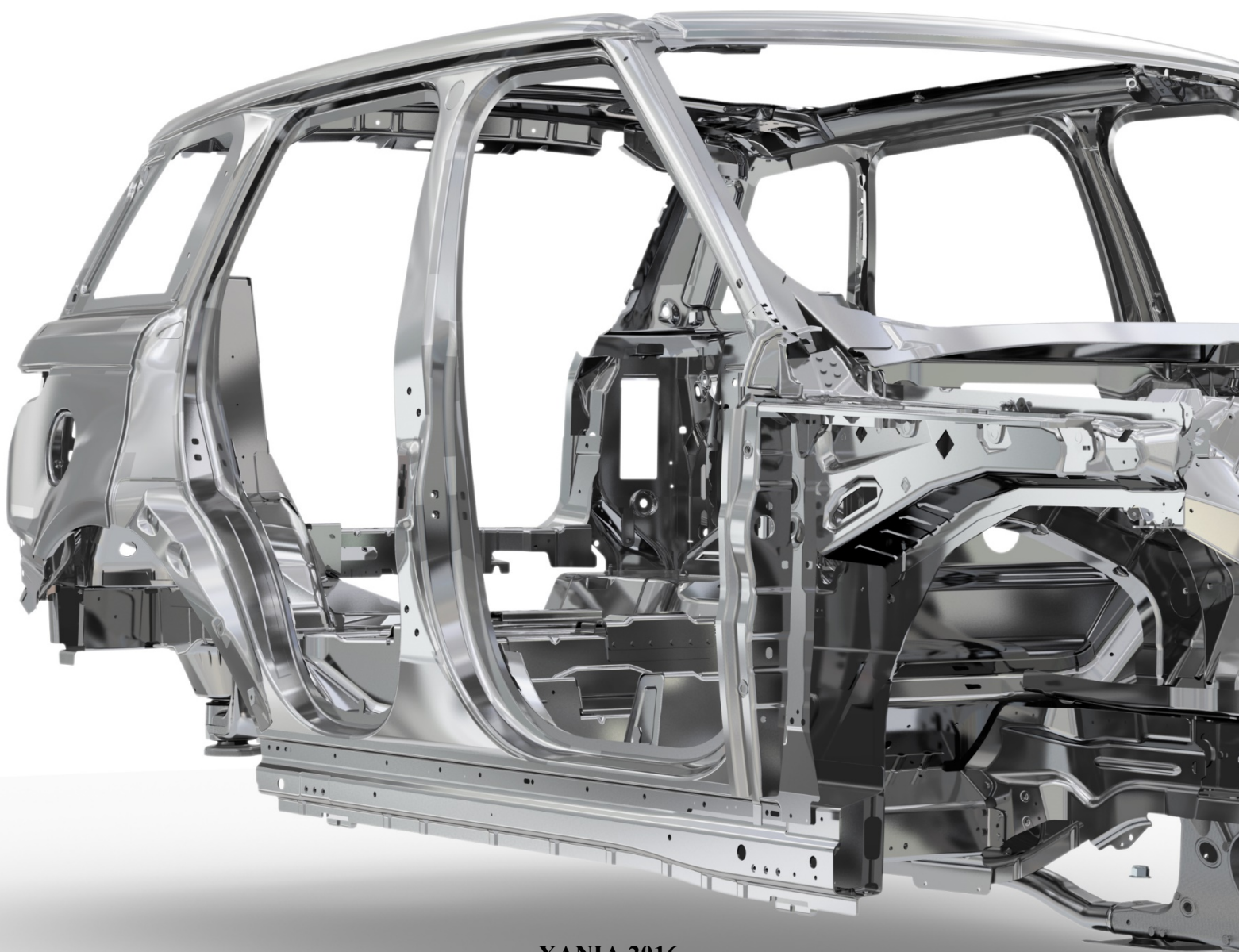




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ



XANIA 2016

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ
ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ**



Εργασία που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των
απαιτήσεων απόκτησης διπλώματος

υπό τον
Γεώργιο Π. Κουμαρτζάκη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης, καθηγητής

Copyright © Κουμαρτζάκης Π. Γεώργιος, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Εξώφυλλο:
Πλαίσιο Range Rover Sport Autobiography 2016

Σε συνεργασία με το Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών του
Πολυτεχνείου Κρήτης.



Αφιερώνεται στους γονείς μου
Παντελή και Μαρία

Περίληψη

Το βασικότερο δομικό στοιχείο κάθε αυτοκινούμενης κατασκευής είναι το πλαίσιο στήριξης των επιμέρους τμημάτων της. Στην αυτοκίνηση αναφέρεται ως αμάξωμα ή σασί. Η συγκεκριμένη εργασία έχει σαν αντικείμενο το σχεδιασμό, τη μελέτη και την ανάπτυξη ενός τέτοιου πλαισίου για το πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα πόλεως ER2015, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές που σχετίζονται τόσο με τους κανονισμούς συμμετοχής στο διεθνή διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου “Shell Eco Marathon”, όσο και με την ορθή και λειτουργική τοποθέτηση όλων των συστημάτων του οχήματος. Φυσικά η παραπάνω διαδικασία έχει σαν γνώμονα την εμπορική διαθεσιμότητα των υλικών για το σκοπό αυτό. Τη σχεδίαση ακολουθεί η διαδικασία της μοντελοποίησης της κατασκευής. Με τη χρήση εξειδικευμένου προεπεξεργαστή γίνεται η εφαρμογή των στατικών φορτίων που ασκούνται στο πλαίσιο και έπειτα μέσω της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία ελέγχεται η αντοχή του. Σε δεύτερο στάδιο με τη χρήση του ίδιου πακέτου λογισμικών γίνεται μια ιδιομορφική ανάλυση με σκοπό τον προσδιορισμό των φυσικών συχνοτήτων και των χαρακτηριστικών σχημάτων λειτουργίας της κατασκευής. Έτσι γίνεται εν μέρη κατανοητή η δυναμική συμπεριφορά της δομής του πλαισίου. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται για τα πλαίσια των οχημάτων του 2014 και του 2015. Τέλος από τα αποτελέσματα και τη σύγκριση τους προκύπτει η τελική πρόταση του σχεδίου η οποία προχωρά σε κατασκευή.

Abstract

The main structure of any self-propelled construction is the frame which connects its component parts. In automotive, this is called chassis. The main purpose of this thesis is the design and the development of a chassis for the prototype electric vehicle, ER2015. This project takes place in the Technical University of Crete. The design is carried out based on specific standards which are related to the participation regulations of the international fuel economy competition, "Shell Eco Marathon". The standards are also related to the proper and functional positioning of all vehicle systems. Naturally the above process shall be guided by the commercial availability of the components we need. After the design process, the modeling process follows. Using a specialized pre-processor, we apply the static loads on the frame and then we run the finite element analysis. In the second step, we use the same CAE software suite to run the modal analysis. This analysis determines the natural frequencies and the mode shapes of a chassis. This way we can partly understand the dynamic behavior of the frame structure. These analyses are made for the 2014 and the 2015 car frames. Finally, the results comparison shows the final project proposal which goes into construction.

Ευχαριστίες

Κατά την διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας υπήρξαν αρκετοί άνθρωποι οι οποίοι συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της, ο καθένας με το δικό του τρόπο. Θεωρώ απαραίτητο λοιπόν να αφιερώσω μερικές γραμμές σε αυτούς ώστε να τους απευθύνω τις ευχαριστίες μου.

Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης και καθηγητή μου, Νικόλαο Τσουρβελούδη. Η εμπιστοσύνη του προς το πρόσωπο μου και η συνεργασία μαζί του αποτέλεσαν αφορμή για να ασχοληθώ με σπουδαία πράγματα κατά τη διάρκεια φοίτησης μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να δώσω στο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και αρχηγό της ομάδας TUCer, Σπανουδάκη Πολυχρόνη. Η συνεργασία μαζί του ήταν μεγάλη τιμή για μένα. Η υποστήριξη καθώς και η αμέριστη εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ήταν κάτι παραπάνω από πολύτιμες στα 2,5 χρόνια που εργαστήκαμε μαζί.

Συνεχίζοντας δε μπορώ να μην αναφερθώ στην οικογένεια και τους φίλους μου. Είναι οι άνθρωποι στους οποίους οφείλω το πιο μεγάλο ευχαριστώ γιατί όποτε χρειάστηκε στάθηκαν δίπλα μου δίνοντας μου δύναμη και κουράγιο.

Ακόμη, ξεχωριστό κομμάτι στο οποίο πρέπει να κάνω αναφορά και να ευχαριστήσω είναι οι άνθρωποι με τους οποίους συνεργάστηκα στην ομάδα TUCer για 2 χρόνια. Χωρίς αυτά τα παιδιά και το εξαιρετικό κλίμα συνύπαρξης δεν θα μπορούσε να γίνει τίποτα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η παρούσα εργασία που πήρε σάρκα και οστά από την όρεξη και την εργασία τους.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τους Θανάση Παπαδόπουλο, Αργύρη Ραδόπουλο, Τρακατέλη Νίκο, Σαρρίδη Τάσο, Βέρρο Γιώργο από τη BETA CAE Systems S.A. Η βοήθεια τους ήταν πολύτιμη πάνω σε θέματα σχετικά με τη λειτουργία των λογισμικών της εταιρίας και τη χρήση αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

*Γεώργιος Π. Κουμαρτζάκης
Χανιά, Οκτώβριος 2016*



Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	v
Abstract	v
Ευχαριστίες	vii
Πίνακας περιεχομένων	ix
Λίστα εικόνων.....	xiii
Λίστα πινάκων	xvii
Λίστα διαγραμμάτων	xvii
Συντομογραφίες.....	xviii
1. Εισαγωγή.....	19
1.1 Ιστορική εξέλιξη πλαισίων οχημάτων	19
1.2 Είδη πλαισίων οχημάτων	21
1.2.1 Πλαίσιο τύπου σκάλας.....	21
1.2.2 Πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος.....	23
1.2.3 Πλαίσιο τύπου «ψαροκόκκαλο»	25
1.2.4 Πλαίσια τύπου «πατώματος» και «μπανιέρας»	26
1.2.5 Αυτοφερόμενα πλαίσια	27
1.2.6 Υποπλαίσια	29
1.3 Ηλεκτρικά οχήματα και οχήματα πόλης.....	30
1.3.1 Οχήματα πόλης	30
1.3.2 Ηλεκτρικά οχήματα	31
1.3.3 Πλαίσια οχημάτων πόλης.....	32
1.4 Η ομάδα TUCer και ο σκοπός της εργασίας	33
1.4.1 Τα οχήματα της ομάδας TUCer	34
1.4.2 Ο διαγωνισμός “Shell Eco Marathon”	34
1.4.3 Ο σκοπός της εργασίας	35
1.5 Μεθοδολογία ανάπτυξης	35
2. Σχεδιασμός.....	37
2.1 Επιλογή είδους πλαισίου και υλικών κατασκευής.....	37
2.1.1 Διαθεσιμότητα υλικών κατασκευής.....	37
2.1.2 Προφίλ και τύποι αλουμινίου.....	38
2.2 Κανονισμοί και βασικές διαστάσεις	40
2.2.1 Κανονισμοί πλαισίων	40
2.2.2 Κανονισμοί διαστάσεων.....	40
2.2.3 Το κάλυμμα του οχήματος.....	41
2.3 Βασικός σχεδιασμός	42
2.3.1 Μήκη και πλάτη κυρίως πλαισίου	43
2.3.2 Ύψη κυρίως πλαισίου	44

2.3.3 Βάσεις στήριξης εμπρός ημιαξόνων	45
2.3.4 Roll bar	46
2.4 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του οχήματος	47
2.4.1 Το πλαίσιο του ER2014 και οι λόγοι αντικατάστασης του.....	47
2.4.2 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του καλύμματος	49
2.4.3 Σχεδίαση με βάση τα ηλεκτρομηχανολογικά τμήματα	51
2.4.4 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του οδηγού	52
2.5 Τελικός σχεδιασμός	53
3. Αναλύσεις & μοντελοποίηση	57
3.1 Εισαγωγή	57
3.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	59
3.3 Θεωρίες αστοχίας	61
3.4 Στατική φόρτιση πλαισίου	62
3.4.1 Βάρη παλιού πλαισίου	62
3.4.2 Βάρη νέου πλαισίου	63
3.5 Μοντελοποίηση στατικής φόρτισης	65
3.5.1 Δημιουργία πλέγματος	65
3.5.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων	68
3.5.3 Μοντελοποίηση υλικών και πάχους διατομών	68
3.5.4 Μοντελοποίηση περιορισμών	70
3.5.5 Μοντελοποίηση βαρύτητας και δυνάμεων	70
3.5.6 Αρχείο επιλυτή	70
3.6 Ανάλυση ιδιομορφών	71
3.6.1 Χαρακτηριστικά σχήματα λειτουργίας	71
3.6.2 Ταλαντώσεις & συντονισμός	72
3.6.3 Τι δείχνουν τα χαρακτηριστικά σχήματα λειτουργίας	73
3.6.4 Το μαθηματικό υπόβαθρο της ανάλυσης	73
3.6.5 Η ανάλυση ιδιομορφών για το πλαίσιο ενός οχήματος.....	75
3.6.6 Η ανάλυση ιδιομορφών & το πλαίσιο του ER2015	76
3.7 Μοντελοποίηση ανάλυσης ιδιομορφών.....	77
3.7.1 Η μέθοδος και το αρχείο του επιλυτή	77
4. Επίλυση & σύγκριση μοντέλων.....	79
4.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	79
4.1.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης πλαισίου ER2014	79
4.1.2 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης πλαισίου ER2015	81
4.2 Τελικός σχεδιασμός πλαισίου ER2015.....	85
4.2.1 Δοκιμές βελτίωσης	85
4.2.2 Τελικό σχέδιο	86
4.2.3 Η διαδικασία πριν την τελική ανάλυση	89
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης τελικού σχεδιασμού	89
4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων στατικής ανάλυσης.....	92
4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης ιδιομορφών.....	92

4.5.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης πλαισίου ER2014	93
4.5.2 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης πλαισίου ER2015	96
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης ιδιομορφών	100
4.7 Τελικό συμπέρασμα	101
5. Κατασκευή	103
5.1 Προετοιμασία κατασκευής	103
5.2 Κοπή & διαμόρφωση τμημάτων πλαισίου	103
5.3 Συγκόλληση τμημάτων πλαισίου	104
5.4 Τοποθέτηση τμημάτων οχήματος στο νέο πλαίσιο	106
6. Επιδόσεις & συμπεράσματα	109
6.1 Ο διαγωνισμός και τα αποτελέσματα των επιδόσεων	109
6.2 Τελικά συμπεράσματα	111
6.3 Μελλοντικές αναλύσεις	111
Βιβλιογραφία	113
Κατασκευαστικά σχέδια	117

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση άμαξας Ασσύριων, Βρετανικό Μουσείο	19
Εικόνα 1.2: Σασί οχήματος σε πρόγραμμα προσομοίωσης CAE	20
Εικόνα 1.3: Σασί Porsche 918 Spider.....	21
Εικόνα 1.4: Σασί GMC Sierra	22
Εικόνα 1.5: Σασί σειράς φορτηγών Mercedes – Benz Actros	22
Εικόνα 1.6: Στρατιωτικό φορτηγό MAZ 79221	23
Εικόνα 1.7: Πλαίσιο Lamborghini Diablo του 1993.....	23
Εικόνα 1.8: Πλαίσιο Lotus 7 του 1972	24
Εικόνα 1.9: Mercedes – Benz 300SL Gullwing του 1957	25
Εικόνα 1.10: Σασί Lotus Elan του 1965.....	26
Εικόνα 1.11: Σασί Volkswagen Beetle του 1940	26
Εικόνα 1.12: Σασί Lotus Evora	27
Εικόνα 1.13: Σασί Mercedes – Benz GT 146 AMG	28
Εικόνα 1.14: Σασί Ferrari La Ferrari του 2013	28
Εικόνα 1.15: Σασί Mercedes – Benz SL550 του 2016.....	29
Εικόνα 1.16: Υποπλαίσιο κινητήρα, Lamborghini Aventador LP 700 του 2015	30
Εικόνα 1.17: Smart Fortwo του 1998	31
Εικόνα 1.18: Ηλεκτρικό όχημα BMW i3 του 2014	32
Εικόνα 1.19: Πλαίσιο και κλωβός ασφαλείας, Smart Fortwo του 1998	32
Εικόνα 1.20: Εσωτερική τομή BMW i3.....	33
Εικόνα 1.21: Το όχημα ER2015 της ομάδας TUCer.....	34
Εικόνα 1.22: Πορεία ανάπτυξης του πλαισίου του ER2015	35
Εικόνα 2.1: Προφίλ αλουμινίου	38
Εικόνα 2.2: Μπροστινή άποψη καλύμματος με βασικές διαστάσεις.....	41
Εικόνα 2.3: Δεξιά άποψη του καλύμματος	42
Εικόνα 2.4: Κάτοψη καλύμματος.....	42
Εικόνα 2.5: Κάτοψη βασικού πλαισίου με μετατρόχια και βασικά πλάτη	43
Εικόνα 2.6: Αριστερή πλάγια όψη με συνολικό μήκος πλαισίου και μεταξόνιο	43
Εικόνα 2.7: Αναπαράσταση εμπρός τροχού, ημιαξόνιου και μπράτσου	44
Εικόνα 2.8: Αναπαράσταση πίσω τροχού και ημιαξόνιου.....	45
Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση μπάρας ασφαλείας και βασικών διαστάσεων της.....	46
Εικόνα 2.10: Άποψη του βασικού τμήματος του πλαισίου.....	47
Εικόνα 2.11: Το πλαίσιο του ER2014.....	48
Εικόνα 2.12: Σημάδια φθοράς και οπές στήριξης στο πλαίσιο του ER2014	48
Εικόνα 2.13: Άνω άποψη στηρίξεων των καλυμμάτων	49
Εικόνα 2.14: Άνω άποψη πλαισίου με προσθήκες προφίλ στήριξης καλύμματος	50
Εικόνα 2.15: Τοποθέτηση ηλεκτρομηχανολογικών τμημάτων του οχήματος.....	51
Εικόνα 2.16: Τμήμα πλαισίου και μπάρες στήριξης καθίσματος	52

Εικόνα 2.17: Θέση οδηγού και σημεία στήριξης του καθίσματος.....	53
Εικόνα 2.18: Συνολική απεικόνιση ολοκληρωμένου σχεδιασμού του πλαισίου	53
Εικόνα 2.19: Απεικόνιση διαφορετικού πάχους προφίλ πλαισίου.....	54
Εικόνα 2.20: Απεικόνιση διαφορετικής διατομής προφίλ πλαισίου	54
Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα μεθόδου FEA σε λογισμικό CAE	58
Εικόνα 3.2: Η εφαρμογή της μεθόδου FEA σε μεγάλο εύρος κατασκευών.....	59
Εικόνα 3.3: Σημεία τοποθέτησης βάρους πάνω στο πλαίσιο	64
Εικόνα 3.4: Δημιουργία πλέγματος με μέση επιφάνεια	65
Εικόνα 3.5: Διαφορά στην πυκνότητα του πλέγματος.....	66
Εικόνα 3.6: Αυξομείωση πλέγματος ανάλογα με την ανάλυση.....	66
Εικόνα 3.7: Τμήματα πλαισίου όπου χρησιμοποιήθηκε πλέγμα στερεού όγκου.....	67
Εικόνα 3.8: Μερική άποψη πλαισίου μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος.....	67
Εικόνα 3.9: Τελική μορφή πλαισίου μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος.....	68
Εικόνα 3.10: Παραδείγματα ενώσεων CWELD στο πλαίσιο	68
Εικόνα 3.11: Αναπαράσταση πάχους προφίλ στον προεπεξεργαστή	69
Εικόνα 3.12: Σημεία πακτώσεων πλαισίου	70
Εικόνα 3.13: Το header file για τη γραμμική στατική ανάλυση	71
Εικόνα 3.14: Χαρ/στικά σχήματα λειτουργίας ταλαντώσεων.....	72
Εικόνα 3.15: Παράδειγμα συστήματος 2 βαθμών ελευθερίας.....	73
Εικόνα 3.16: Πειραματική ανάλυση δονήσεων σε BMW Z4 του 2006.....	75
Εικόνα 3.17: Τυπικές συχνότητες συντονισμού βασικών συστημάτων οχήματος	76
Εικόνα 4.1: Φόρτιση εμπρός αριστερής βάσης ημιαξόνιων ER2014	79
Εικόνα 4.2: Φόρτιση πίσω αριστερού ημιαξόνιου ER2014.....	80
Εικόνα 4.3: Φόρτιση πλαισίου ER2014 με εμφανές το σημείο μέγιστης τάσης.....	80
Εικόνα 4.4: Άποψη παραμορφώσεων του πλαισίου του ER2014.....	81
Εικόνα 4.5: Φόρτιση εμπρός αριστερής βάσης ημιαξόνιων ER2015	82
Εικόνα 4.6: Φόρτιση πίσω αριστερού ημιαξόνιου ER2015.....	82
Εικόνα 4.7: Φόρτιση πλαισίου ER2015 με εμφανές το σημείο μέγιστης τάσης.....	83
Εικόνα 4.8: Σημείο εμφάνισης μέγιστης τάσης του πλαισίου του ER2015.....	83
Εικόνα 4.9: Άποψη παραμορφώσεων του πλαισίου του ER2015.....	84
Εικόνα 4.10: Τοποθέτηση εικονικών προφίλ για επανεξέταση του σχεδιασμού.....	85
Εικόνα 4.11: Περιοχές με ανάγκη προσθήκης βάση των παραμορφώσεων	86
Εικόνα 4.12: Προσθήκες προφίλ αλουμινίου ως αντηρίδες.....	87
Εικόνα 4.13: Τελικό σχέδιο πλαισίου	87
Εικόνα 4.14: Απεικόνιση τελικού σχεδιασμού βάση διαφορετικών διατομών.....	88
Εικόνα 4.15: Τελικός σχεδιασμός βάση διαφορετικών παχών προφίλ.....	88
Εικόνα 4.16: Φόρτιση εμπρός βάσης ημιαξόνιων.....	89
Εικόνα 4.17: Φόρτιση πίσω ημιαξόνιου τελικού σχεδιασμού ER2015	90
Εικόνα 4.18: Φόρτιση τελικού σχεδιασμού του πλαισίου του ER2015.....	90
Εικόνα 4.19: Σημείο μέγιστης τάσης νέου πλαισίου μετά τον τελικό σχεδιασμό	91
Εικόνα 4.20: Παραμορφώσεις πλαισίου ER2015 μετά τον τελικό σχεδιασμό	91
Εικόνα 4.21: Χαρακτηριστικά Σχήματα Λειτουργίας πλαισίου του ER2014.....	94

Εικόνα 4.22: Συμπεριφορά πλαισίου ER2014 στο συντονισμό.....	95
Εικόνα 4.23: Αναπαράσταση στρέψης πλαισίου ER2014	95
Εικόνα 4.24: Αναπαράσταση κάμψης πλαισίου RE2014	96
Εικόνα 4.25: Συμπεριφορά νέου πλαισίου ER2015 στο συντονισμό.....	97
Εικόνα 4.26: Χαρακτηριστικά Σχήματα Λειτουργίας πλαισίου ER2015	98
Εικόνα 4.27: Αναπαράσταση στρέψης πλαισίου ER2015	99
Εικόνα 4.28: Αναπαράσταση κάμψης πλαισίου RE2015	99
Εικόνα 5.1: Τα τμήματα που αποτελούν το πλαίσιο	103
Εικόνα 5.2: Κατεργασία διαμόρφωσης βάσεων ημιαξόνων	104
Εικόνα 5.3: Συγκόλληση του πλαισίου με τη μέθοδο T.I.G	104
Εικόνα 5.4: Συγκόλληση T.I.G	105
Εικόνα 5.5: Βασικό τμήμα πλαισίου υπό κατασκευή	105
Εικόνα 5.6: Τελικά στάδια κατασκευής.....	106
Εικόνα 5.7: Εισαγωγή των πρώτων τμημάτων του οχήματος.....	106
Εικόνα 5.8: Τοποθέτηση πατωμάτων και τμημάτων καμπίνας.....	107
Εικόνα 5.9: Τοποθέτηση ηλεκτρομηχανολογικών μερών.....	107
Εικόνα 6.1: Συμμετέχοντες διαγωνισμού “Shell Eco Marathon 2015”	109
Εικόνα 6.2: Διαδικασία τεχνικού ελέγχου και πιστοποίηση του οχήματος	110
Εικόνα 6.3: Το πρωτότυπο ER2015 κατά τη διάρκεια του αγώνα.....	110
Εικόνα 6.4: Η ομάδα TUCer το 2015 στο Ahoj του Rotterdam	111

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες αλουμινίου 6063 – T4.....	39
Πίνακας 2.2: Ιδιότητες αλουμινίου 6061 – T4.....	40
Πίνακας 3.1: Πίνακας με βάρη πλαισίου 2014	63
Πίνακας 3.2: Πίνακας με βάρη πλαισίου 2015	64
Πίνακας 3.3: Ιδιότητες χάλυβα 18/8 AISI – SAE 304.....	69
Πίνακας 4.1: Πίνακας σύγκρισης αποτελεσμάτων στατικής ανάλυσης	92
Πίνακας 4.2: Πίνακας φυσικών συχνοτήτων πλαισίου ER2014.....	93
Πίνακας 4.3: Πίνακας φυσικών συχνοτήτων πλαισίου ER2015.....	96

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα συχνοτήτων πλαισίου ER2014.....	93
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα συχνοτήτων πλαισίου ER2015.....	97
Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση φυσικών συχνοτήτων των δύο πλαισίων	100

Συντομογραφίες

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
FEA	Finite Elements Analysis
MDOFS	Multi Degree of Freedom System

Χ.Σ.Λ.	Χαρακτηριστικά Σχήματα Λειτουργίας
--------	------------------------------------

1.

Εισαγωγή

1.1 Η ιστορική εξέλιξη των πλαισίων οχημάτων

Η ανάγκη του ανθρώπου να μετακινείται και να μετακινεί τον οδηγό από την αρχαιότητα ήδη, στην ανακάλυψη του τροχού και την κατασκευή τροχοφόρων οχημάτων. Από τότε έκανε την εμφάνιση της η χρήση της κατασκευής ενός σκελετού που θα ένωνε τους τροχούς και θα είχε την απαραίτητη αντοχή για να στηρίζει όλη την κατασκευή.



Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση άμαξας Ασσύριων, Βρετανικό Μουσείο – Λονδίνο.

Από τους Μεσοποταμίους λαούς και τους Ρωμαίους έως το μεσαίωνα, η εξέλιξη των πλαισίων των τροχοφόρων είναι συνεχής. Ανάλογα με την εποχή οι κατασκευές αυτές φτιάχνονταν από πέτρα, ξύλο, κεραμικά, διάφορα μέταλλα και κινητήριος δύναμη τους ήταν κατά κύριο λόγο τα άλογα.

Με τη βιομηχανική επανάσταση, την ραγδαία εξέλιξη των βιομηχανικών κατεργασιών και την αφθονία πρώτων υλών, τα σασί των οχημάτων αρχίζουν να παίρνουν μια πιο γνώριμη με τη σημερινή τους μορφή. Τα πρώτα πλαίσια οχημάτων που έφεραν μηχανή έκαναν την εμφάνιση τους μεταξύ 1896 και 1910 [25]. Ήταν παρόμοια στο σχεδιασμό με αυτά των ιππήλατων αμαξών και ήταν κατασκευασμένα σχεδόν εξ' ολοκλήρου από διάφορα είδη ξύλου και χάλυβα. Παρ' όλα αυτά τα πρώτα 50 χρόνια της ανάπτυξης των αυτοκινήτων τα σχέδια και οι κατασκευές των πλαισίων ήταν συχνά αυτοσχέδια. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τα πρώιμα στάδια της αυτοκίνησης οι μηχανικοί είχαν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ελαφρών και αποδοτικών κινητήρων. Παρόλο

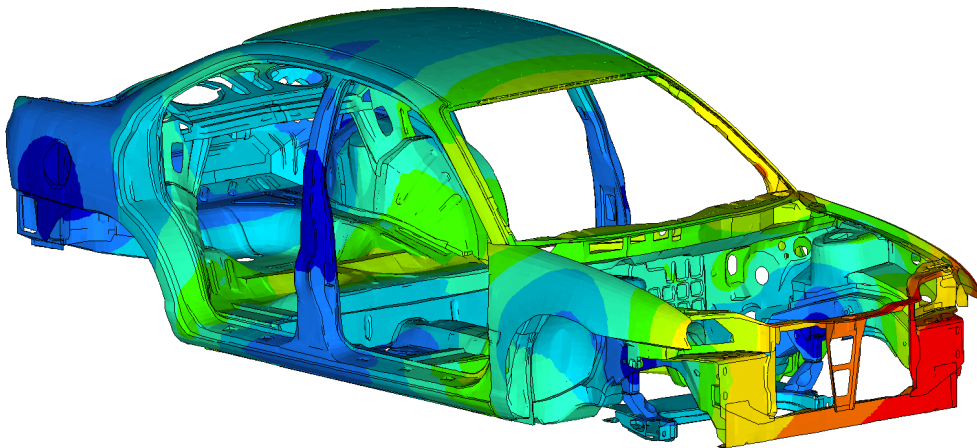
που ο Karl Benz επισήμανε τη σημασία της εξέλιξης του πλαισίου ως μέρος ενός οχήματος, η γενική εξέλιξη του υστερούσε σε σύγκριση με εκείνο του συστήματος μετάδοσης κίνησης μέχρι το 1930 [10].

Καθώς η τεχνολογία των κινητήρων αναπτυσσόταν, οι μέγιστες ταχύτητες των αυτοκινήτων αυξήθηκαν με ταχείς ρυθμούς. Αυτό οδήγησε σε περαιτέρω απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία, την άνεση και την ασφάλεια στις στροφές και το φρενάρισμα του αυτοκινήτου. Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις η αυτοκινητοβιομηχανία άρχισε να επικεντρώνεται πιο ουσιαστικά στην ανάπτυξη πλαισίων.

Κατά τη δεκαετία του 1950 οι κατασκευαστές οχημάτων χρειάζονταν 6 με 10 χρόνια για να εξελίξουν ένα σασί οχήματος μαζικής παραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η “Mercedes S-Class” του 1965, μοντέλο του οποίου το πλαίσιο χρειάστηκε μια ολόκληρη δεκαετία έως ότου ολοκληρωθεί [10].

Η εισαγωγή της τεχνολογίας CAD το 1970 επέτρεψε στους κατασκευαστές οχημάτων να κινηθούν μακριά από τον παραδοσιακό σχεδιασμό στην πολλή πιο αποτελεσματική αναπαράσταση και παραμετροποίηση σε υπολογιστή. Αυτή η αλλαγή επέτρεψε στους μηχανικούς όχι μόνο να προσομοιώνουν το σχεδιασμό και την κατασκευή επί της οθόνης, αλλά και να εξετάζουν και να αναπτύσσουν νέα σχέδια σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα [17].

Έπειτα η εισαγωγή των ολοένα και πιο προηγμένων προσομοιώσεων σε υπολογιστή και τα προγράμματα CAE, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη γενική γνώση για τη δυναμική συμπεριφορά του οχήματος, έχουν οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην ασφάλεια και την άνεση των οχημάτων τα τελευταία 20 χρόνια [10], [17].



Εικόνα 1.2: Σασί οχήματος σε πρόγραμμα προσομοίωσης CAE.

Σήμερα τα πλαίσια των οχημάτων δεν ακολουθούν πιστά μια μέθοδο σχεδιασμού και κατασκευής. Ο χρόνος ανάπτυξης και σχεδιασμού τους κυμαίνεται πλέον στα 2 με 3 χρόνια ενώ ο ρυθμός παραγωγής έχει δεκαπλασιαστεί [10]. Η τεχνολογία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν οδηγήσει στη δημιουργία σασί με πολύ χαμηλό βάρος και ιδιαίτερα μεγάλης αντοχής. Η κατασκευή τους αποτελεί πλέον για την αυτοκινητοβιομηχανία, μια διαδικασία ιδιαίτερης έρευνας και ανάπτυξης. Αυτό είναι ένα φυ-

σικό επακόλουθο αφού όσο οι απαιτήσεις του ανθρώπου και οι επιδόσεις των οχημάτων αυξάνονται, τόσο μεγαλύτερα είναι τα καθήκοντα που καλείται να αναλάβει μια τέτοια κατασκευή.



Εικόνα 1.3: Σασί Porsche 918 Spider από ανθρακόνημα και κράματα αλουμινίου.

1.2 Είδη πλαισίων οχημάτων

Η ανάπτυξη πλαισίων οχημάτων με σύγχρονες μεθόδους έχει υιοθετήσει αρχές σχεδιασμού του παρελθόντος αλλά έχει δημιουργήσει και μια πληθώρα νέων. Τα νέα υλικά και οι βιομηχανικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα σύγχρονα λογισμικά, έχουν φέρει στο προσκήνιο είδη σασί που συνδυάζουν την ασφάλεια, την άνεση και τις απαιτήσεις ενός οχήματος.

1.2.1 Πλαίσιο τύπου σκάλας

Τα πλαίσια του τύπου σκάλας είναι από τα πρώτα που κατασκευάστηκαν για οχήματα. Τα περισσότερα αυτοκίνητα μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '60 χρησιμοποιούσαν ως πρότυπο το συγκεκριμένο σχέδιο [14]. Το όνομα «σκάλα» προκύπτει από την εμφάνιση του. Οι εγκάρσια τοποθετημένες δοκοί πάνω στις 2 κύριες διαμήκειες, θυμίζουν τα σκαλοπάτια μίας σκάλας όταν κάποιος κοιτάει την κάτωψη του. Αρχικά, οι δοκοί ήταν πολύ απλοί σε σχήμα χωρίς καθόλου γωνίες κατά μήκος τους. Με το πέρασμα του χρόνου οι εργονομικές ανάγκες τροποποίησαν το σχεδιασμό αυτών των πλαισίων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να εμφανιστούν καμπύλες προκειμένου το σασί να μην έρχεται σε επαφή με τους άξονες αλλά και για να παρέχει βάσεις στήριξης στον κινητήρα και σε άλλα μηχανικά και μη, μέρη του αυτοκινήτου [14].

Όσον αφορά την αντοχή αυτού του πλαισίου, οι διαμήκειες δοκοί της κατασκευής παραλαμβάνουν τις διαμήκειες δυνάμεις που προκαλούνται από τις επιταχύνσεις και τα φρεναρίσματα ενώ τα πλευρικά και εγκάρσια μέλη εξασφαλίζουν αντοχή στις πλευρικές δυνάμεις και την περαιτέρω αύξηση της στρεπτικής ακαμψίας [14].



Εικόνα 1.4: Σασί τύπου σκάλας του οχήματος GMC Sierra.

Αναφορικά με τα πλεονεκτήματα του πλαισίου τύπου σκάλας, αυτό που το καθιστά τόσο ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι η στιβαρότητα και προσαρμοστικότητα του. Όσον αφορά τη μεταφορά φορτίων μεγάλου βάρους, αυτά τα πλαίσια είναι τα πλέον κατάλληλα λόγω της γεωμετρίας που επιτρέπει στρέβλωση χωρίς πλαστική παραμόρφωση και αντοχή σε κρουστικά φορτία. Επιπλέον τα συγκεκριμένα σασί έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε πολλά διαφορετικά οχήματα λόγω απλότητας κατασκευής. Σε ορισμένους σχεδιασμούς, από την ολοκλήρωσή τους και έπειτα οι κατασκευαστές μπορούν με σχετική ευκολία να αυξομειώνουν το μήκος και το πλάτος προτού τοποθετηθούν τα υπόλοιπα μέρη του οχήματος [14].



Εικόνα 1.5: Σασί σειράς φορτηγών Mercedes – Benz Actros. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σασί τύπου σκάλας που προσαρμόζεται σε παραπάνω από έναν τύπους οχημάτων.

Το μεγάλο ελάττωμα αυτής της κατασκευής είναι το υψηλό βάρος που τη συνοδεύει αλλά και η χαμηλή αντοχή σε στρεπτική ακαμψία λόγω του γεγονότος ότι εκτείνεται κυρίως σε 2 διαστάσεις.

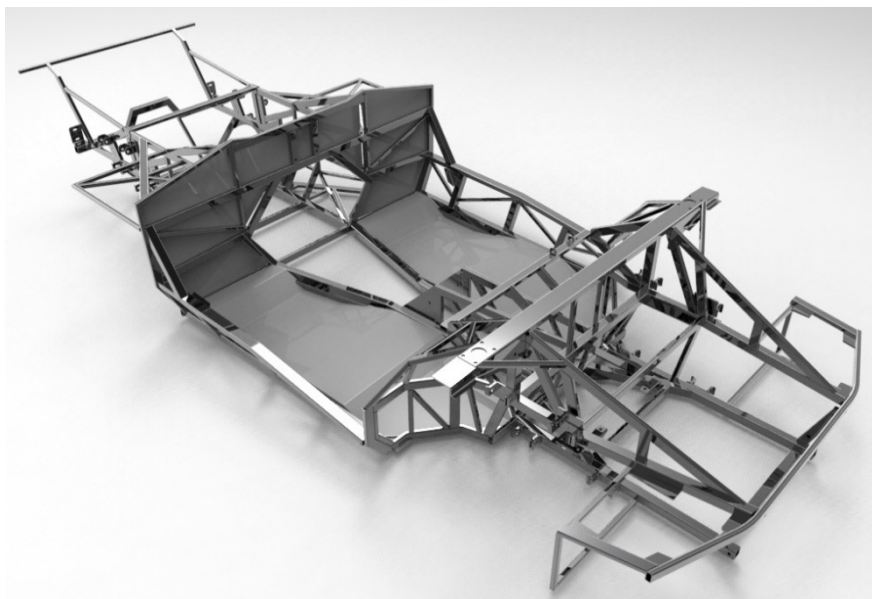
Δεδομένων όλων των παραπάνω, η χρήση του σασί αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε οχήματα με τετρακίνηση αλλά και στη πλειοψηφία των ημιφορητών, φορτηγών και οχημάτων βαρέων καθηκόντων όπως γερανών, πυροσβεστικών, στρατιωτικών οχημάτων κ.α.



Εικόνα 1.6: Στρατιωτικό φορτηγό MAZ 79221. Το όχημα φέρει σασί τύπου σκάλας.

1.2.2 Πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος

Το πλαίσιο χωροδικτυώματος όπως φανερώνει και η ονομασία του, είναι ένα χωροδικτύωμα αποτελούμενο από ένα μεγάλο αριθμό ενωμένων δοκών κυκλικής ή τετραγωνικής διατομής. Αυτοί οι δοκοί συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας την κατασκευή του σασί.

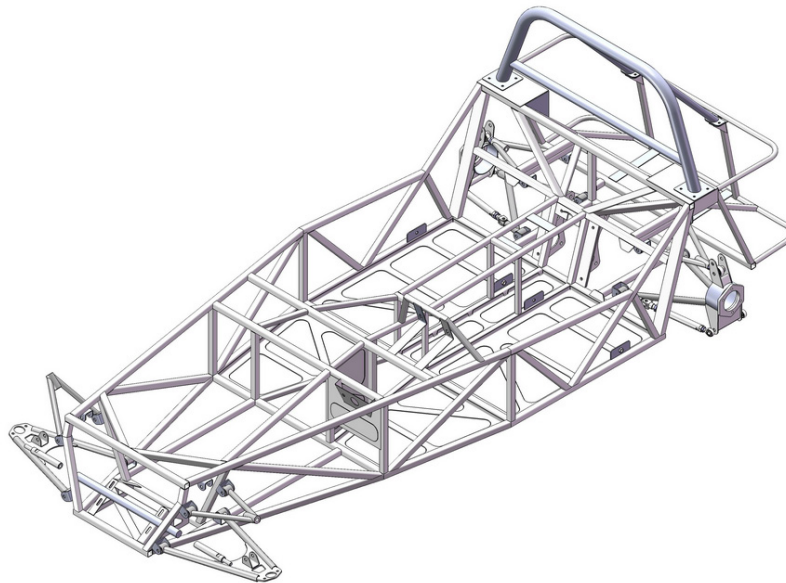


Εικόνα 1.7: Πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος. Lamborghini Diablo του 1993.

Η συγκεκριμένη μορφή δημιουργήθηκε από την ανάγκη ενίσχυσης της δυσκαμψίας ενός πλαισίου με χρήση στηριγμάτων. Σε απλοποιημένη μορφή θα μπορούσε να πει κανείς πως το χωροδικτύωμα είναι η εξέλιξη του σασί τύπου σκάλας. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού είναι ό,τι στο βασικό πλαίσιο γίνονται προσθήκες στηριγμάτων ώστε να παραλαμβάνουν τις διαφόρων ειδών φορτίσεις. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο όπου κάθε κύριο τμήμα του θα είχε και ένα στήριγμα στο οποίο δεν θα ασκούνται στρεπτικά φορτία παρά μόνο θλιπτικά και εφελκυστικά. Έτσι κάθε δοκός δέχεται φορτία μόνο προς την διεύθυνση κατά την οποία εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή [14], [20], [33].

Βασικότερο πλεονέκτημα του σχεδίου αυτού είναι η υψηλή αντοχή σε φορτίσεις τριών διαστάσεων και το χαμηλό βάρος του συγκριτικά με την αντοχή αυτή. Επίσης το γεγονός ότι τόσο τα υλικά όσο και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του είναι σχετικά απλά, το καθιστά μια πολύ φθηνή και στιβαρή λύση για ένα όχημα. Όταν λοιπόν έχουμε να κάνουμε με κατασκευές όπου η ταχύτητα κατασκευής και ο χώρος της καμπίνας μπορούν να θυσιάστούν για χάρη της ισχυρής αντοχής, το σασί χωροδικτύωμα είναι μια πολύ καλή επιλογή [14], [20].

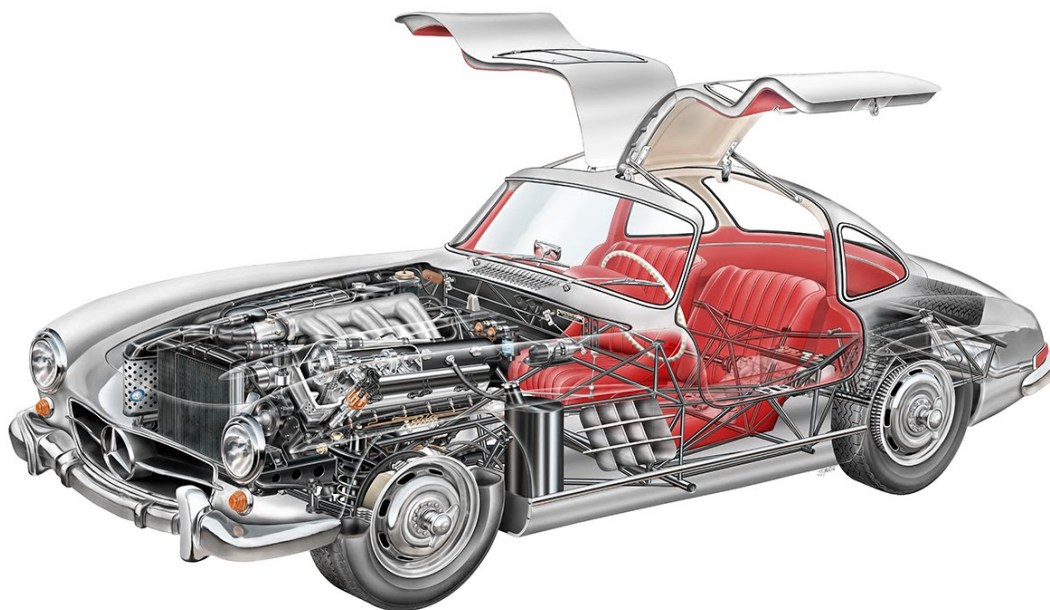
Από τη άλλη πλευρά ένα τέτοιο σασί μειονεκτεί σε χρόνο κατασκευής και πολυπλοκότητα σχεδιασμού. Το γεγονός ότι συχνά αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό δοκών το καθιστά δύσκολο στη συναρμολόγηση του συμπαρασύροντας έτσι αυξητικά τον παράγοντα του κατασκευαστικού χρόνου [33].



Εικόνα 1.8: Πλαίσιο τύπου χωροδικτύωματος. Lotus 7 του 1972.

