονέκτημα του χωροδικτυώματος είναι η υψηλή του ακαμψία που πηγάζει από την παρουσία τριγωνικών τμημάτων (triangular bays). Η τριγωνική διάταξη δοκών υπερτερεί καθώς δεν μπορεί να παραμορφωθεί (δηλαδή να γίνει μηχανισμός) υπό την επίδραση φορτίων που ανήκουν στο επίπεδο του τριγώνου, εφόσον τα μήκη των δοκών δεν μπορούν να μεταβληθούν, σε

αντίθεση με την τετραγωνική διάταξη που δύναται να παραμορφωθεί (να γίνει μηχανισμός) ακόμη και αν τα μήκη των δοκών διατηρούνται σταθερά.

Επιπλέον, οποιαδήποτε μορφή και αν έχει η καταπόνηση που υφίσταται περιφερειακά (στο σύνορό του) ένα χωροδικτύωμα ή τα επιμέρους τμήματά του, αυτές μεταφέρονται στις ενισχυτικές δοκούς ως αξονικά (θλιπτικά ή εφελκυστικά) φορτία.

Στα χωροδικτύωματα επιδιώκεται εν γένει η παρουσία πολλών τριγωνικών τμημάτων (multi-bay truss) καθώς αυτή συνεπάγεται τη μείωση του ενεργού μήκους των δοκών και συνεπώς την αυξημένη τους αντοχή – κυρίως σε λυγισμό.

Φυσικά επιδιώκεται η χρήση της ελάχιστης δυνατής μάζας υλικού, συνεπώς ο αριθμός τριγώνων στον οποίον «διαίρεείται» μία κατασκευή (degree of triangulation) αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης αλλά και κριτήριο της "ποιότητας" σχεδίασης της εν λόγω κατασκευής.

Σχεδίαση

Εν γένει, η διαδικασία της σχεδίασης ενός οχήματος γίνεται βάσει διαφόρων κριτηρίων και παραμέτρων. Ωστόσο, τα κυριότερα εξ'αυτών είναι η επιδιωκόμενη δυναμική απόκριση του οχήματος στις "εντολές" του οδηγού και τα ζητήματα εργονομίας-λειτουργικότητας-χωροταξίας ("packaging").

Η πρώτη απαίτηση καθορίζει χαρακτηριστικά όπως η σχετική θέση των τροχών (μεταξόνιο, μετατρόχιο), η γεωμετρία των αναρτήσεων, η επιθυμητή θέση του κέντρου μάζης κλπ. Γενικότερα, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς οχήματος περιλαμβάνει συγκεκριμένα «σενάρια», όπως η κίνηση σε καμπύλη τροχιά (steady-state cornering), η εφαρμογή διαμήκους επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης, η αλλαγή κατεύθυνσης, η αυξομείωση της ισχύος κλπ.

Η δεύτερη απαίτηση καθορίζει τη διαστασιολόγηση του θαλάμου επιβατών, τη θέση των εκάστοτε τμήματος του οχήματος (τροχοί, κινητήρας/μετάδοση, επιβάτες, χώρος αποσκευών, δεξαμενή καυσίμου κλπ), τη γεωμετρία του αμαξώματος κλπ. Αυτή η απαίτηση είναι εν μέρει αλληλένδετη με την παραπάνω, καθώς η θέση των διαφόρων μερών του οχήματος επιδρά άμεσα στην κατανομή μαζών.

Πλαίσιο

Εν γένει, οι κυριότεροι ρόλοι που επιτελεί το πλαίσιο ενός επιβατηγού οχήματος είναι οι ακόλουθοι :

Συγκρατεί/διατηρεί τη σχετική θέση των επιμέρους τμημάτων του οχήματος σταθερή και ιδιαιτέρως διατηρεί αμετάβλητη τη γεωμετρία της ανάρτησης, ώστε σε κάθε περίπτωση να μην υπονομεύεται η δυναμική απόκριση και η ελεγχιμότητα του οχήματος.

Απορροφά/ εξουδετερώνει τα εσωτερικά φορτία που δέχεται από τα επιμέρους τμήματα του οχήματος (κινητήρας/μετάδοση, επιβάτες, χώρος αποσκευών, δεξαμενή καυσίμου, ίδιον βάρος κλπ), καθώς και τα εξωτερικά φορτία που δέχεται από το περιβάλλον (και φτάνουν σε αυτό μέσω των σημείων εδράσεως των αναρτήσεων).

Συγκρατεί το αμάξωμα στην περίπτωση που αυτό αποτελεί χωριστή οντότητα από το πλαίσιο.

Απορροφά – σε συνδυασμό με άλλα μέρη του οχήματος - την κινητική ενέργεια του οχήματος κατά την πρόσκρουσή του, έτσι ώστε αφενός η παραμόρφωση να μη φτάσει έως το θάλαμο επιβατών και αφετέρου η επιβράδυνση των επιβατών να μη λάβει επικίνδυνα υψηλές για την ακεραιότητά τους τιμές.

Στατική ανάλυση

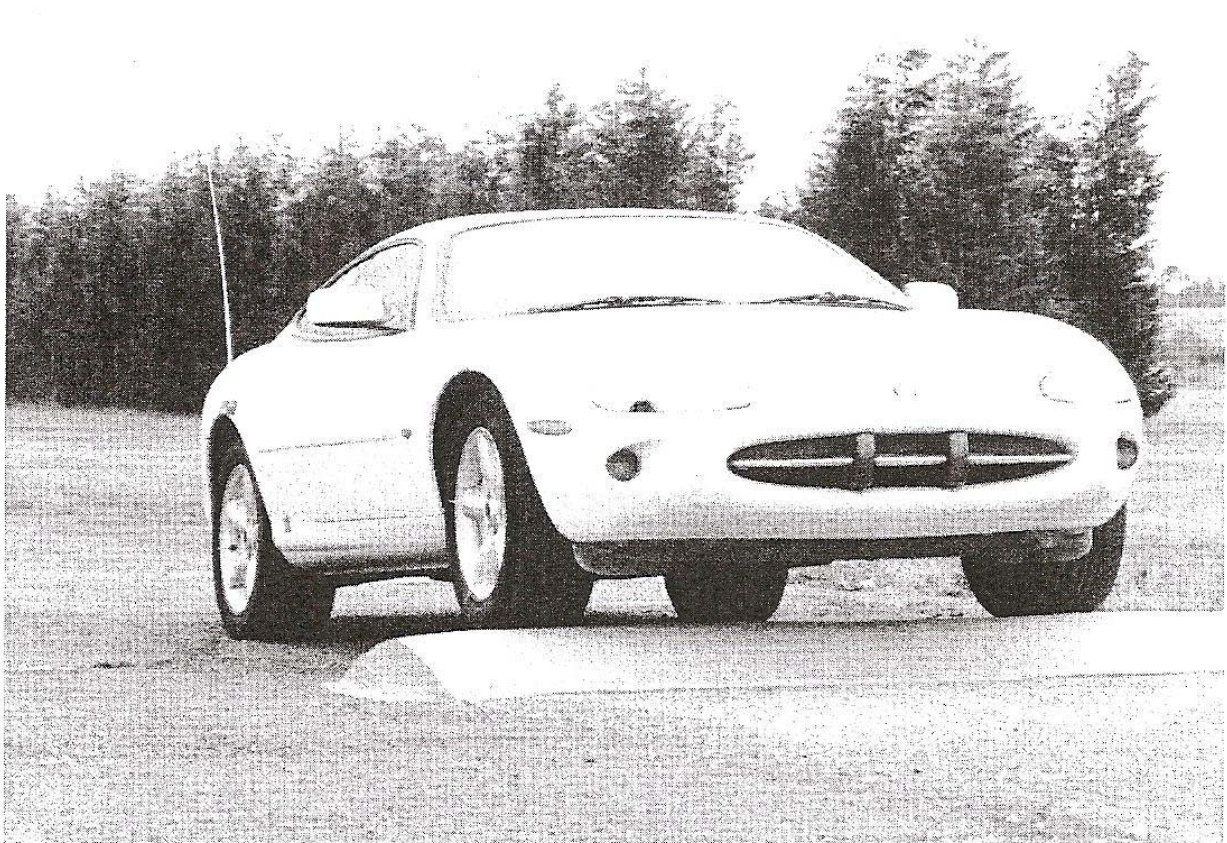
Στη βιβλιογραφία απαντούν διάφοροι τύποι φορτίσεως (load cases) ενός οχήματος που κινείται σε ασφάλτινο δόμο. Ακολούθως αναφέρονται επιγραμματικά οι σημαντικότερες εξ' αυτών. Περαιτέρω πληροφορίες έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη εργασία [4].

Καμπτική καταπόνηση (Bending Case - Symmetric Vertical Load)

Εν γένει αφορά είτε τη στατική φόρτιση λόγω του βάρους των επιμέρους τμημάτων του οχήματος (κινητήρας/μετάδοση, επιβάτες, χώρος αποσκευών, δεξαμενή καυσίμου, ίδιον βάρος κλπ) είτε τη δυναμική φόρτιση που δέχεται το πλαίσιο όταν δέχεται δύο - συμμετρικές ως προς το διαμήκη άξονα - κατακόρυφες δυνάμεις σε έναν εκ των δύο αξόνων.

Χαρακτηριστική περίπτωση εμφάνισης τέτοιων δυνάμεων είναι όταν το όχημα διέρχεται από εγκάρσιο εμπόδιο. Αυτό προκαλεί την εμφάνιση καμπτικής ροπής στο όχημα, κατά τον εγκάρσιο άξονα. Στην περίπτωση που το φαινόμενο είναι δυναμικό, το στατικό φορτίο πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (dynamic factor) που συνήθως λαμβάνει την τιμή 3 για οχήματα ασφάλτου και έως 6 για εκτός-δρόμου οχήματα [6]. Επιπλέον εισάγεται και συντελεστής ασφαλείας με τιμή 1.5-2.0 [6].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μία τυπική περίπτωση εμφάνισης καμπτικών φορτίων :

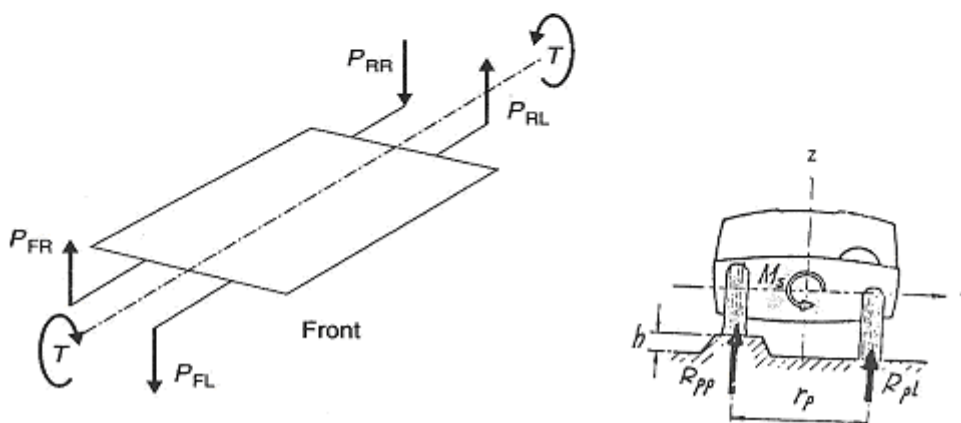


Εμφάνισης καμπτικής φόρτισης λόγω διέλευσης του οχήματος από εγκάρσιο εμπόδιο (Bending Case – Symmetric Vertical Load)

Στρεπτική καταπόνηση (Torsion case ή Vertical Asymmetric Load)

Πρόκειται για τη συνηθέστερη και δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης. Για το λόγο αυτό, η στρεπτική ακαμψία που επιδεικνύει ένα όχημα χρησιμοποιείται ως μέγεθος ενδεικτικό της γενικότερης ακαμψίας και αντοχής του. Αφορά τη φόρτιση του οχήματος με δύο κατακόρυφες αντίθετες δυνάμεις στους τροχούς ενός άξονα ή στη γενικότερη περίπτωση με ένα ζεύγος αντίθετων δυνάμεων στον κάθε άξονα. Στην πράξη η καταπόνηση αυτή εμφανίζεται όταν ο ένας τροχός του άξονα διέρχεται από κάποιο εμπόδιο ή όταν οι τροχοί βρίσκονται σε διαφορετικό υψομετρικό επίπεδο. Στην περίπτωση που το φαινόμενο είναι δυναμικό, στην ανάλυση υπεισέρχεται κατάλληλος συντελεστής.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μία τυπική περίπτωση εμφάνισης στρεπτικών φορτίων :



Εμφάνιση στρεπτικής φόρτισης

Η στρεπτική ακαμψία ενός οχήματος εξαρτάται από την κατασκευαστική του δομή και την ακαμψία του πλαισίου, του αμαξώματος και των αναρτήσεων. Αυτά τα μέρη δρουν ως στροφικά ελατήρια συνδεδεμένα εν παραλλήλω, οπότε η συνολική στρεπτική δυσκαμψία K της κατασκευής προκύπτει ως συνδυασμός των K των επιμέρους μερών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα εξωτερικά φορτία διανέμονται στην ολική κατασκευή βάσει του K του κάθε επιμέρους τμήματος. Και πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό οδεύει προς το τμήμα με το μεγαλύτερο K . Αυτό κατέστη σαφές εξ'αρχής στους κατασκευαστές οχημάτων και τις πρώτες δεκαετίες εμφάνισης του αυτοκινήτου, στην περίπτωση δομών με ξεχωριστό πλαίσιο και αμάξωμα (Body on chassis) επιλέγοντο κατά περίπτωση συγκεκριμένες λύσεις ώστε να κατευθύνονται τα φορτία προς τα τμήματα με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία. Πιο συγκεκριμένα, για να λάβει το πλαίσιο (chassis) το μεγαλύτερο ποσοστό της φόρτισης, επιλέγοντο εύκαμπτοι σύνδεσμοι μεταξύ αυτού και του αμαξώματος (body) ή εύκαμπτο αμάξωμα, ώστε σε κάθε περίπτωση τα φορτία να καταλήξουν κυρίως στο πλαίσιο [6].

Ο λόγος που η στρεπτική δυσκαμψία και η περίπτωση της στρεπτικής καταπόνησης έχουν ιδιαίτερη σημασία, είναι ότι σε ένα όχημα με μικρή στρεπτική δυσκαμψία, η εμφάνιση στρεπτικής καταπόνησης θα συνεπάγετο σημαντική μεταβολή της γεωμετρίας των αναρτήσεων και συνεπώς υπονόμηση της δυναμικής συμπεριφοράς και ελεγχιμότητας (handling) του οχήματος, με πολύ σοβαρές συνέπειες για την ασφάλεια και τις επιδόσεις του οχήματος. Επιπλέον, θα εμφανίζοντο και λειτουργικά/εργονομικά προβλήματα όπως για παράδειγμα προβλήματα συναρμογής και ανοίγματος/κλεισίματος των θυρών και των καλυμάτων του θαλάμου του κινητήρα και των αποσκευών.

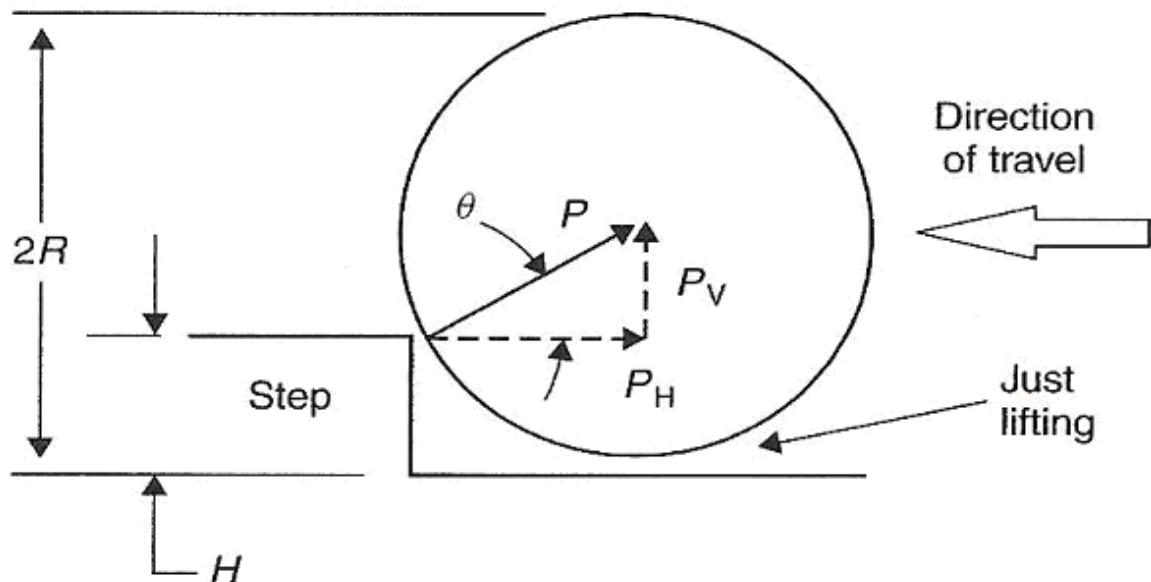
Κλείνοντας, επισημαίνεται ότι η στρεπτική φόρτιση, απαντά στην πραγματικότητα σε συνδυασμό με κάποια άλλη.

Οι δύο παραπάνω μορφές καταπόνησης, σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά κατά την πρόσκρουση, καθώς και η μελέτη ταλαντώσεων, αποτελούν τα τέσσερα βασικά «σενάρια» (cases) κατά την έρευνα και την εξέλιξη ενός πλαισίου οχήματος. Ωστόσο, απαντούν και άλλες περιπτώσεις φόρτισης που εξετάζονται κατά την εξέλιξη ενός οχήματος. Ακολούθως αναφέρονται και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικότερες εξ'αυτών :

Διαμήκης φόρτιση (Longitudinal loads)

Τα εν λόγω φορτία εμφανίζονται κυρίως κατά την επιβράδυνση (πέδηση) του οχήματος. Εφόσον οι δυνάμεις πεδήσεως ασκούνται στην επιφάνεια επαφής των ελαστικών επισώτρων με το οδόστρωμα, τότε λόγω της υψομετρική διαφοράς των σημείων εφαρμογής από το κέντρο μάζας, παρατηρείται μεταφορά βάρους από τους πίσω στους εμπρός τροχούς. Επισημαίνεται επιπλέον ότι η μέγιστη επιβράδυνση ενός επιβατηγού οχήματος είναι της τάξεως του 10 m/s^2 ($= 1g$) και ενός λεωφορείου ή φορτηγού 7 m/s^2 [2].

Αρκετά συχνά τα διαμήκη φορτία εμφανίζονται και λόγω της πρόσκρουσης του τροχού του οχήματος σε εμπόδιο. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο ισούται με την οριζόντια συνιστώσα της δύναμης που έχει διεύθυνση από το σημείο επαφής τροχού-εμποδίου προς το κέντρο του τροχού (πλήμνη) όπου και εφαρμόζεται – όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα :

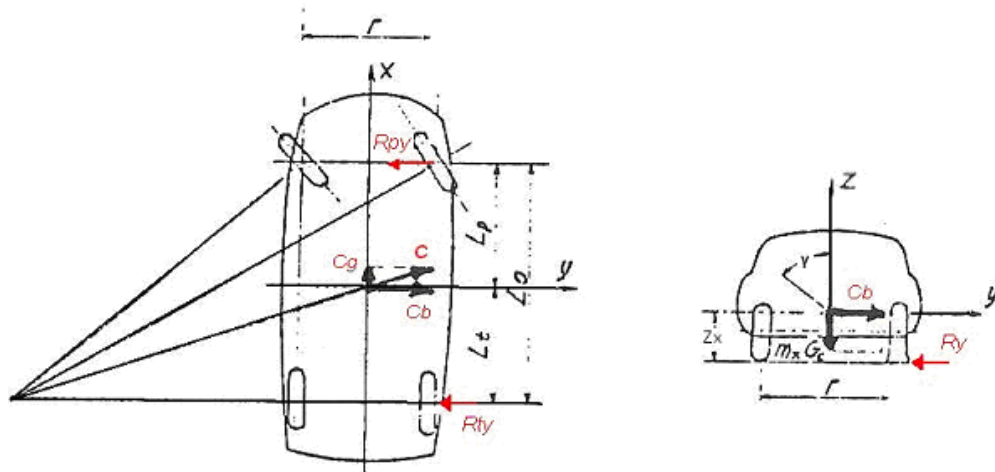
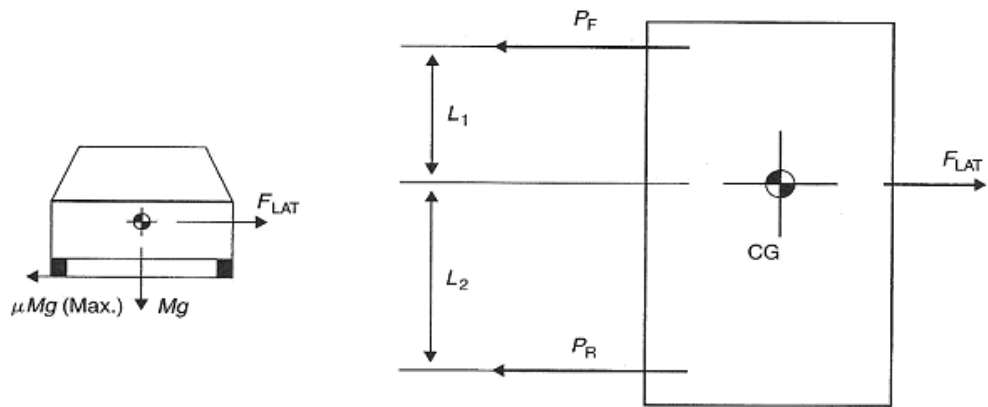


Ανάπτυξη διαμήκους φορτίου κατά την πρόσκρουση του τροχού σε εμπόδιο

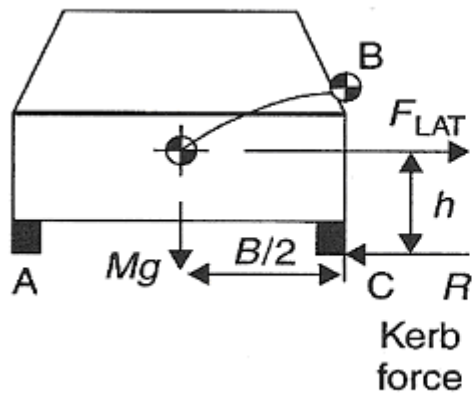
Κάποιοι μελετητές [6], στην κατηγορία των διαμηκών φορτίων συμπεριλαμβάνουν και αυτά που οφείλονται στην απότομη σύμπλεξη κατά την εκκίνηση του οχήματος (clutch-drop loads), τα οποία εν γένει είναι μικρά συγκριτικά με τα υπόλοιπα διαμήκη φορτία, αλλά καταπονούν ιδιαίτερος τα σημεία στήριξης του κινητήρα/μετάδοσης στο πλαίσιο.

Εγκάρσια φόρτιση (Lateral load case)

Τα εν λόγω φορτία εμφανίζονται κυρίως όταν το όχημα διαγράφει καμπύλη τροχιά, καθώς και όταν αυτό προσκρούει ελαφρώς πλευρικά με κάποιο εμπόδιο (πχ «κερμπ»). Στην πρώτη περίπτωση, η πλευρική δύναμη είναι στην ουσία η κεντρομόλος που ισούται με τη δύναμη τριβής . Αν και στην τυχαία θέση της τροχιάς η δύναμη έχει συνιστώσα και κατά το διαμήκη άξονα του οχήματος, εντούτοις αυτή αμελείται καθώς θεωρείται μικρή. Στην οριακή περίπτωση (πριν την ολίσθηση των τροχών ή την απώλεια επαφής με το οδόστρωμα), το μέγιστο φορτίο της κεντρομόλου αντισταθμίζεται από την αντίδραση των ελαστικών. Οι αναπτυσσόμενες εγκάρσιες δυνάμεις, παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :



Εμφάνιση εγκάρσιων φορτίων κατά την κίνηση οχήματος επί καμπύλης τροχιάς



$$F_{(LAT)}h = Mg \frac{B}{2} \times K$$

$$F_{(LAT)} = \frac{MgB}{2h} \times K$$

Εμφάνιση εγκάρσιων φορτίων κατά την πλευρική πρόσκρουση του οχήματος σε εμπόδιο

Επισημαίνεται ότι όπως και στην περίπτωση της διαμήκους φόρτισης, τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων είναι οι επαφές των τροχών με το οδόστρωμα ή το εμπόδιο. Συνεπώς και εδώ η υψομετρική διαφορά h προκαλεί μεταφορά βάρους - από τους εσωτερικούς προς τους εξωτερικούς τροχούς.

Κόπωση

Η κόπωση εμφανίζεται κυρίως όταν το όχημα διέρχεται από ατέλειες του οδοστρώματος ή όταν κινείται σε λιθόστρωτο δρόμο. Εν αντιθέσει με τα παραπάνω φορτία που είναι της τάξεως μεγέθους των 10^4 N, τα φορτία που εμφανίζονται στην κόπωση είναι σχετικά μέτριας μέσης τιμής, της τάξεως των 10^3 N [6].

Συγκεντρωμένα φορτία

Πρόκειται για φορτία που δεν εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του οχήματος, αλλά σε ειδικές περιπτώσεις, όπως κατά τη μεταφορά/ανύψωσή του (στις θέσεις συγκράτησης), κατά τη ρυμούλκησης του κλπ.

Καταπόνηση πλαισίου

Στρέψη

Εν γένει, το «αυτοφερόμενο» πλαίσιο ενός κλειστού (τύπου «saloon») οχήματος, μπορεί να προσομοιωθεί με μία κοίλη δοκό μεταβλητής και - κατά κανόνα - ορθογωνικής διατομής. Συνεπώς όσα ισχύουν για την κάμψη (ως προς τον εγκάρσιο άξονα) και στη στρέψη (ως προς το διαμήκη άξονα) μίας κοίλης δοκού, ισχύουν εν γένει και για το εν λόγω πλαίσιο. Λαμβάνοντας υπ' όψη την παρατήρηση, δύναται να ερμηνευτεί η παρουσία και ο ρόλος των διαφόρων τμημάτων που συνιστούν το πλαίσιο.

Όπως είναι γνωστό και από τις εργασίες του Pawlowski, η εμφάνιση στρεπτικής φόρτισης στο πλαίσιο, συνεπάγεται – όπως και στην περίπτωση δοκού υπό στρέψη) την εμφάνιση διατμητικών τάσεων στις πλευρικές επιφάνειες που συνιστούν τη «δοκό». Αυτές οι διατμητικές τάσεις μεταδίδονται με διάφορους τρόπους (load paths) στην υπόλοιπη κατασκευή. Ο Pawlowski [2] προσομοίασε τις επιφάνειες ενός «αυτοφερόμενου» πλαισίου με Απλές Δομικές Επιφάνειες (Simple Structural Surfaces, SSS) και μελέτησε το πως διανέμονται τα φορτία σε ολόκληρο το πλαίσιο.

Επισημαίνεται ότι οι δοκοί κλειστής διατομής επιδεικνύουν πολύ υψηλότερη στρεπτική ακαμψία από τις δοκούς ανοικτής διατομής. Συνεπώς στα οχήματα επιδιώκεται να μη διακόπτεται η συνέχεια της διατομής. Όταν αυτό είναι αναπόφευκτο (οχήματα τύπου «convertible») προστίθενται επιπλέον ενισχύσεις.

Συχνά τα οχήματα, και ιδιαιτέρως τα οχήματα επιδόσεων, φέρουν μία κοίλη «δοκό» κλειστής διατομής (torsion box) κατά μήκος του θαλάμου των επιβατών που ενισχύει τη στρεπτική ακαμψία του πλαισίου.

Επιπλέον φέρουν εγκάρσιες επιφάνειες (firewall, bulkheads) που δρουν κυρίως ως ενισχύσεις που μειώνουν το ενεργό μήκος της ολικής «δοκού» (πλασίου) αυξάνοντας την αντοχή σε στρεπτικό λυγισμό. Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει και από τη σχέση που δίδει τη στρεπτική δυσκαμψία K , $K=G J/L$, όπου J και L η σταθερά στρέψης (torsion constant) και το ενεργό μήκος του φορέα αντιστοίχως [7].

Αλλωστε, από τη Μηχανική είναι γνωστό ότι στην περίπτωση στρέψεως δοκών ορθογωνικής διατομής, οι διατομές δε διατηρούνται κατακόρυφες και επίπεδες, αλλά

στρεβλώνουν. Επιπλέον είναι γνωστά και τα φαινόμενα στρεπτικού λυγισμού που εμφανίζονται σε «δοκούς» μεγάλου ενεργού (ανυποστήρικτου) μήκους.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να μεταφερθούν απ'ευθείας και σε ένα πλαίσιο-χωροδικτύωμα. Πιο συγκεκριμένα, η λογική του χωροδικτυώματος είναι κυρίως η αντικατάσταση των υπό διάτμηση επιφανειών (shear panels) από επίπεδα τριγωνικά δικτύωματα που μεταφέρουν τις διατμητικές δυνάμεις από τις ακμές, στις ενισχυτικές δοκούς. Το ρόλο των εγκάρσιων επιφανειών επιτελούν και πάλι επίπεδα δικτύωματα.

Κάμψη

Οι κατακόρυφες δυνάμεις μεταφέρονται στις ενισχυτικές δοκούς με τον τρόπο που περιγράφηκε. Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι η κατακόρυφη ανάπτυξη του πλαισίου δρα ευεργετικά στην καμπτική δυσκαμψία καθώς αυξάνει τη ροπή αδρανείας I_{yy} της ολικής «δοκού» ως προς τον εγκάρσιο άξονα. Όσον αφορά τις διατομές των διαμηκών δοκών/συνόρων του πλαισίου, αυτές επιδιώκεται να έχουν το κατάλληλο σχήμα (με υψηλή I_{yy} , δηλαδή ορθογωνικό σχήμα, μεγάλου ύψους και μικρού πλάτους), αν και στην πράξη η πλειοψηφία των χαλύβδινων χωροδικτυωμάτων που απαντούν στα επιβατηγά οχήματα, συνίσταται από δοκούς κυκλικής διατομής.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο αριθμός των ενισχύσεων και γενικότερα ο αριθμός των τριγώνων που θα σχηματιστούν κατά την αντικατάσταση ενός συνεχούς φορέα (έλασμα ή panel) από το αντίστοιχο επίπεδο τριγωνικό δίκτυο (degree of triangulation), ώστε να διατηρηθεί η συμπεριφορά του σε διάτμηση ή κάμψη, αποτελεί μείζον ζήτημα καθώς επηρεάζει άμεσα το βάρος της κατασκευής.

Επιπλέον, ο αριθμός των τριγώνων και οι εμφανιζόμενες γωνίες είναι ενδεικτικές της σχεδιαστικής «ποιότητας» και επιπέδου της εν λόγω κατασκευής. Όσο λιγότερες ράβδοι χρησιμοποιηθούν, τόσο «ποιοτικότερη» είναι σχεδιαστικά η κατασκευή.

