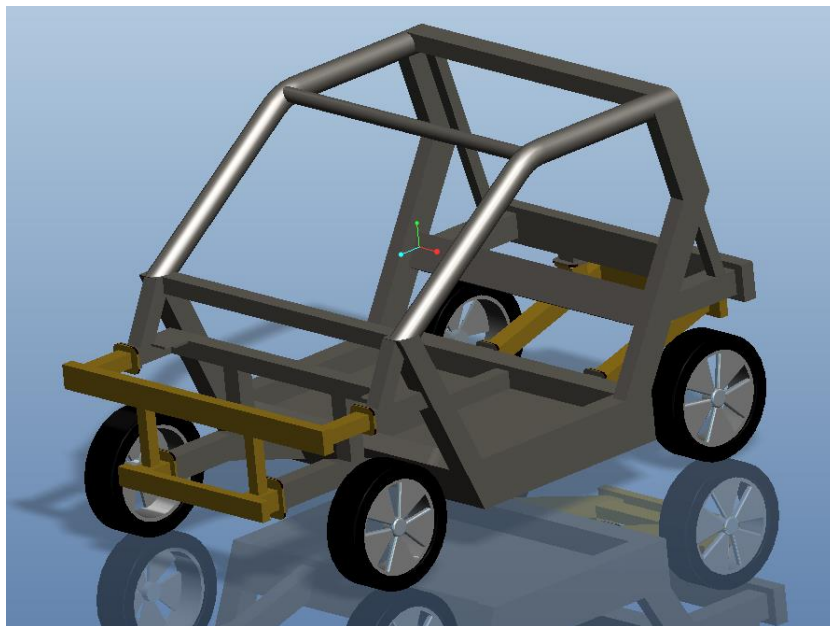




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Διπλωματική Εργασία

"Σχεδιασμός και μελέτη αντοχής πλαισίου διθέσιου ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου σε περιβάλλον CAD/CAE"



Κατσαρός-Σεγδίτσας Θεόδωρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Τσουρβελούδης Νικόλαος

XANIA 2013

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- 1.1 Περίληψη
- 1.2 Αντικείμενο της εργασίας
- 1.3 Στόχοι

Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή

- 2.1 Τύποι πλαισίων αυτοκινήτων
- 2.2 Υλικά κατασκευής
- 2.3 Τύποι συγκολλήσεων
- 2.4 Σύγχρονα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων παραγωγής
 - 2.4.1 Renault Twizy
 - 2.4.2 Smart Fortwo Electric Drive

Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Σχεδιασμός κλωβού ασφαλείας
- 3.3 Σχεδιασμός εμπρόσθιου υποπλαισίου
- 3.4 Σχεδιασμός οπίσθιου υποπλαισίου
- 3.5 Ολοκληρωμένη συναρμογή

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος αντοχής

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Εισαγωγή στα Πεπερασμένα Στοιχεία
- 4.3 Θεωρίες αστοχίας
- 4.4 Μοντελοποίηση
 - 4.4.1 Δημιουργία πλέγματος
 - 4.4.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων
 - 4.4.3 Εισαγωγή του Εμποδίου
 - 4.4.4 Μοντελοποίηση των υλικών
 - 4.4.5 Μοντελοποίηση περιορισμών
 - 4.4.6 Μοντελοποίηση αρχικής ταχύτητας
 - 4.4.7 Μοντελοποίηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας
 - 4.4.8 Μοντελοποίηση μάζας
 - 4.4.9 Μοντελοποίηση των διατομών ελέγχου

Κεφάλαιο 5: Επίλυση του Μοντέλου

5.1 Mark_10

5.2.1 Mark_11

5.2.2 Mark_11 Attempt_2

5.3 Mark_12

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Ευχαριστίες

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Περίληψη της εργασίας

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό και εν συνεχεία την ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων του πλαισίου ενός διθέσιου ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου πόλης. Αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα προκειμένου να προσδιοριστούν οι διάφοροι τύποι πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς από την αυτοκινητοβιομηχανία, τα διάφορα υλικά κατασκευής καθώς και οι υπόλοιπες παράμετροι που εμπλέκονται στην κατασκευή ενός πλαισίου αυτοκινήτου. Επιπλέον, ερευνήθηκαν τα μοντέλα αυτοκινήτων που ήδη υπάρχουν στην αγορά προκειμένου να προσδιοριστούν με σαφήνεια οι προδιαγραφές του πλαισίου που πρόκειται να σχεδιαστεί και να μελετηθεί.

Με βάση τις πληροφορίες αυτές προκύπτει ο τύπος πλαισίου και τα υλικά κατασκευής που θα χρησιμοποιηθούν, ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζονται και οι προδιαγραφές ασφαλείας που πρέπει να πληροί το νέο όχημα. Ακολουθεί το στάδιο του σχεδιασμού του πλαισίου έχοντας ως βασικούς στόχους: 1) την απλότητα στην κατασκευή, 2) την ευκολία επεξεργασίας και εύρεσης των υλικών και 3) την υψηλή ακαμψία και ασφάλεια που θα πρέπει αυτό να παρέχει στους επιβαίνοντες. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των δυναμικών φορτίσεων/τάσεων που δέχεται το πλαίσιο με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Έπειτα επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέσω της οποίας προκύπτουν τα σημεία που παρουσιάζουν ατέλειες τα οποία στη συνέχεια επανασχεδιάζονται προκειμένου να προκύψει το τελικό σχέδιο που ικανοποιεί τις προδιαγραφές και τους στόχους που τέθηκαν.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη του πλαισίου ενός διαθέσιμου ηλεκτρικού αυτοκινήτου πόλης που θα πληροί τις προδιαγραφές ασφαλείας της Euro-NCAP στην αντίστοιχη κατηγορία αυτοκινήτων. Ο ανεξάρτητος ευρωπαϊκός οργανισμός Euro-NCAP ιδρύθηκε το 1997, με σκοπό να ενημερώνει τους καταναλωτές σε θέματα ασφάλειας, για τα πιο δημοφιλή μοντέλα που κυκλοφορούν στην ευρωπαϊκή αγορά.

Με τον Euro-NCAP συνεργάζονται στενά :

- Οι Κυβερνήσεις πέντε Ευρωπαϊκών χωρών,
- Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή,
- Οι Εθνικές Λέσχες Αυτοκινήτου (για την Ελλάδα αποκλειστικός συνεργάτης είναι η ΕΛΠΑ)
- Οι Ενώσεις Καταναλωτών κάθε χώρας

Σήμερα ο Euro-NCAP έχει εξελιχθεί σε καταλύτη εξελίξεων, στον τομέα της συνεχώς βελτιούμενης ασφάλειας που παρέχουν τα νέα μοντέλα αυτοκινήτων.

1.3 Στόχοι

Στόχος της εργασίας είναι να οριστούν όλα τα χαρακτηριστικά του πλαισίου έχοντας ως βασικό στόχο την απλότητα της κατασκευής, την ευκολία εύρεσης και επεξεργασίας των υλικών και την υψηλή ακαμψία και ασφάλεια που θα πρέπει το πλαίσιο να παρέχει στους επιβαίνοντες του οχήματος.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική έρευνα

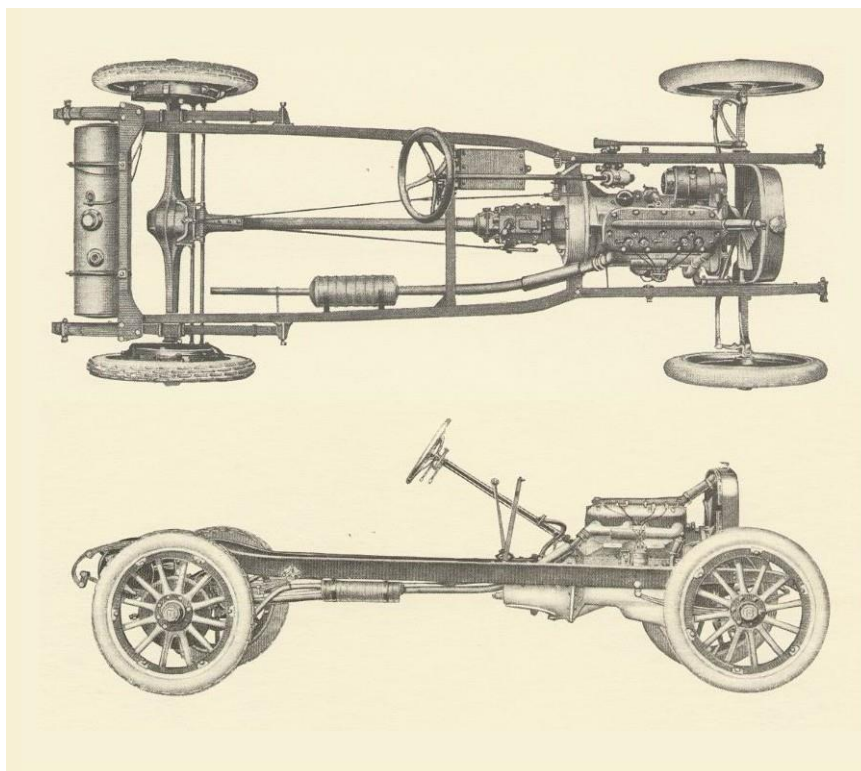
2.1 Εισαγωγή στα πλαίσια αυτοκινήτων - Τύποι πλαισίων

Το πλαίσιο είναι ο σκελετός του αυτοκινήτου και αυτό που προσδίδει στο αυτοκίνητο την δομική αντοχή του και τα διάφορα σημεία στήριξης των υπόλοιπων εξαρτημάτων που το αποτελούν .

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται οι διάφοροι τύποι πλαισίων που κατά καιρούς χρησιμοποιήθηκαν από την βιομηχανία αλλά και χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.

Πρώτα σχέδια πλαισίων & πλαίσιο τύπου σκάλας

Πολλές από τις βασικές αρχές και τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή αυτοκινήτων προήλθαν από την βιομηχανία των κάρων και αυτό είναι φανερό από τα αρχικά σχέδια πλαισίων των αυτοκινήτων. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται το σασί ενός Dodge του 1920 (χωρίς το αμάξωμά του) και είναι ένα κλασικό παράδειγμα προπολεμικού σχεδιασμού πλαισίων αυτοκινήτου: δύο μεγάλου μήκους δοκοί που διατρέχουν το συνολικό μήκος του αυτοκινήτου, με τον κινητήρα να είναι τοποθετημένος ανάμεσά τους και τους άξονες τοποθετημένους από κάτω. Το αμάξωμα τοποθετείται ακριβώς από πάνω από το πλαίσιο.



Εικόνα 2.1: Πλαίσιο τύπου σκάλας

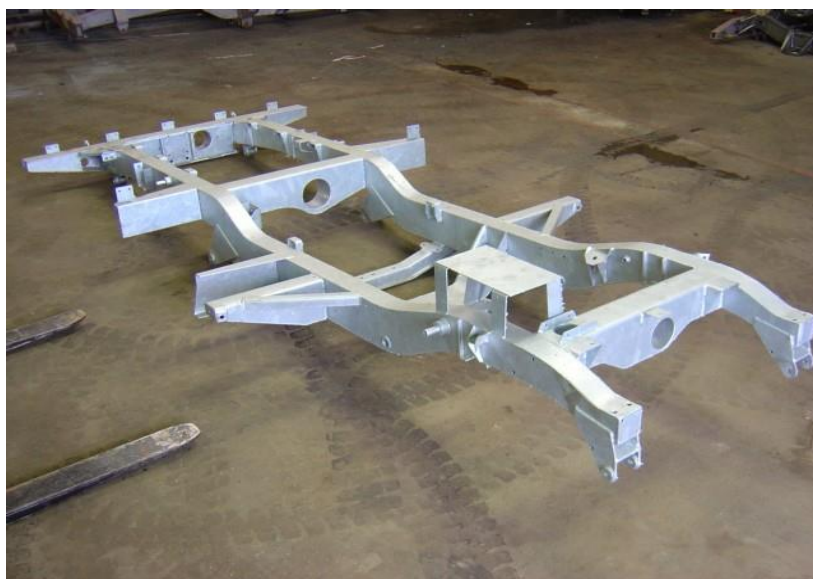
Αυτός ο τύπος πλαισίου είναι γνωστός ως σκάλα αφού οι εγκάρσια τοποθετημένες δοκοί θυμίζουν τα σκαλοπάτια μίας σκάλας όπως κάποιος το βλέπει από πάνω προς τα κάτω. Στην αρχή οι δοκοί ήταν πολύ απλοί, χωρίς καθόλου καμπύλες στο μήκος τους, αλλά με το πέρασμα του χρόνου όσο πιο περίπλοκη γινόταν η τεχνολογία και η μηχανική της εποχής

τόσο πιο περίπλοκος γινόταν και ο σχεδιασμός των πλαισίων, με αποτέλεσμα οι δοκοί από ίδιοι απέκτησαν καμπύλες προκειμένου να μην έρχονται σε επαφή με τους άξονες και για να παρέχουν τις βάσεις στήριξης του κινητήρα κλπ. Πέρα από αυτές τις μικρές αλλαγές η ουσία του πλαισίου αυτού έμεινε η ίδια και απαράλλαχτη σε σχέση με το αρχικό σχέδιο.

Το να κατασκευάσει ένα τέτοιο πλαίσιο είναι τεχνικά πολύ εύκολο: όσο όλα τα στοιχεία είναι ευθυγραμμισμένα σωστά μπορούν να συγκολληθούν μεταξύ τους χειροκίνητα (εννοώντας χωρίς τη χρήση κάποιου εξειδικευμένου μηχανήματος ηλεκτροσυγκόλλησης) και όλα τα υλικά είναι φθηνά και βρίσκονται εύκολα. Από την άλλη παίρνει πολύ χρόνο να γίνουν όλες οι συγκολλήσεις και η τελική κατασκευή υποφέρει από την έλλειψη διαγώνιων ενώσεων με αποτέλεσμα να μπορεί εύκολα να παραμορφωθεί σε όλο το μήκος του. Προκειμένου αυτός ο τύπος πλαισίου να γίνει πιο ισχυρός η τεχνική που ακολουθείται είναι να τοποθετούνται επιπλέον εγκάρσιοι δοκοί που αυξάνουν βάρος του.

Σε γενικές γραμμές το πλαίσιο-σκάλα είναι μία κατασκευή με υψηλό βάρος που τελικά δεν προσφέρει μία ιδιαίτερα καλή βάση για να χτίσει κανείς ένα αυτοκίνητο.

Στην εικόνα 2.2 φαίνεται το πλαίσιο ενός Land-Rover του 1960 και είναι σχεδόν πανομοιότυπο με το σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε στο Defender του 2005.



Εικόνα 2.2: Πλαίσιο-Σκάλα Land Rover Defender 2005

Οι λόγοι που έπειτα από τόσα χρόνια, το πλαίσιο αυτό παραμένει σχεδόν απαράλλαχτο σχολιάζονται στη συνέχεια. Το πλαίσιο-σκάλα έχει όντως κάποια πολύ καλά χαρακτηριστικά. Για αρχή, όσον αφορά στη μεταφορά φορτίου μεγάλου βάρους αυτά τα πλαίσια είναι τα πλέον κατάλληλα, αφού στην ουσία πρόκειται για ατσάλινες δοκούς. Επιπλέον, έχει την υψηλότερη προσαρμοστικότητα σε σχέση με όλους τους άλλους τύπους πλαισίων: από την

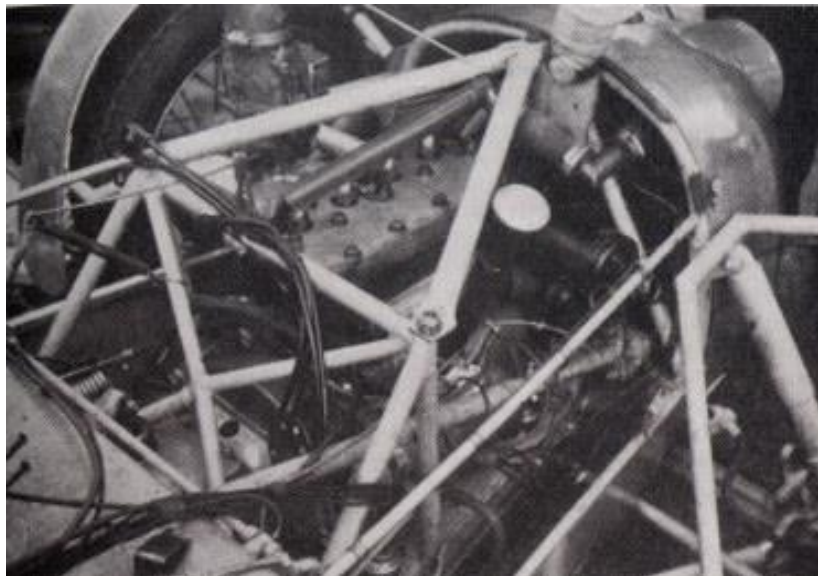
στιγμή που η κατασκευή του έχει ολοκληρωθεί μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί το μήκος του κατά βούληση όπως επίσης και το πλάτος του σχετικά εύκολα. Επίσης, με πολύ μικρούς περιορισμούς που έχουν να κάνουν με την τοποθέτηση κυρίως μεγάλων εξαρτημάτων, μπορεί να τοποθετηθεί οποιοδήποτε αμάξωμα υπάρχει (εικόνα 2.3). Για παράδειγμα μπορεί να τοποθετηθούν αμαξώματα όπως τριών όγκων, ανοιχτό και φορτηγού.



Εικόνα 2.3: Πλαίσιο-Σκάλα της εταιρίας Isuzu

Πλαίσιο τύπου Χωροδικτυώματος

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το πρόβλημα με το πλαίσιο-σκάλα είναι ότι ενώ είναι πάρα πολύ δυνατό δεν είναι ιδιαίτερα στιβαρό. Εάν κάποιος δοκίμαζε να χρησιμοποιήσει ένα πλαίσιο τύπου-σκάλας για αγωνιστική χρήση το πρώτο μέλημα θα ήταν να το κάνει πιο άκαμπτο. Προκειμένου να γίνει αυτό πρέπει να προστεθούν στηρίγματα στο αρχικό πλαίσιο έτσι ώστε να αποφευχθεί η συστροφή του. Η παρακάτω φωτογραφία (εικόνα 2.4) δείχνει τέτοιου είδους προσθήκες σε σασί-σκάλα που τοποθέτησε ο ιδρυτής της Lotus, Colin Chapman στο πλαίσιο ενός Austin 7, ενέργεια η οποία αύξησε σημαντικά την δυσκαμψία.



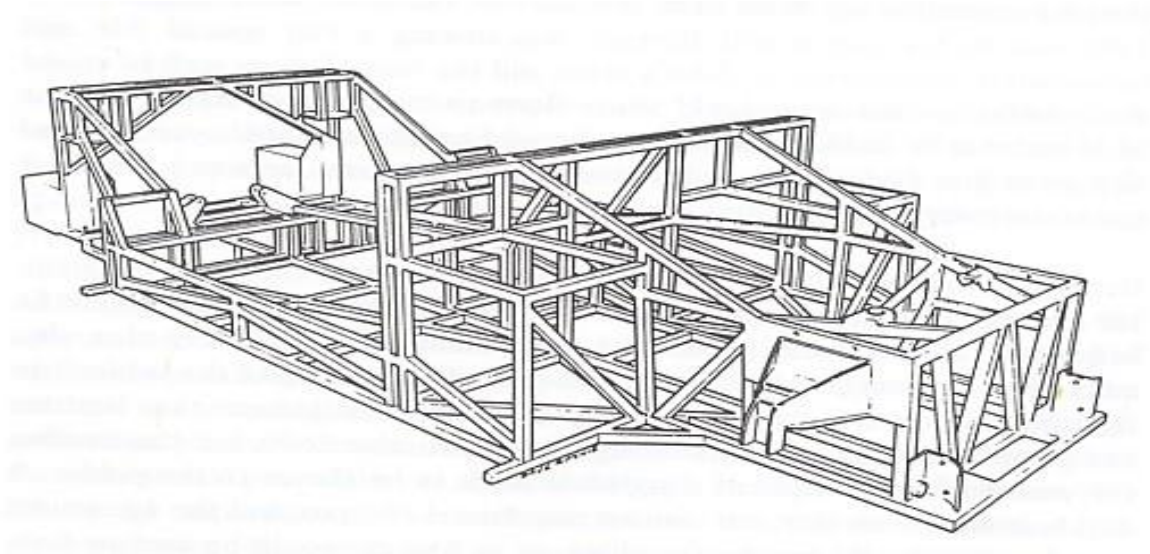
Εικόνα 2.4: Πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος στο βρετανικό Austin 7

Από την στιγμή που παρουσιάστηκε αυτή η ιδέα, δηλαδή η ενίσχυση της δυσκαμψίας ενός πλαισίου με χρήση στηριγμάτων, το επόμενο βήμα ήταν να γίνει και το ίδιο στο βασικό πλαίσιο προκειμένου και αυτό να αντιστέκεται στην παραμόρφωση. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατό να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο όπου κάθε κομμάτι θα είχε και ένα στήριγμα στο οποίο δεν θα ασκούνται εν τέλει καθόλου στρεπτικά φορτία, παρά μόνο θλιπτικά και εφελκυστικά. Αυτό είναι και η αρχή που διέπει τα πλαίσια αυτού του τύπου (Space Frame): αφαιρώντας τα καμπτικά φορτία που ασκούνται στα κομμάτια του σασί μπορεί κανείς να τα κατασκευάσει μικρότερα, λεπτότερα και ελαφρύτερα ενώ ταυτόχρονα το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πιο δύσκαμπτο πλαίσιο. Η παρακάτω φωτογραφία (εικόνα 2.5) δείχνει το πλαίσιο Birdcage της Maserati το οποίο είναι το τέλει παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω φιλοσοφίας: είναι χαρακτηριστικό το πόσο λεπτοί είναι οι σωλήνες αφού δέχονται μόνο εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία ενώ ταυτόχρονα δεν δέχονται σχεδόν καθόλου καμπτικά. Κάθε κομμάτι δέχεται φορτία μόνο προς την διεύθυνση κατά την οποία είναι ισχυρότερο.



Εικόνα 2.5: Πλαίσιο Birdcage σε αυτοκίνητο της Maserati

Τα μειονεκτήματα του εν λόγω πλαισίου είναι κυρίως δύο. Το πρώτο είναι ότι λόγω της ύπαρξης αυτού του μεγάλου αριθμού σωλήνων που υπάρχουν παντού το πλαίσιο αυτό δεν είναι ιδανικό στο να μεταφέρει μεγάλο βάρος. Ένα δευτερεύον πρόβλημα είναι ότι τα πλαίσια αυτού του τύπου είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν. Ακόμα και να μην αναλογιστεί κανείς την δυσκολία του να σιγουρέψει ότι όλα τα κομμάτια είναι κατασκευασμένα σωστά, το πρόβλημα είναι ότι κάποια στιγμή θα χρειαστεί όλα αυτά τα διαφορετικά κομμάτια να συγκολληθούν, πράγμα ιδιαίτερα χρονοβόρο.

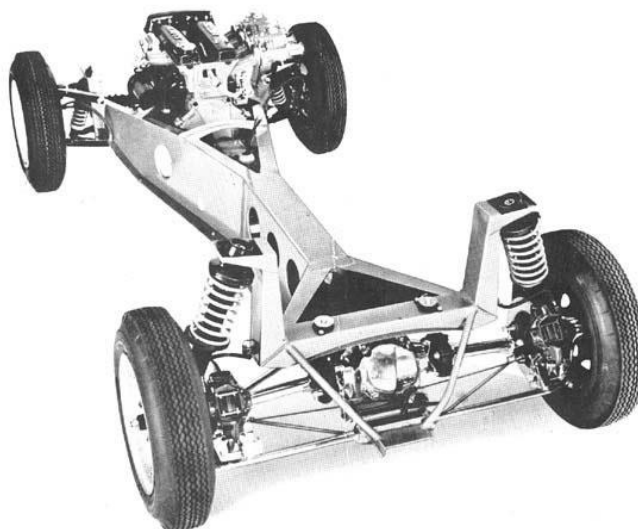


Εικόνα 2.6: Πλαίσιο του Gordon Keeble

Αντίθετα, ένα βασικό πλεονέκτημα του σχεδίου αυτού είναι το γεγονός ότι τόσο τα υλικά όσο και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του είναι σχετικά απλά και φθηνά, με αποτέλεσμα εάν κανείς έχει τον απαραίτητο χρόνο να αφιερώσει θα έχει τελικά στα χέρια του ένα πολύ δύσκαμπτο και στιβαρό πλαίσιο που δεν χρειάζεται ειδικές τεχνικές και εργαλεία για να κατασκευαστεί. Για αυτό ακριβώς τον λόγο που ενώ η τεχνολογία και η μηχανική έχει προχωρήσει αρκετά, το spaceframe παραμένει πάρα πολύ δημοφιλές όσο έχουμε να κάνουμε με κατασκευές όπου τόσο η ταχύτητα κατασκευής, ο χώρος της καμπίνας και η καλύτερη δυνατή δυσκαμψία και το βάρος μπορούν να θυσιαστούν για χάρη της χρήσης πολύ βασικών υλικών και τεχνικών.

Πλαίσιο Τύπου Ψαροκόκκαλο

Ένα πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος λειτουργεί διαμοιράζοντας όλα τα φορτία που δέχεται στο σύνολο της κατασκευής. Το πλαίσιο Ψαροκόκκαλο (Backbone αγγλιστί) είναι στην ουσία ένα πλαίσιο χωροδικτυώματος με την διαφορά ότι αντί για σωλήνες που δρουν ως στηρίγματα όπως αναλύσαμε παραπάνω, χρησιμοποιούνται αυτή την φορά ελάσματα μετάλλου, κατάλληλα διαμορφωμένα. 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 πλαισίου. Στην πράξη ο κορμός αυτός είναι κατασκευασμένος από μεταλλικά ελάσματα που έχουν διπλωθεί και συγκολληθεί κατάλληλα, δημιουργώντας έτσι έναν κεντρικό τομέα τετραγωνικής διατομής. Στο σασί της πρώτης Lotus Elan (που φαίνεται στην εικόνα 2.7), φαίνεται η εφαρμογή όσων αναφέρονται παραπάνω, αφού στην πλειονότητα της η κατασκευή έχει γίνει από διπλωμένα ελάσματα μετάλλου.



Εικόνα 2.7: Πλαίσιο-Backbone της Lotus Elan

Ένα σασί τύπου Ψαροκόκκαλο μπορεί στην πραγματικότητα να είναι πιο στιβαρό και δύσκαμπτο από ένα αντίστοιχο χωροδικτυώματος ίδιου βάρους. Παρ' όλα αυτά όμως, επειδή ακριβώς το πλαίσιο πρέπει να είναι πολύ στενό στον κεντρικό του τομέα, εφόσον πρέπει να χωρέσουν εκατέρωθεν τα καθίσματα, μπορεί να έχει μόνο τόση ακαμψία. Έτσι λοιπόν, λόγω αυτού του γεγονότος, η χρήση του έχει περιοριστεί σε οχήματα μικρού και μεσαίου μεγέθους, αφού τα μεγάλα και δυνατά (από άποψη ισχύος) αυτοκίνητα δεν έχουν το περιθώριο να στενέψουν από ένα σημείο και μετά προκειμένου να φιλοξενήσουν ένα πλαίσιο τέτοιου τύπου. Αυτό δεν ισχύει και για οχήματα πολύ μεγάλου μεγέθους, όπως για παράδειγμα το στρατιωτικό φορτηγό της Τσεχοσλοβάκις Tatra που φαίνεται παρακάτω (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Στρατιωτικό φορτηγό της Tatra

Μια σημαντική σημείωση για το συγκεκριμένο σασί είναι ότι δεδομένου ότι το βασικό του κομμάτι είναι στο κέντρο, τα περιφερειακά panels του οχήματος μπορούν να κατασκευαστούν από ελαφριά υλικά όπως για παράδειγμα από αλουμίνιο. Βέβαια, όσο καλό είναι αυτό για το βάρος του αυτοκινήτου (άρα και για τις επιδόσεις του) άλλο τόσο κρίνεται μη-ασφαλές στην περίπτωση πλευρικής πρόσκρουσης.