Λόγω της μεγάλης αντοχής του το συγκεκριμένο σασί χρησιμοποιείται κυρίως από αγωνιστικά αυτοκίνητα υψηλών προδιαγραφών. Στις αρχές της δεκαετίας του '50 η Mercedes – Benz δημιούργησε την “300SLR”, αγωνιστικό αυτοκίνητο που χρησιμοποιούσε σωληνοειδές χωροδικτύωμα. Αυτό ήταν η αφορμή για τη δημιουργία του πρώτου αυτοκινήτου δρόμου με τέτοιο πλαίσιο, την “300SL Gullwing”. Μάλιστα επειδή λόγω σχεδίου οι δοκοί της οροφής μείωναν την προσβασιμότητα στη θέση του οδηγού,

η Mercedes έπρεπε να επεκτείνει τις πόρτες στην οροφή. Το αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία των διάσημων «φτερών του γλάρου» που έδωσαν την ονομασία τους στο συγκεκριμένο μοντέλο [20], [33].



Εικόνα 1.9: Mercedes – Benz 300SL “Gullwing” του 1957. Εμφανή είναι το σασί τύπου χωροδικτύωματος, ο κινητήρας και οι διάσημες θήρες που ανοίγουν προς τα πάνω.

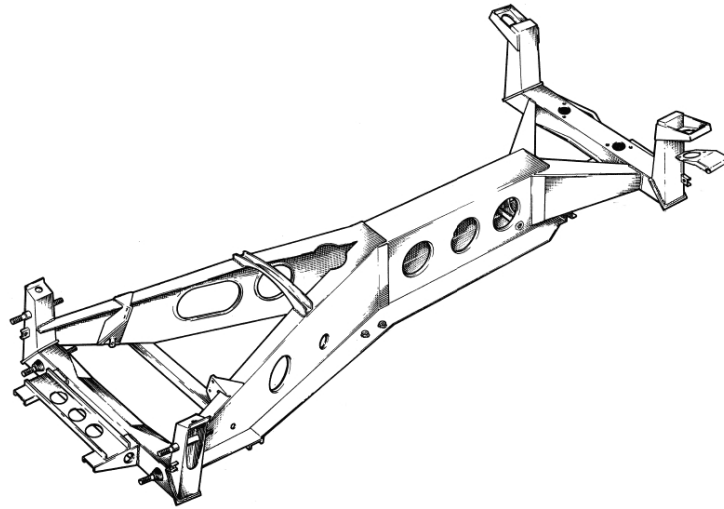
1.2.3 Πλαίσιο τύπου «ψαροκόκκαλο»

Ο Hans Ledwica ιδρυτής της τσέχικης Tatra ήταν ο πρώτος που σχεδίασε και χρησιμοποίησε το σασί «ψαροκόκκαλο» για το στρατιωτικό φορτηγό Tatra 11 το 1923. Συνεχιστής αυτού του σχεδιασμού υπήρξε ο Colin Chapman ιδρυτής της Lotus, που σχεδίασε ένα τέτοιο σασί για το πρωτότυπο roadster “Lotus Elan”.

Το πλαίσιο «ψαροκόκκαλο» ή “Backbone” είναι στην ουσία ένα πλαίσιο χωροδικτύωματος με τη διαφορά ότι αντί για τις δοκούς που δρουν ως στηρίγματα αυτή την φορά χρησιμοποιούνται ελάσματα μετάλλου κατάλληλα διαμορφωμένα [14]. Πιο συγκεκριμένα, ένα έλασμα διατρέχει όλη την επιφάνεια του πλαισίου κάνοντας το με αυτό τον τρόπο έναν ενιαίο τετραγωνικής διατομής κορμό που περνά από το κέντρο του σασί [14]. Στην πράξη ο κορμός αυτός είναι κατασκευασμένος από μεταλλικά ελάσματα που έχουν διπλωθεί και συγκολληθεί κατάλληλα δημιουργώντας έτσι έναν κεντρικό τομέα τετραγωνικής διατομής με κενό εσωτερικό [14]. Αυτό επιτρέπει εύκολα την τοποθέτηση των μηχανικών μερών σε περίπτωση που το όχημα διαθέτει άξονα μετάδοσης κίνησης [14], [30], [33].

Το συγκεκριμένο σασί μπορεί στην πραγματικότητα να είναι πιο στιβαρό και δύσκαμπτο από ένα αντίστοιχο χωροδικτύωματος ίδιου βάρους. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται σε μικρού μεγέθους αυτοκίνητα. Επιπλέον λόγω της γεωμετρίας του εξοικονομεί πολύ χώρο δίνοντας την ευχέρεια στο σχεδιαστή να προσαρμόσει κατάλληλα τα υπόλοιπα δομικά μέρη του οχήματος.

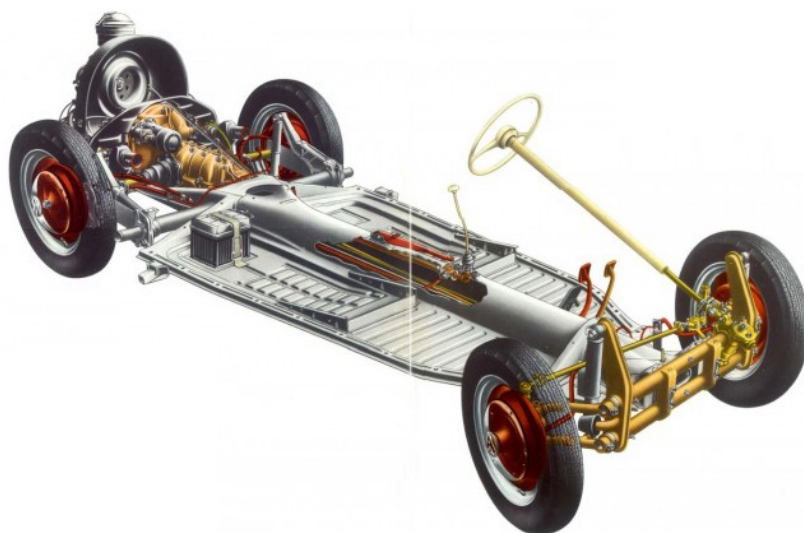
Στα μειονεκτήματα του παρουσιάζονται προβλήματα που αφορούν την μέγιστη επιτρεπτή ακαμψία και την ασφάλεια των επιβατών. Το πλαίσιο πρέπει να είναι πολύ στενό στον κεντρικό του τομέα εφόσον πρέπει να χωρέσουν εκατέρωθεν τα καθίσματα, οπότε η αντοχή του σε στρέψη έχει συγκεκριμένα όρια. Τέλος σε επίπεδο ασφάλειας οι επιβάτες είναι εκτεθειμένοι σε πλευρικές συγκρούσεις λόγω απώλειας δομικών στοιχείων στα πλάγια του οχήματος [14], [20], [33].



Εικόνα 1.10: Σασί τύπου «ψαροκόκκαλο». Lotus Elan του 1965.

1.2.4 Πλαίσια τύπου «πατώματος» και «μπανιέρας»

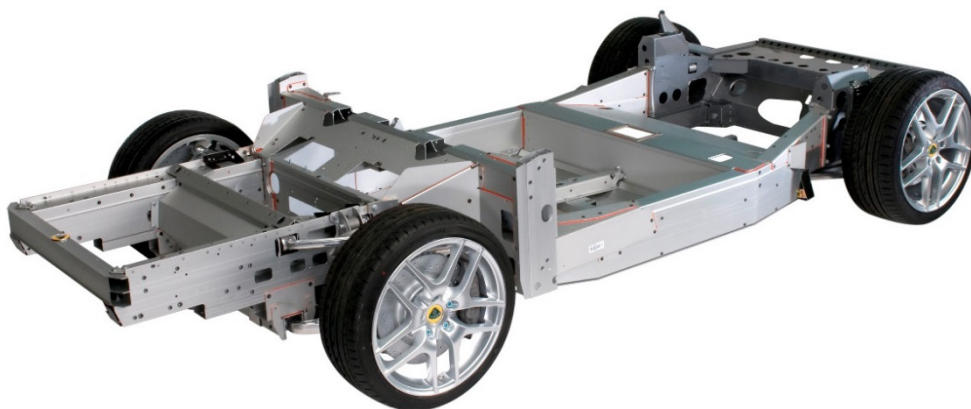
Τα πλαίσια «πατώματος» κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου από μεγάλης επιφάνειας ελάσματα μετάλλου. Οι επιφάνειες αυτές σφυρηλατούνται και συγκολλώνται μαζί. Βιομηχανικά για να γίνει αυτό πρέπει να πρεσαριστούν σε κατάλληλα καλούπια δύο μεγάλης επιφάνειας ελάσματα μετάλλου και έπειτα να συγκολληθούν σημειακά μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα σασί τύπου σκάλας με συμπαγές



Εικόνα 1.11: Σασί τύπου πατώματος, Volkswagen Beetle του 1940.

πάτωμα [14]. Σε αυτό το σχεδιασμό συνηθίζεται τα δύο ελάσματα μετάλλου που έχουν προσαρτιστεί μεταξύ τους να σχηματίζουν ένα κεντρικό κορμό που παραπέμπει σε πλαίσιο μορφής «ψαροκόκκαλο». Αυτή η διάταξη που διατρέχει όλο το μήκος του αυτοκινήτου συμβάλλει στην αποφυγή μεγάλου βέλους κάμψης κατά τη στατική και δυναμική φόρτιση του οχήματος [20], [30].

Εξέλιξη του παραπάνω σχεδίου είναι η κατασκευή μίας μορφής «μπανιέρας» ή “tub” χρησιμοποιώντας ελάσματα μετάλλου ή άλλων υλικών [14]. Το σασί κρατάει το χαρακτήρα του «πατώματος», πλαισιώνεται όμως από διατάξεις ελασμάτων που δημιουργούν ένα σχεδιασμό γύρο από τους επιβάτες [33].



Εικόνα 1.12: Σασί τύπου «μπανιέρας». Lotus Evora.

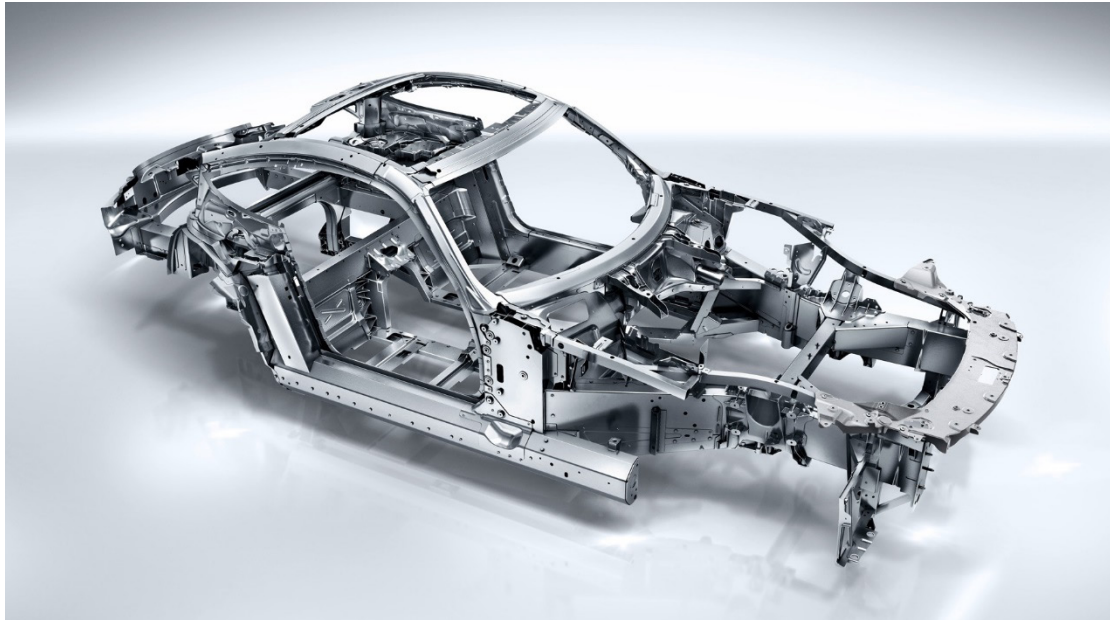
Ο συγκεκριμένος τύπος πλαισίου διακρίνεται από ιδιαίτερη αντοχή σε φορτίσεις τριών διαστάσεων. Τα σασί τύπου «μπανιέρας» είναι πολύ χαμηλού βάρους και η δομή τους συμβάλλει αρκετά στην παθητική ασφάλεια του οχήματος σε περιπτώσεις πλάγιων και μετωπικών συγκρούσεων. Αυτό τα καθιστά μια ιδανική λύση για αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων [33].

1.2.5 Αυτοφερόμενα πλαίσια

Σήμερα πάνω από το 80% των πλαισίων που παράγονται είναι αυτοφερόμενα ή αλλιώς “monocoque” σασί από κράματα μετάλλων ή ανθρακονήματα. Το monocoque είναι μια κατασκευή σασί πολύπλοκης γεωμετρίας που περιβάλλει όλη την καμπίνα του οχήματος. Από σχεδιασμό σε σχεδιασμό αλλά και ανάλογα με το υλικό κατασκευής έχουμε μια πληθώρα γεωμετρικών αλλαγών στα οχήματα που φέρουν τέτοιο σασί, η οποία επηρεάζεται και από το σκοπό χρήσης του αυτοκινήτου [10], [20], [30], [33].

Η πλειοψηφία των επιβατικών οχημάτων αυτή τη στιγμή φέρει αυτοφερόμενα πλαίσια από κράματα μετάλλων και κυρίως αλουμινίου. Η κατασκευή τους γίνεται από πολύπλοκης γεωμετρίας ελάσματα τα οποία συγκολλώνται μεταξύ τους. Σε σχέση με άλλους τύπους σασί ο συγκεκριμένος δίνει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη του οχήματος αφού αποτελεί ένα αρκετά μεγάλο μέρος του και πολλές φορές και ένα εξωτερικό του τμήμα. Αυτό προέκυψε σχεδιαστικά από την ανάγκη για ασφαλέστερα και ελαφρύτερα σασί [33].

Στους τύπους πλαισίων που έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής το πλαίσιο του αυτοκινήτου δέχεται όλα τα φορτία ενώ τα πλευρικά πάνελ δεν είχαν καμία συμμετοχή στην απορρόφηση αυτών. Επιπλέον όσο ελαφριά και αν είναι μια κατασκευή σασί, το βάρος του αυτοκινήτου αυξάνεται όσο προστίθενται τα υπόλοιπα δομικά του μέρη. Έτσι οι σχεδιαστές στράφηκαν στην κατασκευή πλαισίων που είχαν σαν τμήματα τους σημεία από τα πάνελ του οχήματος [14], [20], [33].



Εικόνα 1.13: Αυτοφερόμενο σασί. Mercedes – Benz GT 146 AMG του 2015.



Εικόνα 1.14: Αυτοφερόμενο σασί από ανθρακονήματα. Ferrari La Ferrari του 2013.

Τα αυτοφερόμενα σασί είναι σύνηθες να κατασκευάζονται και από ανθρακονήματα. Το υλικό αυτό είναι μεγάλης αντοχής, ιδιαίτερα ελαφρύ και μπορεί να προσαρμόζεται σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Κάθε τέτοιο πλαίσιο μπορεί να απαρτίζεται από

διαφορετικούς τύπους ανθρακονήματος με πολλαπλές στρώσεις. Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύπλοκη, απαιτεί τεχνογνωσία, σύγχρονες εγκαταστάσεις και ένα σχετικά υπολογίσιμο χρόνο ανάπτυξης.

Οι δυνάμεις σε αυτή την κατηγορία πλαισίων μεταφέρονται μέσα από όλα τα δομικά στοιχεία. Αυτά φροντίζουν να τις ισοκατανέμουν ή να τις διοχετεύουν σε συγκεκριμένες διευθύνσεις και σημεία τα οποία είναι ειδικά σχεδιασμένα για να παραμορφώνονται απορροφώντας τις δυνάμεις της κρούσης. Τα αυτοφερόμενα αμαξώματα είναι σχεδιασμένα για στρεπτική ακαμψία με το μικρότερο δυνατό βάρος έχοντας περιορισμένη αντοχή στα κρουστικά φορτία. Επιπλέον η μάζα τους είναι κατανεμημένη σε όλο τους το σώμα και όχι συγκεντρωμένη σημειακά [22], [33].

Στα πλεονεκτήματα των αυτοφερόμενων σασί κυριότερο είναι η ασφάλεια που προσδίδουν σε ένα όχημα. Η κατασκευή που περιβάλλει τους επιβάτες αλλά και η ύπαρξη αρκετών μεταλλικών ζωνών παραμόρφωσης, δημιουργούν ασφαλή σε συγκρούσεις και ανατροπές οχήματα. Για αυτό το σκοπό είναι συχνό να κατασκευάζονται αυτοφερόμενα σασί που έχουν εμπρός και πίσω μεταλλικά υποπλαίσια. Η δομή τους επίσης προσφέρει άνεση στην τοποθέτηση των μερών του οχήματος αλλά και η αντοχή σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις είναι αξιόλογη. Τέλος το χαμηλό βάρος και η ευκολία βιομηχανικής παραγωγής τους με αυτοματοποιημένο τρόπο αποδεικνύουν το γιατί έχουν καθιερωθεί στην αυτοκίνηση [33].



Εικόνα 1.15: Αυτοφερόμενο σασί αλουμινίου. Mercedes – Benz SL550 του 2016.

1.2.6 Υποπλαίσια

Στην πλειονότητα των οχημάτων τα βαριά και ογκώδη μηχανικά μέρη τοποθετούνται πάνω στο σασί. Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές έχουν ενσωματώσει στον κύριο σκελετό τους υποπλαίσια που χρησιμοποιούνται για σκοπούς στήριξης. Τα υποπλαίσια

είναι ξεχωριστές μικρότερου μεγέθους κατασκευές, πάνω στις οποίες τοποθετούνται συγκεκριμένα εξαρτήματα όπως ο κινητήρας ή το πίσω σύστημα ανάρτησης. Έπειτα αυτά προσαρμόζονται στο κυρίως σασί και ολοκληρώνουν τη δομή της κατασκευής. Ο πιο κοινός τύπος σασί στον οποίο συναντάμε υποπλαίσια είναι τα αυτοφερόμενα [14].

Το μεγάλο πλεονέκτημα των υποπλαisiών έχει να κάνει με την συναρμολόγηση του οχήματος καθώς δίνουν την δυνατότητα ξεχωριστής τοποθέτησης εξαρτημάτων [14]. Επιπλέον παρέχουν μεγάλη προσαρμοστικότητα στο πλαίσιο αφού επιτρέπουν τη χρήση διαφορετικών μηχανικών μερών σε οχήματα ίδιου σχεδιασμού [30].



Εικόνα 1.16: Πίσω μεταλλικό υποπλάνιο κινητήρα. Lamborghini Aventador LP 700-4 του 2015.

1.3 Ηλεκτρικά οχήματα και οχήματα πόλης

Με την άνθηση της βιομηχανίας και την ανάπτυξη των υπηρεσιών κατά τον 19^ο αιώνα, ο άνθρωπος άρχισε να στρέφεται στο δευτερογενή και τον τριτογενή τομέα. Αυτό προκάλεσε τη συσσώρευση ενός μεγάλου μέρους του πληθυσμού στις πόλεις. Όπως ήταν αναμενόμενο η αύξηση του όγκου των αστικών κέντρων αλλά και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δημιούργησε την ανάγκη εναλλακτικών και φιλικών προς το περιβάλλον τρόπων μεταφοράς. Έτσι οι αυτοκινητοβιομηχανίες στράφηκαν στην κατασκευή οχημάτων μικρού μεγέθους και χαμηλών ρύπων.

1.3.1 Οχήματα πόλης

Η ανάγκη μεταφοράς μέσα σε μία πόλη είναι σήμερα επιβεβλημένη. Λόγο του κυκλοφοριακού προβλήματος, του περιορισμένου χώρου στάθμευσης αλλά και των μεγάλων αποστάσεων εντός του αστικού κύκλου, αυτή δεν είναι καθόλου εύκολη. Έτσι

όλο και περισσότεροι άνθρωποι αναζητούν τη λύση σε οχήματα μικρά σε μέγεθος αλλά και οικονομικά στη χρήση.

Τα οχήματα πόλης είναι αυτοκίνητα μικρού μεγέθους, όσον αφορά το μήκος και το πλάτος τους, αλλά και στην πλειοψηφία τους μικρού κυβισμού. Διαθέτουν από 2 έως 4 θέσεις επιβατών και ανάλογα με το μοντέλο, μικρό αποθηκευτικό χώρο. Είναι χαμηλών επιδόσεων και χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου αφού η κίνηση στην πόλη δεν απαιτεί μεγάλες ταχύτητες.



Εικόνα 1.17: Smart Fortwo του 1998.

1.3.2 Ηλεκτρικά οχήματα

Η πετρελαϊκή κρίση αλλά και η ατμοσφαιρική ρύπανση που έχουν αυξηθεί κατακόρυφα τα τελευταία χρόνια, έχουν στρέψει την αυτοκίνηση στην αναζήτηση οικολογικών τρόπων μεταφοράς. Έτσι έκαναν την εμφάνισή τους τα ηλεκτροκίνητα ή ηλεκτρικά οχήματα. Τα αυτοκίνητα αυτά έχουν σαν κινητήριο δύναμη την ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή αποθηκεύεται ή παράγεται στο όχημα και διοχετευόμενη σε έναν ηλεκτροκινητήρα, μετακινεί το αυτοκίνητο. Το πλεονέκτημα στην τεχνολογία αυτή είναι ό,τι η χρήση του κινητήρα αυτού του τύπου δεν εκπέμπει ρύπους.

Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη αφορά αυτοκίνητα που φέρουν μπαταρίες σαν αποθήκη της ενέργειας που χρειάζονται. Τα αυτοκίνητα αυτά συνδέονται με μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να φορτίσουν τις μπαταρίες τους. Η δεύτερη κατηγορία συμπεριλαμβάνει αυτοκίνητα τα οποία φέρουν αποθηκευμένο το καύσιμο σε άλλη μορφή και με τη βοήθεια κυψελών, το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα τέτοιο καύσιμο είναι το υδρογόνο που συνδεδεμένο με ατμοσφαιρικό οξυγόνο και με τη μέθοδο της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης σε κυψέλη, παράγει ηλεκτρισμό [5], [26].



Εικόνα 1.18: Ηλεκτρικό όχημα BMW i3 του 2014.

Τα πρώτα βήματα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έγιναν με τα λεγόμενα «υβριδικά» μοντέλα. Η φιλοσοφία της λειτουργίας αυτών των οχημάτων είναι η παράλληλη ύπαρξη ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης κι ενός ηλεκτροκινητήρα που λειτουργούν συμπληρωματικά [5], [26].

1.3.3 Πλαίσια οχημάτων πόλης

Οι στατιστικές έρευνες δείχνουν ό,τι πάνω από το 60% των ατυχημάτων στα οποία εμπλέκονται αυτοκίνητα, γίνονται εντός πόλεων. Είναι κατανοητό λοιπόν πως αν και τα οχήματα πόλης είναι φτιαγμένα για να κινούνται με μικρές ταχύτητες, πρέπει να είναι απόλυτα ασφαλή για τους επιβάτες τους. Κύριο ρόλο για την εξασφάλιση της ακεραιότητας των επιβατών κατά τη σύγκρουση έχει το πλαίσιο του οχήματος.



Εικόνα 1.19: Πλαίσιο και κλωβός ασφαλείας Smart Fortwo του 1998.

Τα οχήματα πόλεως λόγω μεγέθους έχουν μικρό βάρος αν εξαιρέσουμε την προσθήκη των μπαταριών. Έτσι πέρα από την απαιτούμενη αντοχή σε στατικά και δυναμικά φορτία, το κύριο μέλημα των κατασκευαστών είναι βέλτιστη αντοχή σε συγκρούσεις. Για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των σασί οχημάτων πόλεως σήμερα φέρει αυτοφερόμενα ή πλαίσια χωροδικτυώματος από ατσάλι και άλλα μεταλλικά κράματα [14]. Βέβαια με την καθιέρωση του ανθρακονήματος σαν υλικό κατασκευής έχουμε την εμφάνιση και τέτοιου είδους αυτοφερόμενων σασί χαμηλότερου βάρους.



Εικόνα 1.20 Εσωτερική τομή BMW i3. Εμφανή είναι το πλαίσιο και ο ηλεκτροκινητήρας του οχήματος.

1.4 Η ομάδα TUCer και ο σκοπός της εργασίας

Η ομάδα TUCer είναι ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης που κατασκευάζει πρωτότυπα οχήματα πόλης, χαμηλής κατανάλωσης. Από το 2008 που δημιουργήθηκε έχει αναπτύξει και κατασκευάσει 3 οχήματα πόλεως. Κάθε όχημα αποτελεί ένα τετράτροχο, μονοθέσιο, ηλεκτρικό όχημα πόλης που κατασκευάζεται εξ' ολοκλήρου στα εργαστήρια του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα συγκεκριμένα οχήματα αποτελούν πλατφόρμα πειραματισμού πάνω σε θέματα μηχανολογικού σχεδιασμού, χαμηλής κατανάλωσης, οδηγικής ασφάλειας και αυτόνομης πλοήγησης.

Κάθε χρόνο η ομάδα αναπτύσσει και βελτιώνει το πρωτότυπο της με σκοπό να διαγωνιστεί στο διεθνή διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου “Shell Eco Marathon”. Από εκεί έχει αποσπάσει 4 πρωτιές σε θέματα ασφάλειας οχημάτων και ενεργειακών προκλήσεων. Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου, η ομάδα βρίσκεται τα τελευταία χρόνια μέσα στις 4 καλύτερες ομάδες της Ευρώπης, με την πιο πρόσφατη κατανάλωση του οχήματος να είναι στα 193 χιλιόμετρα ανά κυβικό μέτρο υδρογόνου.



Εικόνα 1.21: Το όχημα ER2015 της ομάδας TUCer στο διαγωνισμό “Shell Eco Marathon 2015”.

1.4.1 Τα οχήματα της ομάδας TUCer

Τα οχήματα με τα οποία ασχολείται η ομάδα TUCer είναι ηλεκτρικά οχήματα πόλεως τα οποία κινούνται με καύσιμο το υδρογόνο. Τα πρωτότυπα αυτά είναι χαμηλού βάρους και διαθέτουν κυψέλη υδρογόνου. Το υδρογόνο που βρίσκεται υπό πίεση μέσα σε φιάλη, διοχετεύεται μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο στην κυψέλη. Εκεί με τη διαδικασία της αντίστροφης ηλεκτρόλυσης παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό κινεί έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος με τη σειρά του κινεί και το όχημα. Σκοπός αυτών των πρωτοτύπων είναι η μεγαλύτερη δυνατή αυτονομία καυσίμου. Αυτό πρακτικά σημαίνει τη διάσχιση όσων περισσότερων χιλιομέτρων γίνεται με το λιγότερο δυνατό καύσιμο.

1.4.2 Ο διαγωνισμός “Shell Eco Marathon”

Ο διαγωνισμός “Shell Eco Marathon” πραγματοποιείται επι 30 χρόνια και αποτελεί σημείο αναφοράς της ερευνητικής δραστηριότητας που σχετίζεται με μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και την εξέλιξη νέων τεχνολογιών οχημάτων. Η διοργάνωση του γίνεται κάθε χρόνο στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο συγκεντρώνοντας πάνω από 300 ερευνητικές ομάδες πανεπιστημίων.

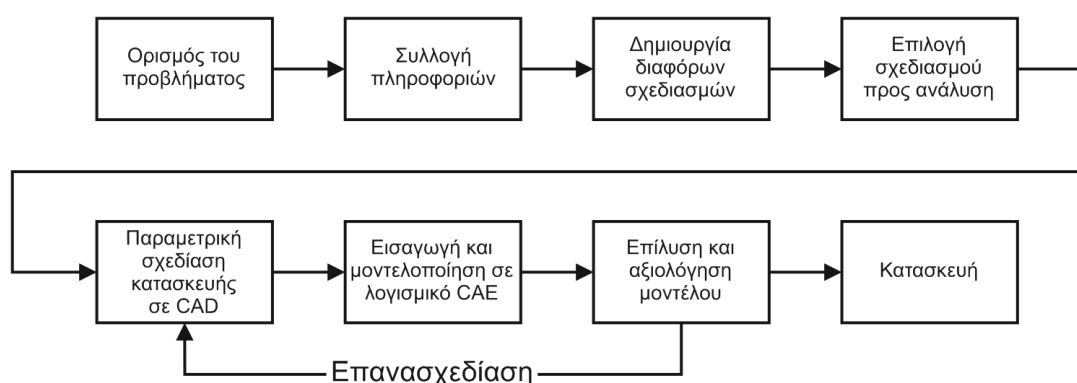
Η ομάδα TUCer λαμβάνει μέρος στην κατηγορία οχημάτων πόλεως με καύσιμο το υδρογόνο. Σκοπός είναι να διανύσει μια συγκεκριμένη απόσταση σε συγκεκριμένο χρόνο. Η απόσταση αυτή χωρίζεται σε γύρους κατά τους οποίους το όχημα πρέπει να σταματήσει και να εκκινήσει κάθε φορά που περνάει την αφετηρία. Κάθε ομάδα έχει τέσσερις διαθέσιμες προσπάθειες οι οποίες υπάγονται σε κανονισμούς και στενά χρονικά περιθώρια. Στόχος είναι το όχημα να έχει την απαραίτητη τεχνολογία αλλά και να κινηθεί σωστά ώστε η κατανάλωση του να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

1.4.3 Ο σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας αυτής αποτελεί ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του πλαισίου του οχήματος που καλείται να πάρει μέρος στον παραπάνω διαγωνισμό. Εφόσον βασικός σκοπός, όπως προαναφέρθηκε, είναι η ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου, κυριότερο μέλημα είναι η κατασκευή ενός όσο ελαφρότερου σασί γίνεται. Ο λόγος λοιπόν για τον οποίο υλοποιείται η στατική ανάλυση και η ανάλυση ιδιομορφών, είναι για να κατασκευασθεί ένα πλαίσιο αρκετά ελαφρύ και ανθεκτικό στις καταπονήσεις που θα δεχθεί κατά την κίνηση του οχήματος.

1.5 Μεθοδολογία ανάπτυξης

Όπως το πλαίσιο ενός οχήματος παραγωγής έτσι και το σασί του ER2015 πρέπει να ακολουθήσει μια μέθοδο και μια στρατηγική για την πορεία ανάπτυξης του. Αυτή είναι μια διαδικασία που ακολουθείται για κάθε μηχανολογική κατασκευή με σκοπό την αποφυγή λαθών, τη βελτιστοποίηση της και τη μείωση του χρόνου παραγωγής. Παρακάτω φαίνεται η πορεία ανάπτυξης του συγκεκριμένου πλαισίου.



Εικόνα 1.22: Πορεία ανάπτυξης του πλαισίου του ER2015.

Η αρχική διαδικασία προϋποθέτει τον ορισμό του τι ακριβώς πρέπει να κατασκευαστεί και τη συλλογή παντός είδους πληροφοριών για την κατασκευή αυτή. Έπειτα δημιουργούνται κάποια πιθανά σχέδια του πλαισίου τα οποία περνούν μια διαδικασία εκτίμησης και διόρθωσης. Αφού γίνει αυτό επιλέγεται ένα σχέδιο το οποίο θεωρητικά ικανοποιεί τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Το τελευταίο σχεδιάζεται σε πρόγραμμα CAD και μετά μοντελοποιείται για ανάλυση σε λογισμικό CAE. Η ανάλυση αυτή θα δώσει την πληροφορία για το αν ο σχεδιασμός είναι κατάλληλος. Αν η απάντηση σε αυτό είναι θετική, η διαδικασία προχωρά στην κατασκευή. Αν όχι, τότε γίνεται επανασχεδίαση με βάση τις πληροφορίες που προέκυψαν και ακολουθείται η ίδια διαδικασία έως ότου το μοντέλο είναι ικανό προς κατασκευή.

2.

Σχεδιασμός

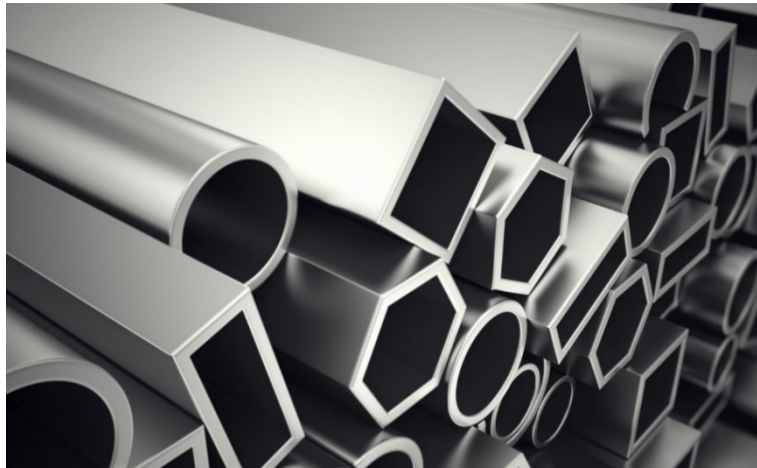
2.1 Επιλογή είδους πλαισίου και υλικών κατασκευής

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει πριν την έναρξη του σχεδιασμού είναι η επιλογή του τύπου πλαισίου που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες του οχήματος. Έπειτα πρέπει να γίνει ανεύρεση των υλικών. Οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιούνται με γνώμονα την διαθέσιμη τεχνογνωσία και τις εγκαταστάσεις στις οποίες θα γίνει η κατασκευή.

Βασικός σκοπός του πλαισίου για το όχημα ER2015 είναι να αποτελέσει μια ελαφριά και ανθεκτική κατασκευή, που δεν θα είναι υψηλού κόστους και θα μπορεί να κατασκευασθεί στα εργαστήρια του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για αυτούς τους λόγους το σασί τύπου χωροδικτυώματος από δοκούς αλουμινίου θεωρήθηκε η καλύτερη επιλογή. Ένα τέτοιου τύπου σασί, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια αρκετά ελαφριά και στιβαρή λύση σε φορτίσεις τριών διαστάσεων. Επιπλέον τα δομικά του μέρη μπορούν εύκολα να κοπούν και να συγκολληθούν. Ως υλικό επιλέχθηκε το αλουμίνιο το οποίο αποτελεί ένα φθινό, ανθεκτικό και ελαφρύ υλικό που εύκολα μπορεί να κατεργαστεί.

2.1.1 Διαθεσιμότητα υλικών κατασκευής

Η επιλογή του υλικού έγινε σύμφωνα με κατασκευαστικά κριτήρια αλλά και γνωρίζοντας ότι τα προφίλ αλουμινίου είναι αρκετά διαδεδομένα και ευρέως εμπορεύσιμα στην ελληνική αγορά. Το αρχικό πλάνο προέβλεπε τη χρήση ορθογωνικού προφίλ για το κύριο μέρος του σασί, τετραγωνικού για τις επιμέρους στηρίξεις και κυλινδρικού για τη μπάρα ασφαλείας.



Εικόνα 2.1: Προφίλ αλουμινίου.

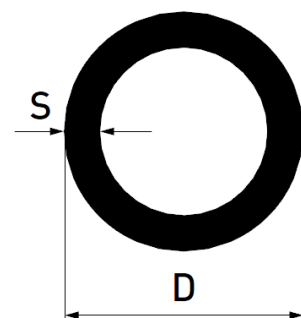
Το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε εδώ ήταν η διαθεσιμότητα των ζητούμενων προφίλ στην ποσότητα που ήταν αναγκαία. Αυτό συνέβη γιατί οι προμηθευτές αλουμινίου παράγουν βιομηχανικά ένα προφίλ μόνο αν η παραγγελία του ξεπερνά ένα ορισμένο βάρος. Φυσικά το βάρος του αλουμινίου που χρειαζόταν όλη η κατασκευή δεν ξεπερνούσε ούτε καν το ένα εκατοστό του βάρους που χρειαζόταν για να γίνει η παραγγελία. Η εξέλιξη αυτή οδήγησε σε πολλές μετατροπές και αλλαγές τον αρχικό σχεδιασμό. Εν τέλει το οριστικό σχέδιο προς ανάλυση δημιουργήθηκε αφού οριστικοποιήθηκε η διαθεσιμότητα των συμβατών προφίλ.

2.1.2 Προφίλ και τύποι αλουμινίου

Οι τύποι αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκαν στη σχεδίαση του πλαισίου είναι δύο, το **6063 – T4** και το **6061 – T4**. Τα διαφορετικά προφίλ των τύπων αυτών είναι τριών ειδών, ορθογωνικής, τετραγωνικής και κυκλικής διατομής.

Αλουμίνιο τύπου 6063 – T4:

Το αλουμίνιο αυτού του τύπου είναι ένα κράμα μέτριας αντοχής με καλό φινίρισμα και μεγάλη ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Η συγκολλησιμότητα του είναι αρκετά καλή και η ικανότητα κατεργασίας του μεγάλη [7]. Το προφίλ που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα, κυκλικής διατομής.



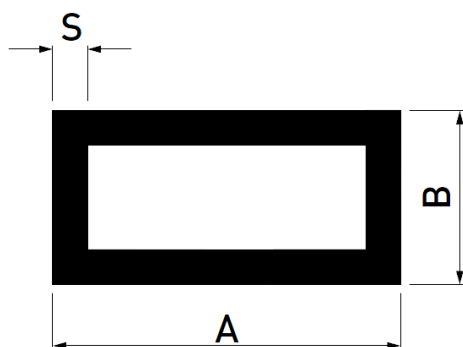
D	20 mm
S	1,5 mm
Βάρος	0,236 kg/m

Ιδιότητες αλουμινίου 6063 – T4	
Πυκνότητα	2,69 g/cm ³
Μέτρο ελαστικότητας	69 GPa
Λόγος Poisson	0,33
Όριο διαρροής	80 MPa

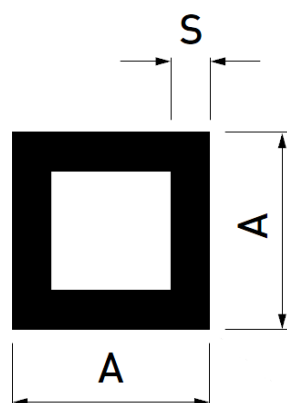
Πίνακας 2.1

Αλουμίνιο τύπου 6061 – T4:

Πρόκειται για τύπο αλουμινίου με πολύ καλή ποιότητα ανοδίωσης, αντοχή στη διάβρωση και άριστη μηχανική διαμόρφωση και συγκολλησιμότητα. Το συγκεκριμένο κράμα έχει υποστεί θερμική κατεργασία ομογενοποίησης με φυσική γήρανση [8]. Τα προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένα ορθογωνικής και δύο τετραγωνικής διατομής.



A	40 mm
B	20 mm
S	2 mm
Βάρος	0,607 kg/m



A	20 mm
B	20 mm
S	1,3 mm
Βάρος	0,263 kg/m

A	30 mm
B	30 mm
S	1,3 mm
Βάρος	0,403 kg/m

Ιδιότητες αλουμινίου 6061 – T4	
Πυκνότητα	2,7 g/cm ³
Μέτρο ελαστικότητας	69 GPa
Λόγος Poisson	0,33
Όριο διαρροής	130 MPa

Πίνακας 2.2

2.2 Κανονισμοί και βασικές διαστάσεις

Το πρωτότυπο όχημα ER2015 κατασκευάζεται προκειμένου να διαγωνιστεί στην κατηγορία των οχημάτων πόλεως, στο διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου “Shell Eco Marathon”. Η συμμετοχή αυτή διέπεται από αυστηρούς κανονισμούς που αφορούν όλα τα τμήματα του οχήματος. Κατά το σχεδιασμό του σασί οι κανονισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι γενικοί σχεδιαστικοί κανόνες αλλά και οι διαστασιολογικοί. Επιρροές στην κατασκευή του σχεδίου έχουν και οι κανόνες που ορίζουν την ορατότητα και την πρόσβαση του οδηγού στο όχημα, καθώς και οι κανόνες του συστήματος διεύθυνσης και της ζώνης ασφαλείας.

2.2.1 Κανονισμοί πλαισίων

- Όλα τα οχήματα πρέπει να έχουν σταθερό πάτωμα και το πλαίσιο πρέπει να εμποδίζει οποιοδήποτε μέρος του σώματος του οδηγού από την επαφή με το οδόστρωμα.
- Το σασί του οχήματος πρέπει να έχει σχεδιαστεί ώστε το μήκος, το πλάτος και το ύψος του να προστατεύουν το σώμα του οδηγού σε περίπτωση σύγκρουσης ή ανατροπής.
- Το σασί του οχήματος πρέπει να είναι εξοπλισμένο με roll bar προστασίας του οδηγού. Η μπάρα πρέπει να εκτείνεται 5 εκατοστά γύρω από το κράνος του, όταν κάθεται σε κανονική θέση οδήγησης και η ζώνη ασφαλείας είναι κλειστή.
- Το roll bar πρέπει να αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του σασί και να διαχωρίζει την καμπίνα του οδηγού από την κυψέλη υδρογόνου και τον κινητήρα.
- Το roll bar θα πρέπει να μπορεί να αντέξει στατική φόρτιση 70 kg χωρίς να παραμορφώνεται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

2.2.2 Κανονισμοί διαστάσεων

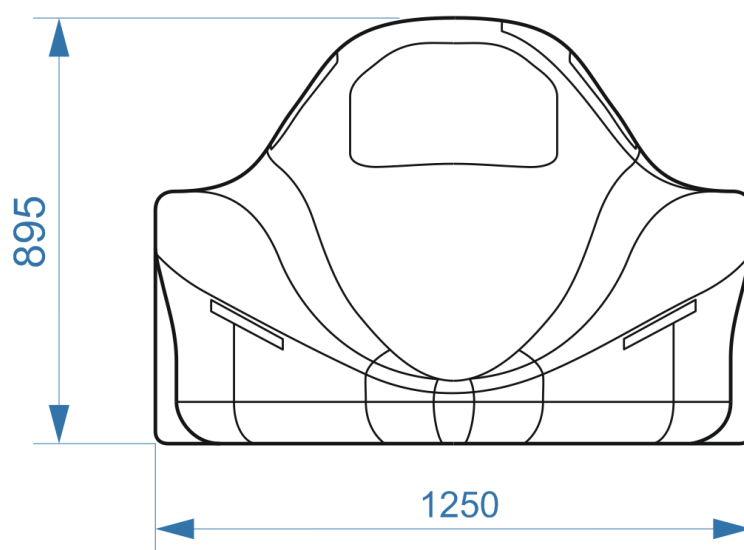
- Το συνολικό ύψος του οχήματος πρέπει να είναι μεταξύ 100 cm και 130 cm.
- Το συνολικό πλάτος του οχήματος, χωρίς καθρέπτες, πρέπει να είναι μεταξύ 120 cm και 130 cm.

- Το συνολικό μήκος του οχήματος πρέπει να είναι μεταξύ 220 cm και 350 cm.
- Το μεταξόνιο πρέπει να είναι τουλάχιστον 120 cm.
- Το μετατρόχιο πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 cm για το μπροστινό άξονα, και τουλάχιστον 80 cm για τον πίσω. Οι αποστάσεις μετρώνται μεταξύ των κέντρων των ελαστικών.
- Η καμπίνα του οδηγού πρέπει να έχει ύψος τουλάχιστον 88 cm και πλάτος, στο σημείο των ώμων, τουλάχιστον 70 cm.
- Η απόσταση του οχήματος από το οδόστρωμα, με τον οδηγό μέσα, πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 cm.
- Το κεφάλι του οδηγού, φορώντας το κράνος, πρέπει να απέχει τουλάχιστον 5 cm από το άνω τμήμα της καμπίνας.