Επισημαίνεται ότι οι θέσεις (σημεία) εφαρμογής των εξωτερικών φορτίων (θέσεις σύνδεσης των αναρτήσεων), επιδιώκεται να είναι και θέσεις όπου τέμνονται δοκοί.

Κρούση [5]

Εν γένει, η μελέτη της συμπεριφοράς ενός οχήματος σε κρούση (crashworthiness), αποσκοπεί στο να μελετηθεί η απόκριση του ιδίου και των επιβατών του, καθώς και να εξακριβωθεί εάν το όχημα πληροί τις απαιτούμενες – βάσει σχετικής νομοθεσίας- προδιαγραφές ή ακόμη καλύτερα εάν τις υπερκαλύπτει, ώστε να λάβει τη σχετική έγκριση κυκλοφορίας.

Το υπό μελέτη σύστημα συνίσταται από το όχημα, τους επιβαίνοντες και τις περιοριστικές διατάξεις (αερόσακοι κλπ) (Vehicle-Occupants-Restraint systems, VOR). Επί της ουσίας, η μελέτη αφορά την απόκριση (επιβράδυνση) των διαφόρων μερών του οχήματος και των επιβατών στον κρουστικό παλμό (επιβράδυνση) που εισέρχεται στο σύστημα από το τμήμα του οχήματος (προφυλακτήρας στη μετωπική πρόσκρουση) που έρχεται πρώτο σε επαφή με το υποτιθέμενο εμπόδιο.

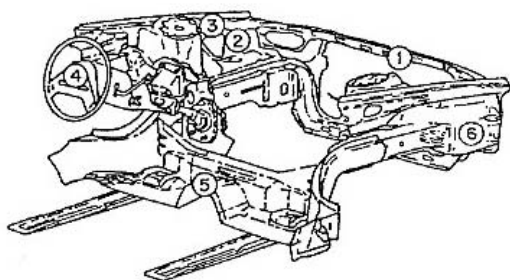
Κρουστικοί παλμοί (Crash pulse)

Ο όρος «κρουστικός παλμός» περιγράφει στην ουσία τη **χρονική συνάρτηση της επιβράδυνσης** κάποιου προεπιλεγθέντος σημείου του οχήματος κατά τη διάρκεια μίας πρόσκρουσης.

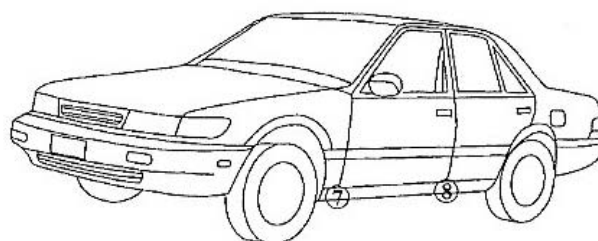
Η εν λόγω χρονική κατανομή λαμβάνεται κατά την πειραματική δοκιμή πρόσκρουσης του οχήματος σε καθορισμένες εργαστηριακές συνθήκες, που ποικίλουν αναλόγως του εξεταζόμενου τύπου πρόσκρουσης και καθορίζονται εν γένει από τα σχετικά εθνικά ή διεθνή πρότυπα .

Η καταγραφή του κρουστικού παλμού γίνεται μέσω κατάλληλων αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρα) που βρίσκονται τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις του οχήματος. Σε μία τυπική περίπτωση μελέτης μετωπικής πρόσκρουσης, ο κρουστικός παλμός λαμβάνεται συνήθως στην πρώτη ή/και στη δεύτερη κολώνα του πλαισίου (“A ή B-pillar” αντίστοιχα), ή στις διαμήκεις δοκούς του δαπέδου (“Rocker panel”), προκειμένου για οχήματα με αυτοφερόμενο πλαίσιο/αμάξωμα. Σπανιότερα, λαμβάνεται στον κινητήρα ή στον εναλλάκτη θερμότητας ψυκτικού υγρού/αέρος (radiator) που βρίσκεται (συνήθως) στο εμπρός άκρο του οχήματος.

Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνονται οι εν λόγω θέσεις:



Crash Test Sensor and Accelerometer Locations



Crash Test Sensor/Accelerometer Locations

<ol style="list-style-type: none">1. Upper radiator support bracket2. Front left/right shotguns (inside fender)3. Left/right shotguns at spring tower4. Steering wheel	<ol style="list-style-type: none">5. Centerline tunnel in passenger compartment6. Front left/right frame rails7. Left/right rockers at A-pillar8. Left/right rockers at B-pillar
---	---

Συνήθεις θέσεις τοποθέτησης επιταχυνσιόμετρων

Επισημαίνεται ότι αισθητήρες επιβράδυνσης κατά τις πειραματικές δοκιμές πρόσκρουσης, τοποθετούνται όχι μόνο σε τμήματα του οχήματος, αλλά και επί χαρακτηριστικών θέσεων του ανδρείκελου (κεφαλή, θώρακας κλπ).

Επιπλέον, η καταστροφή κάποιων εκ των αισθητήρων κατά τη δοκιμή, αποτελεί σύνηθες και αναμενόμενο γεγονός.

Τύποι πρόσκρουσης




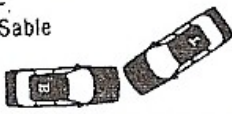

Εν γένει, η μελέτη της συμπεριφοράς ενός οχήματος σε πρόσκρουση πραγματοποιείται μέσω μοντελοποίησης (θεωρητικά μοντέλα, εξομοίωση σε H/Y) και μέσω εργαστηριακών δοκιμών που περιλαμβάνουν πληθώρα τύπων πρόσκρουσης, έτσι ώστε να εξεταστεί ο μεγαλύτερος δυνατός αριθμός «σεναρίων» που δύνανται να εμφανιστούν κατά την κίνηση του οχήματος σε πραγματικές συνθήκες .

Όπως αναφέρθηκε και στον πρόλογο, η μελέτη της απόκρισης ενός οχήματος σε πρόσκρουση αποτελεί ένα από τα πλέον εκτενή, χρονοβόρα και δαπανηρά στάδια εξέλιξής του και διεξάγεται από τον κατασκευαστή.

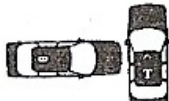




Μετά το πέρας της εξέλιξης του οχήματος από τον κατασκευαστή, πραγματοποιούνται και οι τελικές δοκιμές υπό την επίβλεψη και εποπτεία των αρμόδιων εθνικών ή διεθνών φορέων, ώστε να δοθεί έγκριση κυκλοφορίας στο όχημα. Σε κάποιες περιπτώσεις, ημιανεξάρτητοι φορείς όπως η "Euro NCAP" (European New Car Assessment Programme), πραγματοποιούν επιπρόσθετες δοκιμές ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή προστασία των καταναλωτών.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται ενδεικτικά δοκιμές πρόσκρουσης διαφόρων τύπων, που πραγματοποιήθηκαν από την εταιρία Ford Motor Company στα πλαίσια εξέλιξης ενός τύπου αερόσακου [5] :

1. A perpendicular (90-degree) barrier
2. A low and high speed rigid pole
3. A front-to-front overlap
4. An oblique front to front (three types)
5. A vehicle front to an MDB (moving deformable barrier) perpendicular
6. A vehicle front-to-side
7. A front-to-rear
8. A bumper over-ride (or truck under-ride)

Sensor Test Number	Actual Speed (mph)	Type / Configuration
1	14.0	90 Barrier
10	5.8	
11	35.3	
12	10.5	
13	7.4	
2	13.8	8" Pole Offset Left
3	34.9	
4	26.5	F-F 25% Overlap Taurus → Sable
		
5	25.2	30 L.F.-R.F. Taurus → Sable
		
15	35.3/ 35.4	90 Front ↔ NHTSA MDB
		

Crash Test Mode - 1

Sensor Test Number	Actual Speed (mph)	Type / Configuration
16	21.8/ 21.6	90 Front-Side (Both Moving)
		
8	25.3	Front-Rear Taurus → Escort
9	24.1	Sable → Sable
		
14	17.7	Bumper Over-Ride 50% Offset Right
		
6	27.7	30 L.F. Corner F. Center Taurus → Sable
		
7	37.5	30 R.F. Corner Side Wheel Sable → Taurus
		

Crash Test Mode - 2

Διάφοροι τύποι δοκιμών πρόσκρουσης επιβατηγών οχημάτων (Ford Motor Company)

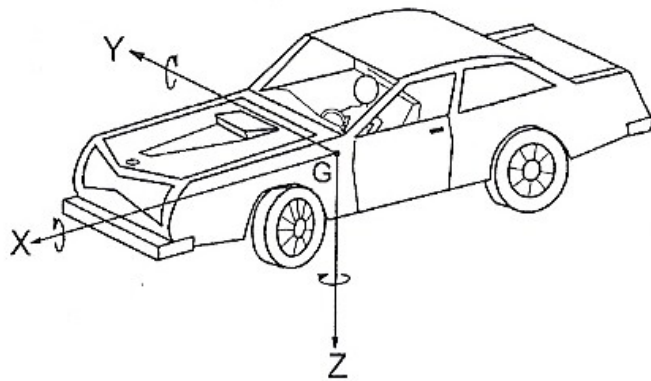
Επιταχυνσιόμετρα

Τα συνήθη επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούνται κατά την πρόσκρουση ενός οχήματος, για να ενημερώσουν το σύστημα ελέγχου προς ενεργοποίηση των μηχανισμών παθητικής ασφαλείας (αερόσακοι, προεντατήρες, προσκέφαλα κλπ) είναι κυρίως παραμορφωσιόμετρα (strain gauge) που τοποθετούνται επί της πλευρικής επιφάνειας μίας δοκού, ή πιεζοηλεκτρικού τύπου.

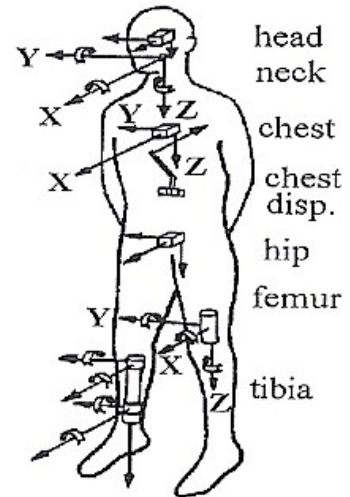
Τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιούνται στη ζώνη κρούσεως (vehicle crush zone) έχουν εύρος μέτρησης ± 2000 g και αυτά που είναι τοποθετημένα στον κινητήρα, στη μετάδοση, στο θάλαμο επιβατών και στα ανδρείκελα (crush test dummies) έχουν εύρος μέτρησης ± 2000 g. Τα πρώτα επιδεικνύουν ευαισθησία της τάξεως των 0.25 mV/g με διέγερση 10 Volt.

Επισημαίνεται ότι είναι πιθανό κάποιο ή κάποια εκ των επιταχυνσιομέτρων να καταστραφούν κατά την πρόσκρουση.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα επιταχυνσιόμετρα (διάταξη τριών μεμονωμένων επιταχυνσιομέτρων) επιλέγεται η κατά το δυνατόν ταύτιση των τριών αξόνων με τους κύριους άξονες του οχήματος. Τα συστήματα αξόνων του οχήματος και του επιβάτη φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα:



Vehicle Coordinate System



Occupant Coordinate System

Σύστημα αξόνων του οχήματος και του επιβάτη

Επεξεργασία πρωτογενούς σήματος μετρήσεως

Το πρωτογενές σήμα επιβράδυνσης $a(t)$ που δίδουν τα επιταχυνσιόμετρα, επεξεργάζεται εν γένει βάσει του προτύπου SAE J211 (“Instrumentation for Impact Tests”), ή βάσει του προτύπου ISO 6487 (“Road Vehicles – Measurement Techniques in Impact Tests - Instrumentation”). Η έξοδος της μετρητικής διάταξης $a(t)$ λαμβάνεται συνήθως σε **[g/msec]**.

Η επεξεργασία σήματος που επιλέγεται, γίνεται βάσει του προτύπου και δεν είναι η ίδια για όλες τις θέσεις μετρήσεως. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των φίλτρων απόκρισης σήματος που προτείνει το πρότυπο SAE J211. Επισημαίνεται ότι τα δύο τελευταία είναι πανομοιότυπα με αυτά του προτύπου ISO 6487 :

Band Pass Frequency Response Values For Various Channel Classes

Channel Class	f_L , Hz	a, db	f_H , Hz	b, db	f_N , Hz	c, db	d	e	g, db
							db/octave		
1000	0.1	.5, -.5	1000	.5, -1	1650	.5, -4	-9	-24	-30
600	0.1	.5, -.5	600	.5, -1	1000	.5, -4	-9	-24	-30
180	0.1	.5, -.5	180	.5, -1	300	.5, -4	-9	-24	-30
60	0.1	.5, -.5	60	.5, -1	100	.5, -4	-9	-24	-30

Χαρακτηριστικά των φίλτρων απόκρισης σήματος κατά SAE J211

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα συνιστώμενα - κατά SAE J211 - φίλτρα (channel class) για την κάθε εφαρμογή :

Channel Class Selection - SAE J211

Typical Test Measurement	Channel Class
<u>Vehicle structural acceleration for use in:</u>	
Total vehicle comparison	60
Collision simulation (for example, impact sled) input	60
Component analysis	600
Integration for velocity or displacement	180
Barrier face force	60
Belt restraint system load	60
<u>Occupant</u>	
Head acceleration	1000
Chest acceleration	180
deflection	180
Pelvis	
acceleration	1000
forces	1000
moments	1000
Femur/knee/tibia/ankle	
forces	600
moments	600
displacements	180
Sled acceleration	60
Steering column load	600
Headform acceleration	1000

Συνιστώμενα - κατά SAE J211 – φίλτρα για διάφορες εφαρμογές

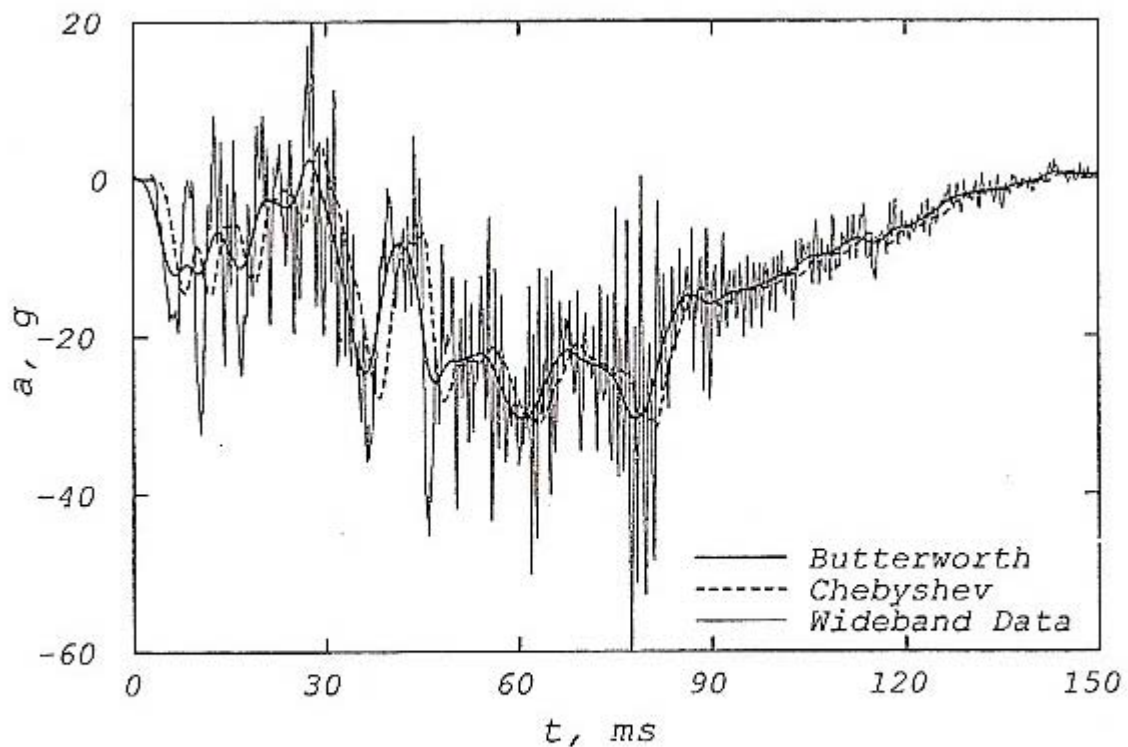
Ψηφιακά φίλτρα

Για την επεξεργασία δεδομένων $a(t)$ από την πρόσκρουση οχημάτων χρησιμοποιούνται συνήθως ψηφιακά φίλτρα τύπου Chebyshev ή Butterworth. Τα χαρακτηριστικά τους επιλέγονται έτσι ώστε να μην αλλοιώνεται το αρχικό (προεπεξεργασμένο) σήμα και κυρίως να μην υπάρχει διαφορά φάσης και αποκλίσεις στα πλάτη μεταξύ των δύο σημάτων.

Γενικότερα, βάσει του προτύπου SAE J211, το φίλτρο Butterworth ενδείκνυται για τα σήματα Channel Class 180 και 60, ενώ για τα Channel Class 1000 και 600 δύναται να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε αλγόριθμος φιλτραρίσματος.

Η NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration – ΗΠΑ) συνιστά χάριν ευκολίας τη χρήση του φίλτρου Butterworth και για τα τέσσερα Channel Class.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται ενδεικτικά το πρωτογενές σήμα (wideband data) και τα φιλτραρισμένα σήματα μέσω των δύο προαναφερθέντων φίλτρων. Το σήμα ελήφθη από επιταχυνσιόμετρο στην αριστερή κάτω οριζόντια δοκό (left rocker) ενός μεσαίου μεγέθους επιβατηγού οχήματος κατά τη μετωπική πρόσκρουσή του με ελαφρύ φορτηγό (full frontal test) με ταχύτητα 58 mph. Το πρωτογενές σήμα έχει φιλτραριστεί με “Channel Class 60” κατά SAE J211.

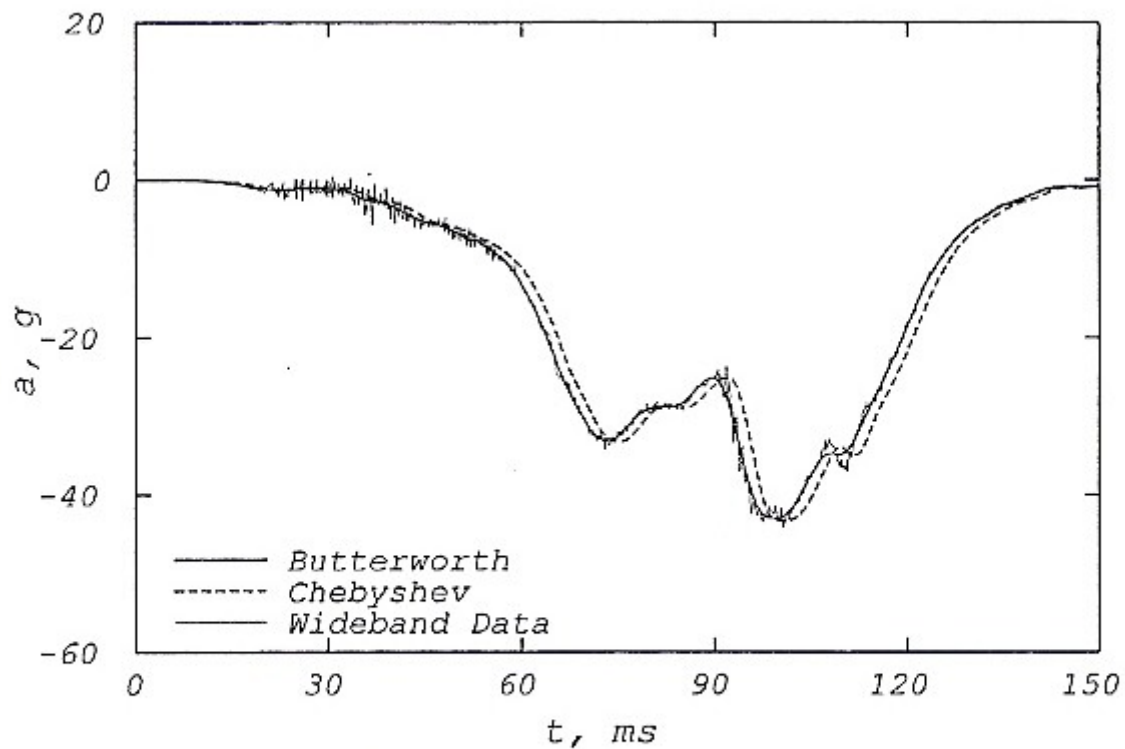


Vehicle Pulse Filtered by Channel Class 60 –
Butterworth and Chebyshev

Πρωτογενές και φιλτραρισμένα σήματα $a(t)$ από την αριστερή κάτω οριζόντια δοκό του πλαισίου ενός μεσαίου μεγέθους επιβατηγού οχήματος, κατά τη μετωπική πρόσκρουσή του με ελαφρύ φορτηγό με ταχύτητα 58 mph

Επισημαίνεται ότι η σύγκριση και η εγγύτητα του επεξεργασμένου σήματος ως προς το πρωτογενές, αφορά το σημείο εκκίνησης του σήματος, τα πλάτη στις διάφορες χρονικές στιγμές και τη διαφορά φάσης.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται τα αντίστοιχα σήματα επιβράδυνσης του αισθητήρα που βρίσκεται στο θώρακα του ανδρείκελου (driver chest), κατά την ίδια σύγκρουση :



**Chest Decel. Filtered by Channel Class 180 -
Butterworth and Chebyshev**

Πρωτογενές και φιλτραρισμένα σήματα $a(t)$ από το θώρακα του ανδρείκελου

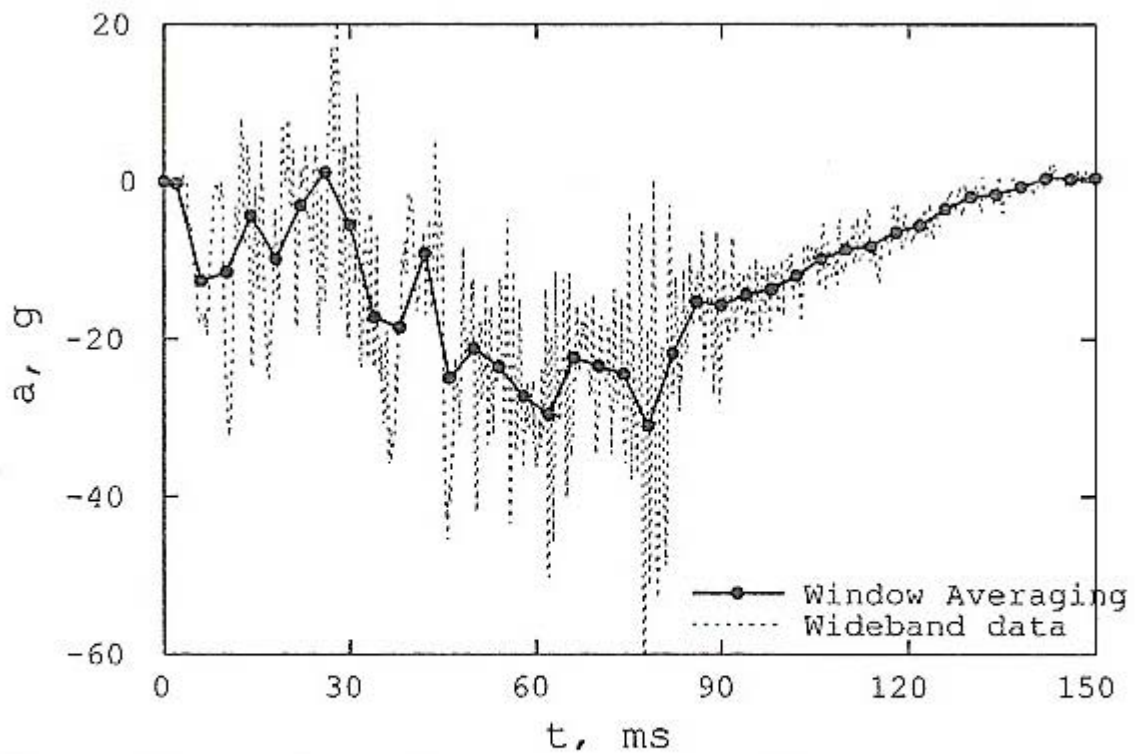
Moving window averaging

Συχνά το αρχικό σήμα φιλτράρεται μέσω “Moving window averaging” ώστε αφενός να μειωθεί ο αριθμός των διακριτών σημείων που το συνιστούν και αφετέρου να μειωθεί ο «θόρυβος» του.

Επισημαίνεται ότι σε ένα τυπικό πρωτογενές σήμα $a(t)$ πρόσκρουσης οχήματος, η συχνότητα δειγματοληψίας είναι της τάξεως του **ενός σημείου (bite) ανά 0.08 msec**, ή **12500 σημείων ανά sec** (ρυθμός δειγματοληψίας=125000 Hz). Λαμβάνοντας υπ’ όψη ότι η χρονική διάρκεια ενός κρουστικού σήματος (στην περίπτωση πρόσκρουσης οχήματος) είναι της τάξεως των **150 msec***, έπεται ότι μία τυπική καμπύλη $a(t)$ συνίσταται από **1876** (150/0.08 + το αρχικό) σημεία.

Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθενται ενδεικτικά το πρωτογενές σήμα (1876 σημεία) διάρκειας 150 msec και το αντίστοιχο επεξεργασμένο σήμα (50 σημεία) από την πρόσκρουση ελαφρού φορτηγού (truck) με 31 mph σε σταθερό εμπόδιο :

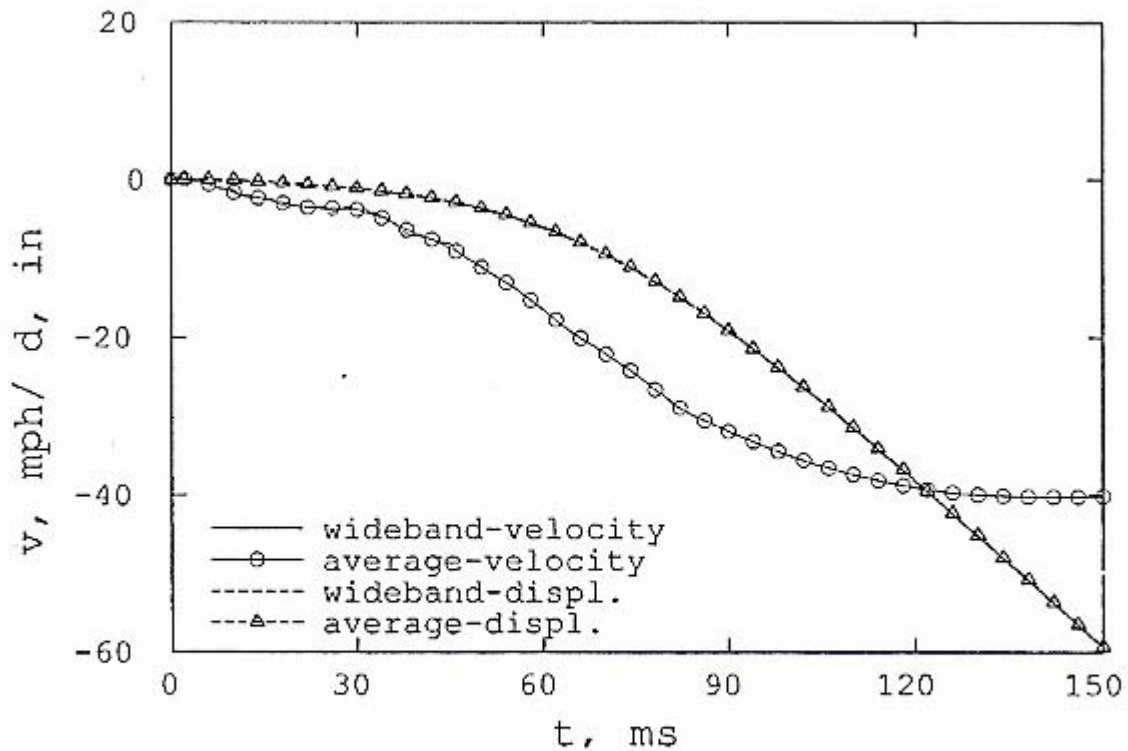
** Ενδεικτική τάξη μεγέθους. Η διάρκεια του κρουστικού παλμού εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η αρχική ταχύτητα του οχήματος, οι μηχανικές ιδιότητες των φορέων που δέχονται τα κρουστικά φορτία, ο τύπος της πρόσκρουσης κλπ.*



A Truck Crash Test Raw Data with Moving Window Averaging

Πρωτογενές και επεξεργασμένο – μέσω Moving window averaging - σήμα (συνιστάμενα από 1876 και 50 σημεία αντίστοιχα) από την πρόσκρουση ελαφρού φορτηγού με ταχύτητα 31 mph σε σταθερό εμπόδιο

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τη μείωση του αριθμού των σημείων που συνιστούν την $a(t)$, η ακρίβεια των χρονικών εκφράσεων της σχετικής ταχύτητας (1^ο ολοκλήρωμα της a) και της μετατόπισης (2^ο ολοκλήρωμα της a) παραμένει ιδιαίτερα υψηλή. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα, οι εκφράσεις του φιλτραρισμένου σήματος σχεδόν ταυτίζονται με αυτές του πρωτογενούς :



1st and 2nd Integrals of Crash Test Raw Data with Moving Window Averaging

1^ο και 2^ο ολοκλήρωμα (σχετική ταχύτητα και μετατόπιση αντίστοιχα) του πρωτογενούς και του φιλτραρισμένου σήματος $a(t)$ της παραπάνω πρόσκρουσης

Κινηματική οχήματος και επιβατών κατά την πρόσκρουση

Από το διάγραμμα $a(t)$ ενός αισθητήρα, δύνανται να εξαχθούν μέσω ολοκλήρωσης τα διαγράμματα της ταχύτητας και της μετατόπισης $v(t)$ και $d^*(t)$ αντιστοίχως και από αυτά τα ιδιαίτερος χρήσιμα διαγράμματα $v(d)$ και $a(d)$.

Επιπλέον, από τις σχέσεις της κινηματικής $v=dx/dt$, $a=dv/dt$, $a dx=v dv$, δύνανται να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την κινηματική του οχήματος και των επιβατών στο

πεδίο του χρόνου και της μετατόπισης. Παράλληλα ορίζεται και η ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα μάζας) βάσει των σχέσεων $e=\int a \, dx$ και $e=\int v \, dv$.

Ειδικότερα το διάγραμμα σχετικής ταχύτητας – σχετικής μετατόπισης $v(d)$, κυρίως των ανδρείκελων, χρησιμοποιείται ιδιαίτερος σε δοκιμές εξέλιξης αερόσακων. Αυτό που έχει ιδιαίτερη σημασία σε τέτοιες δοκιμές, είναι η συσχέτιση της κινηματικής του οχήματος με αυτές του επιβάτη.