Πλαίσια τύπου "πατώματος" και "μπανιέρας" (Floor pans και Tubs)

Έχοντας αναφερθεί στην χρήση ελασμάτων μετάλλου στην κατασκευή πλαισίων αυτοκινήτου, επόμενο είναι να γίνει αναφορά στον σχεδιασμό ενός πλαισίου που κατασκευάζεται εξ ολοκλήρου από ελάσματα και μεγάλες επιφάνειες μετάλλου, είτε έχοντας διπλωθεί είτε έχοντας συγκολληθεί μεταξύ τους. Ο εύκολος τρόπος να γίνει το παραπάνω είναι να πρεσαριστούν σε κατάλληλα καλούπια δύο μεγάλης επιφάνειας ελάσματα μετάλλου έτσι ώστε να σχηματιστούν ραβδώσεις σε συγκεκριμένα σημεία και έπειτα να ενωθούν μεταξύ τους (σαν σάντουιτς) προκειμένου οι ραβδώσεις να σχηματίσουν τελικά σωλήνες πάνω στο πλαίσιο. Με αυτό τον τρόπο έχει δημιουργηθεί ένα σασί τύπου σκάλας χωρίς όμως να χρειαστεί να ασχοληθεί κανείς με την ευθυγράμμιση και συγκόλληση των δοκών. Παρακάτω φαίνεται το πλαίσιο-πάτωμα ενός VW Beetle (εικόνα 2.9) -αξίζει να παρατηρήσει κανείς τον τρόπο με τον οποίο τα δύο ελάσματα μετάλλου, που έχουν πρεσαριστεί μεταξύ τους, σχηματίζουν στον κεντρικό κορμό ένα πλαίσιο μορφής Ψαροκόκκαλο που διατρέχει όλο το μήκος του αυτοκινήτου.



Εικόνα 2.9: Το πλαίσιο του VW Beetle 1ης γενιάς

Με τα πλαίσια αυτής της μορφής εξασφαλίζονται τα πολλά πλεονεκτήματα ενός πλαισίου σκάλας (όπως για παράδειγμα η προσαρμοστικότητα σε πολλούς διαφορετικούς τύπους αμαξωμάτων) χωρίς όμως τα αντίστοιχα μειονεκτήματα της κατασκευής ενός τέτοιου πλαισίου, δηλαδή τον απαιτούμενο χρόνο καθώς και την αντίστοιχη ενέργεια που απαιτείται για να ευθυγραμμιστούν προσεκτικά τα πολλά διαφορετικά εξαρτήματα.

Μία εξέλιξη στο παραπάνω σχέδιο είναι η κατασκευή μίας μορφής "μπανιέρας" (tub αγγλιστί) χρησιμοποιώντας ελάσματα μετάλλου ή άλλων υλικών, έτσι ώστε τα τοιχώματα αυτής να προσθέτουν ακαμψία στο όχημα. Το σασί της Lotus Elise (εικόνα 2.10) είναι ένα πολύ καλό παράδειγμα της παραπάνω φιλοσοφίας, κατασκευασμένο από κολλημένα μεταξύ τους κομμάτια αλουμινίου.

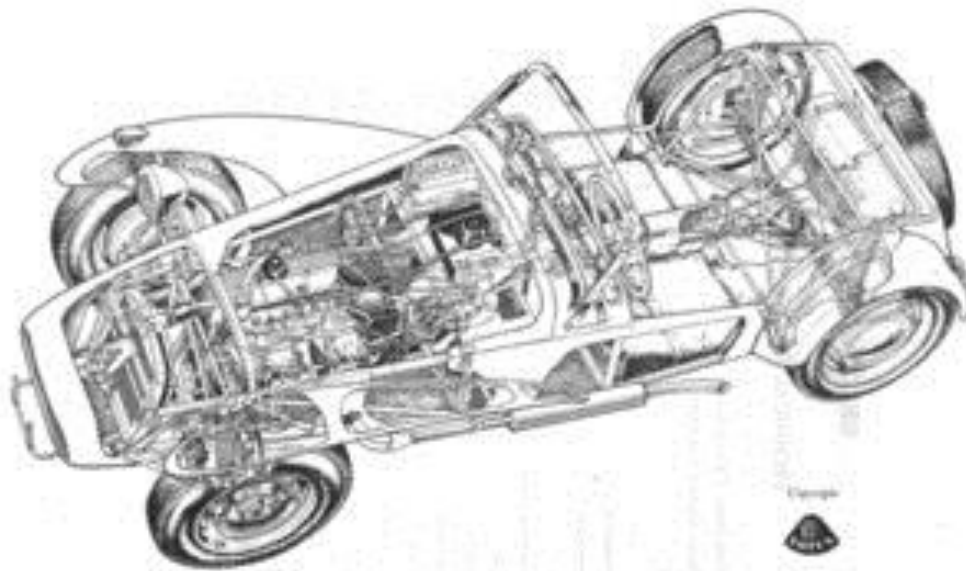


Εικόνα 2.10: Το πλαίσιο-μπανιέρα της Lotus Elise

Αυτό δίνει στο αυτοκίνητο ένα πολύ στιβαρό και άκαμπτο πλαίσιο, πάνω στο οποίο μπορούν να τοποθετηθούν όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματά του.

Αυτοφερόμενα πλαίσια (Monocoque Chassis)

Στους τύπους πλαισίων που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής το πλαίσιο του αυτοκινήτου δέχεται όλα τα φορτία ενώ τα πλευρικά κομμάτια και πάνελ δεν είχαν καμία συμμετοχή στην απορρόφηση αυτών των φορτίων. Το πρόβλημα με το παραπάνω είναι ότι όσο ελαφρύ και να είναι το σασί, εν τέλει το βάρος του αυτοκινήτου αυξάνεται όσο προστίθενται τα υπόλοιπα κομμάτια του πάνω στην κατασκευή. Για το παραπάνω πρόβλημα υπάρχουν δύο λύσεις. Πρώτον, θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο ελάχιστος αριθμός πλευρικών πάνελ χρησιμοποιώντας μόνο το ελαφρύτερο υλικό που θα είχαμε διαθέσιμο (για παράδειγμα πολύ λεπτά ελάσματα αλουμινίου). Μία εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας είναι η Lotus Seven που φαίνεται παρακάτω (εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11: Το αυτοφερόμενο πλαίσιο της Lotus Seven

Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν και τα πάνελ του αμαξώματος σαν μέρος του πλαισίου, προσδίδοντας έτσι επιπλέον ακαμψία και ασφάλεια χωρίς μεγάλη αύξηση στο βάρος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μπορεί να γίνει χρήση ελασμάτων μετάλλου για την κατασκευή τόσο του πλαισίου όσο και των πλευρικών πάνελ και υπόλοιπων κομματιών του αμαξώματος. Επόμενο είναι λοιπόν να χρησιμοποιηθούν τα διάφορα πάνελ σαν μέρη του σασί, εκμηδενίζοντας έτσι το έξτρα βάρος του να υπάρχουν και τα δύο στο ίδιο αυτοκίνητο. Το παραπάνω ονομάζεται αυτοφερόμενο πλαίσιο. Σε αυτή την περίπτωση αντί να πρεσαριστούν μεταξύ τους μόνο τα κομμάτια που αποτελούν το σασί, γίνεται το ίδιο ακριβώς και στην περίπτωση των πάνελ. Έτσι λοιπόν, εάν το πλαίσιο-πάτωμα είναι ουσιαστικά ένα

σασί τύπου σκάλας απλά κατασκευασμένο από πρεσαριστά κομμάτια μετάλλου, αντίστοιχα το αυτοφερόμενο σασί είναι ένα με αντίστοιχο τρόπο κατασκευασμένο space-frame. Επιπρόσθετα, επειδή από πλευράς κατεργασιών είναι πολύ εύκολο να πρεσαριστούν διαφορετικά και περίπλοκα σχέδια πάνω στα κομμάτια που αποτελούν το πλαίσιο και τα πάνελ αντί να χρησιμοποιούνται μόνο ευθείς σωλήνες και δοκοί, δεν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά τα σημεία τοποθέτησης των στηριγμάτων του σασί με αποτέλεσμα να είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο που όχι μόνο έχει πολύ μεγάλη ακαμψία αλλά επιπλέον έχει και πολύ μεγάλο εσωτερικό χώρο.

Έτσι, με τη δυνατότητα κατασκευής ελαφρών, μεγάλης ακαμψίας πλαισίων που ταυτόχρονα παρέχουν μεγάλο εσωτερικό χώρο αλλά είναι και πολύ εύκολα στην κατασκευή τους (κυρίως δεδομένου της αυτοματοποίησης των σημερινών γραμμών παραγωγής), το αυτοφερόμενο σασί είναι σήμερα η τεχνική με την οποία κατασκευάζονται τα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής. Ακόμα κι αν το πλαίσιο αυτό δεν έχει την δύναμη ενός σασί τύπου σκάλας, ή το βάρος και την ακαμψία άλλων σχεδίων, το σχέδιο αυτό υπερέχει τελικά εάν κανείς λάβει υπόψη το κόστος και την ευκολία παραγωγής και κατά πάσα πιθανότητα αυτό δεν πρόκειται να αλλάξει για πολλά χρόνια ακόμα.



Εικόνα 2.12: Σύγχρονο αυτοφερόμενο πλαίσιο

Ακόμα κι αν το λεπτότερο συγκριτικά υλικό που χρησιμοποιείται στα αυτοφερόμενα πλαίσια είναι πιο επιρρεπές στην κάμψη, αυτό ακριβώς οδήγησε στην ανάπτυξη των λεγόμενων ζωνών παραμόρφωσης στα σημερινά αυτοκίνητα με αποτέλεσμα να είναι πολύ πιο ασφαλή σε σχέση με τα παλαιότερα. Επιτρέποντας στην ενέργεια κρούσης να διαμοιραστεί σε πολλά

κομμάτια του πλαισίου, καταστρέφοντας τα κατά τη διάρκεια, ο χρόνος που περνά όσο γίνεται το παραπάνω μειώνει τα φορτία που τελικά ασκούνται στους επιβαίνοντες. Το αποτέλεσμα είναι φυσικά η σχεδόν ολοκληρωτική καταστροφή του πλαισίου. Επιπρόσθετα, αυτές οι ζώνες παραμόρφωσης μπορούν να κατασκευαστούν κατάλληλα προκειμένου να παραμορφώνονται προς πολλές κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η κατασκευή ενός οχήματος που παρέχει υψηλή προστασία και στην πλευρική πρόσκρουση. Αυτό συμβαίνει ακριβώς διότι με τον τρόπο κατασκευής του πλαισίου μπορεί να καθοριστεί προς ποια κατεύθυνση θα παραμορφωθεί ένα κομμάτι του πλαισίου και αντίστοιχα προς ποια κατεύθυνση θα είναι πιο δύσκαμπτο.

Υποπλαίσια

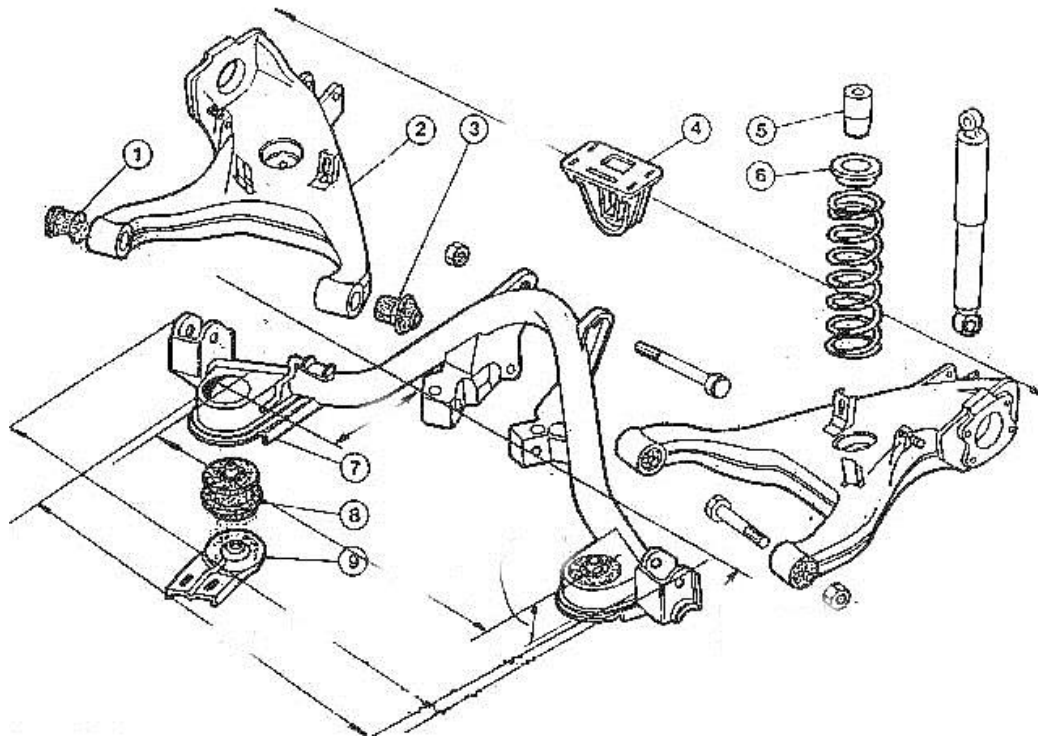
Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, ένα όχημα θα έχει τα περισσότερα μεγάλα σε μέγεθος εξαρτήματά του πάνω στο σασί του. Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα υποπλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό. Το τελευταίο είναι ένα ξεχωριστό, μικροπλαίσιο που κουβαλά συγκεκριμένα εξαρτήματα, όπως για παράδειγμα τον κινητήρα ή το πίσω σύστημα ανάρτησης, και εν συνεχεία τοποθετείται πάνω στο βασικό πλαίσιο. Η πιο κοινή εφαρμογή των υποπλαισίων είναι σε αυτοκίνητα κατηγορίας μίνι (όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία), όπου στο εμπρόσθιο υποπλαίσιο (εικόνα 2.13) βρίσκεται ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα ανάρτησης, ενώ στο οπίσθιο υποπλαίσιο (εικόνα 2.14) βρίσκεται η πίσω ανάρτηση. Βέβαια και αυτοκίνητα άλλων κατηγοριών κάνουν χρήση απλών υποπλαισίων ως σημεία στερέωσης της πίσω ανάρτησης.



Εικόνα 2.13: Εμπρόσθιο υποπλαίσιο

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, χρήση υποπλαισίων γίνεται σε αυτοφερόμενα σχέδια πλαισίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα των υποπλαισίων έχει να κάνει με την συναρμολόγηση: δίνει την δυνατότητα ξεχωριστής συναρμολόγησης εξαρτημάτων πριν την τελική συναρμολόγηση του οχήματος. Επιπλέον παρέχει την προσαρμοστικότητα του πλαισίου σκάλα: μπορεί να γίνει χρήση της ίδιας συνδεσμολογίας υποπλαισίου με πολλούς διαφορετικούς τύπους αμαξωμάτων ενώ ταυτόχρονα τα προτερήματα όσον αφορά στην ακαμψία σημείων πρόσδεσης της ανάρτησης και άλλων εξαρτημάτων παραμένει. Στα

σύγχρονα σχέδια βέβαια το βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πολύ μικρών ανοχών στο υποπλαίσιο, με αποτέλεσμα η ακρίβεια της ευθυγράμμισης με τον κεντρικού τομέα του πλαισίου να είναι λιγότερο δύσκολη.



Εικόνα 2.14: Οπίσθιο υποπλαίσιο

2.2 Εισαγωγή στα πλαίσια αυτοκινήτων - Υλικά κατασκευής

Το πιο κλασικό υλικό κατασκευής πλαισίων αυτοκινήτου είναι το ατσάλι σε διαφορετικές μορφές ανάλογα την εφαρμογή. Με το πέρασμα του χρόνου χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά, η πλειονότητα των οποίων θα καλυφθεί σε αυτό το κεφάλαιο.

Ατσάλι	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Φθηνό	Μικρή αντοχή στην διάβρωση
	Υψηλή διαθεσιμότητα	Υψηλό βάρος
	Υψηλή ακαμψία και αντοχή	
	Υψηλό όριο πλαστικής παραμόρφωσης	

Αλουμίνιο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Μικρό βάρος (πυκνότητα περίπου στο 35% εκείνης του ατσαλιού)	Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό πλαισίων από αλουμίνιο αφού έχει πολύ μικρότερη ακαμψία σε σχέση με το ατσάλι
	Υψηλό όριο θραύσης δεδομένης της πυκνότητάς του	
	Υψηλή αντοχή στην διάβρωση	

Τιτάνιο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Υψηλή αντοχή στην κόπωση	Υψηλό κόστος
	Υψηλή αντοχή στην διάβρωση	

Υαλονήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Δυνατότητα δημιουργίας πληθώρας σχεδίων με χρήση κατάλληλων καλουπιών	Μικρή ακαμψία και αντοχή
	Μικρό βάρος	Υψηλός χρόνος επεξεργασίας
		Επιρρεπές σε πολλά χημικά καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες

Ανθρακονήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Δυνατότητα δημιουργίας πληθώρας σχεδίων με χρήση κατάλληλων καλουπιών	Υψηλό κόστος
	Μικρό βάρος	Απαιτείται πολύς χρόνος επεξεργασίας καθώς και πολύ εξειδικευμένοι τεχνίτες
	Υψηλή ακαμψία και αντοχή	

2.3 Εισαγωγή στα πλαίσια αυτοκινήτων - Τύποι συγκολλήσεων

Ανεξάρτητα από τον τύπο σασί που χρησιμοποιείται για ένα αυτοκίνητο ή το υλικό κατασκευής, κάποια στιγμή τα διάφορα κομμάτια θα χρειαστεί να συγκολληθούν μεταξύ τους. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε όλους τους διαφορετικούς τρόπους που μπορεί να γίνει αυτό.

Συγκόλληση Ραφής	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Πολύ ισχυρή κόλληση	Υψηλός χρόνος επεξεργασίας
	Δυνατότητα αυτοματοποίησης με χρήση ρομπότ για γραμμές μαζικής παραγωγής	Υψηλό κόστος
		Σε περίπτωση που συγκολλούνται λεπτά υλικά, υπάρχει η πιθανότητα παραμόρφωσης

Σημειακή Ηλεκτροσυγκόλληση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Ευκολία και ταχύτητα	Μικρή ισχύς συγκόλλησης
	Δυνατότητα αυτοματοποίησης με χρήση ρομπότ για γραμμές μαζικής παραγωγής	Δεν προστατεύεται το σημείο συγκόλλησης με αποτέλεσμα να είναι επιρρεπές στη διάβρωση

2.4 Σύγχρονα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων παραγωγής

Έπειτα από έρευνα στο διαδίκτυο δύο είναι τα αυτοκίνητα που πληρούν τις προϋποθέσεις που τέθηκαν, δηλαδή να είναι διαθέσια, ηλεκτροκίνητα και να παρέχουν καλή ασφάλεια στους επιβαίνοντες: το Renault Twizy και το Smart Fortwo Electric Drive.

2.4.1 Renault Twizy

Το Twizy είναι ένα μικρό διαθέσιο ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατασκευασμένο από τη γαλλική Renault. Ακολουθούν μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του:

Μήκος: 2,34 μέτρα

Πλάτος: 1,23 μέτρα

Ύψος: 1,46 μέτρα

Βάρος: 450 κιλά

Κινητήρας: εγκάρσια τοποθετημένος ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας με ισχύ 13 kW.

Μπαταρία: χωρητικότητα: 7 kWh, βάρος: 100 κιλά

Στο Twizy χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο τύπου χωροδικτυώματος (εικόνα 2.25) κατασκευασμένο από τετραγωνικής διατομής ατσάλινους σωλήνες. Τα δύο καθίσματα είναι τοποθετημένα το ένα πίσω από το άλλο, ενώ ακριβώς από κάτω τους βρίσκονται οι μπαταρίες του οχήματος. Ο κινητήρας είναι τοποθετημένος στον πίσω άξονα και συνδέεται με τους τροχούς μέσω ενός κιβωτίου υποπολλαπλασιασμού.



Εικόνα 2.25: Το πλαίσιο του Renault Twizy

Παρακάτω φαίνεται μία φωτογραφία του συνόλου μπαταρία-κινητήρας-κιβώτιο (εικόνα 2.26):



Εικόνα 2.26: Σύνολο μπαταρίας-κινητήρας-κιβώτιο ταχυτήτων του Renault Twizy

Τέλος, εδώ φαίνεται ολόκληρο το όχημα σε φωτογραφία επεξεργασμένη κατάλληλα, όπου γίνεται καλύτερα αντιληπτός ο σχεδιασμός του πλαισίου (εικόνα 2.27).



Εικόνα 2.27: Οι μηχανισμοί παθητικής ασφάλειας του Renault Twizy

2.4.2 Smart Fortwo Electric Drive

Το Smart Fortwo Electric Drive είναι ένα διθέσιο, ηλεκτρικό αυτοκίνητο πόλης. Δεν έχει καμία διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες εκδόσεις του μοντέλου, με μόνη εξαίρεση το γεγονός ότι για την κίνησή του χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός κινητήρας.

Ακολουθούν μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά του:

Μήκος: 2,69 μέτρα

Πλάτος: 1,56 μέτρα

Ύψος: 1,54 μέτρα

Βάρος: 900 κιλά

Κινητήρας: εγκάρσια τοποθετημένος, υδρόψυκτος, μόνιμα τριφασικός, ηλεκτροκινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, μέγιστη απόδοση: 55 kW

Μπαταρία: χωρητικότητα 17 kWh, βάρος: 100 κιλά

Στο Smart Fortwo χρησιμοποιείται ένα αυτοφερόμενο πλαίσιο κατασκευασμένο από ατσάλι. Όλα τα τμήματα του πλαισίου είναι στην ουσία πρεσαριστά ελάσματα ατσαλιού που με τη χρήση καλουπιών έχουν πάρει το επιθυμητό σχήμα. Αναλυτικά η διαδικασία εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.1. Το πλαίσιο αποτελείται από έναν κεντρικό κλωβό ασφαλείας, δύο ατσάλινες δοκούς μπροστά που δρουν ως προφυλακτήρες, ενώ τέλος το οπίσθιο τμήμα είναι ένα υπο-πλαίσιο βιδωμένο στο κεντρικό που δρα ως προφυλακτήρας αλλά και ως βάση του οπίσθιου συστήματος ανάρτησης και του κινητήρα. Η εμπρόσθια ανάρτηση αποτελείται από δύο γόνατα MacPherson ενώ η οπίσθια είναι ένας άξονας DeDion. Το πλαίσιο του Smart Fortwo προσφέρει εξαιρετική παθητική ασφάλεια στο αυτοκίνητο. Έχει αποσπάσει βαθμολογία 4 στα 5 αστεριών από τον οργανισμό Euro-NCAP για την ασφάλεια ενήλικων επιβατών. Τα καθίσματα των επιβατών βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο, ενώ από κάτω τους βρίσκονται οι μπαταρίες του οχήματος. Τέλος, ο κινητήρας είναι τοποθετημένος στον πίσω άξονα και συνδέεται με τους τροχούς μέσω ενός κιβωτίου υποπολλαπλασιασμού.

Παρακάτω φαίνονται κάποιες φωτογραφίες του πλαισίου του Smart Fortwo.



Εικόνα 2.28: Οπίσθια-πλαινή όψη του κλωβού ασφαλείας του Smart Fortwo

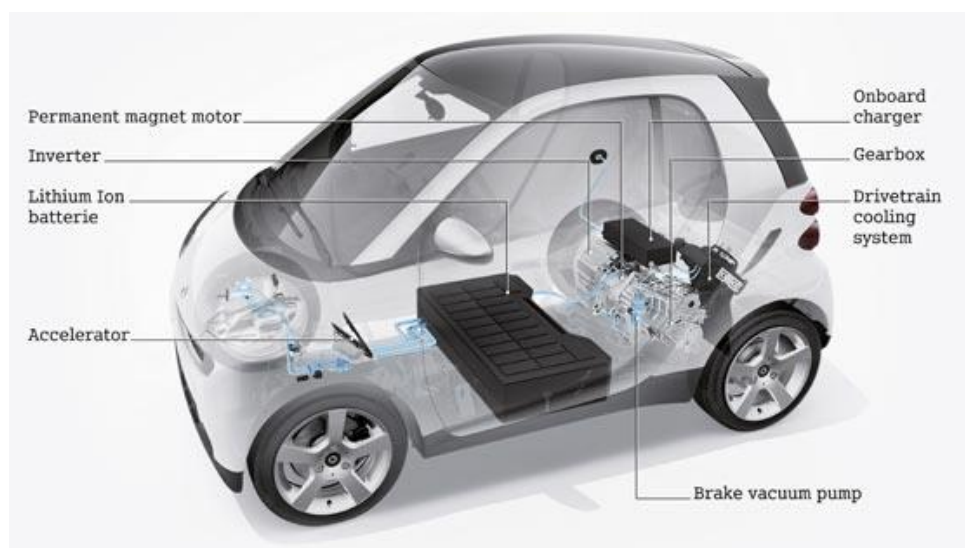


Εικόνα 2.29: Εμπρόσθια-πλαινή όψη του κλωβού ασφαλείας του Smart Fortwo



Εικόνα 2.30: Πλάγια όψη του κλωβού ασφαλείας του Smart Fortwo

Στην παραπάνω φωτογραφία (εικόνα 2.30) φαίνονται οι προφυλακτήρες με μπλε χρώμα, με κόκκινο και κίτρινο χρώμα φαίνεται ο βασικός κορμός του κλωβού ασφαλείας, ενώ αξίζει να παρατηρηθεί το υποπλαίσιο στο οπίσθιο μέρος του αυτοκινήτου.