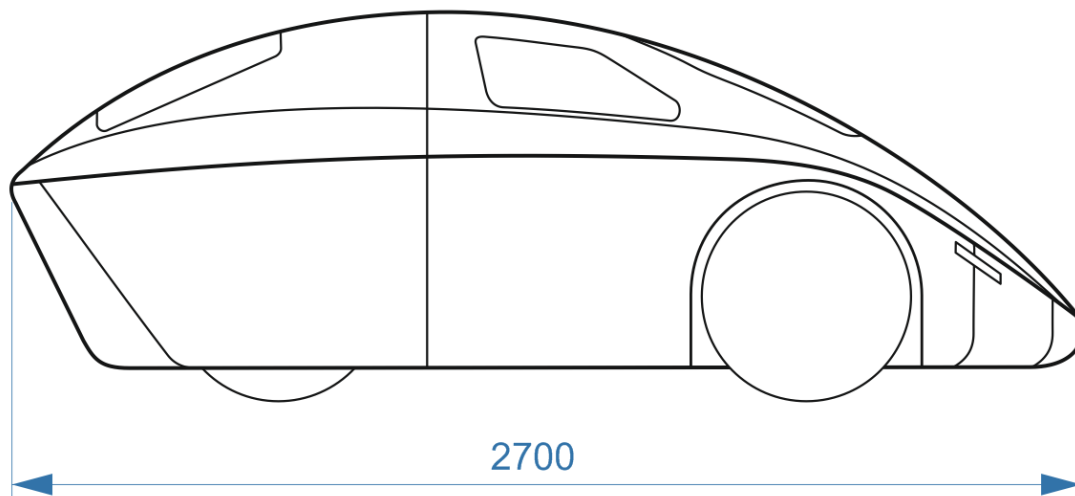
2.2.3 Το κάλυμμα του οχήματος

Το κάλυμμα του ER2015 είναι μια κατασκευή από ανθρακόνημα η οποία περιβάλλει όλο το όχημα εξασφαλίζοντας του μια καλή αεροδυναμική συμπεριφορά. Ρόλος του καλύμματος είναι επίσης να προστατεύει τον οδηγό και τα μέρη του οχήματος από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, θραύσματα ή συγκρούσεις μικρής έντασης [31].

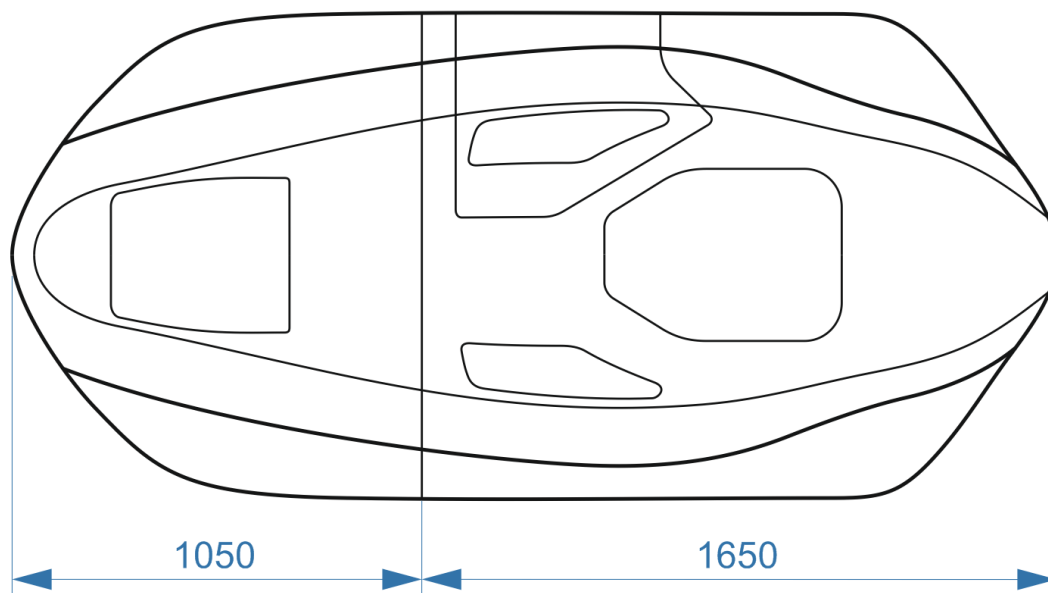
Παρακάτω ακολουθούν οι βασικές διαστάσεις του καλύμματος που ορίζονται από τους κανονισμούς και που όρισαν με τη σειρά τους το μήκος, το πλάτος και το ύψος του πλαισίου.



Εικόνα 2.2: Μπροστινή άποψη καλύμματος με βασικές διαστάσεις [31].



Εικόνα 2.3: Δεξιά άποψη του καλύμματος [31].



Εικόνα 2.4: Κάτοψη καλύμματος [31].

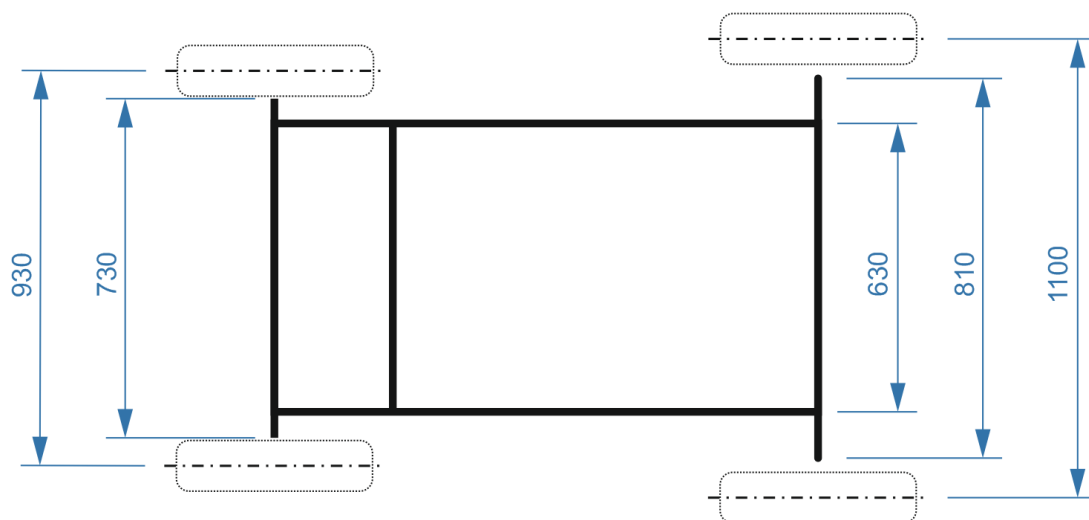
2.3 Βασικός σχεδιασμός

Ο βασικός σχεδιασμός του πλαισίου ξεκινάει με το κυρίως μέρος που δομείται με βάση τους κανονισμούς και τις διαστάσεις που έχει το κάλυμμα του οχήματος. Αυτό που πραγματοποιείται στο παρόν στάδιο είναι η δημιουργία ενός βασικού σκελετού, πάνω στον οποίο θα στηριχτούν όλα τα δομικά μέρη του αυτοκινήτου. Ο σχεδιασμός αυτού του τμήματος και η επιλογή των προφίλ που θα χρησιμοποιηθούν είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού η κατασκευή αυτή θα δεχθεί τις μεγαλύτερες φορτίσεις.

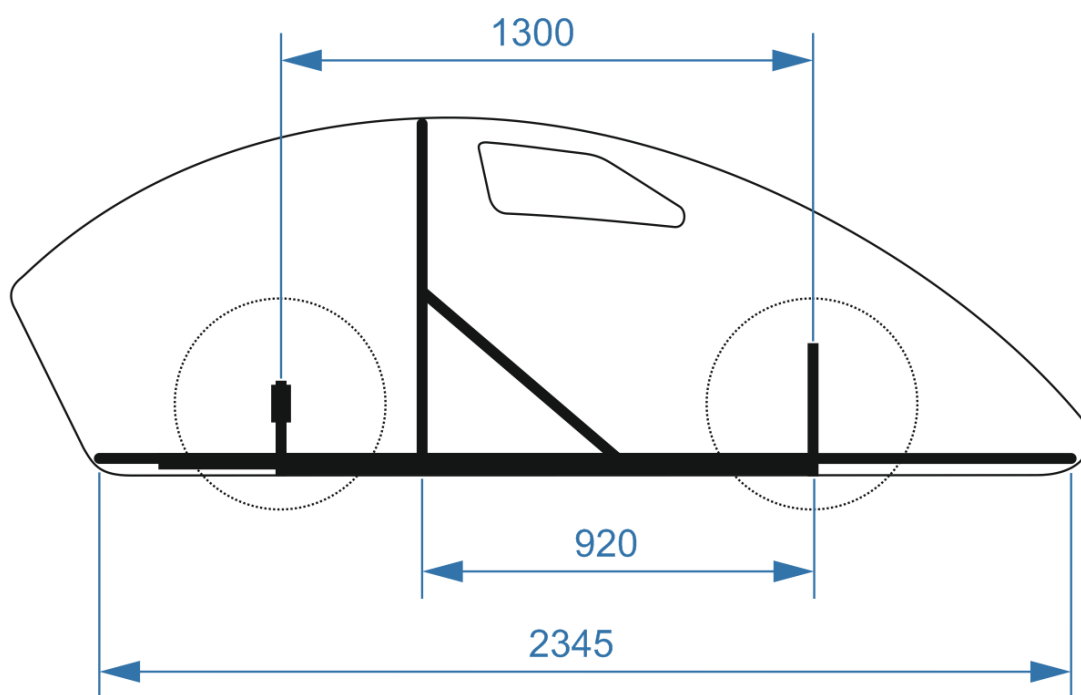
Σε αυτό το τμήμα της κατασκευής χρησιμοποιούνται ορθογωνικής διατομής προφίλ 40x20 mm και πάχους 2 mm, για το κυρίως σώμα. Για το roll bar χρησιμοποιείται κυλινδρικό προφίλ διαμέτρου 20 mm και πάχους 1,5 mm.

2.3.1 Μήκη και πλάτη κυρίως πλαισίου

Αρχικά οι δεδομένες διαστάσεις είναι το μεταξόνιο, στα 1300 mm και τα μετατρόγια εμπρός και πίσω, στα 1100 mm και 930 mm αντίστοιχα. Γνωρίζοντας τα μήκη των ημιαξόνιων σχεδιάζονται οι εγκάρσιες διατάξεις που θα τα στηρίζουν αλλά και η απόσταση μεταξύ τους.



Εικόνα 2.5: Κάτοψη βασικού πλαισίου όπου είναι εμφανή τα μετατρόγια και τα βασικά πλάτη του.

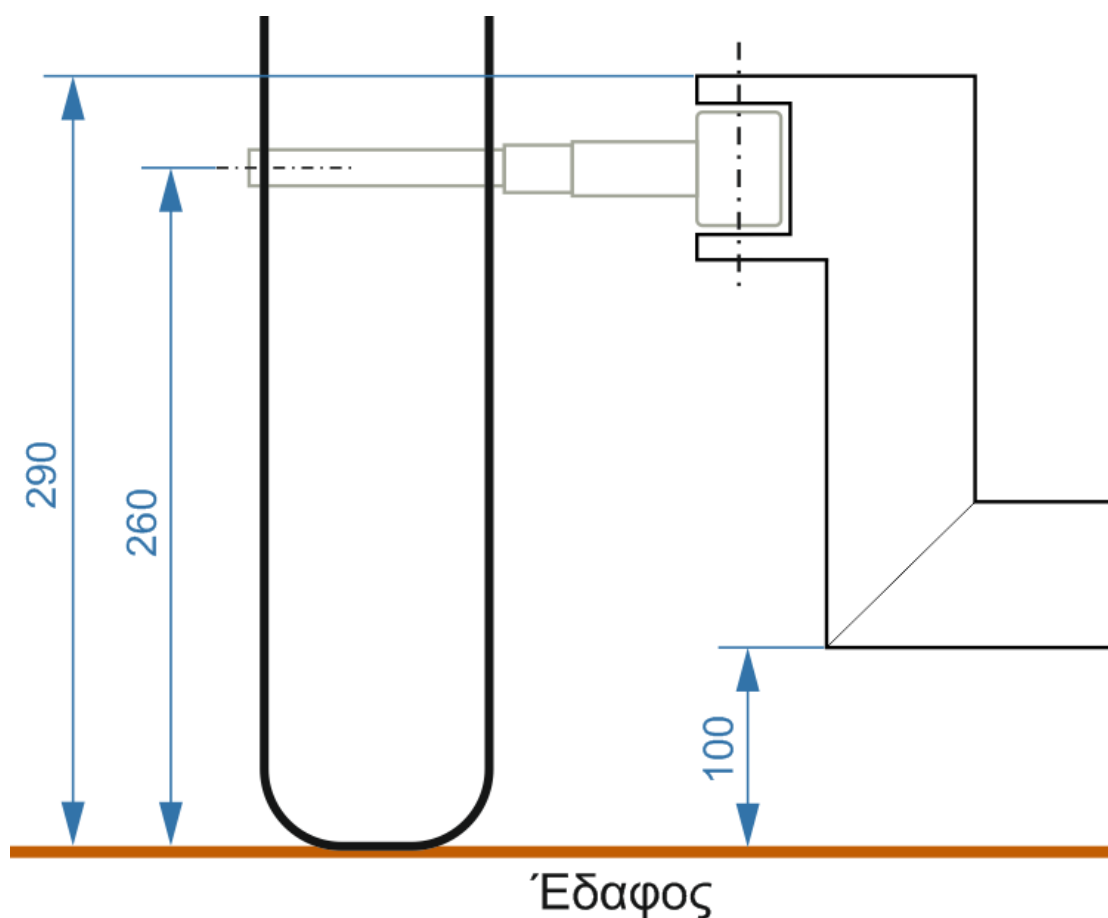


Εικόνα 2.6: Αριστερή πλάγια όψη όπου είναι εμφανή το συνολικό μήκος του πλαισίου και το μεταξόνιο.

Έτσι το εμπρός εγκάρσιο τμήμα σχεδιάζεται στα 810 mm και το πίσω στα 730 mm. Οι διαμήκεις δοκοί που δημιουργούν το τελικό ορθογωνικό σχήμα έχουν μήκος 1300 mm, όσο δηλαδή και το μεταξόνιο. Η απόσταση μεταξύ τους δημιουργεί το πλάτος του βασικού τμήματος που είναι στα 630 mm.

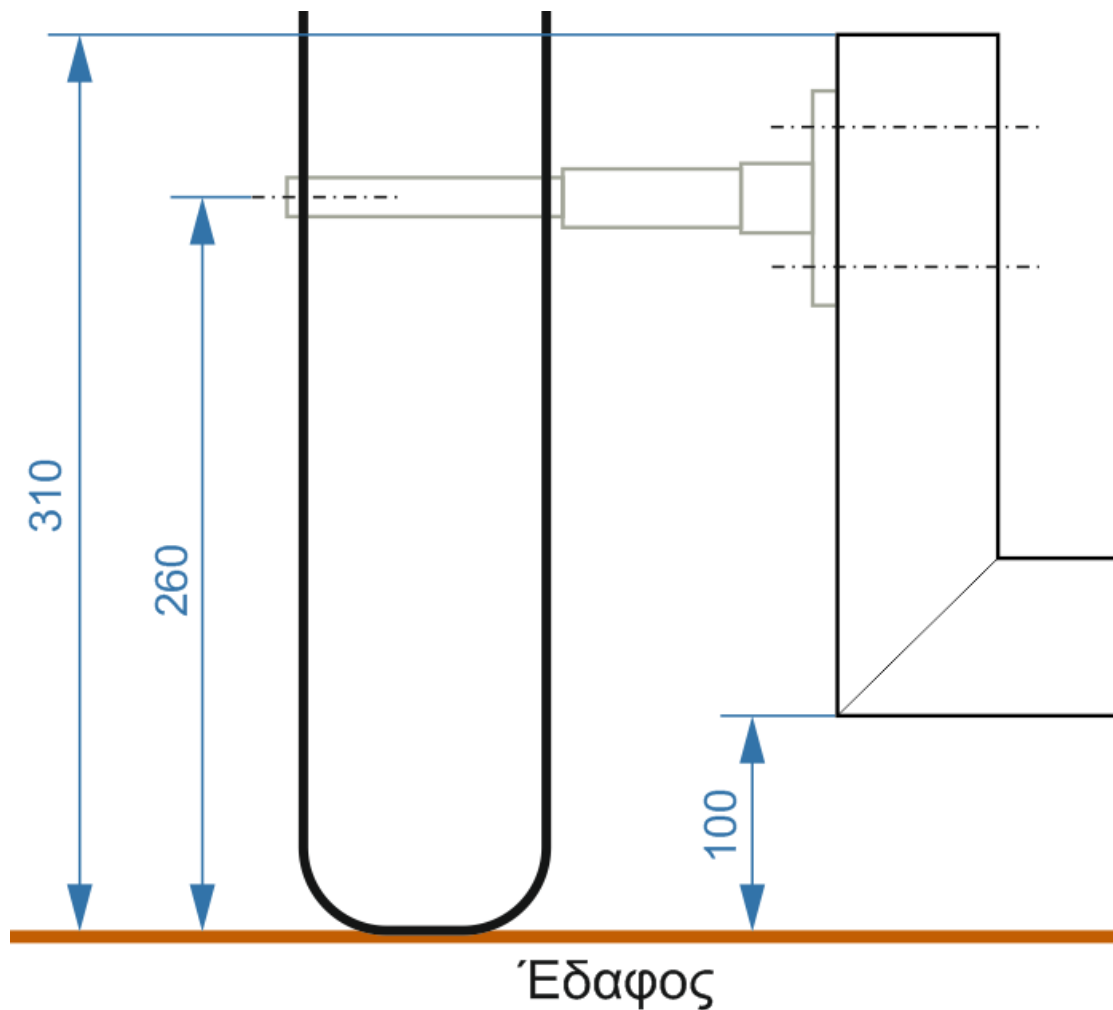
2.3.2 Ύψη κυρίως πλαισίου

Οι κανονισμοί ορίζουν ότι το όχημα πρέπει να έχει ύψος τουλάχιστον 100 mm από το οδόστρωμα. Με βάση αυτό υπολογίζονται τα ύψη των δοκών που στηρίζουν τα ημιαξόνια αλλά και το που θα τοποθετηθούν τα τελευταία.



Εικόνα 2.7: Αναπαράσταση εμπρός τροχού, ημιαξόνιου και μπράτσου του ER2015.

Σε αυτό το σημείο η ακτίνα κύλισης του τροχού είναι η διάσταση που καθορίζει το σχεδιασμό. Υπό φυσιολογικές συνθήκες και με τη μέγιστη πίεση στα ελαστικά, η ακτίνα κύλισης είναι στα 280 mm. Αυτό σημαίνει ότι για να είναι η απόσταση του οχήματος πάνω από το όριο των 100 mm και για να έχουμε 2 εκατοστά περιθώριο, το ύψος του κέντρου του άξονα κίνησης από το κάτω μέρος του πλαισίου πρέπει να είναι 160 mm. Η διαμόρφωση της εικόνας 2.7 παρουσιάζει την ιδανική περίπτωση που το ύψος του οχήματος από το έδαφος είναι 10 εκατοστά. Έτσι είναι εμφανή τα ύψη που αφορούν το σχεδιασμό και που εν τέλει ορίζουν το ύψος της κάθετης δοκού στα 190 mm.

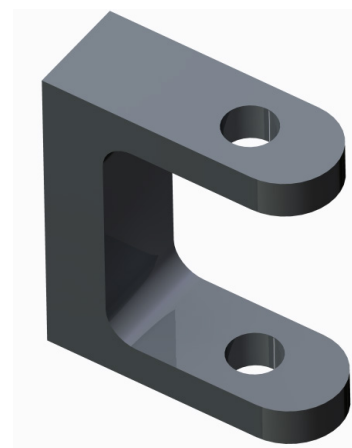


Εικόνα 2.8: Αναπαράσταση πίσω τροχού και ημιαξόνιου του ER2015.

Στους πίσω τροχούς έχουμε αντίστοιχη διάταξη. Στην ιδανική περίπτωση (εικόνα 2.8) που το ύψος του οχήματος από το έδαφος είναι 100 mm, έχουμε το κέντρο του άξονα περιστροφής στα 260 mm. Αυτό σημαίνει ότι όπως και στο μπροστά τμήμα το κέντρο περιστροφής τοποθετείται στα 160 mm από το κάτω μέρος του σασί. Έτσι το όχημα μας σε ευθεία δεν εμφανίζει κλίση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Τέλος τα ύψη αυτά ορίζουν ότι οι πίσω δοκοί του πλαισίου πρέπει να σχεδιαστούν στα 210 mm.

2.3.3 Βάσεις στήριξης εμπρός ημιαξόνιων

Στις μπροστά κάθετες δοκούς τοποθετούνται οι βάσεις στήριξης των αξόνων. Αυτές οι βάσεις αναλαμβάνουν να στηρίξουν τους εμπρός τροχούς αλλά και την περιστροφή των ημιαξόνιων. Η κατασκευή τους γίνεται από αλουμίνιο 6063 – T4 και ο σχεδιασμός τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή αφού είναι ένα τμήμα του πλαισίου που καταπονείται διαρκώς. Επιπλέον το γεγονός ότι τα ημιαξόνια αλλά και οι πείροι που τα συγκρατούν είναι

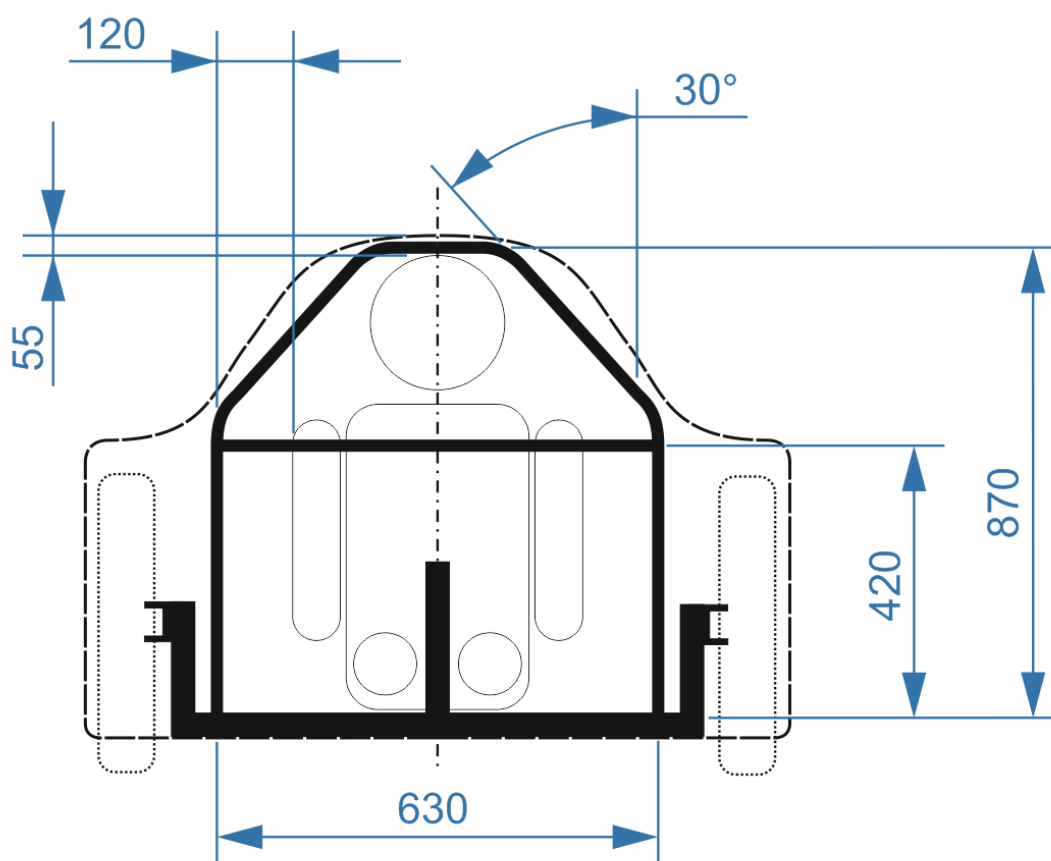


κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα, συμβάλει στη φθορά αυτού του δομικού μέρους του σασί.

Το ύψος αυτών των βάσεων είναι 30 mm, το μήκος 58 mm και το πλάτος τους 20 mm ώστε να εφαρμόζουν ακριβώς στο προφίλ 40x20 mm που συγκολλώνται. Η εσοχή τους έχει διαστάσεις 45x40x20 mm και οφείλεται στο μέγεθος των ημιαξόνων. Τέλος οι γωνίες που παρατηρούνται να έχουν σχήμα καμπύλης είναι για την εξομάλυνση των ορθών τάσεων που εμφανίζονται σε αυτά τα σημεία.

2.3.4 Roll bar

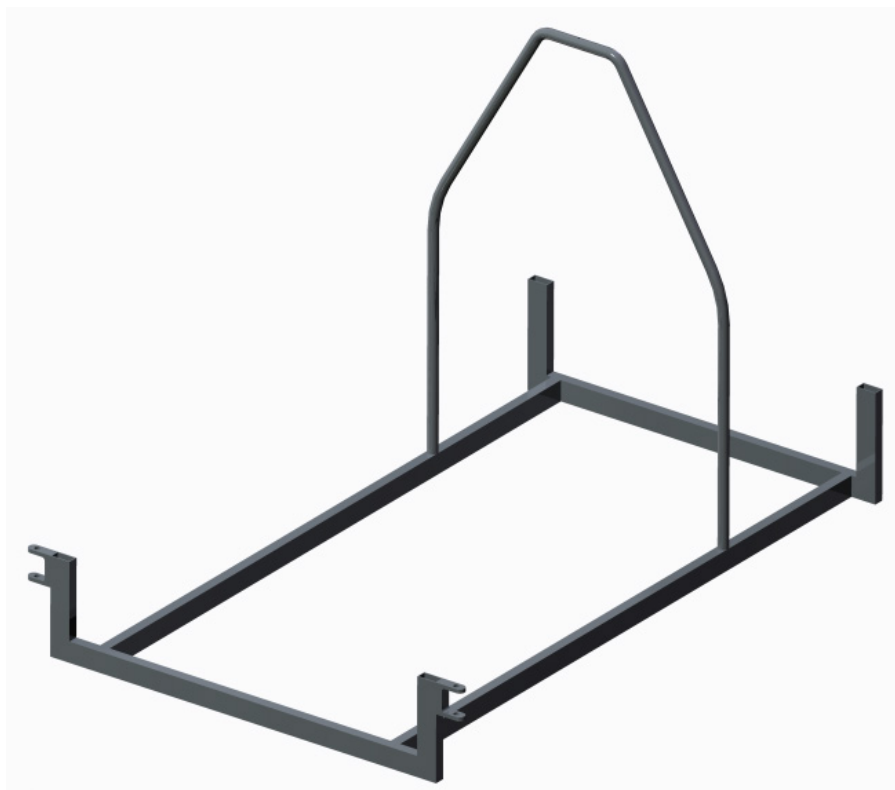
Το roll bar ή μπάρα ασφαλείας είναι η κυλινδρικού προφίλ μπάρα η οποία περιβάλλει τον οδηγό και τον προφυλάσσει σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος. Αποτελεί σημαντικό δομικό στοιχείο του πλαισίου κυρίως για λόγους ασφάλειας αλλά και για τη συνολική ακαμψία της κατασκευής.



Εικόνα 2.9: Αναπαράσταση της μπάρας ασφαλείας και των βασικών διαστάσεων της.

Το πλάτος του roll bar σχεδιάζεται στα 630 mm ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στις διαμήκεις δοκούς. Η απόσταση αυτή εξασφαλίζει ένα περιθώριο 100 mm με 130 mm ανάμεσα στον κάθε ώμο του οδηγού και τη μπάρα. Το ύψος του ευθύγραμμου τμήματος της δοκού είναι στα 420 mm ώστε να φτάνει μέχρι το ύψος των ώμων του οδηγού όταν κάθετα. Το συνολικό ύψος της κατασκευής είναι στα 870 mm έτσι ώστε

να φτάνει στο σημείο που ακουμπά το εξωτερικό κάλυμμα αλλά και για να εξασφαλίζει ότι το κεφάλι του οδηγού απέχει τουλάχιστον 5 εκατοστά από το ανώτερο σημείο της καμπίνας. Τέλος για να εξασφαλιστεί ότι το roll bar περιβάλλει το κεφάλι του οδηγού στα 5 cm περιμετρικά, κρίνεται απαραίτητο η γωνία του σχεδίου να είναι στις 30 μοίρες.



Εικόνα 2.10: Άποψη του βασικού τμήματος του πλαισίου.

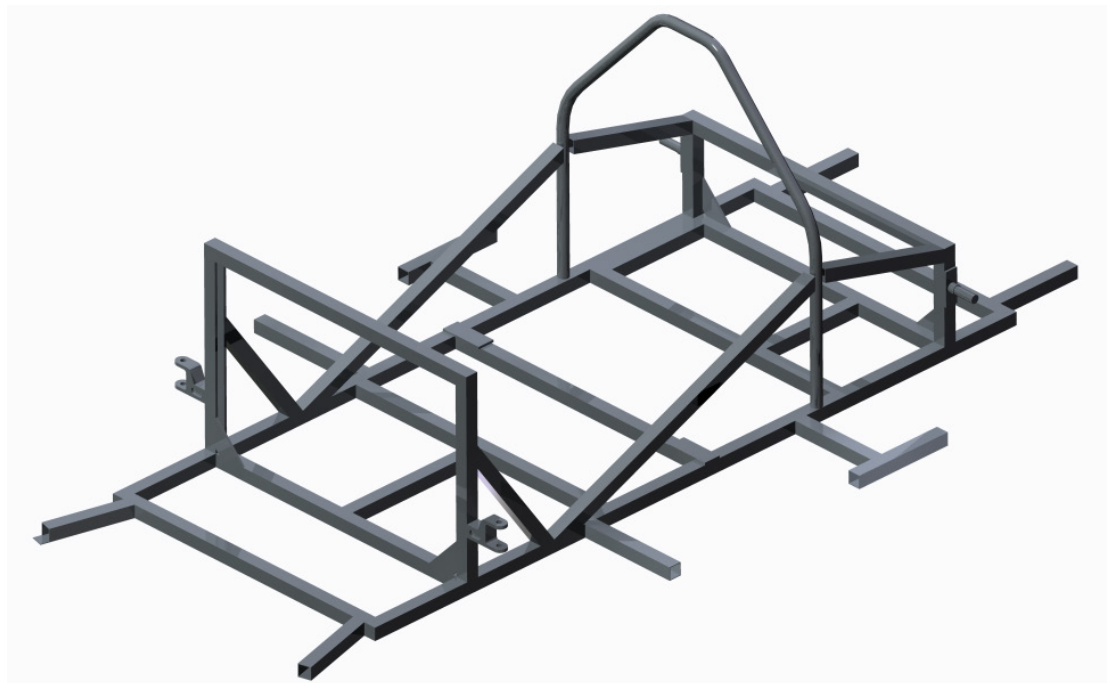
2.4 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του οχήματος

Αφού δημιουργηθεί ο βασικός σχεδιασμός του σασί και ικανοποιηθούν όλοι οι περιορισμοί σειρά έχει η σχεδίαση με βάση τις ανάγκες του οχήματος. Στο σημείο αυτό το βασικό σασί πλαισιώνεται από τα επιμέρους δομικά του στοιχεία με γνώμονα την εξασφάλιση της απαιτούμενης αντοχής και ακαμψίας, την ορθή τοποθέτηση των ηλεκτρομηχανολογικών του μερών και την εργονομική του χρήση. Βασικός παράγοντας για την επίτευξη του ορθού σχεδιασμού σε αυτό το σημείο, είναι η μελέτη του παλιού πλαισίου για την αποφυγή σχεδιαστικών λαθών.

2.4.1 Το πλαίσιο του ER2014 και οι λόγοι αντικατάστασης του

Το πλαίσιο του ER2014 αποτελούσε μια κατασκευή σασί ίδιας φιλοσοφίας με το παρόν. Τα υλικά που το δομούσαν ήταν και πάλι αλουμιένιες μπάρες με προσθήκες

μασίφ τμημάτων σε κάποια σημεία. Το συγκεκριμένο πλαίσιο διαγωνίστηκε με επιτυχία για 3 χρόνια και υπήρξε μια στιβαρή και αξιόπιστη λύση για το όχημα. Παρ' όλα αυτά οι κύριοι λόγοι αντικατάστασης του ήταν το βάρος, η εργονομική βελτίωση κάποιων τμημάτων του αλλά και η φθορά που είχε υποστεί με τη χρήση.



Εικόνα 2.11: Το πλαίσιο του ER2014.

Το βάρος της κατασκευής αν και ήταν στα 10,55 kg [30] κρίθηκε σκόπιμο να μειωθεί ώστε το νέο όχημα να γίνει ανταγωνιστικότερο στις επιδώσεις του.

Στον εργονομικό τομέα, η πρόσβαση του οδηγού στην καμπίνα γινόταν με δυσκολία. Αυτό οφείλονταν στην αριστερή διαγώνια αντηρίδα που εκτεινόταν μέχρι ένα αρκετά μεγάλο σημείο της πόρτας (εικόνα 2.11). Επιπλέον η συνεχής ανάπτυξη και βελτίωση των ηλεκτρομηχανολογικών μερών του οχήματος δημιούργησε ανάγκες στήριξης και τοποθέτησης τους που δύσκολα μπορούσαν να ικανοποιηθούν. Χαρακτηριστικό είναι ότι στο νέο πλαίσιο θα έπρεπε να τοποθετηθεί καινούρια κυψέλη καυσίμου και εκ νέου καινούρια ηλεκτρονικά μέρη και καλωδίωση. Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο τμήμα του οχήματος θα έπρεπε να αναδιαμορφωθεί τελείως.



Εικόνα 2.12: Πλαίσιο ER2014. Εμφανή είναι τα σημάδια φθοράς και οι οπές στήριξης.

Τρίτος και τελευταίος λόγος ήταν η φθορά του πλαισίου. Οι προσθήκες όλα αυτά τα χρόνια είχαν φθείρει και γεμίσει οπές διάφορα τμήματα που αναδιαμορφώνονταν συχνά. Για παράδειγμα στο πίσω μέρος όπου στηριζόταν ο κινητήρας

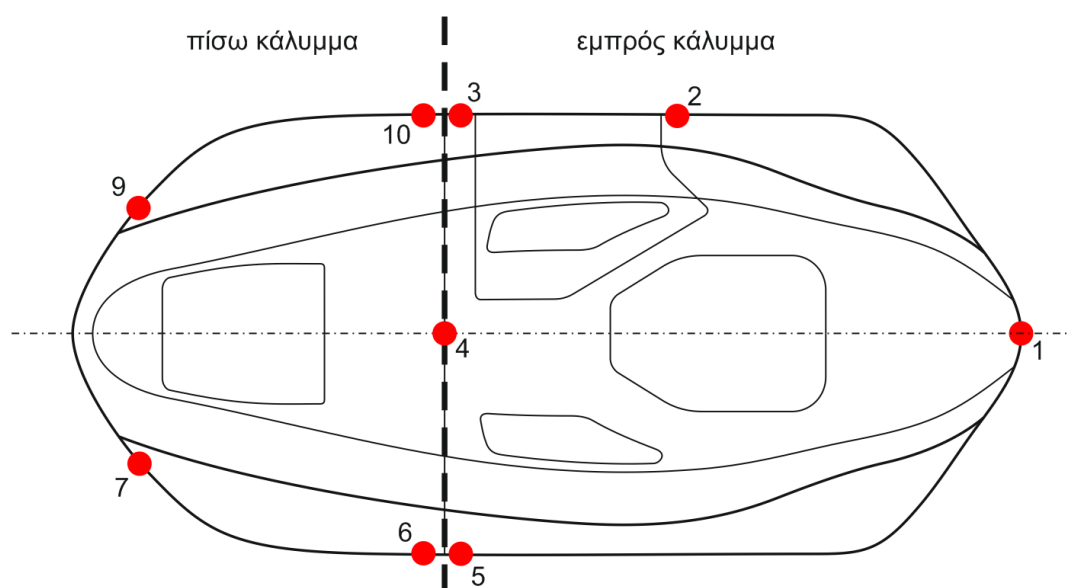
και το κιβώτιο ταχυτήτων είχαν δημιουργηθεί περίπου 20 οπές στήριξης. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ένα πολύ σημαντικό σημείο του σασί να έχει αμφίβολη αντοχή και να χρειάζεται υποστηρίξεις που προϋπέθεταν την προσθήκη βάρους.

2.4.2 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του καλύμματος

Το κάλυμμα του οχήματος πέρα από το γεγονός ότι όρισε πολλές από τις βασικές διαστάσεις του οχήματος έπαιξε ρόλο και στην υπόλοιπη σχεδίαση. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάγκη στήριξης του και το πώς επηρέασε το σχέδιο ολόκληρου του πλαισίου.

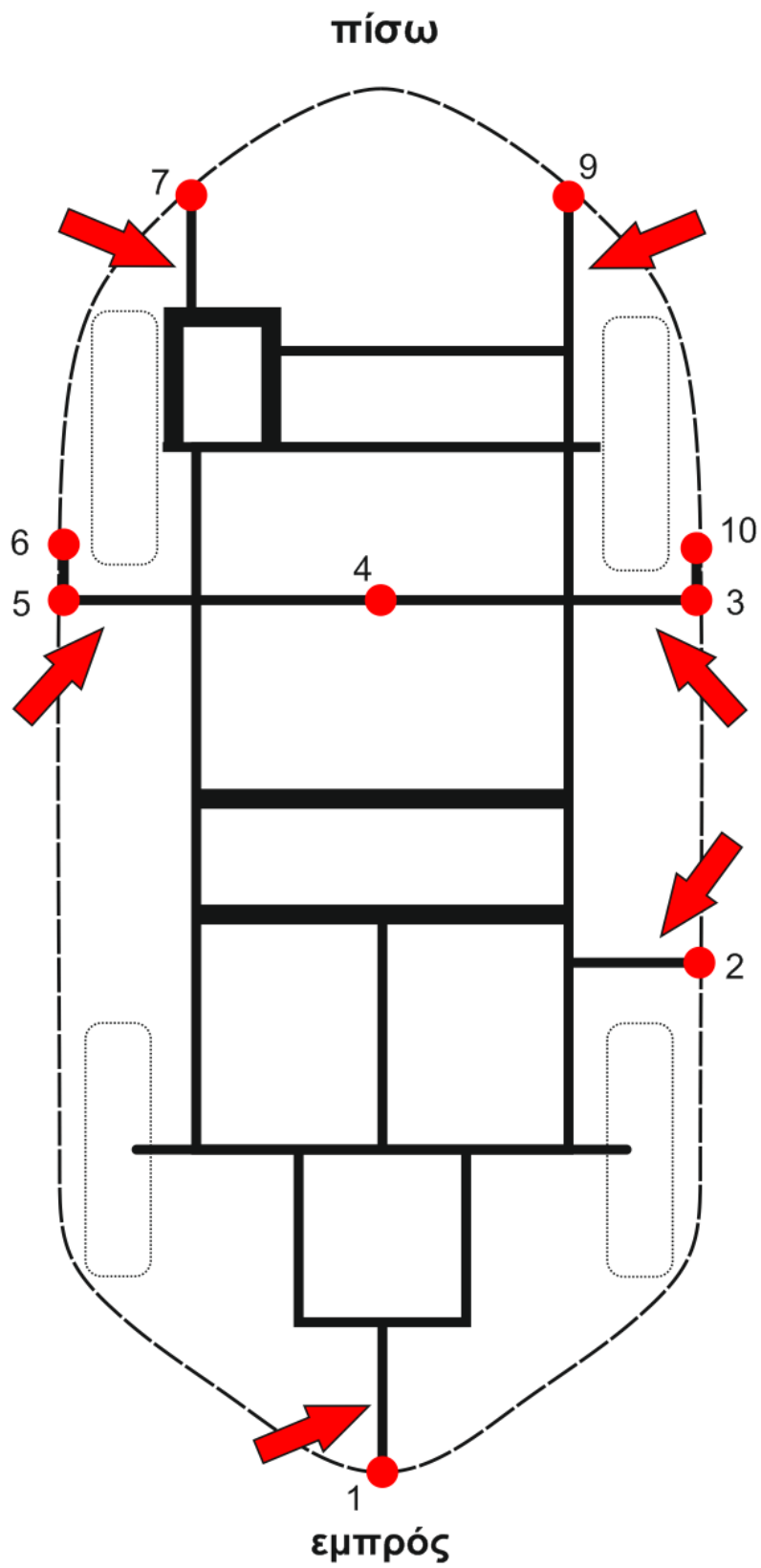
Κάτι που δεν αναφέρθηκε παραπάνω είναι ότι το κάλυμμα χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο καλύπτει το εμπρός μέρος έως το roll bar και το δεύτερο από εκεί και πίσω. Όσον αφορά το βάρος του, το εμπρός τμήμα ζυγίζει 8 kg ενώ το πίσω 6 kg [31]. Είναι λοιπόν σαφές ό,τι αυτά τα 14 kg πρέπει να στηριχτούν πάνω στο όχημα και συγκεκριμένα στο πλαίσιο.

Ο παράγοντας που έπρεπε να ληφθεί υπόψιν εδώ είναι η ανάγκη για εύκολη τοποθέτηση και αφαίρεση ιδίως του πίσω τμήματος του καλύμματος. Η ανάγκη αυτή υπάρχει γιατί απαιτείται εύκολη πρόσβαση στο χώρο των ηλεκτρομηχανολογικών μερών του οχήματος αρκετά συχνά. Έτσι δημιουργήθηκαν με βάση την παλιά διάταξη 4 σημεία στήριξης του πίσω τμήματος και 5 του εμπρός.



Εικόνα 2.13: Άνω άποψη των στηρίξεων των καλυμμάτων.

Το σημείο 4 σχεδιάστηκε στο επάνω μέρος του roll bar για να συγκρατεί και τα δύο τμήματα καθώς ενώνονται σε εκείνο το ύψος. Τα σημεία 1 έως 9 σχεδιάστηκαν σαν προεκτάσεις του βασικού πλαισίου για τις ανάγκες στήριξης του καλύμματος περιφερειακά. Για να επιτευχθεί αυτό στο σχέδιο προστέθηκαν μπάρες τετραγωνικού προφίλ 20x20 οι οποίες συγκολλήθηκαν πάνω στο βασικό τμήμα.

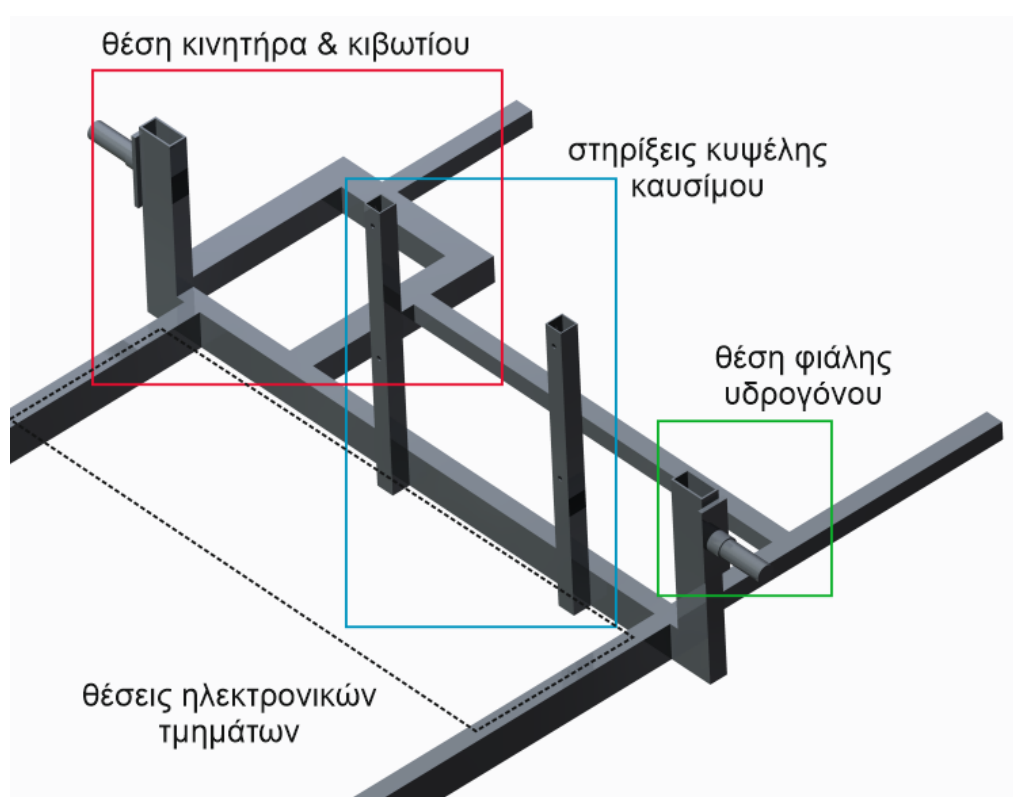


Εικόνα 2.14 Άνω άποψη του πλαισίου όπου φαίνονται οι προσθήκες προφίλ για τη στήριξη του καλύμματος.