* ή "x"

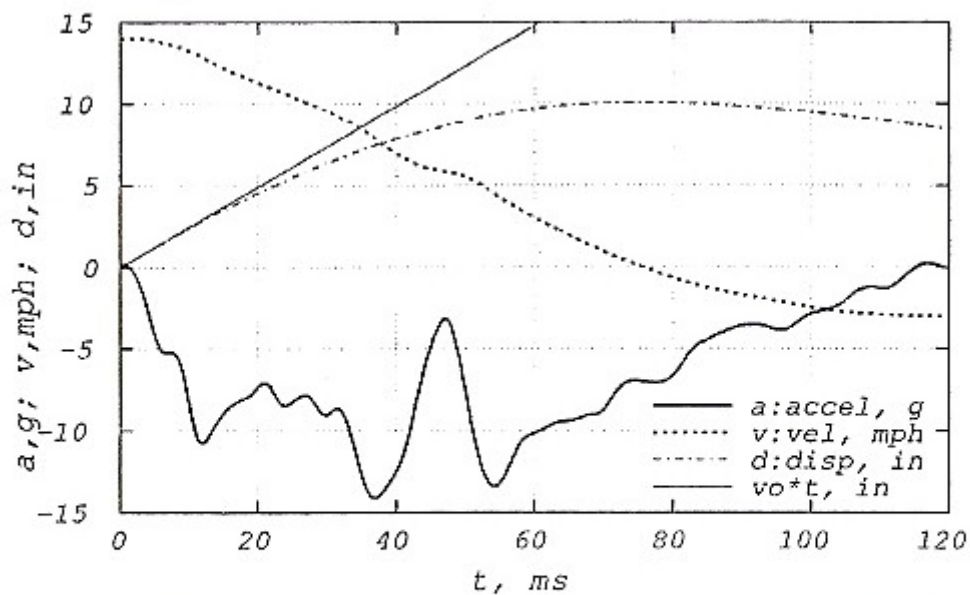
Rigid Barrier Test

Όπως προαναφέρθηκε, η μετωπική πρόσκρουση οχήματος σε σταθερό εμπόδιο αποτελεί το θεμελιώδη τύπο πειραματικής δοκιμής πρόσκρουσης για την εξέταση της απόκρισης του οχήματος και των επιβατών.

Σε αυτού του τύπου τις προσκρούσεις, το όχημα δέχεται άμεσα τον κρουστικό παλμό ο οποίος, αφού διέλθει από τα ενδιάμεσα μέρη του οχήματος (προφυλακτήρας, εμπρός δοκοί πλαισίου κλπ), καταλήγει στους επιβάτες.

Κινηματική οχήματος

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται ενδεικτικά τα διαγράμματα $a(t)$, $v(t)$, $d(t)$ ενός οχήματος, καθώς και η μετατόπιση του μη προσδεδεμένου ανδρείκελου (free-flying/unrestrained occupant) – ίση με $v_0 \cdot t$ - κατά την πρόσκρουση οχήματος μεσαίου μεγέθους και αρχικής ταχύτητας $v_0=14$ mph (22.5 km/h) σε σταθερό εμπόδιο (Rigid Barrier Test) (θέση επιταχυνσιόμετρου: Στο αριστερό Rocker):



Rocker B-Post Kinematics of a Mid-Size Car in a 14 mph Rigid Barrier Test.

$a(t)$, $v(t)$, $d(t)$ ενός οχήματος και η $d(t)$ του μη προσδεμένου ανδρείκελου, κατά την πρόσκρουση οχήματος μεσαίου μεγέθους αρχικής ταχύτητας $v_0=14$ mph σε σταθερό εμπόδιο

Επισημαίνεται ότι η χρονική στιγμή μηδενισμού της ταχύτητας αντιστοιχεί στη «σκέδαση» (elastic **rebound**) του οχήματος και την έναρξη της κίνησής του προς τα πίσω ("ταχύτητα αποχωρισμού"), με χαμηλή και περίπου σταθερή ταχύτητα (της τάξεως των -3 mph σε αυτό το διάγραμμα) μέχρι πλήρους ακινητοποιήσεως.

Στην ίδια χρονική στιγμή μεγιστοποιείται η διανυθείσα απόσταση d . Η τελική τιμή του d είναι συνήθως θετική (το όχημα ακινητοποιείται πλήρως πιο μπροστά από το σημείο $d_0=d(t=0)$ – και έστω $d_0=0$), αλλά μπορεί να είναι και αρνητική ή μηδενική.

Επισημαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση d του οχήματος περιγράφεται και με τον όρο “**Dynamic crash**” και συμβολίζεται με c και ο αντίστοιχος χρόνος ως t_m . Στην ουσία, πρόκειται για το χρόνο που αντιστοιχεί στη στιγμιαία ακινητοποίηση του οχήματος (πριν σκεδαστεί προς τα πίσω).

Ο λόγος της ταχύτητας αποχωρισμού προς την αρχική ταχύτητα, καλείται εξ' ορισμού «συντελεστής αποκαταστάσεως» (**coefficient of restitution**) και στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισούται περίπου με 0.21 (=3/14).

Κινηματική επιβάτη – Ενεργοποίηση αερόσακου

Όσον αφορά τον επιβάτη, αυτός θεωρείται πως κινείται (ως προς αδρανειακό σύστημα) με σταθερή ταχύτητα v_0 (όπου v_0 η ταχύτητα του οχήματος κατά την έναρξη της πρόσκρουσης) και την τυχαία χρονική στιγμή t έχει διανύσει απόσταση $v_0 \cdot t$. Η αρχική επιτάχυνσή του είναι $a_0=0$

Η σχετική επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση του επιβάτη σε σχέση με το όχημα (a' , v' , x' αντιστοίχως) δίδεται από τις σχέσεις:

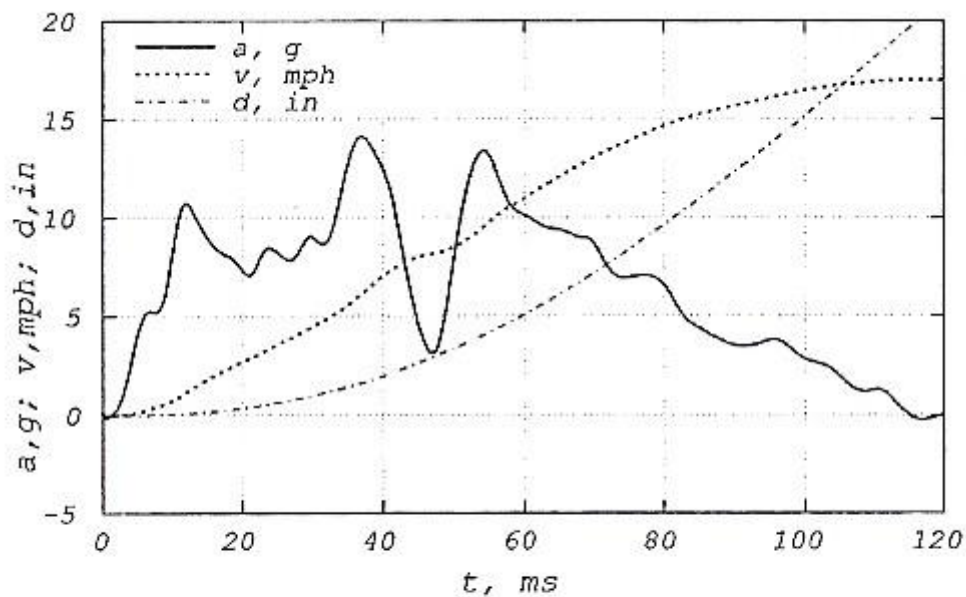
$$a' = a_{\text{occupant}} - a_{\text{vehicle}} = -a(t)$$

$$v' = v_{\text{occupant}} - v_{\text{vehicle}} = v_0 - v(t)$$

$$x' = x_{\text{occupant}} - x_{\text{vehicle}} = v_0 \cdot t - x(t)$$

Όπου a, v, x και $a_{\text{occupant}}, v_{\text{occupant}}, x_{\text{occupant}}$ η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η μετατόπιση του οχήματος και του επιβάτη αντίστοιχα, ως προς αδρανειακό σύστημα. Επισημαίνεται ότι θεωρήθηκε $a_{\text{occupant}} = \text{const} = 0$ και $v_{\text{occupant}} = \text{const} = v_0$.

Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθενται τα διαγράμματα (a' , v' , x') = $f(t)$ για την παραπάνω πρόσκρουση:



Unbelted Occupant Kinematics in a Mid-Size Sedan 14 mph Barrier Test.

$a'(t)$, $v'(t)$ και $x'(t)$ του μη προσδεμένου ανδρείκελου, κατά την πρόσκρουση οχήματος μεσαίου μεγέθους αρχικής ταχύτητας $v_0=14$ mph σε σταθερό εμπόδιο

Όπως παρατηρείται, η επιτάχυνση του ανδρείκελου είναι ίση με την επιβράδυνση του οχήματος, ενώ τα v' και x' είναι αύξουσες συναρτήσεις του χρόνου.

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν ιδιαίτερη σημασία καθώς συσχετίζουν την κίνηση του επιβάτη με την κίνηση του οχήματος, καθορίζοντας πόση απόσταση θα διανύσει σε δεδομένο χρονικό διάστημα ή σε πόσο χρόνο θα διανύσει μία δεδομένη απόσταση και συνεπώς πότε και με ποιά ταχύτητα και επιτάχυνση θα προσπέσει στο τιμόνι (steering hub).

Επομένως αυτές οι σχέσεις - και ιδιαιτέρως η σχετική μετατόπιση του επιβάτη - εμπεριέχονται στον αλγόριθμο ελέγχου των αερόσακων, βάσει των οποίων αποφασίζεται η χρονική υστέρηση ενεργοποίησης ως προς τη στιγμή της πρώτης επαφής οχήματος-εμποδίου

Ενδεικτικά αναφέρεται το κριτήριο ενεργοποίησης " 5in-30 ms " (**5in-30 ms criterion**) που σκοπός του είναι να αποτρέψει την επαφή του επιβάτη με τον αναπτυσσόμενο αερόσακο. Βάσει αυτού, η χρονική στιγμή ενεργοποίησης του αερόσακου προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπ' όψη τις ακόλουθες υποθέσεις:

- Όταν ο αερόσακος αναπτυχθεί πλήρως, ο μη προσδεμένος επιβάτης θα έχει διανύσει απόσταση 5 ιντσών (≈ 13 cm) προς τα εμπρός, εντός του θαλάμου (κατά τη μετωπική πρόσκρουση).
- Ο χρόνος πλήρους αναπτύξεως του αερόσακου είναι της τάξεως των 30 ms.
- Το βάθος ενός πλήρως ανεπτυγμένου αερόσακου είναι περίπου 10 in (≈ 25.4 cm)
- Η αρχική απόσταση κορμού επιβάτη-τιμονιού (torso-steering hub) είναι 15 in (≈ 38 cm).

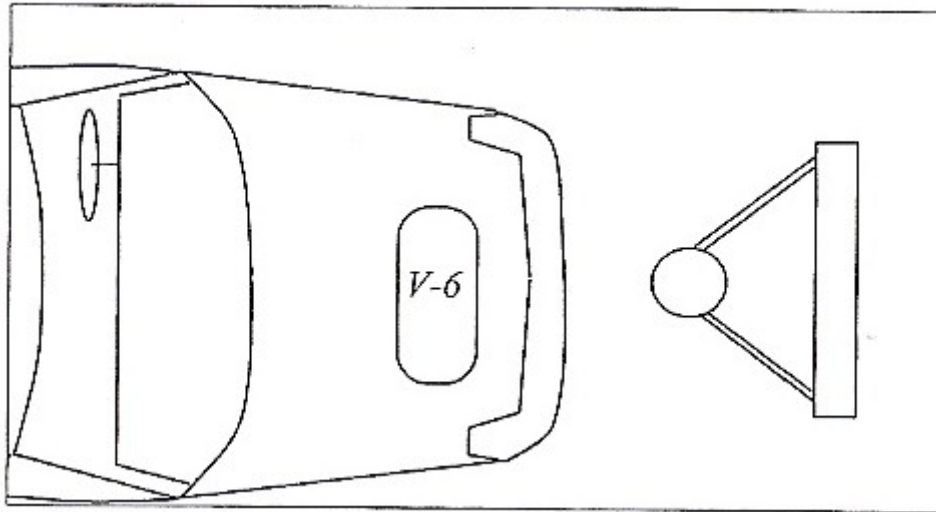
Στο παράδειγμα που εξετάστηκε παραπάνω, ο επιβάτης διανύει 5 in εντός 60 ms. Συνεπώς, βάσει του κριτηρίου, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να ενεργοποιήσει τον αερόσακο $60-30=30$ ms μετά την πρόσκρουση.

Από το παραπάνω διάγραμμα, δύναται να εξαχθούν και άλλες, ιδιαίτερες σημαντικές παρατηρήσεις. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι στη θέση που το όχημα αλλάζει κατεύθυνση κίνησης (rebound) η v γίνεται αρνητική και συνεπώς η v' λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της v_0 μέχρι τη σταθερή τιμή $v'_{\text{τελική}} = v_0 - v_{\text{τελική}} \approx 14 - (-3) \approx 17$ mph. Επομένως, αναλόγως της απόστασης του επιβάτη από το τιμόνι, ο επιβάτης θα προσκρούσει σε αυτό με ταχύτητα μικρότερη (πριν το rebound) ή μεγαλύτερη (μετά το rebound) από την αρχική του ταχύτητα v_0 .

Όπως αναφέρθηκε, σε ένα τυπικό επιβατηγό όχημα, η απόσταση του θώρακα του οδηγού (torso) από το τιμόνι (hub) είναι της τάξεως των 15 in. Επομένως η πρόσκρουση του οδηγού στο τιμόνι θα γίνει (για το παραπάνω παράδειγμα) περίπου τη στιγμή $t=100$ ms, οπότε και το όχημα κινείται ήδη προς τα πίσω και $v' \approx 16$ mph $> v_0$. Επομένως η πρόσκρουση επιβάτη-τιμονιού θα είναι δριμύτερη απ' ό,τι εάν συνέβαινε πριν τη σκέδαση του οχήματος.

Front Center Pole Test

Τα όσα ισχύουν για τη μετωπική πρόσκρουση σε σταθερό εμπόδιο (rigid barrier test), ισχύουν εν γένει και για την πρόσκρουση σε σταθερή «κολώνα» (front center pole crashtest). Μία τέτοιου τύπου πειραματική δοκιμή, απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Διάταξη δοκιμής πρόσκρουσης τύπου "Front Center Pole Test"

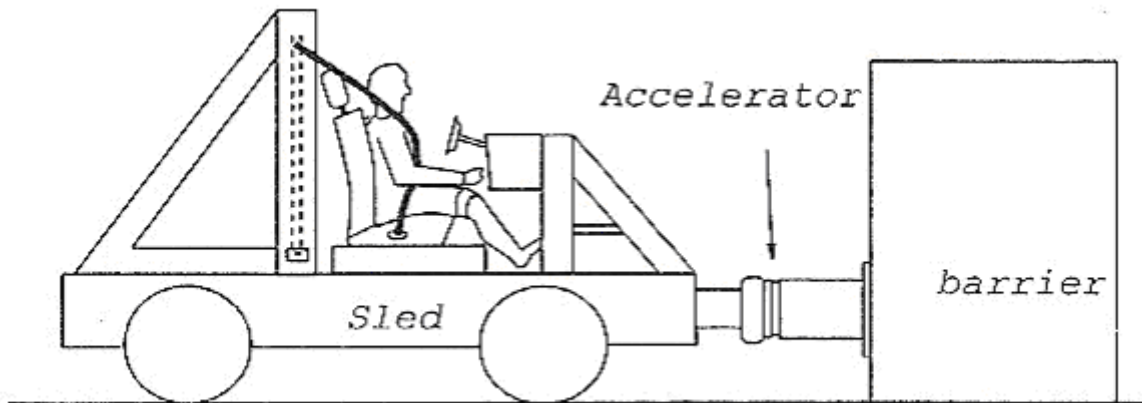
Hyge Sled Test

Η δοκιμή Hyge Sled Test χρησιμοποιείται ευρέως για τη δοκιμή επιμέρους συστημάτων παθητικής ασφαλείας (αερόσακοι, ζώνες ασφαλείας, κολώνα τιμονιού, πίνακας οργάνων κλπ) αλλά και για τη μελέτη της απόκρισης του επιβάτη, ως μία φθηνότερη και εναλλακτική δοκιμή της μετωπικής πρόσκρουσης ολόκληρου του οχήματος σε σταθερό εμπόδιο (rigid barrier test).

Όπως αναφέρθηκε, κατά τη μετωπική πρόσκρουση το όχημα δέχεται άμεσα τον κρουστικό παλμό ο οποίος εν συνεχεία διεγείρει τους επιβάτες. Στην περίπτωση του Hyge Sled Test, η τροχοφόρος εξέδρα (sled) δέχεται από ένα «έμβολο» (accelerator) έναν παρόμοιο κρουστικό παλμό. Σε αυτήν την περίπτωση, το «έμβολο» και η εξέδρα κινούνται προς μία κατεύθυνση και το ανδρείκελο προς την αντίθετη.

Σε αυτήν τη δοκιμή πρόσκρουσης ισχύουν για το "όχημα" και το ανδρείκελο σχέσεις και συμπεράσματα παρόμοια εν γένει με αυτά της δοκιμής μετωπικής πρόσκρουσης. Το βασικότερο χαρακτηριστικό της δοκιμής είναι ότι η προς τα εμπρός επιβράδυνση που εμφανίζεται κατά τη δοκιμή μετωπικής πρόσκρουσης είναι ίση με την προς τα πίσω επιτάχυνση που εμφανίζεται κατά τη δοκιμή Hyge Sled.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται σχηματικά η εν λόγω διάταξη :



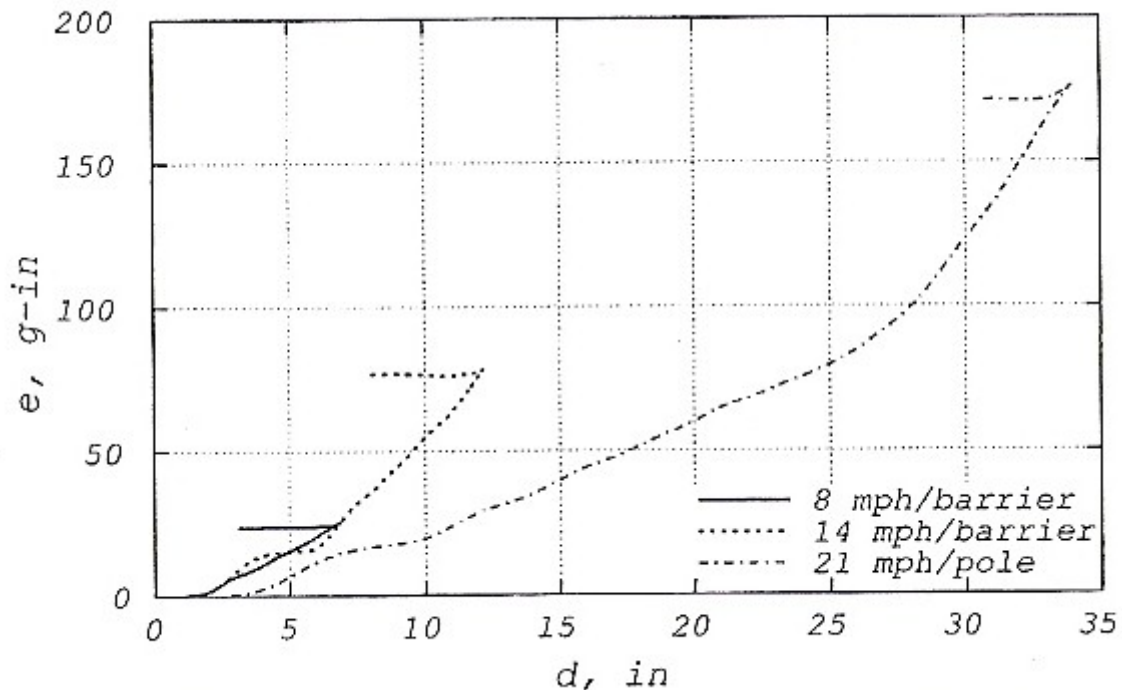
Διάταξη δοκιμής πρόσκρουσης τύπου "Hyge Sled Test"

Ειδική ενέργεια οχήματος (Vehicle energy density)

Όπως αναφέρθηκε, δύναται να οριστεί η ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα μάζας) ενός οχήματος βάσει των σχέσεων $e = \int a \, dx$ και $e = \int v \, dv$. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια μίας πρόσκρουσης, η e μπορεί να υπολογιστεί μέσω ολοκλήρωσης των δεδομένων του επιταχυνσιομέτρου.

Επιπλέον, από το διάγραμμα $e(d)$ μπορεί να εξαχθεί και η επιτάχυνση, καθώς αυτή ισούται με την κλίση του: $a = de/dx$

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται ενδεικτικά τρία διαγράμματα $e(d)$ ενός οχήματος για τρεις διαφορετικές προσκρούσεις. Η αύξηση της κλίσης αναπαριστά την αύξηση της επιβράδυνσης που οφείλεται στην αυξανόμενη αντίσταση του οχήματος καθώς εξελίσσεται χρονικά η κρούση.



Ειδική ενέργεια οχήματος κατά τη διάρκεια τριών τύπων πρόσκρουσης

Σύνοψη Κινηματικών Μεταβλητών

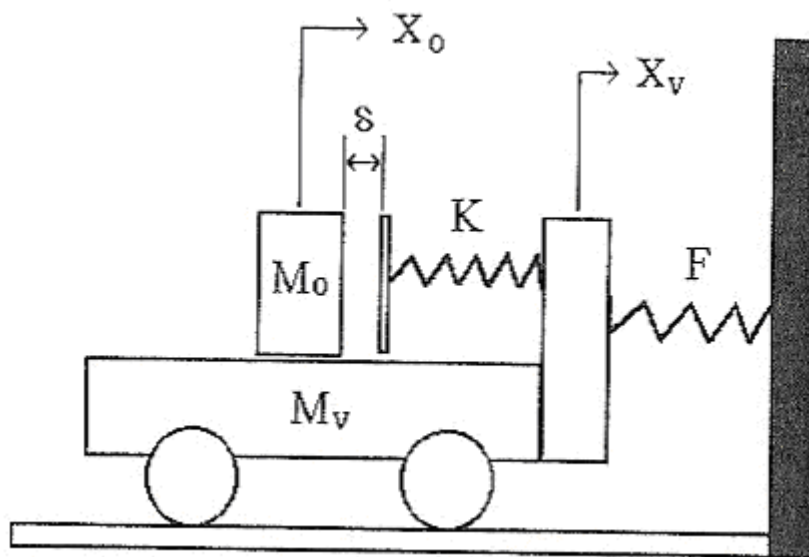
Πέραν των προαναφερθέντων μεταβλητών (επιτάχυνση, ταχύτητα, μετατόπιση), από τον κρουστικό παλμό που εμφανίζεται κατά την πρόσκρουση ενός οχήματος δύνανται να εξαχθούν και άλλες κινηματικές μεταβλητές που αφορούν στο όχημα και στους επιβάτες. Οι βασικότερες εξ'αυτών, καθώς και οι σχέσεις βάσει των οποίων ορίζονται, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα :

<i>Kinematic Variable</i>	<i>Unit</i>	<i>Expression</i>
1. <i>Acceleration</i>	ft/s^2	$a = \frac{dv}{dt}$
2. <i>Velocity</i>	ft/s	$v = \int a dt = \frac{dx}{dt}$
3. <i>Displacement</i>	ft	$x = \int v dt = \int \int a dt dt$
4. <i>Jerk</i>	ft/s^3	$j = \frac{da}{dt}$
5. <i>Energy Density</i>	$(ft/s)^2$	$e = \int_{x_0}^x a dx = \int_{v_0}^v v dv = \frac{1}{2}(v^2 - v_0^2)$
6. <i>Energy</i>	$lb \cdot ft$	$E = \frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2), \quad m: \text{mass}$
7. <i>Power</i>	$lb \cdot ft/s$	$\bar{p} = \frac{dE}{dt} = mva$
8. <i>Power Density</i>	ft^2/s^3	$p = \frac{\bar{p}}{m} = va$
9. <i>Power Rate Density</i>	$(ft/s^2)^2$	$p' = \frac{dp}{dt} = vj + a^2$

Μαθηματικά μοντέλα συστήματος οχήματος-επιβάτη-εμποδίου

Για την προκαταρκτική μελέτη της πρόσκρουσης ενός οχήματος, δύναται να χρησιμοποιηθούν μαθηματικά μοντέλα, βάσει των οποίων προκύπτουν οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς.

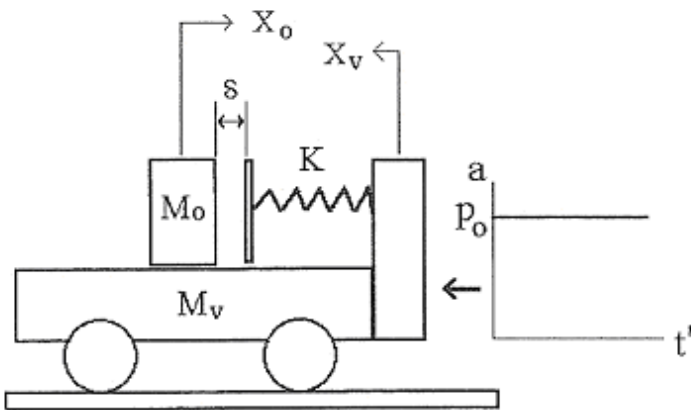
Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται ενδεικτικά ένα απλοποιημένο μηχανικό ανάλογο του συστήματος όχημα-επιβάτης-εμπόδιο (occupant-vehicle impact model) κατά τη μετωπική πρόσκρουση οχήματος. Ο οδηγός μάζας M_o απέχει απόσταση δ από το σύστημα περιορισμού (restraint system - αερόσακος) ενώ με K συμβολίζεται η «δυσκαμψία» του αερόσακου. Ουσιαστικά ο αερόσακος δρα ως μία συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ οχήματος και επιβάτη εφόσον ουσιαστικά ο επιβάτης έρχεται σε άμεση επαφή μόνο με αυτόν.



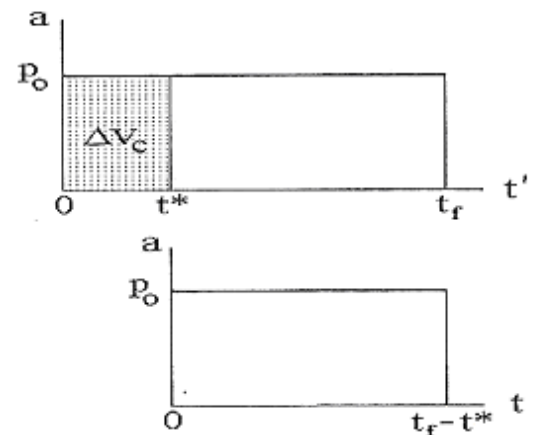
Απλοποιημένο μηχανικό ανάλογο του συστήματος όχημα-επιβάτης-εμπόδιο κατά τη μετωπική πρόσκρουση

Στην ακόλουθη εικόνα, παρίσταται το μηχανικό ανάλογο μίας δοκιμής "Sled Impact Test". Εδώ το εμπόδιο έχει αντικατασταθεί από έναν εξωτερικό παλμό σταθερής τιμής p_0 (Equivalent Square Wave, ESW).

- a_o : occupant absolute acceleration
- a_v : vehicle absolute acceleration
- $a_{o/v}$: occupant relative to vehicle acceleration
- $v_{o/v}$: occupant relative to vehicle velocity
- $x_{o/v}$: occupant relative to vehicle displacement
- k : slope of a_o vs. $x_{o/v}$ in the coupling phase (specific stiffness, g/in)
- ω : circling frequency of the restraint system, rad/sec ($= 2\pi f$)
- f : restraint natural frequency, Hz
- δ : restraint slack
- t^* : occupant-restraint contact time
- t : time variable in restraint coupling phase, starting from t^* as time zero
- Δv_c : occupant-restraint contact velocity ($= a_v t^*$)



A Sled Impact Model



A Constant Sled Excitation Pulse

Μηχανικό ανάλογο και παλμός διέγερσης μίας δοκιμής "Sled Impact Test"

Βάσει αυτού του μοντέλου, η επιτάχυνση του επιβάτη (a_o) και την επιτάχυνση του οχήματος (a_v) συνδέονται με τη σχέση

$$a_o = A \sin(\omega t + \phi) + a_v$$

όπου

$$A = - [p_o^2 + (\omega p_o t^*)^2]^{0.5}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\varphi = -\tan^{-1}(1/\omega t^*)$$

t^* ο χρόνος επαφής επιβάτη – αερόσακου

f η φυσική συχνότητα του περιοριστικού συστήματος (αερόσακος)

Ακολουθως, περιγράφεται συνοπτικά η προσέγγιση που ακολουθείται στην περίπτωση ενός πιο σύνθετου μηχανικό μοντέλου του συστήματος όχημα-επιβάτης-εμπόδιο, κατά τη μετωπική πρόσκρουση οχήματος (rigid barrier test).

Εν γένει το σύστημα δύναται να περιγραφεί είτε ως συνδυασμός ελατηρίων και αποσβεστήρων (εφόσον επιδεικνύει δυσκαμψία και απόσβεση) εν παραλλήλω (μοντέλο Kelvin), είτε μέσω μίας συνάρτησης μεταφοράς. Στη δεύτερη περίπτωση, η συνάρτηση μεταφοράς εξάγεται ως εξής:

Από την πειραματικώς μετρούμενη – μέσω επιταχυνσιομέτρων – απόκριση (επιβράδυνση) και βάσει του κρουστικού παλμού εισόδου (δηλαδή μέσω της πειραματικής καταγραφής του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου), μπορεί να εξαχθεί (μέσω υπολογισμού κατάλληλων συντελεστών - "Finite Impulse Response coefficients" - εφόσον το σύστημα που μελετάται θεωρείται γραμμικό) η συνάρτηση μεταφοράς του οχήματος, του αερόσακου, του συστήματος πρόσδεσης (restraint system), των στηρίξεων του προφυλακτήρα ή του αμαξώματος (για "body-on-frame" διάταξη) στο πλαίσιο (Body mounts) και γενικότερα όλων των συστημάτων που παραλαμβάνουν την παλμική διέγερση (επιβράδυνση) ως είσοδο και τη μεταφέρουν ως έξοδο στο πλαίσιο και στους επιβάτες.

Αυτή η συνάρτηση μεταφοράς δύναται να χρησιμοποιηθεί εν συνεχεία σε εξομοιώσεις που έχουν ως είσοδο κάποια εκ των προσεγγιστικών εκφράσεων κρουστικού παλμού.