Εικόνα 2.31: Σύνολο μπαταρίες-κινητήρας-κιβώτιο του Smart Fortwo

Κεφάλαιο 3: Σχεδιασμός

Κεφάλαιο 3.1: Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο στόχος της εργασίας είναι σε πρώτη φάση ο σχεδιασμός ενός πλαισίου που θα πληροί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- απλότητα κατασκευής
- ευκολία επεξεργασίας και εύρεσης των υλικών
- υψηλή ακαμψία και ασφάλεια

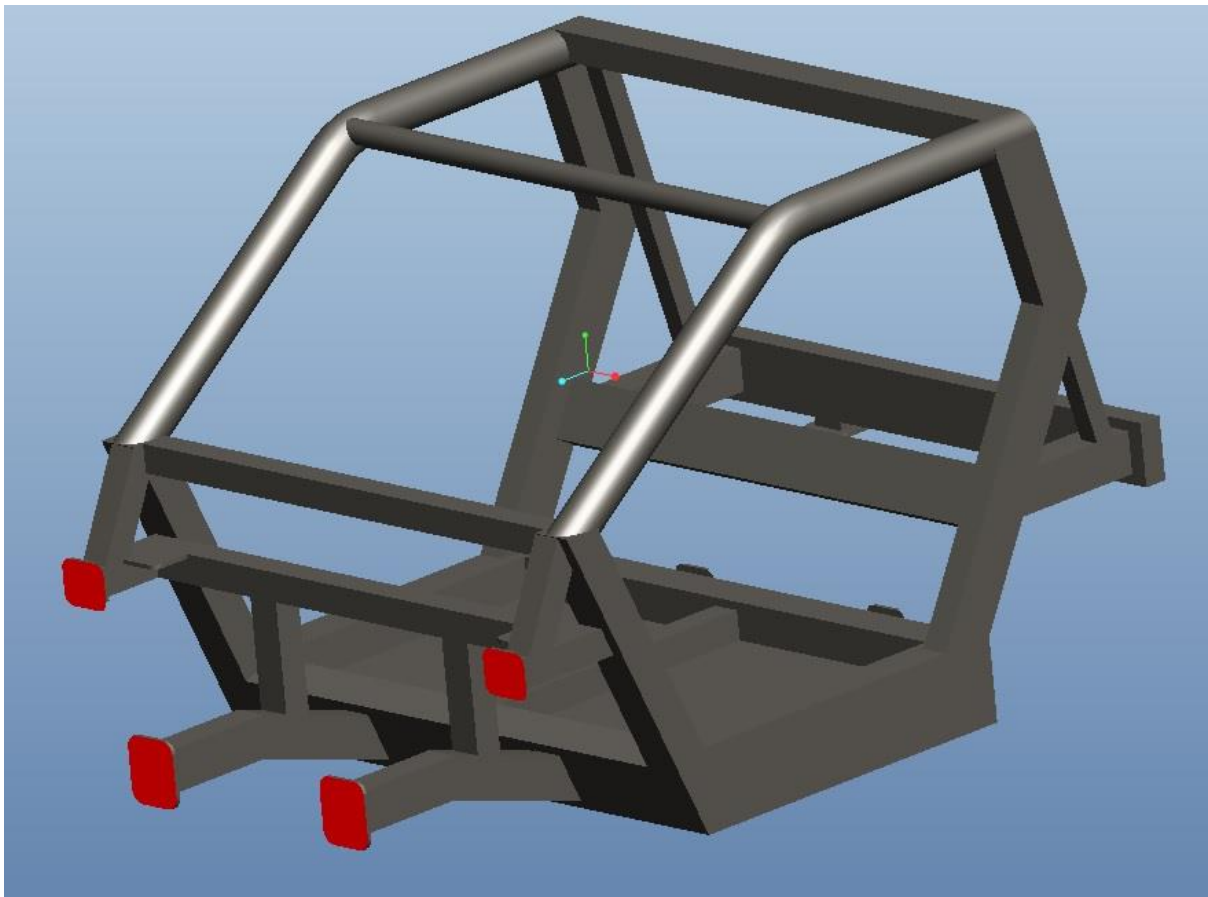
Με βάση τα παραπάνω αποφασίστηκε η χρήση του πλαισίου του Smart ως βάση. Στο στάδιο του σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων τετραγωνικής και ορθογώνιας παραλληλόγραμμης διατομής, ενώ στις περιπτώσεις που χρειάστηκαν καμπύλα τμήματα χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες κυκλικής διατομής. Το πλαίσιο που τελικά σχεδιάστηκε αποτελείται συνολικά από τρία κομμάτια:

- Το κεντρικό πλαίσιο, που αποτελεί και τον κλωβό ασφαλείας,
- Το εμπρόσθιο υποπλάισιο και
- Το οπίσθιο υποπλάισιο

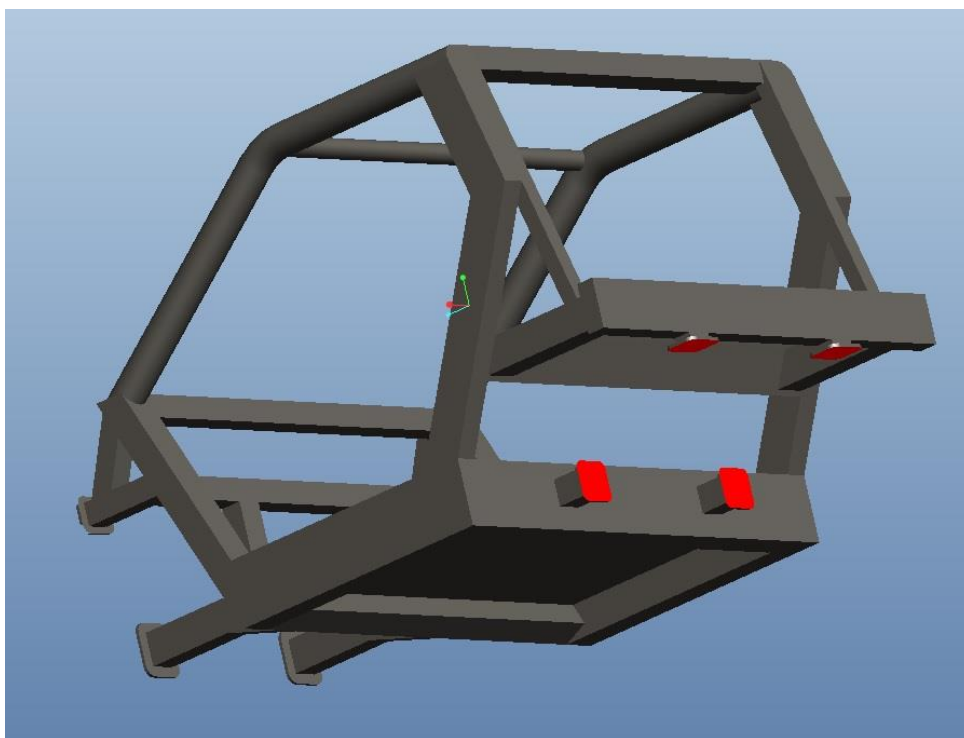
Ο κλωβός ασφαλείας είναι αυτός που φιλοξενεί τους επιβάτες καθώς επίσης και τις μπαταρίες του οχήματος. Το εμπρόσθιο υποπλάισιο αποτελείται από έναν άνω και έναν κάτω προφυλακτήρα ενώ τέλος αποφασίστηκε το οπίσθιο υποπλάισιο να εξυπηρετεί τις ίδιες ανάγκες με το υποπλάισιο του Smart, δηλαδή να αποτελεί τις βάσεις στήριξης της οπίσθιας ανάρτησης και του οπίσθιου προφυλακτήρα.

Κεφάλαιο 3.2: Σχεδιασμός κλωβού ασφαλείας

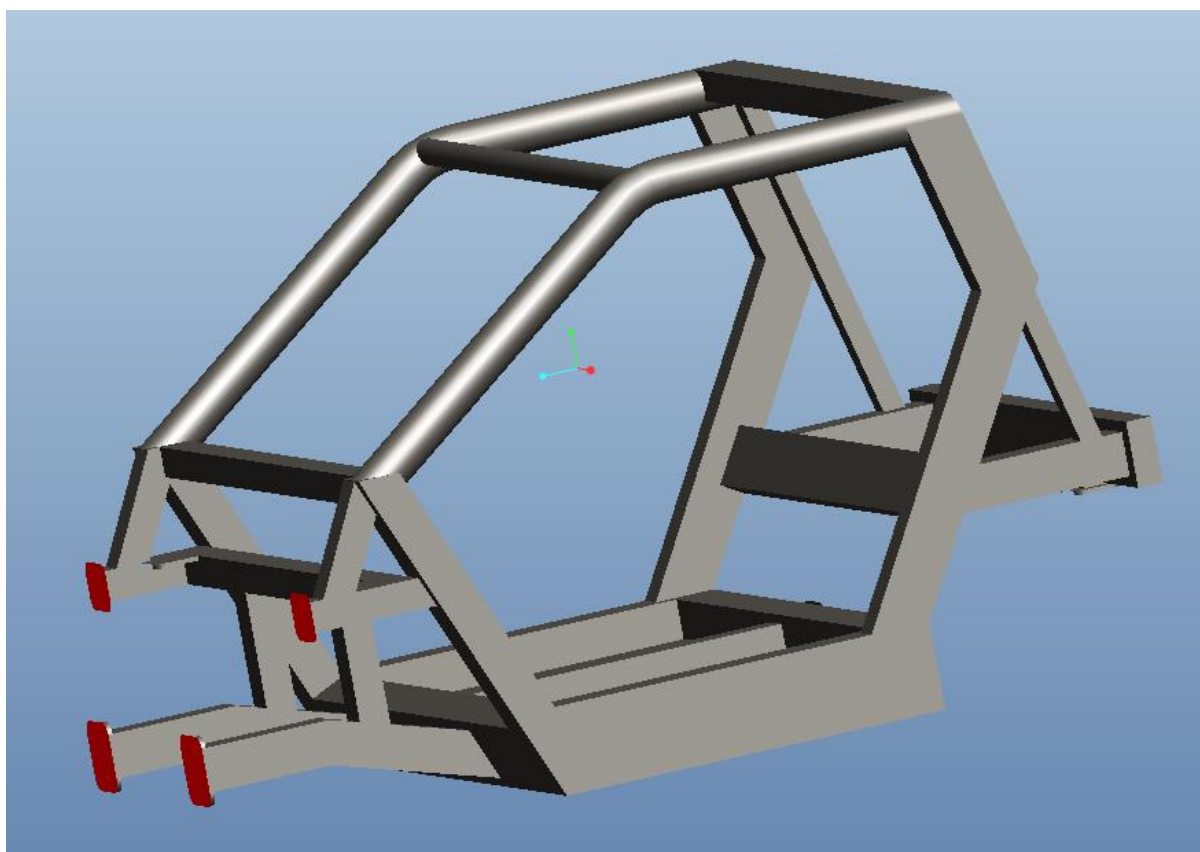
Ο κλωβός ασφαλείας του πλαισίου, όπως και τα υπόλοιπα κομμάτια του, σχεδιάστηκαν με εξειδικευμένο λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης, ώστε στη συνέχεια να είναι δυνατή η χρήση τους σε λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων Στοιχείων. Παρακάτω παρουσιάζονται διαφορετικές όψεις του κλωβού ασφαλείας (εικόνες 3.1-3.3):



Εικόνα 3.1: Τρισδιάστατη όψη του νέου πλαισίου



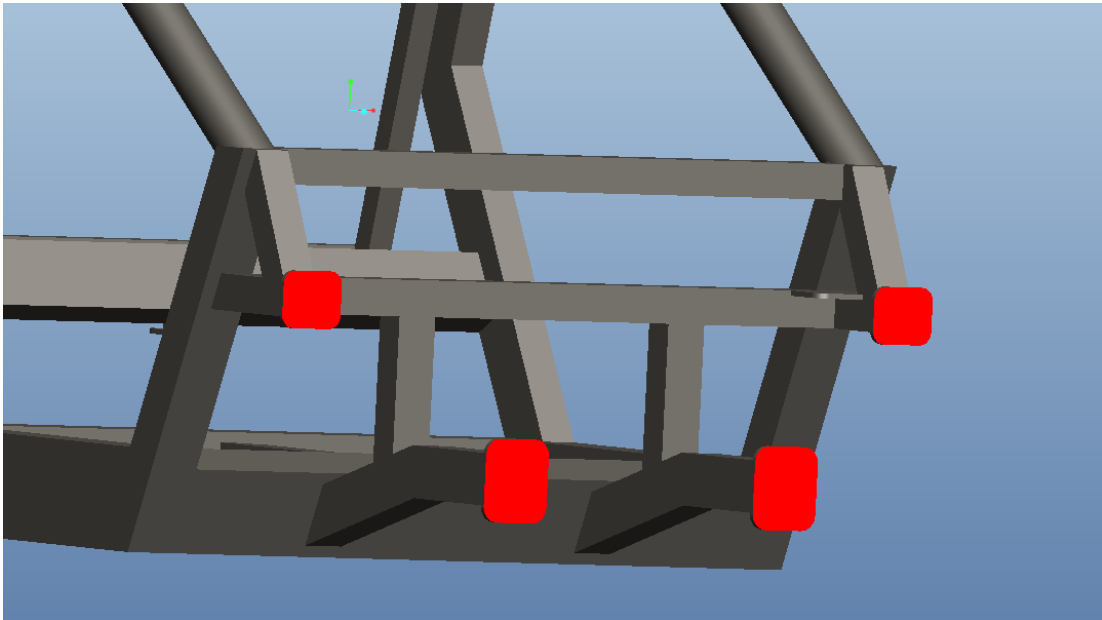
Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατη όψη του νέου πλαισίου



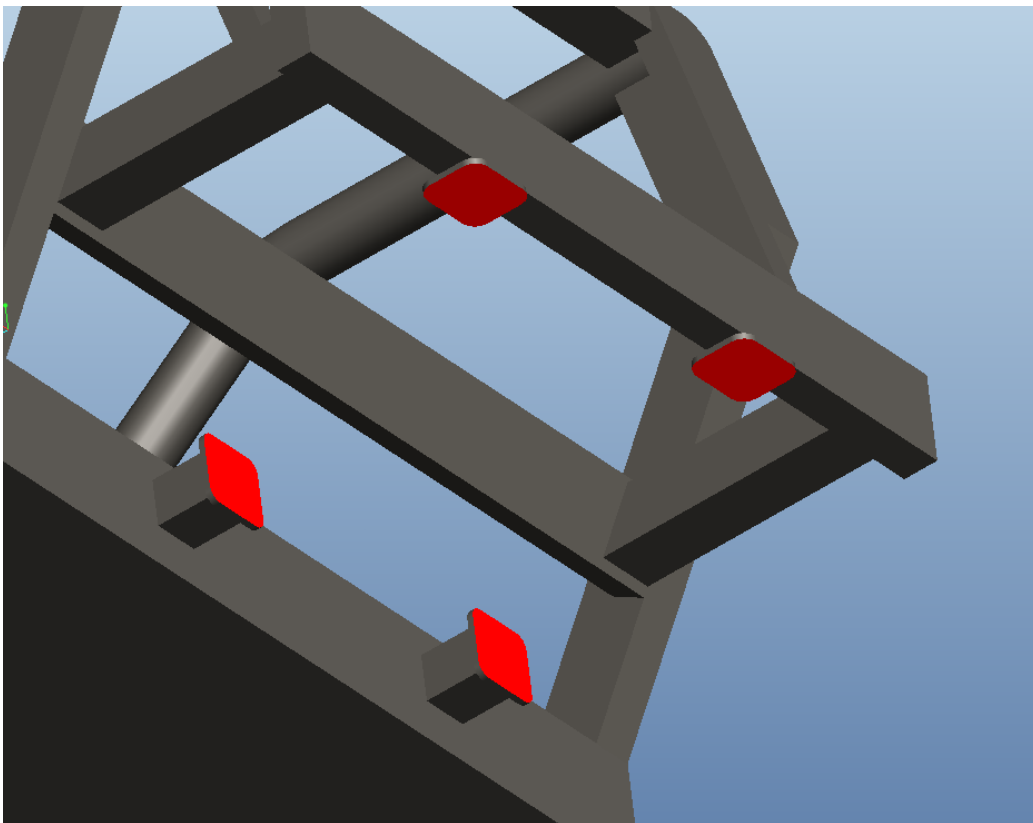
Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατη όψη του νέου πλαισίου

Ακολουθούν μερικά σχόλια για το πρώτο σχέδιο του πλαισίου:

Στις εικόνες 3.10 και 3.11 που ακολουθούν παρουσιάζονται βαμμένες με κόκκινο χρώμα οι πλάκες πρόσδεσης του εμπρόσθιου και του οπίσθιου υποπλαισίου αντίστοιχα:

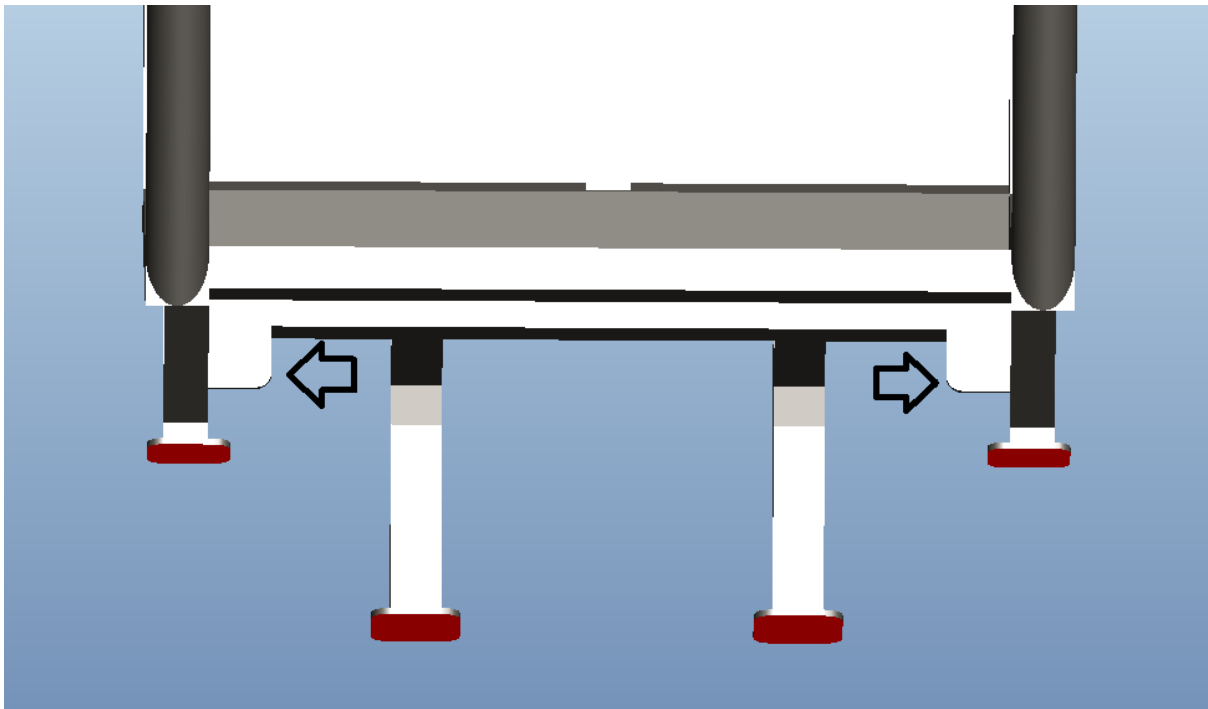


Εικόνα 3.10: Φλάντζες πρόσδεσης του εμπρόσθιου υποπλαισίου



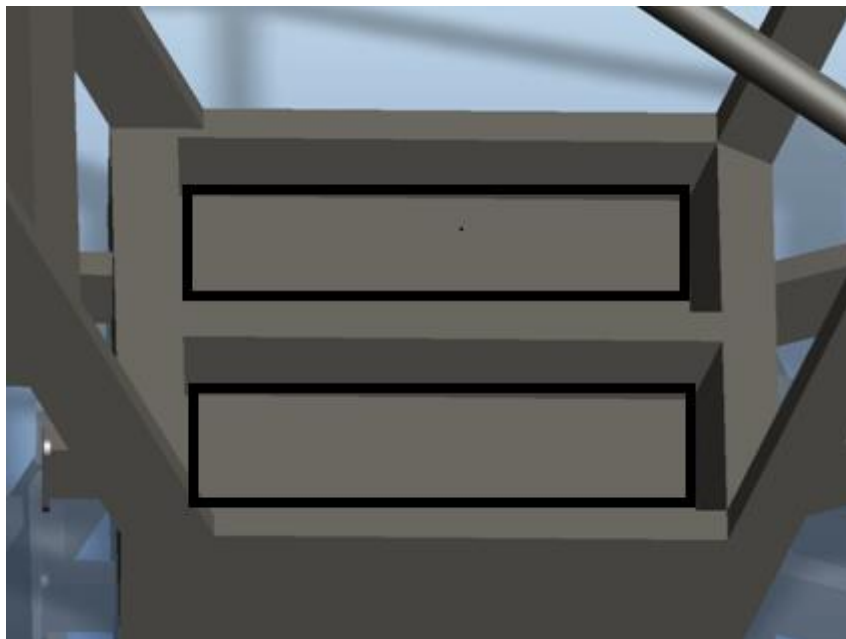
Εικόνα 3.11: Φλάντζες πρόσδεσης του οπίσθιου υποπλαισίου

Στα σημεία όπου δείχνουν τα βέλη φαίνονται τα κομμάτια στα οποία προσδένονται οι άνω βάσεις των γονάτων MacPherson της εμπρόσθιας ανάρτησης:



Εικόνα 3.12: Βάσεις των γονάτων MacPherson του μπροστινού συστήματος ανάρτησης

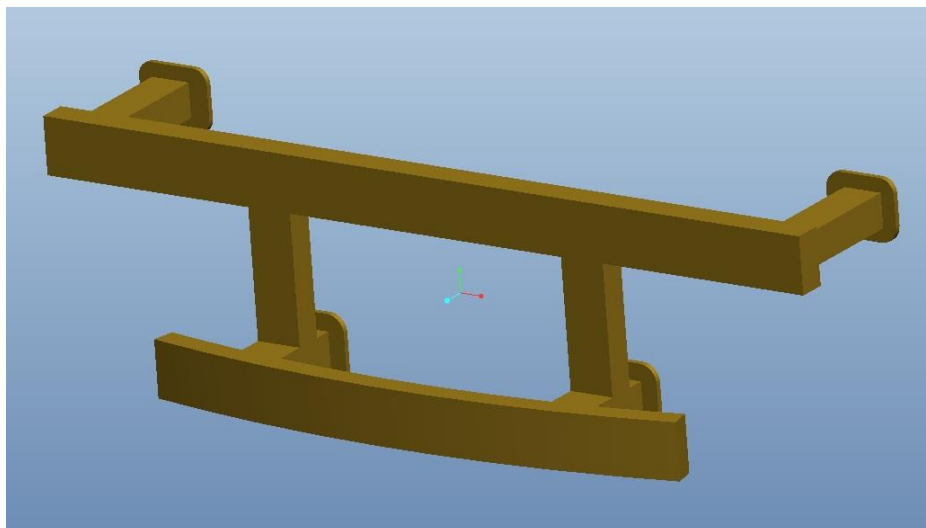
Τέλος, εδώ φαίνεται ο χώρος όπου θα τοποθετηθούν οι μπαταρίες του οχήματος, ενώ από πάνω τους θα τοποθετηθούν τα καθίσματα των επιβατών:



Εικόνα 3.13: Σημεία τοποθέτησης μπαταριών και καθισμάτων επιβαίνόντων

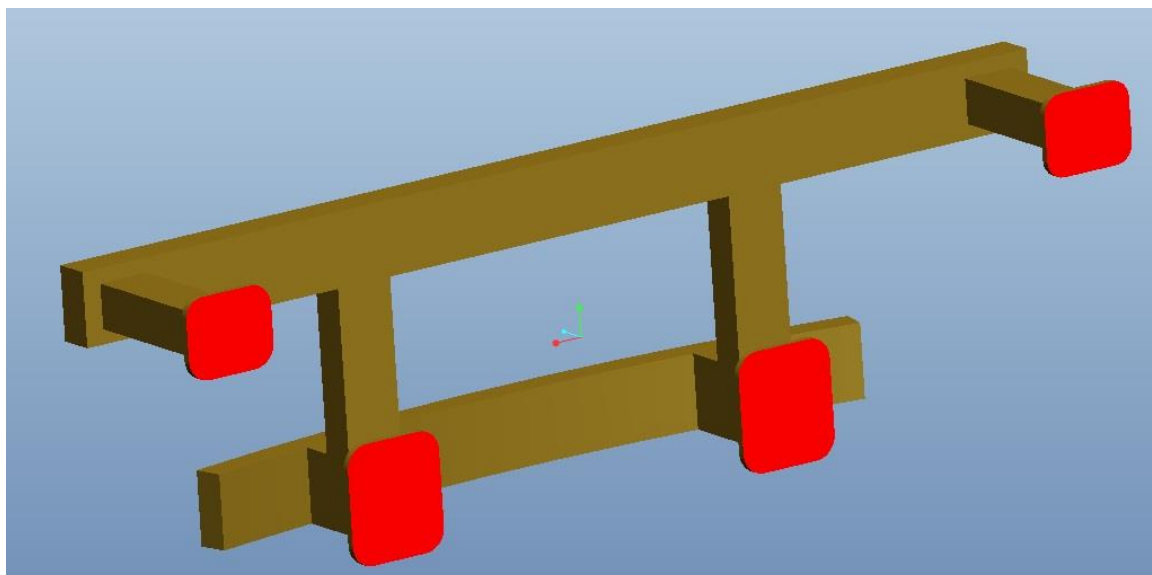
Κεφάλαιο 3.3: Σχεδιασμός Εμπρόσθιου Υποπλαισίου

Το εμπρόσθιο υποπλαίσιο είναι το βασικότερο κομμάτι για την απορρόφηση της ενέργειας πρόσκρουσης της κατασκευής. Η μπροστινή όψη του εμπρόσθιου υποπλαισίου φαίνεται στην εικόνα 3.14:



Εικόνα 3.14: Μπροστινή όψη του εμπρόσθιου υποπλαισίου

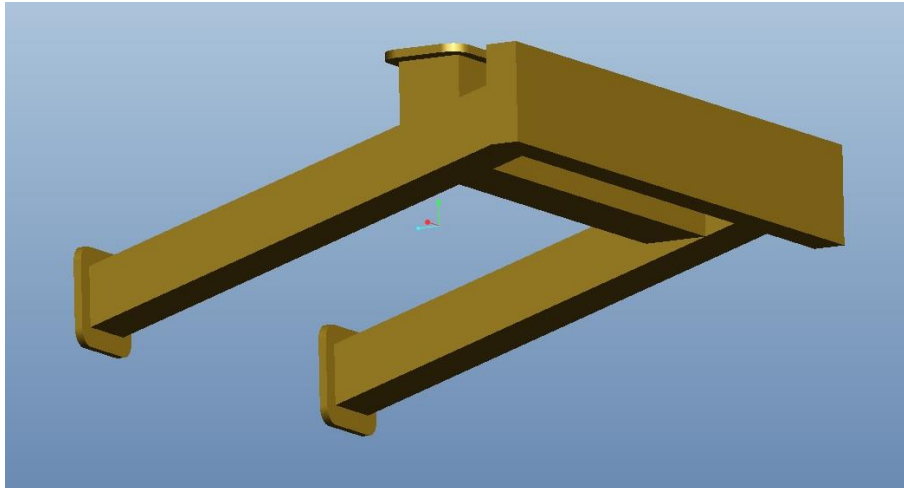
Στην εικόνα 3.15 φαίνεται το πίσω μέρος του υποπλαισίου, ενώ με κόκκινο χρώμα είναι βαμμένες οι πλάκες πρόσδεσης του υποπλαισίου πάνω στο κεντρικό πλαίσιο. Το εμπρόσθιο υποπλαίσιο συνδέεται με το κεντρικό χρησιμοποιώντας βίδες στις τέσσερις αυτές φλάντζες.