2.4.3 Σχεδίαση με βάση τα ηλεκτρομηχανολογικά τμήματα

Τα κυρίως ηλεκτρονικά και μηχανολογικά μέρη του οχήματος αφορούν τη μετάδοση της κίνησης και τη διαχείριση και μεταφορά της ενέργειας. Αυτά τοποθετούνται στο πίσω μέρος του οχήματος ανάμεσα στους 2 πίσω τροχούς και ο χώρος τους διαχωρίζεται από αυτόν της καμπίνας του οδηγού για λόγους ασφαλείας.

Εδώ η ανάγκη τοποθέτησης αφορά μέρη που προκαλούν κραδασμούς και κίνηση (κινητήρας και κιβώτιο ταχυτήτων) αλλά και ευαίσθητα ηλεκτρονικά (πλακέτες και κυψέλη υδρογόνου). Τα τμήματα αυτά πρέπει να τοποθετηθούν κοντά ώστε να μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, πρέπει όμως να διαχωρίζονται ώστε η λειτουργία του ενός να μην επηρεάζει τα υπόλοιπα. Έτσι προκύπτει η παρακάτω τοποθέτηση στο πίσω μέρος του οχήματος.



Εικόνα 2.15: Τοποθέτηση ηλεκτρονικών και μηχανολογικών τμημάτων του οχήματος.

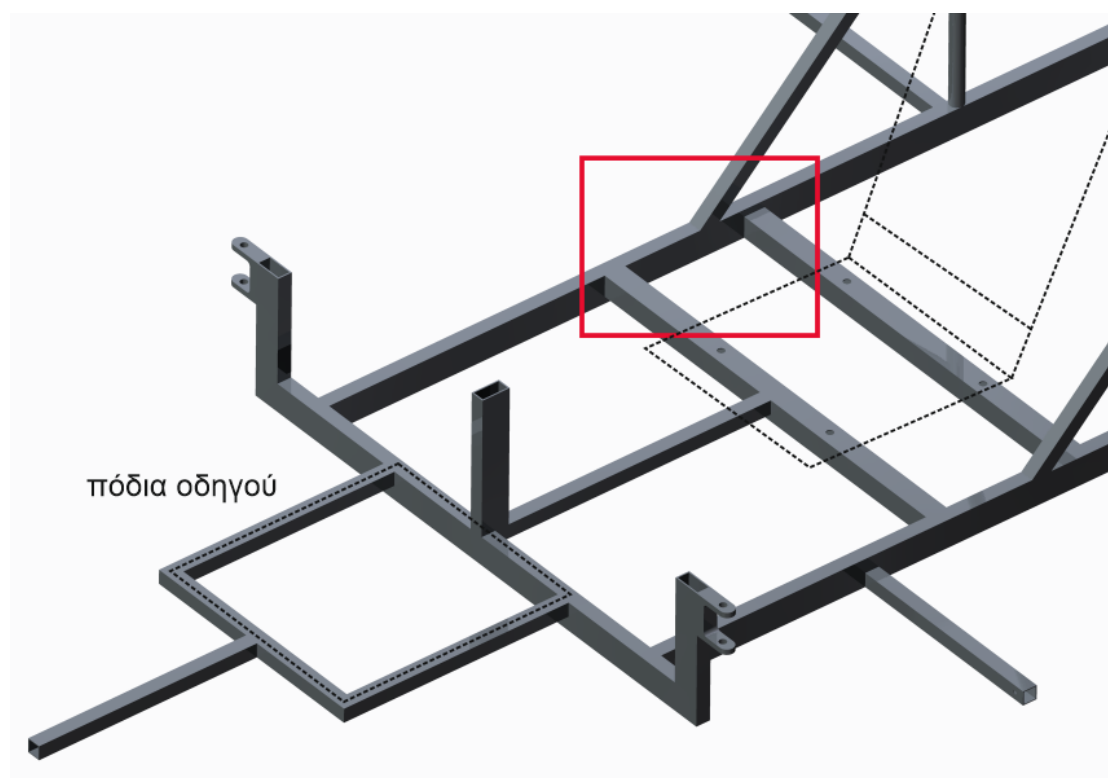
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, για τη βάση τοποθέτησης του κιβωτίου και του κινητήρα δημιουργείται μια ορθογωνική διάταξη στο πίσω δεξιά τμήμα του πλαισίου. Λόγω ισχυρών κραδασμών στο σημείο αυτό χρησιμοποιείται προφίλ 30x30 τετραγωνικής διατομής. Για την τοποθέτηση της κυψέλης υδρογόνου αλλά και για την ομαλή λειτουργία της, σχεδιάζονται 2 όρθιες δοκοί. Οι δοκοί αυτοί μπαίνουν σε σημείο ώστε να μην εμποδίζεται η ροή του αέρα μέσα από τις κυψέλες που τοποθετούνται σε όρθια θέση. Η φιάλη του υδρογόνου τοποθετείται ελαφρώς δεξιά της κυψέλης ώστε να μειωθεί το μήκος της σωλήνωσης που μεταφέρει το υδρογόνο. Τέλος ένα επίπεδο πιο

πίσω υπάρχει χώρος για την προσαρμογή των ηλεκτρονικών έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν με τα μηχανολογικά μέρη αλλά και με την κυψέλη καυσίμου.

2.4.4 Σχεδιασμός με βάση τις ανάγκες του οδηγού

Η θέση του οδηγού αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρο για κάθε όχημα. Στην περίπτωση του ER2015 η θέση αυτή διέπεται από κανόνες που ορίζουν το που θα βρίσκεται ο οδηγός μέσα στην καμπίνα αλλά και το πεδίο όρασης του εμπρός και πίσω.

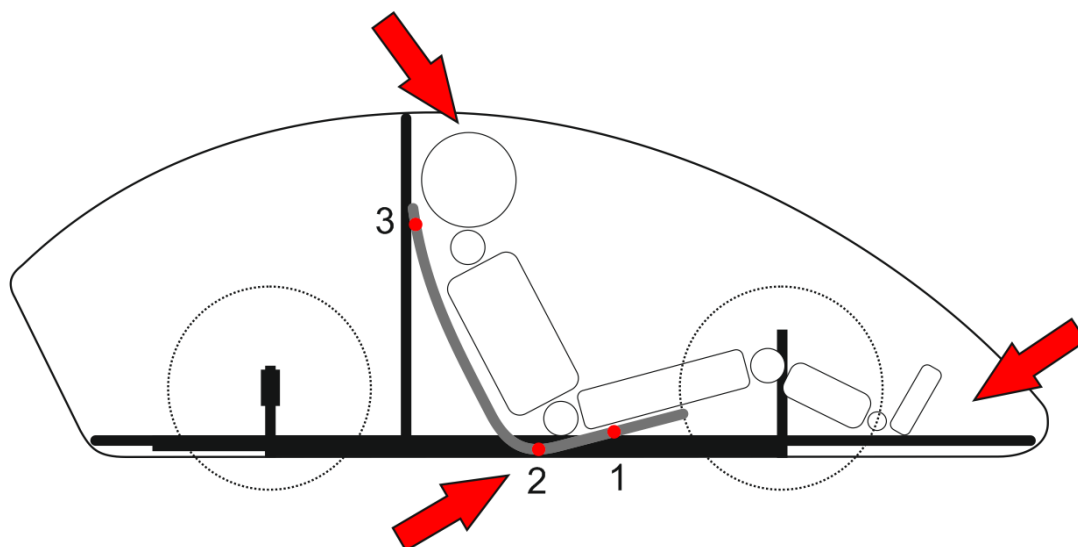
Παραπάνω εξηγήθηκε πως η κατασκευή του roll bar τηρεί τους κανόνες που επιβάλλει ο διαγωνισμός “Shell Eco Marathon” για την θέση οδήγησης. Η διάσταση που έπαιξε μεγάλο ρόλο στη σχεδίαση ήταν η απόσταση του κεφαλιού του οδηγού από το άνω μέρος της καμπίνας. Η απόσταση αυτή θα μπορούσε από μόνη της να καλυφθεί από το ύψος του roll bar, η διάσταση όμως του καλύμματος δεν το επέτρεπε. Έτσι ο σχεδιασμός έγινε με την τοποθέτηση των στηριγμάτων του καθίσματος να έχουν μια ελαφριά διαφορά ύψους της τάξης του 1 cm (εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.16: Μπροστά τμήμα πλαισίου. Εμφανής είναι η διαφορά ύψους στις μπάρες στήριξης του καθίσματος.

Αυτή η διαφορά του ενός εκατοστού δημιουργεί μια γωνία στο κάθισμα. Έτσι το σώμα του οδηγού παίρνει μια μικρή κλίση η οποία εξασφαλίζει τη ζητούμενη απόσταση. Το κάθισμα επίσης στηρίζεται σε 4 σημεία στη βάση του και σε ένα στην πλάτη του οδηγού.

Το εμπρός τμήμα που φαίνεται στην εικόνα 2.16 σχεδιάζεται σε σχήμα τετραγώνου με μήκος 33 cm και πλάτος 34 cm. Ο χώρος αυτός έχει διαστάσεις τέτοιες ώστε ο οδηγός να μπορεί να εκτείνει τα πόδια του στα πεντάλ με μικρή κλίση.

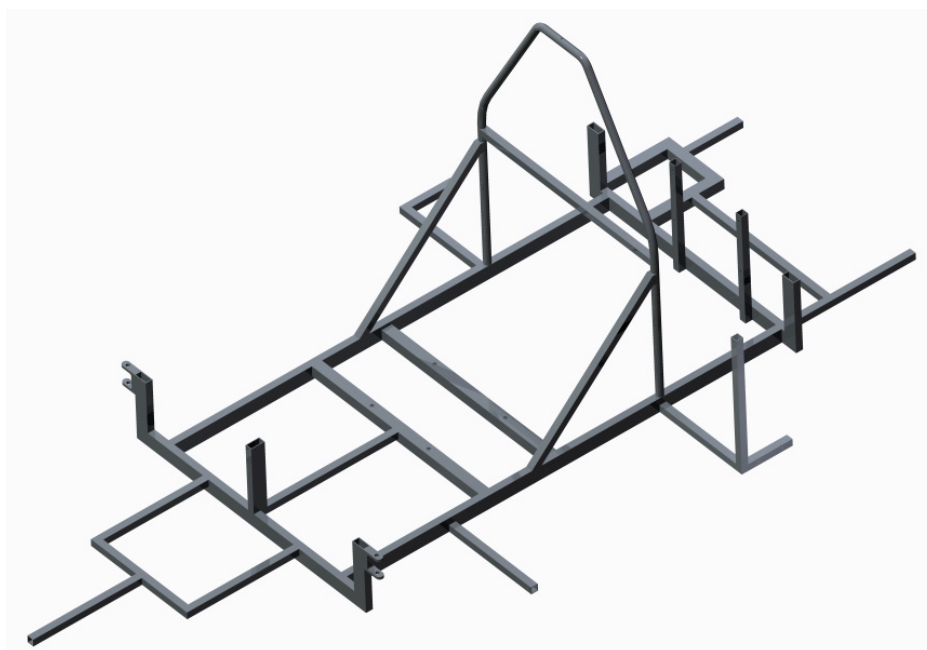


Εικόνα 2.17: Θέση οδηγού και σημεία στήριξης του καθίσματος. Τα βέλη δείχνουν κρίσιμες αποστάσεις βάση κανονισμών.

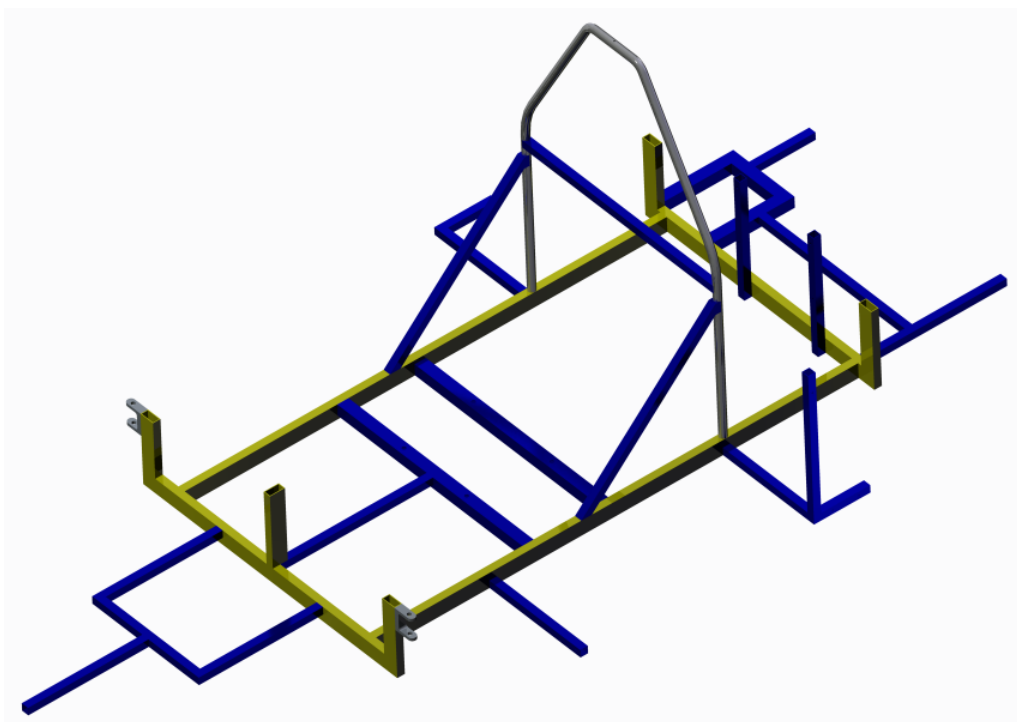
2.5 Τελικός σχεδιασμός

Αφού ληφθούν υπόψιν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό του πλαισίου, δημιουργείται ένα πρώτο σχέδιο προς ανάλυση. Το σχέδιο αυτό είναι δοκιμαστικό καθώς είναι φτιαγμένο εμπειρικά και με την ελάχιστη δυνατή χρήση υλικού. Η αντοχή του και η ακαμψία θα προκύψουν από τις αναλύσεις που θα επιφέρουν και τις αντίστοιχες αλλαγές.

Το πλαίσιο πριν φτάσει στο στάδιο της ανάλυσης μοντελοποιείται σε σύστημα CAD. Το σχεδιαστικό πακέτο που χρησιμοποιείται είναι το PTC Creo Parametric 3.0 της Parametric Technology Corporation. Έτσι έχουμε μια τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου μας.

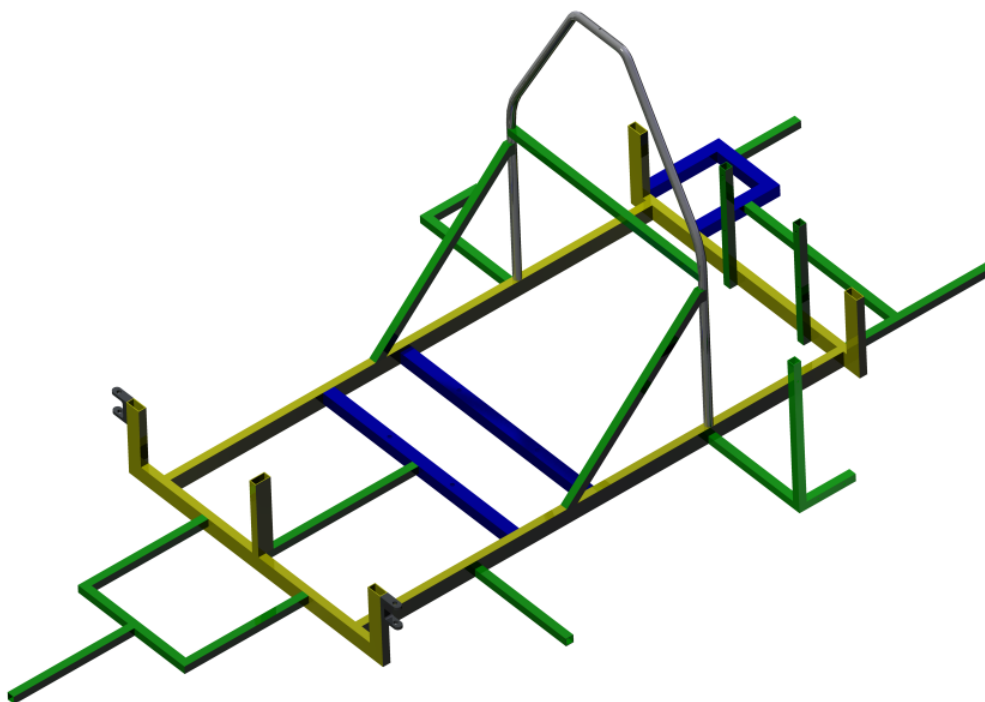


Εικόνα 2.18: Συνολική απεικόνιση του ολοκληρωμένου σχεδιασμού του πλαισίου.



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση διαφορετικού πάχους προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο.

Στην παραπάνω απεικόνιση φαίνεται η διάταξη των προφίλ διαφορετικού πάχους, που επιλέχθηκαν στη διαμόρφωση του σχεδίου. Το κύριο μέρος με κίτρινο αναπαριστά τα προφίλ με πάχος 2 mm. Το roll bar είναι πάχους 1,5 mm ενώ οι βάσεις των ημιαξόνων είναι από μασίφ τμήμα αλουμινίου. Με μπλε εμφανίζονται τα τμήματα που έχουν πάχος 1,3 mm. Αυτά όπως είναι εμφανές, είναι περιφερειακά του κυρίως σκελετού και συμπληρώνουν την κατασκευή.



Εικόνα 2.20: Απεικόνιση διαφορετικής διατομής προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο.

Η εικόνα 2.19 αναπαριστά τις διαφορετικές διατομές προφίλ που έχουν τοποθετηθεί στο σασί του οχήματος. Τα προφίλ κίτρινου χρώματος είναι τα ορθογωνικής διατομής 40x20 που πλαισιώνουν το κυρίως μέρος. Με μπλε διακρίνονται τα προφίλ 30x30 που ως πιο στιβαρά από τα μικρότερα τετραγωνικής διατομής, χρησιμοποιούνται σαν βάση για το κάθισμα και τον κινητήρα. Το roll bar είναι ο κυκλικής διατομής σωλήνας που εμφανίζεται με γκρι, ενώ με πράσινο φαίνονται τα προφίλ 20x20 που έχουν υποστηρικτικό ρόλο.

3.

Αναλύσεις & μοντελοποίηση

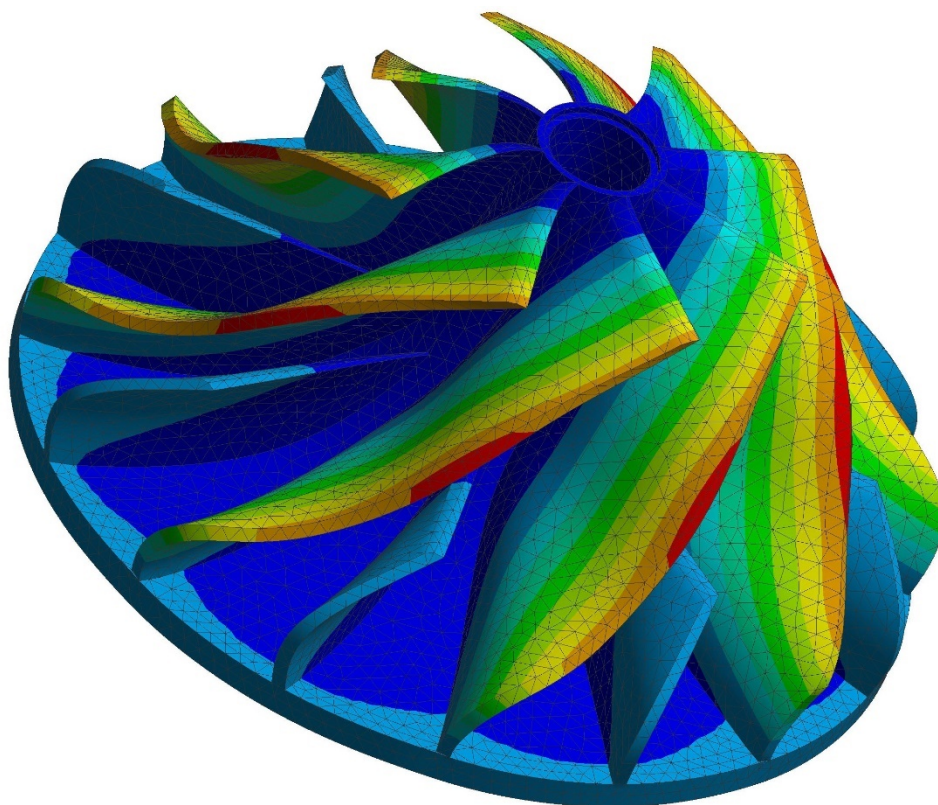
3.1 Εισαγωγή

Δύο από τις σημαντικότερες αναλύσεις για την δοκιμή αντοχής ενός πλαισίου είναι η γραμμική στατική ανάλυση και η ανάλυση ιδιομορφών. Η γραμμική στατική ανάλυση αποτελεί το πιο βασικό είδος ανάλυσης για μία κατασκευή. Ο όρος «γραμμική» σημαίνει ότι οι υπολογιζόμενες μετατοπίσεις και φορτίσεις σχετίζονται γραμμικά με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Ο όρος «στατική» υποδεικνύει ότι οι δυνάμεις αυτές δεν μεταβάλλονται με το χρόνο αλλά το μέγεθος τους παραμένει σταθερό. Από την άλλη η ανάλυση ιδιομορφών ή modal analysis όπως συνηθίζεται, αποτελεί το θεμέλιο για μια λεπτομερή κατανόηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της δομής μιας κατασκευής.

Η ανάγκη μελέτης και εξακρίβωσης της αντοχής των κατασκευών με τις παραπάνω μεθόδους απαιτεί μεγάλη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που βοηθούν στην ανάλυση, την εξέταση και τη βελτίωση τέτοιου είδους κατασκευών. Τα προγράμματα αυτά στηρίζονται στην μέθοδο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που για συντομία στη συνέχεια θα αναφέρεται με τη διεθνή ονομασία της ως FEA (Finite Elements Analysis). Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει αποτελέσματα ακριβείας για πολύπλοκες κατασκευές, απαιτεί όμως πολλούς και χρονοβόρους υπολογισμούς. Παρ' όλα αυτά η παρούσα τεχνολογία ηλεκτρονικών υπολογιστών καθιστά βατή την πραγματοποίησή τους μέσα σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα [19].

Η χρήση αυτών των λογισμικών πακέτων σε συνδυασμό με άλλα εξειδικευμένα πακέτα σχεδίασης CAD αρχίζουν να αποτελούν το βασικό πυρήνα για την ανάπτυξη και τον έλεγχο πολύπλοκων κατασκευών. Ολοένα και περισσότερες εταιρίες χρησιμοποιούν λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση των κατασκευών τους. Η χρήση τους προσδίδει μείωση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης ενός προϊόντος αλλά και πολύ μεγάλη ευελιξία στην βελτιστοποίηση των στοιχείων της κατασκευής [19].

Πληθώρα μελετών έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα για να εξακριβωθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα τέτοιου είδους αναλύσεων συμφωνούν με πειραματικές δοκιμές. Τέτοιες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί από αυτοκινητοβιομηχανίες, διεθνή ιδρύματα, οργανισμούς, και πανεπιστήμια. Σύμφωνα με τα πειράματα αυτά αποδεικνύεται ότι η χρήση τέτοιων λογισμικών, επιτυγχάνει ένα καλό βαθμό ακρίβειας αποτελεσμάτων. Επιπλέον είναι πολύ φθηνή και πολύ γρήγορη εφόσον ακολουθείται σωστή μεθοδολογία κατά την μοντελοποίηση και την ερμηνεύση των αποτελεσμάτων [19].



Εικόνα 3.1: Αποτελέσματα μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε λογισμικό CAE.

Σημαντικό στοιχείο σε αυτές τις αναλύσεις αποτελεί η μοντελοποίηση. Ο ορθός και πλήρης ορισμός όλων των παραμέτρων της κατασκευής αποτελεί το βασικό γνώμονα για τη σωστή αξιολόγηση της αντοχής της. Στην περίπτωση αυτή το ζητούμενο είναι ο έλεγχος στιβαρότητας της προτεινόμενης κατασκευής κάτω από συγκεκριμένα στατικά φορτία, αλλά και η διερεύνηση της δυναμικής απόκρισης της μέσω της αξιολόγησης των χαρακτηριστικών σχημάτων λειτουργίας και των φυσικών συχνοτήτων της. Η διαδικασία παράλληλα με τον έλεγχο της κατασκευής, δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης των σχεδίων ώστε αυτά να ανταποκρίνονται στις ασκούμενες φορτίσεις, κρατώντας το βάρος σε χαμηλά επίπεδα [19].

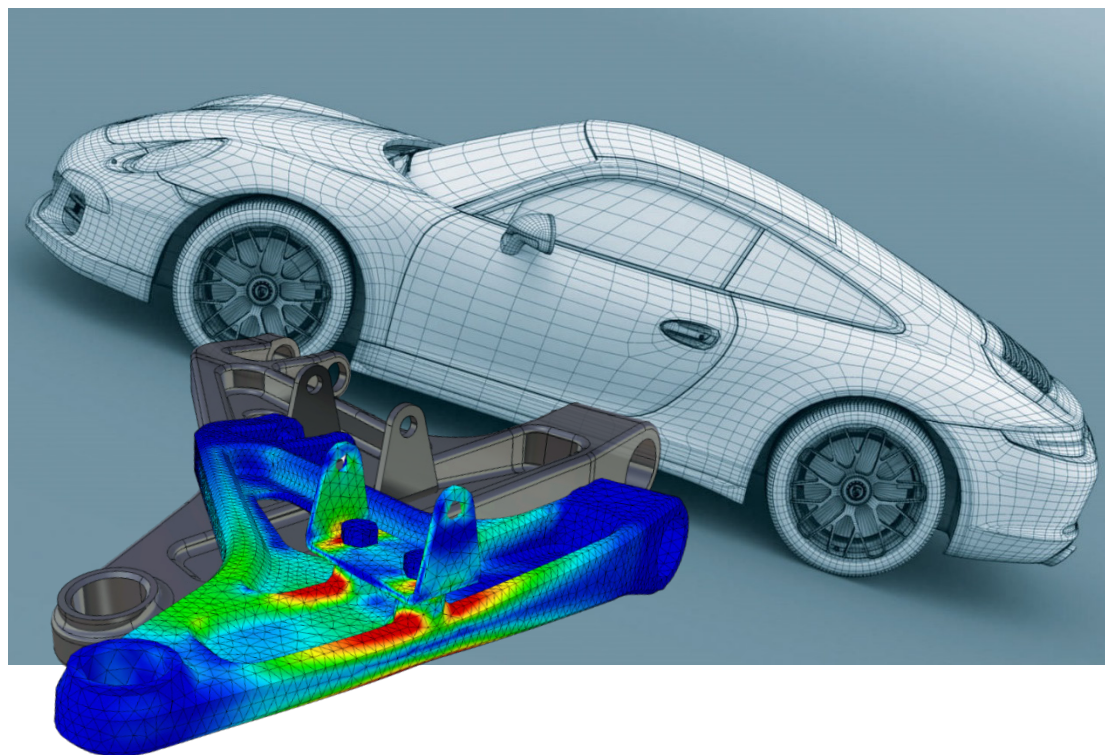
Έτσι η μελέτη εστιάζει στα δύο παραπάνω είδη ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος είναι η μοντελοποίηση του σασί που σχεδιάστηκε με σκοπό την ανάλυση και την εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση του εξειδικευμένου πακέτου λογισμικών της εταιρίας BETA CAE Systems S.A. Η μοντελοποίηση γίνεται αρχικά στον προεπεξεργαστή ANSA v16.2.2 όπου εισάγεται η γεωμετρία και οι παράμετροι του μοντέλου.

3.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ή FEA είναι μια βασισμένη σε υπολογιστή αριθμητική μέθοδος για επίλυση μεγάλου φάσματος προβλημάτων του τομέα εφαρμοσμένης μηχανικής. Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ένα στερεό ή ένα συνεχές ρευστό, θεωρείται δομημένο από πολυάριθμα μικροσκοπικά συνδεδεμένα στοιχεία. Δεδομένου ότι τα στοιχεία μπορούν να είναι τοποθετημένα ουσιαστικά με οποιοδήποτε τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαμόρφωση πολύ σύνθετων μορφών. Κατά συνέπεια δεν είναι πλέον απαραίτητο να βρεθεί μια αναλυτική λύση η οποία να μεταχειρίζεται ένα στενά εξιδανικευμένο μοντέλο [19], [27].

Σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους που συχνά απαιτούν τη χρήση υψηλότερου επιπέδου μαθηματικών, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε απλές αλγεβρικές εξισώσεις που επιλύονται με τη χρήση πινάκων. Έτσι μια λύση FEA μπορεί να απαιτήσει την ταυτόχρονη επίλυση εκατοντάδων εξισώσεων με εκατοντάδες άγνωστους όρους [19], [27].

Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων η φορτισμένη δομή μοντελοποιείται με ένα πλέγμα χωριστών στοιχείων. Τα στοιχεία συνδέονται το ένα με το άλλο στις γωνίες τους και τα συνδεδεμένα σημεία καλούνται κόμβοι. Για μία ανάλυση τάσεων η λύση προκύπτει χρησιμοποιώντας τις βασικές εξισώσεις ορθών τάσεων και παραμορφώσεων. Μέσω αυτών γίνεται ο υπολογισμός των μετατοπίσεων κάθε στοιχείου. Η παραμόρφωση καθορίζεται από την εκτροπή των κόμβων και από αυτήν η ορθή τάση μέσω της κατάλληλης εξίσωσης [19].



Εικόνα 3.2: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκει εφαρμογή από μικρά μηχανολογικά εξαρτήματα έως και μεγάλες κατασκευές της βιομηχανίας.

Εντούτοις το πρόβλημα είναι πιο ογκώδες απ' ό,τι αρχικά φαίνεται καθώς η δύναμη σε κάθε κόμβο εξαρτάται από τις δυνάμεις των γειτονικών. Τα στοιχεία συμπεριφέρονται όπως ένα σύστημα ελατηρίων τα οποία εκτρέπονται έως ότου όλες οι δυνάμεις βρεθούν σε ισορροπία. Αυτό οδηγεί σε ένα σύνθετο σύστημα ταυτόχρονων εξισώσεων όπου απαιτείται η άλγεβρα πινάκων για να χειριστεί τα δυσκίνητα συστήματα [13], [19].

Το βασικό κομμάτι των πληροφοριών είναι η μήτρα δυσκαμψίας για κάθε στοιχείο. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος σταθεράς ελατηρίου που περιγράφει το μέγεθος της μετατόπισης των κομβικών σημείων εξαιτίας ενός συστήματος εφαρμοζόμενων δυνάμεων [19], [27]. Σε μορφή πινάκων αυτό δίνεται από:

$$\{f\} = [k] \{\delta\} \quad (3.1)$$

όπου,

$\{f\}$: πίνακας στήλης με τις δυνάμεις που ασκούνται στο στοιχείο

$[k]$: μήτρα δυσκαμψίας

$\{\delta\}$: πίνακας στήλης με τις μετατοπίσεις των κόμβων του στοιχείου

Η μήτρα δυσκαμψίας κατασκευάζεται από τις συντεταγμένες των θέσεων των κόμβων και τον πίνακα των σταθερών ελαστικότητας του υλικού [3], [13], [27].

Ένα τριγωνικό στοιχείο $[k]$ μπορεί να κατασκευαστεί με βάση τις αρχές της στατικής. Όμως πιο περίπλοκα στοιχεία απαιτούν τη χρήση ενεργειακών μεθόδων για τον προσδιορισμό του $[k]$ [3], [13], [19], [27].

Όταν όλα τα στοιχεία του συστήματος συγκεντρωθούν η βασική εξίσωση των μητρών είναι:

$$\{F\} = [K] \{\delta\} \quad (3.2)$$

όπου,

$\{F\}$: εξωτερικές δυνάμεις σε κάθε κόμβο

$[K]$: βασική μήτρα δυσκαμψίας σχηματιζόμενη από όλα τα $[k]$ για όλα τα στοιχεία

$\{\delta\}$: μετατοπίσεις σε κάθε κόμβο

Ο πίνακας των δυνάμεων είναι γνωστός καθώς αποτελείται από τις αριθμητικές τιμές των φορτίων και των αντιδράσεων που υπολογίζονται πριν την έναρξη της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων [3], [13], [19], [27].

Οι μετατοπίσεις είναι οι άγνωστοι και βρίσκονται με τη μετάθεση της μήτρας δυσκαμψίας στην παραπάνω εξίσωση. Αυτή η υπολογιστική λύση δίνει τις μετατοπίσεις σε όλους τους κόμβους [19].

Όταν οι μετατοπίσεις πολλαπλασιάζονται με τον πίνακα συντεταγμένων των θέσεων των κόμβων $[B]$ και τον πίνακα των ελαστικών σταθερών $[D]$, δίνουν την τάση σε κάθε κόμβο [19], [27].

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{\delta\} \quad (3.3)$$

Η ανάλυση συνήθως γίνεται για να προσδιοριστούν οι τάσεις και οι διευθύνσεις τους σε όλο το μοντέλο. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τον επιλυτή, ειδικά για πολύπλοκα σχέδια, είναι πάρα πολλά και δύσκολα στο να χρησιμοποιηθούν. Έτσι οι γραφικές αναπαραστάσεις των τελικών τιμών με διανύσματα και γραφικά είναι αναπόσπαστο κομμάτι των μετεπεξεργασιών [27].

3.3 Θεωρίες αστοχίας

Όταν ένα κομμάτι φορτίζεται ομοαξονικά τότε η τάση και η αντοχή του μπορούν να συγκριθούν απευθείας για να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας και για να γίνει φανερό αν το τμήμα θα αστοχήσει. Η μέθοδος αυτή είναι απλή καθώς υπάρχει μία μόνο τιμή τάσης και μία τιμή αντοχής. Αυτή μπορεί να είναι είτε το όριο διαρροής, είτε η μέγιστη διατμητική τάση [19], [27].

Το πρόβλημα παρ' όλα αυτά γίνεται αρκετά πολύπλοκο όταν έχουμε τάσεις σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν πολλές φορτίσεις αλλά μονάχα μία σημαντική αντοχή. Για να γίνει δυνατός ο προσδιορισμός της ασφάλειας του μοντέλου, αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες ώστε να βοηθήσουν αυτόν τον υπολογισμό.

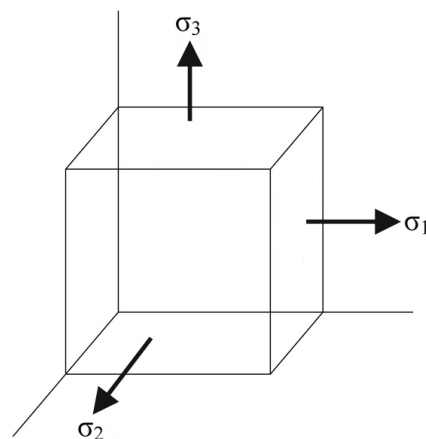
Οι θεωρίες αυτές είναι :

- **Θεωρία μέγιστης ορθής τάσης**

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή αστοχία θα προκύψει όταν μία από τις τρεις βασικές τάσεις φτάσει την αντοχή του υλικού. Έτσι αν κατατάξουμε τις τάσεις για οποιαδήποτε κατάσταση στην παρακάτω σειρά: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, τότε η θεωρία αυτή προβλέπει ότι θα έχουμε αστοχία όταν:

$$\sigma_1 = S_y \quad \text{ή} \quad \sigma_3 = -S_c$$

όπου S_y και S_c είναι οι αντοχές θλίψης και εφελκυσμού που αφορούν, είτε το όριο διαρροής, είτε το μέγιστο όριο αντίστοιχα [19],[27].



▪ Θεωρία μέγιστης διατμητικής τάσης

Στη θεωρία αυτή η διαρροή ξεκινάει όταν η μέγιστη διατμητική τάση σε οποιοδήποτε τμήμα γίνει ίση με την μέγιστη ορθή τάση ενός δείγματος του τεμαχίου σε εφελκυσμό. Προϋπόθεση είναι το μοντέλο να αποτελείται από το ίδιο υλικό όταν το δείγμα αυτό αρχίσει να διαρρέει [15], [19], [21], [27]. Αν καταταχθούν και πάλι οι τάσεις σαν $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, τότε η θεωρία αυτή προβλέπει ότι η διαρροή θα προκύψει όταν:

$$\tau_{\max} \geq \frac{S_y}{2} \quad \text{ή} \quad \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$

▪ Θεωρία ενέργειας παραμόρφωσης ή Von Mises

Σε αυτή τη θεωρία προβλέπεται ότι η αστοχία από διαρροή προκύπτει όταν η Von Mises ή αλλιώς ισοδύναμη τάση σ' , ισούται με το όριο διαρροής του υλικού [19]. Η τιμή της τάσης αυτής προκύπτει χρησιμοποιώντας μια υπόθεση για την ενέργεια παραμόρφωσης και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Το σημαντικό στοιχείο αυτής της θεωρίας είναι ότι μπορεί να αναπαραστήσει ολόκληρη την κατάσταση των τάσεων, όσο πολύπλοκη και αν είναι, ενώ παράλληλα δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από τις άλλες δύο [15], [19], [21], [27].

3.4 Στατική φόρτιση πλαισίου

Η πρώτη ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί είναι η γραμμική στατική ανάλυση. Η στατική φόρτιση που δέχεται το πλαίσιο οφείλεται στα διάφορα μέρη που στηρίζονται πάνω του, αλλά και στην αντίδραση αυτού του βάρους. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά για τα πλαίσια του 2014 και του 2015, τα βάρη που θα ληφθούν υπόψη στη μελέτη αντοχής.

3.4.1 Βάρη παλιού πλαισίου

Το πλαίσιο του 2014 χωρίς καμία άλλη προσθήκη υπολογίστηκε ότι ζυγίζει **10,55 kg**. Παρακάτω παραθέτονται τα βάρη των επιμέρους τμημάτων του οχήματος που φορτίζουν στατικά το σασί. Αυτό σημαίνει ότι στον πίνακα δεν εμφανίζονται τμήματα του οχήματος όπως οι τροχοί που δεν παίζουν ρόλο στη στατική καταπόνηση. Ο πίνακας παρουσιάζει και τη μετατροπή του βάρους σε δύναμη αφού θα χρησιμεύσει κατά τη μοντελοποίηση.

Πίνακας με βάρη πλαισίου 2014			
Τμήμα		kg	N
1.	Εμπρός κάλυμμα	8	78,45
2.	Πίσω κάλυμμα	6	58,84
3.	Οδηγός	70	686,46
4.	Κάθισμα	2	19,61
5.	Ζώνη	1	9,81
6.	Τιμόνι – σύστημα διεύθυνσης	3	29,42
7.	Πυροσβεστήρας	2,5	24,52
8.	Κυψέλη καυσίμου	13	127,49
9.	Φιάλη – ρυθμιστής υδρογόνου	4	39,23
10.	Κιβώτιο ταχυτήτων	4	39,23
11.	Ηλεκτρονικά – καλωδίωση	6	58,84
12.	Σασί	10,5	102,97
Σύνολο		130	1274,87

Πίνακας 3.1

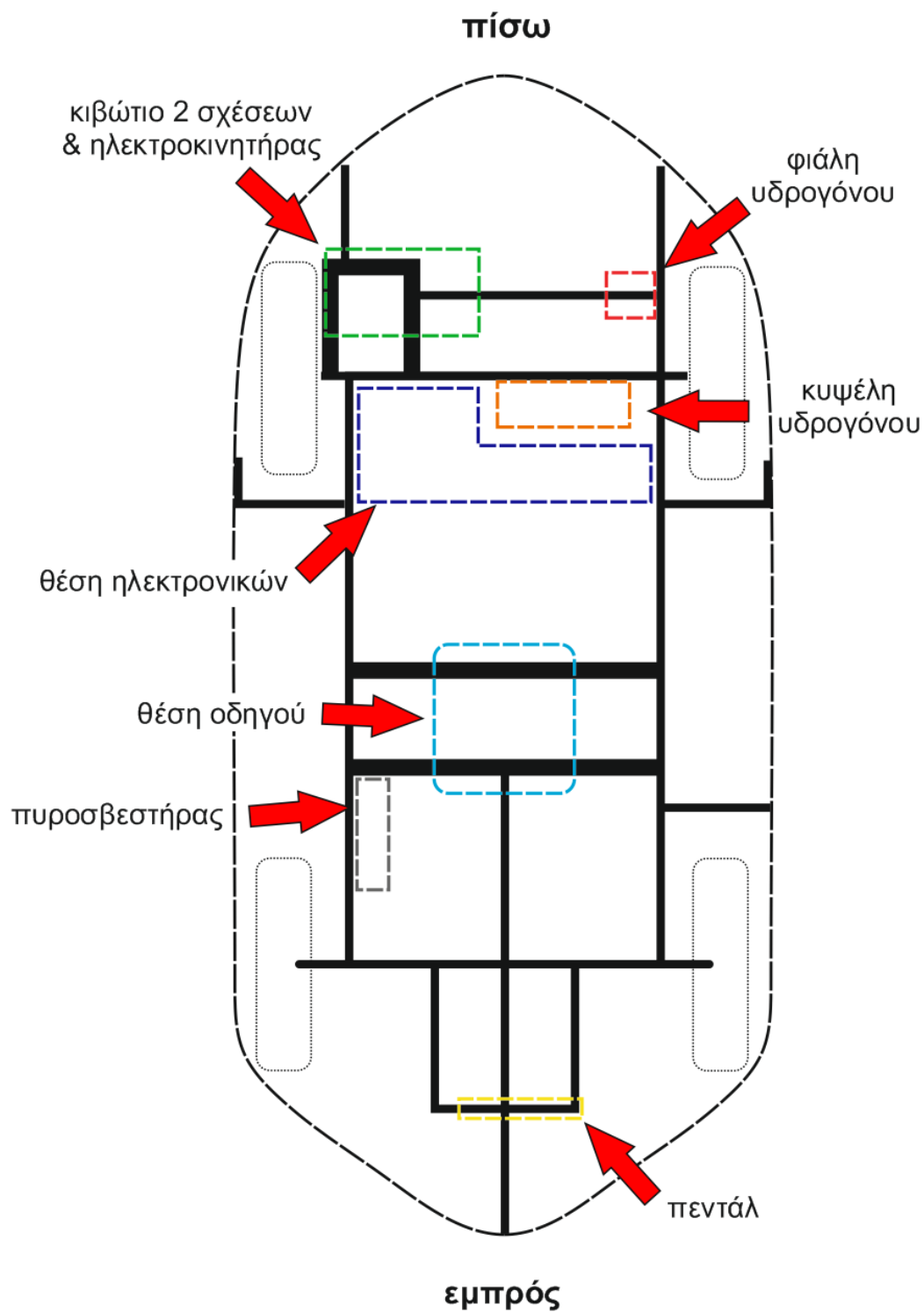
3.4.2 Βάρη νέου πλαισίου

Το συνολικό βάρος του πλαισίου που σχεδιάστηκε υπολογίζεται από το λογισμικό σχεδίασης PTC Creo Parametric 3.0 στα **6 kg**. Παρακάτω ακολουθούν τα βάρη που εφαρμόζονται στο νέο σασί και η συνοπτική τοποθέτησή τους.