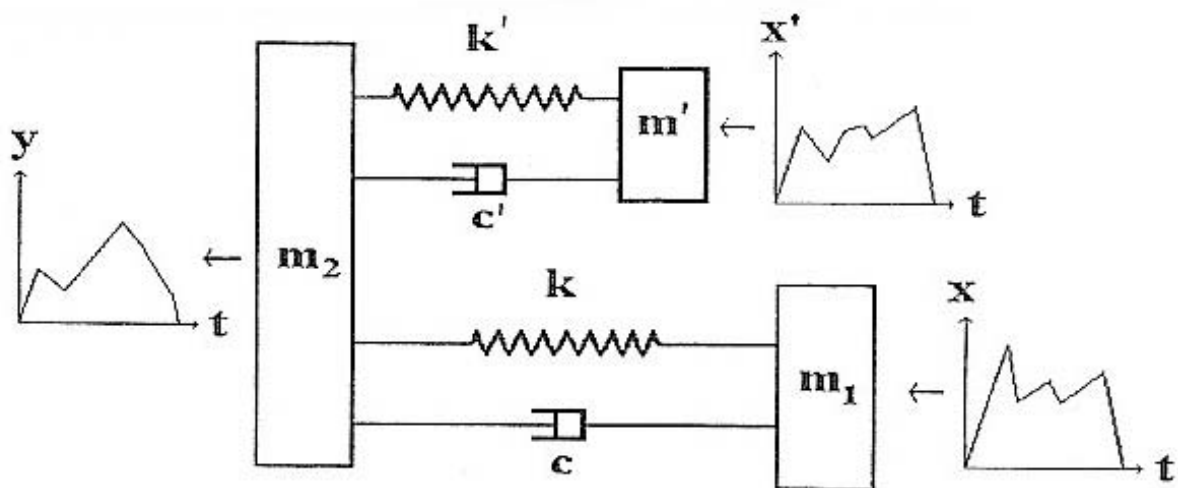
Αναλόγως της προσέγγισης που ακολουθείται, ένα σύστημα μπορεί να υποδιαιρείται σε διάφορα υποσυστήματα. Για παράδειγμα, στο παρακάτω μοντέλο που αναφέρεται σε διάταξη "body-on-frame" και σε μετωπική πρόσκρουση (frontal barrier test) η μάζα m_2 συμβολίζει το τμήμα του αμαξώματος που παραλαμβάνει τελικώς τον κρουστικό παλμό (Body rocker panels) και οι μάζες m' και m_1 το άνω εμπρός τμήμα της κατασκευής (upper front end

structure) και τις διαμήκεις δοκούς του πλαισίου (frame rails) αντιστοίχως, που παραλαμβάνουν τον κρουστικό παλμό και τον μεταφέρουν στο αμάξιωμα. Οι συναρτήσεις μεταφοράς των (k', c') και (k, c) συμβολίζουν το "ταμπλώ" (dash panel) και τα "body mounts" αντιστοίχως.

Σε αυτήν την περίπτωση, για τις εισόδους x και για την έξοδο y ισχύει

$$y = [TF]' \cdot x' + [TF] \cdot x$$

Ως είσοδοι λαμβάνονται η επιβράδυνση του πλαισίου (frame rails) και μέρος του αμαξώματος (Body rocker panels) και ως έξοδος η επιβράδυνση του κυρίως αμαξώματος.



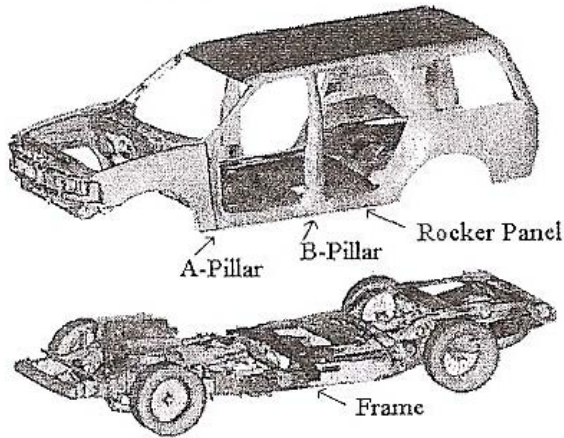
Μηχανικό ανάλογο οχήματος-εμποδίου, κατά τη μετωπική πρόσκρουση οχήματος δομής "body-on-frame"

Στην περίπτωση που μελετείτο η απόκριση του επιβάτη (occupant kinematic analysis) η μάζα m_2 θα αντιστοιχούσε στη μάζα του επιβάτη, ενώ το ένα υποσύστημα θα αναφέρετο, για παράδειγμα, στο σύστημα περιορισμού (αερόσακος, ζώνες ασφαλείας – και κολώνα τιμονιού για την πλευρά του οδηγού, καθώς εκεί στηρίζεται και ο αερόσακος) και το δεύτερο στο "knee bolster" (το κέλυφος που καλύπτει το χώρο κάτω από την κολώνα του τιμονιού). Δηλαδή, σε αυτό το σύστημα θα λαμβάνετο ως είσοδος η επιβράδυνση του οχήματος (πλασίου) και ως έξοδος η επιβράδυνση των επιβαινόντων (κεφαλή, θώρακας κλπ). Επισημαίνεται ότι και σε αυτήν την περίπτωση, η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να εξαχθεί από την πειραματική καταγραφή των σημάτων εισόδου και εξόδου.

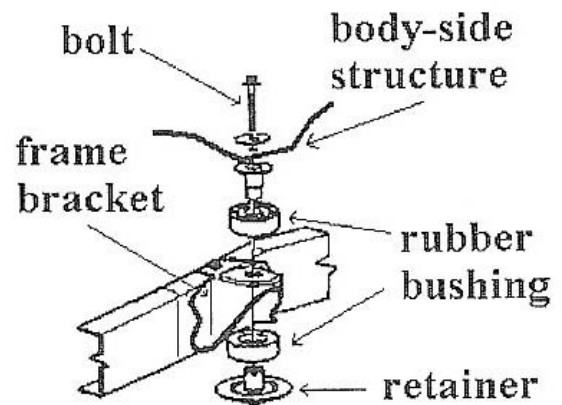
Δυναμική συμπεριφορά συνδέσμων αμαξώματος – πλαισίου κατά την πρόσκρουση οχήματος

Όπως είναι γνωστό, στη διάταξη «Body-on-chassis» το αμάξωμα (body) στηρίζεται στο πλαίσιο (chassis) μέσω ελαστικών συνδέσμων (*body mounts*) που επιτελούν διάφορες διεργασίες, όπως τη στήριξη του αμαξώματος, τη απομόνωσή του από τους κραδασμούς αλλά και τη μεταφορά των οριζόντιων κρουστικών φορτίων μίας ενδεχόμενης πρόσκρουσης.

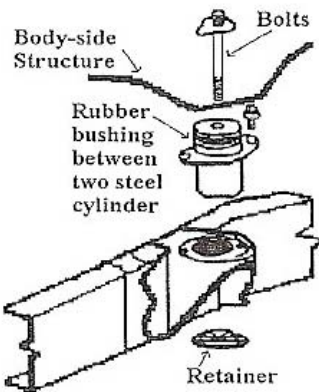
Οι δύο συνήθεις τύποι συνδέσμων που χρησιμοποιούνται, είναι ο "Type F" και ο "Type T". Η μορφή τους και οι τυπικές θέσεις τους επί του οχήματος, διακρίνονται στην ακόλουθη εικόνα :



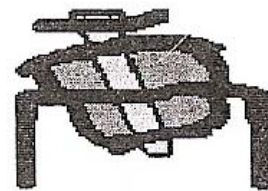
Two Body Mount Locations



Type F Body Mount



Type T Body Mount



Body Mount Deformation
(Type F)

Σύνδεσμοι πλαισίου-αμαξώματος, τύπου "Type F" και ο "Type T" και οι χαρακτηριστικές τους θέσεις επί του οχήματος

Το κύριο μέρος των συνδέσμων αυτού του τύπου συνίσταται από ελαστομερές πολυμερές που περιβάλλεται από χαλύβδινα τμήματα. Ο σύνδεσμος επιδεικνύει ελαστικότητα και απόσβεση (που οφείλεται κυρίως στο ελαστομερές) και δύναται να περιγραφεί από μία συνάρτηση μεταφοράς.

Η ικανότητα ενός συνδέσμου να μεταφέρει τον κρουστικό παλμό από το πλαίσιο στο αμάξωμα περιγράφεται από το μέγεθος "Transient Transmissibility" (T.T.) που ισούται με το λόγο επιβραδύνσεων $a_{body_max}/a_{frame_max}$.

Έχει δε ιδιαίτερη σημασία καθώς επηρεάζει άμεσα την απόκριση του θαλάμου επιβατών. Εν γένει επιδιώκεται μικρή τιμή του T.T., δηλαδή μικρή επιβράδυνση του αμαξώματος, καθώς στο αμάξωμα βρίσκεται και ο θάλαμος των επιβατών.

Επισημαίνεται ότι παρόμοιοι σύνδεσμοι απαντούν και σε άλλες θέσεις του οχήματος, όπως για παράδειγμα στα σημεία στήριξης του κινητήρα, διαμέσου των οποίων ενδέχεται να διέλθει κρουστικός παλμός.

Προσέγγιση/Χαρακτηρισμός κρουστικών παλμών

Όπως προαναφέρθηκε, το πρωτογενές σήμα επιβράδυνσης $a(t)$ συνίσταται από πολύ μεγάλο αριθμό σημείων και απαιτείται φιλτράρισμά του προτού υποστεί περαιτέρω επεξεργασία. Ωστόσο, για να μελετηθούν μαθηματικά μοντέλα πρόσκρουσης απαιτείται ως είσοδος στο σύστημα (όχημα) μία πολύ απλούστερη είσοδος $a(t)$.

Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές εκφράσεις του κρουστικού παλμού, οι κυριότερες των οποίων παρατίθενται συνοπτικά ακολούθως:

Για $a(t=0) \neq 0$:

- Average Square Wave (ASW)
- Equivalent Square Wave (ESW)
- Tipped Equivalent Square Wave (TESW)

Για $a(t=0)=0$:

- Fourier Equivalent Wave (FEW)
- Trapezoidal Wave Approximation (TWA)
- Bi-Slope Approximation (BSA)
- Harmonic Pulses

Ακολούθως αναφέρονται επιγραμματικά οι κύριες εκφράσεις $a(t)$ για κάποιους εκ των παραπάνω τύπων προσέγγισης :

ASW

$$a_{\text{average}} = 45.55 \cdot (v_0/t_m) \text{ [g]}$$

Όπου v_0 (αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης) σε [mph] και t_m (dynamic crush time) σε [ms]

ESW

$$a = 0.4 \cdot (v_0^2/C) \text{ [g]}$$

Όπου v_0 (αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης) σε [mph] και C (dynamic crush) σε [in]

FEW

$$A(t) = \sum \alpha_i \sin(i \cdot \omega \cdot t)$$

Όπου:

t_k η διάρκεια του κρουστικού παλμού

$$\omega = \pi / t_k$$

α_i συντελεστής ίσος με $\alpha_i = [2t_k / (i \cdot \pi)^2] \cdot \sum_{j=1}^n m_j \cdot [\sin(i \omega t_j) - \sin(i \omega t_{j-1})]$

$$m_j = \frac{A_j - A_{j-1}}{t_j - t_{j-1}}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στον Πρόλογο, στην παρούσα Διπλωματική Εργασία σχεδιάστηκε ένα χαλύβδινο **πλαίσιο-χωροδικτύωμα** που προορίζεται για συμβατικής τεχνολογίας διθέσιο τροχοφόρο επιβατηγό όχημα επιδόσεων/αναψυχής.

Επιπλέον σχεδιάστηκε και ένα **αμάξωμα** (body) για το εν λόγω πλαίσιο. Το αμάξωμα είναι κατασκευασμένο από κοινό εμπορικό κράμα αλουμινίου, δεν αποτελεί φορέα (πλην των αεροδυναμικών δυνάμεων που δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη) και περιβάλλει όλο το δικτύωμα και τους τροχούς εξασφαλίζοντας την προστασία των επιβατών και των μηχανικών μερών, καθώς και καλύτερα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για το όχημα.

Ο συνδυασμός χαλύβδινου χωροδικτυώματος και ανεξάρτητου αμαξώματος από ελαφρύ μεταλλικό κράμα, απαντά σε πολλά επιβατηγά οχήματα αυτής της κατηγορίας και προτιμάται για λόγους που αναπτύχθηκαν στο Θεωρητικό Μέρος.

Εν συνεχεία το πλαίσιο εξετάστηκε (εξομοίωση σε H/Y) ως προς την απόκρισή του (παραμορφώσεις) σε **στατική κάμψη και στρέψη**.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε μία εκτίμηση της στρεπτικής του δυσκαμψίας.

Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται διεξοδικότερα τα παραπάνω:

Λογισμικό Solidworks

Η σχεδίαση όλων των μερών του οχήματος, καθώς και η στατική ανάλυση του πλαισίου, κατέστησαν δυνατά μέσω της χρήσεως του λογισμικού "**Solid Works**" (έκδοση 2008) της Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Ακολούθως, παρατίθεται συνοπτικά το ιστορικό και τα χαρακτηριστικά Του εν λόγω λογισμικού.

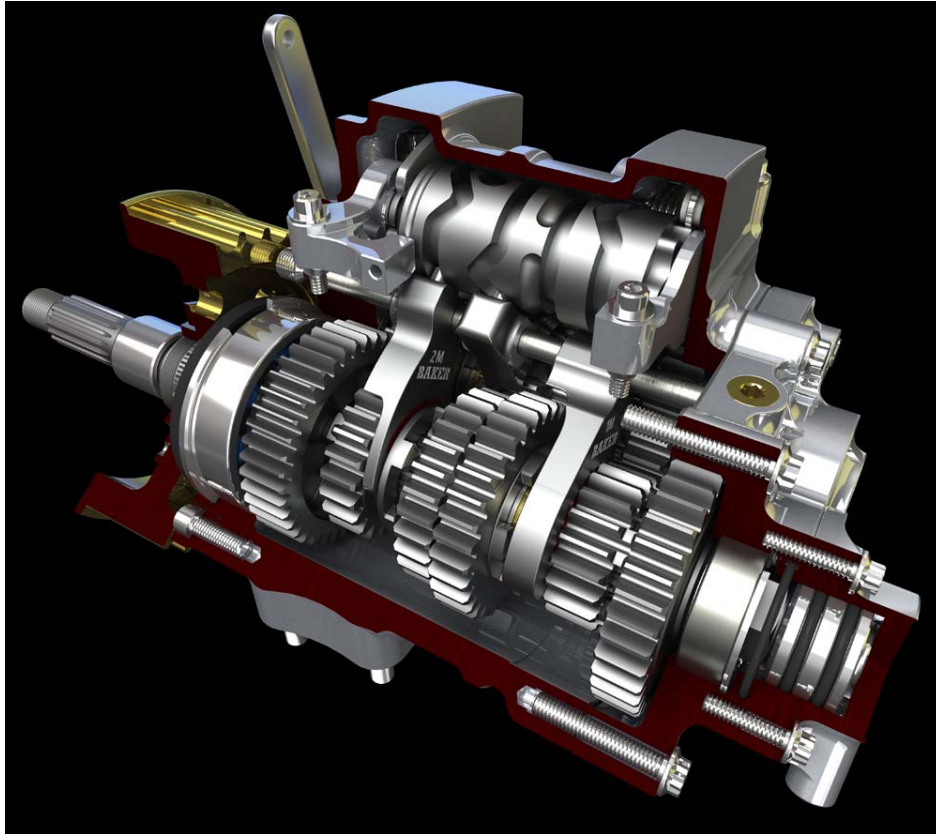
Το λογισμικό "SolidWorks" αναπτύχθηκε το 1995 από μία ομάδα μηχανικών της την εταιρία SolidWorks, που ίδρυσε το 1993 ο Jon Hirschtick στη Μασαχουσέτη των Η.Π.Α. και την ομάδα, ως ένα εξελιγμένο αλλά εύχρηστο λογισμικό σχεδίασης / μοντελοποίησης 3D CAD. Το 1997 η εταιρία αγοράστηκε από τη Dassault Systèmes.

Εν συνεχεία οι δυνατότητες το λογισμικού επεκτάθηκαν στη δυνατότητα πραγματοποίησης αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis), με αποτέλεσμα να εξελιχθεί σε ένα από τα πιο εξελιγμένα και διαδεδομένα λογισμικά CAD – CAE (Computer Aided Design – Computer Aided Engineering).

Στη σύγχρονη μορφή του, το λογισμικό SolidWorks παρέχει τη δυνατότητα τρισδιάστατου σχεδιασμού / μοντελοποίησης (με μεγάλες δυνατότητες φωτορρεαλιστικής απεικόνισης), στατικής, ρευστομηχανικής και θερμικής ανάλυσης, καθώς και πολλές λειτουργίες που αφορούν κατασκευαστικά θέματα (πχ σχεδίαση τύπων).

Συνοψίζοντας, το λογισμικό παρέχει ένα πλήρες σύνολο δυνατοτήτων που αφορούν τα περισσότερα στάδια σχεδίασης και εξέλιξης ενός προϊόντος.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται ενδεικτικά ένας μειωτήρας στροφών δίτροχου οχήματος, σχεδιασμένος μέσω του λογισμικού SolidWorks [9]:



Σχεδίαση μειωτήρα στροφών δίτροχου οχήματος, μέσω χρήσεως του λογισμικού SolidWorks

Κριτήρια Σχεδίασης

Η προκαταρτική σχεδίαση του πλαισίου έγινε βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- Χωροταξικά/εργονομικά κριτήρια
- Καμπτική και στρεπτική ακαμψία

Πιο συγκεκριμένα:

Χωροταξικά/εργονομικά κριτήρια

Η γενική διαστασιολόγηση του οχήματος σχετίζεται άμεσα με τις διαστάσεις του θαλάμου επιβατών οι οποίες και προσδιορίζονται βάσει ενός πρότυπου μοντέλου τυπικού ανθρώπου. Ένα τέτοιο πρότυπο μοντέλο παρατίθενται στην ακόλουθη εικόνα [2] :

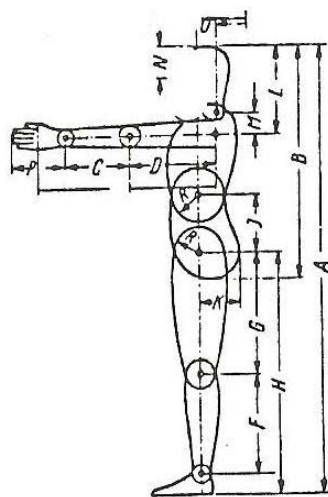


Fig. 4.4—Model dimensions of an average person

Table 4.1 Human dimensions (mm)

	1900	1750	1600
A			
B	975	900	850
C	280	255	230
D	370	335	300
E	750	685	680
F	430	390	350
G	515	475	435
H	1050	950	850
I	275	225	225
K	160	150	140
L	360	330	300
M	90	80	80
N	135	130	125
O	70	60	50
P	220	200	180
R	125	100	100
Shoulder width	430	400	370
Hip width	325	300	275

Γεωμετρία και διαστάσεις μελών πρότυπου μοντέλου τυπικού ανθρώπου

Στην παρούσα Εργασία, η σχεδίαση έγινε βάσει του μοντέλου ανθρώπου ύψους 1900 mm.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά μεγέθη του οχήματος όπως το μεταξόνιο και το μετατρόχιο, αυτά υπολογίζονται κυρίως βάσει της επιδιωκόμενης δυναμικής συμπεριφοράς του. Επειδή μία τέτοια ανάλυση ξεφεύγει από το αντικείμενο του παρόντος, θα επιλεγθούν

τιμές μεταξονίου και μετατροχίου (ίδιο και στους δύο άξονες) που απαντούν σε οχήματα αυτού του τύπου. Στην παρούσα Εργασία προτείνεται μεταξόνιο ίσο με **Wb = 2760 mm**.

Καμπτική και στρεπτική ακαμψία

Η επίδραση της επιθυμητής απόκρισης σε στατική κάμψη και στρέψη (μεγάλη ακαμψία, μικρές μετατοπίσεις) στην επιλογή της γεωμετρίας του πλαισίου, έχει ήδη αναλυθεί στο Θεωρητικό Μέρος. Συνοψίζοντας, οι κύριες παράμετροι σχεδίασης είναι οι ακόλουθες:

- Το ολικό μήκος, πλάτος και ύψος του πλαισίου
- Το μήκος, οι διατομές και ο αριθμός των επιμέρους δοκών
- Ο αριθμός και η θέση των διαγώνιων ενισχυτικών δοκών

Επιλογή Υλικών

Πλαίσιο

Το πλαίσιο συνίσταται από χωροδικτύωμα **χαλύβδινων κοίλων δοκών κυκλικής διατομής** – μία δομή που απαντά ευρέως σε συμβατικής τεχνολογίας οχήματα επιδόσεων κατασκευαστών περιορισμένης παραγωγής.

Ο χάλυβας επιλέχθη ως υλικό κατασκευής του πλαισίου καθώς, συγκριτικά με άλλα μη σιδηρούχα κράματα (πχ κράματα Al) επιδεικνύει:

- Υψηλό σ_{Δ} , E, G
- Υψηλή αντοχή σε στατική/δυναμική ελαστική και πλαστική φόρτιση
- Υψηλή ειδική αντοχή
- Χαμηλό κόστος
- Καλή συγκολλησιμότητα

Τα κύρια μειονεκτήματά του είναι:

- Δυσκολία μορφοποίησης – Απαιτείται σχετικά ακριβός εξοπλισμός
- Διάβρωση και δαπανηρή αντιδιαβρωτική προστασία (φωσφάτωση, γαλβανισμός ολόκληρης της κατασκευής)
- Δαπανηρές μεταλλοθερμικές κατεργασίες (ανόπτηση, επαναφορά κλπ)

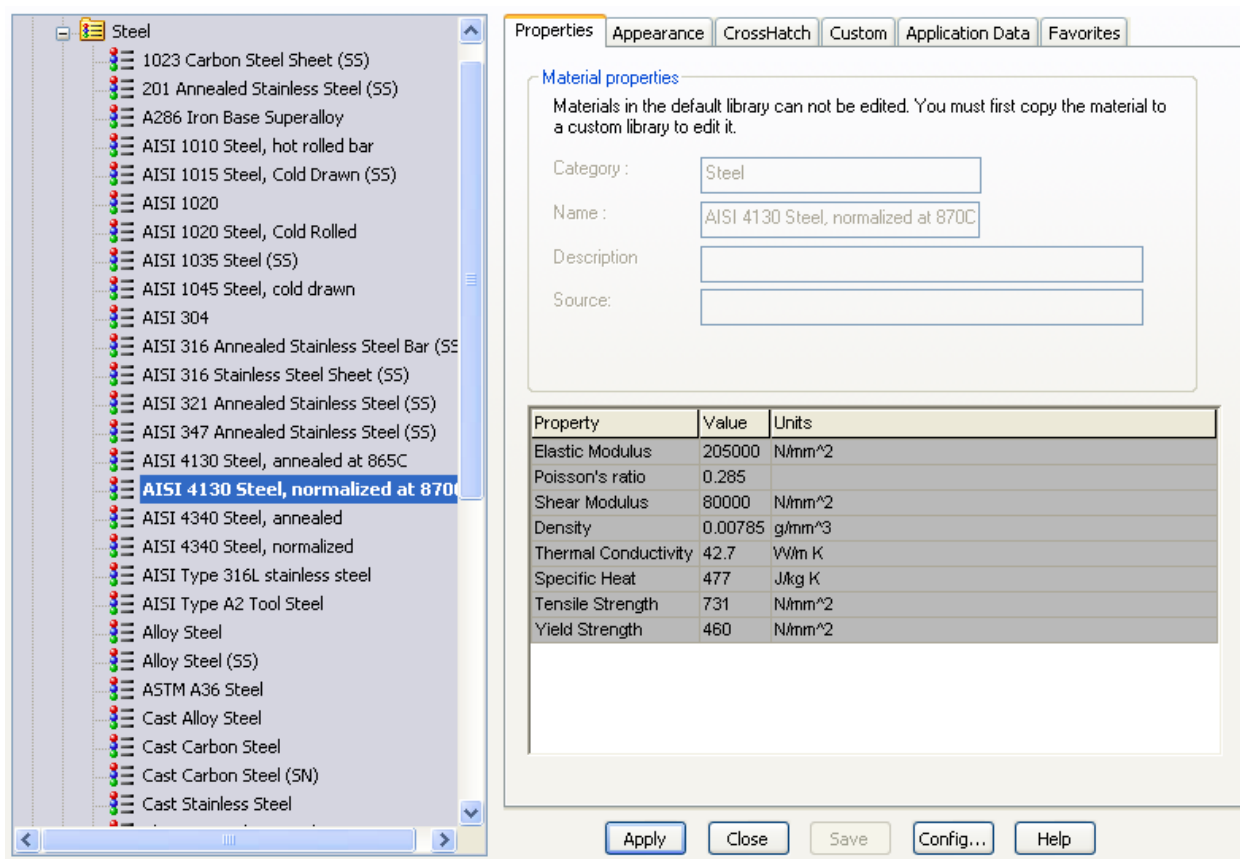
Όλες οι δοκοί είναι συγκολλημένες μεταξύ τους και θεωρείται πως σχηματίζουν ένα ενιαίο χωροδικτύωμα.

Τα επιμέρους τετραγωνικά τμήματα του δικτυώματος ενισχύονται με διαγώνιες δοκούς ώστε η τριγωνική δομή που προκύπτει να αποτρέψει την εμφάνιση μηχανισμού στα επιμέρους τμήματα – όπως αναφέρθηκε και στο Θεωρητικό Μέρος.

Στην παρούσα Εργασία επιλέχθηκε χρωμιομολυβδενιούχος χάλυβας όπως συνηθίζεται στην κατασκευή χαλύβδινων χωροδικτυωμάτων που χρησιμοποιούνται ως πλαίσια σε οχήματα.

Ο εν λόγω τύπος χάλυβα ονομάζεται κατά SAE "AISI 41xx" . Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας **AISI 4130 επαναφερμένος στους 870 °C** που διατίθεται στη βάση δεδομένων του λογισμικού SolidWorks και του οποίου οι κύριες μηχανικές ιδιότητες παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα AISI 4130 (επαναφερμένου στους 870 °C)	
E [N/mm ² = MPa]	205000
σ _Δ [N/mm ²]	460
G [N/mm ²]	80000
Λόγος Poisson	0,285
Ειδικό βάρος [g/mm ³]	0,00785
Εφελκυστική αντοχή [N/mm ²]	731

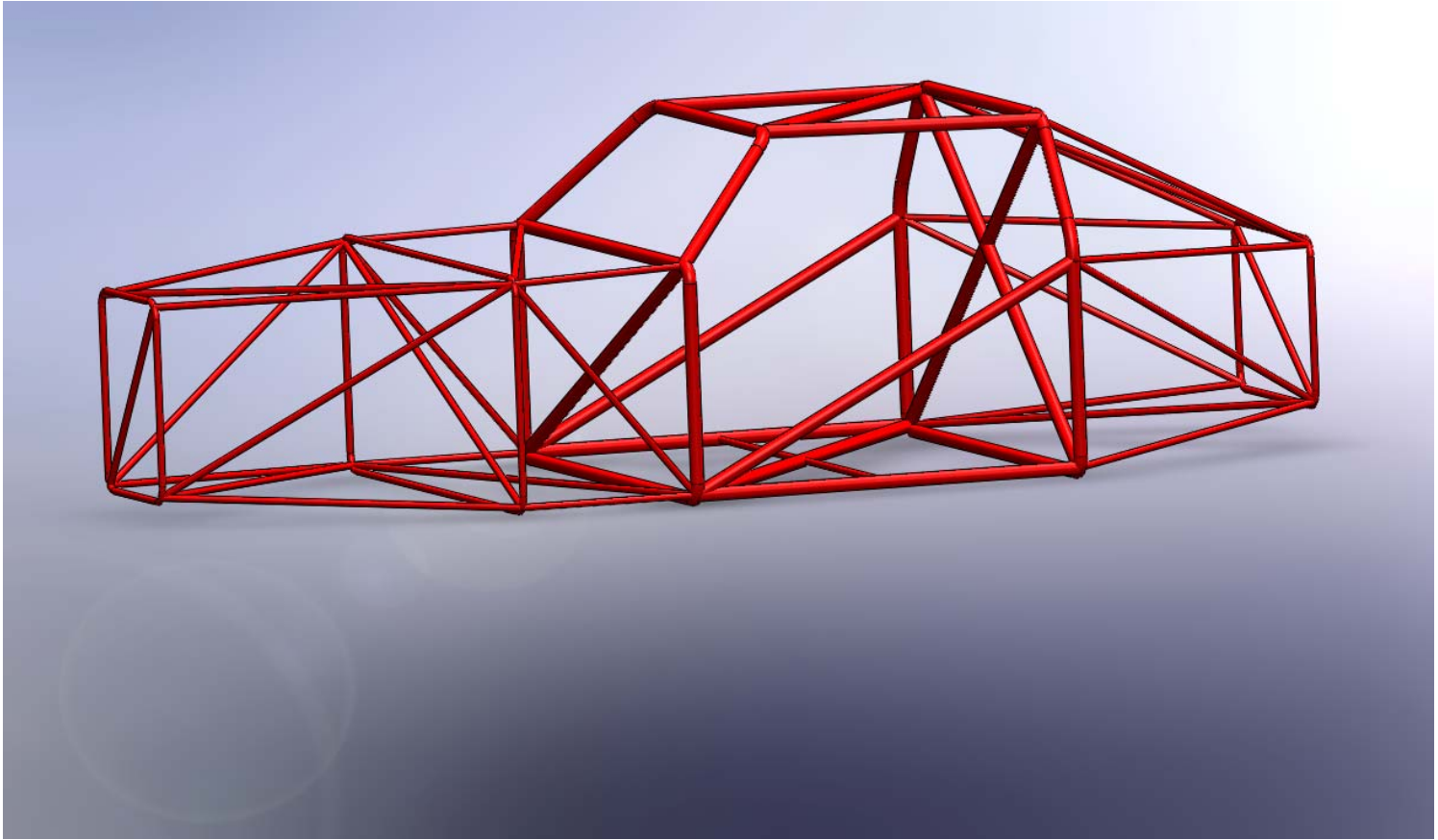


Για τη σχεδίαση του πλαισίου, επιλέχθηκαν **κυκλικές διατομές**, με τις ακόλουθες διαστάσεις:

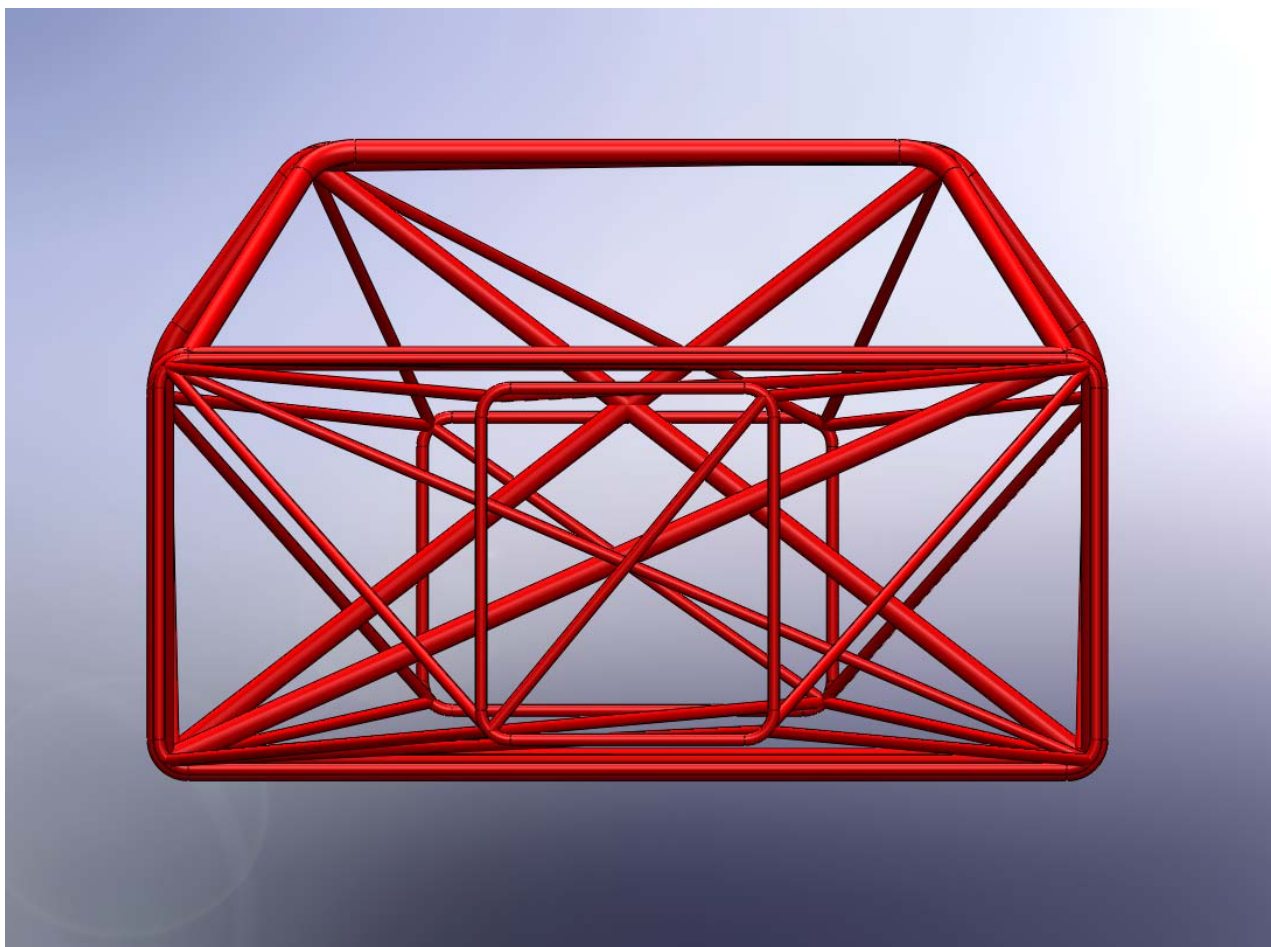
D=40 mm, t=2mm για τις δοκούς που συνιστούν το θάλαμο των επιβατών. Η διάσταση θεωρείται μεγάλη, όμως επιλέχθηκε για λόγους αντοχής καθώς αυτή η περιοχή του δικτυώματος επιτελεί και ρόλο κλωβού ασφαλείας των επιβατών ("roll cage").