Εικόνα 3.15: Πίσω όψη του εμπρόσθιου υποπλαισίου

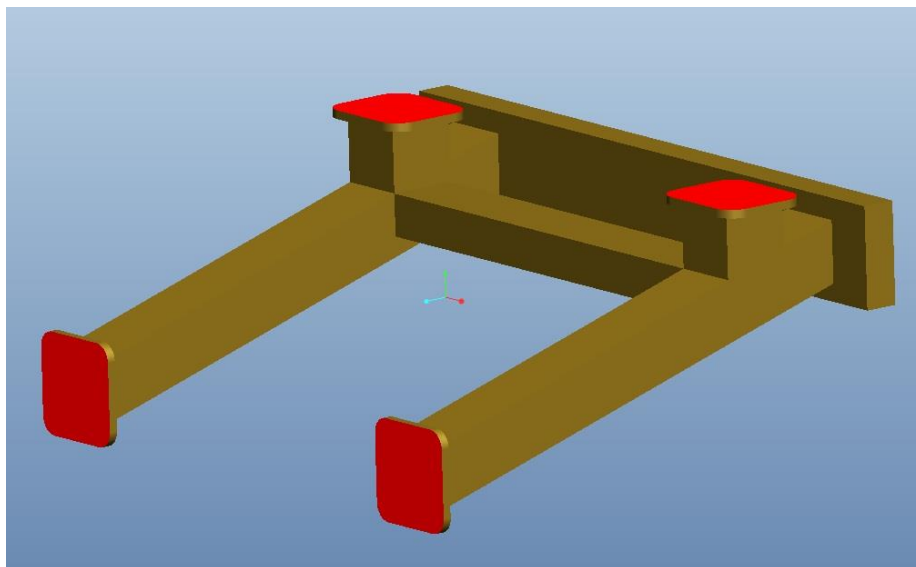
Κεφάλαιο 3.4: Σχεδιασμός Οπίσθιου Υποπλαισίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, το οπίσθιο υποπλαίσιο έχει δύο ρόλους: αφ' ενός χρησιμεύει ως βάση στήριξης του οπίσθιου συστήματος της ανάρτησης και αφ' ετέρου ως οπίσθιος προφυλακτήρας. Παρακάτω φαίνεται μία άποψη του οπίσθιου υποπλαισίου (εικόνα 3.16):



Εικόνα 3.16: Τρισδιάστατη όψη του οπίσθιου υποπλαισίου

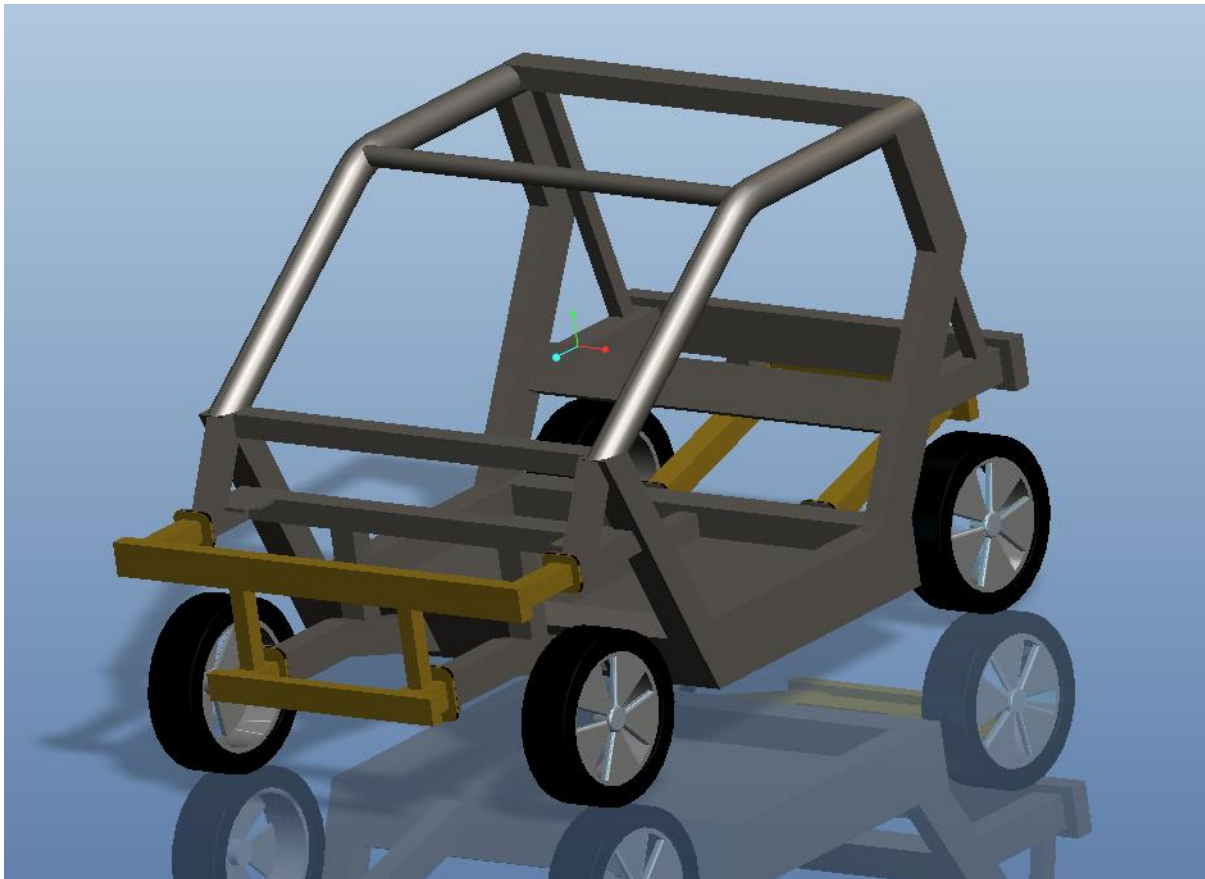
Παρακάτω φαίνεται το πίσω μέρος του υποπλαισίου (εικόνα 3.17), ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνονται τα σημεία πρόσδεσής του στο κεντρικό πλαίσιο:



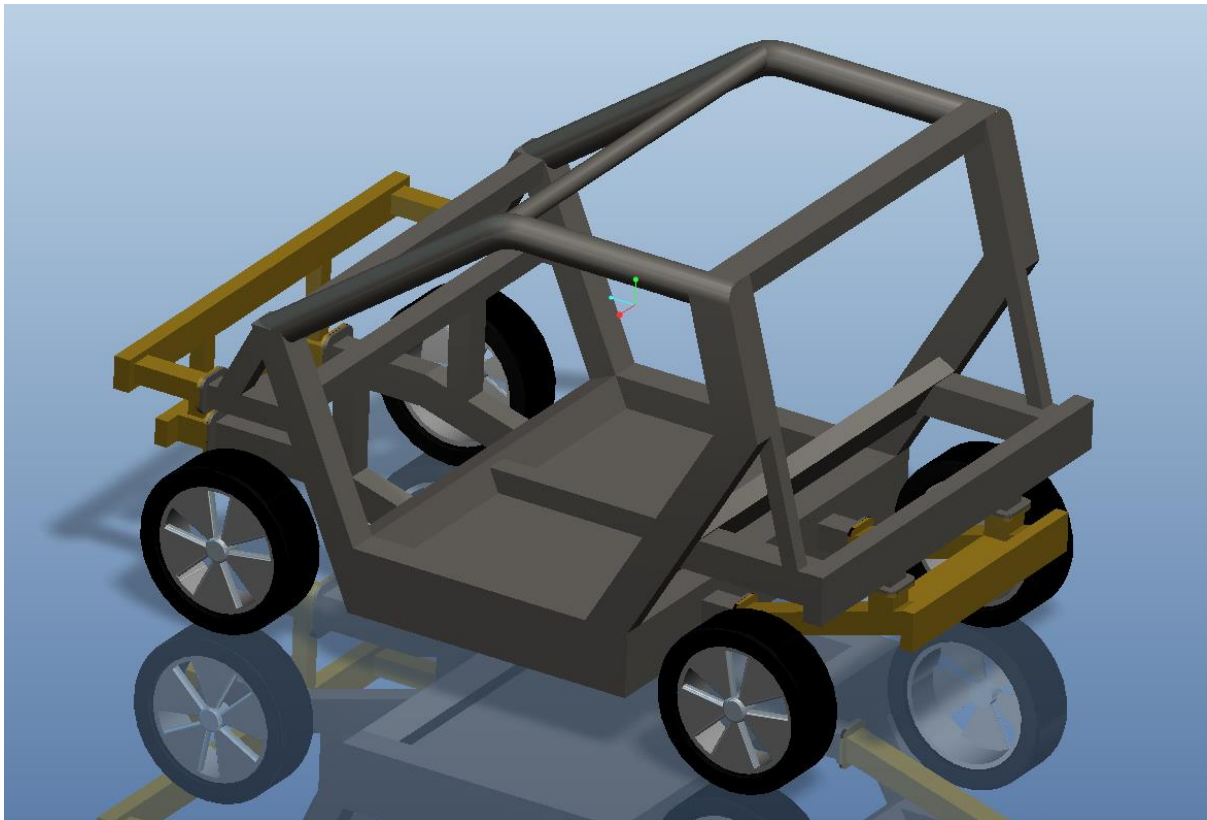
Εικόνα 3.17: Τρισδιάστατη όψη του οπίσθιου υποπλαισίου

Κεφάλαιο 3.5: Τελική συναρμογή των τμημάτων του πλαισίου

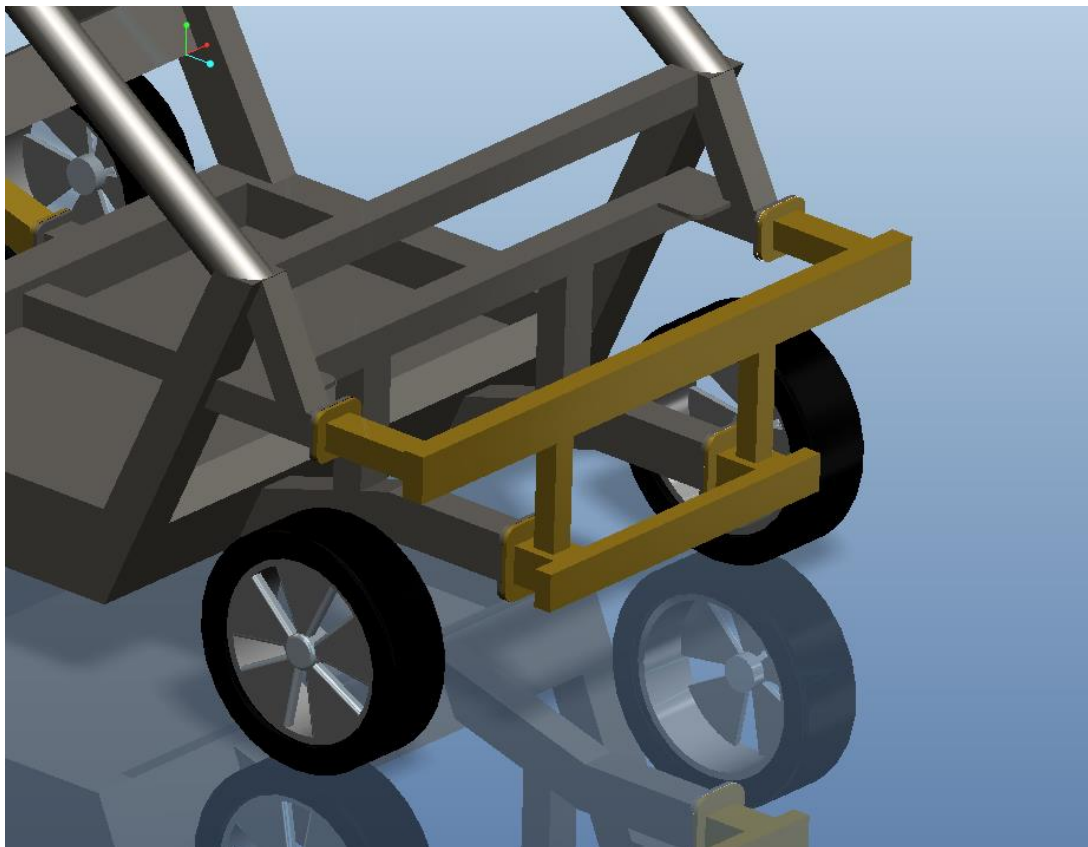
Στην τελική συναρμογή έχουν προστεθεί και τέσσερις τροχοί (εικόνες 3.18-3.22), σχεδιασμένοι με βάση τις προδιαγραφές των τροχών του Smart Fortwo προκειμένου να δοθεί έτσι μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα του οχήματος. Ακολουθούν ορισμένες όψεις του τελικού σχεδίου:



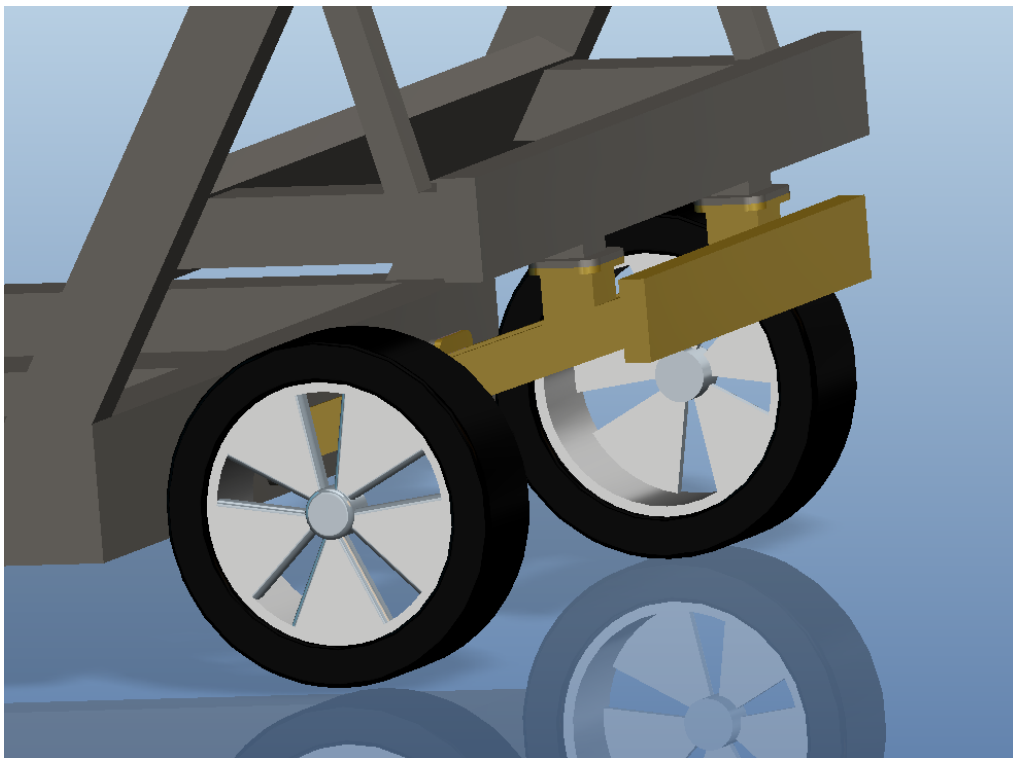
Εικόνα 3.18: Τρισδιάστατη όψη της τελικής συναρμογής του οχήματος



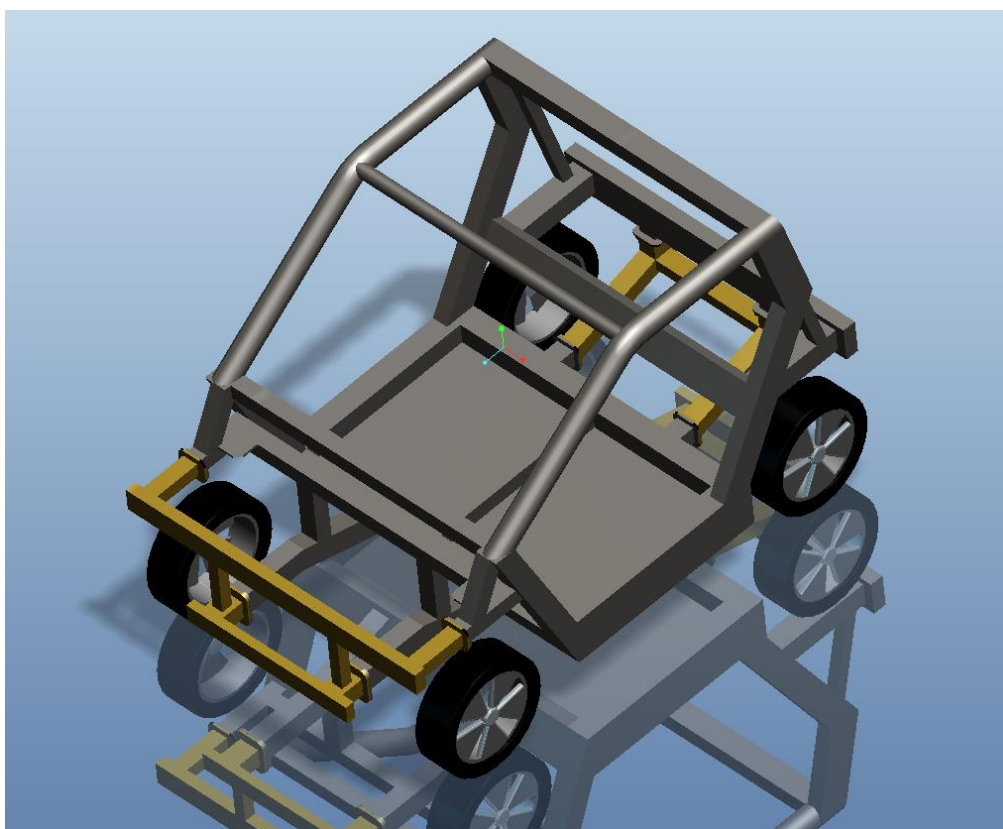
Εικόνα 3.19: Τρισδιάστατη όψη της τελικής συναρμογής του οχήματος



Εικόνα 3.20: Τρισδιάστατη όψη της τελικής συναρμογής του οχήματος



Εικόνα 3.21: Τρισδιάστατη όψη της τελικής συναρμογής του οχήματος



Εικόνα 3.22: Τρισδιάστατη όψη της τελικής συναρμογής του οχήματος

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος Αντοχής

Κεφάλαιο 4.1: Εισαγωγή

Η ανάγκη μελέτης της αντοχής με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια είναι το ζητούμενο σε κάθε επίπεδο εφαρμογών: στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην κατασκευή κτιρίων κλπ. Επιπλέον, δεδομένου ότι είναι ασύμφορο οικονομικά, δεν είναι δυνατή η κατασκευή και η εν συνεχεία καταστροφή των υπό μελέτη στοιχείων προκειμένου να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα για την αντοχή τους. Ακριβώς αυτή η ανάγκη είναι που οδήγησε στην ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων ελέγχου της αντοχής, δηλαδή λογισμικών που έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν σε Η/Υ τις φορτίσεις που δέχεται ένα αντικείμενο, ώστε στη συνέχεια να γίνεται η αξιολόγησή του χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για την κατασκευή ενός φυσικού μοντέλου. Μία από αυτές τις υπολογιστικές μεθόδους είναι η Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (Finite Elements Analysis-FEA). Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει αποτελέσματα ακριβείας για πολύπλοκες κατασκευές, απαιτεί όμως πολυάριθμους και χρονοβόρους υπολογισμούς, οι οποίοι όμως λόγω της ταχύτατης ανάπτυξης των Η/Υ στις μέρες μας μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Η χρήση τέτοιου είδους λογισμικών σε συνδυασμό με άλλα εξειδικευμένα λογισμικά σχεδίασης (CAD) αποτελούν εδώ και χρόνια τον βασικό πυρήνα για την ανάπτυξη και τον έλεγχο πολύπλοκων κατασκευών.

Στην συγκεκριμένη εργασία το ζητούμενο είναι ο έλεγχος αντοχής της κατασκευής σε τεστ πλαγιομετωπικής πρόσκρουσης (crash test) με βάση τις προδιαγραφές της EuroNCAP. Ειδικά στην περίπτωση των δοκιμών πρόσκρουσης η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρύτατα από όλες τις αυτοκινητοβιομηχανίες.

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δίνονται στη συνέχεια κάποια στοιχεία θεωρίας που σχετίζονται με τις βασικές αρχές τους, ώστε να γίνει καλύτερα κατανοητή η διαδικασία υπολογισμών που ακολουθείται κατά την επίλυση ενός προβλήματος.

Ακόμα, επεξηγείται ο τρόπος μοντελοποίησης της κατασκευής, των υλικών και των φορτίσεων κατά την προετοιμασία του μοντέλου πριν την διαδικασία επίλυσης, ενώ

παρουσιάζονται και οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSA ως προ-επεξεργαστής (pre-processor), υπεύθυνο για την προετοιμασία του μοντέλου, και το μΕΤΑ μετα-επεξεργαστής (post-processor), όπου γίνεται δυνατή η ανάλυση και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τον επιλυτή (Solver). Ως Επιλυτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LS-DYNA το οποίο θεωρείται από τα πιο εξειδικευμένα για περιπτώσεις crash-test.

Ο προ-επεξεργαστής ANSA θεωρείται ένας από τους κορυφαίους στο είδος του, αφ' ενός λόγω του υψηλής ποιότητας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που παράγει, και αφ' ετέρου λόγω της ευκολίας και φιλικότητας προς τον χρήστη.

Ο μετα-επεξεργαστής μΕΤΑ δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του Solver σε γραφικό περιβάλλον και όχι μόνο με την χρήση γραφημάτων αλλά και με βίντεο αναπαράσταση της πρόσκρουσης.

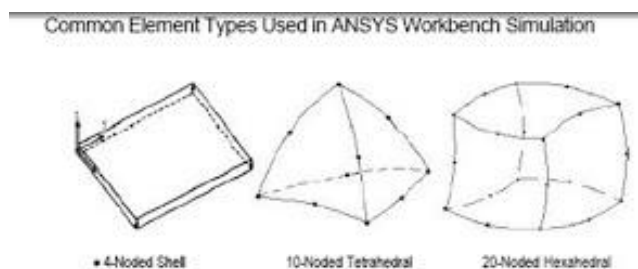
Κεφάλαιο 4.2: Πεπερασμένα Στοιχεία

Η ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι μια βασισμένη σε Η/Υ αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μεγάλου φάσματος προβλημάτων του τομέα εφαρμοσμένης μηχανικής, όπως είναι η ανάλυση τάσεων, η θερμική ανάλυση, η ανάλυση της ροής των ρευστών, η ρευστή διάχυση ροής και η ανάλυση των μαγνητικών πεδίων. Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ένα στερεό ή ένα συνεχές ρευστό θεωρείται δομημένο από πολυάριθμα μικροσκοπικά συνδεδεμένα μεταξύ τους στοιχεία (elements). Δεδομένου ότι τα στοιχεία μπορούν να είναι τοποθετημένα με οποιοδήποτε τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση πολύ σύνθετων και περίπλοκων μορφών. Κατά συνέπεια, δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί μια αναλυτική λύση η οποία να μεταχειρίζεται ένα στενά "εξιδανικευμένο" μοντέλο, μαντεύοντας τον τρόπο με τον οποίο η απόκλιση από το μοντέλο επηρεάζει το πρωτότυπο. Κατά την ανάπτυξη της, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αντικαταστήσει σημαντικά την ακριβή από πλευράς κόστους προκαταρκτική μέσω δοκιμών φυσικών μοντέλων ανάπτυξη, με την ταχύτερη και φθηνότερη μοντελοποίηση μέσω Η/Υ.

Σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους που συχνά απαιτούν τη χρήση υψηλότερου επιπέδου μαθηματικών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε απλές αλγεβρικές εξισώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια λύση FEA να απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση εκατοντάδων εξισώσεων με εκατοντάδες αγνώστους όρους. Επομένως, η ανάπτυξη της εν λόγω τεχνικής απαιτούσε την διαθεσιμότητα πολύ γρήγορων ψηφιακών υπολογιστικών συστημάτων για να μπορεί να λύσει αποτελεσματικά τις εξισώσεις με την μέθοδο των πινάκων. Η ταχύτατη αποδοχή της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στην αυξανόμενη διαθεσιμότητα των λογισμικών FEA μέσω των Η/Υ.

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αρχικά αναπτύχθηκε για καταστάσεις δύο διαστάσεων. Ένα τρισδιάστατο στερεό αυξάνει κατά πολύ την τάξη μεγέθους στον αριθμό των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα. Όμως αυτό το χειρίζονται πλέον τα λογισμικά FEA με τη χρήση μεγαλύτερου βαθμού στοιχείων και ταχύτερων υπολογιστών. Τα πιο διαδεδομένα στοιχεία είναι δύο: τα συνεχή και τα δομικά. Στα συνεχή η γεωμετρία τους ορίζεται πλήρως από τις συντεταγμένες των κόμβων τους. Τα δομικά στοιχεία από την άλλη, είναι στοιχεία που συμπεριφέρονται σύμφωνα με τις παραδοχές της συμπεριφοράς των κατασκευών σε

σχέση με την αντοχή των υλικών. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται μερικά από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία:



Other Common Element Types

Dimension	Degree	Element Shape	Element Type
1D (Line)	Linear		Beam, Truss
	Quadratic		Beam
	Cubic		Beam
2D (Area)	Linear		Plane stress Plane strain Plate, Shell
	Quadratic		
	Cubic		
3D (Volume)	Linear		
	Quadratic		

Εικόνα 4.1: Είδη πεπερασμένων στοιχείων

Τα τρίγωνα (trias) και τα τετράγωνα (quads) είναι τα πιο απλά στοιχεία που χρησιμοποιούνται με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (node). Προσθέτοντας κι άλλους κόμβους στις άκρες ή στο κέντρο μοντελοποιούνται καλύτερα καμπύλες και μέτωπα. Τρισδιάστατα μοντέλα έχουμε: τα ισοπαραμετρικά τρίγωνα, τα τετράεδρα και τα εξάεδρα.

Κεφάλαιο 4.3: Θεωρίες Αστοχίας

Όταν ένα κομμάτι φορτίζεται ομοαξονικά, τότε η τάση και η αντοχή μπορούν να συγκριθούν απευθείας ώστε να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας του ή για να γίνει φανερό εάν το κομμάτι θα αστοχήσει. Η μέθοδος αυτή είναι απλή, καθώς υπάρχει μόνο μία τιμή τάσης και μόνο μία τιμή αντοχής, είτε είναι διαρροής, είτε είναι η μέγιστη ή διατμητική ή ότι αρμόζει στην μελετούμενη περίπτωση.

Το πρόβλημα όμως γίνεται αρκετά πιο περίπλοκο όταν έχουμε τάσεις σε δύο ή και τρεις διαστάσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν πολλές τάσεις, αλλά μόνο μία σημαντική αντοχή. Για να γίνει δυνατός ο προσδιορισμός της ασφαλείας του κομματιού αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες για να βοηθήσουν στον υπολογισμό αυτό.

Επιγραμματικά οι θεωρίες αυτές είναι:

- Η θεωρία μέγιστης ορθής τάσης
- Η θεωρία μέγιστης διατμητικής τάσης
- Η θεωρία ενέργειας παραμόρφωσης ή Von Mises Stress

Από τις παραπάνω επιλέχθηκε η θεωρία ενέργειας παραμόρφωσης ή Von Mises Stress.

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

$$\begin{aligned}\sigma_v &= \sqrt{3J_2} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \\ &= \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij}s_{ij}}\end{aligned}$$

Κεφάλαιο 4.4: Μοντελοποίηση

Για να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση αντοχής με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του σχεδίου που έχει προκύψει από το πρόγραμμα CAD. Αυτό περιλαμβάνει την μοντελοποίηση των φορτίσεων, των περιορισμών, των συνδέσεων των επιμέρους κομματιών, τα χρησιμοποιούμενα υλικά και την δημιουργία του πλέγματος από τα κατάλληλα στοιχεία.

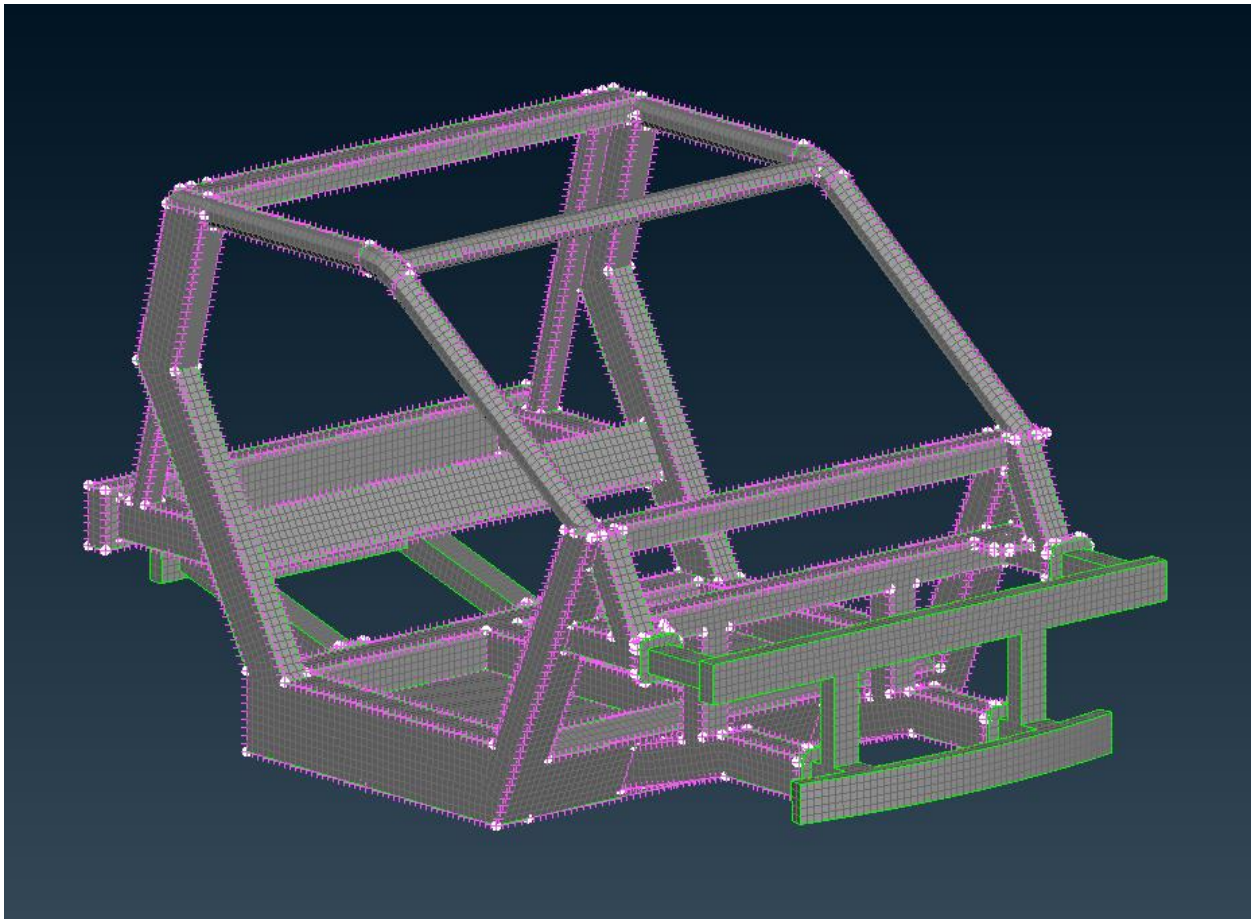
Κεφάλαιο 4.4.1: Δημιουργία Πλέγματος

Αρχικά εισάγεται το τρισδιάστατο μοντέλο του πλαισίου στον προ-επεξεργαστή (ANSA) όπου δημιουργείται πλέγμα με χρήση στοιχείων κελύφους (Shell) τύπου ELFORM του LS-Dyna. Ο συγκεκριμένος τύπος πλέγματος επιλέχθηκε διότι είναι ο ιδανικός δεδομένου των υλικών που επιλέχθηκαν. Το ANSA δίνει την δυνατότητα διόρθωσης τυχόν ασυνέχειας στο πλέγμα που προκύπτει, πράγμα που μπορεί οφείλεται στο αρχικό σχέδιο που προέρχεται από το πρόγραμμα CAD. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δεν χρειάστηκε, αφού λόγω της απλής γεωμετρίας που έχει το σχέδιό δεν υπήρξαν ασυνέχειες ή ατέλειες.

Στις παραμέτρους των στοιχείων του πλέγματος τέθηκε μέγιστη διάσταση τα 20mm και ελάχιστη 10mm, κι αυτό για να μην υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μικρών σε μέγεθος στοιχείων στο πλέγμα, αφού η γεωμετρία του σχεδίου είναι σχετικά απλή.