Πίνακας με βάρη πλαισίου 2015			
Τμήμα		kg	N
1.	Εμπρός κάλυμμα	8	78,45
2.	Πίσω κάλυμμα	6	58,84
3.	Οδηγός	70	686,46
4.	Κάθισμα	2	19,61
5.	Ζώνη	1	9,81
6.	Τιμόνι – σύστημα διεύθυνσης	2,5	24,52
7.	Πυροσβεστήρας	2,5	24,52
8.	Κυψέλη καυσίμου	6,5	63,74
9.	Φιάλη – ρυθμιστής υδρογόνου	4	39,23

10.	Κιβώτιο ταχυτήτων	3	29,42
11.	Ηλεκτρονικά – καλωδίωση	5	49,03
12.	Σασί	6	58,84
	Σύνολο	116,5	1142,47

Πίνακας 3.2



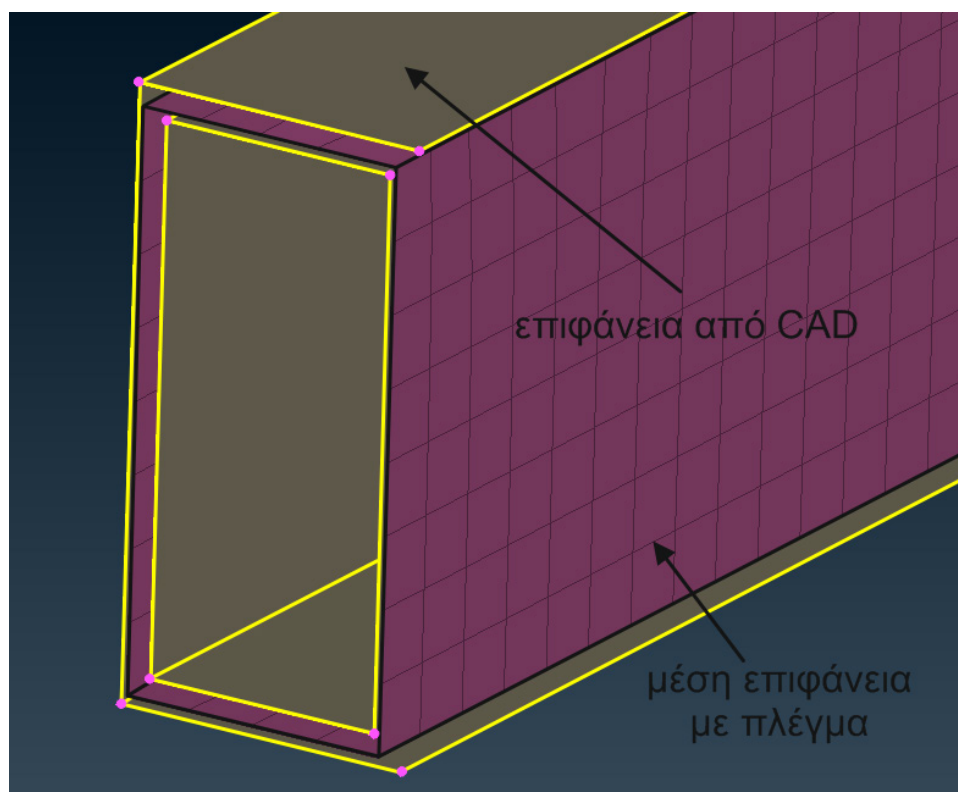
Εικόνα 3.3: Σημεία τοποθέτησης βάρους πάνω στο πλαίσιο.

3.5 Μοντελοποίηση στατικής φόρτισης

Για να πραγματοποιηθεί η γραμμική στατική ανάλυση το μοντέλο εισάγεται από το πρόγραμμα CAD στον προεπεξεργαστή ANSA v16.2.2 ώστε να μοντελοποιηθεί και να είναι επιλύσιμο. Στο στάδιο αυτό δημιουργείται στο σχέδιο του πλαισίου το κατάλληλο πλέγμα. Επιπλέον εισάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα ώστε η ανάλυση να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και τα αποτελέσματα της να είναι ορθά. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή και πραγματοποιείται και για τα 2 σασί που μελετώνται.

3.5.1 Δημιουργία πλέγματος

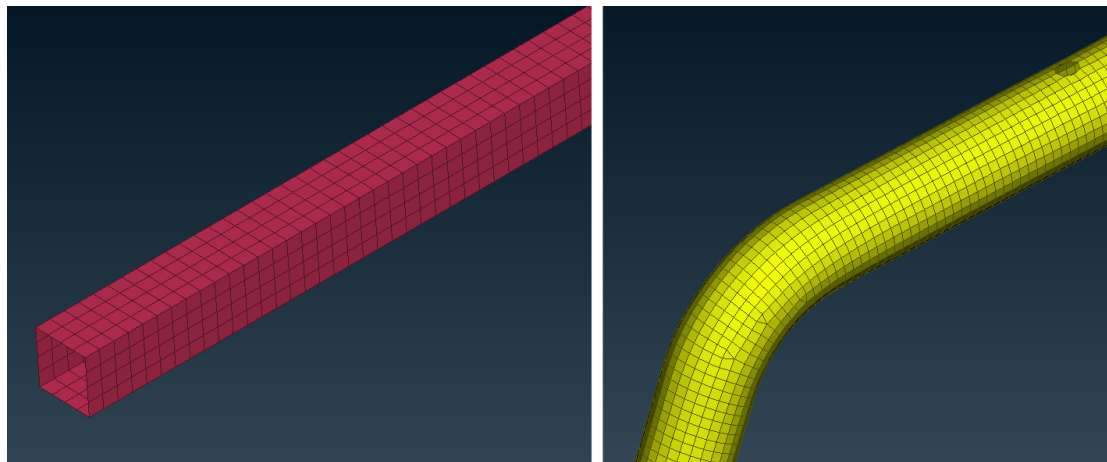
Το κυρίως τμήμα του πλαισίου αποτελείται από προφίλ αλουμινίου μικρού πάχους. Ο καλύτερος τρόπος για την δημιουργία πλέγματος σε αυτές τις περιπτώσεις είναι το πλέγμα μέσης επιφάνειας (middle surface mesh). Ο προεπεξεργαστής ανιχνεύει το πάχος του προφίλ και δημιουργεί στο μέσο του μια επιφάνεια με πλέγμα. Η επιφάνεια αυτή εμφανίζεται σαν μηδενικού πάχους, το λογισμικό όμως έχει καταχωρίσει το πάχος που εισήχθη από το πρόγραμμα CAD [2].



Εικόνα 3.4: Δημιουργία πλέγματος σε μέση επιφάνεια.

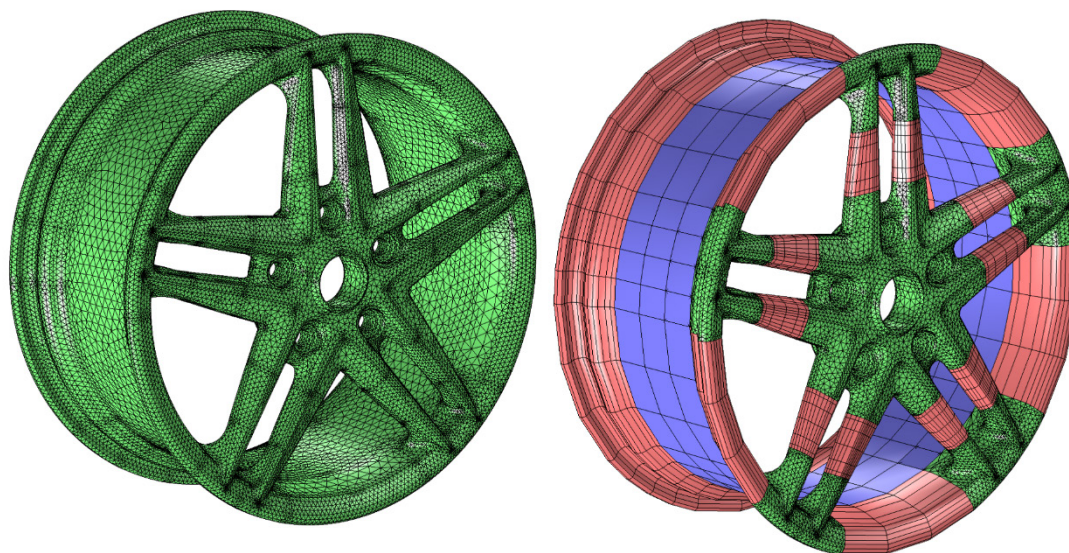
Τα στοιχεία πλέγματος που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι τετραγωνικής γεωμετρίας λόγω των ιδιοτήτων τους. Ένας άλλος παράγοντας για τη χρήση αυτού του είδους γεωμετρίας πλέγματος, είναι τα σχήματα στα οποία δημιουργείται και τα οποία έχουν απλή γεωμετρία με ίσιες ακμές και ορθές γωνίες.

Το μέγεθος των τετραγωνικών στοιχείων του πλέγματος είναι στην πλειοψηφία του 5x5 mm εκτός του roll bar. Στο σημείο εκείνο λόγω κυλινδρικής διάταξης αλλά και επειδή θέλουμε μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων σημειακά, το πλέγμα δημιουργείται πιο πυκνό. Έτσι εκεί τα στοιχεία είναι μεγέθους 2x2 mm.



Εικόνα 3.5: Διαφορά στην πυκνότητα του πλέγματος.

Αυτή η εναλλαγή της πυκνότητας του πλέγματος είναι μια πάγια τακτική ώστε να μειώνεται ο όγκος των απαιτούμενων υπολογισμών στην επίλυση. Με αυτό τον τρόπο σε σημεία και επιφάνειες που δεν εμφανίζουν μεγάλες γεωμετρικές αλλαγές και δεν είναι κρίσιμες για την αντοχή, το μέγεθος του πλέγματος αυξάνεται. Το ίδιο αντίστοιχα γίνεται και με τη μείωση του πλέγματος όπου είναι αναγκαίο.

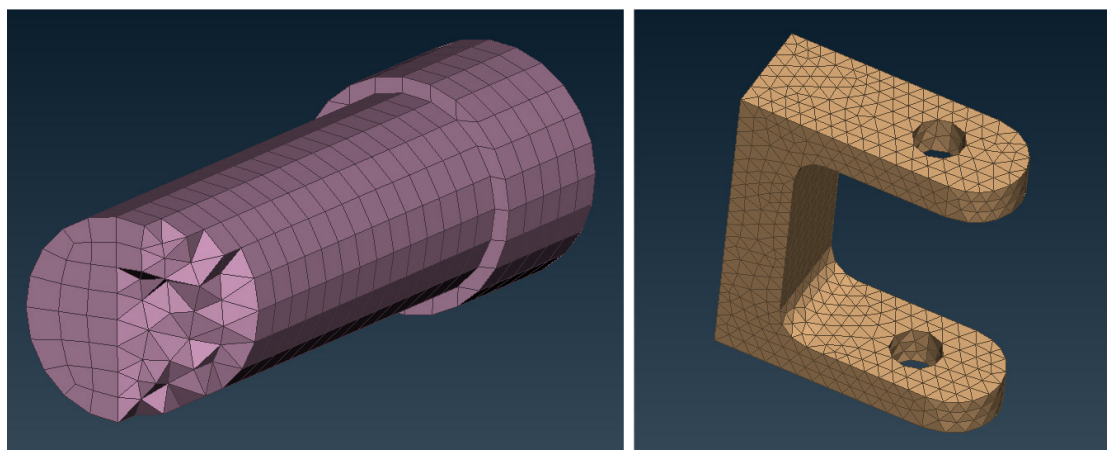


Εικόνα 3.6: Αυξομείωση πλέγματος ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδίου και τα ζητούμενα της ανάλυσης.

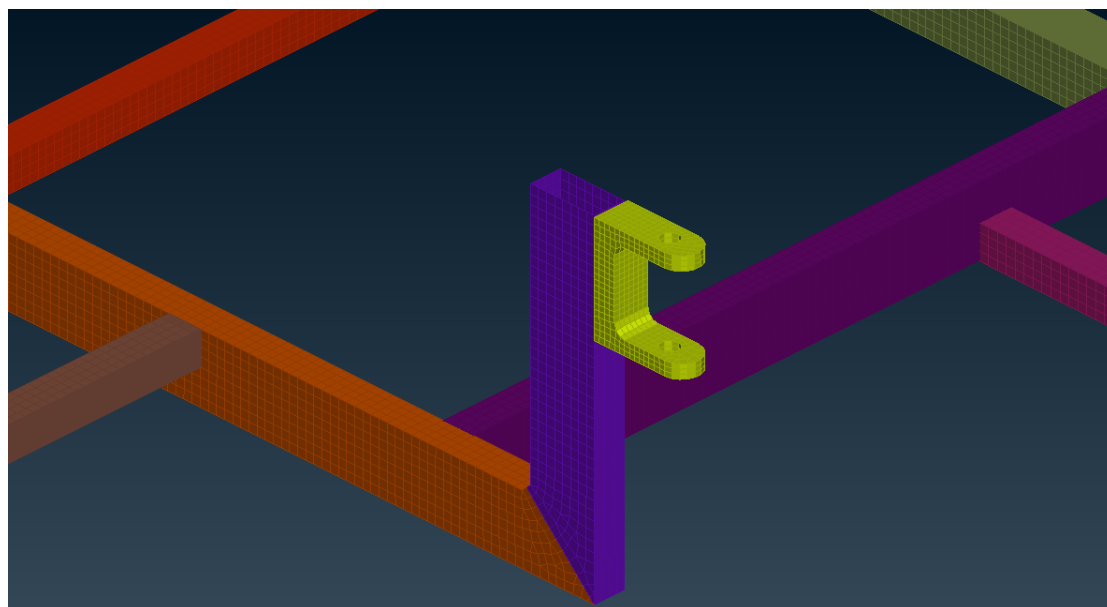
Μετά το πέρας της δημιουργίας πλέγματος μέσης επιφάνειας, το μοντέλο εμφανίζει κενές αποστάσεις λόγω συρρίκνωσης των επιμέρους επιφανειών. Η ατελής αυτή

δομή διορθώνεται με την εντολή welding FE [2]. Αυτή αναλαμβάνει να καλύψει τα κενά ενώνοντας τις ακμές των επιφανειών σαν να έχουν συγκολληθεί [4].

Το παραπάνω πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποκαλείται shell mesh. Στα σημεία με δύσκολη γεωμετρία και πολύπλοκότερο όγκο προτιμήθηκε πλέγμα στερεού όγκου (solid mesh ή volume mesh). Τα σημεία αυτά είναι τα πίσω ημιαξόνια και οι βάσεις των μπροστά ημιαξόνιων. Στα πίσω ημιαξόνια που είναι κυλινδρικού σχηματισμού δημιουργείται πλέγμα που πλαισιώνει όλο τον όγκο τους. Τα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι τετράεδρα και πεντάεδρα με σχήμα πυραμίδας και με ακμές 2 mm. Οι βάσεις των εμπρός ημιαξόνιων διακρίνονται και αυτές από πολύπλοκη γεωμετρία με γωνίες και καμπύλες. Για τη δημιουργία του πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή την περίπτωση τα ίδια στοιχεία.



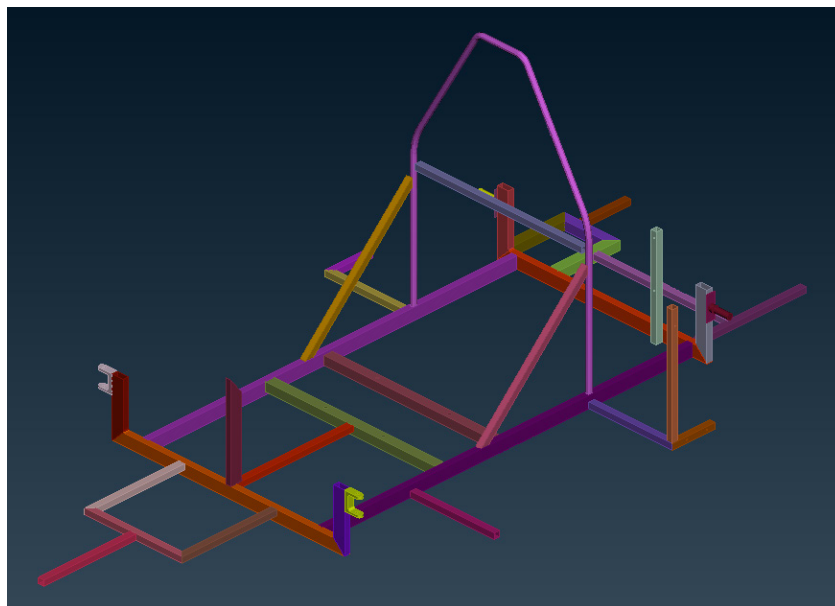
Εικόνα 3.7: Τμήματα του πλαισίου όπου χρησιμοποιήθηκε πλέγμα στερεού όγκου.



Εικόνα 3.8: Μερική άποψη πλαισίου μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το πλαίσιο μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος. Οι λεπτομέρειες της δομής δεν είναι εφικτό να φανούν λόγω της πυκνότητας και του

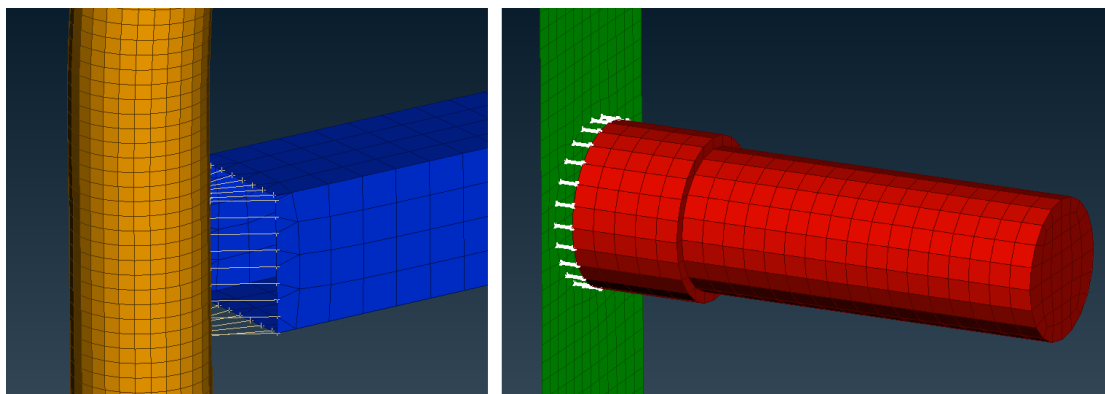
μεγέθους των στοιχείων. Με τους διάφορους χρωματισμούς αναπαρίστανται τα επιμέρους τμήματα που αναγνωρίζει ο προεπεξεργαστής.



Εικόνα 3.9: Τελική μορφή πλαισίου μετά την ολοκλήρωση του πλέγματος.

3.5.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων

Σε ορισμένα σημεία του πλαισίου υπάρχει ανάγκη σύνδεσης των διαφορετικών δομικών τμημάτων που δεν ενώθηκαν με την εντολή welding FE. Αυτή η ένωση πραγματοποιείται εύκολα με την εντολή σύνδεσης CWELD η οποία ενώνει 2 επιφάνειες προσομοιώνοντας τις ραφές συγκόλλησης [2].



Εικόνα 3.10: Παραδείγματα ενώσεων CWELD στο πλαίσιο.

3.5.3 Μοντελοποίηση υλικών και πάχους διατομών

Αφού γίνει η ένωση όλων των επιμέρους σημείων του σασί, σειρά έχει η εισαγωγή των υλικών κατασκευής και των δομικών χαρακτηριστικών τους. Ως γνωστόν τα υλικά

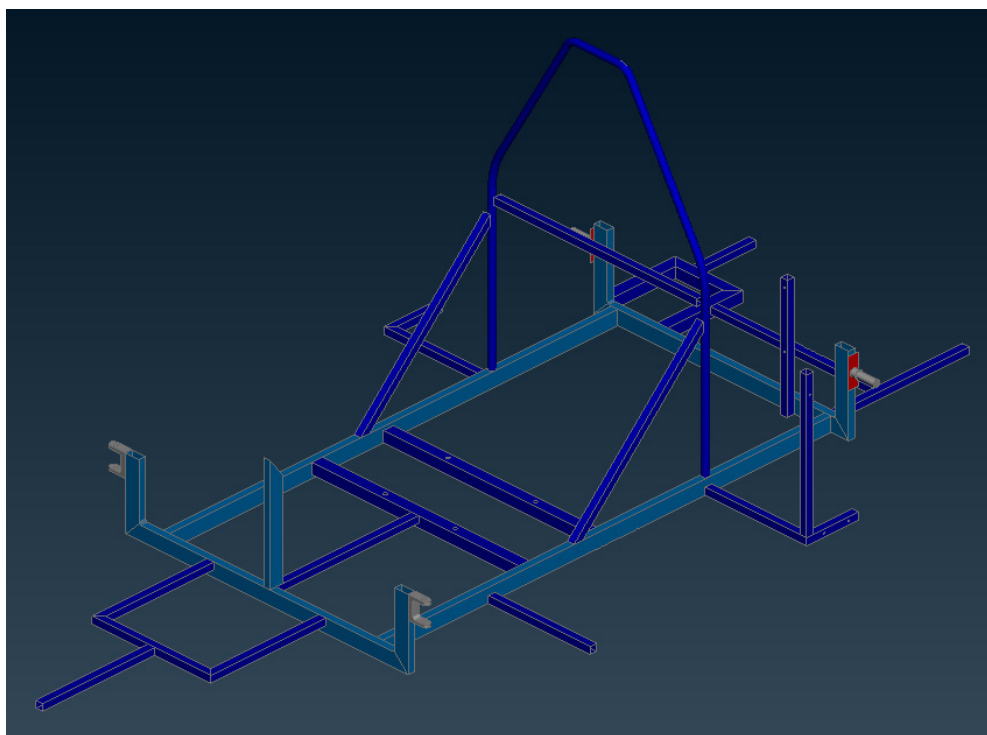
που επιλέχθηκαν για το πλαίσιο είναι τα 2 είδη αλουμινίου 6063 – T4 και 6061 – T4. Όμως στη μοντελοποίηση θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν και οι πίσω άξονες του οχήματος. Το υλικό κατασκευής τους είναι ανοξείδωτος χάλυβας 18/8 AISI – SAE 304 ωστενιτικής κατηγορίας.

Όσον αφορά τις ιδιότητες των υλικών ο προεπεξεργαστής χρειάζεται σαν είσοδο το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson, την πυκνότητα και το όριο διαρροής. Τα στοιχεία αυτά αναφέρθηκαν για τους 2 τύπους αλουμινίου οπότε παρακάτω ακολουθούν αυτά του χάλυβα [1], [2].

Ιδιότητες χάλυβα 18/8 AISI – SAE 304	
Πυκνότητα	2,7 g/cm ³
Μέτρο ελαστικότητας	69 GPa
Λόγος Poisson	0,33
Όριο διαρροής	230 – 820 MPa

Πίνακας 3.3

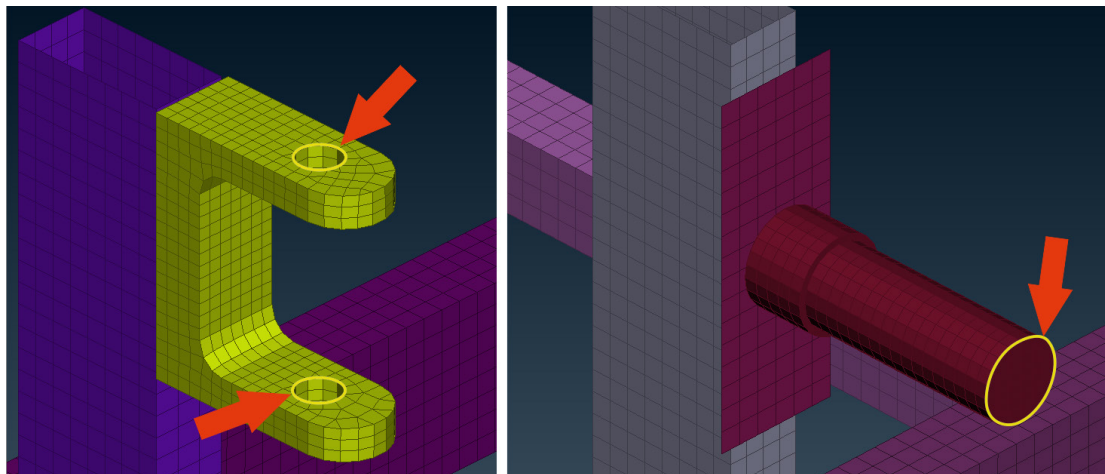
Το σχέδιο του μοντέλου όταν εισάγεται από το πρόγραμμα σχεδιασμού με τη μορφή επιφανειών μεταφέρει την πληροφορία του πάχους των διαφόρων διατομών. Επειδή όμως κατά τη δημιουργία του πλέγματος μέσης επιφάνειας η δομή αλλάζει σε κάποια σημεία το μοντέλο χρειάζεται διόρθωση. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη εντολή που δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα επιλέγοντας την τιμή πάχους και το αντίστοιχο στοιχείο [2].



Εικόνα 3.11: Αναπαράσταση διαφορετικού πάχους προφίλ στον προεπεξεργαστή.

3.5.4 Μοντελοποίηση περιορισμών

Οι περιορισμοί που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στη στατική ανάλυση είναι οι πακτώσεις στα 4 σημεία όπου το σασί συνδέεται με τους τροχούς. Επομένως οι πακτώσεις στο μοντέλο τοποθετούνται στις εμπρός βάσεις των ημιαξόνων και στην κάθετη επιφάνεια των πίσω αξόνων.



Εικόνα 3.12: Σημεία πακτώσεων πλαισίου.

3.5.5 Μοντελοποίηση βαρύτητας και δυνάμεων

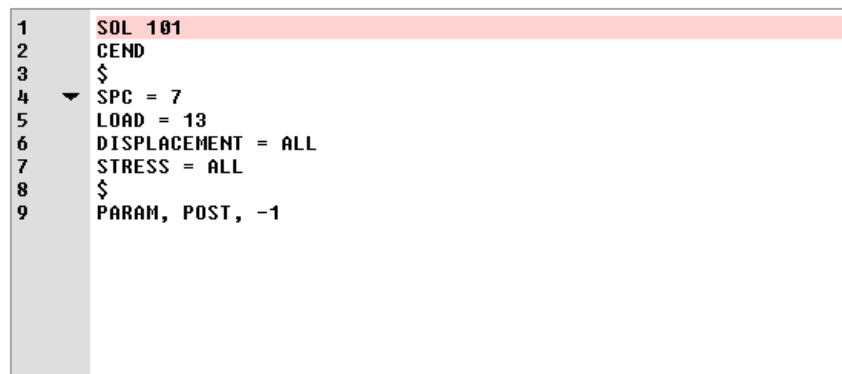
Για την εφαρμογή της βαρύτητας και των διαφόρων βαρών στο σασί υπάρχουν εξειδικευμένες εντολές στην «καρτέλα» του επιλυτή NASTRAN που χρησιμοποιείται. Η χρήση αυτών των εντολών είναι πολύ κρίσιμη αφού οποιοδήποτε λάθος στην τοποθέτηση των μεγεθών μπορεί να παραποιήσει τα αποτελέσματα.

Η εντολή GRAV μοντελοποιεί τη δύναμη λόγω βαρύτητας σε όλο το σασί και η χρήση της είναι απλή [1]. Για την εφαρμογή του βάρους που δέχεται το πλαίσιο από τα μέρη του οχήματος, γίνεται η μετατροπή των κιλών σε Newton ώστε να μοντελοποιηθούν σαν δυνάμεις. Αυτό γίνεται για διευκόλυνση της μοντελοποίησης με τη χρήση καταναμεμένων δυνάμεων στα σημεία που αυτές εντοπίζονται. Εδώ τα στοιχεία εισόδου στον προεπεξεργαστή είναι το μέτρο, η περιοχή εφαρμογής και η κατεύθυνση της δύναμης [1].

3.5.6 Αρχείο επιλυτή

Το τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης είναι η συγγραφή του αρχείου ανάγνωσης του επιλυτή. Το αρχείο αυτό θα δώσει την πληροφορία για το είδος της ανάλυσης που πρέπει να εκτελεστεί. Επιπλέον οι πληροφορίες που πρέπει να δοθούν είναι οι πακτώσεις και οι δυνάμεις που έχουν ομαδοποιηθεί και κωδικοποιηθεί κατάλληλα. Τέλος με συγκεκριμένες εντολές διευκρινίζονται τα δεδομένα που πρέπει να προκύψουν. Στην παρούσα ανάλυση αυτό που πρέπει να εξεταστεί είναι οι ισοδύναμες τάσεις κατά Von Mises και οι παραμορφώσεις [18].

Από τη στιγμή που θα ετοιμαστεί και το header file η εργασία στον προεπεξεργαστή έχει τελειώσει. Αυτό που έχει σειρά είναι η εξαγωγή του αρχείου και η επίλυση.



Εικόνα 3.13: Το header file για τη γραμμική στατική ανάλυση.

3.6 Ανάλυση ιδιομορφών

Ιδιομορφική ανάλυση είναι η μελέτη των δυναμικών ιδιοτήτων των κατασκευών υπό παλμική διέγερση. Είναι ο πιο θεμελιώδης τύπος δυναμικής ανάλυσης και γενικά είναι το σημείο εκκίνησης για άλλες πιο λεπτομερείς δυναμικές αναλύσεις [32].

Ο στόχος της ιδιομορφικής ανάλυσης είναι να προσδιορίσει τα σχήματα λειτουργίας μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια κάποιου είδους δόνησης, αλλά και να προσδιορίσει τις ιδιοσυχνότητες στις οποίες αποδίδονται αυτά. Γι' αυτό το λόγο κάθε σχήμα λειτουργίας συνοδεύεται από μία συχνότητα. Έτσι η ανάλυση δίνει την πληροφορία για το πώς η εξεταζόμενη δομή θα συμπεριφερθεί υπό ταλάντωση καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τείνει να παραμορφωθεί [32], [34].

Αρκετά σύνηθες είναι σε τέτοιες αναλύσεις να χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τύποι των εξισώσεων των ιδιομορφών είναι εκείνοι που χρησιμοποιούνται στα ιδιοσυστήματα. Η φυσική ερμηνεία των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων, τα οποία προέρχονται από την επίλυση του συστήματος, αντιπροσωπεύουν τις φυσικές συχνότητες και τα αντίστοιχα σχήματα λειτουργίας [32].

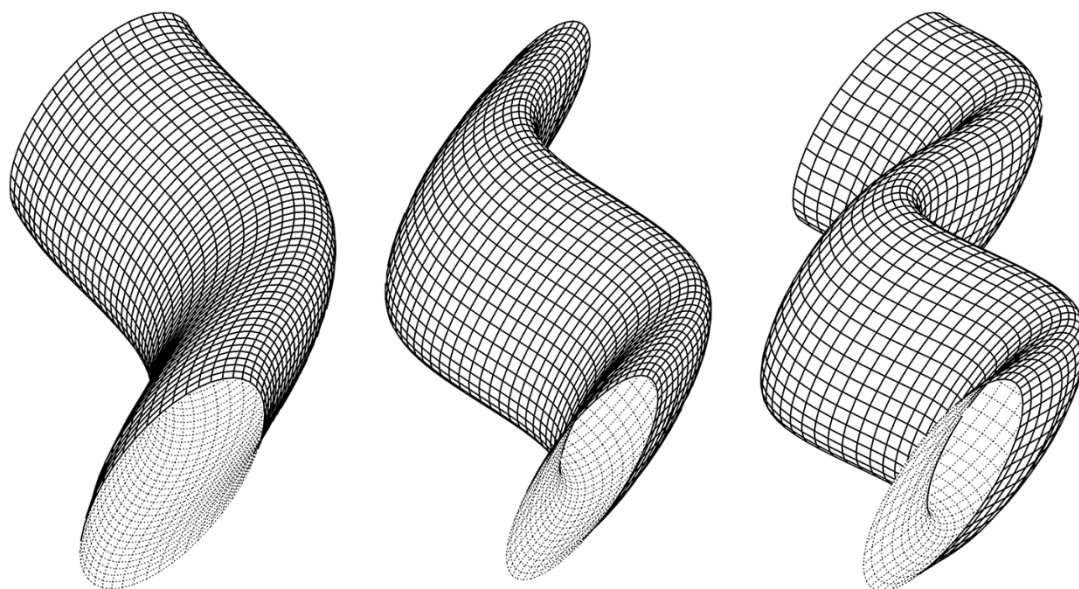
3.6.1 Χαρακτηριστικά σχήματα λειτουργίας

Κάθε σχήμα λειτουργίας λαμβάνει χώρα σε μία πολύ συγκεκριμένη συχνότητα που ονομάζεται φυσική συχνότητα. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει με την πολλαπλότητα του σχήματος αυτού αφού είναι απολύτως δυνατό μια δομή να έχει διαφορετικές μορφές στην ίδια συχνότητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ενώ για ένα σχήμα έχουμε μια συχνότητα, το σχήμα αυτό μπορεί να έχει πολλές μορφές αφού υπόκειται σε ταλάντωση. Έτσι η συνολική μετατόπιση και οι καταπονήσεις που εμφανίζονται, οφείλονται σε όλες τις μορφές που μπορεί να πάρει η κατασκευή μέσα σε ένα χαρακτηριστικό σχήμα λειτουργίας [32].

3.6.2 Ταλαντώσεις & συντονισμός

Συντονισμός το φαινόμενο κατά το οποίο σε μια εξαναγκασμένη ταλάντωση η συχνότητα του διεγέρτη είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή με αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση του πλάτους. Κάθε ταλαντωτής μπορεί να ταλαντώνεται σε μία περιοχή συχνοτήτων. Η στιγμιαία διέγερση ενός ταλαντωτή ισοδυναμεί με την απόδοση στην ταλάντωση ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας. Αυτή είναι η ελεύθερη ταλάντωση η οποία συμβαίνει με συχνότητα που ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή. Όταν η ταλάντωση είναι εξαναγκασμένη, η συχνότητα της είναι η συχνότητα του διεγέρτη. Όταν η συχνότητα του διεγέρτη ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή έχουμε συντονισμό.

Κατά το συντονισμό το σύστημα έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος και τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Αν δεν υπάρχουν αποσβεστικές δυνάμεις, τότε το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται θεωρητικά άπειρο. Έτσι η ταλάντωση μπορεί να γίνει τόσο έντονη ώστε να καταστραφεί ο ταλαντωτής. Αν η προσφορά ενέργειας είναι μεγαλύτερη τότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του ταλαντωτή [32].



Εικόνα 3.14: Χαρ/στικά σχήματα λειτουργίας για ταλαντώσεις με διαφορετική συχνότητα.

Στην περίπτωση μας το όχημα δεν διαθέτει αποσβεστήρες. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις ιδιοσυχνότητες που θα μας δώσουν την πληροφορία για το ποιες συχνότητες ο ταλαντωτής παρουσιάζει την ελάχιστη απόσβεση κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση. Στην ανάλυση αυτή αποφεύγεται η χρήση φορτίων στις κατασκευές. Στόχος είναι το σύστημα να ταλαντωθεί ελεύθερα ώστε τα στοιχεία που θα προκύψουν από τα Χ.Σ.Λ. να αφορούν τις ιδιότητες της δομής. Έτσι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα μεταξύ των διαφορετικών σχεδιασμών που παρουσιάζονται [32].

3.6.3 Τι δείχνουν τα χαρακτηριστικά σχήματα λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ένα Χ.Σ.Λ. αποτελείται από ένα σύνολο μορφών που αποδίδουν παραμορφώσεις. Παρ' όλα αυτά οι τιμές αυτές δεν έχουν φυσικό νόημα από μόνες τους. Για μαθηματικούς λόγους ένας αυθαίρετος παράγοντας κλίμακας επιλέγεται κατά την επίλυση οπότε τα αριθμητικά αποτελέσματα χρίζουν μετατροπής [32].

Ωστόσο αυτή η κλιμάκωση δεν επηρεάζει την κατανομή των τάσεων η οποία γραφικά παραμένει σωστή ακόμη και αν οι ακριβείς τιμές είναι αναληθείς. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σχετικές τιμές μεταξύ οποιωνδήποτε σημείων στη δομή έχουν νόημα και προέρχονται από τη μαθηματική επίλυση [32].

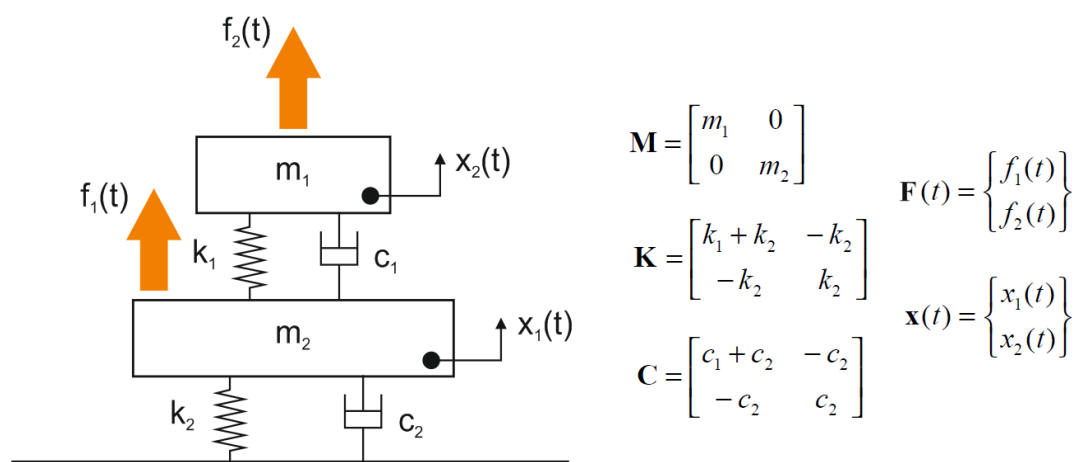
Για να κατανοηθεί λοιπόν η πραγματική τάξη τιμών των αποτελεσμάτων αρκεί να μετατραπεί η κλίμακα επίλυσης. Αυτό γίνεται αν σε ένα Χ.Σ.Λ. διαιρεθεί η μονάδα με τη μέγιστη τιμή μετατόπισης και πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη τιμή τάσης. Έτσι λαμβάνουμε την πραγματική τιμή της φόρτισης [32].

3.6.4 Το μαθηματικό υπόβαθρο της ανάλυσης

Το πλαίσιο ενός οχήματος θεωρείται σύστημα πολλαπλών βαθμών ελευθερίας (MDOFS) [5], [9], [23], [34]. Η διακριτή δυναμική εξίσωση που χρησιμοποιείται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}] \{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.4)$$

Όπου $[\mathbf{M}]$ η μήτρα μάζας, $[\mathbf{C}]$ η μήτρα απόσβεσης και $[\mathbf{K}]$ η μήτρα ακαμψίας. Τα στοιχεία $\{\ddot{\mathbf{x}}\}$, $\{\dot{\mathbf{x}}\}$ και $\{\mathbf{x}\}$ είναι αντίστοιχα το διάνυσμα της επιτάχυνσης, το διάνυσμα της ταχύτητας και το διάνυσμα της μετατόπισης. Και οι τρεις αυτοί συντελεστές μεταβάλλονται ως συνάρτηση του χρόνου [17], [32], [34].



Εικόνα 3.15: Παράδειγμα συστήματος 2 βαθμών ελευθερίας [5], [17].

Αν αγνοηθεί η απόσβεση η εξίσωση γίνεται:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.5)$$

Το ποσοστό της απόσβεσης για τις περισσότερες κατασκευές είναι αρκετά κάτω του 10%. Αυτό οποίο σημαίνει αργή απόσβεση των δονήσεων στο σύστημα [32], [34].

Αν υποθεθεί ότι τα διανύσματα $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_1$ και $\{\mathbf{x}\}_1$ είναι λύσεις για τη δυναμική εξίσωση έτσι ώστε:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\}_1 + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\}_1 = \{\mathbf{F}\} \quad (3.6)$$

και ότι τα διανύσματα $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_2$ και $\{\mathbf{x}\}_2$ είναι λύσεις της δυναμικής εξίσωσης στην οποία ο φορέας φορτίου έχει οριστεί σε μηδέν:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\}_2 + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\}_2 = \{\mathbf{0}\} \quad (3.7)$$

Το άθροισμα των 2 εξισώσεων δίνει:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\}_1 + [\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\}_2 + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\}_1 + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\}_2 = \{\mathbf{F}\} + \{\mathbf{0}\} \quad (3.8)$$

Που γράφεται ως:

$$[\mathbf{M}] (\{\ddot{\mathbf{x}}\}_1 + \{\ddot{\mathbf{x}}\}_2) + [\mathbf{K}] (\{\mathbf{x}\}_1 + \{\mathbf{x}\}_2) = \{\mathbf{F}\} \quad (3.9)$$

Με άλλα λόγια, τα $(\{\ddot{\mathbf{x}}\}_1 + \{\ddot{\mathbf{x}}\}_2)$ και $(\{\mathbf{x}\}_1 + \{\mathbf{x}\}_2)$ είναι επίσης μια έγκυρη λύση της δυναμικής εξίσωσης χωρίς απόσβεση [32].

Όσο τα $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_2$ και $\{\mathbf{x}\}_2$ είναι μηδενικά, δεν υπάρχει προφανώς κανένα πρόβλημα. Αυτή ονομάζεται τετριμμένη λύση.

Από την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει ένα μη μηδενικό σύνολο διανυσμάτων $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_2$ και $\{\mathbf{x}\}_2$, τότε υπάρχουν πολλαπλές πιθανές λύσεις για τη δυναμική εξίσωση. Παρ' όλα αυτά όπως αποδεικνύεται υπάρχει μόνο μία έγκυρη λύση η οποία καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες [32].

Οι λύσεις για την εξίσωση:

$$[\mathbf{M}] \{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}] \{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{0}\} \quad (3.10)$$

έχουν τη μορφή:

$$\{\mathbf{u}\}(\mathbf{t}) = \{\mathbf{U}\} \mathbf{e}^{i\omega \mathbf{t}} \quad (3.11)$$

$$\{\ddot{\mathbf{u}}\}(\mathbf{t}) = -\omega^2 \{\mathbf{U}\} e^{i\omega t} \quad (3.12)$$

Όπου το $\{\mathbf{U}\}$ είναι ένα σταθερό διάνυσμα και το $e^{i\omega t}$ αντιπροσωπεύει το χρόνο απόκρισης (ημιτονοειδές κύμα) [32], [34].

Το ω είναι η συχνότητα του ημιτονοειδούς κύματος.

Το γινόμενο $\{\ddot{\mathbf{u}}\}(\mathbf{t})$ λαμβάνεται με τη διαφόρηση του $\{\mathbf{u}\}(\mathbf{t})$ δύο φορές. Χρησιμοποιώντας αυτό προκύπτει:

$$-\omega^2 [\mathbf{M}] \{\mathbf{U}\} e^{i\omega t} + [\mathbf{K}] \{\mathbf{U}\} e^{i\omega t} = \{\mathbf{0}\} \quad (3.13)$$

και διαιρώντας με $e^{i\omega t}$:

$$([\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}]) \{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{0}\} \quad (3.14)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το ω^2 είναι η ιδιοτιμή και το $\{\mathbf{U}\}$ ιδιοδιάνυσμα. Η λύση σε αυτή την εξίσωση είναι το διάνυσμα $\{\mathbf{U}\}$ με αντίστοιχη συχνότητα ω [32], [34].

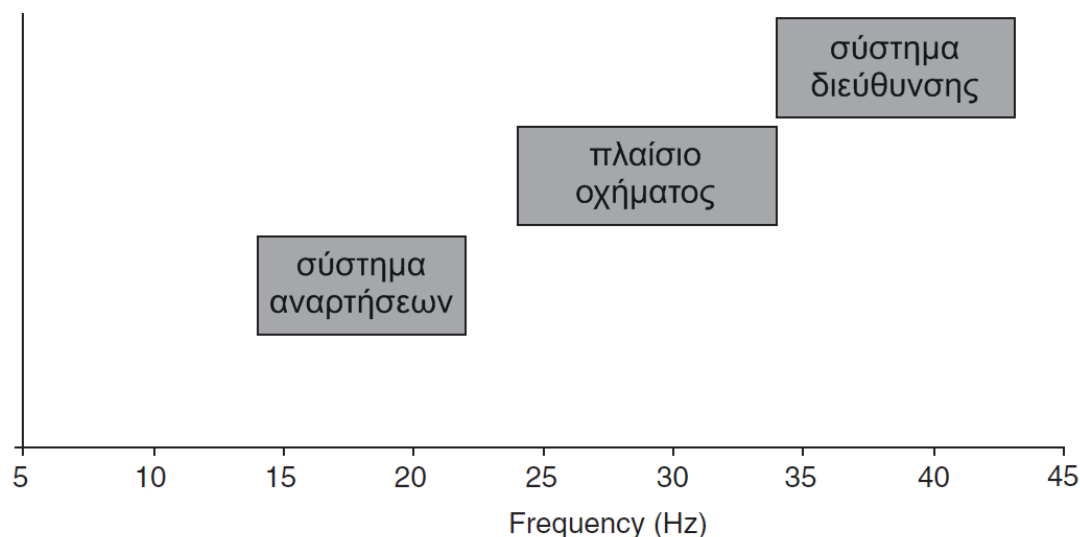
3.6.5 Η ανάλυση ιδιομορφών για το πλαίσιο ενός οχήματος

Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι ένας από τους μεγαλύτερους χρήστες της τεχνολογίας της ανάλυσης ιδιομορφών. Η συμπεριφορά του σασί είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς του αυτοκινήτου και για αυτό το λόγο η ανάλυση του γίνεται σε βάθος [24], [34].