D=20 mm, t=1mm για τις υπόλοιπες δοκούς. Η επιλογή αυτή έγινε διότι σε περίπτωση μετωπικής πρόσκρουσης του οχήματος, επιδιώκεται εν γένει το εμπρός τμήμα του πλαισίου να απορροφήσει τη μέγιστη δυνατή ενέργεια, προτού η παραμόρφωση φτάσει στο θάλαμο επιβατών.

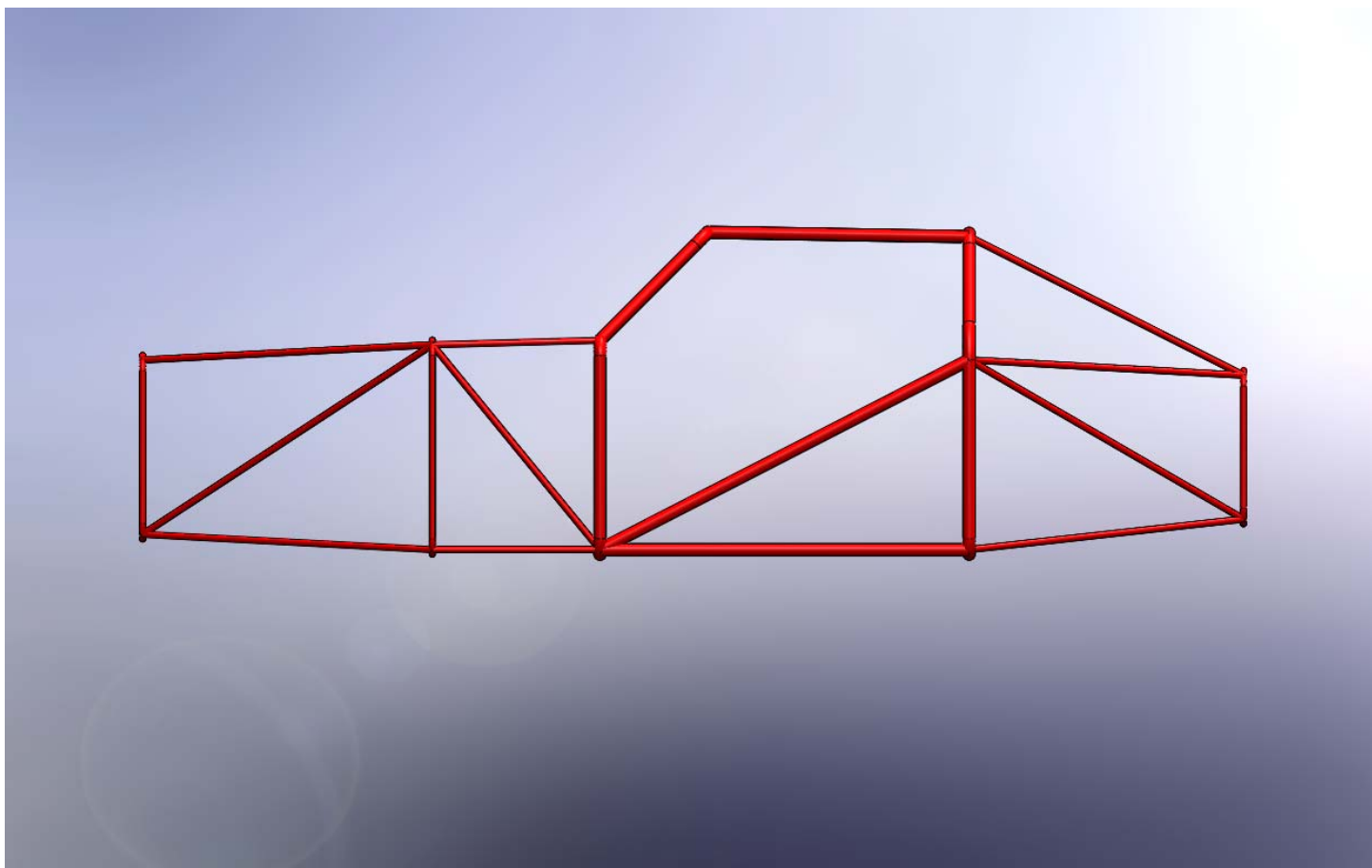
Οι διαστάσεις του πλαισίου είναι **(M×Π×Y) = (3610×1600×1050) [mm]**. Στις ακόλουθες εικόνες παρατίθεται το εν λόγω πλαίσιο:



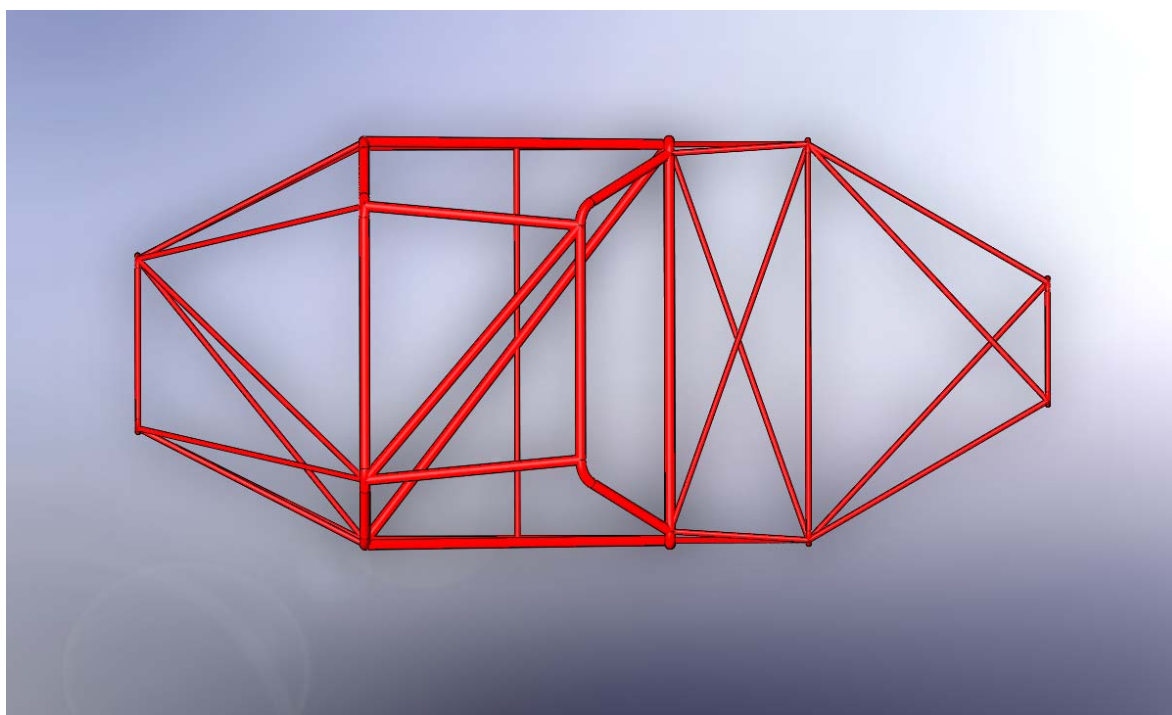
Γενική άποψη του πλαισίου



Πρόοψη πλαισίου



Πλάγια όψη πλαισίου



Κάτοψη πλαισίου

Αμάξωμα

Το αμάξωμα που περιβάλλει το πλαίσιο, συνίσταται από κοινό εμπορικό κράμα αλουμινίου και δεν αποτελεί φορέα δυνάμεων (πλην των αεροδυναμικών, τις οποίες και μεταφέρει μέσω των σημείων σύνδεσης, στο πλαίσιο και οι οποίες αμελούνται).

Το κράμα αλουμινίου επιλέχθη ως υλικό κατασκευής του αμαξώματος καθώς, συγκριτικά με άλλα κράματα (πχ χάλυβες) επιδεικνύει:

- Πολύ μικρό ειδικό βάρος (0.0027 g/mm^3 έναντι 0.0078 g/mm^3 του χάλυβα) που επιτρέπει κατασκευές χαμηλού βάρους και υψηλής δυσκαμψίας.
- Υψηλή ολκιμότητα, χαμηλό σ_{Δ} , E , G , που επιτρέπουν την εύκολη εν ψυχρώ μορφοποίησή του - ακόμη και χειρονακτικώς
- Ικανοποιητική αυτοπροστασία από διάβρωση
- Σχετικά χαμηλού κόστους (σε σχέση με το γαλβανισμό) αντιδιαβρωτική επεξεργασία (ανοδίωση) εάν αυτή κριθεί απαραίτητη
- Ικανοποιητική εμφάνιση και ποιότητα επιφανείας
- Ανακυκλώσιμο (το ανακυκλωμένο Al χρησιμοποιείται ευρέως και έχει κόστος της τάξεως του 5% του κόστους του πρωτογενούς Al)

Τα κύρια μειονεκτήματά του είναι:

- Σχετικά υψηλό κόστος (σε σχέση με το χάλυβα)

Το κράμα Al που επιλέχθηκε από τη βάση δεδομένων του λογισμικού, είναι το "6061" που χρησιμοποιείται ευρέως ως υλικό κατασκευής ελαφρών κελυφών και επιφανειών, όπως οι άτρακτοι και τα φτερά των ελαφρών αεροσκαφών.

Επισημαίνεται ότι για το πλαίσιο, το αμάξωμα και το συνολικό όχημα, η αντιστοιγία αξόνων είναι η παρακάτω:

- **Διαμήκης** άξονας πλαισίου/αμαξώματος/οχήματος → **Z** άξονας του σχεδίου
- **Εγκάρσιος** άξονας πλαισίου/αμαξώματος/οχήματος → **X** άξονας του σχεδίου
- **Κατακόρυφος** άξονας πλαισίου/αμαξώματος/οχήματος → **Y** άξονας του σχεδίου

Εσωτερικά Φορτία

Όλα τα φορτία που ελήφθησαν υπ' όψη, πλην του ιδίου βάρους, θα θεωρηθεί ότι δρουν επί του πλαισίου.

Στο πλαίσιο συνδέονται τα **δύο καθίσματα των επιβατών**, ο **κινητήρας** και η **δεξαμενή καυσίμου**. Οι διαστάσεις του **μειωτήρα** αμελούνται, όμως το βάρος του προστίθεται σε αυτό του κινητήρα. Το βάρος του αμαξώματος αμελείται*. Όλα τα παραπάνω φορτία θα θεωρηθούν χάριν απλότητας **σημειακά** με σημείο εφαρμογής στο κέντρο των αντίστοιχων εγκάρσιων δοκών του δικτυώματος.

* Μέσω του λογισμικού *SolidWorks*, υπολογίζεται πως το βάρος του αμαξώματος είναι περίπου **135 Kg** για πάχος αμαξώματος 2 mm. Ο υπολογισμός έγινε βάσει του κράματος 6061 που απαντά συχνά σε ελαφρά κελύφη (άτρακτοι και φτερά ελαφρών αεροσκαφών κλπ). Βάσει της βιβλιοθήκης του λογισμικού, το ειδικό βάρος αυτού του κράματος είναι 0,0027 g/mm².

Ιδιον βάρος δικτυώματος

Μέσω του λογισμικού, υπολογίζεται ότι το βάρος του ισούται με **W_{FRAME} ≈ 78.81581 Kg**.

Η τιμή αυτή θεωρείται αρκετά χαμηλή δεδομένων των διαστάσεων του πλαισίου. Επισημαίνεται ότι για το χάλυβα θεωρήθηκε ειδικό βάρος 0,00785 g/mm³.

Επιβάτες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην παρούσα η σχεδίαση του οχήματος έγινε βάσει πρότυπου ανθρώπινου μοντέλου ύψους 1900 mm. Θα θεωρηθεί συνεπώς ότι ο εν λόγω επιβάτης έχει μάζα της τάξεως των **90 Kg**.

Κινητήρας / Μειωτήρας

Ως κινητήρας του υποτιθέμενου οχήματος επελέχθη ο κινητήρας "2ZZ-GE" της Toyota Motor Corporation.

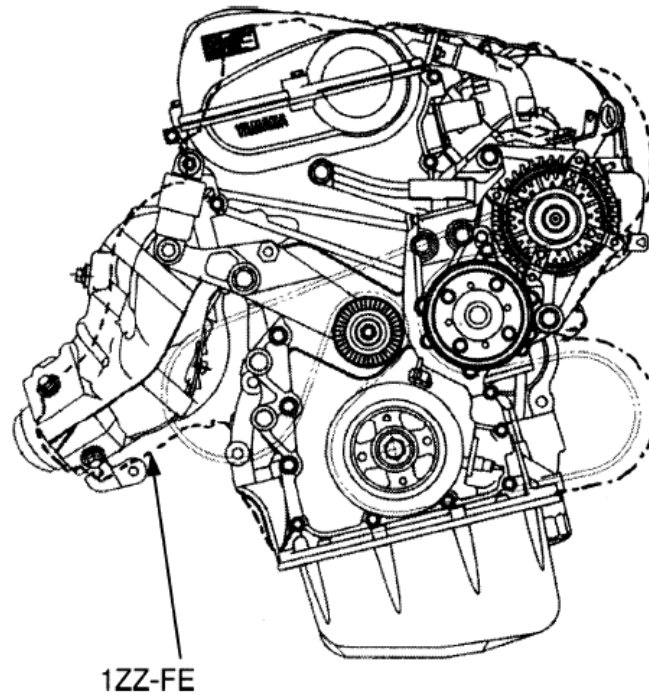
Η επιλογή του έγινε κυρίως λόγω της την υψηλής μηχανικής ισχύος που αποδίδει σε σχέση με το βάρος του. Επιπλέον ο συγκεκριμένος κινητήρας απαντά και σε άλλα οχήματα συναφούς προσανατολισμού χρήσεως. Παράλληλα είναι και ιδιαιτέρως υψηλόστροφος, ενώ τα χαρακτηριστικά του πλησιάζουν αυτά των κινητήρων δίτροχων οχημάτων, γεγονός που οφείλεται στο ότι σχεδιάστηκε από κοινού με τη Yamaha Corporation.

Πρόκειται για έναν τετρακύλινδρο εν σειρά κινητήρα Otto, με όγκο εμβολισμού 1795 cm³, με χαρακτηριστικά εμβόλου 82 mm (bore - διάμετρος) - 85 mm (stroke - διαδρομή), που αποδίδει –αναλόγως της εφαρμογής – μέγιστη μηχανική ισχύ της τάξεως των 135 Kw (≈ 180 hp) στις 7500+ rpm. και μέγιστη ροπή στρέψεως της τάξεως των 180 N·m. Πρόκειται δε για ιδιαιτέρως υψηλόστροφο κινητήρα, για τα δεδομένα των τετράτροχων οχημάτων (μέγιστη γωνιακή ταχύτητα ατράκτου της τάξεως των 8500 rpm).

Το σώμα ("μπλοκ") και η κυλινδροκεφαλή του κινητήρα είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου με αποτέλεσμα η μάζα του (dry weight) να είναι περίπου **115 kg** – ιδιαιτέρως χαμηλή. Οι διαστάσεις του είναι οι ακόλουθες:

$$(\text{Μήκος} \times \text{Πλάτος} \times \text{Ύψος}) = 652 \times 608 \times 659 \text{ [mm]}$$

Στην ακόλουθη εικόνα διακρίνεται το περίγραμμα (outline) του εν λόγω κινητήρα, καθώς και το περίγραμμα του προγενέστερου και ογκωδέστερου κινητήρα "1ZZ-FE" [8]:



Engine Outline

Περίγραμμα του κινητήρα "2ZZ-GE" της Toyota Motor Corporation.

Ως μειωτήρας επελέχθη ο μειωτήρας της σειράς "C-Series" και συγκεκριμένα ο "C 64" της Toyota Motor Corporation, που ενδείκνυται για το συγκεκριμένο κινητήρα. Έχει έξι (6) σχέσεις μετάδοσης, είναι χειροκίνητος (manual) και το κέλυφός του είναι κατασκευασμένο από κράμα αλουμινίου, με αποτέλεσμα η μάζα του να είναι περίπου **40 kg**.

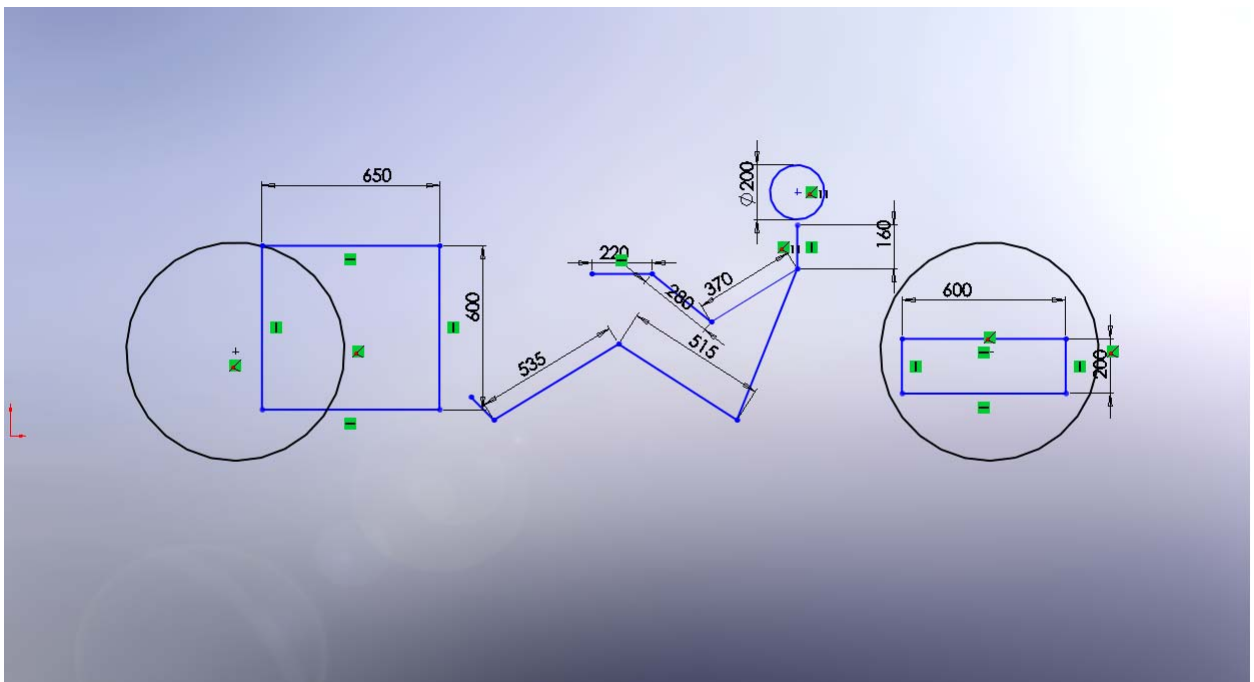
Δεξαμενή καυσίμων

Η συνήθης χωρητικότητα καυσίμου ενός οχήματος αυτών των διαστάσεων, που φέρει κινητήρα που αποδίδει μέγιστη ισχύ 135 kw, είναι της τάξεως των 60 lt. Αμελώντας το καθαρό βάρος της δεξαμενής και θεωρώντας ότι το καύσιμο (C_8H_{18}) έχει πυκνότητα περίπου ίση με 0.703 g/mL, τότε η μάζα του καυσίμου θα ισούται με **42,18 kg**.

Θεωρώντας χάριν απλότητας πως η δεξαμενή έχει παραλληλεπίπεδο σχήμα, προτείνονται οι ακόλουθες διαστάσεις της (πάχος τοιχωμάτων αμελείται):

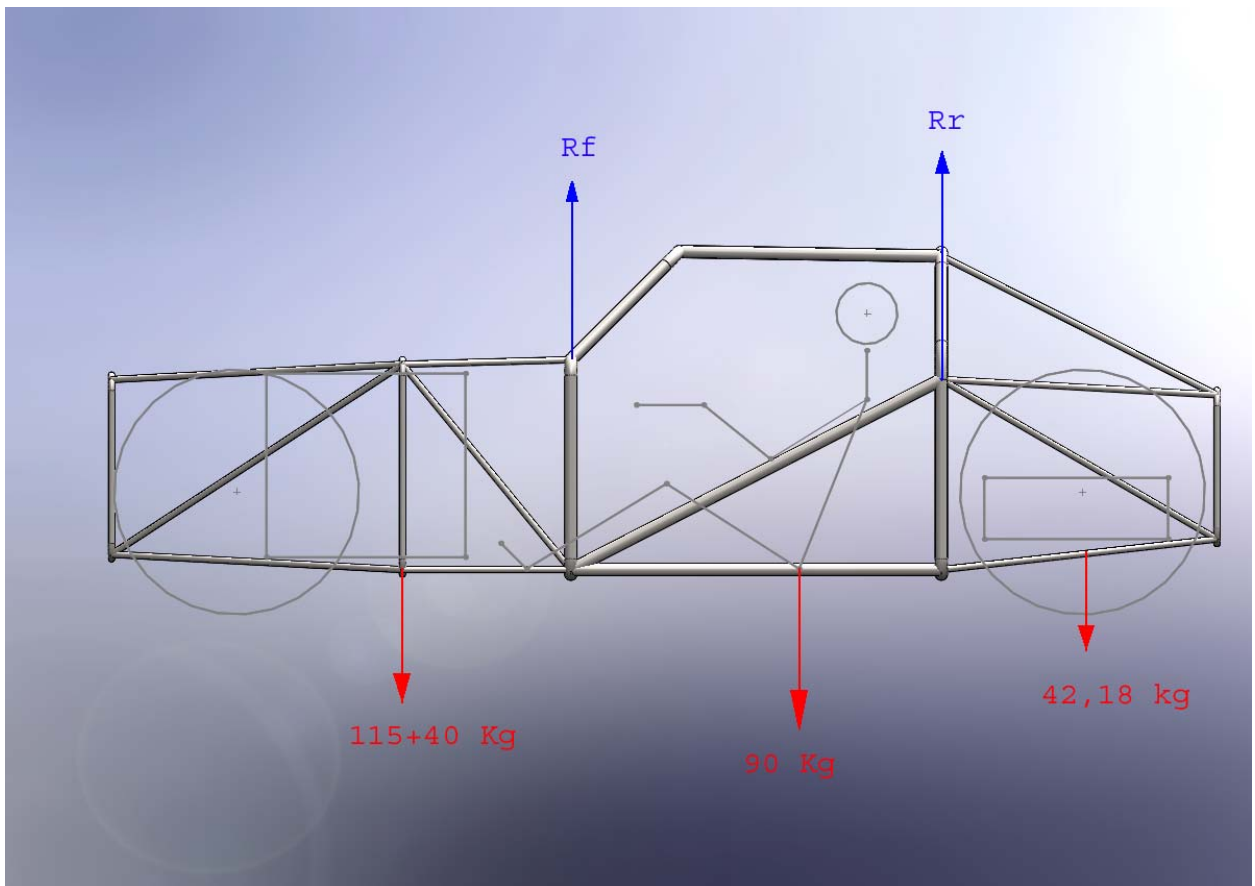
$$(\text{Μήκος} \times \text{Πλάτος} \times \text{Ύψος}) = 600 \times 500 \times 200 \text{ [mm]} = 60 \cdot 10^6 \text{ [mm}^3\text{]} = 60 \text{ lt.}$$

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται οι διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων που συνιστούν το όχημα, καθώς και η σχετική τους θέση ως προς το πλαίσιο και το αμάξωμα:



Διαστάσεις των επιμέρους τμημάτων του οχήματος και σχετική θέση τους ως προς το πλαίσιο και το αμάξωμα

Τα εσωτερικά φορτία, καθώς και τα σημεία όπου θεωρείται ότι ασκούνται, φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα:



Τα εσωτερικά φορτία και οι θέσεις (σημεία) στα οποία θεωρείται ότι δρουν

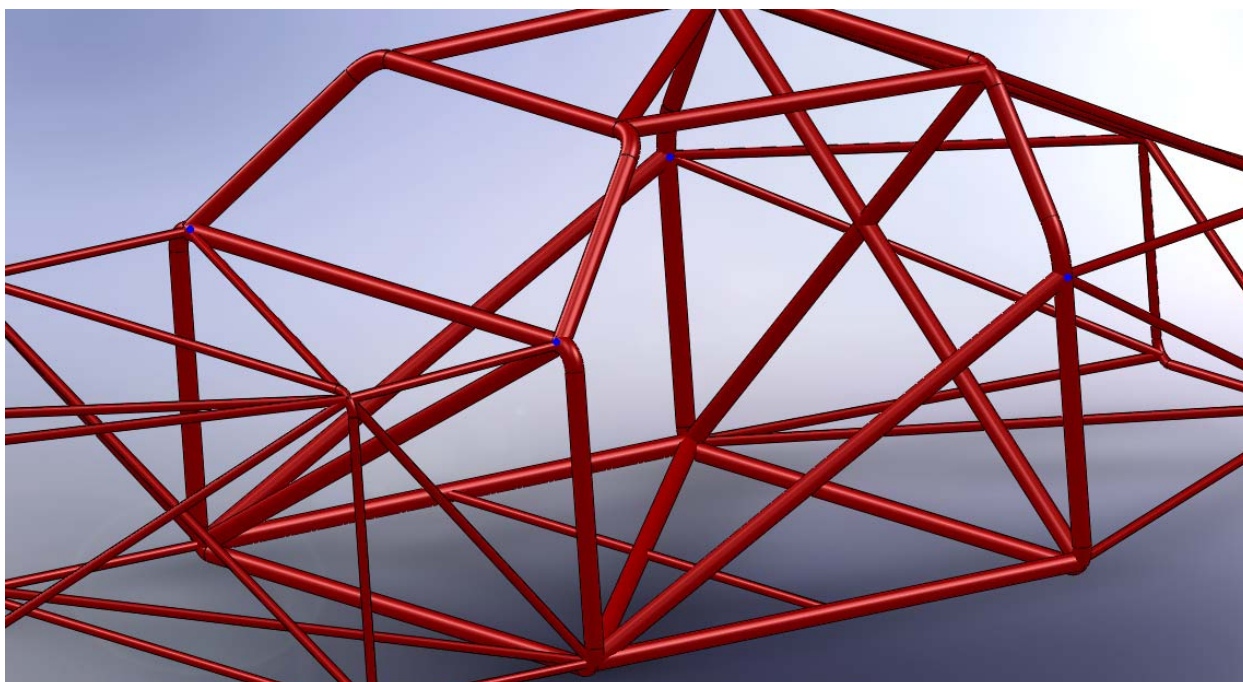
Στατική Ανάλυση

Όπως αναφέρθηκε, θα πραγματοποιηθεί στατική ανάλυσή του χωροδικτυώματος σε δύο εκ των συνηθών τύπων καταπόνησης που απαντούν κατά τη χρήση ενός οχήματος - σε κάμψη (Bending Case) και σε στρέψη (Torsion case). Περισσότερα για τη στατική ανάλυση, έχουν αναφερθεί στο Θεωρητικό Μέρος, αλλά και σε προηγούμενη εργασία [4].

Σημεία στηρίξεως πλαισίου

Τα εσωτερικά φορτία στην περίπτωση της καμπτικής φόρτισης έχουν κατακόρυφη διεύθυνση και συνεπώς μεταφέρονται από το πλαίσιο στο ζεύγος ελατηρίου/αποσβεστήρα μέσω της επαφής τους (attachment point), καθώς οι βραχίονες της ανάρτησης σε αυτού του τύπου τα οχήματα (ανεξάρτητη ανάρτηση με βραχίονες "A-arms") κινούνται ελεύθερα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Εν συνεχεία, μέσω της πλύμνης του τροχού, του σώτρου και του ελαστικού επισώτρου, φτάνουν στο έδαφος.