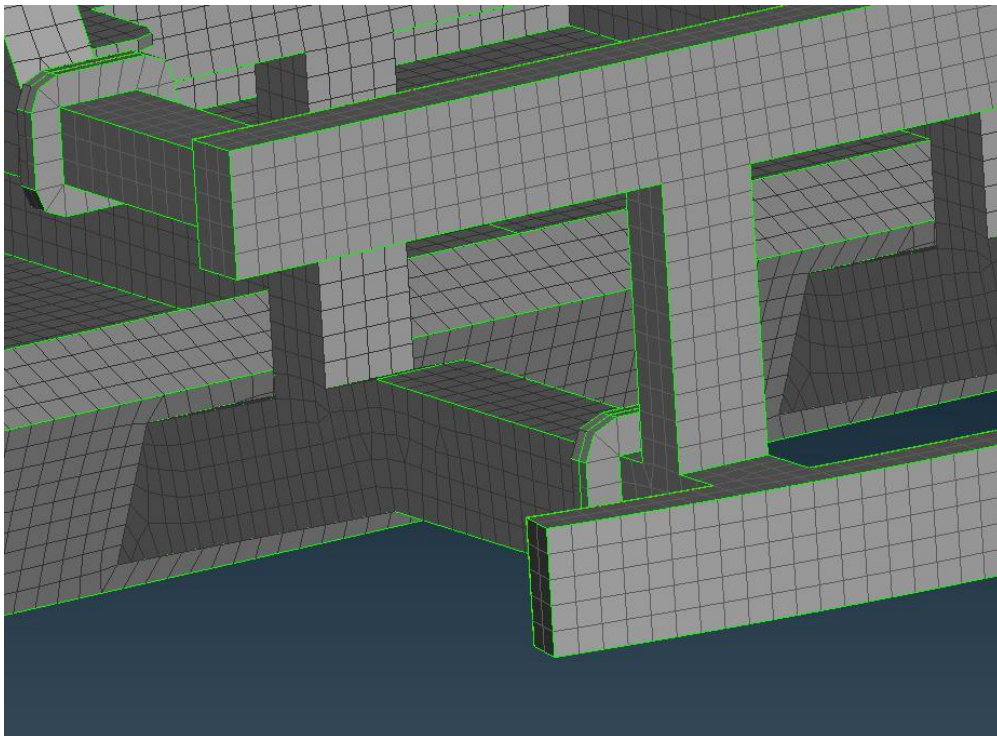
Παρακάτω φαίνονται διάφορες φωτογραφίες από το πλέγμα που δημιουργήθηκε στην τελική συναρμογή. Επιπλέον δίνονται και διάφορες λεπτομέρειες από κάποια σημεία του σχεδίου για να φανεί με μεγαλύτερη ευκρίνεια η δημιουργία του πλέγματος.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.2) φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο. Για την δημιουργία του χρησιμοποιήθηκε η εντολή Shell Mesh, δηλαδή η δημιουργία πλέγματος κελύφους (σε επιφάνειες και όχι σε όγκους). Αυτό γιατί στην πραγματικότητα όλες οι σωλήνες στο σχέδιο δεν είναι συμπαγείς, αλλά κούφιας. Χρησιμοποιώντας πλέγμα κελύφους μπορεί να δοθεί μέσω του πάχους (Thickness) οποιοδήποτε πάχος τοιχωμάτων είναι επιθυμητό.

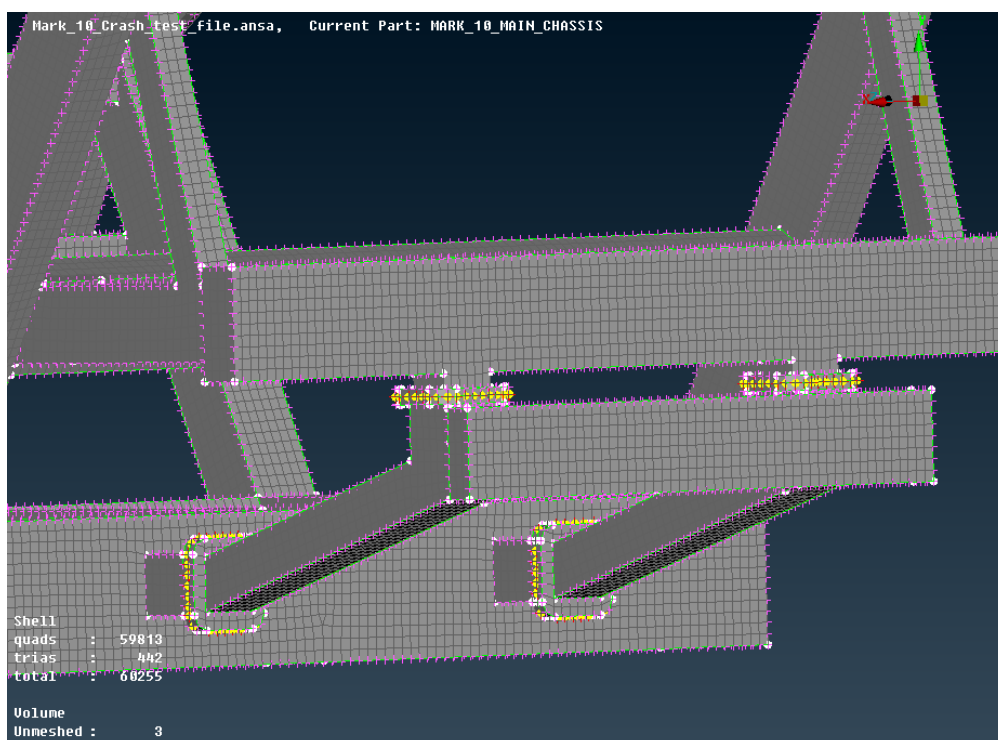


Εικόνα 4.2: Εμπρόσθια άποψη του συνολικού πλέγματος

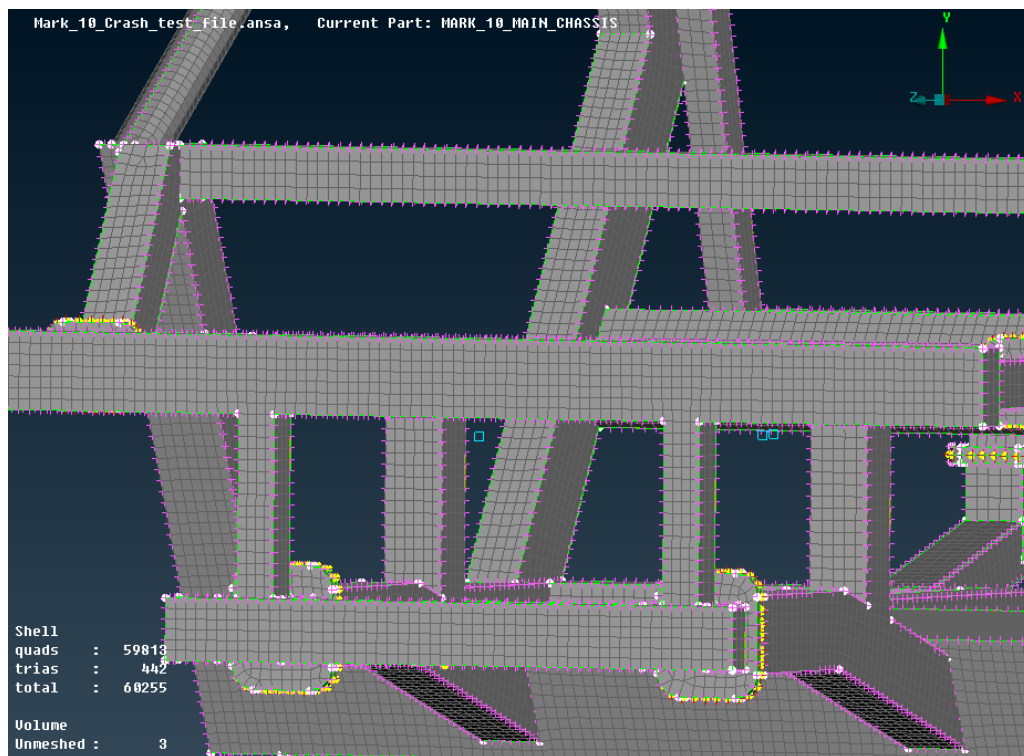
Στις παρακάτω φωτογραφίες (εικόνες 4.3-4.8) φαίνονται λεπτομέρειες του πλέγματος:



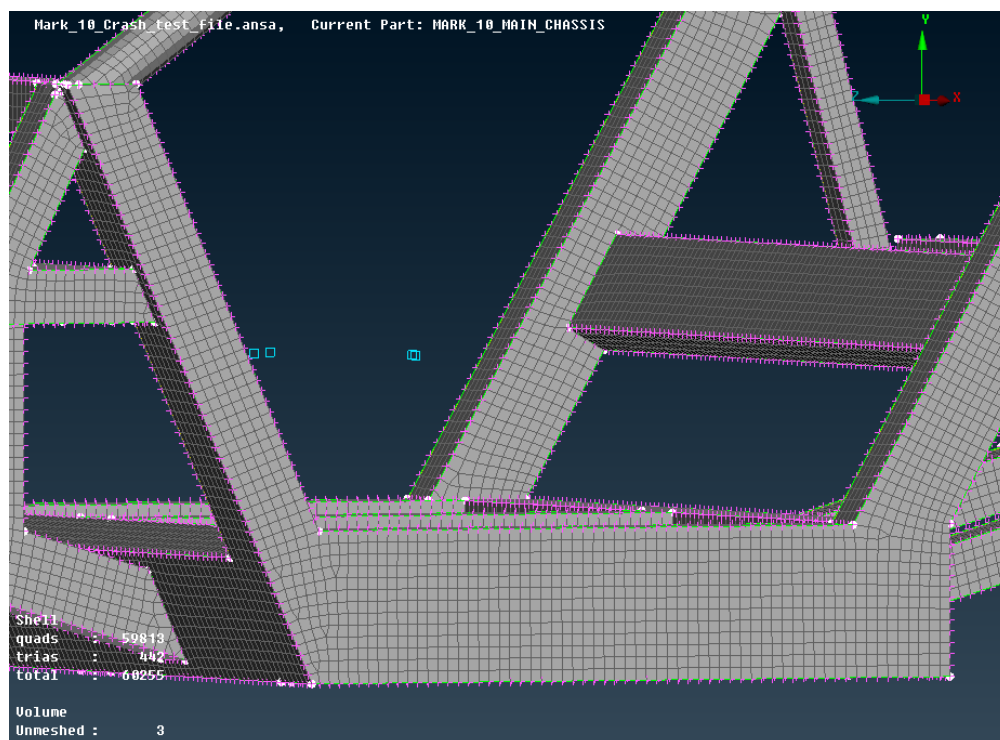
Εικόνα 4.3: Λεπτομέρεια του πλέγματος στο εμπρόσθιο τμήμα του πλαισίου



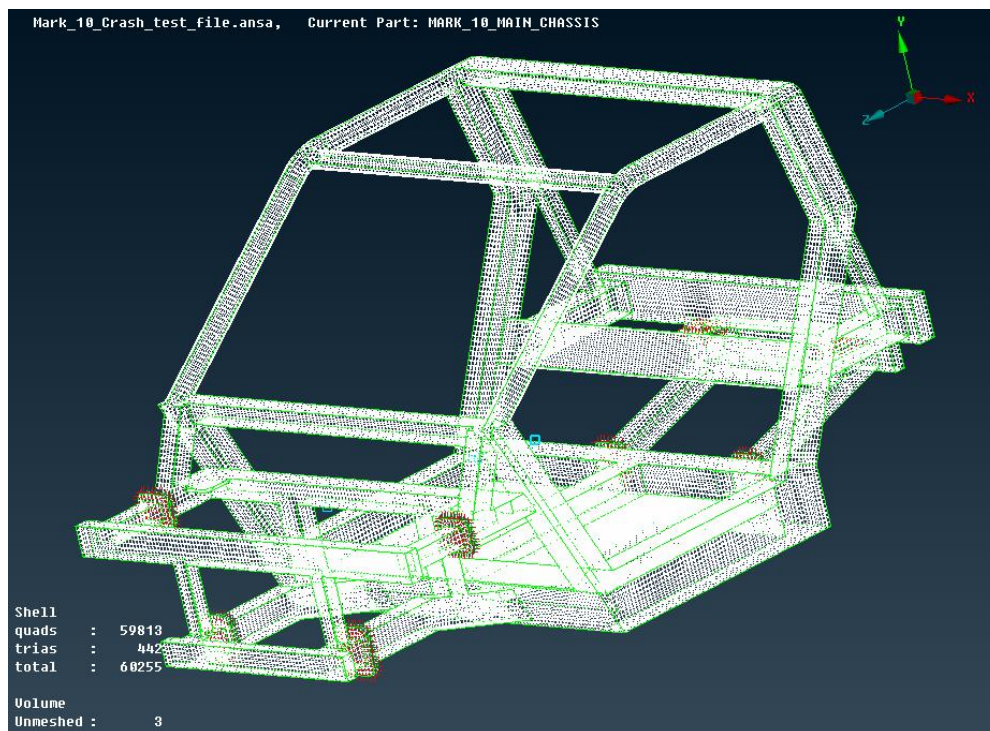
Εικόνα 4.4: Λεπτομέρεια του πλέγματος στο οπίσθιο τμήμα του πλαισίου



Εικόνα 4.5: Λεπτομέρεια του πλέγματος στον εμπρόσθιο προφυλακτήρα



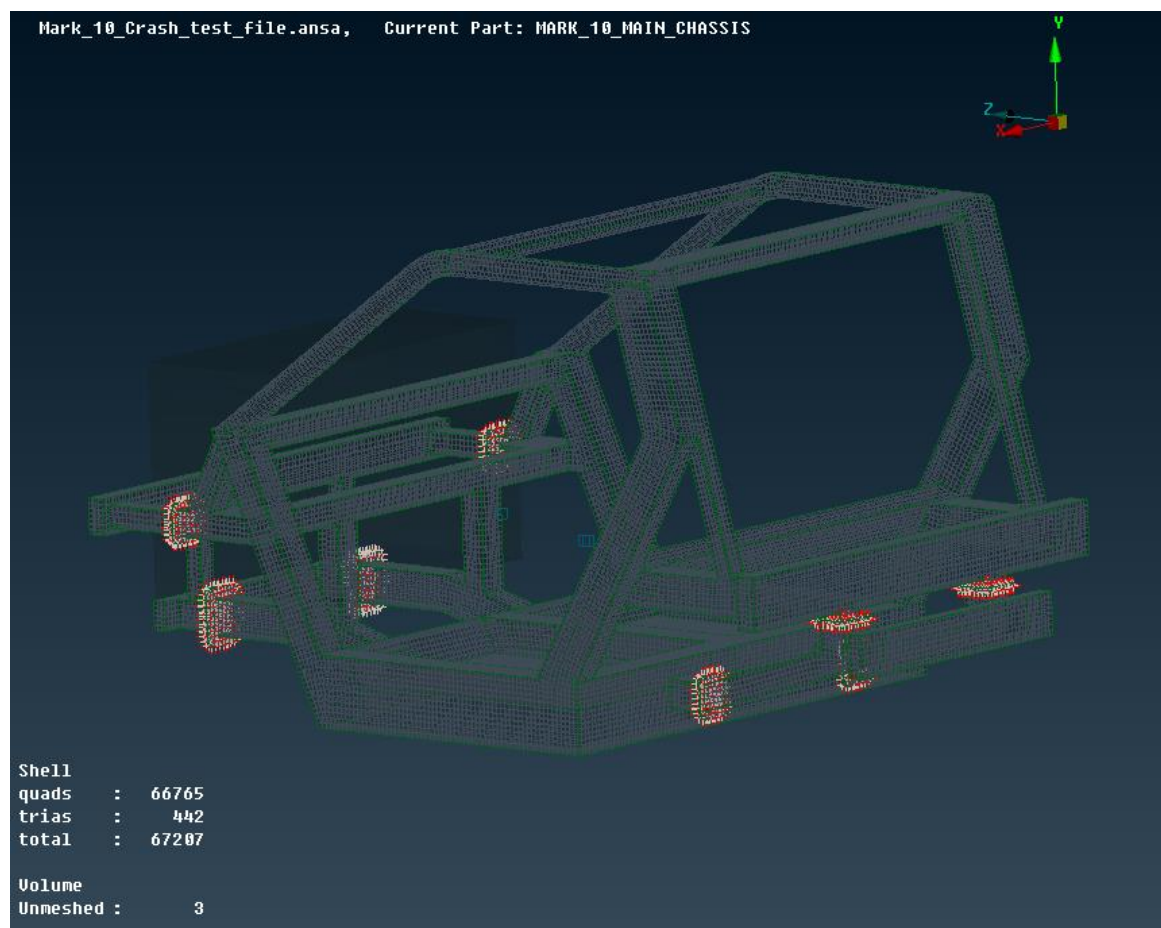
Εικόνα 4.6: Λεπτομέρεια του πλέγματος στο κεντρικό πλαίσιο



Εικόνα 4.7: Συνολική άποψη του πλέγματος με τα Solid κομμάτια μη-ορατά

Κεφάλαιο 4.4.2: Μοντελοποίηση Συνδέσεων

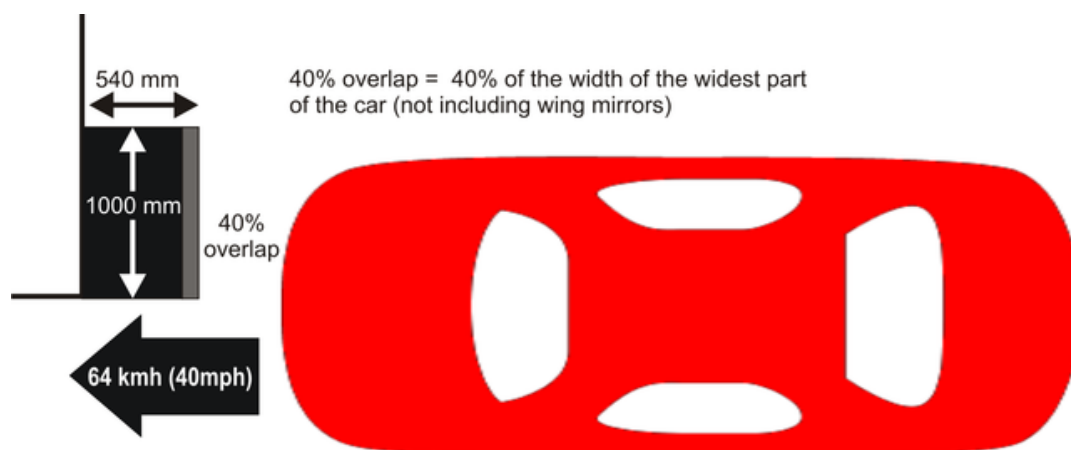
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το τελικό σχέδιο αποτελείται από 3 κομμάτια: το εμπρόσθιο υποπλαίσιο, το οπίσθιο υποπλαίσιο και το κεντρικό πλαίσιο. Αυτά θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με βίδες και παξιμάδια επειδή αυτός ο τύπος ένωσης δίνει την δυνατότητα χρήσης διαφορετικών υλικών για το κάθε κομμάτι ξεχωριστά. Για παράδειγμα θα μπορούσε το εμπρόσθιο τμήμα να είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, ενώ το κεντρικό πλαίσιο από ατσάλι, δύο μέταλλα που μεταξύ τους δεν συγκολλούνται, αλλά μπορούν να ενωθούν με βίδες και παξιμάδια. Παρακάτω φαίνονται οι ενώσεις (εικόνα 4.9):



Εικόνα 4.9: Συνδέσεις μεταξύ του εμπρόσθιου και του οπίσθιου υποπλαίσιου με το κεντρικό πλαίσιο

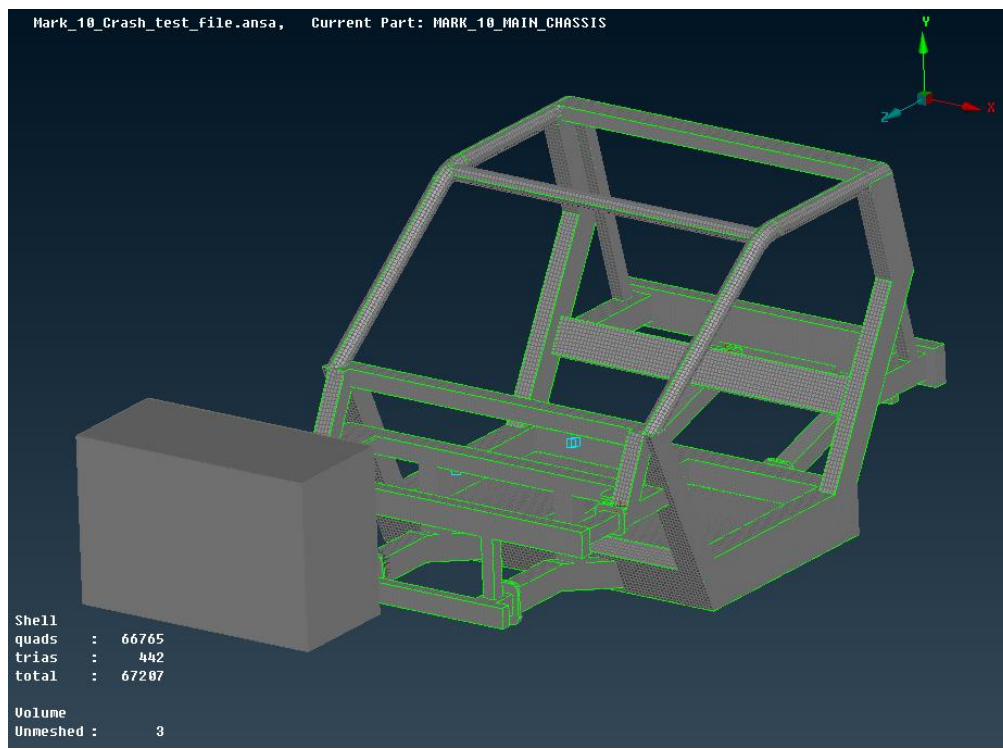
Κεφάλαιο 4.4.3: Εισαγωγή της μπάρας πρόσκρουσης (Barrier)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το crash-test θα πραγματοποιηθεί με βάση τις προδιαγραφές της Euro-NCAP. Από όλα τα τεστ που κάνει η Euro-NCAP επιλέχθηκε η πλαγιομετωπική σύγκρουση του οχήματος με μία μπάρα πρόσκρουσης κατασκευασμένη από αλουμίνιο 3003 και 40% επικάλυψη, με ταχύτητα 64 km/h. Η Euro-NCAP πραγματοποιεί την δοκιμή αυτή με την συγκεκριμένη ταχύτητα διότι με αυτό τον τρόπο προσομοιώνεται η σύγκρουση δύο οχημάτων που κινούνται αντίθετα με ταχύτητα περίπου 55 km/h το καθένα με αποτέλεσμα η σχετική ταχύτητα να είναι 110 km/h. Η μπάρα πρόσκρουσης μπορεί να παραμορφώνεται προσομοιώνοντας έτσι την πρόσκρουση δύο οχημάτων μεταξύ τους. Στην παρακάτω εικόνα (4.10) φαίνονται σχηματικά τα παραπάνω.

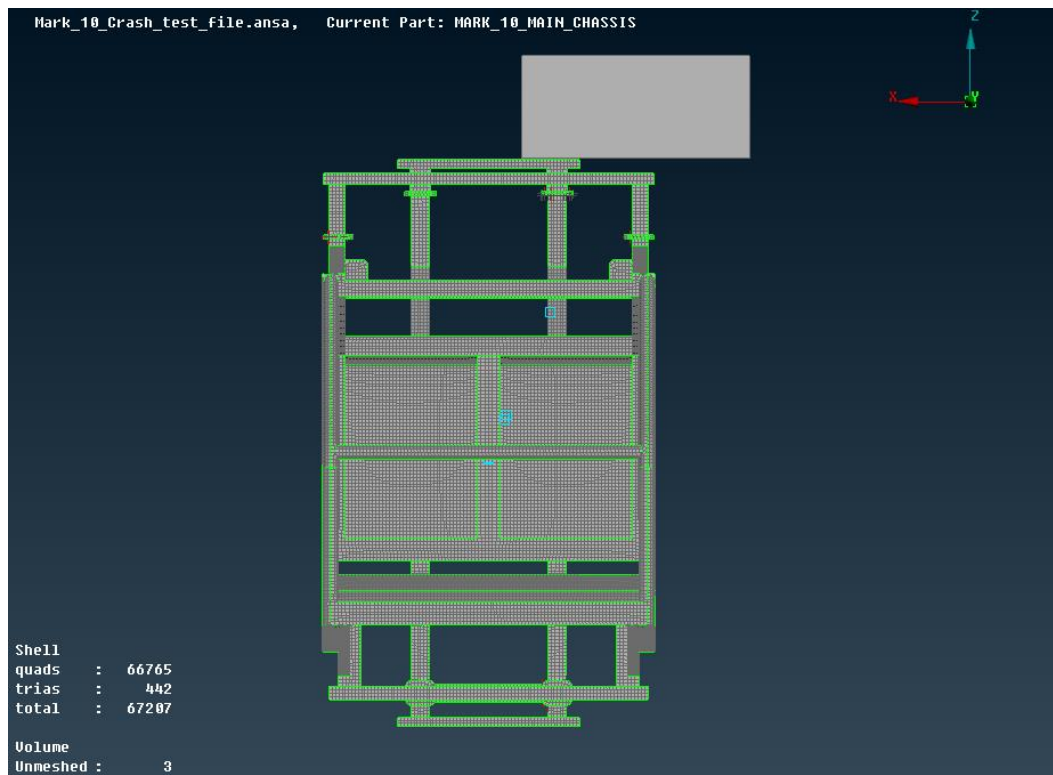


Εικόνα 4.10: Γραφική αναπαράσταση των προδιαγραφών της πλαγιομετωπικής κρούσης της EuroNCAP

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα το μέγεθος του barrier είναι 540 mm x 1000mm, ενώ το ύψος του είναι στα 650mm. Στην πραγματικότητα η μπάρα αυτή είναι κατασκευασμένη από ελάσματα αλουμινίου σε κυψελωειδή διάταξη. Για συντόμευση του χρόνου προσομοίωσης σχεδιάστηκε ως συμπαγές κομμάτι με τις παραπάνω διαστάσεις. Στην συνέχεια μέσω του ANSA τοποθετήθηκε πλέγμα, μοντελοποιήθηκε το υλικό κατασκευής του και δόθηκε πάχος στα 10 χιλιοστά. Τέλος, εισήχθη στο αρχείο με την ολοκληρωμένη συναρμογή του πλαισίου. Παρακάτω δίνονται διάφορες εικόνες όπου φαίνεται η μπάρα πρόσκρουσης τοποθετημένη μπροστά ακριβώς από το όχημα (εικόνα 4.11-4.12).



Εικόνα 4.11: Εμπρόσθια-πλάγια όψη του εμποδίου μπροστά από το όχημα



Εικόνα 4.12: Κάτοψη του συνόλου οχήματος-εμποδίου

Κεφάλαιο 4.4.4: Μοντελοποίηση Υλικών

Ως υλικό κατασκευής επιλέχθηκε το αλουμίνιο 6063 T-6. Το αλουμίνιο μοντελοποιείται ως ιστροπικό ελαστικο-πλαστικό μέταλλο σε λογισμικά FEA. Στην περίπτωση του LS-Dyna μπορούμε να το μοντελοποιήσουμε και ως MAT_ELASTIC χωρίς να υπάρχει διαφορά στα αποτελέσματά.