Εικόνα 3.16: Πειραματική ανάλυση δονήσεων σε BMW Z4 του 2006.

Όταν ένα αυτοκίνητο ταξιδεύει το σασί διεγείρεται από δυνάμεις που προκαλούνται από την τραχύτητα του οδοστρώματος, τον κινητήρα, τη μετάδοση κίνησης κ.α. Κάτω από αυτές τις διάφορες δυναμικές καταπονήσεις το σασί του αυτοκινήτου τείνει να δονείται. Κάθε φορά που η φυσική συχνότητα δόνησης της κατασκευής συμπίπτει με τη συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης εμφανίζεται ένα φαινόμενο του συντονισμού. Σκοπός της ανάλυσης ιδιομορφών είναι τέτοια φαινόμενα να αποφευχθούν με την παρέμβαση στο σχεδιασμό προτού ένα όχημα παραχθεί [24], [34].



Εικόνα 3.17: Τυπικές συχνότητες συντονισμού βασικών συστημάτων οχήματος [26].

Τα χαρακτηριστικά του πλαισίου που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του στη δόνηση είναι η ακαμψία και η κατανομή της μάζας [24]. Γι' αυτό το λόγο οι συχνότητες που προκαλούν συνολική κάμψη και στρέψη είναι σημεία αναφοράς κατά την ανάλυση. Συγκεκριμένα η συμπεριφορά της δομής επηρεάζεται ιδιαίτερα από την πρώτη φυσική συχνότητα που θα δώσει κάμψη και την αντίστοιχη που θα δώσει στρέψη του πλαισίου. Έτσι οι αυτοκινητοβιομηχανίες επιζητούν οι τιμές αυτών των συχνοτήτων να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες [34].

3.6.6 Η ανάλυση ιδιομορφών & το πλαίσιο του ER2015

Το όχημα ER2015 αν και δεν φέρει επάνω του ισχυρές πηγές δονήσεων, δεν διαθέτει αναρτήσεις για την απόσβεση των κραδασμών από εξωτερικές πηγές. Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση ιδιομορφών και τα αποτελέσματα της έχουν νόημα μόνο για τη σύγκριση της στιβαρότητας 2 διαφορετικών σχεδιασμών. Ανάλογα με την κατανομή και την σύγκριση των φυσικών συχνοτήτων που θα προκύψουν, θα έχουμε μια εικόνα για το ποιο σασί τείνει να έχει μεγαλύτερη στιβαρότητα και καλύτερη απόκριση σε δυναμικά φαινόμενα. Επιπλέον τα Χ.Σ.Λ. θα δείξουν που επηρεάζεται και σε ποιο βαθμό το σχέδιο της κατασκευής. Έτσι θα μπορεί να γίνει παρέμβαση στο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του πριν την κατασκευή.

3.7 Μοντελοποίηση ανάλυσης ιδιομορφών

Η προγενέστερη μοντελοποίηση της στατικής ανάλυσης απλοποιεί τη διαδικασία. Το πλέγμα, τα υλικά και οι συνδέσεις παραμένουν ως έχουν. Το μόνο πράγμα που αλλάζει είναι το αρχείο του επιλυτή και ο καθορισμός της μεθόδου που πρέπει να ακολουθήσει.

3.7.1 Η μέθοδος και το αρχείο του επιλυτή

Τα χαρακτηριστικά σχήματα λειτουργίας θα εξαχθούν από τον επιλυτή χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Block Lanczos. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κατά κόρον σε μελέτες τέτοιου είδους και θεωρείται η ανώτερη του είδους της [11], [12], [16]. Η επιλογή στον προεπεξεργαστή ANSA γίνεται στην καρτέλα METHOD. Εκεί εισάγεται ο παραπάνω τύπος ανάλυσης με τη επιλογή EIGRL που θεωρείται βέλτιστη για τον επιλυτή NASTRAN [6]. Από την ίδια καρτέλα επιλέγεται και ο αριθμός των n – πρώτων Χ.Σ.Λ. που θα υπολογιστούν. Για την παρούσα ανάλυση επιλέγονται τα 30 πρώτα με έναρξη υπολογισμού από τα 0 Hz. Έτσι τα αποτελέσματα των συχνοτήτων που θα προκύψουν κυμαίνονται ανάμεσα στην περιοχή 0 – 250 Hz.

Στο αρχείο του επιλυτή εισάγεται ο κωδικός της παραπάνω μεθόδου καθώς και τα ζητούμενα αποτελέσματα που πρέπει να υπολογιστούν. Έτσι το αρχείο είναι έτοιμο για επίλυση αφού εξαχθεί στην κατάλληλη μορφή.

4.

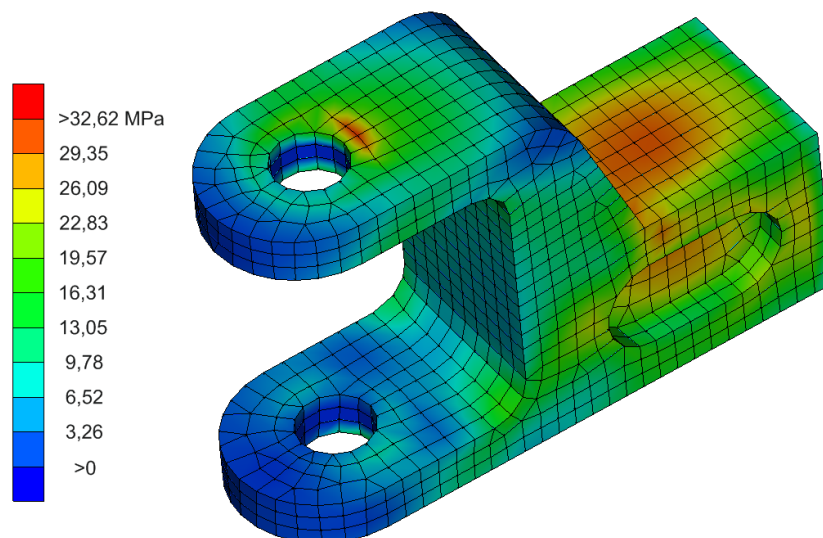
Επίλυση & σύγκριση μοντέλων

4.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

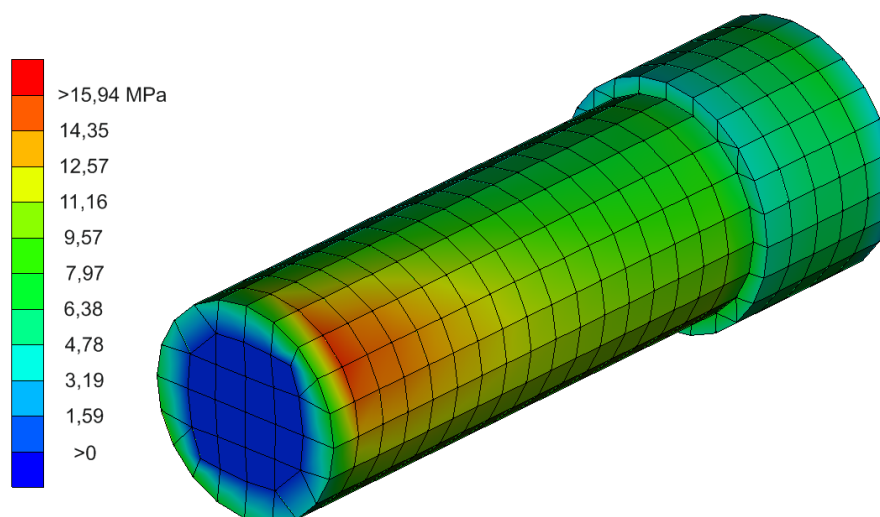
Η γραμμική στατική ανάλυση των 2 μοντέλων σας εκτελέστηκε από τον επιλυτή Epilysis της εταιρίας BETA CAE Systems S.A. Για το κάθε μοντέλο ζητήθηκε από τον επιλυτή να υπολογίσει τις ορθές τάσεις κατά Von Mises και τις παραμορφώσεις των κατασκευών. Στο τελικό στάδιο τα επιλυμένα αρχεία εισάγονται στον post processor μΕΤΑ ώστε να γίνει η γραφική αναπαράσταση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

4.1.1 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης πλαισίου ER2014

Από την επιβολή των στατικών φορτίσεων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το πλαίσιο του 2014:

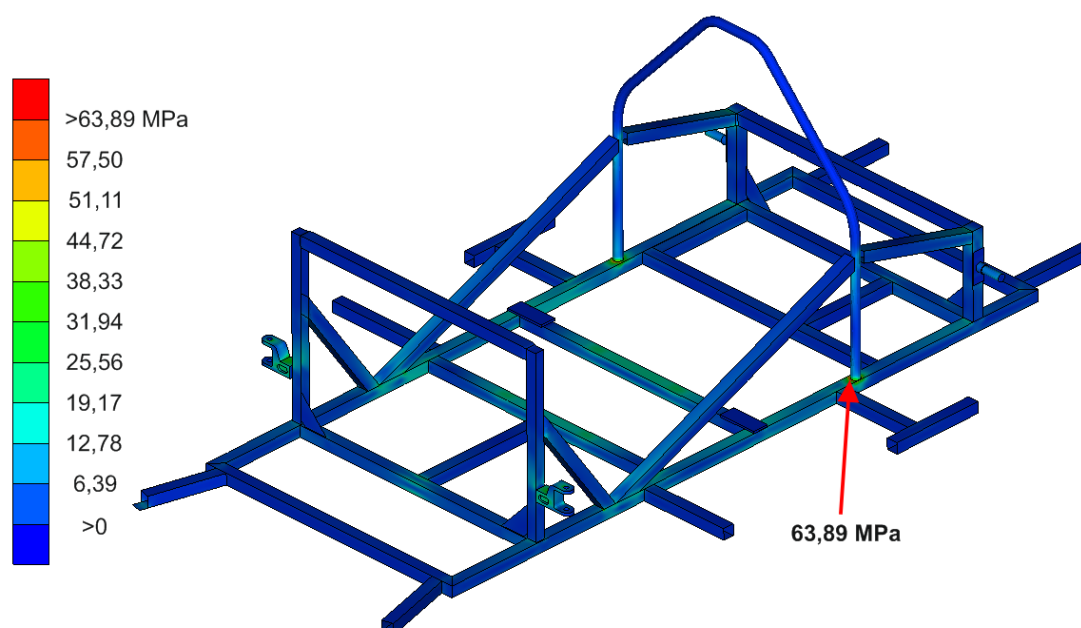


Εικόνα 4.1: Φόρτιση εμπρός αριστερής βάσης ημιαξόνιων ER2014.



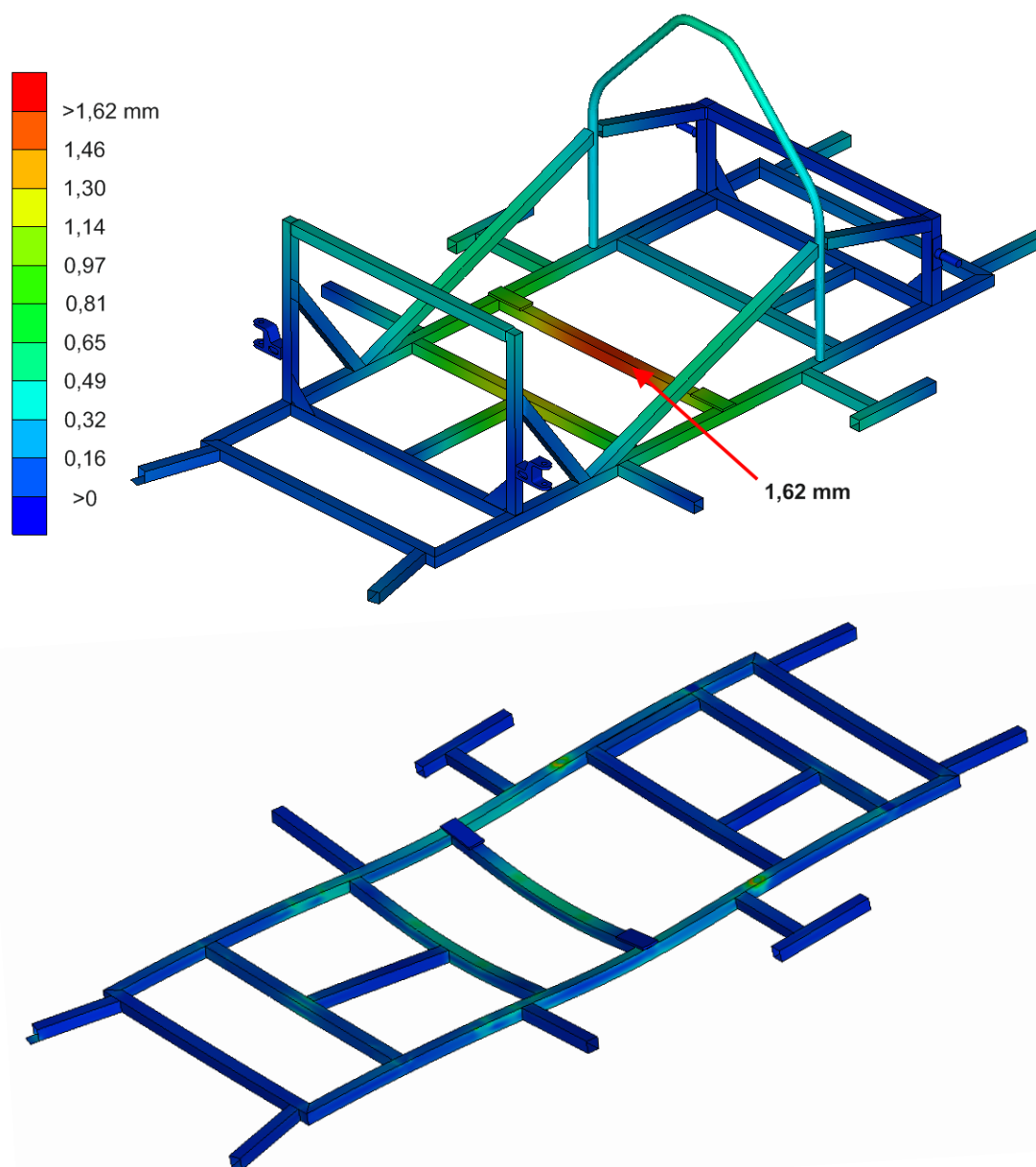
Εικόνα 4.2: Φόρτιση πίσω αριστερού ημιαξόνιου ER2014.

Αυτό που φαίνεται στις εικόνες 4.1 και 4.2 είναι η κατανομή τάσεων κατά Von Mises στις εμπρός βάσεις των ημιαξόνιων και στους πίσω άξονες. Είναι εμφανές πως τα σημεία αυτά δεν αντιμετωπίζουν κάποιο πρόβλημα αντοχής. Πιο συγκεκριμένα οι εμπρός βάσεις εμφανίζουν μέγιστη τάση 32,62 MPa με όριο διαρροής τα 80 MPa και οι πίσω άξονες 15,94 MPa με όριο διαρροής 230 MPa.



Εικόνα 4.3: Φόρτιση πλαισίου ER2014. Εμφανές είναι το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση.

Από τη συνολική κατανομή τάσεων τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πλαίσιο του ER2014 είναι μια αρκετά στιβαρή κατασκευή με συντελεστή ασφαλείας κοντά στο 4. Η μέγιστη τάση παρατηρείται στη βάση του roll bar και είναι στα **63,89 MPa**. Όσον αφορά τις σημαντικές τιμές τάσεων, αυτές παρατηρούνται κυρίως στις 2 κάθετες μπάρες όπου τοποθετείται το κάθισμα του οδηγού αλλά και στις κύριες διαμήκειες δοκούς.

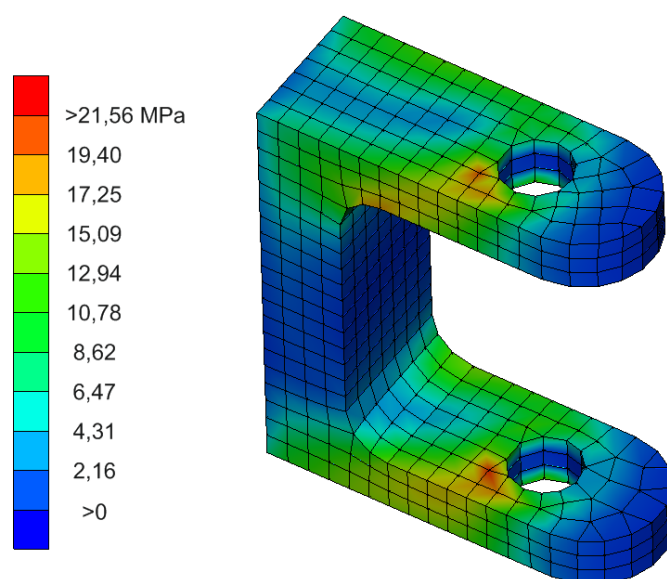


Εικόνα 4.4: Άποψη παραμορφώσεων του πλαισίου του ER2014.

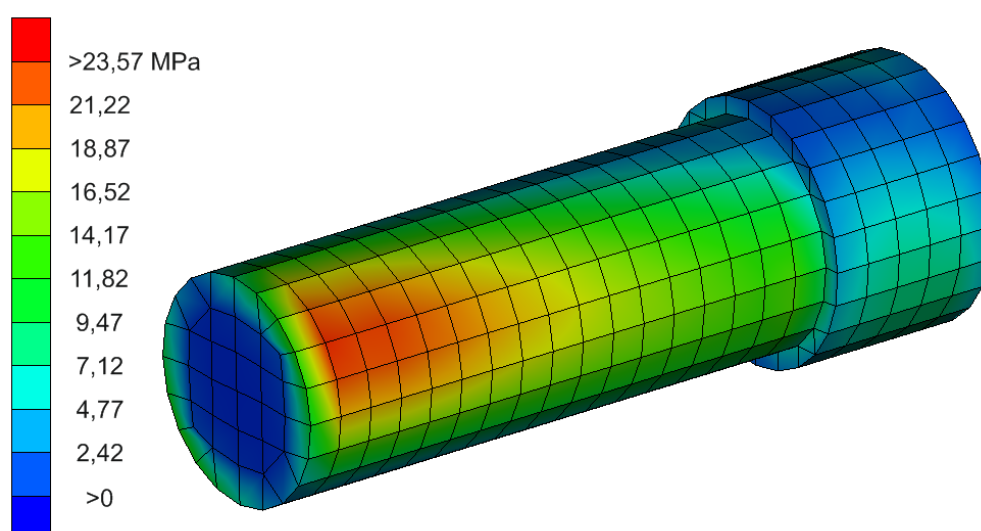
Τα αποτελέσματα των εμφανιζόμενων τάσεων επιβεβαιώνονται και από τις τιμές των παραμορφώσεων. Αυτό που φαίνεται στην εικόνα 4.4 είναι ότι η μέγιστη παραμόρφωση που δέχεται το σασί είναι **1,62 mm** στη θέση του καθίσματος. Τα υπόλοιπα σημεία που εμφανίζουν τιμές παραμόρφωσης κοντά στο 1 mm βρίσκονται περιμετρικά της θέσης του οδηγού. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο φορτίο που φέρει η κατασκευή και δεν είναι άλλο από τον επιβαίνοντα.

4.1.2 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης πλαισίου ER2015

Από την επιβολή των στατικών φορτίσεων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το πλαίσιο του 2015:



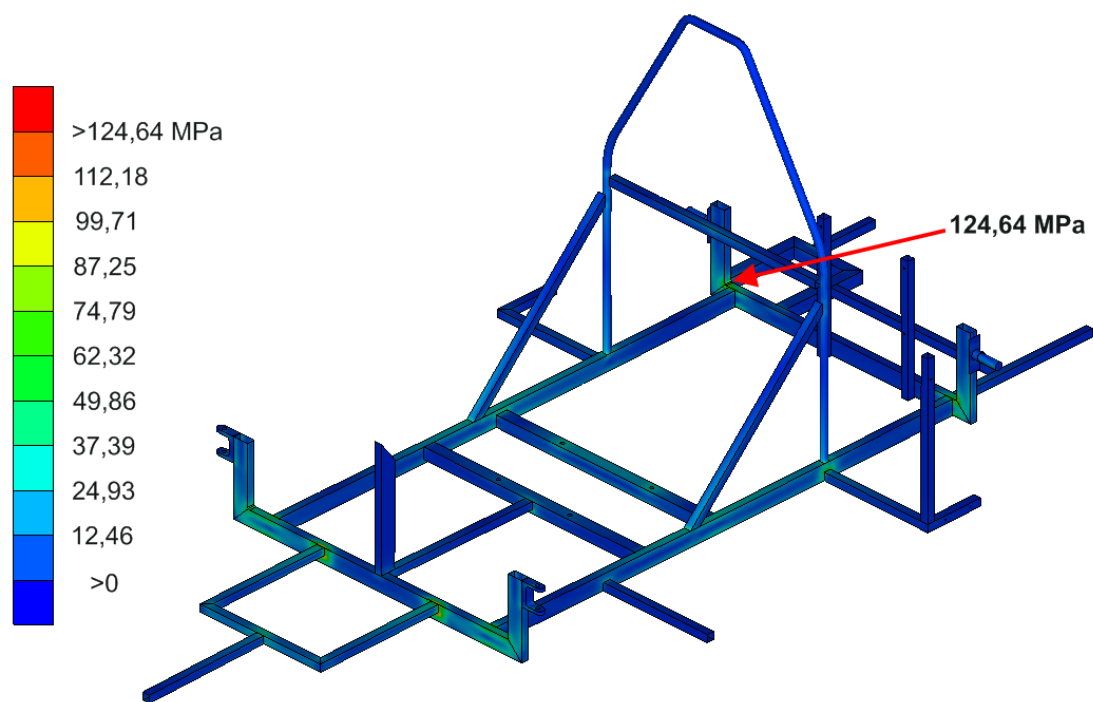
Εικόνα 4.5: Φόρτιση εμπρός αριστερής βάσης ημιαξόνιων ER2015.



Εικόνα 4.6: Φόρτιση πίσω αριστερού ημιαξόνιου ER2015.

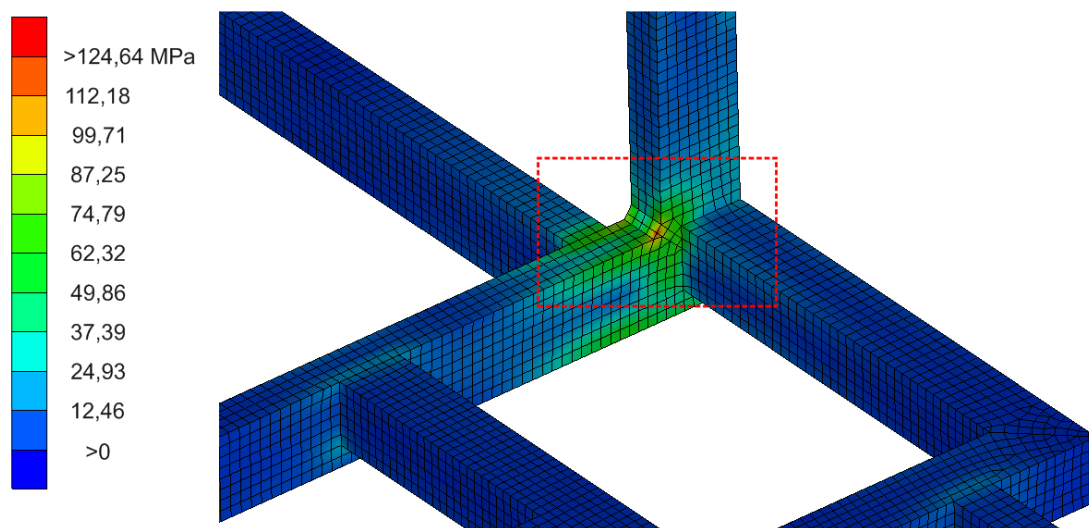
Τα ακραία σημεία του πλαισίου του ER2015 εμφανίζουν μια αρκετά καλή αντοχή στις στατικές φορτίσεις. Η εμπρός βάση έχει μέγιστη τάση 21,56 MPa με όριο διαρροής τα 80 MPa και ο πίσω άξονας 23,57 MPa με όριο διαρροής 230 MPa. Αυτό που παρατηρείται είναι η μείωση κατά 10 MPa περίπου, της μέγιστης τάσης στις βάσεις των εμπρός ημιαξόνιων του νέου σασί. Αυτό οφείλεται στην μείωση της προέκτασης των βάσεων και την τοποθέτησή τους πιο κοντά στο κυρίως μέρος του νέου πλαισίου. Για τους πίσω άξονες η μέγιστη τάση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη αλλά λόγω της μεγάλης τιμής του ορίου διαρροής του χάλυβα δεν αξιολογείται περαιτέρω.

Παρακάτω αναπαρίσταται η συνολική εικόνα για το πώς διαμορφώνονται οι τάσεις σε όλο το πλαίσιο που σχεδιάστηκε για το ER2015. Άξιο προσοχής είναι το γεγονός ότι η μέγιστη φόρτιση είναι στα **124,64 MPa**.



Εικόνα 4.7: Φόρτιση πλαισίου ER2015. Εμφανές είναι το σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη τάση.

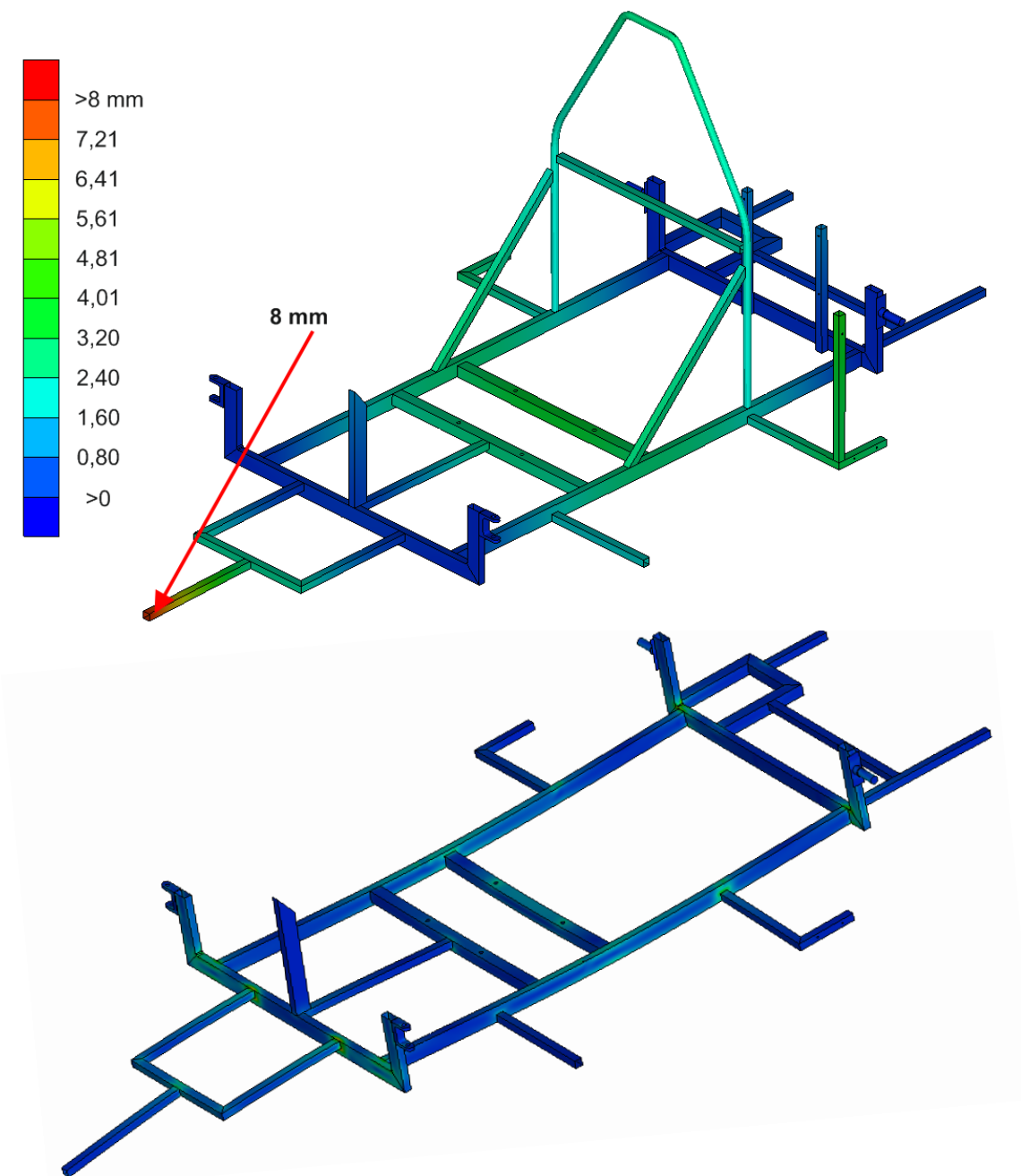
Αυτή η τιμή τάσης είναι απαγορευτική για την κατασκευή αφού βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο διαρροής του υλικού τα 130 MPa. Η συγκεκριμένη τιμή παρατηρείται στην πίσω δεξιά γωνία όπου ενώνονται η κύρια εγκάρσια με την κύρια κάθετη δοκό.



Εικόνα 4.8 Σημείο εμφάνισης μέγιστης τάσης του πλαισίου του ER2015.

Αν η τάση αυτή εμφανιζόταν σημειακά η κατασκευή θα μπορούσε να επανασχεδιαστεί ενισχυμένη σε αυτό το σημείο. Το πρόβλημα εδώ είναι ότι τάσεις της τάξεως των 80 – 100 MPa εμφανίζονται σε πολλά σημεία του πλαισίου καθιστώντας την αντοχή του αμφίβολη και μειώνοντας το συντελεστή ασφαλείας σε πολύ χαμηλά επίπεδα

(περίπου 1). Αξίζει να σημειωθεί ότι για μεταλλικές κατασκευές τέτοιου είδους ο συντελεστής αυτός πρέπει να κυμαίνεται κοντά στο 2 και άνω [19], [27].



Εικόνα 4.9: Αποψη παραμορφώσεων του πλαισίου του ER2015.

Οι υψηλές τάσεις έχουν φυσικά επακόλουθα και στις παραμορφώσεις. Αυτό που προκύπτει και εδώ είναι σημαντικά αυξημένες τιμές παραμόρφωσης επίσης μη αποδεκτές για την κατασκευή του πλαισίου. Η μέγιστη τιμή εμφανίζεται κατά την κάμψη της εμπρός μπάρας και είναι στα 8 mm. Σημαντικές κάμψεις εντοπίζονται επίσης στο κεντρικό τμήμα του πλαισίου που συμπεριλαμβάνει τις βάσεις στήριξης του καθίσματος του οδηγού, το roll bar, τις αντηρίδες και τις πλάγιες στηρίξεις. Σε αυτές τις περιοχές οι μετατοπίσεις κυμαίνονται από 2,5 – 5,5 mm. Τα αποτελέσματα αυτά οφείλονται

στην απώλεια πιθανών στηρίξεων που επιτρέπουν κάμψεις με μεγάλη παραμόρφωση και άρα αυξημένες τιμές τάσεων.

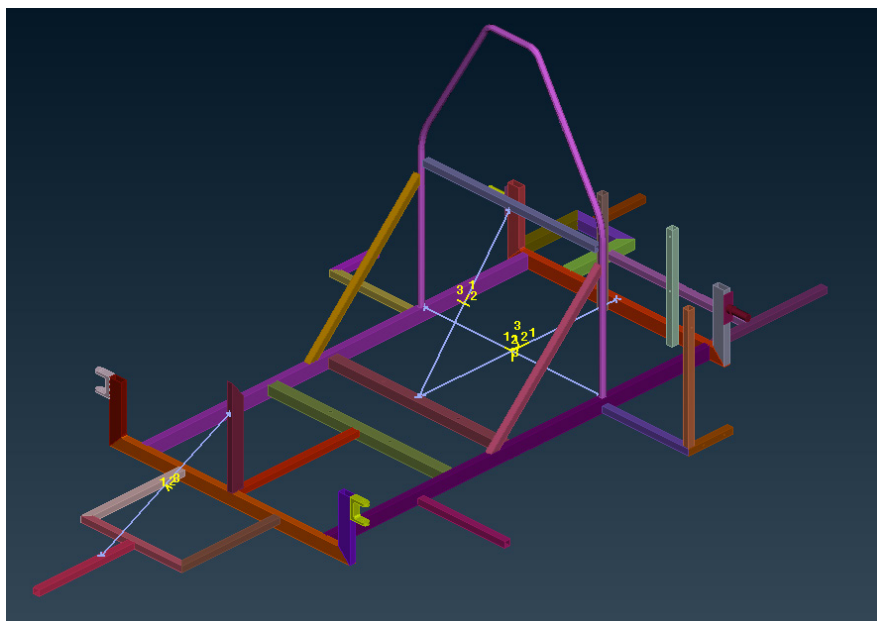
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το νέο πλαίσιο αυτό που είναι ξεκάθαρο είναι ότι το παρόν σχέδιο δε μπορεί να προχωρήσει σε κατασκευή. Παρ' όλα αυτά τούτο το γεγονός δεν είναι καταστροφικό για την διαδικασία ανάπτυξης του σασί. Ο σχεδιασμός εξ' αρχής έγινε δοκιμαστικά στοχεύοντας σε όσο το δυνατόν λιγότερο βάρος με σκοπό την ανάλυση και την εκτίμηση της κατασκευής. Αφού η μελέτη καταλήγει σε τέτοια αποτελέσματα ακολουθείται η διαδικασία του επανασχεδιασμού και της ανάλυσης έως ότου τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά για κατασκευή και το βάρος παραμένει στα επίπεδα που επιζητούνται.

4.2 Τελικός σχεδιασμός πλαισίου ER2015

Η ανάλυση του δεύτερου μοντέλου οδήγησε στο συμπέρασμα ότι το σχέδιο δεν μπορούσε να κατασκευαστεί, έδωσε όμως την απαραίτητη πληροφορία για τις βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν ώστε να μειωθεί το μέγεθος των εμφανιζόμενων τάσεων και παραμορφώσεων.

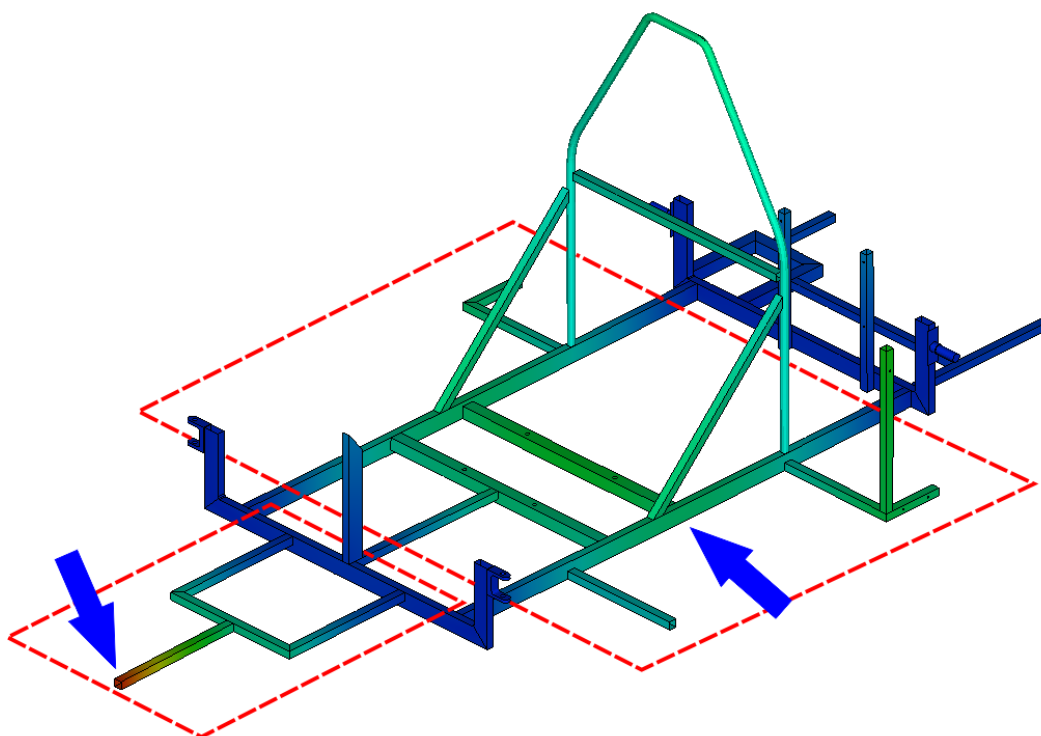
4.2.1 Δοκιμές βελτίωσης

Με τη βοήθεια της εντολής CBEAM της καρτέλας NASTRAN στον προεπεξεργαστή ANSA, τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία του σχεδίου εικονικές μπάρες. Η τοποθέτηση αυτή έγινε σε περιοχές που αντιμετώπιζαν πρόβλημα αντοχής και έντονες παραμορφώσεις. Σκοπός της διαδικασίας ήταν η επανεξέταση μέσω επίλυσης, διαφόρων παρεμφερών σχεδιασμών που θα βελτίωναν τα προβλήματα του αρχικού μοντέλου.



Εικόνα 4.10: Τοποθέτηση εικονικών προφίλ για την επανεξέταση του σχεδιασμού.

Ο λόγος για τον οποίο ακολουθήθηκε αυτή η μέθοδος είναι καθαρά για την εξοικονόμηση χρόνου μιας και έτσι υπάρχει η δυνατότητα εξέτασης πολλών διαφορετικών σχεδίων χωρίς την ανάγκη επανασχεδιασμού και επαναμοντελοποίησης του πλαισίου. Έτσι με την κατάλληλη εισαγωγή εικονικών προφίλ και την επίλυση του κάθε νέου σχεδίου μπορέσαμε να έχουμε μία ξεκάθαρη εικόνα για το που θα γίνουν οι απαραίτητες προσθήκες. Σε αυτό φυσικά βοήθησε και ο μικρός χρόνος που έχει ανάγκη το κάθε μοντέλο για να επιλυθεί (30 λεπτά).



Εικόνα 4.11: Περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη προσθήκης με βάση τις παραμορφώσεις.

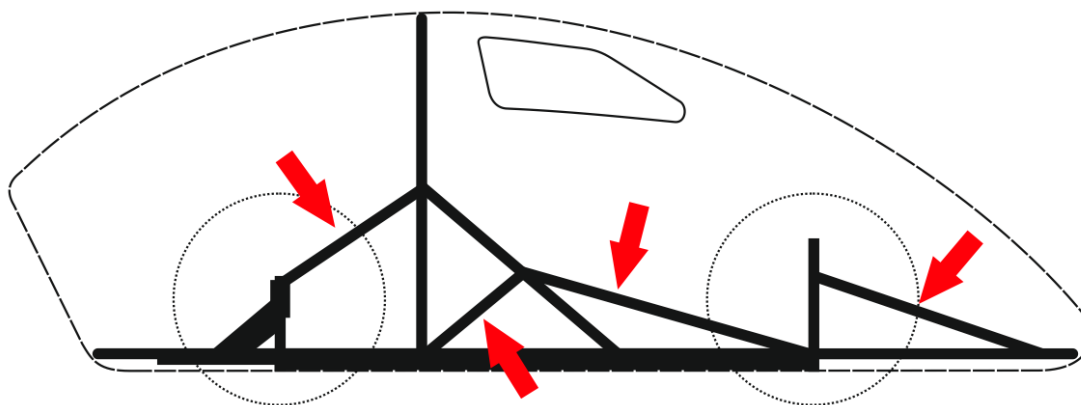
4.2.2 Τελικό σχέδιο

Με γνώμονα πάντα το χαμηλό βάρος και μετά από μια σειρά αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές, ο σχεδιασμός καταλήγει στην τοποθέτηση 7 επιπλέον προφίλ αλουμινίου και 5 γωνιών στήριξης. Τα προφίλ αυτά επιλέχθηκαν να είναι τετραγωνικής διατομής 20x20 και πάχους 1,3 mm όπως τα ήδη χρησιμοποιημένα. Όσον αφορά τις γωνίες, αυτές είναι πάχους 3 mm από αλουμίνιο 6063 – T4.

Τα προφίλ όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.12 χρησιμοποιούνται σαν αντηρίδες στήριξης. Η πρώτη μπάρα ενώνεται με το εμπρός ακραίο τμήμα και το τιμόνι ώστε να περιορίσει την κάμψη αυτής της περιοχής. Ένα επίπεδο πιο πίσω οι 4 διαγώνιες μπαίνουν στα πλάγια του πλαισίου ώστε να αποτρέψουν τη συνολική κάμψη που οφείλεται στο βάρος του οδηγού. Τέλος οι πίσω μπάρες ενώνουν τις κάθετες δοκούς των αξόνων με το roll bar συμβάλλοντας στην ακαμψία της κατασκευής και μειώνοντας τις φορτίσεις που εμφανίζονται στο πίσω τμήμα του σασί.

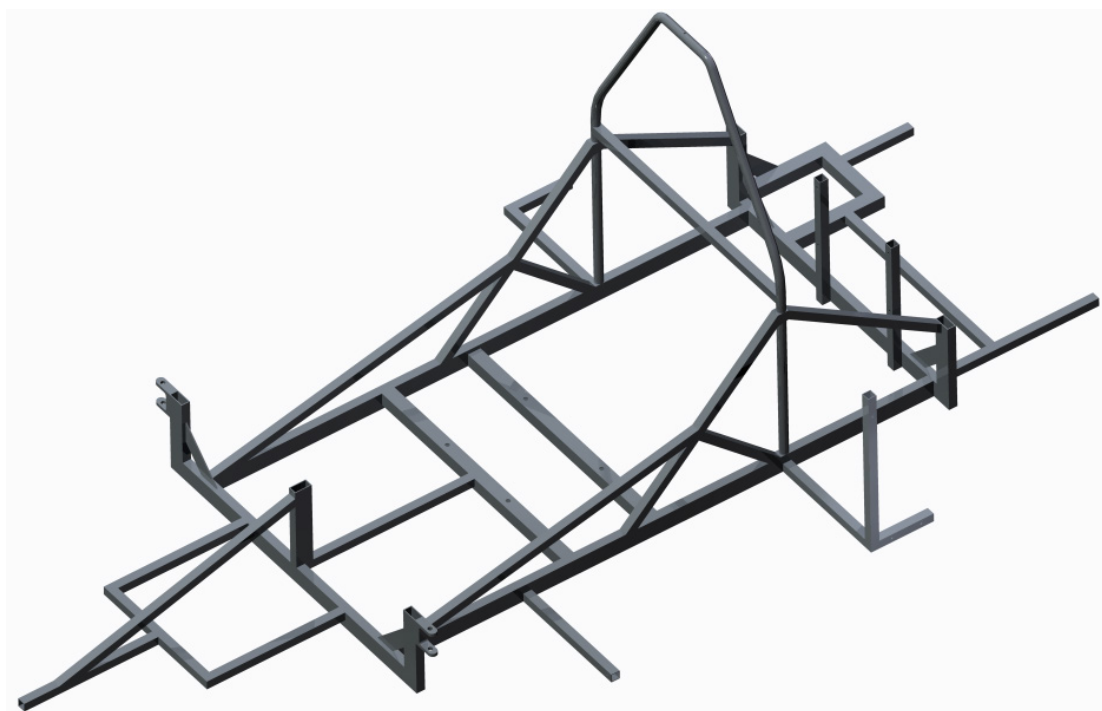
Οι γωνίες στήριξης είναι προσθήκες που τοποθετούνται στις 4 ορθές γωνίες του βασικού πλαισίου για να αποτρέψουν τις παραμορφώσεις των δομικών μερών. Στα σημεία όπου τοποθετούνται, τα προφίλ αντιμετωπίζουν προβλήματα στρέψης και κάμψης λόγω των καταπονήσεων από την κίνηση του οχήματος.

Η 5^η γωνία στήριξης σχεδιάζεται στο σημείο όπου η κάθετη που φέρει τον άξονα του κινητήριου τροχού συνδέεται με τη βάση του κινητήρα και του κιβωτίου ταχυτήτων. Στο σημείο αυτό οι μετατοπίσεις πρέπει να εξαλειφθούν με την τοποθέτηση στηρίξεων ώστε τα γρανάζια κίνησης να συνεργάζονται ομαλά.