Αυτά τα **τέσσερα** σημεία επαφής επιλέγονται ως **σημεία στηρίξεως (εδράσεως) του πλαισίου**. Για λόγους που δε σχετίζεται με το παρόν, τα σημεία αυτά τίθενται στις θέσεις που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Για λόγους αντοχής, τα ακριβή σημεία που ετέθησαν είναι αυτά όπου τέμνονται οι ενισχυτικές δοκοί :



Οι τέσσερις θέσεις εδράσεως του πλαισίου (με μπλε χρώμα)

Εν γένει, θεωρώντας τον τροχό (σώτρο, πλύμνη, ελαστικό επίσωτρο) ακίνητο και εφόσον το πλαίσιο δύναται να στραφεί μόνο περί τον εγκάρσιο άξονα, αλλά όχι περί τον διαμήκη (λόγω συμμετρίας φορτίων*), τότε για τα σημεία στηρίξεως θα ισχύει

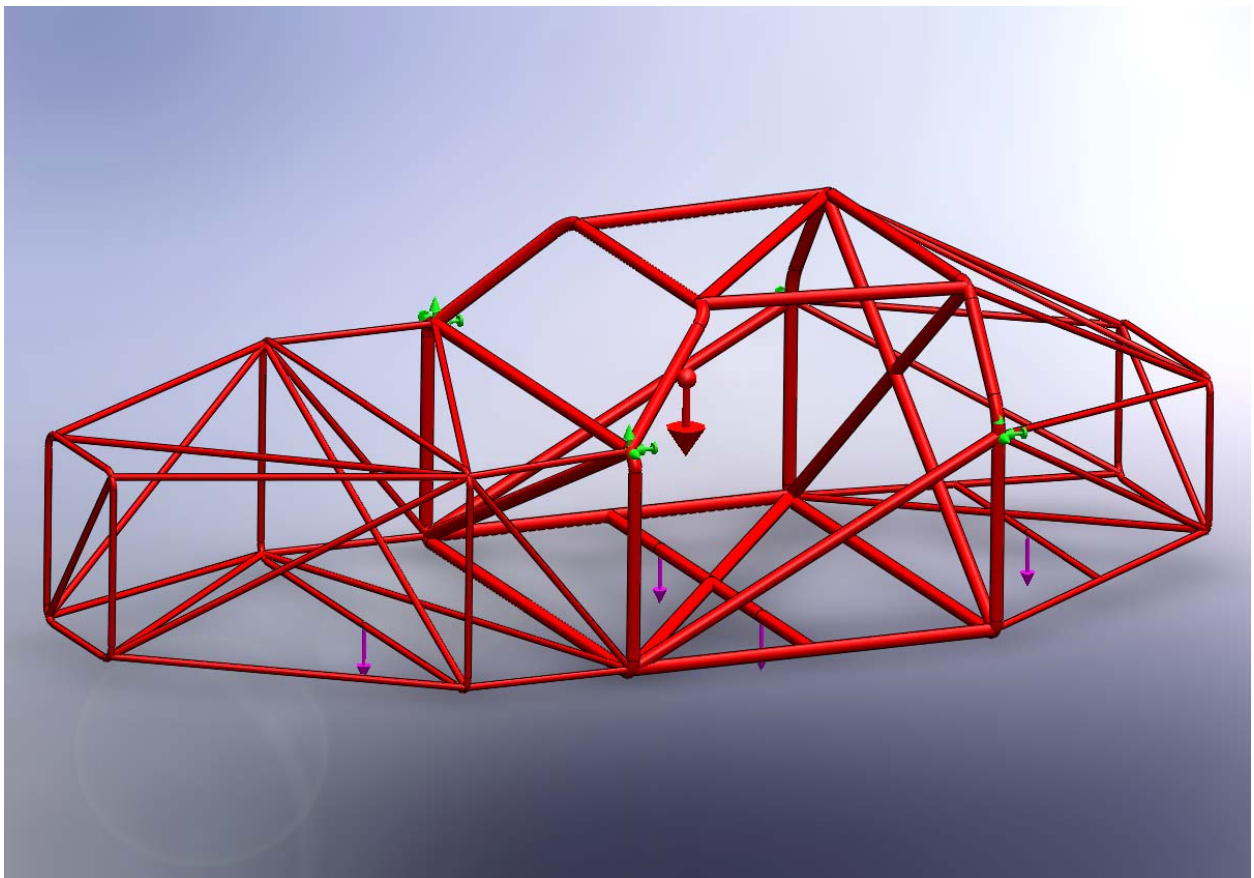
Μετατοπίσεις : $U, W \neq 0, V \approx 0$

** τα φορτία δρουν σημειακά και συμμετρικά ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του πλαισίου, όμως το πλαίσιο – και συνεπώς η κατανομή βάρους - δεν είναι απολύτως συμμετρικό ως προς το διάμηκες επίπεδο, λόγω διαφορετικής τοποθέτησης των ενισχυτικών δοκών.*

Κάμψη λόγω ιδίου βάρους

Τα εσωτερικά φορτία που δρουν στο πλαίσιο αναφέρθηκαν διεξοδικώς στις παραπάνω παραγράφους.

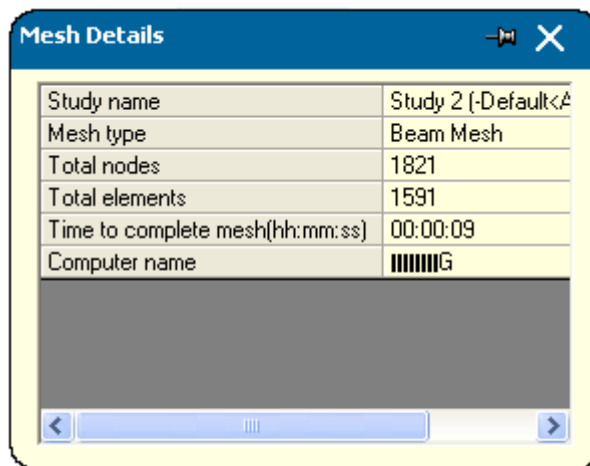
Τα σημεία στήριξης και τα δρώντα επί του πλαισίου φορτία παρατίθενται στη ακόλουθη εικόνα:



Τα σημεία στήριξης και τα δρώντα επί του πλαισίου φορτία

Το κόκκινο διάγραμμα συμβολίζει το ίδιο βάρος του πλαισίου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται ακολούθως. Επισημαίνεται ότι στις ακόλουθες κατανομές μετατοπίσεων και τάσεων, απεικονίζεται ταυτόχρονα και το **παραμορφωμένο σχήμα** του πλαισίου σε **πραγματική κλίμακα**.

Ο αριθμός των κόμβων και των πεπερασμένων στοιχείων που παράγονται κατά την **πλεγματοποίηση**, παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

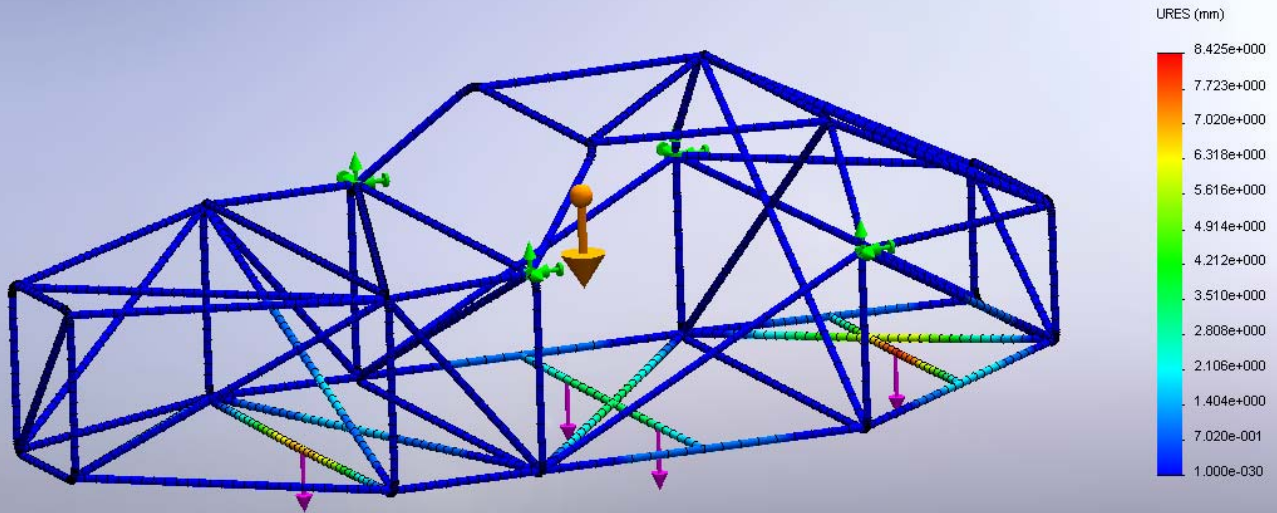


Αποτελέσματα

Μετατοπίσεις (URES)

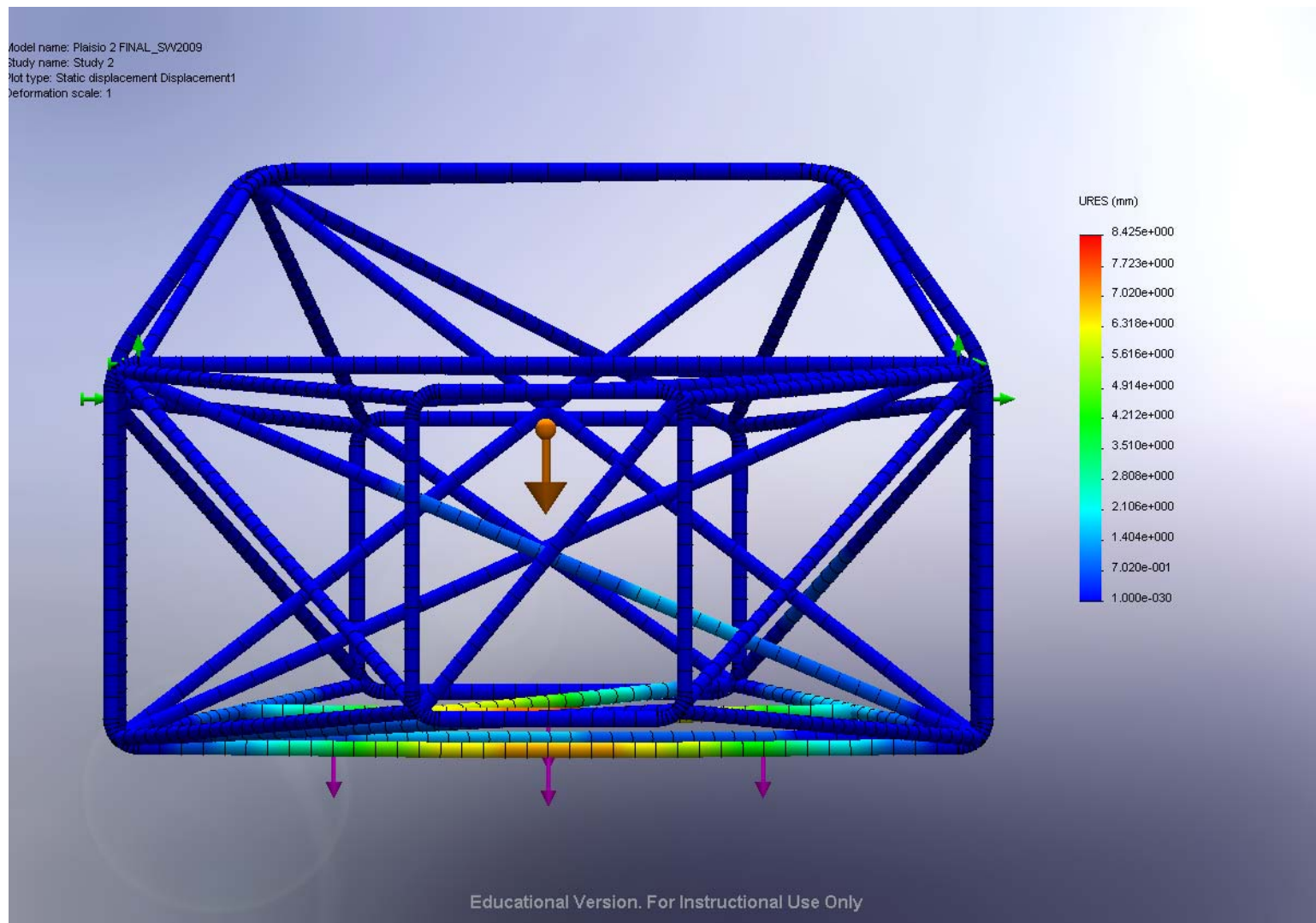
Οι συνιστάμενες μετατοπίσεις URES [mm] των κόμβων καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα του πλαισίου, παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :

Model name: Plaisio 2 FINAL_SW2009
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



Educational Version. For Instructional Use Only

Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ιδίου βάρους σχήματος



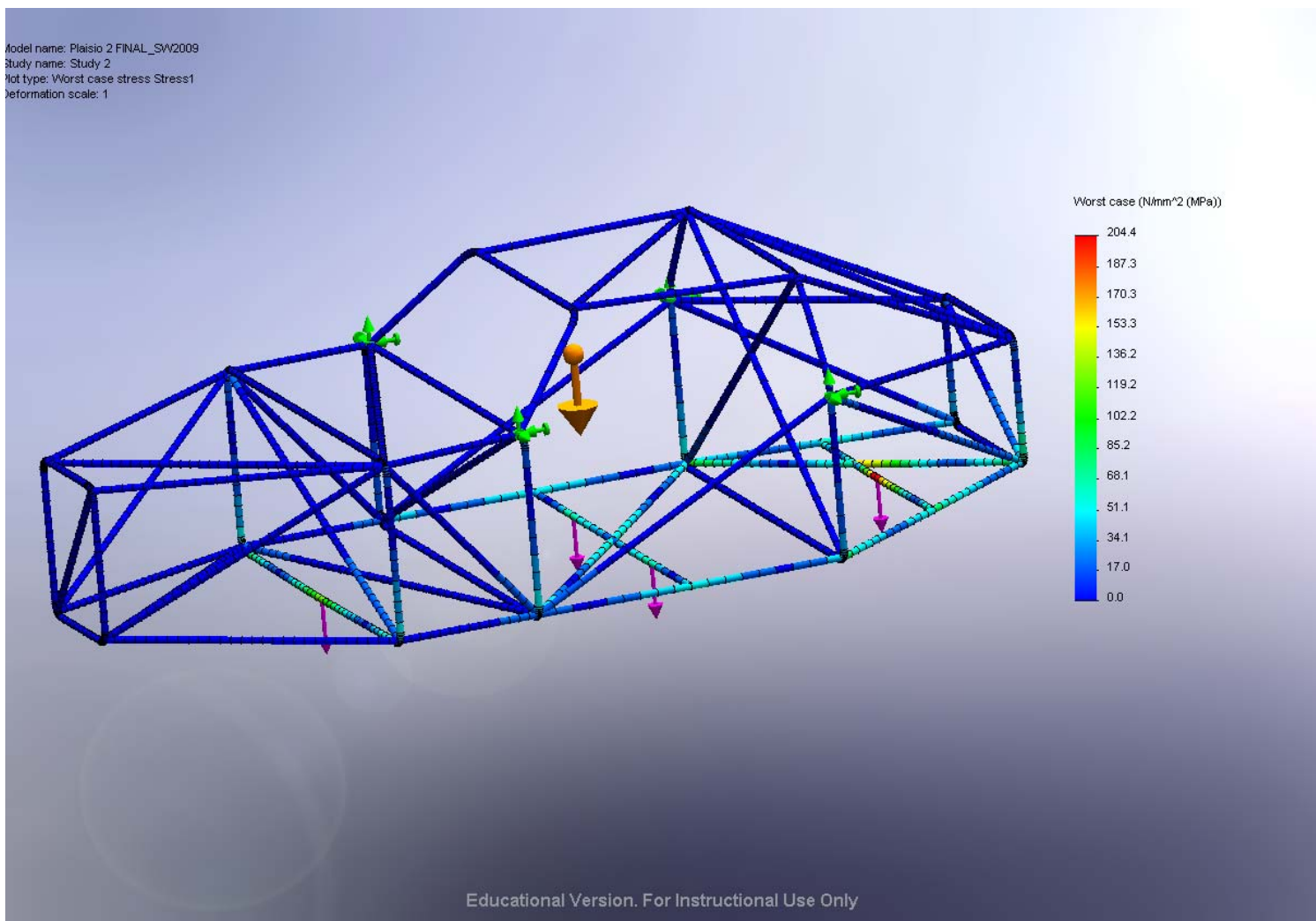
Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ιδίου βάρους οχήματος (πρόοψη)

Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετατοπίσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 8.425 mm και είναι σχετικά υψηλές. Οι μέγιστες και ενδιάμεσες τιμές αφορούν δοκούς που βρίσκονται στο κάτω τμήμα του αμαξώματος, γεγονός αναμενόμενο καθώς εκεί εδράζονται τα εσωτερικά φορτία. Οι μέγιστες URES παρατηρούνται στη θέση εδράσεως του κινητήρα/μειωτήρα και στη θέση εδράσεως της δεξαμενής καυσίμου. Αυτό οφείλεται στη μικρή διατομή και στο μεγάλο μήκος των αντίστοιχων εγκάρσιων δοκών. Μία δυνατή λύση θα ήταν η αντικατάσταση των δύο αυτών δοκών με δοκούς από κράμα Al ίδιου πάχους και

μεγαλύτερων διαστάσεων που θα επιδεικνύουν χαμηλότερο βάρος και πολλαπλάσια I_{xx} . Στις υπόλοιπες περιοχές και ιδιαίτερα στα επίπεδα και τις περιοχές των δύο ζευγών πακτώσεων, οι μετατοπίσεις είναι πρακτικά μηδενικές.

Κατανομή τάσεων

Η κατανομή της τάσεως "Worst Case" [MPa], παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες. Η τάση "Worst Case" είναι αυτή που εμφανίζεται κατά την υποθετική δυσμενέστερη περίπτωση συνδυασμένης φόρτισης και επομένως καλύπτει πληρέστερα την περίπτωση αστοχίας, συγκριτικά με τις τάσεις Von Mises.



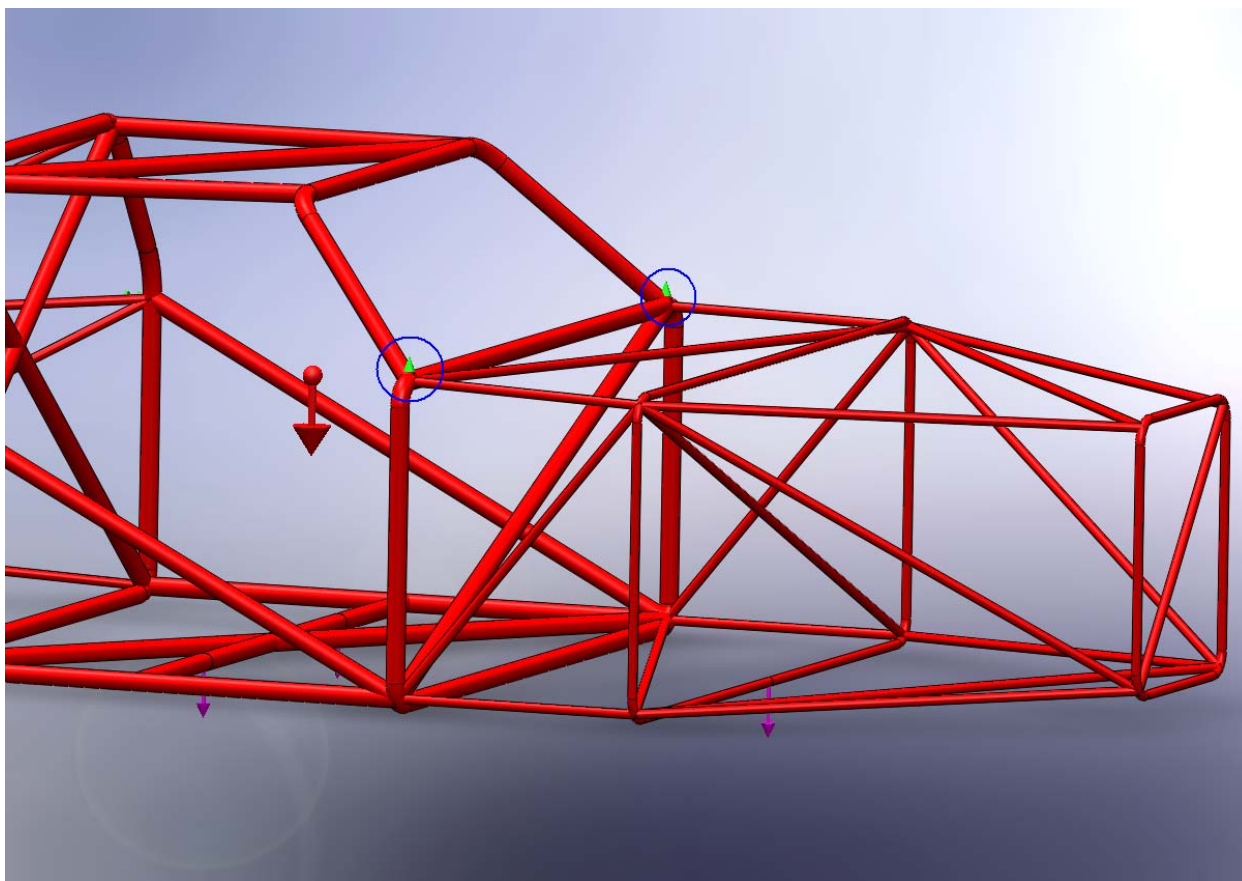
Κατανομή αναπτυσσόμενων τάσεων [MPa] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ιδίου βάρους οχήματος

Παρατηρείται ότι οι τιμές των τάσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 204.4 [MPa]. Η κατανομή μοιάζει με αυτήν των μετατοπίσεων URES. Οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται και πάλι στη θέση εδράσεως του κινητήρα/μειωτήρα και στη θέση εδράσεως της δεξαμενής καυσίμου, καθώς και – όπως αναμένεται – στα σημεία στήριξης των αντίστοιχων δοκών. Ωστόσο, η περιοχή των ενδιάμεσων τιμών τάσης επεκτείνεται σε όλες τις δοκούς του κάτω μέρους (πλην των εμπρός), καθώς και στο ήμισυ του μήκους των πλευρικών κατακόρυφων δοκών. Σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη τιμή της τάσης δεν υπερέβη το όριο διαρροής του υλικού (460 MPa).

Δοκιμή Κάμψεως λόγω υπερκεράσεως εγκάρσιου εμποδίου (Bending Case - Symmetric Vertical Load)

Θα θεωρηθεί πως το όχημα κατά την κίνησή του συναντά εγκάρσιο εμπόδιο μέγιστου ύψους 8 mm - ενδεικτική τάξη μεγέθους του ύψους ενός εγκάρσιου εμποδίου σε ασφάλτινο δρόμο - το οποίο και συναντούν και διέρχονται ταυτόχρονα και οι δύο τροχοί του πρόσθιου άξονα. Η ανύψωση των τροχών θα θεωρηθεί ίση με την ανύψωση των σημείων εδράσεώς τους.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθενται σχηματικά η κατακόρυφη ανύψωση των δύο εμπρός σημείων εδράσεως, τα εσωτερικά φορτία και τα σημεία εδράσεως:



Δοκιμή κάμψης λόγω ταυτόχρονης κατακόρυφης ανύψωσης των τροχών του πρόσθιου άξονα.

Αποτελέσματα

Μετατοπίσεις (URES)

Οι συνιστάμενες μετατοπίσεις URES [mm] των κόμβων καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα του πλαισίου, παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :

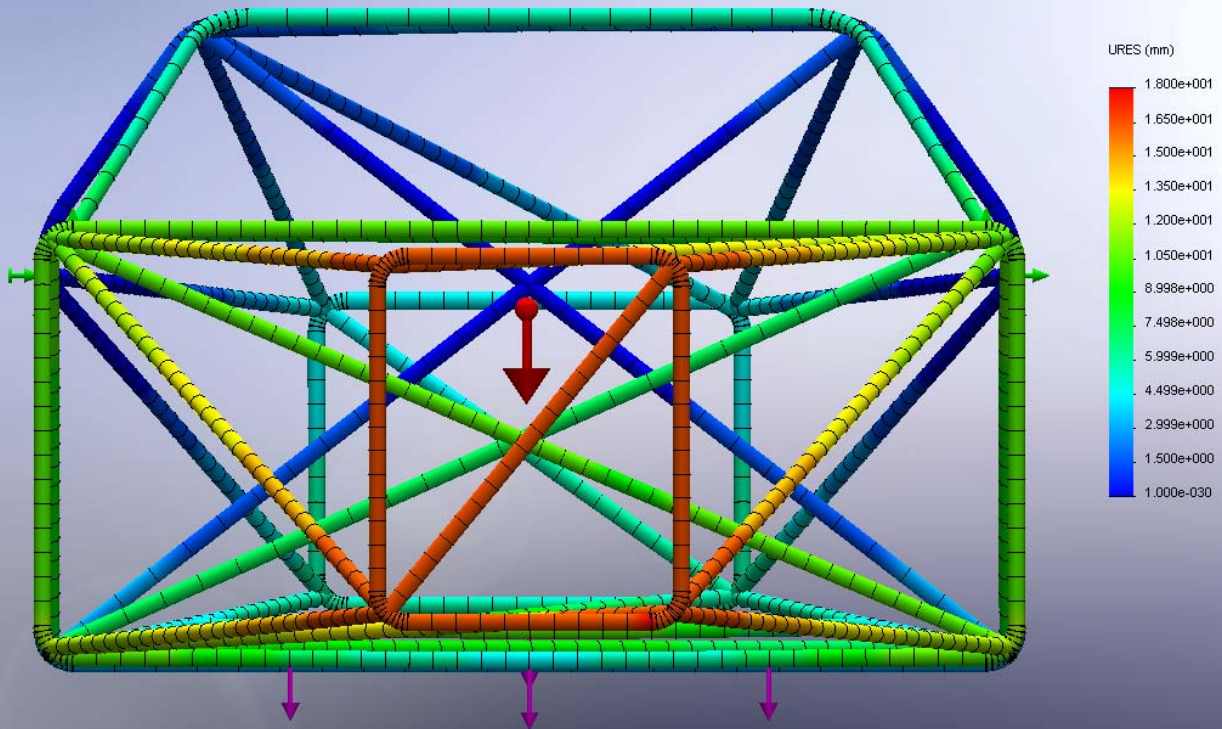
Model name: Pleisio 2 FINAL_SW2009
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



Educational Version. For Instructional Use Only

Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ταυτόχρονης κατακόρυφης ανύψωσης των τροχών του πρόσθιου άξονα

Model name: Plaisio 2 FINAL_SW2009
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



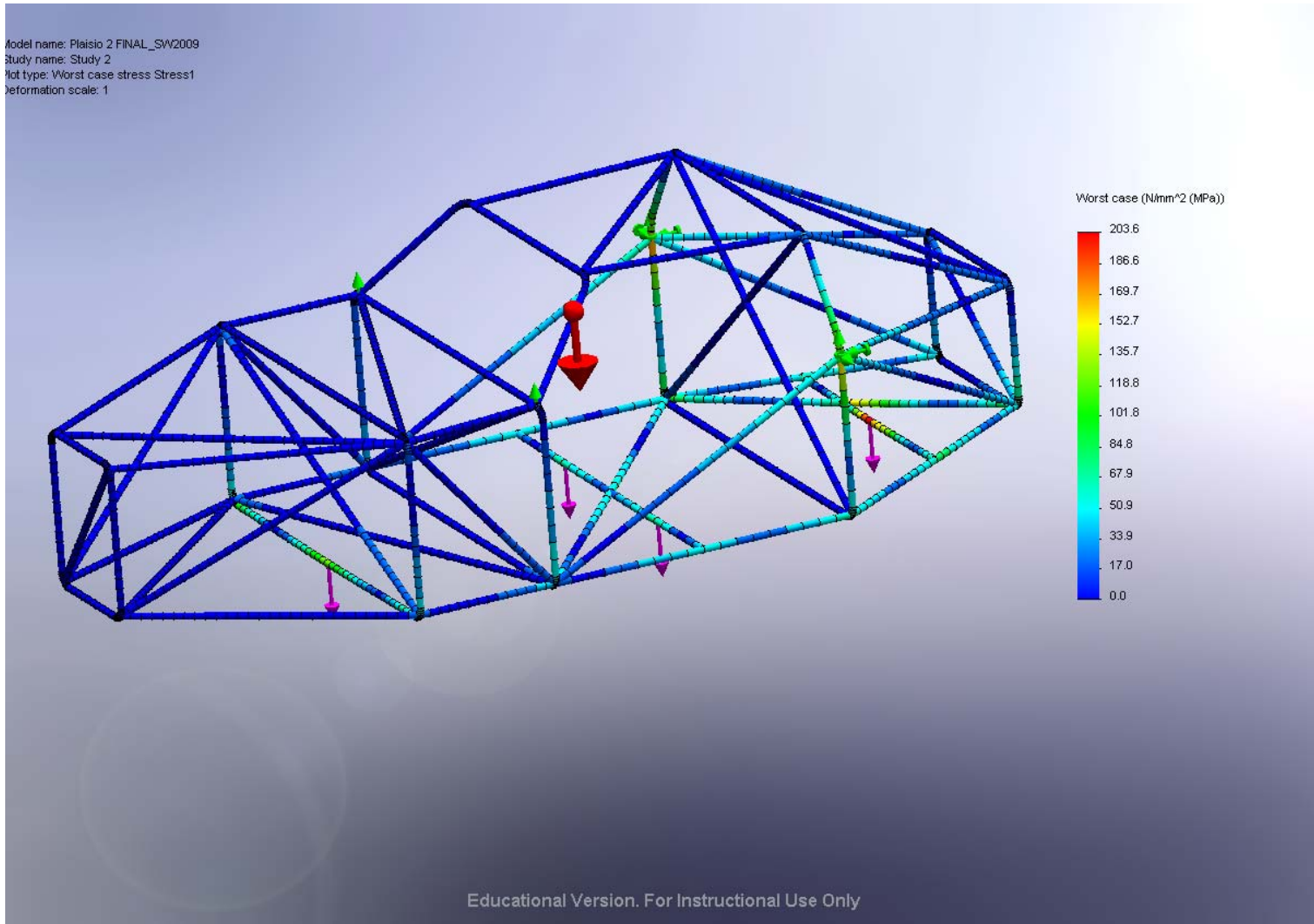
Educational Version. For Instructional Use Only

Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ταυτόχρονης κατακόρυφης ανύψωσης των τροχών του πρόσθιου άξονα (πρόοψη)

Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετατοπίσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 1.8 mm και είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Όπως αναμένετο, οι μέγιστες και ενδιάμεσες τιμές εμφανίζονται στις δοκούς του εμπρός τμήματος και μάλιστα εμπρός από το επίπεδο που ορίζουν οι δύο κατακόρυφες μετατοπίσεις. Στο εν λόγω επίπεδο οι μετατοπίσεις είναι της τάξεως των 8mm. Στις δοκούς που ορίζουν το θάλαμο επιβατών και που βρίσκονται μεταξύ των δύο ζευγών εδράσεων, οι μετατοπίσεις λαμβάνουν μικρές προς μεσαίες τιμές. Το ίδιο ισχύει και για τις δοκούς του πίσω μέρους του πλαισίου. Επιπλέον, στο επίπεδο και την περιοχή των πίσω πακτώσεων οι μετατοπίσεις είναι πρακτικά μηδενικές.