Η διαδικασία μοντελοποίησης έχει ως εξής:

- Εισαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού
- Ορισμός κριτηρίων αστοχίας

Στη συνέχεια εισάγουμε τις ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 6063 T-6 (Aluminium-Magnesium-Silicon Wrought Alloy (6000-Series)):

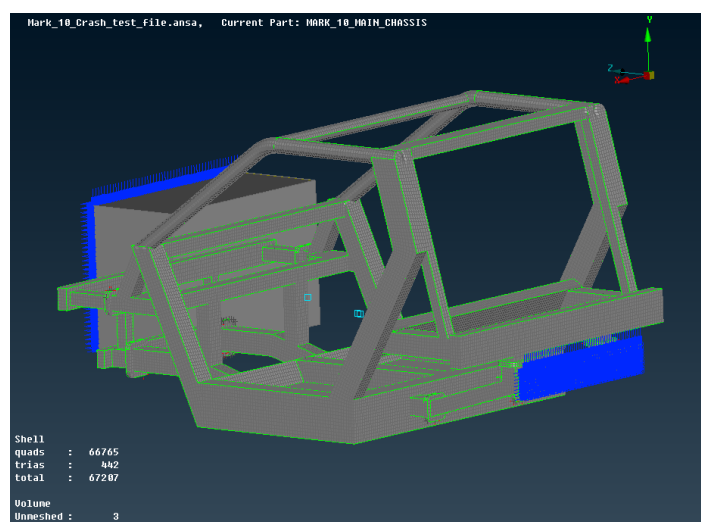
Μηχανικές ιδιότητες Αλουμινίου 6063 T-6	
Πυκνότητα (x 1000 kg/m ³)	2,7
Μέτρο Ελαστικότητας / Young (GPa)	68,9
Λόγος Poisson	0,33
Όριο Διαρροής (MPa)	241

Επιπλέον εισάγουμε τις μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου 3003 που είναι το υλικό κατασκευής του εμποδίου:

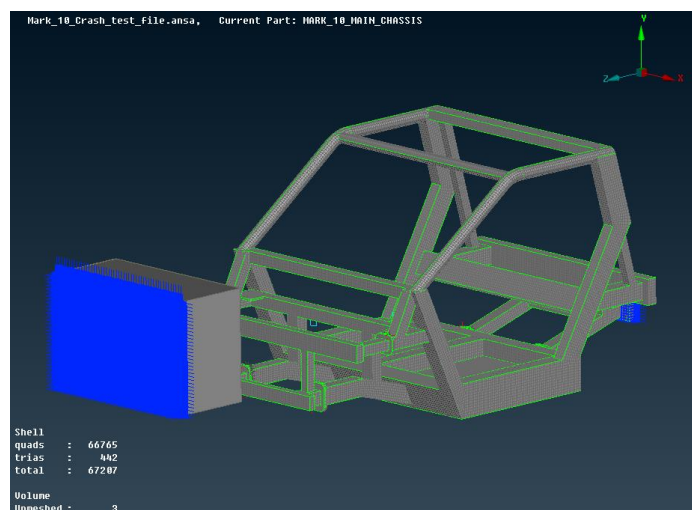
Αλουμίνιο AA 3003	
Πυκνότητα (x1000kg/m ³)	2,73
Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	70
Λόγος Poisson	0,33
Όριο Διαρροής (Mpa)	125

Κεφάλαιο 4.4.5: Μοντελοποίηση Περιορισμών

Όπως αναφέρεται και στο εγχειρίδιο χρήσης του ANSA για το Deck του LS-DYNA, στις περιπτώσεις crash-test χρειαζόμαστε τρεις συνολικά περιορισμούς ή Boundary Conditions όπως ονομάζονται: ένα στο πιο πίσω μέρος του σώματος που κινείται, ένα στο πιο κάτω μέρος του σώματος που κινείται και ένα στο πίσω μέρος του Εμποδίου. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο έγινε Boundary Condition που επιτρέπει κίνηση μόνο στο άξονα Z (βλ. σχήμα) ενώ στο Barrier δεν επιτρέπεται καμία κίνηση. Παρακάτω με μπλε χρώμα φαίνονται τα Boundary Conditions (εικόνα 4.13-4.14).



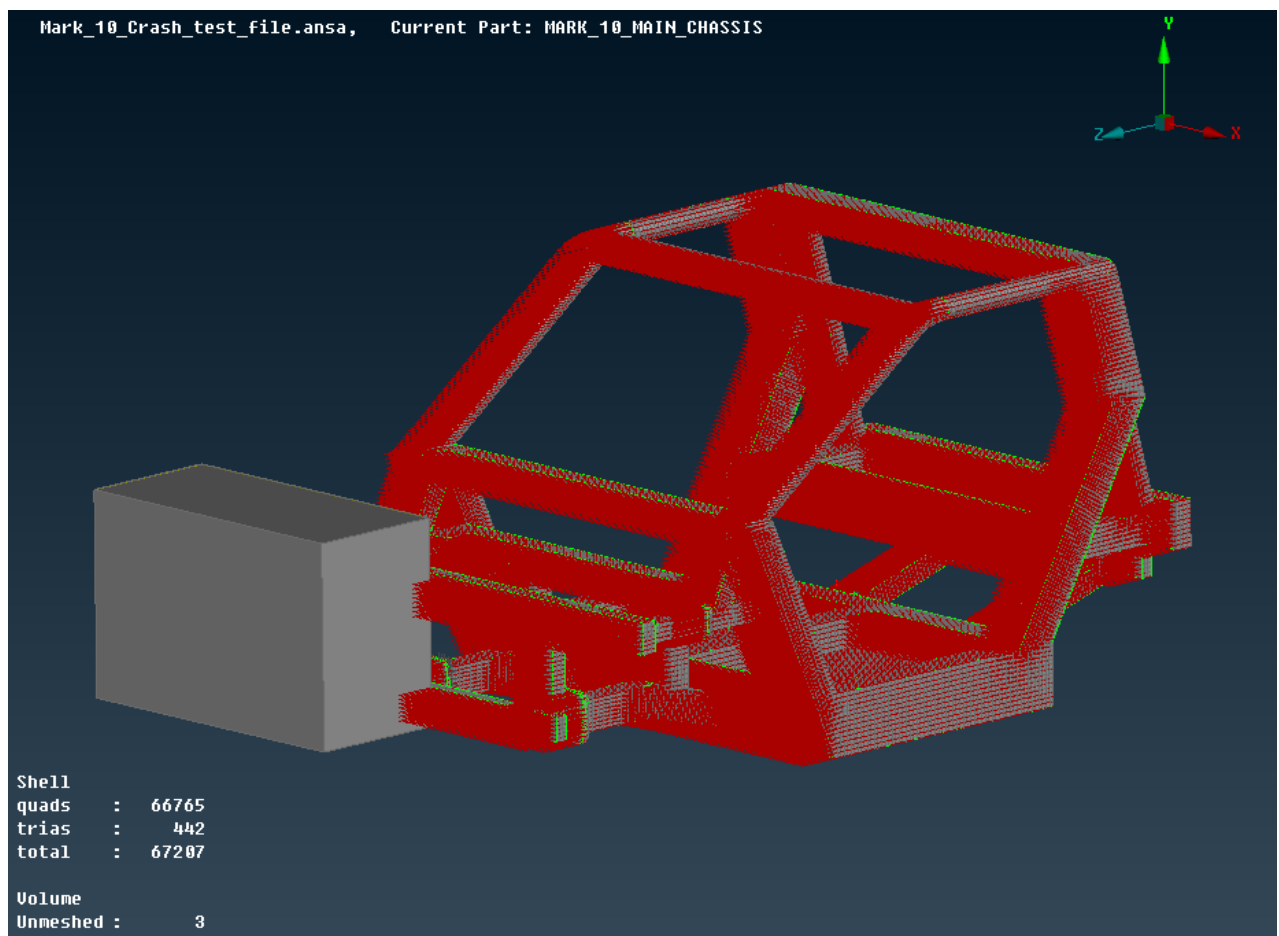
Εικόνα 4.13: Boundary Condition του οπίσθιου προφυλακτήρα



Εικόνα 4.14: Boundary Condition του εμποδίου

Κεφάλαιο 4.4.5: Μοντελοποίηση αρχικής ταχύτητας (Initial Velocity)

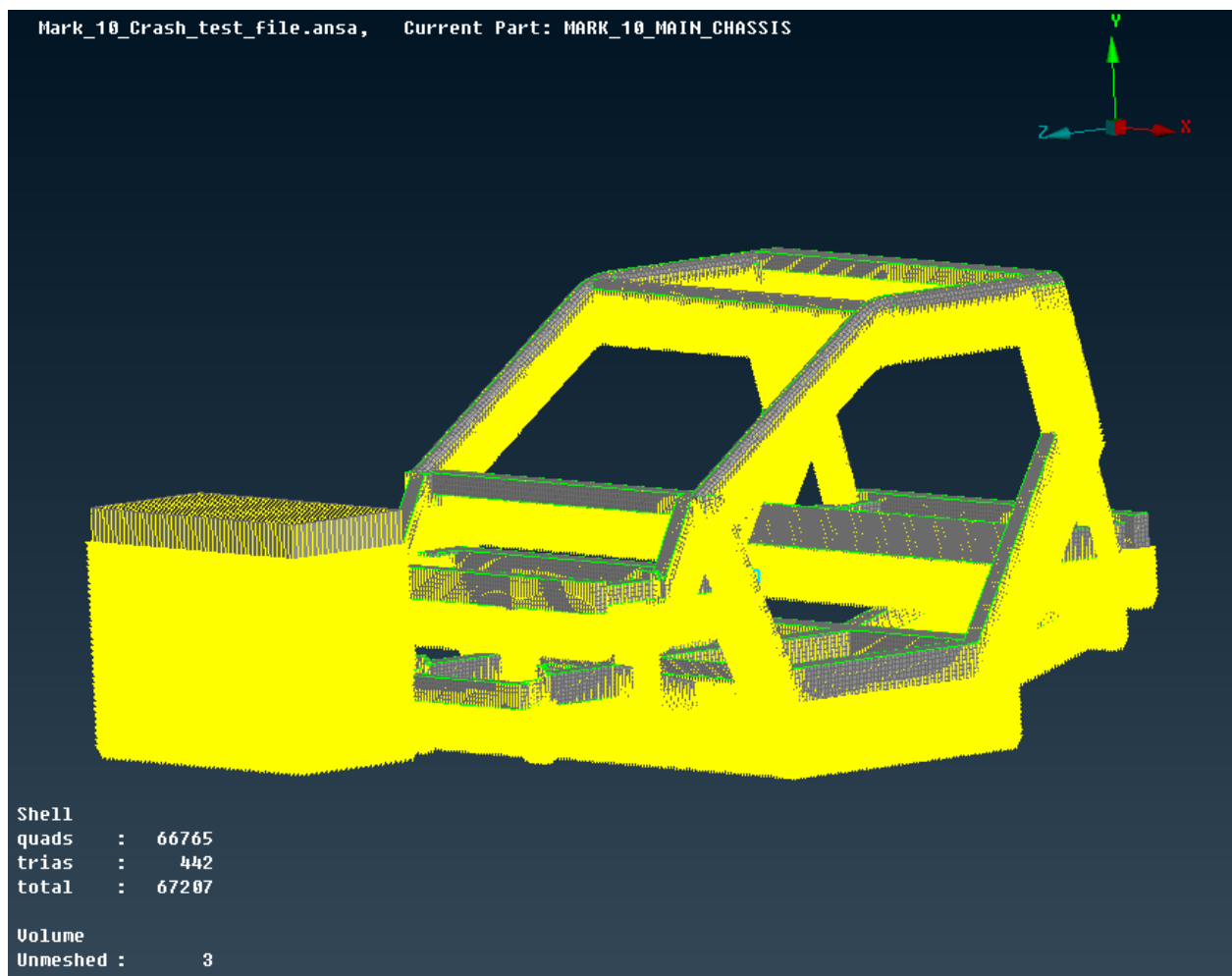
Η αρχική ταχύτητα τοποθετήθηκε σε όλα τα στοιχεία (elements) του πλέγματος του πλαισίου. Οι μονάδες μέτρησης της ταχύτητας είναι mm/msec ή m/sec, οπότε τα 64 km/h θα είναι 17,78 m/s. Παρακάτω φαίνεται μία εικόνα με την αρχική ταχύτητα (εικόνα 4.15).



Εικόνα 4.15: Αρχική ταχύτητα 17,78 m/s σε κάθε στοιχείο του πλέγματος του οχήματος

Κεφάλαιο 4.4.6: Μοντελοποίηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας

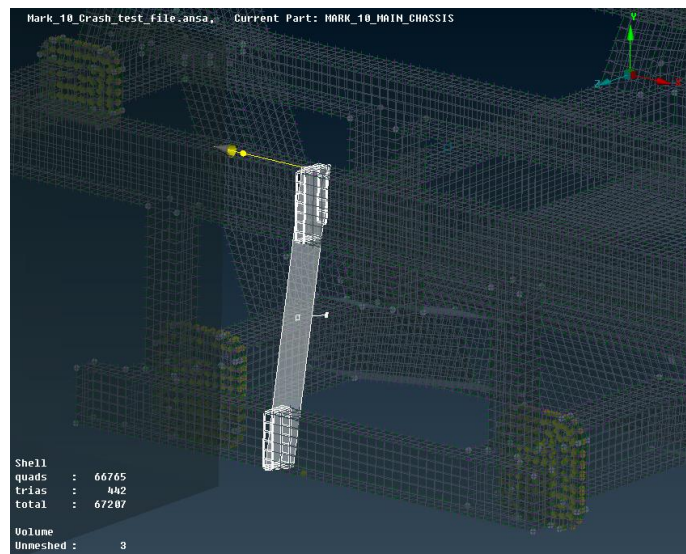
Η βαρύτητα μοντελοποιήθηκε επηρεάζοντας τόσο το πλαίσιο όσο και το barrier, πράγμα που φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.16). Δεδομένων των μονάδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, η επιτάχυνση της βαρύτητας ορίστηκε στα 0,00981 (mm/(msec)²) .



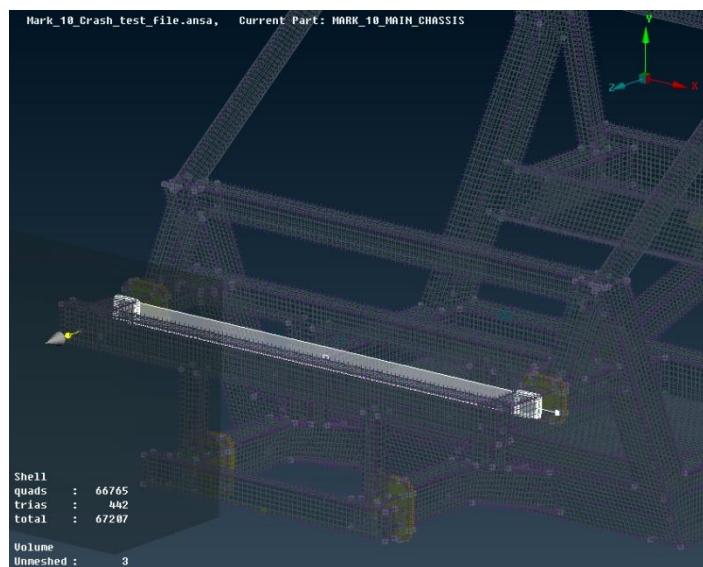
Εικόνα 4.16: Βαρύτητα τοποθετημένη σε όλα τα στοιχεία του οχήματος και του εμποδίου

Κεφάλαιο 4.4.7: Μοντελοποίηση των διατομών ελέγχου (Cross Sections)

Τα Cross Sections είναι στην ουσία τομές σε σημεία που επιλέγει ο χρήστης, εκεί που πρόκειται να αναπτυχθούν υψηλές τάσεις. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν ο άνω, ο κάτω προφυλακτήρας και οι άνω μπάρες του εμπρόσθιου υποπλαισίου, επειδή έτσι προτείνεται από το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού. Παρακάτω φαίνονται οι αντίστοιχες εικόνες (εικόνες 4.17-4.18).



Εικόνα 4.17: Τομές Ελέγχου στους μπροστά προφυλακτήρες



Εικόνα 4.18: Τομές Ελέγχου στις άνω μπάρες του εμπρόσθιου υποπλαισίου

Κεφάλαιο 5: Επίλυση του Μοντέλου

Σε αυτό το στάδιο, το ολοκληρωμένο μοντέλο που προετοιμάστηκε χρησιμοποιώντας τον προ-επεξεργαστή ANSA, εξήχθη χρησιμοποιώντας την εντολή `output` σε αρχείο `.key` του LS-DYNA. Έπειτα έγινε η επίλυση του μοντέλου από τον επιλυτή LS-DYNA. Ο χρόνος επίλυσης κυμαίνεται από 5 έως 9 λεπτά της ώρας. Τέλος, το αρχείο `d3plot` που προέκυψε μετά το πέρας της επίλυσης, χρησιμοποιώντας την εντολή `Open File`, το ανοίγουμε εντός του μετα-επεξεργαστή μΕΤΑ προκειμένου να δούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

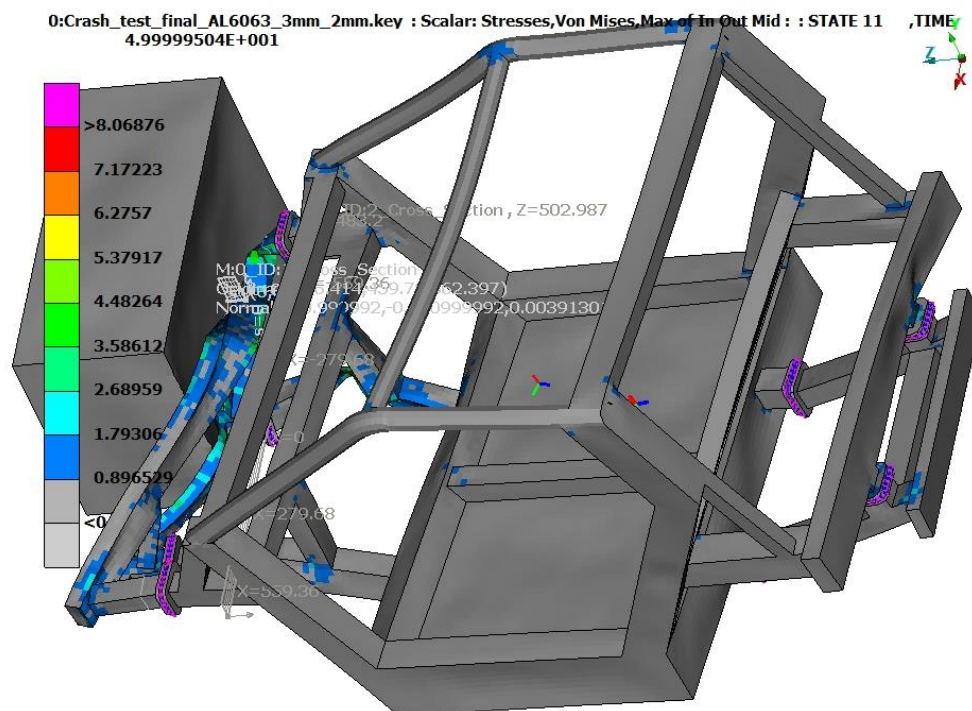
Όπως ήδη έχει αναφερθεί, στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε για την σύγκριση μεταξύ των δοκιμών την μέγιστη τάση Von Mises και την μέγιστη παραμόρφωση. Από το μενού του μΕΤΑ επιλέγουμε αυτές τις δύο ποσότητες και έχουμε την δυνατότητα να δούμε σε στιγμιότυπα (`frames-states`) και σε πραγματικό χρόνο την εξέλιξη της σύγκρουσης με βάση το χρονικό βήμα (`time-step`) που έχουμε θέσει. Εδώ αξίζει να αναφερθεί η μαθηματική σχέση με την οποία υπολογίζεται το dt δηλαδή το `crash time-step`. Αυτό εξαρτάται από το εκάστοτε υλικό, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο: $dt = L * \sqrt{\frac{\rho}{E}}$, όπου E είναι το μέτρο του Young, ρ είναι η πυκνότητα του υλικού και L είναι το `Target Length` των πεπερασμένων στοιχείων. Στην δική μας περίπτωση όπως έχει αναφερθεί και σε παραπάνω κεφάλαιο το L είναι ίσο με 20 mm.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης-τάσης της πρώτης δοκιμής του πλαισίου με κωδικό `Mark_10`. Η παραμετροποίηση του έγινε βάση των εξής στοιχείων: (εικόνες 5.1-5.8).

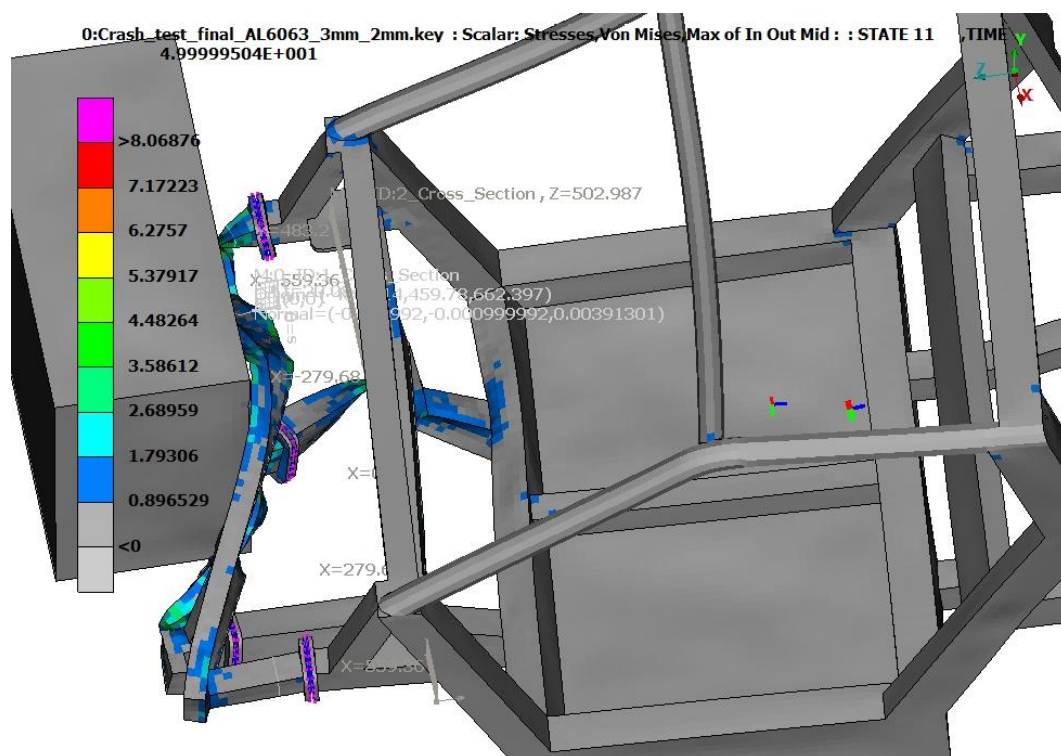
- 5.1 Mark_10:

1. `Main_Chassis`: 3mm
2. `Front & Rear Subframe`: 2mm
3. `Velocity`: 64 km/h

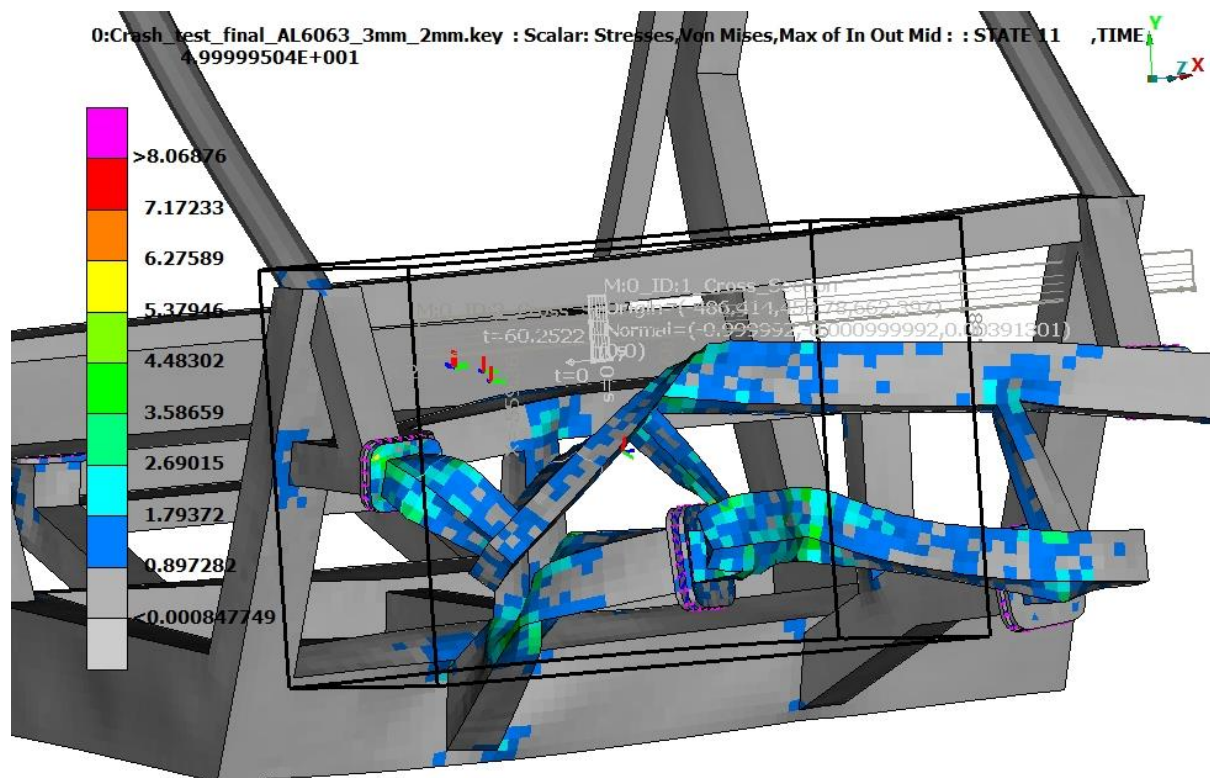
Μέγιστη Παραμόρφωση



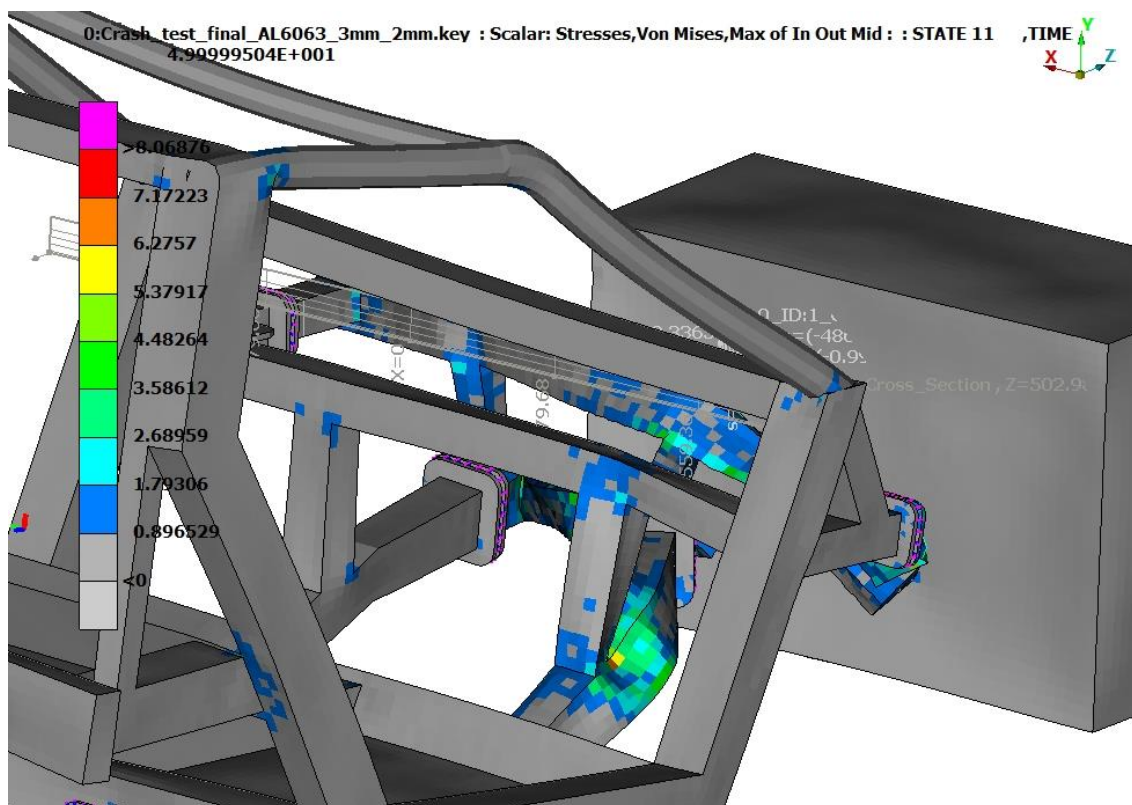
Εικόνα 5.1: Μέγιστη Παραμόρφωση - Πλάγια όψη