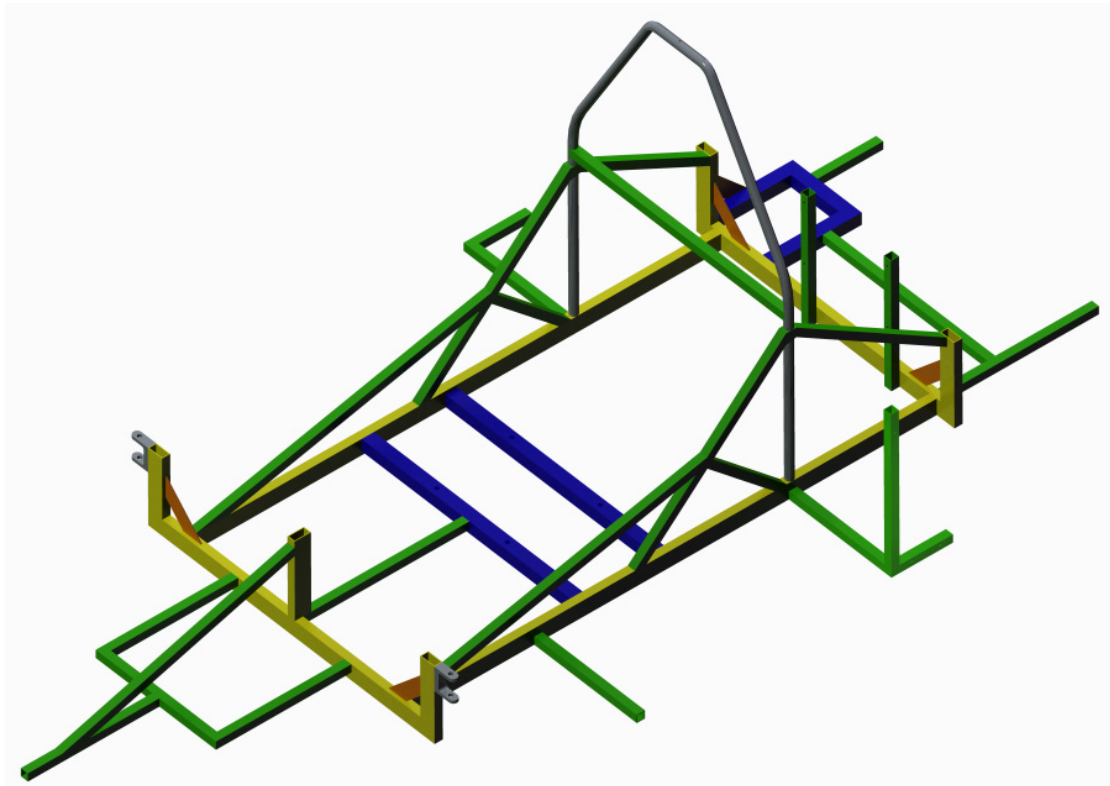
Εικόνα 4.12: Προσθήκες προφίλ αλουμινίου ως αντηρίδες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο τελικός σχεδιασμός προς ανάλυση απεικονίζεται στην εικόνα 4.13. Η αύξηση του βάρους φυσικά ήταν αναπόφευκτη όμως οι παράγοντες ακαμψία και αντοχή είναι πρωτεύουσας σημασίας. Έτσι το εικονιζόμενο πλαίσιο είναι κατά ένα κιλό βαρύτερο του προηγούμενου μοντέλου ζυγίζοντας **7 kg**.

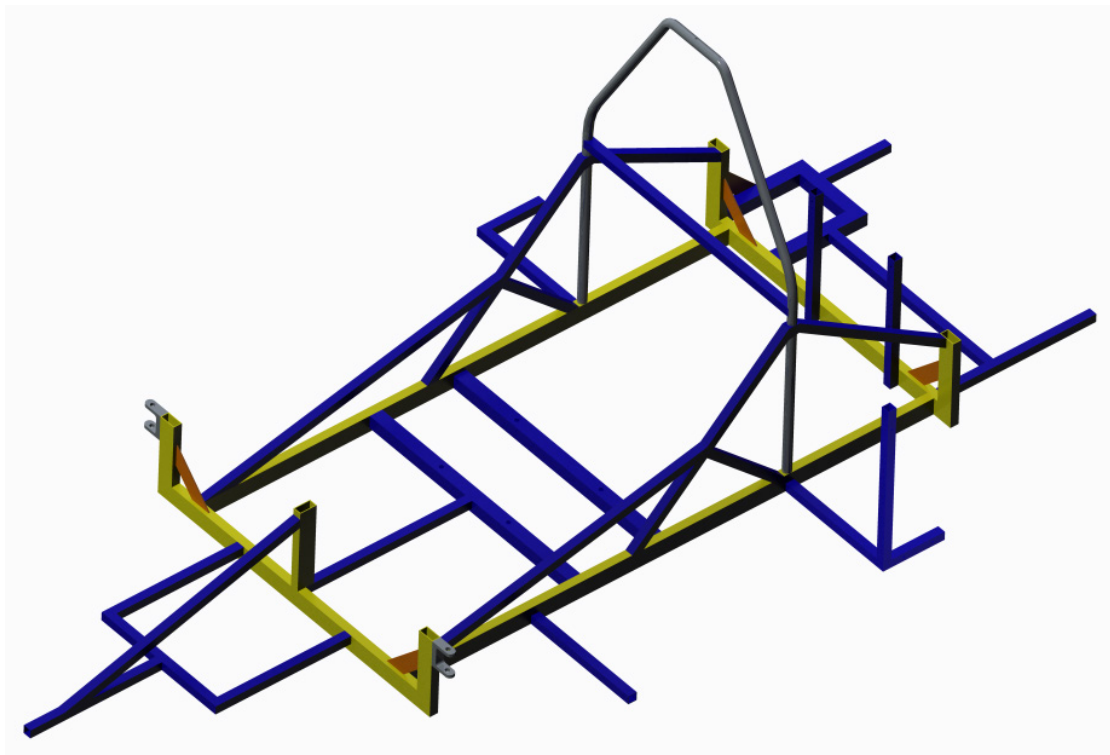


Εικόνα 4.13: Τελικό σχέδιο πλαισίου.

Όσον αφορά τις αλλαγές στα προφίλ και τα πάχη τους, αυτές εντοπίζονται μόνο στις προσθήκες αφού το υπόλοιπο σχέδιο παρέμεινε ως είχε. Επομένως η απεικόνιση με βάση το είδος της διατομής διαφοροποιείται σε πολύ μικρό βαθμό.



Εικόνα 4.14: Απεικόνιση τελικού σχεδιασμού με βάση τις διαφορετικές διατομές προφίλ.



Εικόνα 4.15: Απεικόνιση τελικού σχεδιασμού με βάση τα διαφορετικά πάχη προφίλ.

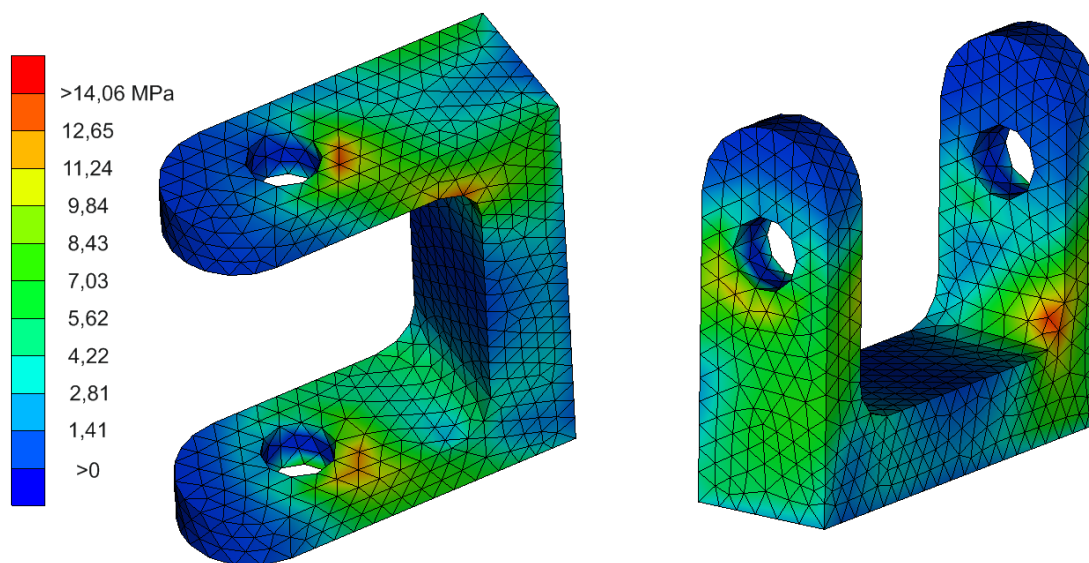
4.2.3 Η διαδικασία πριν την τελική ανάλυση

Αφού εντοπιστούν τα σημεία που πρέπει να αλλάξουν και ο σχεδιασμός καταλήξει, η διαδικασία επαναλαμβάνεται με κάθε λεπτομέρεια από την αρχή για το συγκεκριμένο μοντέλο. Οι προσθήκες γίνονται στο πρόγραμμα σχεδιασμού Creo Parametric 3.0 και το αρχείο .iges εισάγεται ξανά στον προεπεξεργαστή ANSA. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν γίνεται η μοντελοποίηση και το πλαίσιο είναι έτοιμο και πάλι προς ανάλυση.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε με τη χρήση των BEAMS είναι μεν ενδεικτικά αλλά όχι στο βαθμό που χρειάζεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα επιλογής υλικού οπότε αυτά τα στοιχεία μοντελοποιούνται σαν άκαμπτα τμήματα που μάλιστα τοποθετούνται σημειακά στις υπάρχουσες επιφάνειες. Το πρόβλημα λοιπόν είναι ότι τα δεδομένα που λαμβάνουμε δεν είναι απόλυτα ακριβή αλλά χρησιμεύουν στον προσδιορισμό μιας πιθανά αποδεκτής λύσης με καλύτερα αποτελέσματα.

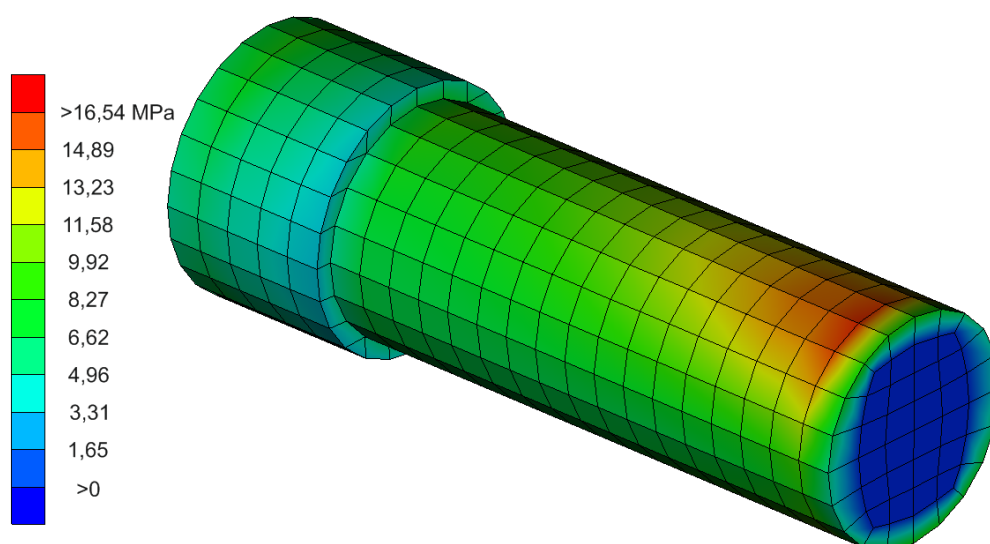
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης τελικού σχεδιασμού

Από την επιβολή των στατικών φορτίσεων προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για τον τελικό σχεδιασμό του πλαισίου του 2015:

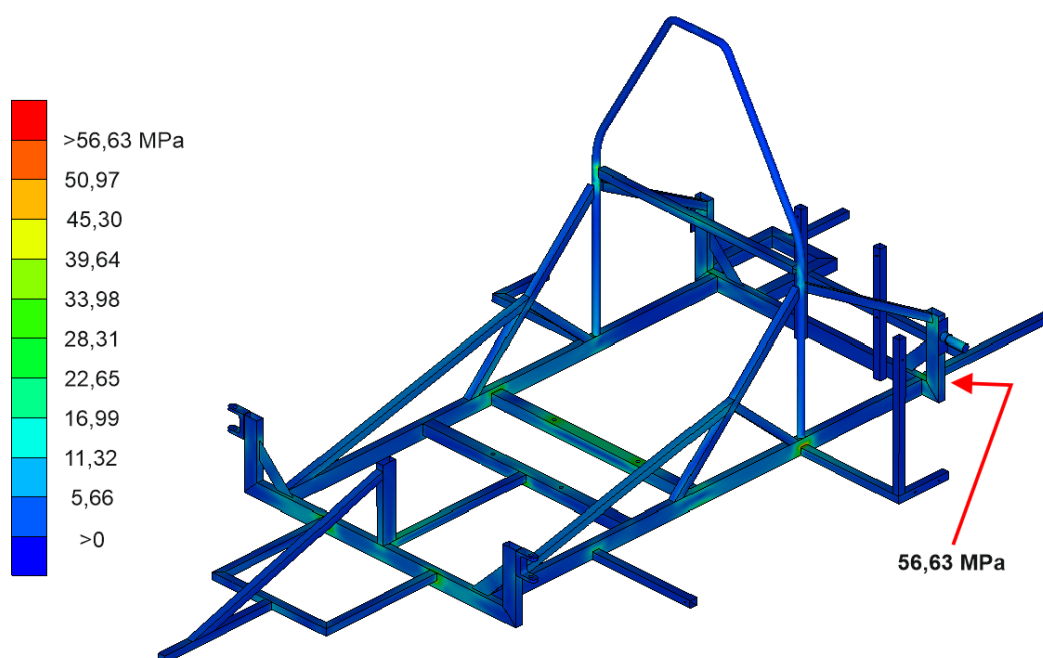


Εικόνα 4.16: Φόρτιση εμπρός αριστερής βάσης ημιαξόνιων του τελικού σχεδιασμού του ER2015.

Οι βάσεις των εμπρός ημιαξόνιων στο νέο σχέδιο εμφανίζουν κατά 7,5 MPa μικρότερη μέγιστη τάση από αυτή που είχαν στο προγενέστερο. Παρ' ότι η θέση και ο σχεδιασμός αυτών δεν άλλαξε, οι μικρότερου μεγέθους συνολικές κάμψεις οδηγούν σε αυτή τη αισθητή μείωση των τάσεων. Για τον ίδιο λόγο οι πίσω άξονες έχουν μέγιστη τάση στα 16,54 MPa. Η μείωση και εδώ είναι στα 7 MPa πράγμα που υποδηλώνει ότι οι παρεμβάσεις που έγιναν συνέβαλαν αρκετά στη μείωση της καταπόνησης ακόμη και τμημάτων που δεν εμφάνιζαν πρόβλημα.



Εικόνα 4.17: Φόρτιση πίσω αριστερού ημιαξόνιου μετά το νέο σχεδιασμό του πλαισίου του ER2015.

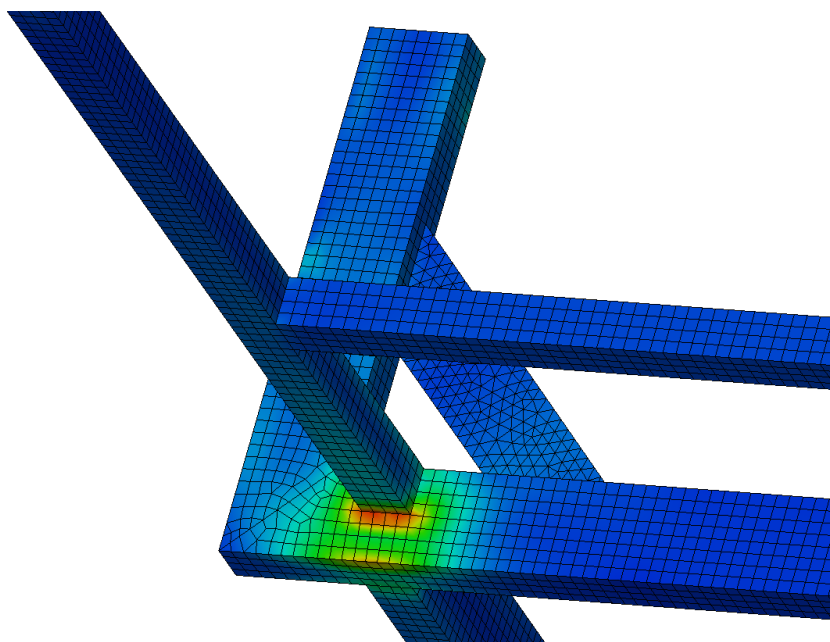


Εικόνα 4.18: Φόρτιση τελικού σχεδιασμού του πλαισίου του ER2015.

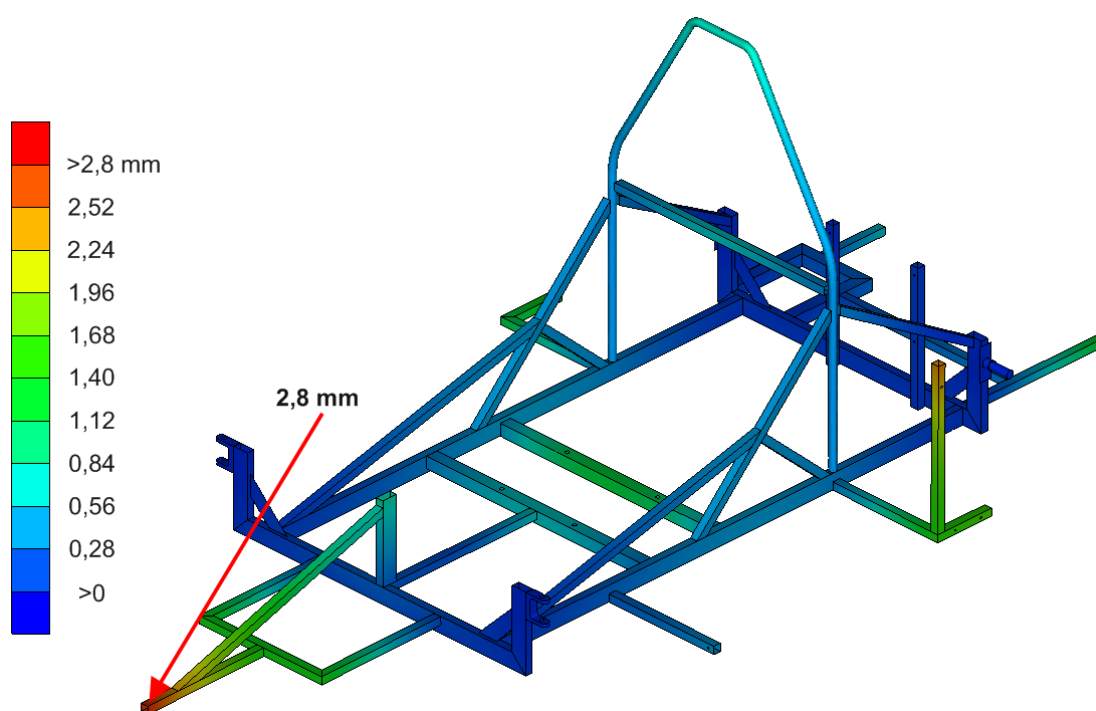
Η εικόνα που εμφανίζουν συνολικά οι τάσεις στο νέο σχέδιο είναι σαφώς καλύτερη. Αρχικά η μέγιστη τάση είναι στα **56,63 MPa** μειωμένη κατά **68 MPa** σε σχέση με τον προηγούμενο σχεδιασμό. Αυτή είναι μια μεγάλη διαφορά που καθιστά το συγκεκριμένο σασί αρκετά ανθεκτικό στις στατικές φορτίσεις (συντελεστής ασφαλείας = 2) και αποδεικνύει ότι η διαδικασία ανάπτυξης και σχεδιασμού προχώρησε ορθά.

Όσον αφορά όλο το πλαίσιο αυτό που παρατηρείται είναι μια αισθητά μειωμένη εικόνα όχι μόνο στις τιμές των φορτίσεων αλλά και στην έκταση εφαρμογής τους. Ση-

μαντικές φορτίσεις της κλίμακας 22 – 39 MPa εντοπίζονται γύρω από τη θέση του οδηγού. Το σημείο αυτό όπως προαναφέρθηκε είναι κρίσιμης σημασίας λόγω του μεγάλου βάρους που δέχεται. Οι τάσεις μεταξύ 40 – 56 MPa εμφανίζονται εντοπισμένες σε μικρής έκτασης περιοχές κυρίως πάνω σε σημεία ένωσης των διαφορετικών τμημάτων του πλαισίου. Μια τέτοια περιοχή είναι και αυτή που εμφανίζει τη μέγιστη φόρτιση. Το σημείο αυτό εντοπίζεται χαμηλά στο πίσω αριστερό τμήμα του σασί και το μέγεθος της καταπόνησης του οφείλεται στις σύνθετες κάμψεις στις οποίες υπόκειται η περιοχή.



Εικόνα 4.19 Σημείο εμφάνισης μέγιστης τάσης του πλαισίου του ER2015 μετά τον τελικό σχεδιασμό.


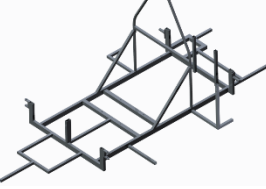
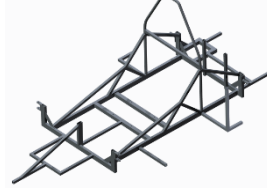


Εικόνα 4.20: Άποψη παραμορφώσεων του πλαισίου του ER2015 μετά τον τελικό σχεδιασμό.

Τα θετικά αποτελέσματα εμφανίζονται και στις παραμορφώσεις. Η μέγιστη τιμή τους είναι τα 2,8 mm και εντοπίζεται στο ίδιο σημείο μειωμένη κατά 5 mm. Στο υπόλοιπο πλαίσιο οι μετατοπίσεις κυμαίνονται κάτω του χιλιοστού με εξαίρεση τη θέση του οδηγού που φτάνει έως τα 1,4 mm.

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων στατικής ανάλυσης

Μετά τη διαδικασία ανάλυσης των 3^{ων} διαφορετικών σχεδιασμών προκύπτουν συνοπτικά τα παρακάτω αποτελέσματα που εξετάζουν κάθε πλαίσιο με γνώμονα το βάρος την αντοχή και την ακαμψία του:

	ER2014	ER2015 I	ER2015 II
			
Βάρος	10,55 kg	6 kg	7 kg
Μέγιστη τάση	63,89 MPa	124,64 MPa	56,63 MPa
Μέγιστη παρ/ση	1,62 mm	8 mm	2,8 mm
Συντ. Ασφαλ.	4	1	2

Πίνακας 4.1

Αυτό που είναι εμφανές από την πρώτη στιγμή είναι ότι το 2^ο κατά σειρά σχέδιο είναι ακατάλληλο για κατασκευή παρά το χαμηλότερο βάρος του. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις και τις ασκούμενες τάσεις που το καθιστούν επικίνδυνο για χρήση. Το παλιό σασί του οχήματος εμφανίζει αρκετά καλά χαρακτηριστικά όσον αφορά την ακαμψία και την αντοχή του, το βάρος του όμως είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό του τελευταίου σχεδιασμού. Έτσι καλύτερη επιλογή θεωρείται το τελικό σχέδιο που παρουσιάστηκε αφού το βάρος του είναι εμφανώς βελτιωμένο ενώ η αντοχή και η ακαμψία του είναι σε αρκετά καλά επίπεδα.

4.5 Αποτελέσματα ανάλυσης ιδιομορφών

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ιδιομορφών συμπεριλαμβάνουν τις φυσικές συχνότητες και τα αντίστοιχα σχήματα λειτουργίας των πλαισίων που εξετάζονται. Αυτά τα δεδομένα αφορούν τις ιδιότητες της δομής και μοναδικό σκοπό έχουν να δείξουν μια εικόνα για το ποιο σχέδιο σασί έχει καλύτερη στιβαρότητα σε ταλάντωση. Στην ενότητα αυτή παραθέτονται με λεπτομέρεια οι επιπτώσεις αυτών των εφαρμοζόμενων δονήσεων, καθώς και ο τρόπος και ο βαθμός στον οποίο επηρεάζουν τα πλαίσια. Τέλος γίνεται η σύγκριση της συμπεριφοράς των κατασκευών ώστε να εξαχθούν τα ζητούμενα συμπεράσματα.

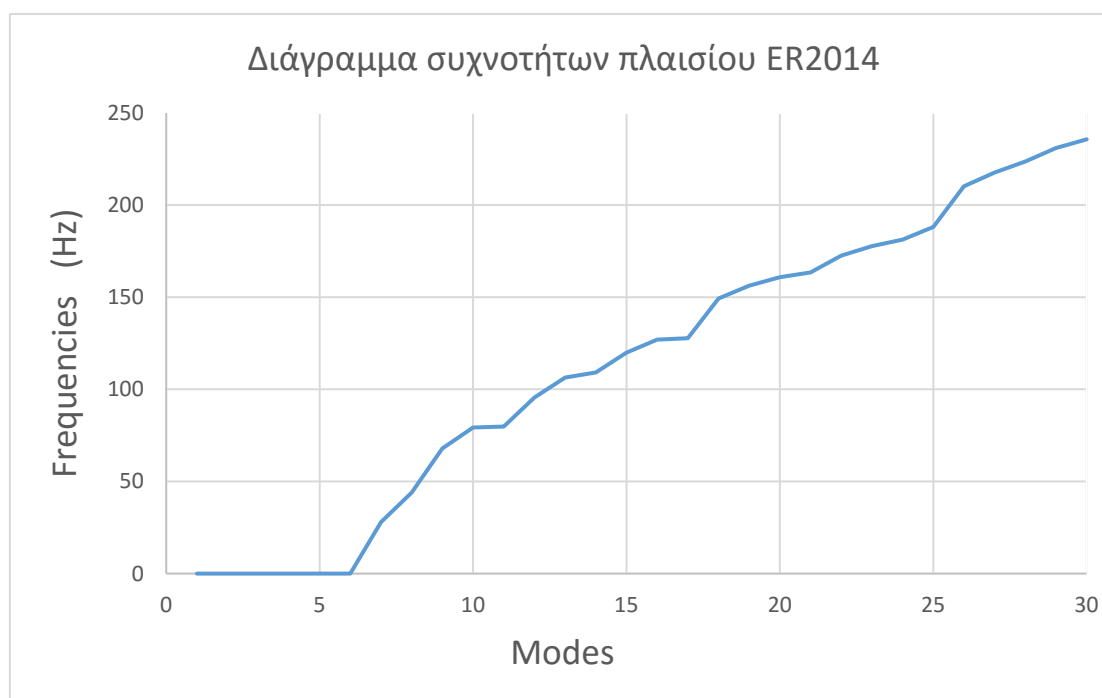
4.5.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης πλαισίου ER2014

Το μοντελοποιημένο σχέδιο του πλαισίου υπόκειται σε ελεύθερη ταλάντωση. Έτσι προκύπτουν οι φυσικές του συχνότητες και τα σχήματα λειτουργίας που τις συνοδεύουν. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 ο επιλυτής προγραμματίστηκε να δώσει τις 30 πρώτες συχνότητες και τα Χ.Σ.Λ. τους. Οι συχνότητες αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας φυσικών συχνοτήτων πλαισίου ER2014					
1.	0	11.	79,82 Hz	21.	163,50 Hz
2.	0	12.	95,53 Hz	22.	172,60 Hz
3.	0	13.	106,42 Hz	23.	177,69 Hz
4.	0	14.	109,13 Hz	24.	181,28 Hz
5.	0	15.	119,92 Hz	25.	188,16 Hz
6.	0	16.	126,96 Hz	26.	210,22 Hz
7.	27,92 Hz	17.	127,75 Hz	27.	217,65 Hz
8.	44,04 Hz	18.	149,32 Hz	28.	223,63 Hz
9.	67,87 Hz	19.	156,21 Hz	29.	230,98 Hz
10.	79,32 Hz	20.	160,81 Hz	30.	235,68 Hz

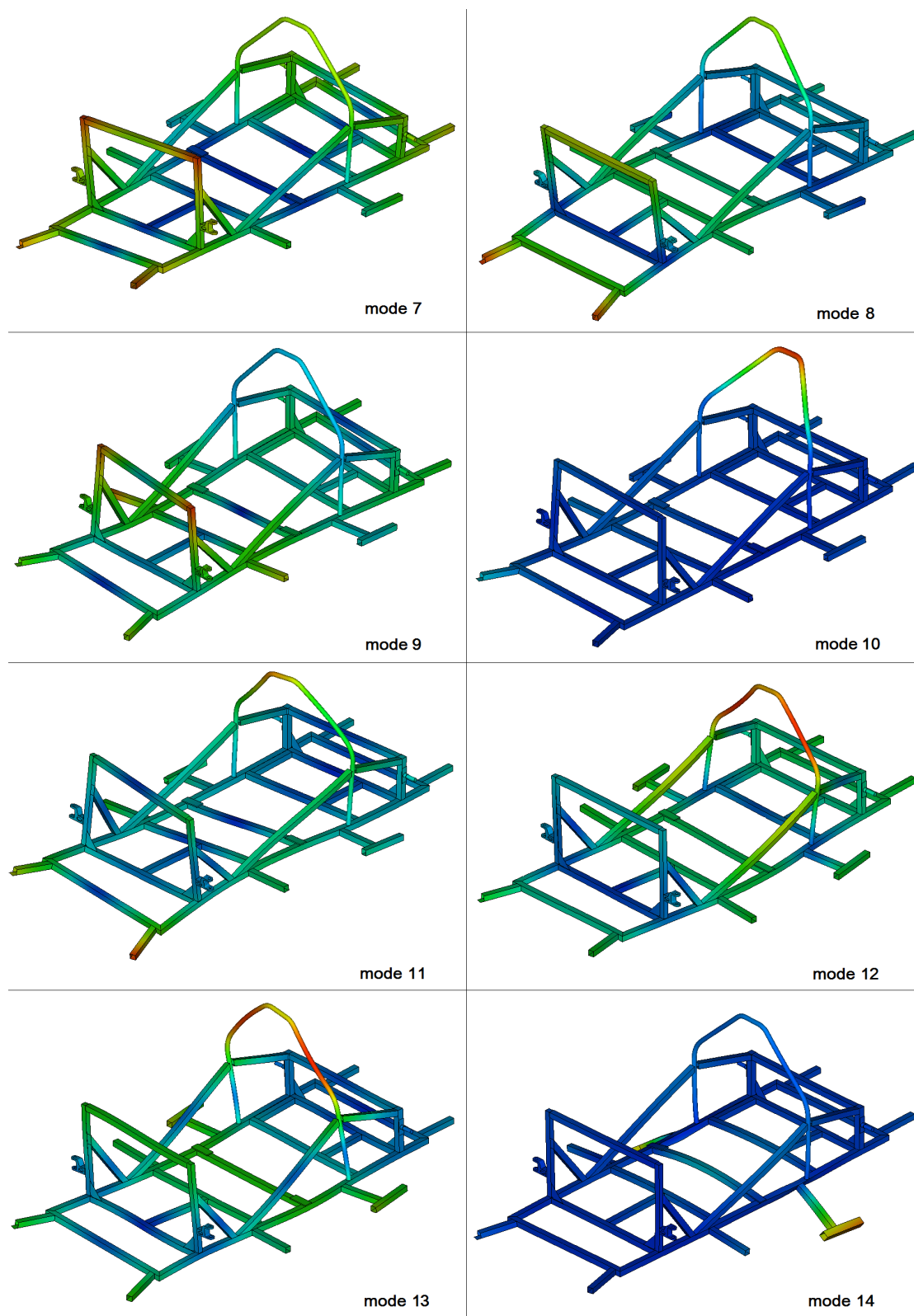
Πίνακας 4.2

Ακολουθεί η γραφική αναπαράσταση των συχνοτήτων:



Διάγραμμα 4.1

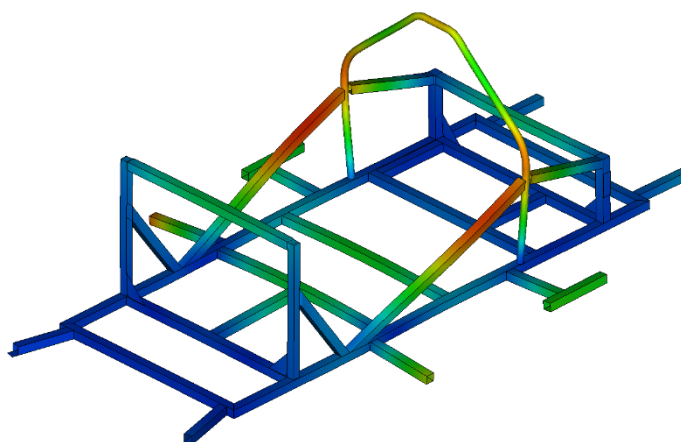
Στον πίνακα 4.1 παρατηρούμε την απώλεια συχνοτήτων για τις 6 πρώτες δοκιμές. Αυτό οφείλεται στην απουσία πακτώσεων η οποία όμως είναι αποδεκτή για αυτή την ανάλυση. Από το 7^ο χαρακτηριστικό σχήμα λειτουργίας και έπειτα οι συχνότητες έχουν αυξητική τάση έως την 30^η τιμή τους που φτάνει τα 235 Hz. Η πρώτη συχνότητα με την οποία δονείται το πλαίσιο αντιστοιχεί στο 7^ο Χ.Σ.Λ. και είναι στα 27,92 Hz.



Εικόνα 4.21: Ενδεικτικά Χαρακτηριστικά Σχήματα Λειτουργίας του πλαισίου του ER2014.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται κάποια από τα Χ.Σ.Λ. που παίρνει το πλαίσιο του ER2014 κατά την ανάλυση ιδιομορφών. Τα σχήματα αυτά αναπαριστούν μια πιθανή παραμόρφωση του πλαισίου σε περίπτωση που ταλαντωθεί με μια συγκεκριμένη συχνότητα.

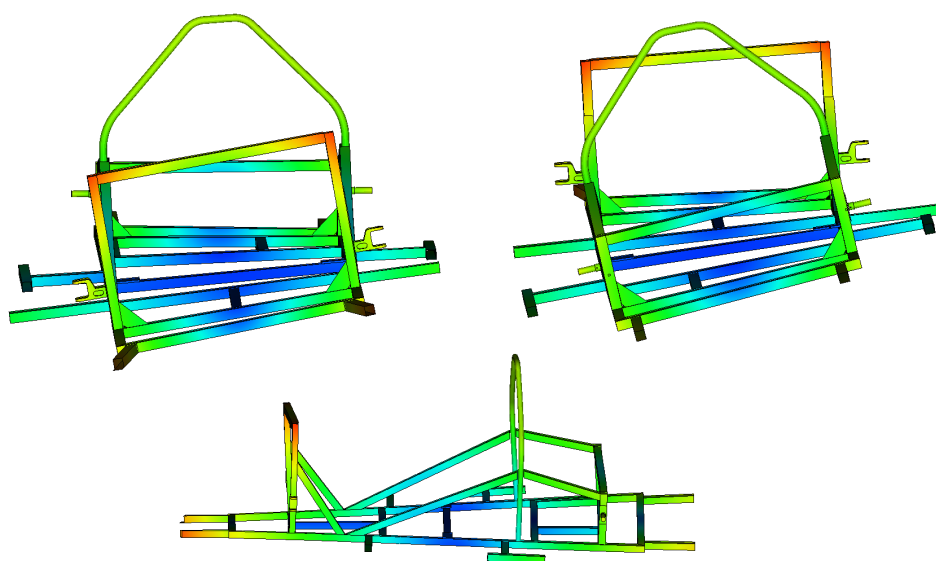
Οι τύποι των δονήσεων στην κατασκευή μπορεί να είναι 2 ειδών, τοπικές ή γενικευμένες [24]. Οι πρώτες εμφανίζονται τοπικά με την ταλάντωση ενός συγκεκριμένου σημείου του σασί (mode 10 και 14, εικόνα 4.21) ενώ οι γενικευμένες αφορούν όλη την κατασκευή (modes 7 με 9 και 11 με 13, εικόνα 4.21). Στη περίπτωση αυτού του σχεδίου έχουμε 16 γενικευμένες και 8 τοπικές δονήσεις. Η μεγαλύτερη μετατόπιση που εμφανίζεται, εντοπίζεται στο mode 18 και τα 149,32 Hz. Σε αυτή τη συχνότητα έχουμε συντονισμό της κατασκευής.



Εικόνα 4.22: Συμπεριφορά πλαισίου ER2014 στο συντονισμό.

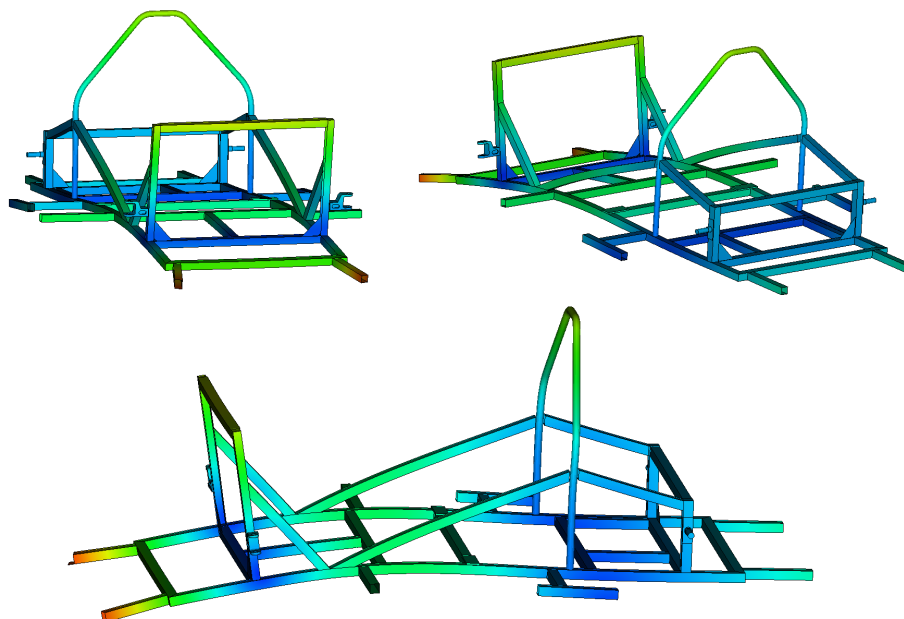
Ένας παράγοντας που έχει ιδιαίτερη σημασία για την αυτοκινητοβιομηχανία και τις αναλύσεις αυτού του είδους είναι οι πρώτες συχνότητες κατά τις οποίες η ανάλυση θα εμφανίσει σχήμα που κάμπτεται ή στρέφεται. Η συμπεριφορά αυτή επιζητείται να συναντάται σε όσο μεγαλύτερη συχνότητα γίνεται ώστε να επηρεάζει λιγότερο την ευστάθεια του οχήματος [6]. Αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των πλαισίων όσον αφορά την ανταπόκριση τους απέναντι στην επιβολή δυναμικών φορτίσεων.

Για το σασί του ER2014, η πρώτη στρέψη εμφανίζεται στο 7^ο Χ.Σ.Λ. και τον άξονα x, με συχνότητα **27,92 Hz**.



Εικόνα 4.23: Αναπαράσταση στρέψης πλαισίου ER2014.

Η πρώτη κάμψη εμφανίζεται στο 8° Χ.Σ.Λ. με συχνότητα **44,04 Hz**.



Εικόνα 4.24: Αναπαράσταση κάμψης πλαισίου RE2014.

4.5.2 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης πλαισίου ER2015

Οι φυσικές συχνότητες του νέου πλαισίου του ER2015 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

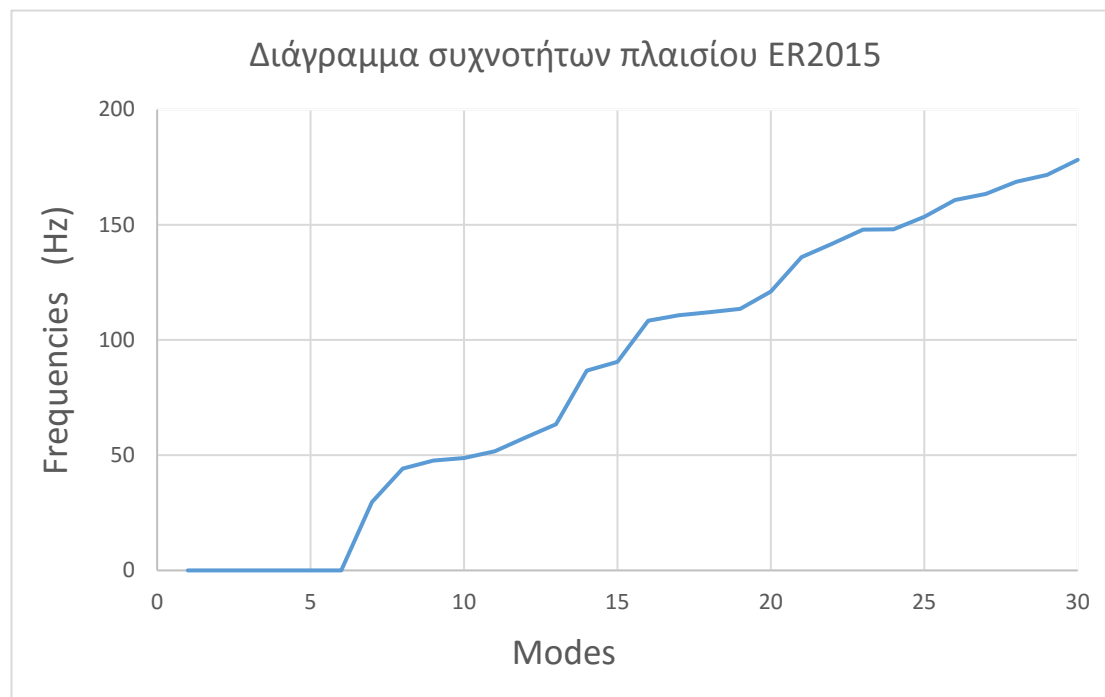
Πίνακας φυσικών συχνοτήτων πλαισίου ER2015					
1.	0	11.	51,71 Hz	21.	135,92 Hz
2.	0	12.	57,66 Hz	22.	141,74 Hz
3.	0	13.	63,43 Hz	23.	147,85 Hz
4.	0	14.	86,67 Hz	24.	148,03 Hz
5.	0	15.	90,54 Hz	25.	153,45 Hz
6.	0	16.	108,38 Hz	26.	160,71 Hz
7.	29,69 Hz	17.	110,73 Hz	27.	163,34 Hz
8.	44,20 Hz	18.	112,02 Hz	28.	168,65 Hz
9.	47,63 Hz	19.	113,49 Hz	29.	171,64 Hz
10.	48,77 Hz	20.	121,01 Hz	30.	178,16 Hz

Πίνακας 4.3

Και σε αυτή την περίπτωση οι 6 πρώτες συχνότητες εξαφανίζονται λόγω απώλειας στηρίξεων. Ο επιλυτής αρχίζει να δίνει τιμές από το 7° Χ.Σ.Λ. με συχνότητα 29,69 Hz

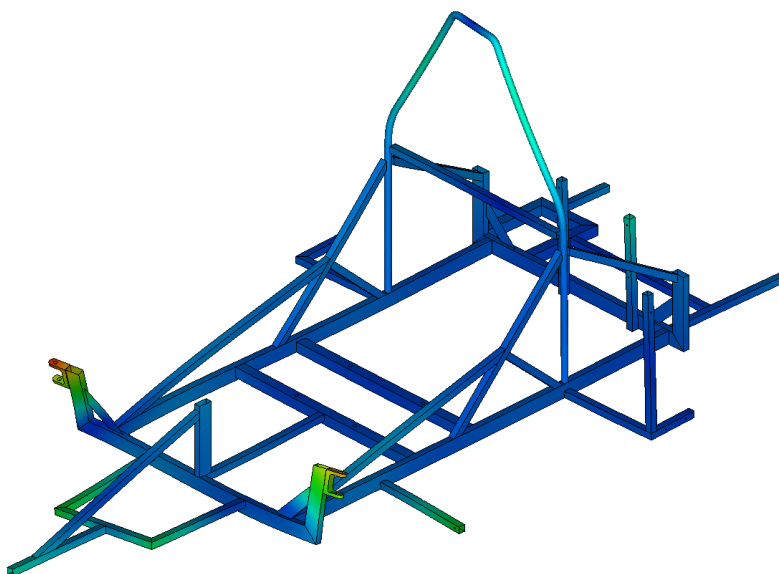
και καταλήγει στην 30^η τιμή που είναι 178,16 Hz. Αυτό που είναι εμφανές στις φυσικές συχνότητες του νέου πλαισίου είναι μια γενική πτώση των τιμών σε σχέση με αυτές του προγενέστερου σασί.