Κατανομή τάσεων

Η κατανομή της τάσεως "Worst Case" [MPa], παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :



Κατανομή αναπτυσσόμενων τάσεων [MPa] κατά την καμπτική φόρτιση λόγω ταυτόχρονης κατακόρυφης ανύψωσης των τροχών του πρόσθιου άξονα

Παρατηρείται ότι οι τιμές των τάσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 203.6 [MPa]. Η κατανομή μοιάζει με αυτήν των τάσεων στην περίπτωση της φόρτισης λόγω ιδίου βάρους. Οι μέγιστες και μεσαίες τιμές παρατηρούνται στις δοκούς του κάτω και του πίσω μέρους. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στη θέση εδράσεως της δεξαμενής καυσίμου και περίξ αυτής. Σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη τιμή της τάσης δεν υπερέβη το όριο διαρροής του υλικού (460 MPa).

Δοκιμή Στρέψης

Όπως έχει αναφερθεί, η στρέψη συνιστά τη συνηθέστερη και δυσμενέστερη μορφή φόρτισης που υφίσταται ένα όχημα κατά την κίνησή του εντός δρόμου. Συνήθως Απαντά σε συνδυασμό με άλλες μορφές φορτίσεως. Η βασικότερη συνέπεια της στρεπτικής καταπόνησης είναι η παραμόρφωση του πλαισίου και συνεπώς η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ανάρτησης, με άμεσο αποτέλεσμα την υπονόμηση της δυναμικής απόκρισης του οχήματος. Για το λόγο αυτόν, η στρεπτική δυσκαμψία ενός πλαισίου και ολόκληρου του οχήματος, χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση της γενικότερης δομικής του αντοχής.

Ενδεικτικές τιμές στρεπτικής δυσκαμψίας οχημάτων

Η συνήθης τάξη μεγέθους της στρεπτικής δυσκαμψίας ενός οχήματος είναι της τάξεως των 4000-9000 Nm/deg . Σε ένα όχημα υψηλών επιδόσεων ωστόσο, δύναται να λάβει τιμές της τάξεως των 15000-30000 Nm/deg [10].

Δοκιμές μετρήσεως στρεπτικής δυσκαμψίας

Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι μετρήσεως της στρεπτικής δυσκαμψίας ενός οχήματος.

Βάσει μίας συνήθους μεθόδου , ο ένας τροχός του υπό εξέταση οχήματος ανυψώνεται κατά 8 cm και εν συνεχεία εξετάζεται εάν κλείνουν σωστά οι θύρες των επιβατών, καθώς και τα καλύμματα του χώρου του κινητήρα και του χώρου αποσκευών. Εάν κλείνουν σωστά, η στρεπτική δυσκαμψία του οχήματος κρίνεται ικανοποιητική. Εάν όχι, η στρεπτική του δυσκαμψία κρίνεται μικρή και το όχημα δε δύναται να λάβει έγκριση κυκλοφορίας.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία παρεμφερής δοκιμή μέτρησης της στρεπτικής δυσκαμψίας. Σε αυτήν την περίπτωση ο ένας τροχός του οχήματος ανυψώνεται ενώ οι υπόλοιποι τρεις παραμένουν πακτωμένοι. Στη συνέχεια μετράται η μέγιστη μετατόπιση (deflection) του πλαισίου και υπολογίζεται η δυσκαμψία του [10]:



Τυπική δοκιμή μετρήσεως της στρεπτικής δυσκαμψίας οχήματος

Δυσκαμψία δοκού σταθερής διατομής

Όπως είναι γνωστό από την Τεχνική Μηχανική, η σχέση που συνδέει τη γωνία συστροφής των μεταλλικών δοκών που υφίστανται ελαστική στρέψη, με την εφαρμοζόμενη στρεπτική ροπή, είναι η ακόλουθη:

$$\Sigma M = K \cdot \theta$$

όπου

ΣM η συνολική ροπή στρέψεως που καταπονεί τη δοκό

θ η ανά μονάδα μήκους γωνία στρέψης της διατομής

K η στρεπτική δυσκαμψία της δοκού που ισούται με $K = I_p \cdot G$

I_p Η πολική ροπή αδρανείας της διατομής

G Το μέτρο διάτμησης του υλικού

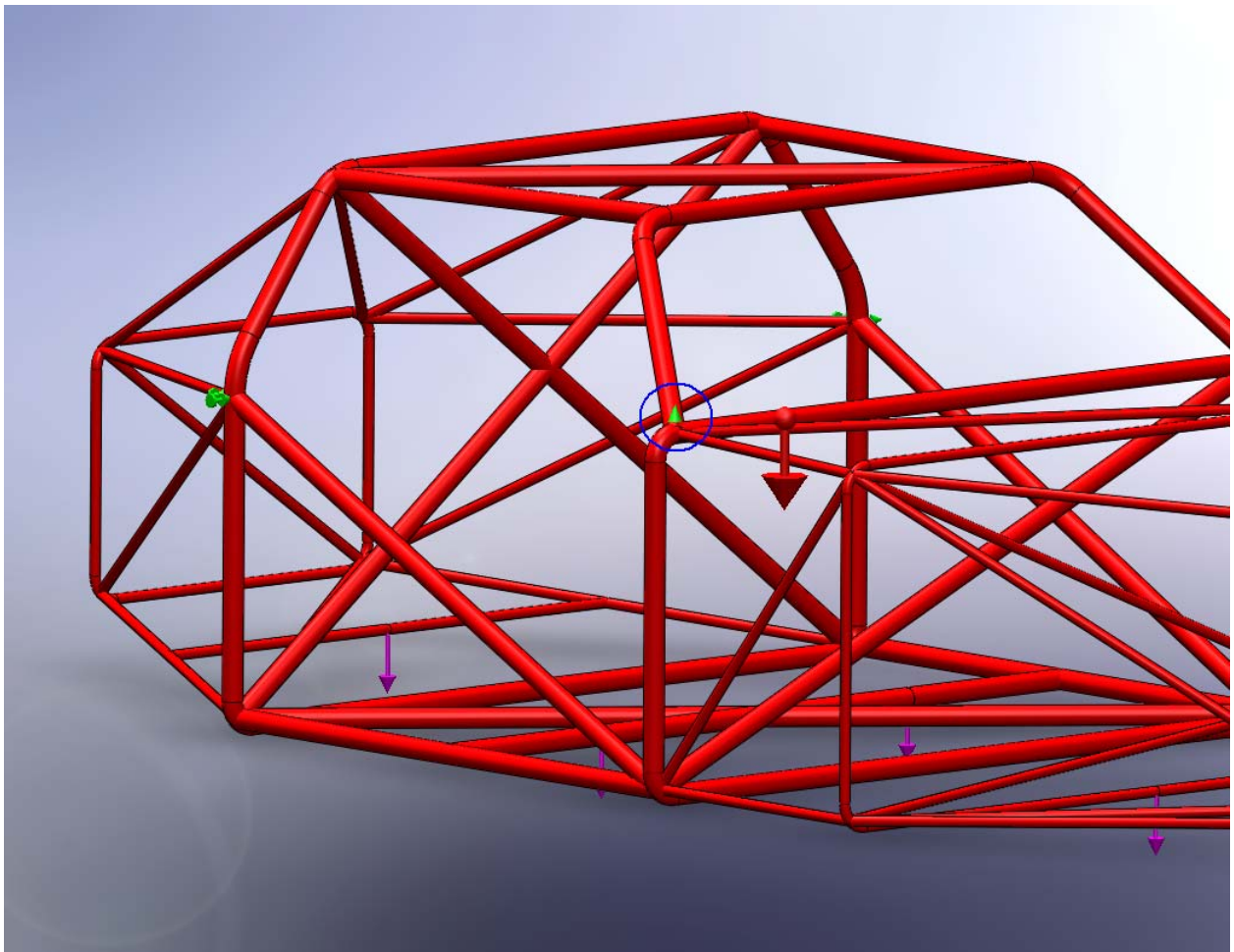
Δεδομένου ότι η σχετική γωνία στροφής δύο διατομών που απέχουν απόσταση d δίδεται από τη σχέση $\varphi = \theta \cdot d$ [7], έπεται ότι η δυσκαμψία της δοκού δίδεται από τη σχέση

$$K = (M \cdot d) / \varphi.$$

Επισημαίνεται ότι εφόσον $d = d(z)$ και $\varphi = \varphi(z)$ - όπου z ο άξονας συμμετρίας της διατομής - και εφόσον $K = \text{const}$, έπεται ότι $d/z = \text{const}$.

Δοκιμή Στρέψης λόγω ανύψωσης του ενός τροχού

Εξετάστηκε η ανύψωση του εμπρός δεξιού τροχού κατά 8 cm (αρχική κατακόρυφη μετατόπιση), όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



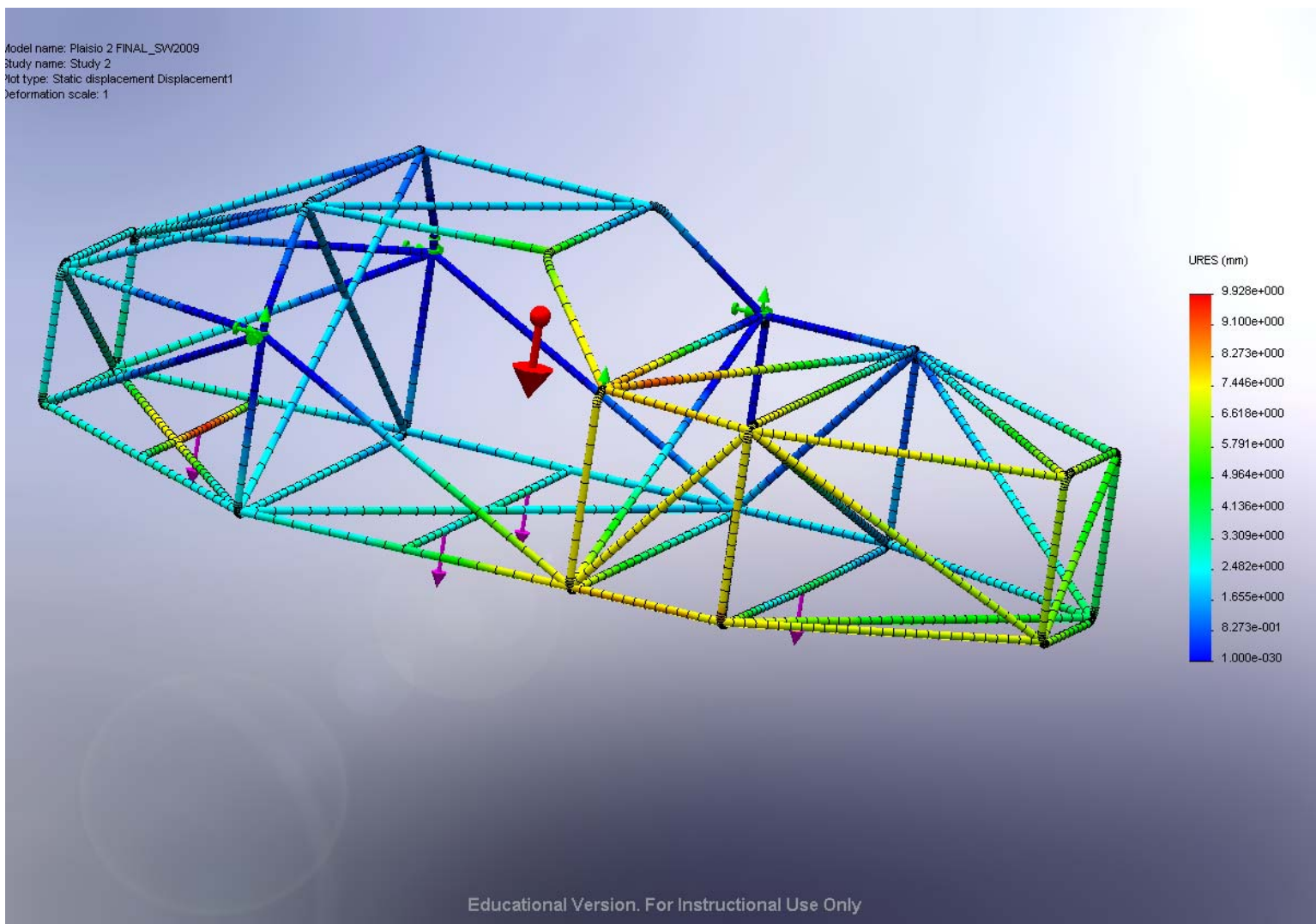
Δοκιμή στρέψης μέσω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού

Τα κάθετα εσωτερικά φορτία που ετέθησαν στη δοκιμή κάμψης, υφίστανται και εδώ. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται ακολούθως:

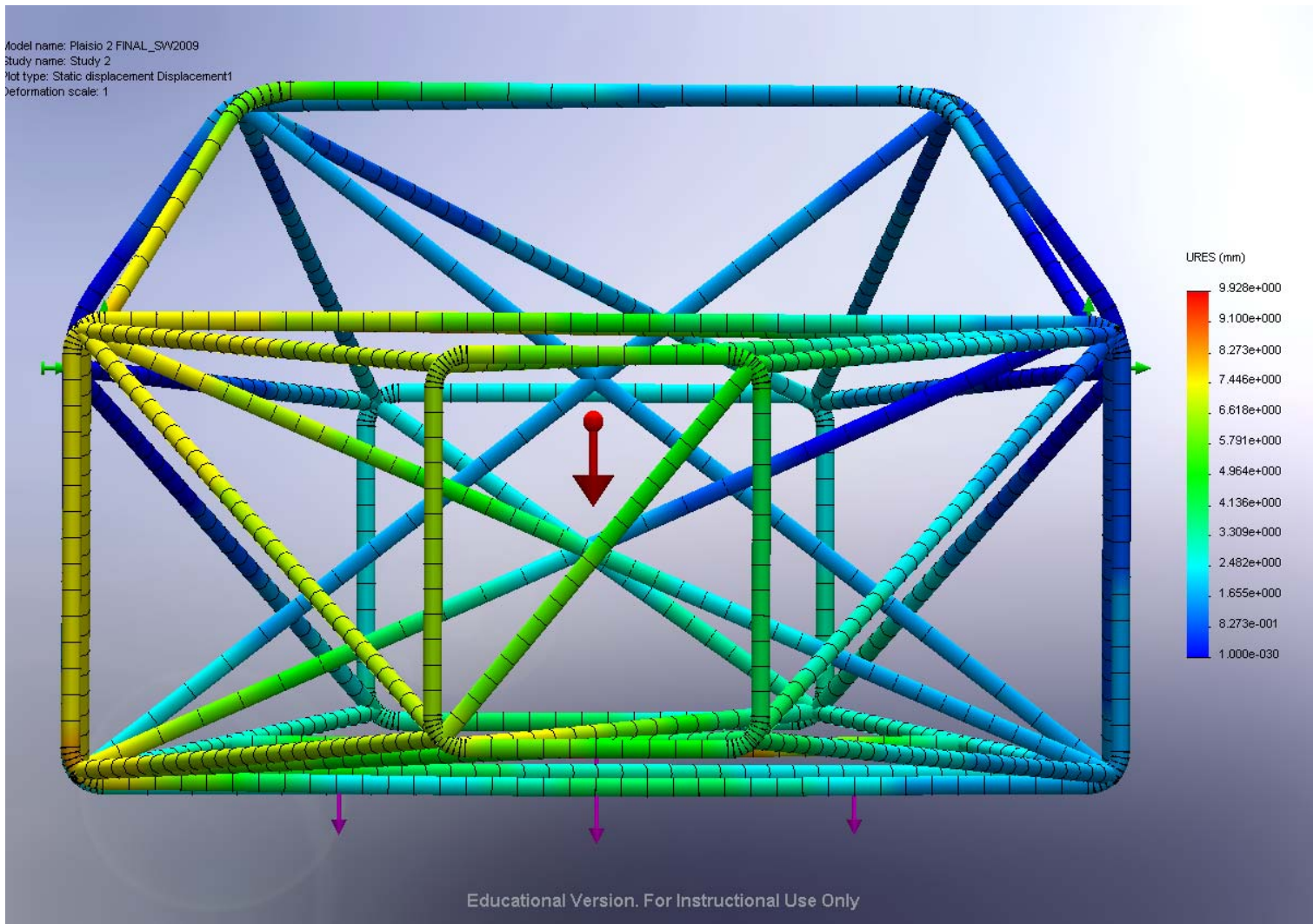
Αποτελέσματα

Μετατοπίσεις (URES)

Οι συνιστάμενες μετατοπίσεις URES [mm] των κόμβων καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα του πλαισίου, παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :

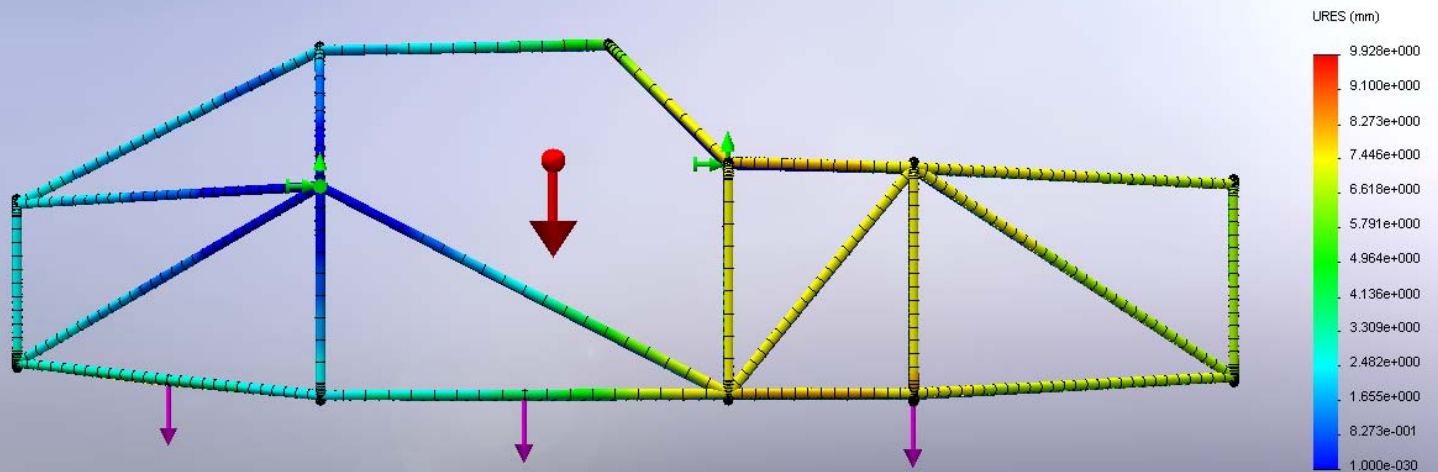


Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη στρεπτική φόρτιση λόγω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού



Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη στρεπτική φόρτιση λόγω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού (πρόοψη)

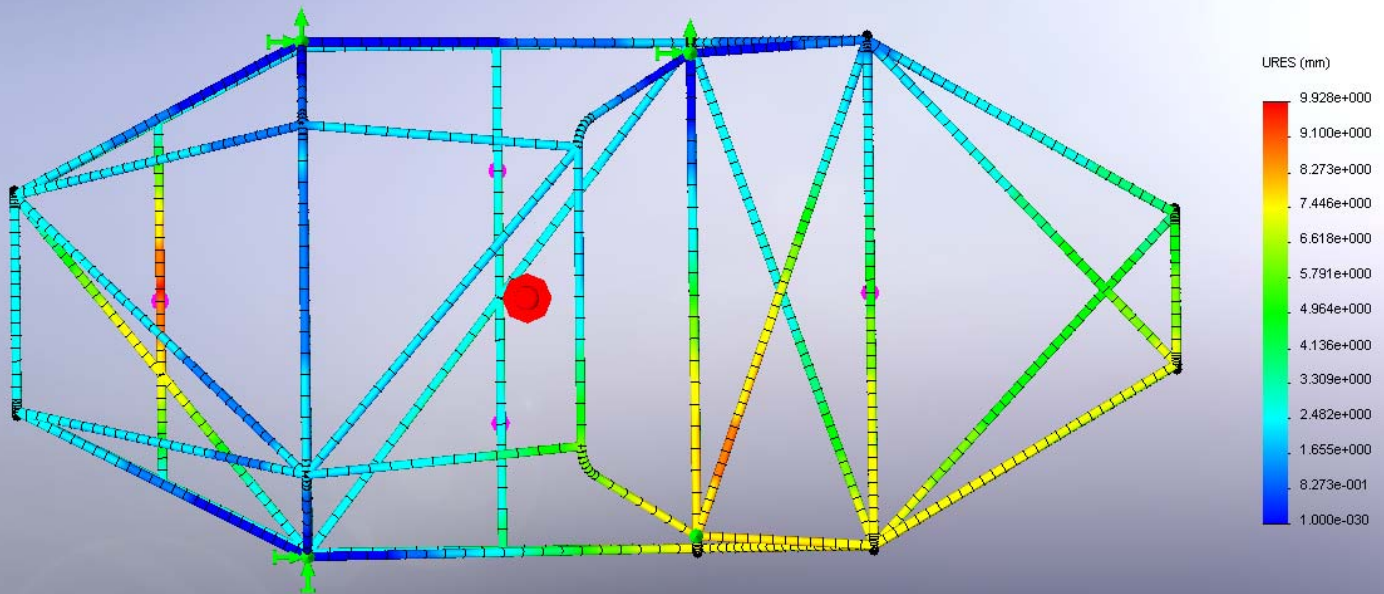
Model name: Pleisio 2 FINAL_SW2009
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



Educational Version. For Instructional Use Only

Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη στρεπτική φόρτιση λόγω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού (πλάγια όψη)

Model name: Plaisio 2 FINAL_SW2009
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



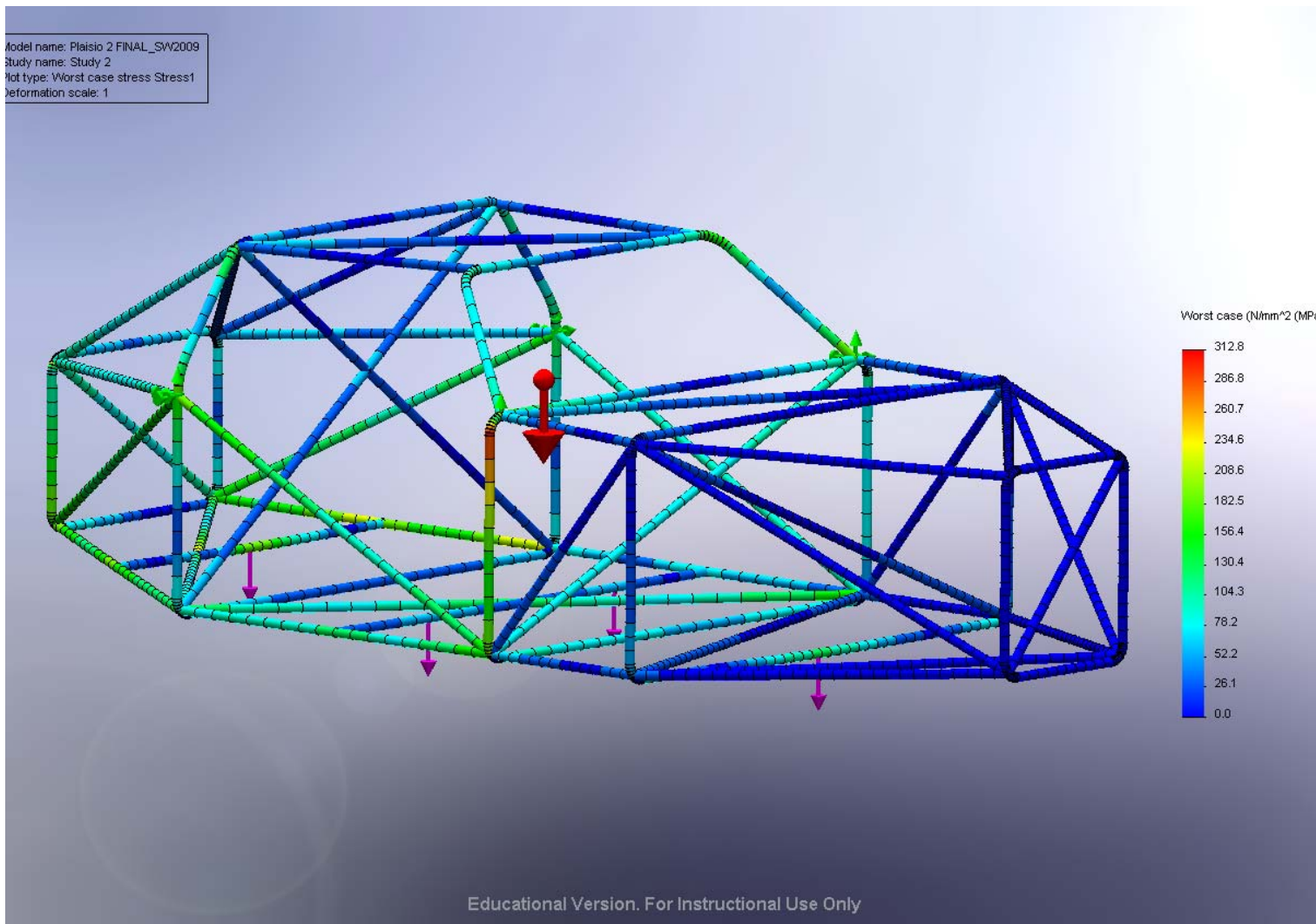
Educational Version. For Instructional Use Only

Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη στρεπτική φόρτιση λόγω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού (κάτοψη)

Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετατοπίσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 10 mm και είναι σχετικά υψηλές. Όπως αναμένετο, οι μέγιστες και ενδιάμεσες τιμές αφορούν την περιοχή του εμπρός δεξιού τμήματος του πλαισίου. Ωστόσο, όλο σχεδόν το πλαίσιο υφίσταται παραμορφώσεις ενδιάμεσης τιμής (της τάξεως των 3 mm) και ελάχιστες περιοχές παραμένουν απαραμόρφωτες. Οι μέγιστες URES παρατηρούνται και πάλι στη θέση εδράσεως του κινητήρα/μειωτήρα και περίξ αυτής.

Κατανομή τάσεων

Η κατανομή της τάσεως "Worst Case" [MPa], παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :



Κατανομή αναπτυσσόμενων τάσεων [MPa] κατά τη στρεπτική φόρτιση λόγω ανύψωσης του εμπρός δεξιού τροχού

Παρατηρείται ότι οι τιμές των τάσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 312.8 [MPa]. Οι μέγιστες και μεσαίες τιμές τάσεων παρατηρούνται στο δεξιό τμήμα του πλαισίου και συγκεκριμένα από την υπό ανύψωση έδραση και πίσω. Πέριξ της υπό ανύψωση έδραση παρατηρείται και η μέγιστη τιμή της τάσης. Σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη τιμή της τάσης δεν υπερέβη το όριο διαρροής του υλικού (460 MPa).

Προσεγγιστική Εκτίμηση Στρεπτικής Δυσκαμψίας πλαισίου

Το πλαίσιο δεν έχει σταθερή διατομή και τα τοιχώματά του δεν συνίστανται από επιφάνειες. Ωστόσο θα θεωρηθεί πως η σχέση για το K που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο ισχύει και βάσει αυτής θα υπολογιστεί η δυσκαμψία.

Για τον προσεγγιστικό υπολογισμό της δυσκαμψίας του πλαισίου, προτείνεται η παρακάτω διαδικασία:

Κατά την εξομοίωση θα πακτωθούν τα δύο σημεία στήριξης στο πίσω μέρος του πλαισίου και στα δύο σημεία στήριξης του εμπρός μέρους θα τεθεί ζεύγος αντίθετων κατακόρυφων δυνάμεων γνωστού μέτρου – έστω $F = 1000 \text{ N}$.

Η απόσταση b (\approx εμπρός μετατρόχιο) των δύο πρόσθιων σημείων στήριξης, είναι γνωστή από τη γεωμετρία του πλαισίου και ισούται με $b = 1500 \text{ mm}$.

Η απόσταση των πρόσθιων σημείων στήριξης από τα δύο πίσω πακτωμένα σημεία στήριξης, είναι γνωστή από τη γεωμετρία του πλαισίου και ισούται με $L = 1210 \text{ mm}$

Θα υπολογιστούν οι μετατοπίσεις **ενός κόμβου** που ανήκει στο επίπεδο όπου ασκείται το ζεύγος δυνάμεων. Συνεπώς θα υπολογιστεί η **κατακόρυφη (κατά τον Y)** και η **εγκάρσια (κατά τον X)** μετατόπιση του κόμβου, V και U αντίστοιχα.

Μέσω αυτών θα υπολογιστεί μία γωνία στροφής Φ_1 . Λαμβάνοντας υπ'όψη ότι η πακτωμένη "διατομή" δε στρέφεται, έπεται ότι η Φ_1 ταυτίζεται με τη σχετική γωνία στροφής των δύο αυτών "διατομών".

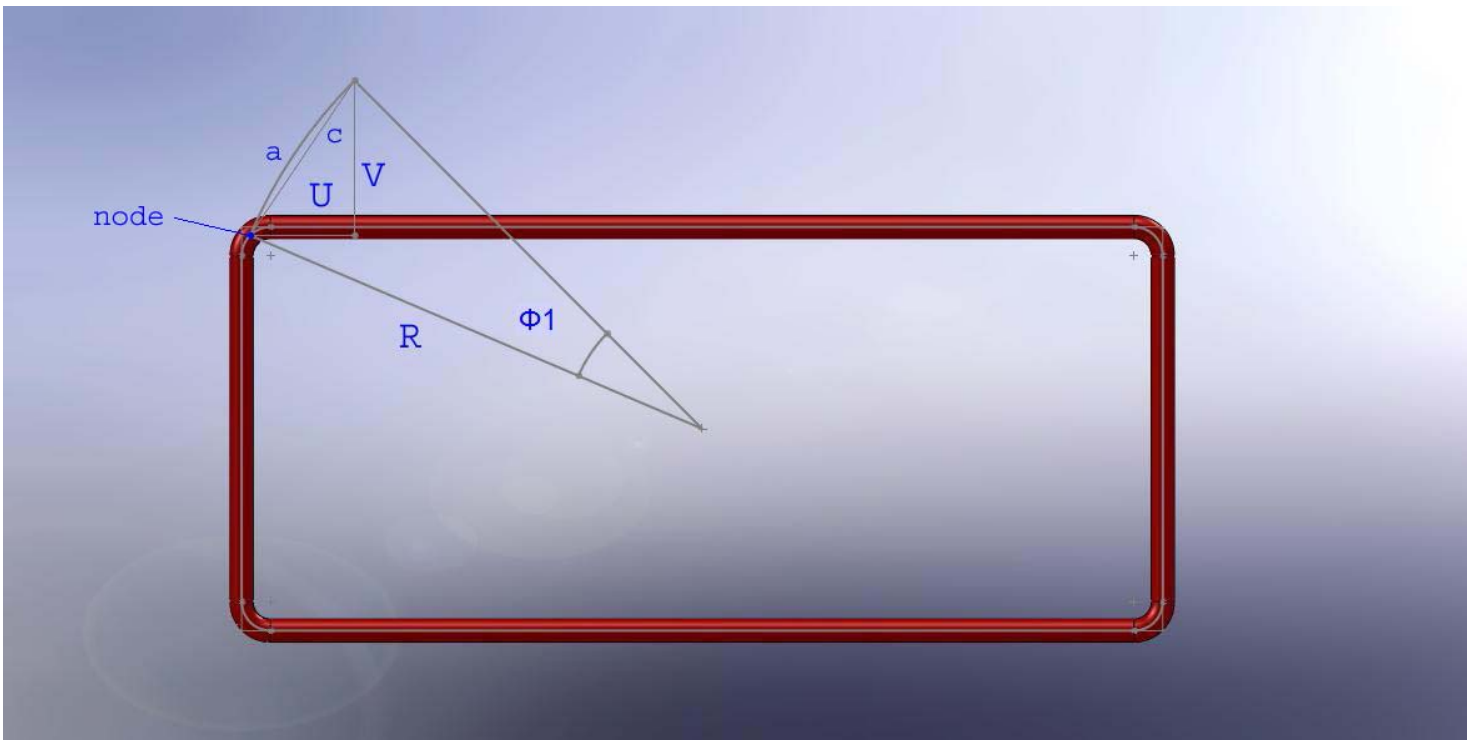
Επιπλέον η απόσταση της πακτωμένης "διατομής" από το επίπεδο όπου δρα το ζεύγος δυνάμεων είναι γνωστή από τη γεωμετρία του πλαισίου και ίση με $L = 1210 \text{ mm}$.