Εικόνα 5.2: Μέγιστη Παραμόρφωση - Πλάγια Άνω όψη

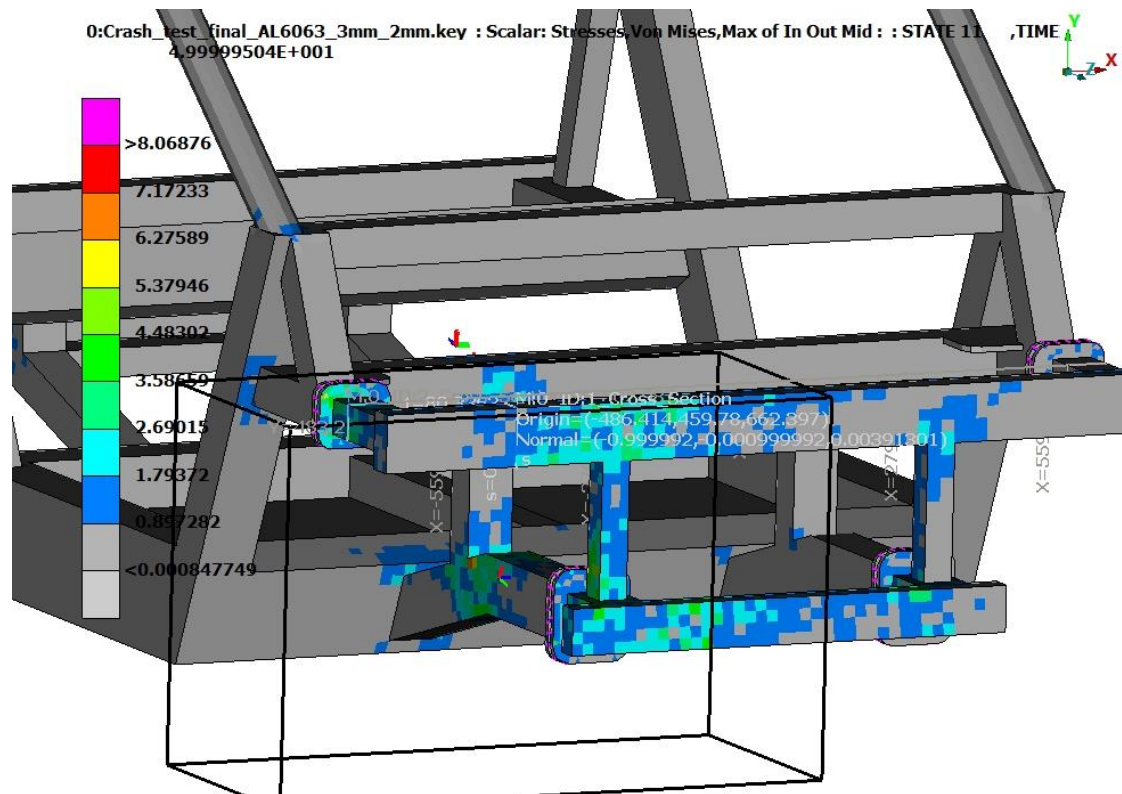


Εικόνα 5.3: Μέγιστη Παραμόρφωση - Εμπρόσθια όψη

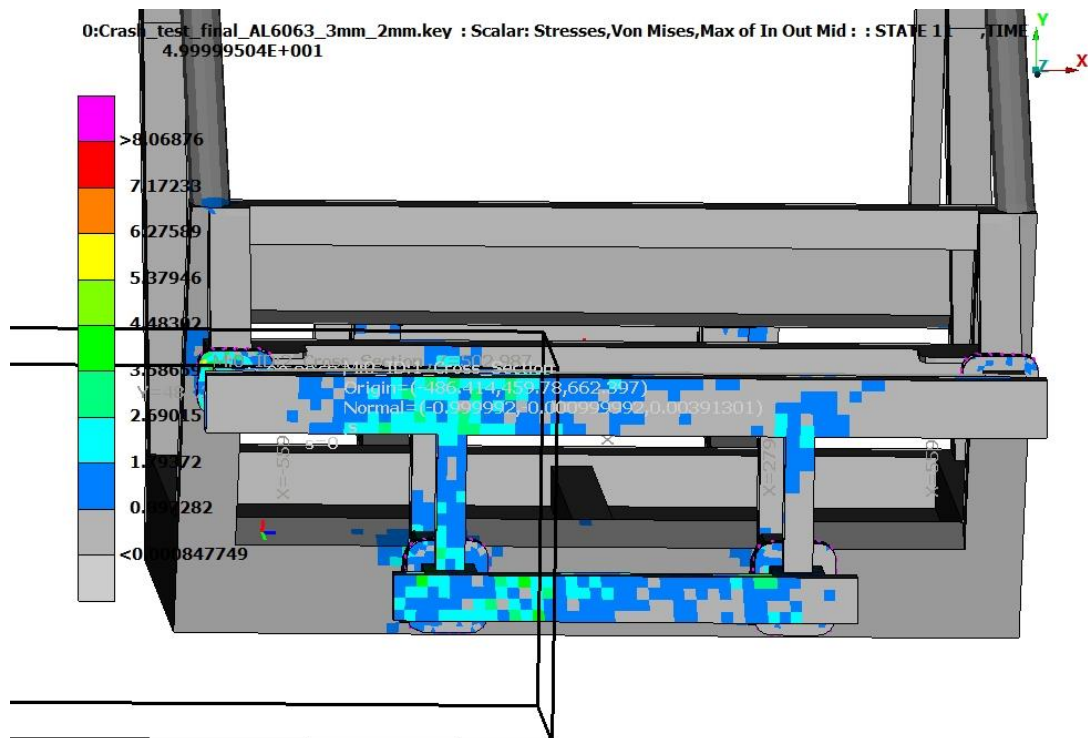


Εικόνα 5.4: Μέγιστη Παραμόρφωση - Δεξιά όψη

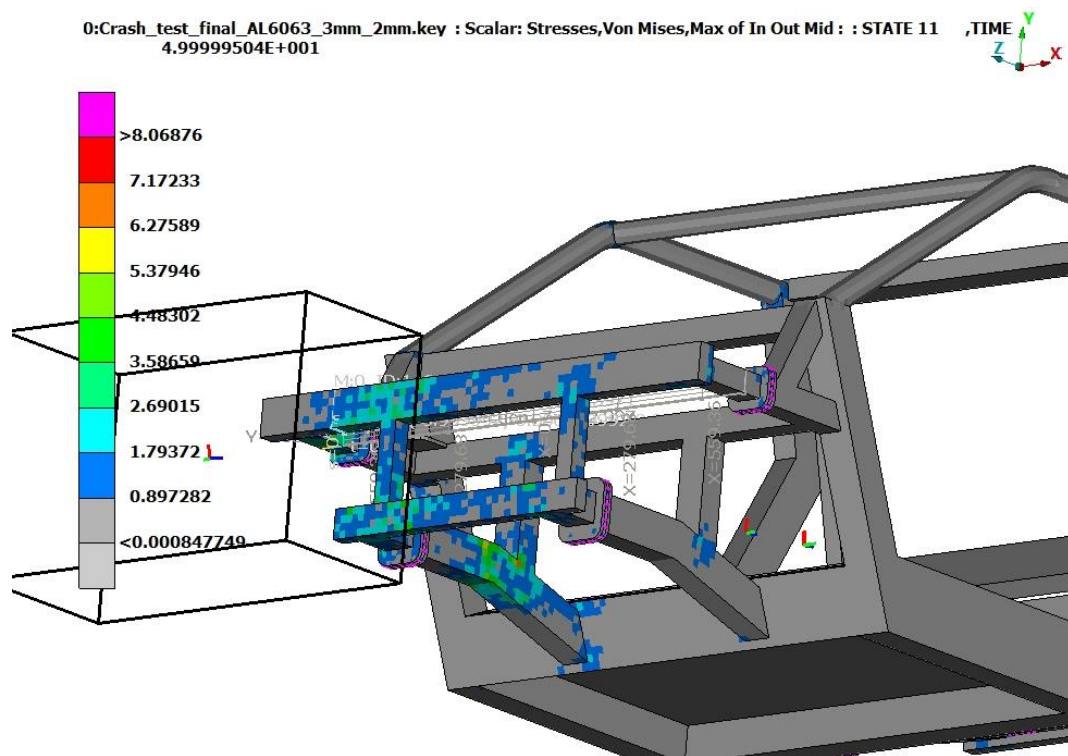
Μέγιστη Τάση Von Mises:



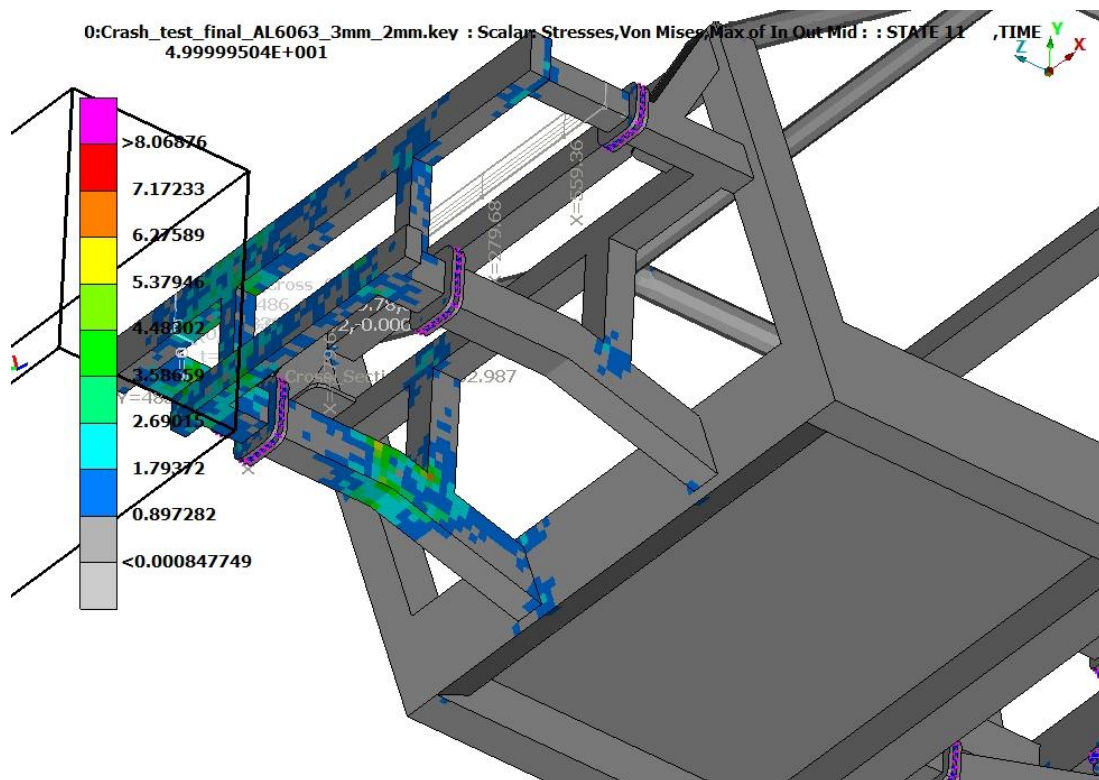
Εικόνα 5.5: Μέγιστη Τάση Von Mises - Εμπρόσθια όψη



Εικόνα 5.6: Μέγιστη Τάση Von Mises - Εμπρόσθια όψη



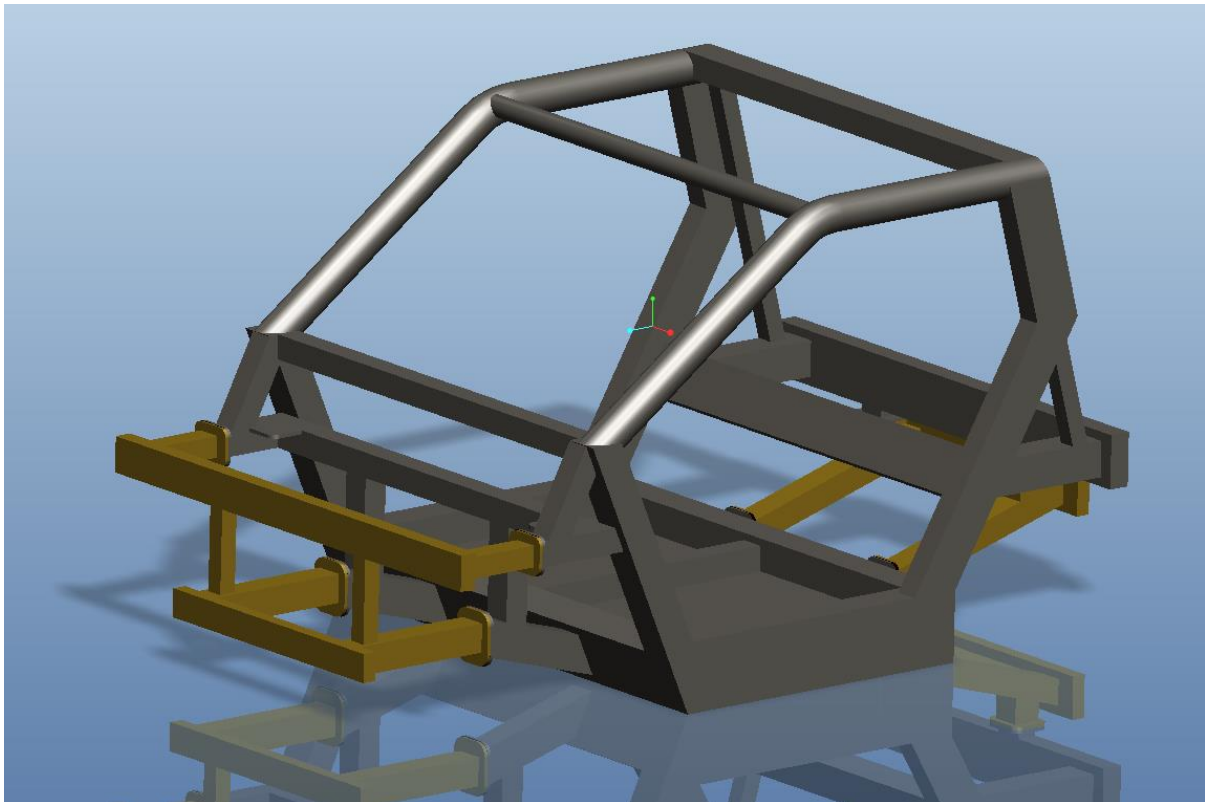
Εικόνα 5.7: Μέγιστη Τάση Von Mises - Εμπρόσθια όψη



Εικόνα 5.8: Μέγιστη Τάση Von Mises - Εμπρόσθια Κάτω όψη

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, το πλαίσιο δεν άντεξε την ενέργεια της πρόσκρουσης με αποτέλεσμα να έχουμε πλαστική παραμόρφωση στο κομμάτι της καμπίνας των επιβατών. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού μας. Αυτό φαίνεται από την μπάρα στα αριστερά της εικόνας : η κλίμακα είναι σε GPa και παρατηρούμε ότι σε πολλά σημεία του πλαισίου η ένδειξη ξεπερνά τα 0,89 GPa (όσα σημεία δηλαδή είναι χρωματισμένα με μπλε,εκρού,πράσινο,κίτρινο,πορτοκαλί,κόκκινο και μωβ), ενώ το όριο διαρροής του υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί είναι στα 0,241 GPa. Έτσι, προκύπτει ότι πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός του εμπρόσθιου τμήματος του πλαισίου (Front Subframe) προκειμένου η ζώνη ελεγχόμενης παραμόρφωσης να είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Το νέο σχέδιο (στο οποίο θα αναφερόμαστε ως Mark_11) είναι το παρακάτω (εικόνα 5.9). Οι αλλαγές που έγιναν αφορούν στην μετακίνηση προς τα πίσω των κάτω πλακών πρόσδεσης του εμπρόσθιου υποπλαισίου. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αύξηση της ζώνης πρόσκρουσης, έτσι ώστε τελικά η απορρόφηση ενέργειας από το υποπλαίσιο να είναι ακόμα μεγαλύτερη.



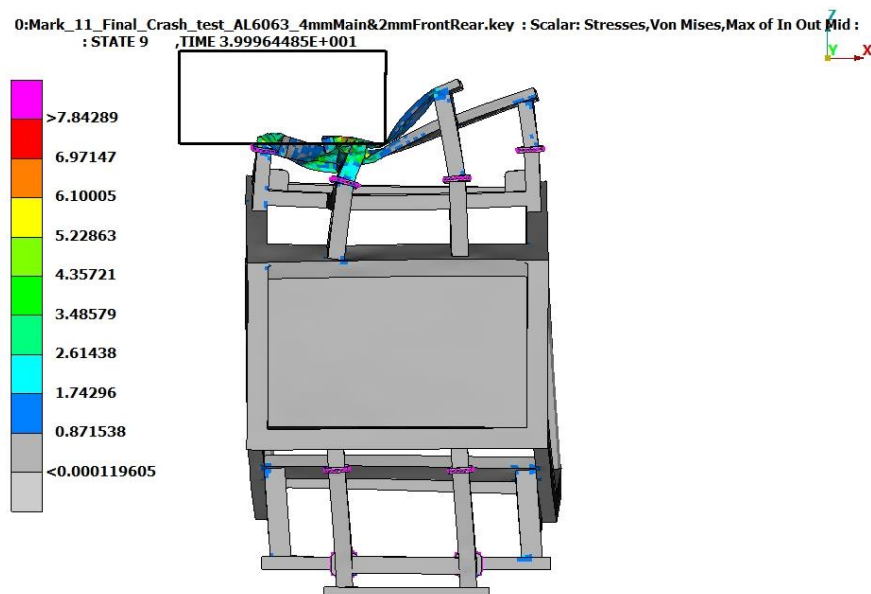
Εικόνα 5.9: Mark_11

- **5.2.1 Mark_11:**

1. Main_Chassis: 4mm
2. Front & Rear Subframe: 2mm
3. Velocity: 64 km/h

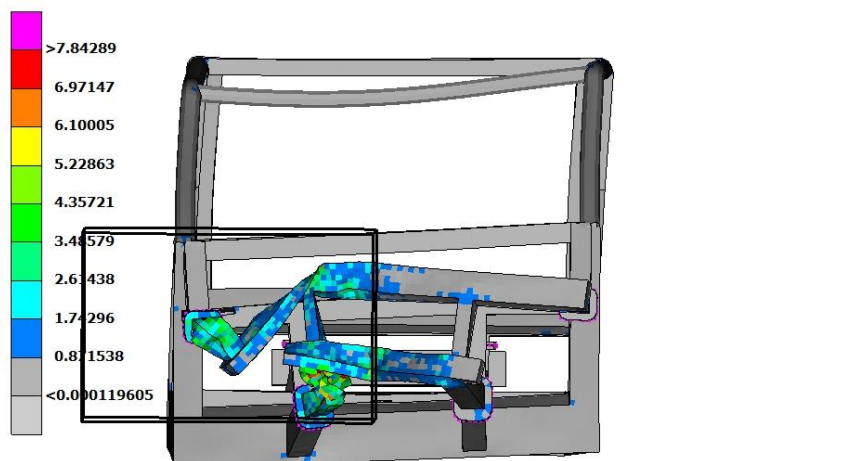
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης-τάσης της πρώτης δοκιμής του Mark11 (εικόνες 5.10-5.19):

Μέγιστη Παραμόρφωση:



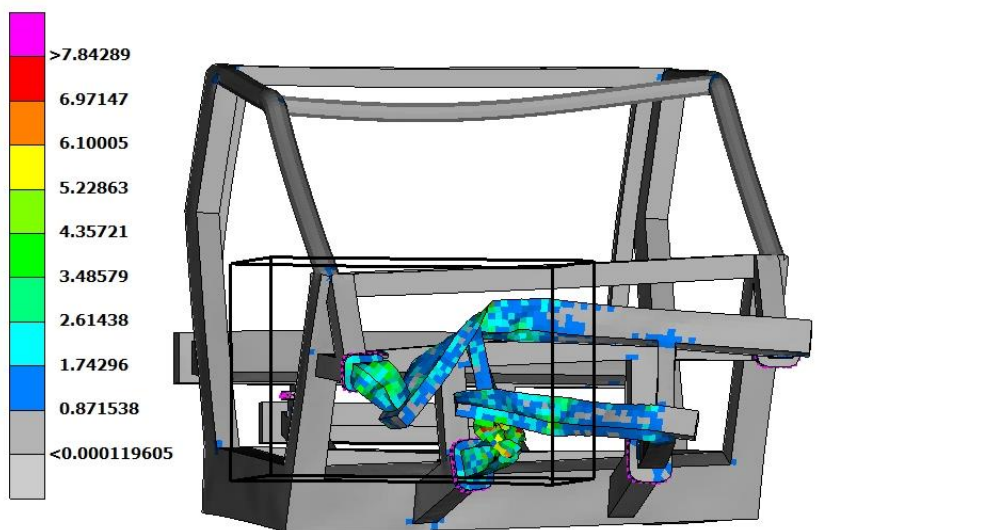
Εικόνα 5.10: Μέγιστη Παραμόρφωση - Κάτω όψη

0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_4mmMain&2mmFrontRear.key : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid :
: STATE 9 ,TIME 3.99964485E+001

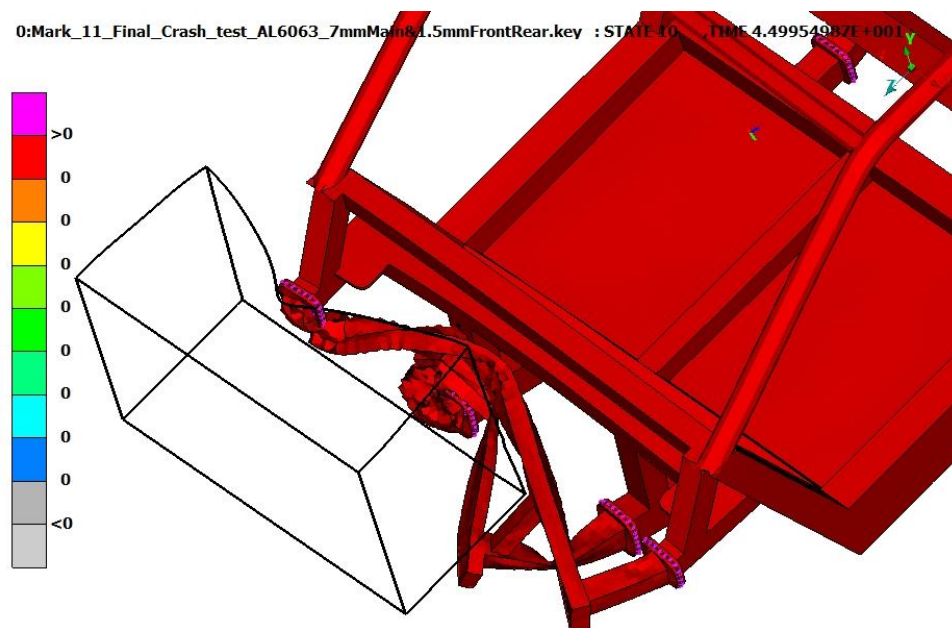
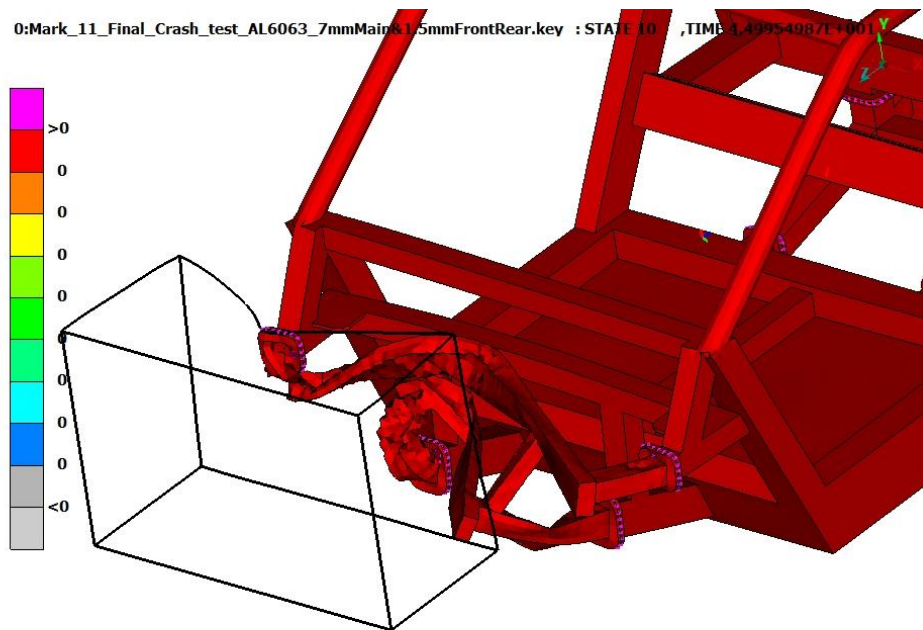


Εικόνα 5.11: Μέγιστη Παραμόρφωση - Εμπρόσθια Όψη

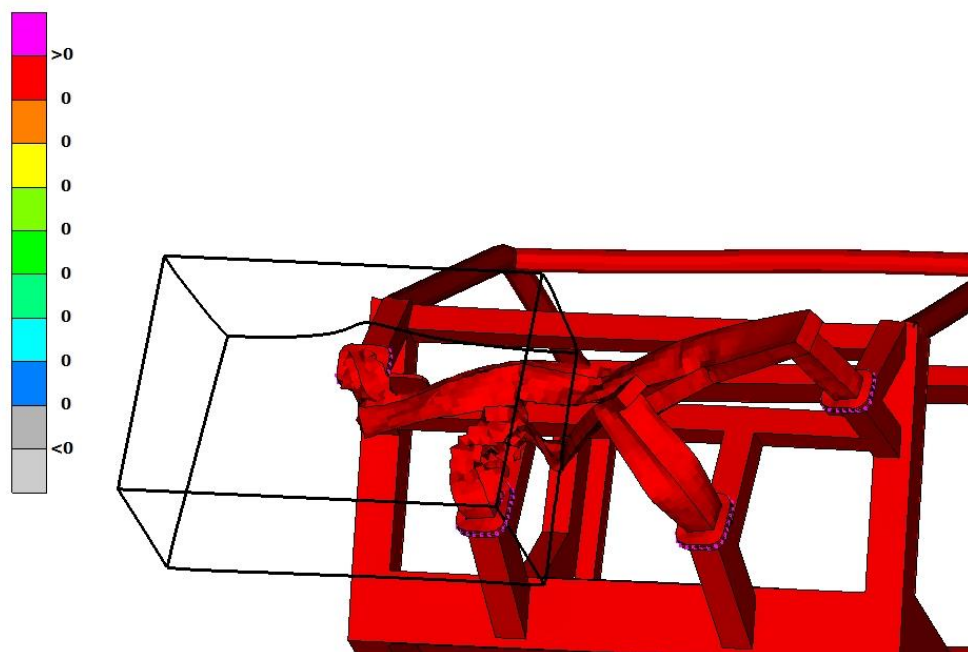
0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_4mmMain&2mmFrontRear.key : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid :
: STATE 9 ,TIME 3.99964485E+001



Εικόνα 5.12: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Εμπρόσθια όψη



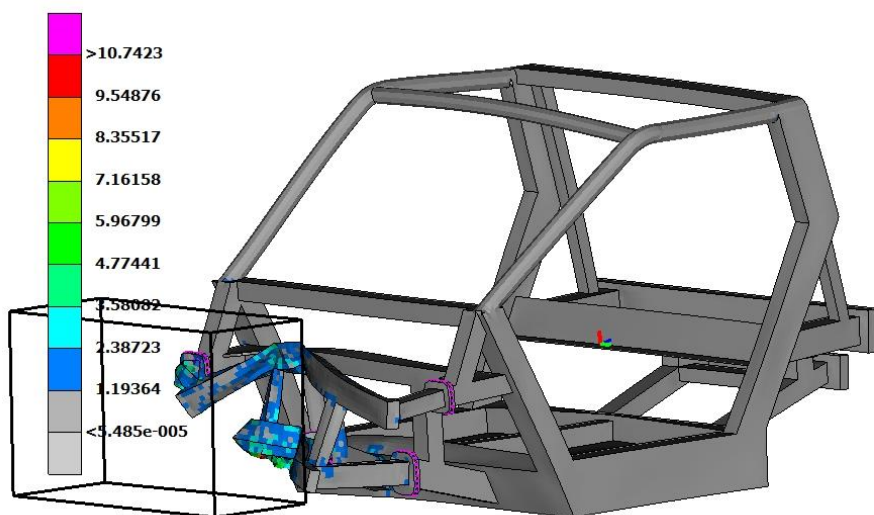
0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_7mmMain&1.5mmFrontRear.key : STATE 10 ,TIME 4.49954987E+001