Ακολουθεί η γραφική αναπαράσταση των συχνοτήτων:

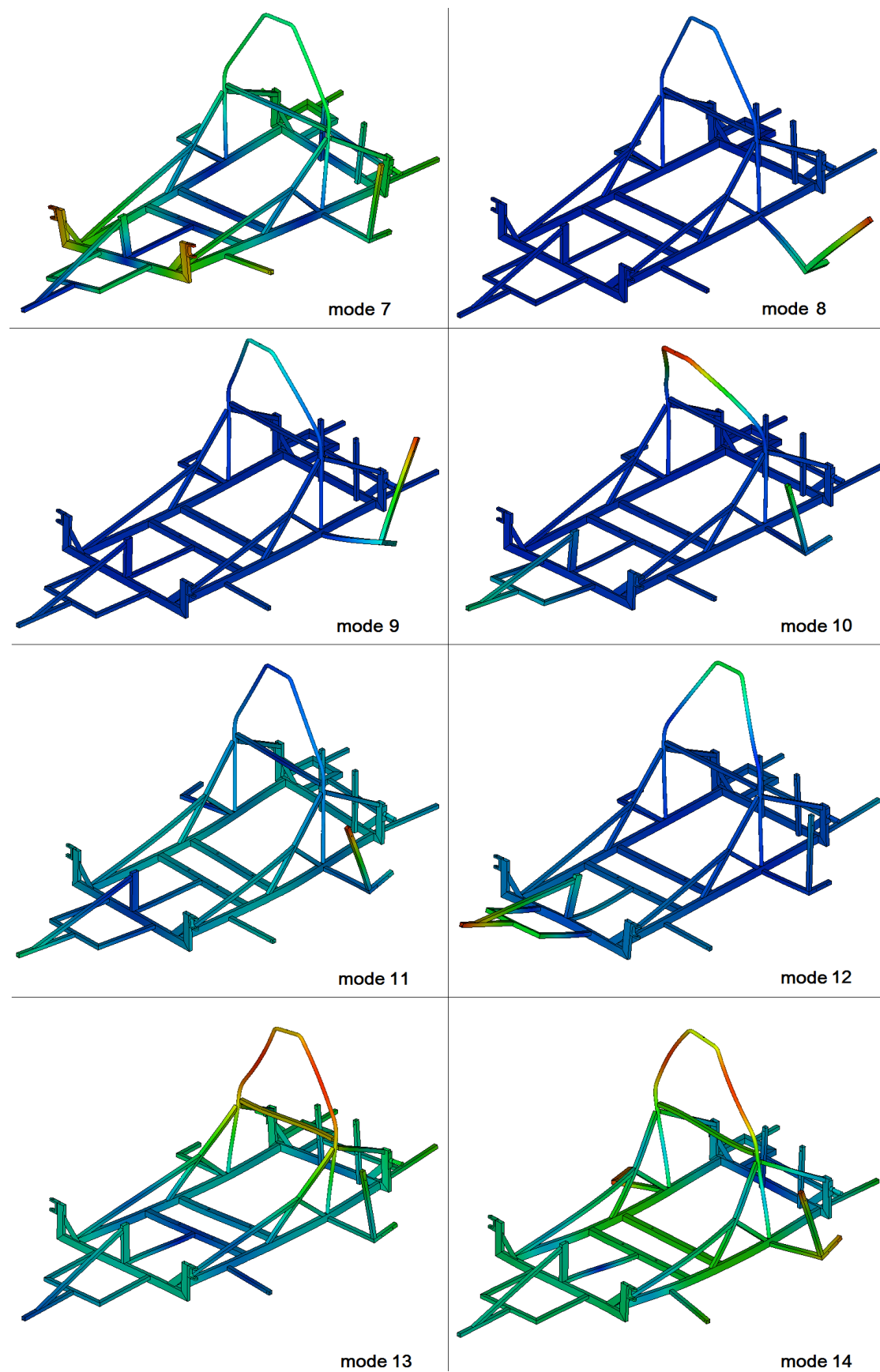


Διάγραμμα 4.2

Όσον αφορά τις τοπικές δονήσεις, αυτές είναι 9 (mode 8 και 9 εικόνα 4.24) ενώ οι γενικευμένες 15 (modes 7 και 10 – 14 εικόνα 4.24). Αυτό παρατηρείται και στην παρακάτω εικόνα που αναπαριστά κάποια ενδεικτικά Χ.Σ.Λ. Για το νέο σασί συντονισμό έχουμε στο 25^ο mode και τα 153,45 Hz.

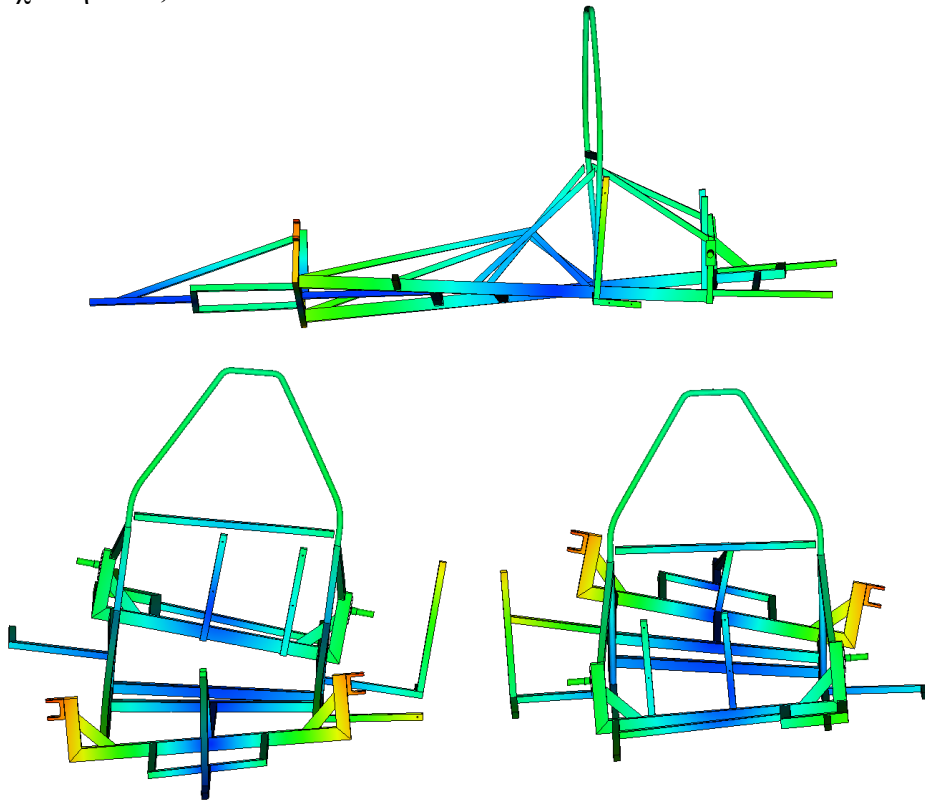


Εικόνα 4.25: Συμπεριφορά νέου πλαισίου ER2015 στο συντονισμό.



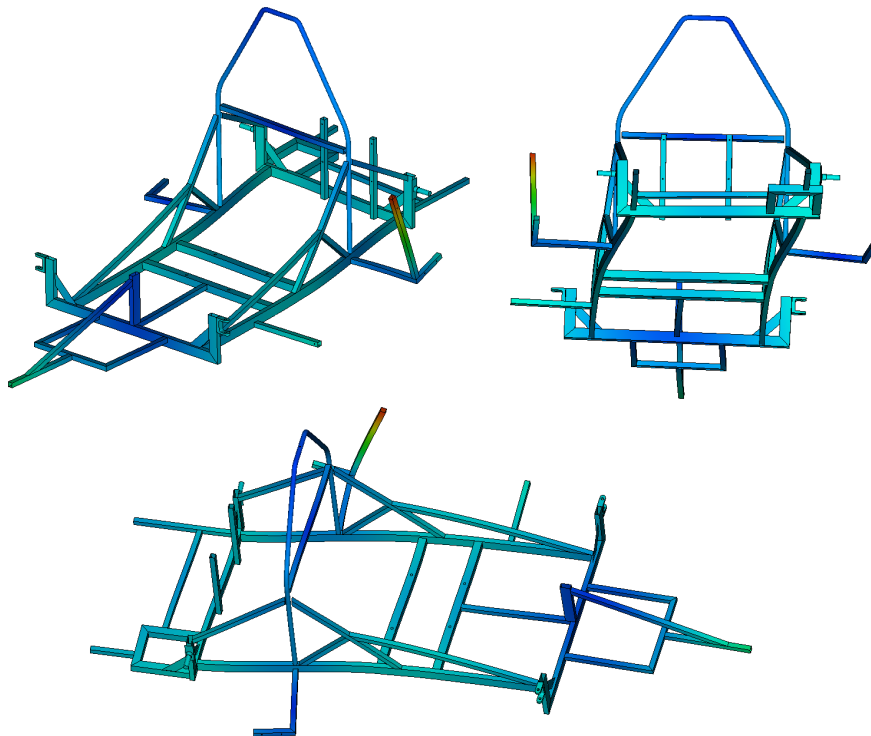
Εικόνα 4.26: Ενδεικτικά Χαρακτηριστικά Σχήματα Λειτουργίας του πλαισίου του ER2015.

Για το σασί του ER2015 η πρώτη στρέψη εμφανίζεται στο 7° Χ.Σ.Λ. και τον άξονα x , με συχνότητα **29,69 Hz**.



Εικόνα 4.27: Αναπαράσταση στρέψης πλαισίου ER2015.

Η πρώτη κάμψη εντοπίζεται στο 11° Χ.Σ.Λ., τον άξονα y και τη συχνότητα 51,71 Hz.



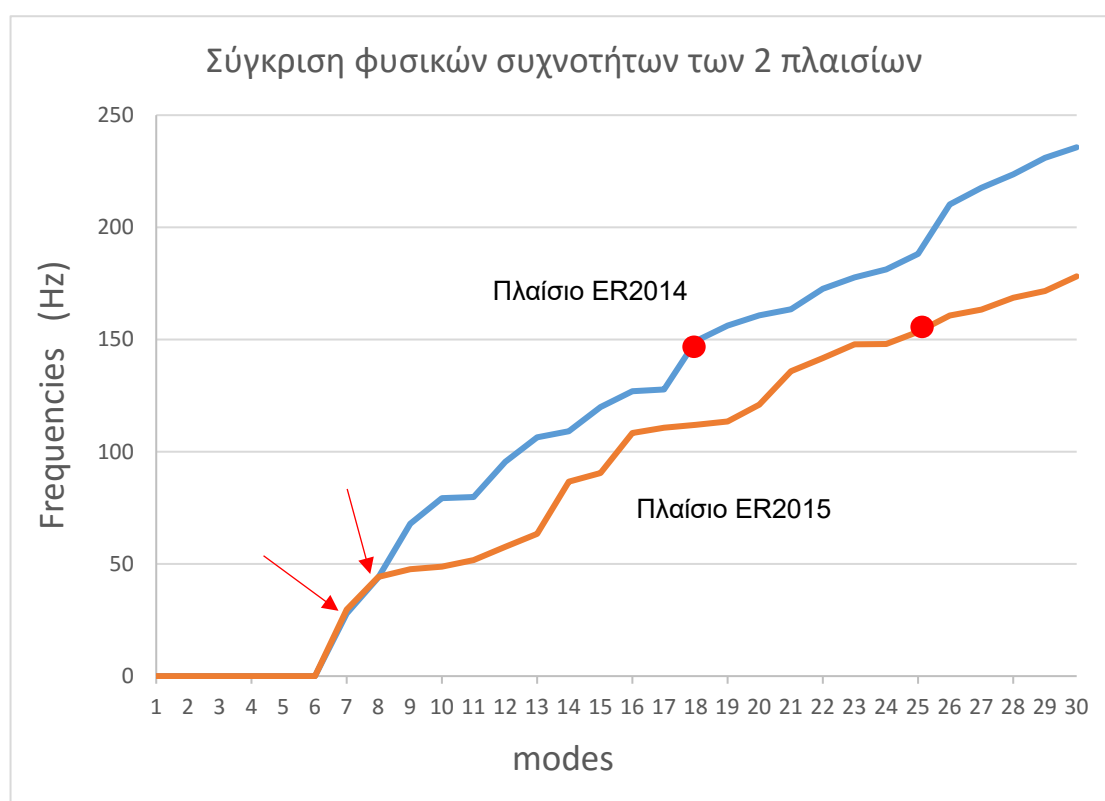
Εικόνα 4.28: Αναπαράσταση κάμψης του πλαισίου του ER2015.

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης ιδιομορφών

Η ανάλυση ιδιομορφών καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα 2 πλαίσια παρουσιάζουν μια αρκετά όμοια συμπεριφορά κατά τη μελέτη.

Όσον αφορά τη συνολική εικόνα των 30 πρώτων συχνοτήτων που λήφθηκαν υπόψιν, το πλαίσιο του 2014 εμφανίζει μια ελαφρώς μεγαλύτερη τάξη τιμών που φτάνει τα 235,68 Hz έναντι των 178,16 Hz του νέου σχεδίου. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα αν κανείς λάβει υπόψιν του ό,τι μιλάμε για 2 κατασκευές με διαφορά βάρους 3,55 kg. Απόρροια αυτής διαφοράς είναι και το γεγονός ότι το πρώτο πλαίσιο εμφανίζει 6 συχνότητες κάτω των 100 Hz ενώ το δεύτερο 9.

Η μελέτη των Χ.Σ.Λ. δείχνει πάντως ότι οι δονήσεις επιδρούν πιο δραστικά στο σύνολο της δομής του σασί του ER2014. Αντιθέτως το νέο πλαίσιο παρουσιάζει μια πιο στιβαρή συμπεριφορά με τις περιφερειακές στηρίξεις του καλύμματος όμως να αντιμετωπίζουν προβλήματα σε ένα μεγάλο εύρος δονήσεων.



Διάγραμμα 4.3

Για μια κατασκευή όπως το πλαίσιο οι δυναμικές φορτίσεις έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη δομή σε χαμηλές συχνότητες [9]. Για το λόγο αυτό μια κατασκευή με υψηλές φυσικές συχνότητες είναι καταλληλότερη. Στην περίπτωση των 2 πλαισίων οι διαφορές των τιμών είναι μεν υπαρκτές, ωστόσο δε μπορούν να κρίνουν κατηγορηματικά μια διαφοροποίηση στη συμπεριφορά ενάντια στις δυναμικές καταπονήσεις. Αυτό που προκύπτει από τον παρακάτω τύπο είναι ότι για τις διαφορετικές μάζες των 2 σασί σε ίδιες συχνότητες, έχουμε ίδιο k που στην προκειμένη περίπτωση είναι η στιβαρότητα

της κατασκευής. Επίσης το γεγονός ότι τα φαινόμενα συντονισμού εμφανίζονται σε συχνότητες άνω των 100 Hz είναι αρκετά θετικό.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Αυτό που μπορεί να δώσει μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά των σασί είναι η πληροφορία για το πότε εμφανίζεται κάμψη και στρέψη στη δομή τους. Εδώ το πλαίσιο του 2015 παρουσιάζεται και στις 2 περιπτώσεις πιο ενισχυμένο. Η πρώτη μορφή στρέψης που εμφανίζει είναι στο 7° Χ.Σ.Λ. με φυσική συχνότητα **29,69 Hz** έναντι των **27,92 Hz** του παλιού σασί. Η εικόνα αυτή παρουσιάζεται και στην κάμψη που το πλαίσιο του 2014 εμφανίζει στο 8° Χ.Σ.Λ. με **44,04 Hz** ενώ το νέο στο 11° Χ.Σ.Λ. με **51,71 Hz**. Άξιο αναφοράς είναι ό,τι οι τιμές αυτές είναι αρκετά κοντά στις τιμές που εμφανίζουν κατά την ίδια πειραματική ανάλυση, ηλεκτρικά οχήματα πόλης όπως το Mitsubishi i-MiEV και το Volkswagen Polo V [6].

4.7 Τελικό συμπέρασμα

Μετά το πέρας των 2 παραπάνω αναλύσεων και τη διόρθωση του προβληματικού σχεδιασμού, προκύπτει ένα πλαίσιο που κρίνεται ανθεκτικό απέναντι στις φορτίσεις που δοκιμάστηκαν. Η μείωση βάρους που είναι και το μεγάλο ζητούμενο, έχει επιτευχθεί καθώς έχει ξεπεράσει τα 3,5 kg. Με βάση αυτά τα δεδομένα γνωρίζουμε ότι πέρα από ένα ελαφρύτερο σασί έχουμε ένα σχέδιο που θεωρητικά μπορεί να ανταποκριθεί στη λειτουργία που καλείται να επιτελέσει. Επίσης η σύγκριση με την προηγούμενη κατασκευή αποδεικνύει ότι η μελέτη αποδίδει αφού το νέο πλαίσιο αποδεικνύεται καταλληλότερο.

5.

Κατασκευή

5.1 Προετοιμασία κατασκευής

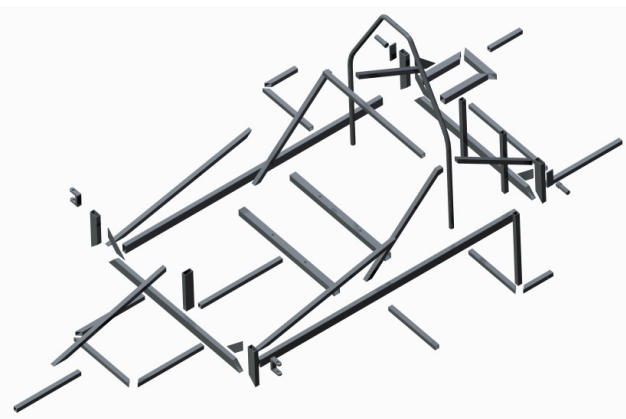
Ο χώρος στον οποίο έγινε η κατασκευή του πλαισίου είναι το Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το εργαστήριο υποστηρίζει της μηχανολογικές κατασκευές της ομάδας TUCer από την ίδρυση της το 2008.

Μετά την ολοκλήρωση των τελικών σχεδίων και των αναλύσεων, έγινε η παραγωγή των απαραίτητων υλικών. Το πλάνο της κατασκευής προέβλεπε την κοπή των προφίλ αλουμινίου στα μέτρα του σχεδιασμού καθώς και την κατεργασία διαμόρφωσης των εμπρός βάσεων στήριξης των ημιαξόνων. Έπειτα, σειρά είχε η συγκόλληση όλων των τμημάτων και τέλος η τοποθέτηση των εξαρτημάτων του οχήματος πάνω στο σασί.

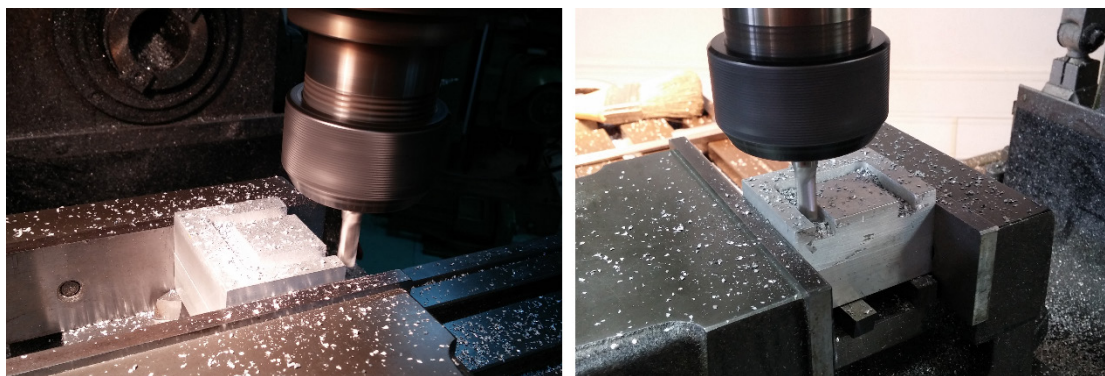
5.2 Κοπή & διαμόρφωση τμημάτων πλαισίου

Τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν το πλαίσιο, σύμφωνα με το σχέδιο, είναι 48. Από αυτά τα 41 είναι τμήματα προφίλ αλουμινίου, τα 5 μασίφ γωνίες και τα 2 οι εμπρός βάσεις στήριξης.

Η διαδικασία ξεκίνησε με την κοπή και κατανομή των τμημάτων ανάλογα με το σημείο τοποθέτησης τους πάνω στο όχημα. Παράλληλα με τη χρήση φρέζας έγινε η διαμόρφωση των βάσεων στήριξης.



Εικόνα 5.1: Τα τμήματα που αποτελούν το πλαίσιο.



Εικόνα 5.2: Κατεργασία διαμόρφωσης βάσεων ημιαξόνων.

5.3 Συγκόλληση τμημάτων πλαισίου

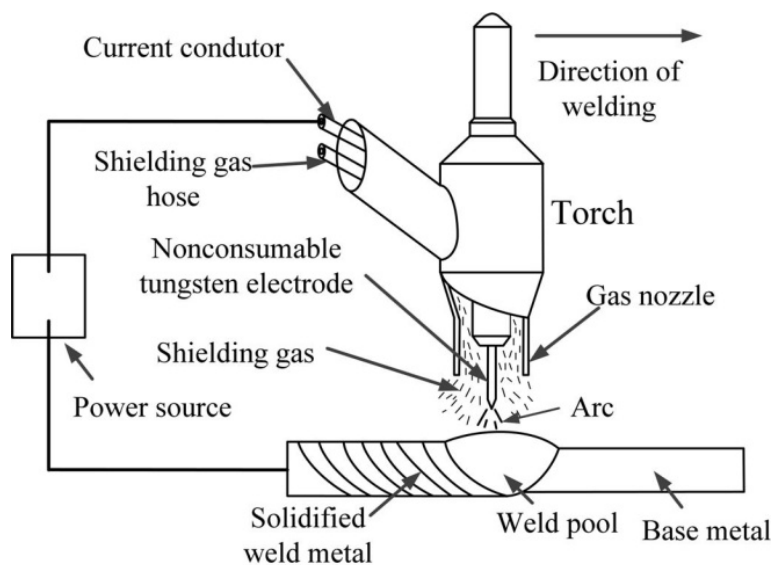
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση του πλαισίου είναι η επονομαζόμενη T.I.G (Tungsten Inert Gas). Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί δύστηκτο ηλεκτρόδιο από βολφράμιο και αέριο αργό. Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε προσθήκη συγκολλητικού υλικού λόγω των λεπτών επιφανειών αλλά και για να εξασφαλισθεί μεγαλύτερη αντοχή στα εκάστοτε σημεία [28].



Εικόνα 5.3: Συγκόλληση του πλαισίου με τη μέθοδο T.I.G.

Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε ως μια από τις καταλληλότερες με βάση τα κατασκευαστικά κριτήρια του πλαισίου. Θεωρείται μια σπουδαία συγκολλητική μέθοδος σε κρίσιμες συγκολλήσεις, στις οποίες μπορεί να φθαρεί ή να καταστραφεί η κόλληση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μέταλλα με λεπτό πάχος, όπως τα προφίλ που χρησιμοποιούνται, και είναι κατάλληλη εφόσον υπάρχει έντονος ο κίνδυνος τρυπημάτων στα προς συγκόλληση μέρη. Τέλος πέρα από την ικανότητα να συγκολλά ανοξείδωτους και ανθρακούχους χάλυβες, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και στο αλουμίνιο [28] [29].

Απαραίτητες προϋποθέσεις για τη χρήση της μεθόδου T.I.G είναι το σημείο που θα συγκολληθεί να είναι καθαρό από σκουριές, μηχανικά επεξεργασμένο και να έχουν απομακρυνθεί όλα τα σωματίδια που επηρεάζουν τη συγκόλληση [28]. Για το λόγο αυτό κάθε επιφάνεια ελεγχόταν και καθαριζόταν προσεκτικά πριν την εφαρμογή.



Εικόνα 5.4: Συγκόλληση T.I.G.

Παρακάτω ακολουθούν εικόνες από τις διάφορες φάσεις κατασκευής του πλαισίου καθώς προχωρούσε η διαδικασία της συγκόλλησης.



Εικόνα 5.5: Βασικό τμήμα πλαισίου υπό κατασκευή.



Εικόνα 5.6: Τελικά στάδια κατασκευής.

5.4 Τοποθέτηση τμημάτων οχήματος στο νέο πλαίσιο

Σε πρώτο στάδιο, μετά την ολοκλήρωση όλων των συγκολλήσεων γίνονται οι οπές στήριξης των επιμέρους τμημάτων και οι υποδοχές της καλωδίωσης. Έπειτα τοποθετούνται τα ημιαξόνια, οι τροχοί, το σύστημα διεύθυνσης και το τιμόνι. Έτσι το όχημα αρχίζει να παίρνει τη γνώριμη μορφή του.



Εικόνα 5.7: Εισαγωγή των πρώτων τμημάτων του οχήματος.

Στη συνέχεια σειρά έχουν τα πατώματα και οι βάσεις στήριξης ενώ παράλληλα τοποθετούνται κάποια ηλεκτρονικά, το κάθισμα και άλλα τμήματα στην καμπίνα και στο πίσω μέρος.



Εικόνα 5.8: Τοποθέτηση πατωμάτων και τμημάτων καμπίνας.

Τέλος σειρά έχει το κάλυμμα, η κυψέλη υδρογόνου, ο κινητήρας και το κιβώτιο ταχυτήτων.



Εικόνα 5.9: Τοποθέτηση ηλεκτρομηχανολογικών μερών.

Μετά την τοποθέτηση όλων των τμημάτων του οχήματος ακολουθεί μια σειρά δοκιμών ώστε να αντιμετωπισθούν τυχόν προβλήματα αλλά, και για να επιβεβαιωθεί η ομαλή λειτουργία του πρωτοτύπου πριν τον αγώνα.

6.

Επιδόσεις & συμπεράσματα

6.1 Ο διαγωνισμός & τα αποτελέσματα των επιδόσεων

Μετά το πέρας της κατασκευής του νέου οχήματος ER2015, η ομάδα TUCer ταξίδεψε στο Rotterdam της Ολλανδίας ώστε να διαγωνιστεί στο διαγωνισμό “Shell Eco Marathon 2015” για 8^η συνεχή χρονιά. Ο διαγωνισμός συμπλήρωσε το 2015 την 30^η επέτειο διεξαγωγής του με τη συμμετοχή πάνω από 5.000 σπουδαστών και μηχανικών από 50 χώρες.



Εικόνα 6.1: Συμμετέχοντες διαγωνισμού “Shell Eco Marathon 2015”.

Το όχημα αρχικά εξετάσθηκε εξονυχιστικά από τον τεχνικό έλεγχο για να πιστοποιηθεί η ασφάλεια και η τήρηση όλων το κανονισμών. Η επιτροπή έκρινε το όχημα ικανό να διαγωνιστεί και έτσι το νέο πρωτότυπο έλαβε τις 2 απαραίτητες πιστοποιήσεις. Κατά την ίδια φάση έγινε και η επίσημη μέτρηση βάρους του οχήματος στα **73,2 kg**, πράγμα που σημαίνει τη μείωση κατά 10 περίπου κιλών σε σχέση με το πρωτότυπο μοντέλο του 2014 και που το καθιστά ένα από τα ελαφρύτερα της κατηγορίας του.



Εικόνα 6.2: Η διαδικασία του τεχνικού ελέγχου και η πιστοποίηση του οχήματος.

Κατά τη φάση του αγωνιστικού μέρους το όχημα έκανε 3 έγκυρες προσπάθειες μέσα στην πίστα, η μία εκ των οποίων υπό βροχή. Η καλύτερη επίδοση που σημείωσε ήταν τα 193 km/m^3 υδρογόνου, επίδοση ρεκόρ για τα δεδομένα του οχήματος. Έτσι η ομάδα κατατάχθηκε στην 4^η θέση πανευρωπαϊκά, στην κατηγορία οχημάτων πόλεως με καύσιμο το υδρογόνο.



Εικόνα 6.3: Το πρωτότυπο ER2015 κατά τη διάρκεια του αγώνα.



Εικόνα 6.4: Η ομάδα TUCer το 2015 στο Ahoy του Rotterdam.

6.2 Τελικά συμπεράσματα

Ο σκοπός της μελέτης που έγινε, ήταν εξ αρχής η κατασκευή ενός πλαισίου που θα ήταν κατάλληλο για το πρωτότυπο όχημα πόλης ER2015. Οι ανάγκες του οχήματος αλλά και οι περιορισμοί του διαγωνισμού στον οποίο λαμβάνει μέρος, επηρέασαν και καθόρισαν το σχεδιασμό. Η μεγαλύτερη παράμετρος στη οποία αποσκοπούσε η δημιουργία της νέας κατασκευής ήταν η μείωση βάρους και αυτό, γιατί είναι καθοριστικής σημασίας στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Εν τέλει το σασί που σχεδιάστηκε ελέγχθηκε με επιτυχία από την γραμμική στατική ανάλυση και την ανάλυση ιδιομορφών. Η αντοχή και η ακαμψία του πιστοποιήθηκαν με την προσεγγιστική μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, όποτε προχώρησε και η κατασκευή του. Έτσι δημιουργήθηκε ένα πλαίσιο κατά **33,6%** ελαφρύτερο του προηγούμενου, πράγμα που συνέβαλε στην κατά **12%** συνολική μείωση βάρους του οχήματος.

6.3 Μελλοντικές αναλύσεις

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη και σύγκριση των διαφορετικών σχεδίων σασί που σχεδιάστηκαν, είναι η βάση για άλλες πιο λεπτομερείς αναλύσεις. Με την παρούσα εργασία έγινε το πρώτο βήμα για την μερική κατανόηση κάποιων χαρακτηριστικών του πλαισίου που επιλέχθηκε να κατασκευασθεί.

Σε επίπεδο στατικών φορτίσεων η ανάλυση έδωσε μια εικόνα για τα φορτία που καταπονούν το σασί. Η επόμενη ανάλυση σε αυτό το πλαίσιο θα μπορούσε να είναι η

ανάλυση στιβαρότητας σε στρέψη και κάμψη. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαμε να έχουμε πληροφορίες για το πόσο στιβαρό είναι το πλαίσιο κατά την κίνηση του σε στροφή καθώς και τις παραμορφώσεις που θα παρουσιάσει.

Όσον αφορά την ανάλυση ιδιομορφών, μια πολύ σημαντική μελέτη που θα μπορούσε να υλοποιηθεί είναι η ανάλυση με τη μοντελοποίηση των φορτίων του οχήματος αλλά και αποσβεστήρων πάνω σε αυτό. Έτσι θα μπορούσαν να εξαχθούν αποτελέσματα για τη συμπεριφορά του σασί απέναντι στις δονήσεις του οδοστρώματος. Η τελευταία ανάλυση θα μπορούσε να υποδείξει τον τρόπο τοποθέτησης και τον τύπο των απαιτούμενων αναρτήσεων που χρειάζεται το όχημα.

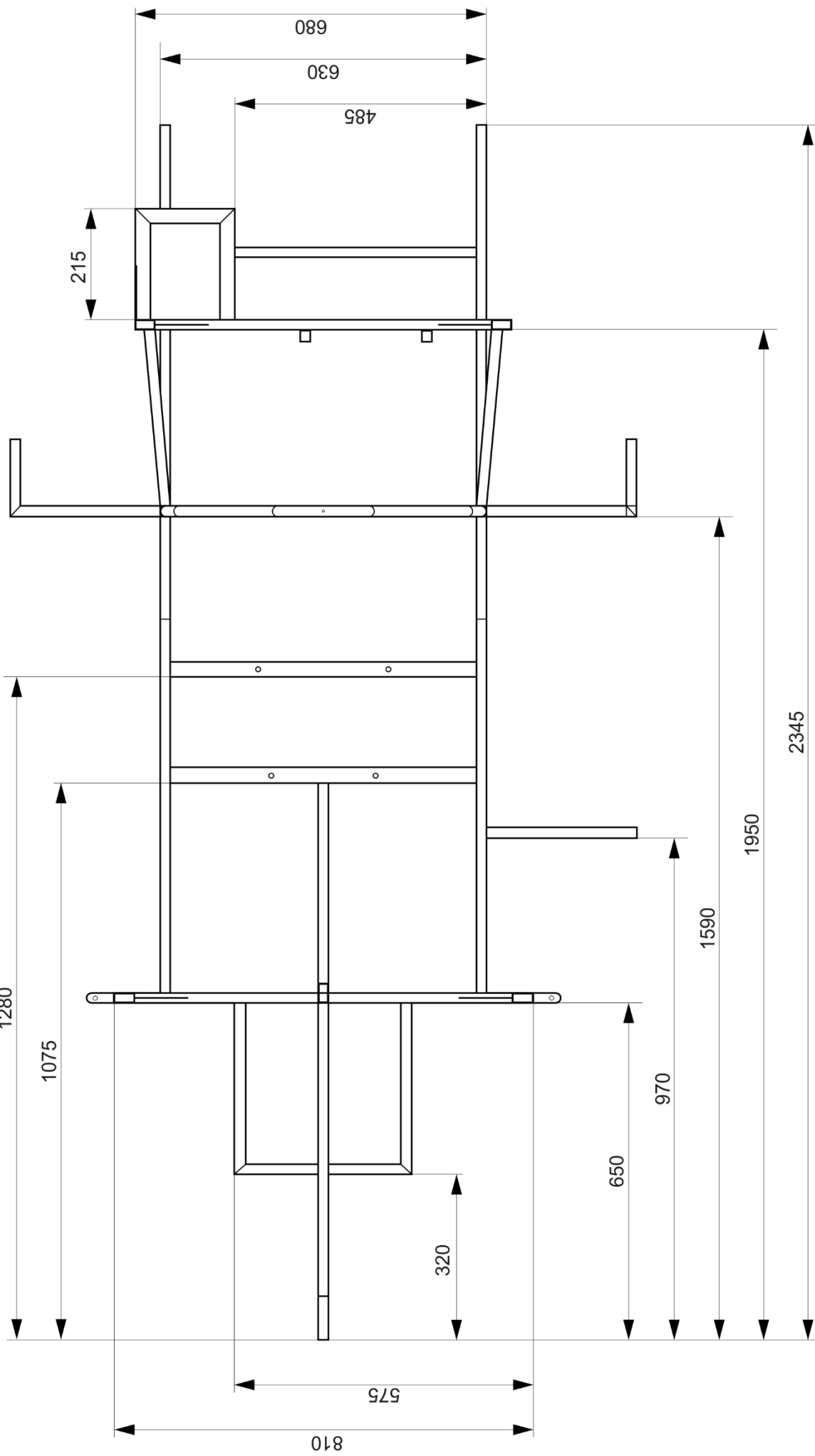
Βιβλιογραφία

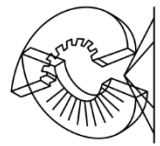
- [1] BETA CAE Systems S.A. (2015). *A guide for setting up NASTRAN load cases in ANSA*. Thessaloniki: BETA CAE Systems S.A publishing.
- [2] BETA CAE Systems S.A. (2015). *ANSYS version 15.2.x User's Guide*. Thessaloniki: BETA CAE Systems S.A publishing.
- [3] Bhavikatti, S.S. (2015). *Finite Element Analysis – Third edition*. New Age International.
- [4] Croccolo, D., De Agostinis, M., Vincenzi, (2011). Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a Case Study. *Journal of Mechanical Engineering*, 57(11), 799 – 809.
- [5] Crolla, A.D. (2009). *Automotive Engineering Powertrain, Chassis System and Vehicle Body*. Elsevier.
- [6] Eckstein, L., Wohlecker, R., Göbbels, R. (2011). *Determination of the Functional Performance of a Series Electric Vehicle*. Beijing: fka.
- [7] E.T.E.M. (2015). *Industrial Aluminium Profiles*. Αθήνα: Έκδοση E.T.E.M.
- [8] EUROPA Aluminium Systems. (2015). *Κατάλογος βιομηχανικών & standard προφίλ*. Αθήνα: Έκδοση EUROPA Aluminium Systems.
- [9] Fan, R.X., Liu, J., Wang, T.L., Xue, H. (2012). Analysis and Optimize of the Vibration of Mini – Electrical Vehicle Frame. *International Conference on Automobile and Traffic Science, Materials, Metallurgy Engineering*.
- [10] Heiβing, B. & Ersoy, M. (2011). *Chassis Handbook Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives*. Berlin: Vieweg + Teubner.
- [11] Hai Fei, W., Kun Kun J., Zi Peng G. (2014). *Random Vibration Analysis for the Chassis Frame of Hydraulic Truck based on ANSYS*. J. Chem. Pharmaceutical Res., 6, 849 – 852.
- [12] He, J. & Fu Z.F. (2001). *Modal Analysis – First edition*. Oxford: Butterworth – Heinemann.
- [13] Hughes, T.J.R. (2000). *The Finite Element Method – Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. New York: Dover publications.
- [14] Κατσαρός – Σεγδίτσας, Θ. (2013). *Σχεδιασμός και μελέτη αντοχής πλαισίου διθέσιου ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου σε περιβάλλον CAD/CAE*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.
- [15] Μπάζιος, Π. (2015). *Σχεδιασμός και μελέτη θυρών διθέσιου ηλεκτροκίνητου οχήματος σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης CAD/CAE*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.

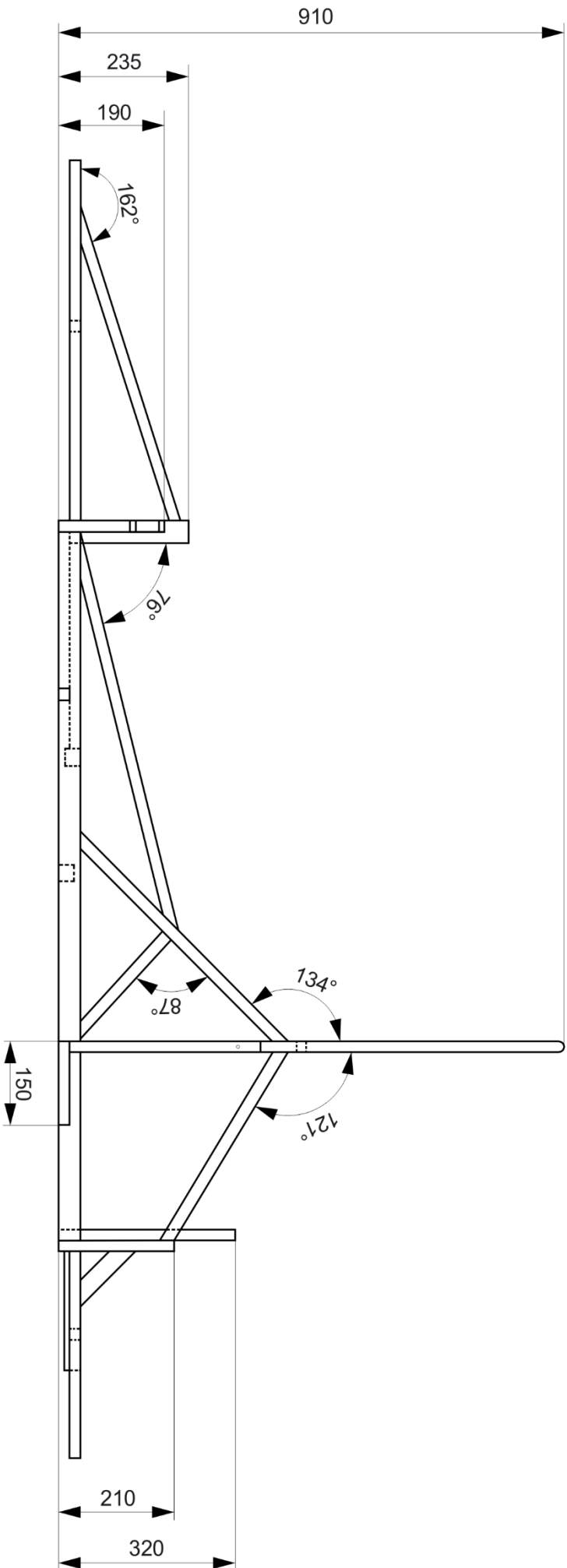
- [16] Marzuki, M.A.B., Halim, M.H.A., Mohamed, A.R.N. (2015). Determination of Natural Frequencies through Modal and Harmonic Analysis of Space Frame Race Car Chassis Based on ANSYS. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- [17] Morello, L., Rossini, R.L., Pia, G., Tonoli, A. (2011). *The Automotive Body – Volume I: Component Design & Volume II: System Design: Components Design*. Springer.
- [18] MSC Software. (2011). *MSC Nastran 2012 Quick Reference Guide*. MSC Software publishing.
- [19] Παππάς, Α. (2010). *Σχεδίαση μελέτη και κατασκευή συστήματος διεύθυνσης για το όχημα ER10*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.
- [20] Πατσίκας, Β. (2012). *Μελέτη και σχεδίαση πλαισίου αυτοκινήτου με CAD και ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.
- [21] Πλουμάκης, Ε. (2010). *Μελέτη και κατασκευή του συστήματος τροχού – πλήμνης για χρήση σε πειραματικό όχημα χαμηλής κατανάλωσης*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.
- [22] Popp, K. & Schiehlen, W. (2010). *Ground Vehicle Dynamics*. Springer.
- [23] Reimpell, J., Stoll, H., Betzler, W.J. (2001). *The Automotive Chassis – Second edition*. Butterworth – Heinemann.
- [24] Renuke, P.A. (2012). Dynamic Analysis of a Car Chassis. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 955 – 959.
- [25] Robinson, A. & Livesey, A. (2006). *The Repair of Vehicle Bodies – Fifth edition*. New York: Routledge.
- [26] Σταμούλης, Φ.Β. (2011). *Σχεδιασμός ηλεκτρικού αυτοκινήτου πόλης*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
- [27] Σπανουδάκης, Π. (2003). *Σχεδίαση νέου μη – επανδρωμένου κάθετης απογείωσης – προσγείωσης*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης.
- [28] Σπάρταλης, Λ. & Χαιρέτης, Ν. (2003). *Σημειώσεις Τεχνολογίας Παραγωγής I – Εργαστήριο*. Χανιά: Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
- [29] Τσουρβελούδης, Χ.Ν. & Νικολός, Ι.Κ. (2014). *Τεχνολογίες Παραγωγής*. Χανιά: Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
- [30] Tsirogiannis, C.E. (2015). *Design of an Efficient and Lightweight Chassis Suitable for an Electric Car*. Chania: Technical University of Crete, School of Production Engineering and Management.

- [31] Tzanakis, A. (2012). *Conceptual and Aerodynamic Design of an Urban Vehicle*. Chania: Technical University of Crete, School of Production Engineering and Management.
- [32] Visser, G. (2014). *Modal Analysis: What it is and is not*. Ανακτήθηκε 20 Δεκεμβρίου 2015 από το διαδίκτυο: <https://esteq.co.za/2014/11/25/modal/>
- [33] Wakeham, J.K. (2009). *Introduction to Chassis Design*. Memorial University of Newfoundland and Labrador.
- [34] Wang, X. (2010). *Vehicle Noise and Vibration Refinement*. Woodhead Publishing Limited.

Κατασκευαστικά σχέδια



Responsible dept. MTL	Technical reference	Created by Koumartzakis Georgios	Approved by			
 Machine Tools Laboratory School of Production Engineering and Management Technical University of Crete	Document type Assembly drawing		Document status			
	Title, Supplementary title Chassis plan no. 1		Scale 0.09			
	Rev.	Date o issue 25/3/2015	Lang. en	Sheet 1/3		



Responsible dept. MTL		Technical reference	
Machine Tools Laboratory School of Production Engineering and Management Technical University of Crete		Created by Koumartzakis Georgios	Approved by
Document type Assembly drawing		Document status	
Title, Supplementary title Chassis plan no. 2		Scale 0.09	
Rev.	Date o issue	Lang.	Sheet
	25/3/2015	en	2/3