Συνεπώς, βάσει των παραπάνω, η σχετική γωνία στροφής Φ_1 θα δίδεται από τη γνωστή σχέση:

$$K = (M \cdot L) / \Phi_1$$

όπου $M = F \cdot 2 \cdot b$ (Ροπή ζεύγους) και L η απόσταση των δύο "διατομών".

Ο υπολογισμός της Φ_1 γίνεται βάσει της παρακάτω γεωμετρίας, θεωρώντας πως η "διατομή" διατηρείται επίπεδη κατά τη στρέψη του πλαισίου:



Υπολογισμός της γωνίας $\Phi 1$

Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$C (\text{μήκος χορδής}) = (U^2 + V^2)^{1/2} = (\Delta X^2 + \Delta Y^2)^{1/2}$$

Επιπλέον, βάσει της γεωμετρίας του πλαισίου ισχύει $R \approx 853,96 \text{ mm}$.

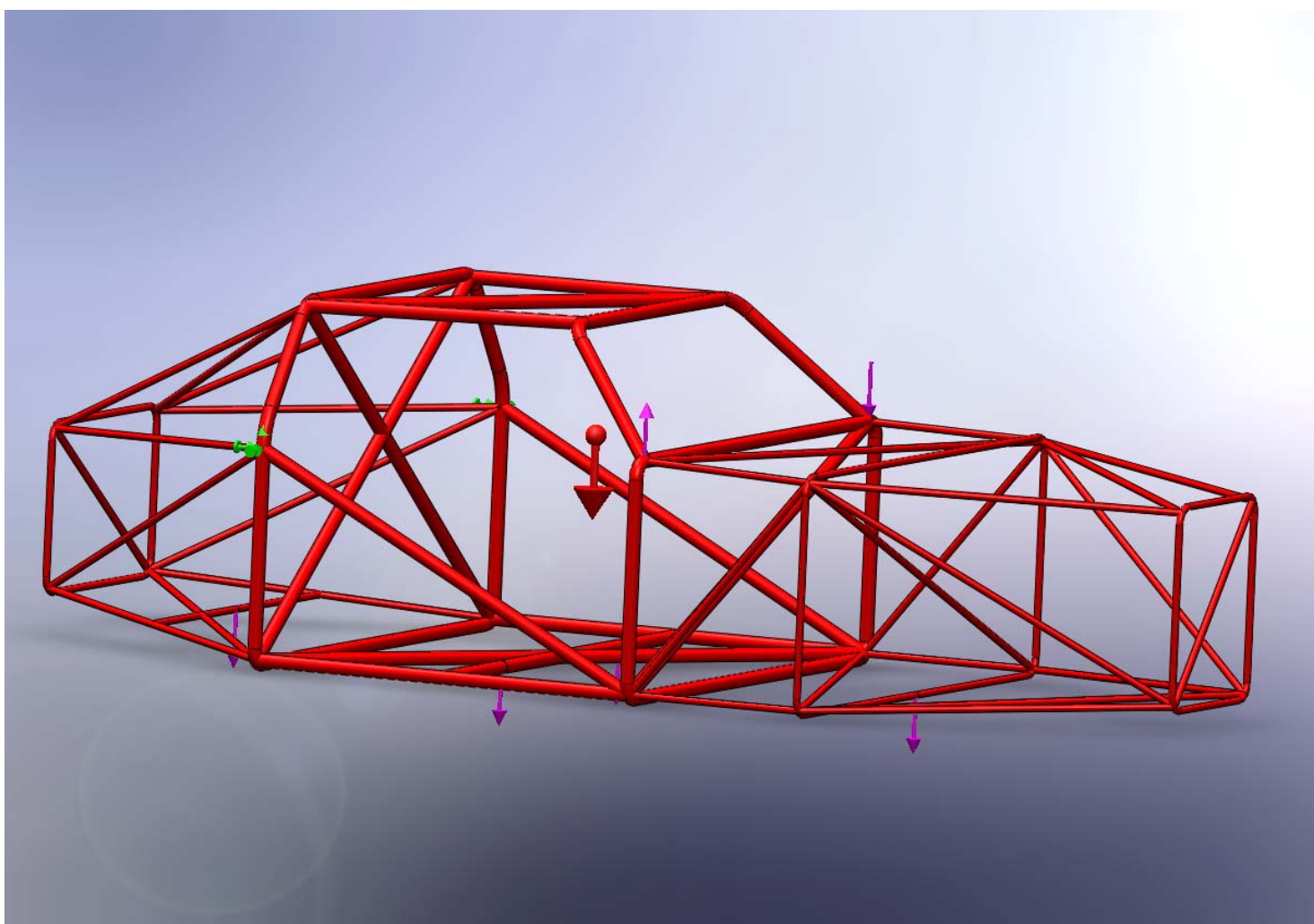
Για μικρές τιμές της $\Phi 1$, ισχύει

$$a (\text{μήκος τόξου}) \approx C = (U^2 + V^2)^{1/2}$$

και εφόσον το μήκος τόξου συνδέεται με τη γωνία μέσω της σχέσεως $a = (\Phi 1 \cdot \pi / 180) \cdot R$ – για γωνία μετρημένη σε **μοίρες** - έπεται ότι η $\Phi 1$ θα δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$\phi 1 \approx (1/R) \cdot (U^2 + V^2)^{1/2}$$

Οι δυνάμεις και τα σημεία εφαρμογής τους παρατίθενται στο ακόλουθο σχήμα:



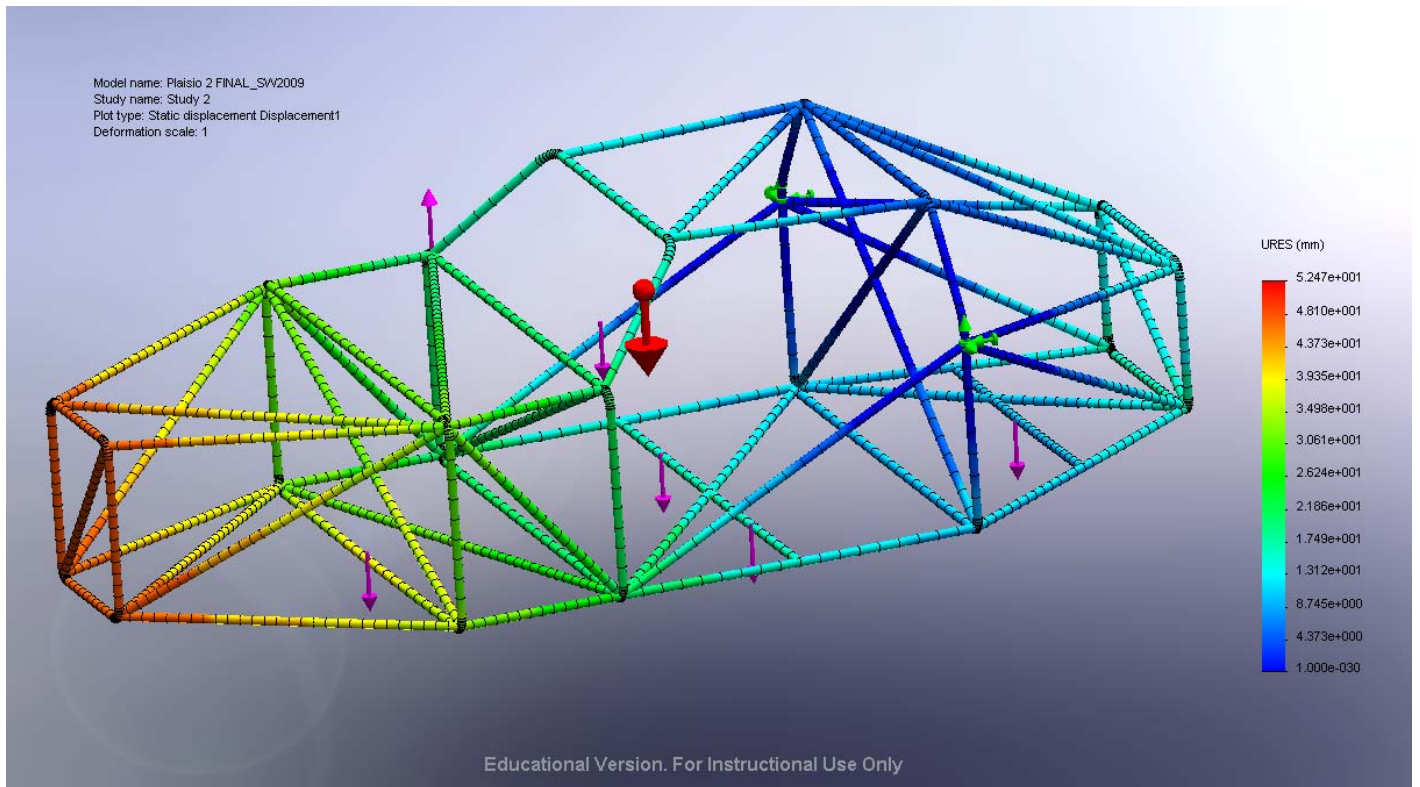
Το ζεύγος δυνάμεων, τα εσωτερικά φορτία και τα σημεία στήριξης κατά τη δοκιμή εκτίμησης της στρεπτικής δυσκαμψίας

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται ακολούθως:

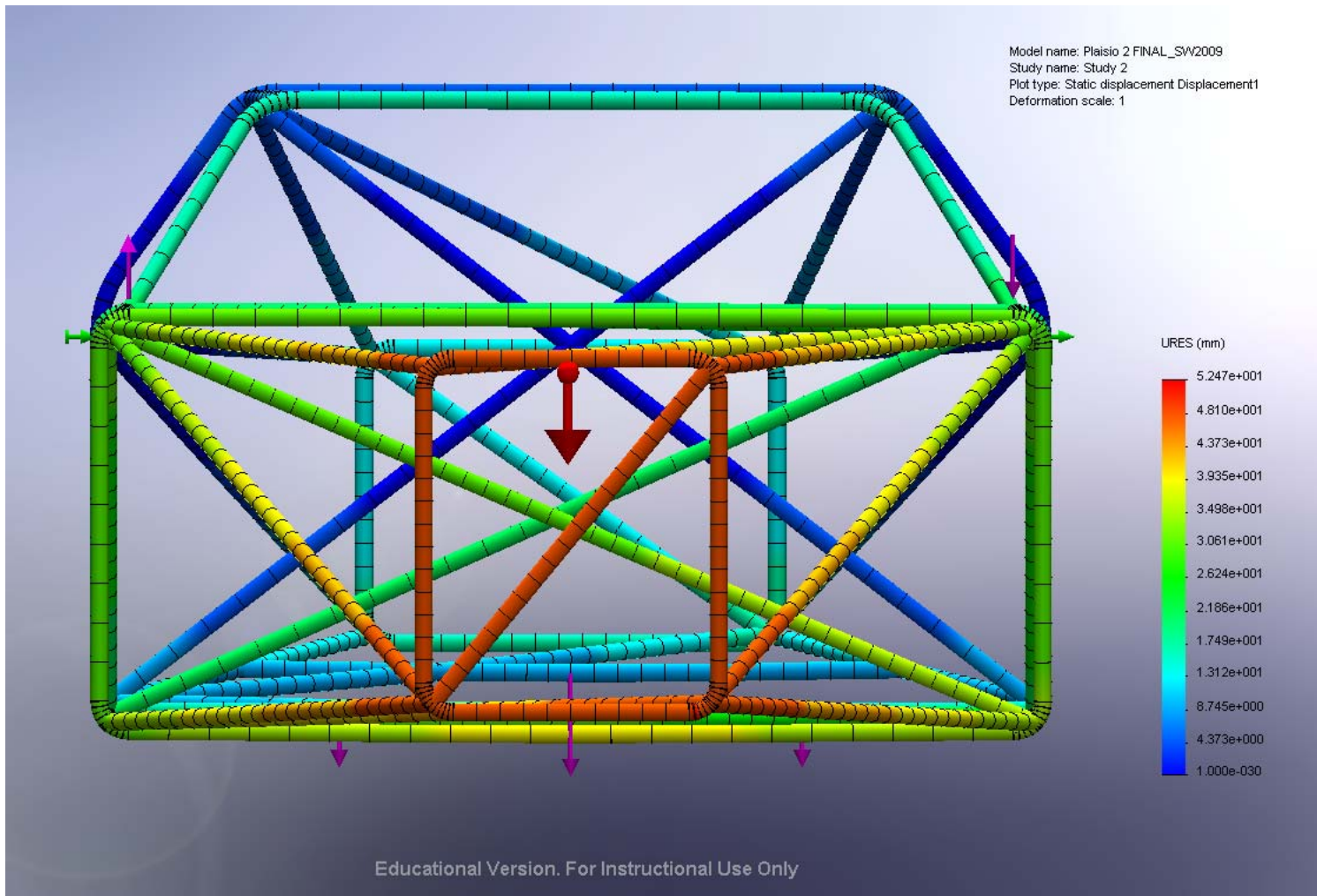
Αποτελέσματα

Μετατοπίσεις (URES)

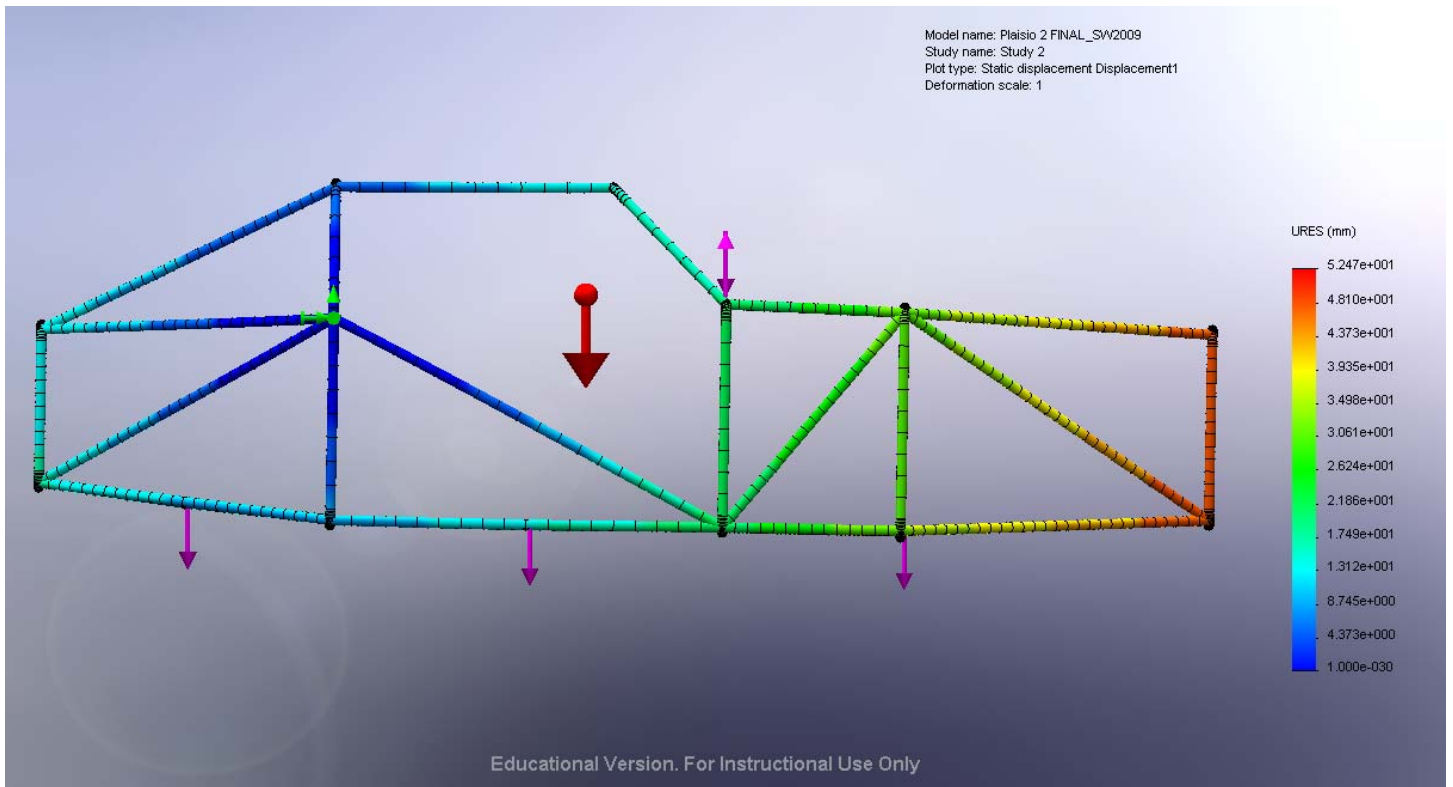
Οι συνιστάμενες μετατοπίσεις URES [mm] των κόμβων καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα του πλαισίου, παρατίθενται στις ακόλουθες εικόνες :



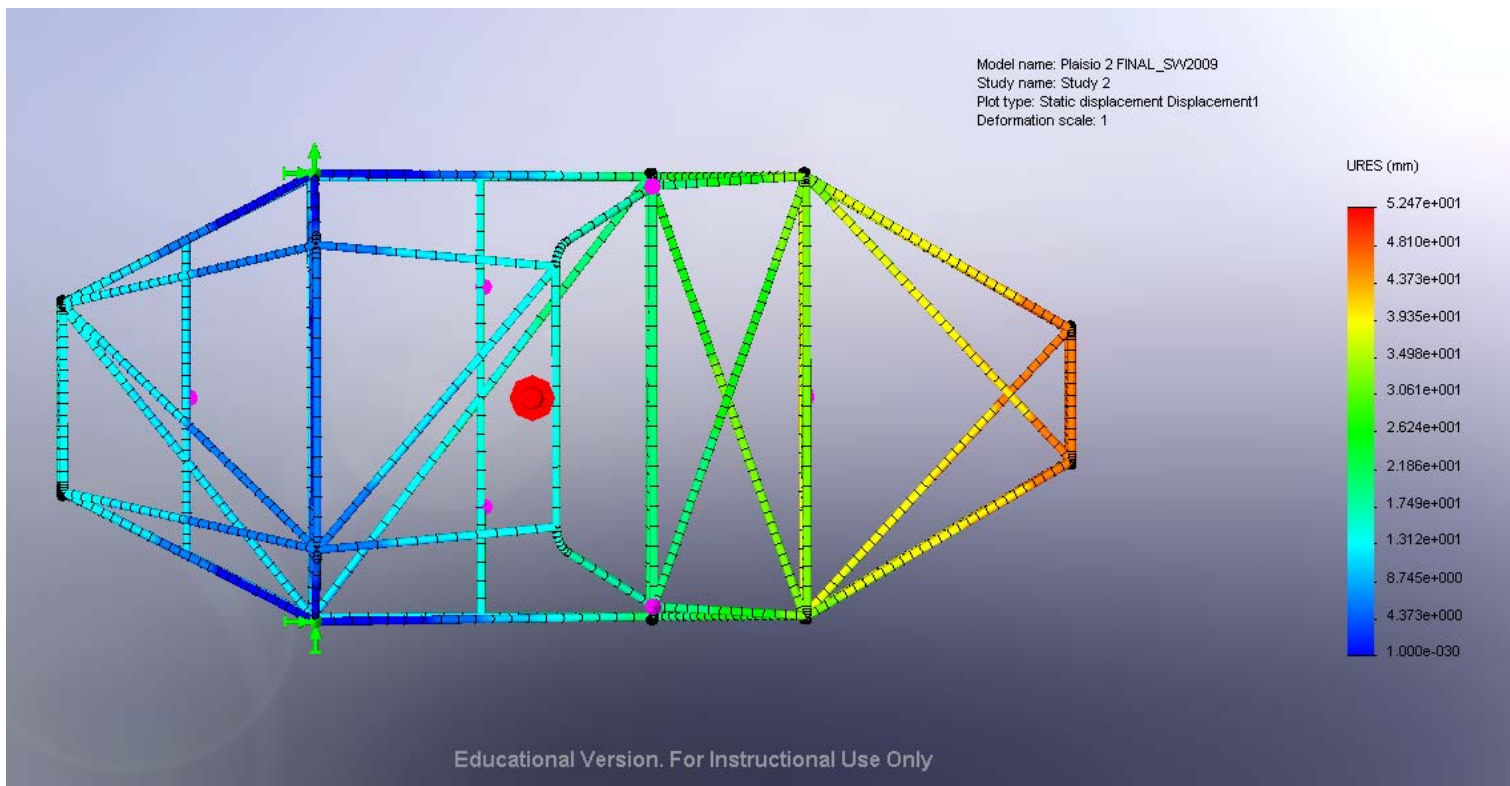
Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη δοκιμή εκτίμησης της στρεπτικής δυσκαμψίας



Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη δοκιμή εκτίμησης της στρεπτικής δυσκαμψίας (πρόοψη)



Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη δοκιμή εκτίμησης της στρεπτικής δυσκαμψίας (πλάγια όψη)



Κατανομή μετατοπίσεων URES [mm] κατά τη δοκιμή εκτίμησης της στρεπτικής δυσκαμψίας (κάτοψη)

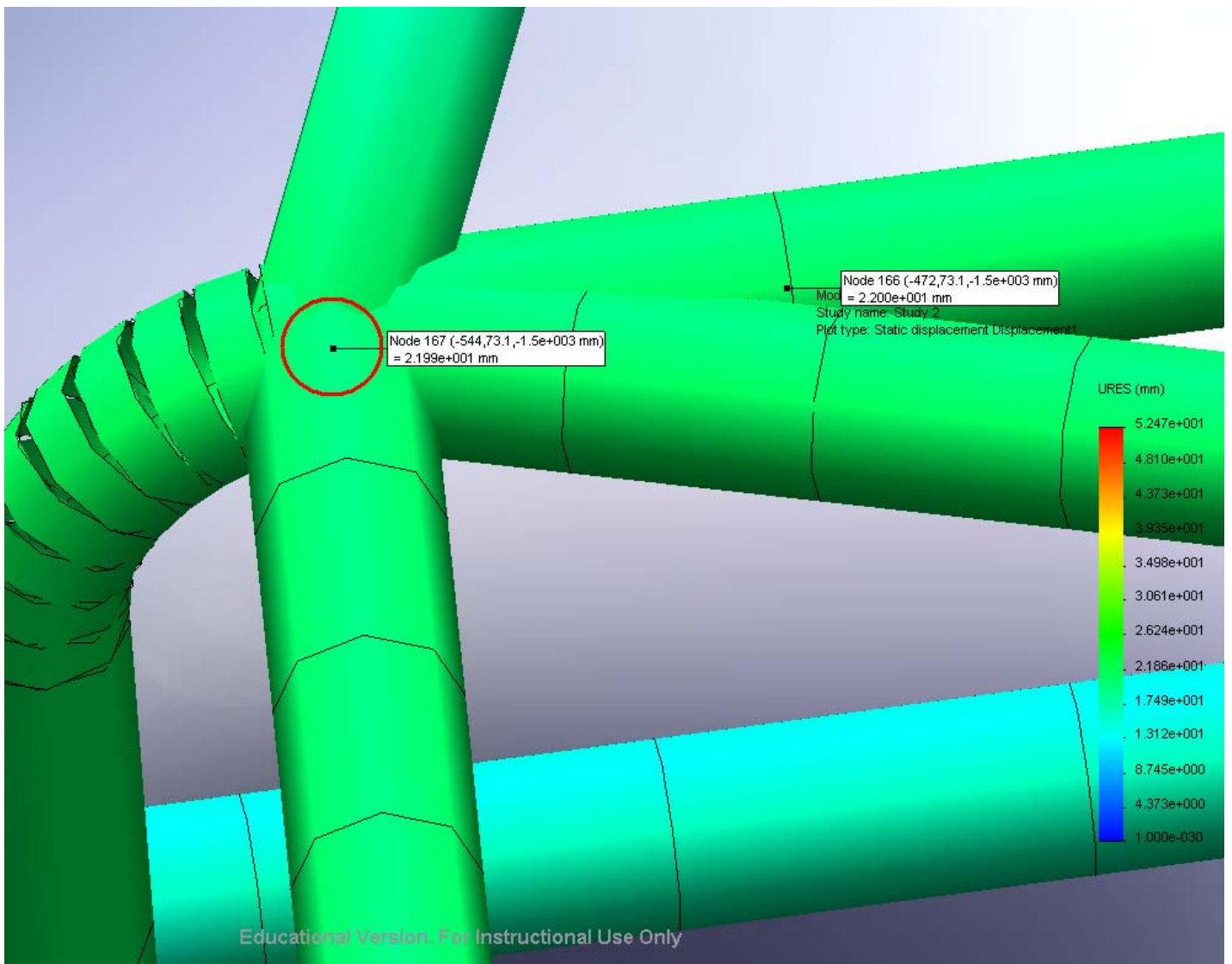
Παρατηρείται ότι οι τιμές των μετατοπίσεων βρίσκονται στο εύρος 0 – 52.47 mm και είναι ιδιαίτερα υψηλές. Στο εν λόγω επίπεδο οι μετατοπίσεις είναι της τάξεως των 20mm. Στο ενδιάμεσο και πίσω τμήμα του πλαισίου οι τιμές των μετατοπίσεων είναι της τάξεως των 15 mm και μόνο στο επίπεδο και την περιοχή των πίσω πακτώσεων οι μετατοπίσεις είναι πρακτικά μηδενικές.

Υπολογισμός

Το ζεύγος των αντίθετων δυνάμεων εφαρμόζεται στις ενώσεις ("Joint") **Joint 7** και **Joint 6** (εκ των 79 συνολικά ενώσεων που έχει το σχέδιο), όπως φαίνεται και στο σχετικό σχήμα που παρατίθεται παραπάνω (στη σελίδα 89). Μετά την πλεγματοποίηση, ο αντίστοιχος κόμβος που σχηματίζεται στη θέση της ένωσης 7, είναι ο **κόμβος 167** (εκ των 1821 συνολικά κόμβων του πλέγματος).

Πρόκειται για τον έναν κόμβο εκ των δύο που οριοθετούν το πρώτο από αριστερά (κοιτάζοντας την πρόοψη του σχήματος) πεπερασμένο στοιχείο (εκ των 1591 συνολικά πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος) της οριζόντιας δοκού που υπάρχει σε αυτή τη θέση.

Η θέση του εν λόγω κόμβου, διακρίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Η θέση του κόμβου 167

Τελικώς υπολογίζεται ότι για τον εν λόγω κόμβο ισχύει

$$U \approx 8.34711e-001 \text{ mm}$$

$$V \approx -2.18898e+001 \text{ mm}$$

$$\text{Επομένως } \phi_1 \approx (1/R) \cdot (U^2 + V^2)^{1/2}$$

Και τελικώς

$$M/\varphi_1=116950 \text{ [Nm/degree]}$$

ή

$$\underline{K= (M \cdot L) / \Phi_1 = 141510 \text{ [Nm} \cdot \text{m/degree]}}$$

Ανάγοντας την παραπάνω σχέση στην απόσταση των εμπρός και πίσω σημείων εδράσεως, λαμβάνεται :

$$(M/\varphi_1)/L = 96653 \text{ [Nm/degree} \cdot \text{m]}$$

Σχολιασμός

Παρατηρείται πως η προκύπτουσα τιμή δυσκαμψίας είναι πολύ υψηλότερη συγκριτικά με την ενδεικτική τιμή των 15000-30000 Nm/deg που προαναφέρθηκε. Αυτή η απόκλιση πιθανόν να οφείλεται στην απλούστευση της μοντελοποίησης. Υπενθυμίζεται πως θεωρήθηκε ότι το πλαίσιο συνιστά μία κοίλη δοκό σταθερής ορθογωνικής διατομής.

Επιπλέον, η υψηλή τιμή μπορεί να αποδοθεί και στο σχετικά μικρό ενεργό μήκος της "δοκού" που ισούται με την απόσταση των εμπρός και πίσω σημείων εδράσεως και που είναι περίπου ίσο με το μεταξόνιο. Στην παρούσα Εργασία η απόσταση αυτή ισούται με $L= 1210$ mm και είναι ιδιαιτέρως χαμηλή σε σχέση με τη συνήθη τιμή στα οχήματα επιδόσεων (της τάξεως των 2000-2500 mm). Αν το εύρος τιμών δυσκαμψίας που απαντά στη βιβλιογραφία (15000-30000 Nm/deg) αναφέρεται σε όχημα με $L=2000-2500$ mm, τότε η αναγωγή του σε μήκος $L=1210$ mm θα δώσει σαφώς υψηλότερη τιμή, λόγω της χαμηλότερης φ_1 που θα μετρηθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κωνσταντίνος Ν. Σπέντζας, "Δυναμική Οχημάτων", ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.
2. J. Pawlowski, Vehicle body engineering, Business Books, London.
3. Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, USA, 1992.
4. Ε. Κ. Φουντουλάκης, "Στατική ανάλυση πλαισίου επιβατηγού τροχοφόρου οχήματος με τη μέθοδο Pawlowski", Υπολογιστικό Θέμα, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
5. Mathew Huang, "Vehicle Crash Mechanics", CRC Press LLC, USA, 2002.
6. Jason C. Brown, A. John Robertson, Stan T. Serpento, "Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals" , Butterworth-Heinemann , Amsterdam , 2002
7. Ε. Γ. Μαρκέτος, "Τεχνική Μηχανική - Τομος ΙΙ - Αντοχή των Υλικών", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1998.
8. T. Shikida, Y. Nakamura, T. Nakakubo and H. Kawase, "Development of the High Speed 2ZZ-GE Engine", Toyota Motor Corporation, SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan.
9. <http://www.solidworks.com>
10. http://www.aa.washington.edu/research/structures/pubs/Sampe_20Tech_202005_20AM_20PF.pdf