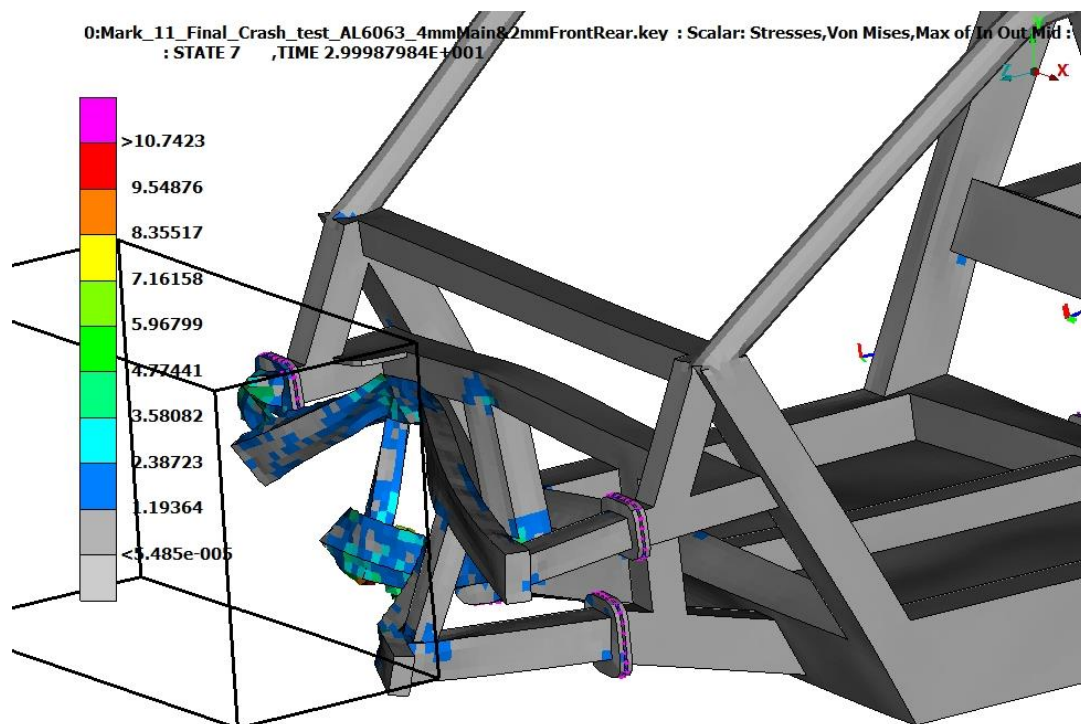
Εικόνα 5.15: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Εμπρόσθια όψη

Μέγιστη Τάση Von Mises:

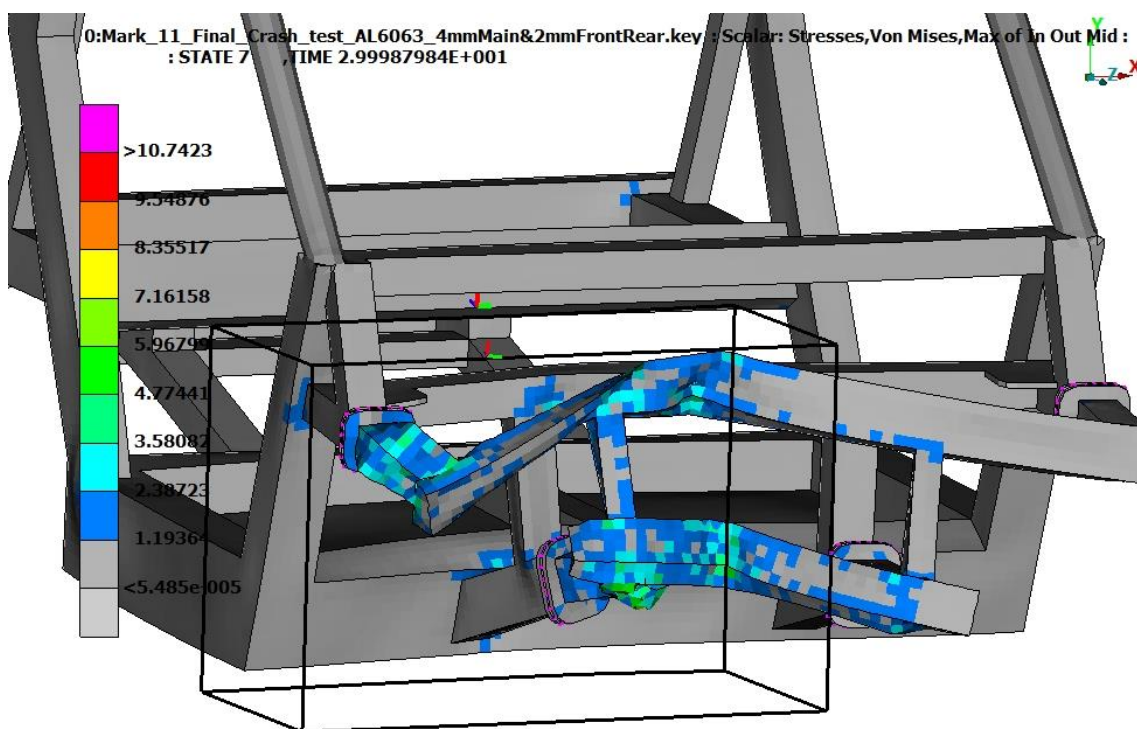
0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_4mmMain&2mmFrontRear.key : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid :
: STATE 7 ,TIME 2.99987984E+001



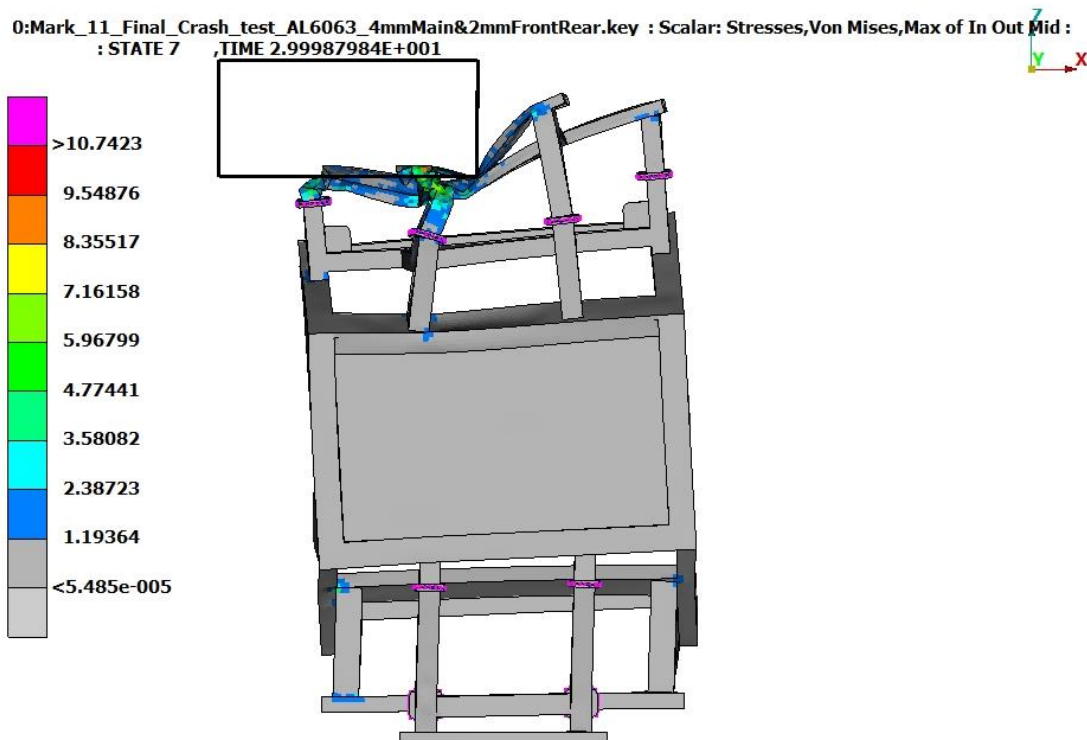
Εικόνα 5.16: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Εμπρόσθια Πλάγια Όψη



Εικόνα 5.17: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Εμπρόσθια Πλάγια Όψη



Εικόνα 5.18: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Εμπρόσθια Όψη



Εικόνα 5.19: Μέγιστη Παραμόρφωση & Τάση Von Mises - Κάτω Όψη

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο είναι πολύ μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού, με αποτέλεσμα να έχουμε πλαστική παραμόρφωση στην καμπίνα των επιβατών. Προκειμένου να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα προχωρούμε σε αλλαγή του πάχους του υλικού στο πλαίσιό μας. Αυτό γίνεται δυνατό, αφού όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.1, το πλαίσιο έχει μοντελοποιηθεί με πλέγμα κελύφους πράγμα που δίνει την δυνατότητα αυξομείωσης του πάχους του πλέγματος κατά βούληση, έως ότου βρεθεί το πλέον κατάλληλο : αυτό που δηλαδή θα δίνει την μεγαλύτερη ακαμψία στο πλαίσιο κρατώντας το βάρος σε λογικά πλαίσια.

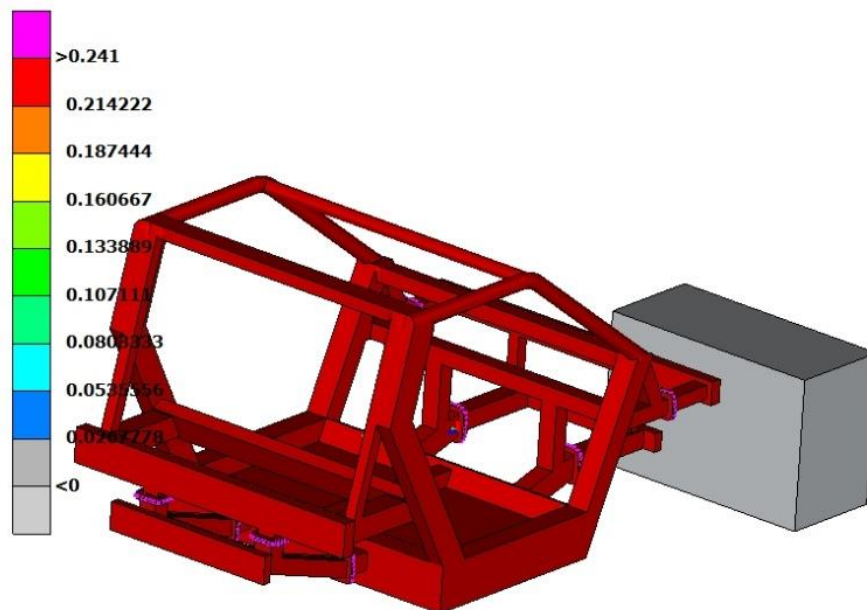
• 5.2.2 Mark_11 Attempt 2

1. Main_Chassis: 7mm
2. Front & Rear Subframe: 1.5mm
3. Velocity: 64 km/h

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης-τάσης της δεύτερης δοκιμής του Mark11 (εικόνες 5.20-5.36):

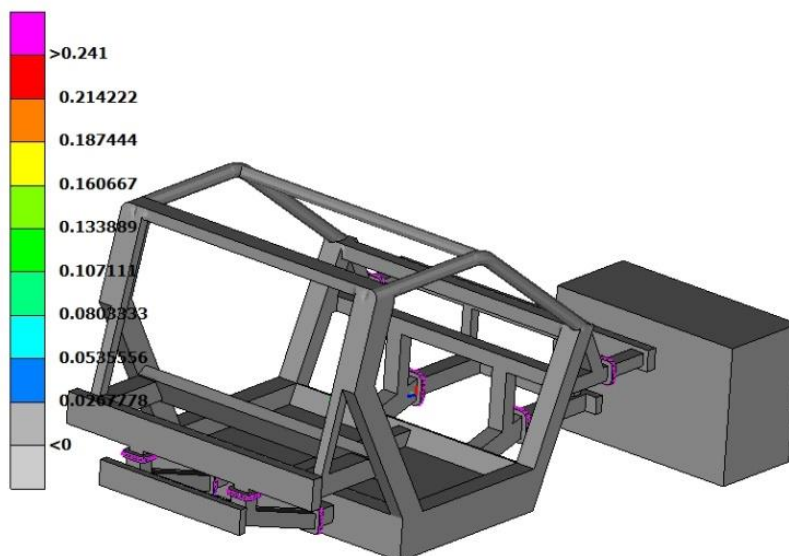
Μέγιστη Παραμόρφωση - Μέγιστη Τάση Von Mises:

0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_7mmMain&1.5mmFrontRear.key : ORIGINAL STATE



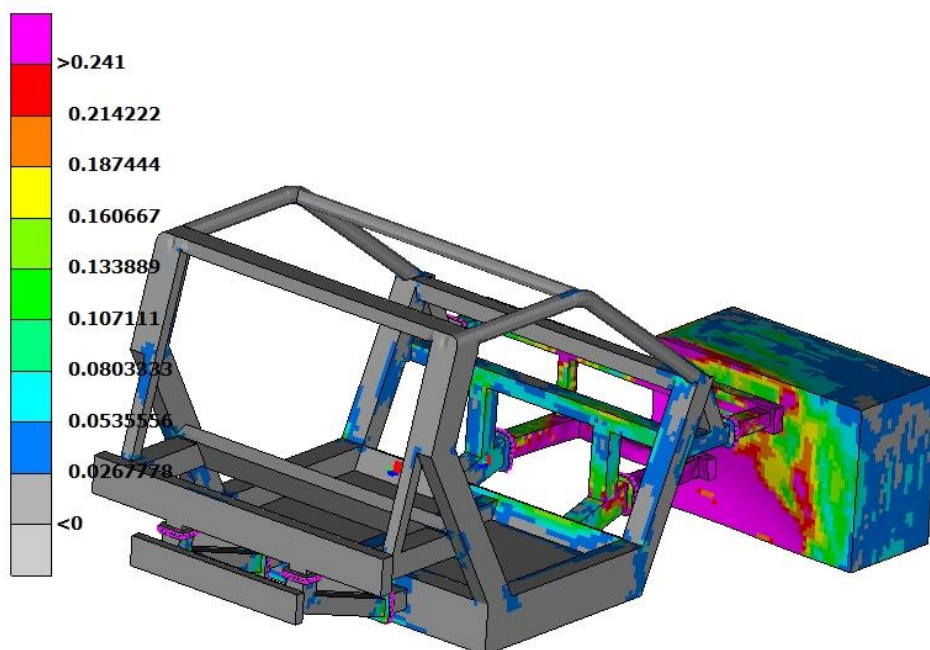
Εικόνα 5.20: Αρχική Κατάσταση

0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_7mmMain&1.5mmFrontRear.key : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid
:: STATE 1 ,TIME 0.00000000E+000

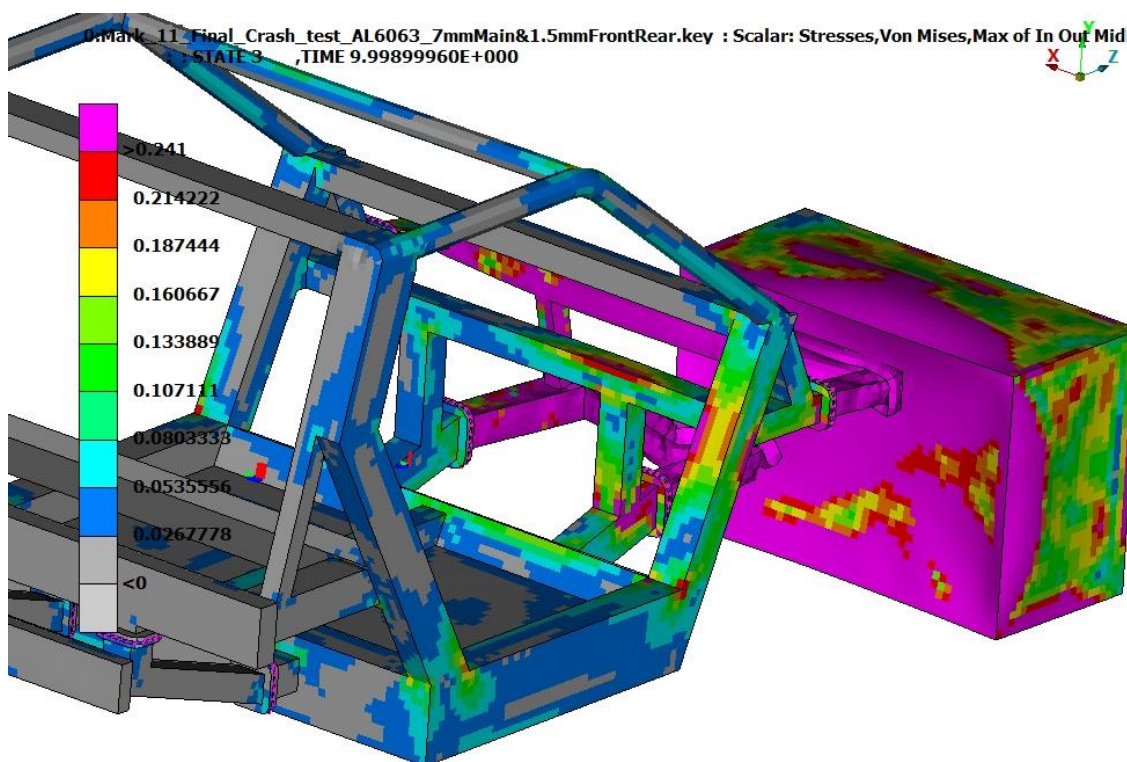


Εικόνα 5.21: State 1

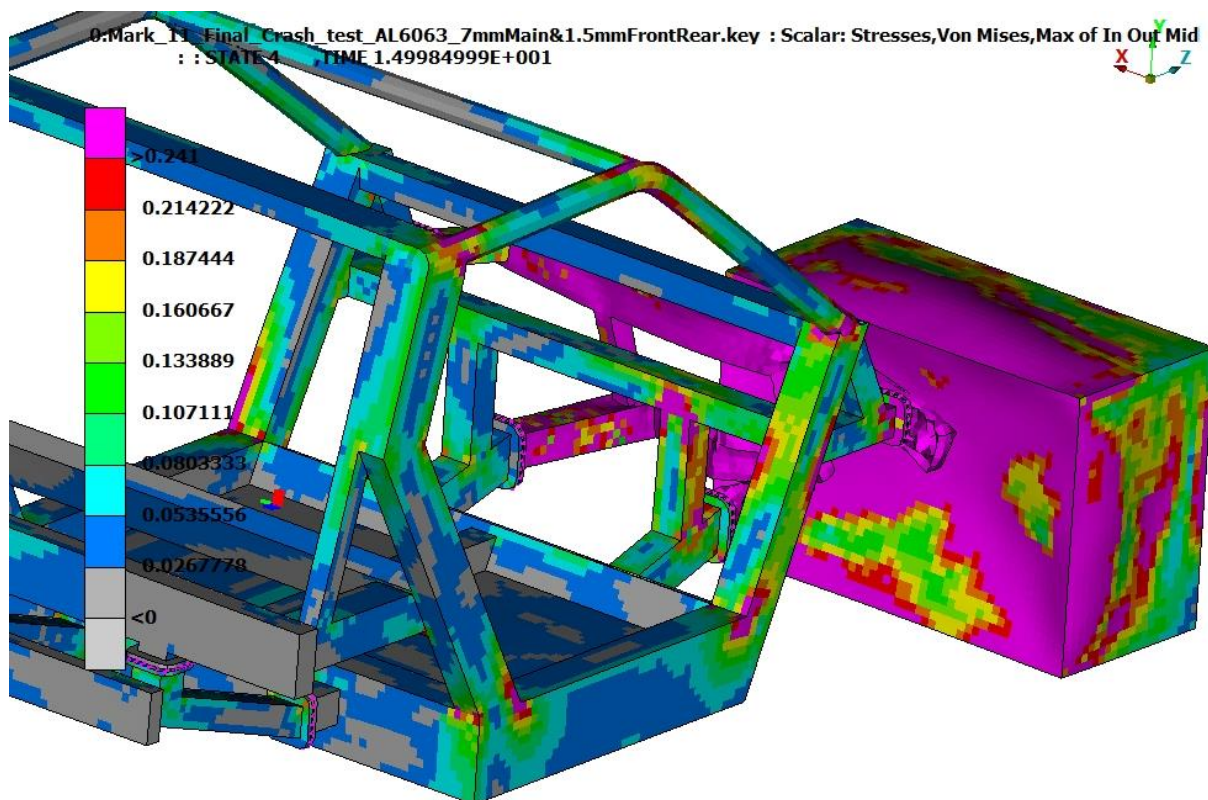
0:Mark_11_Final_Crash_test_AL6063_7mmMain&1.5mmFrontRear.key : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid
: : STATE 2 ,TIME 4.99949980E+000



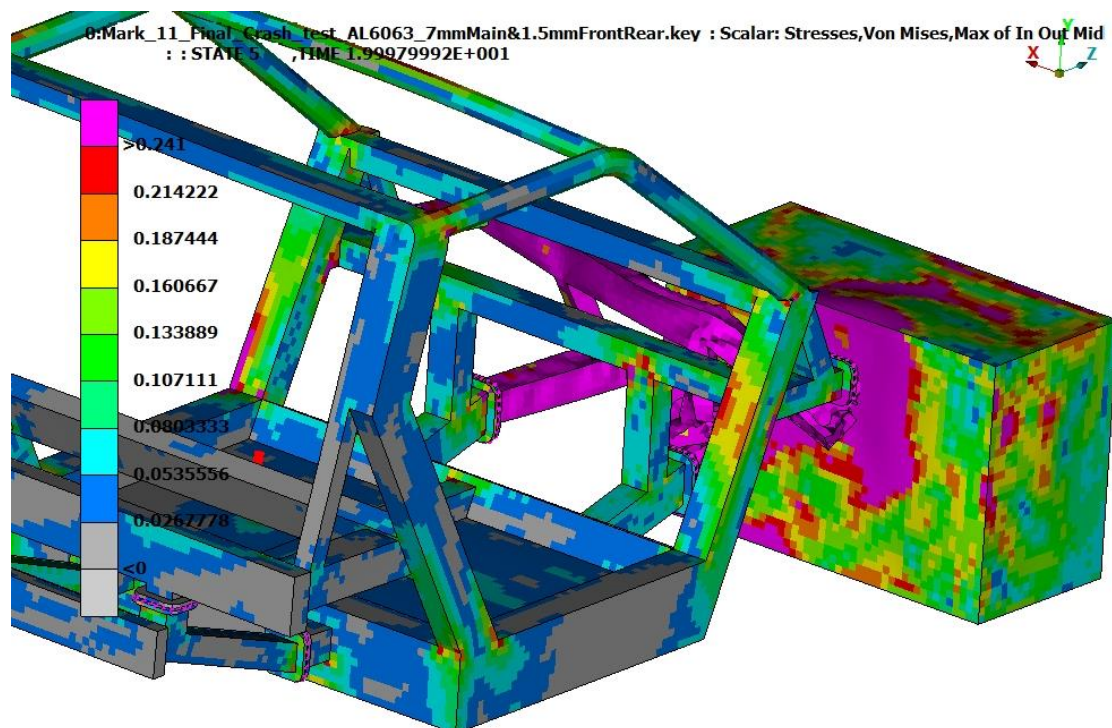
Εικόνα 5.22: State 2



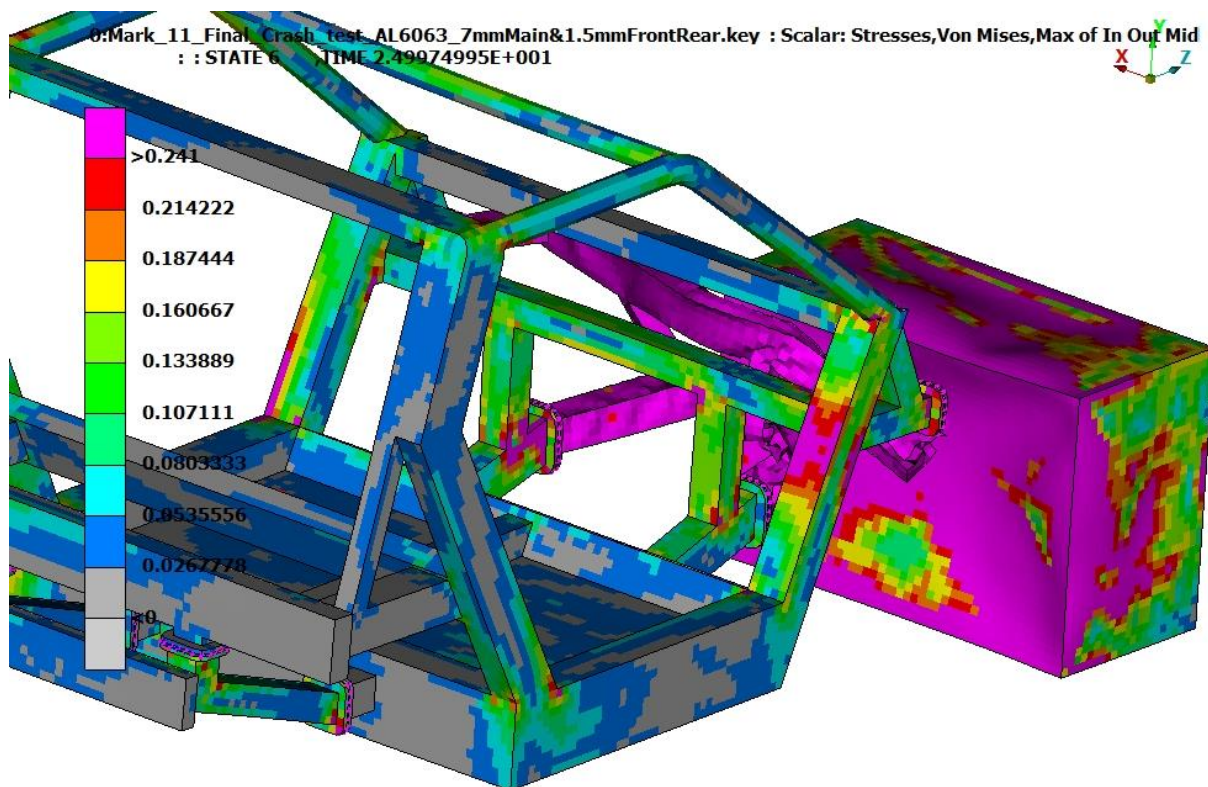
Εικόνα 5.23: State 3



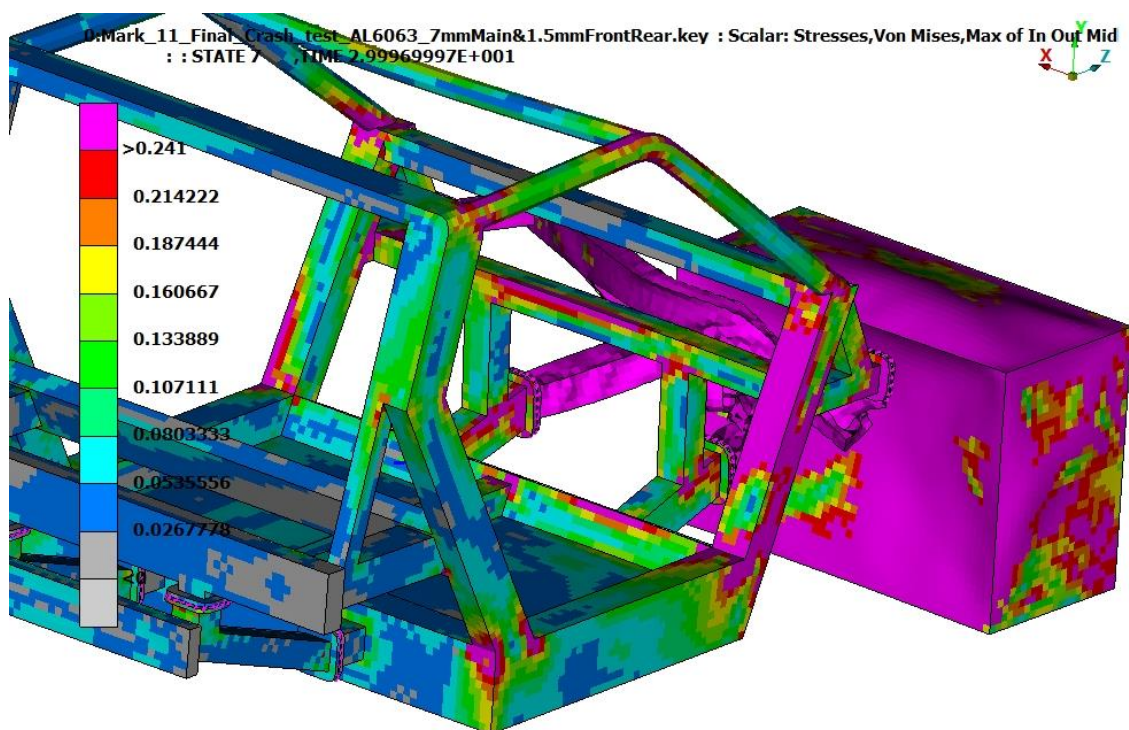
Εικόνα 5.24: State 4



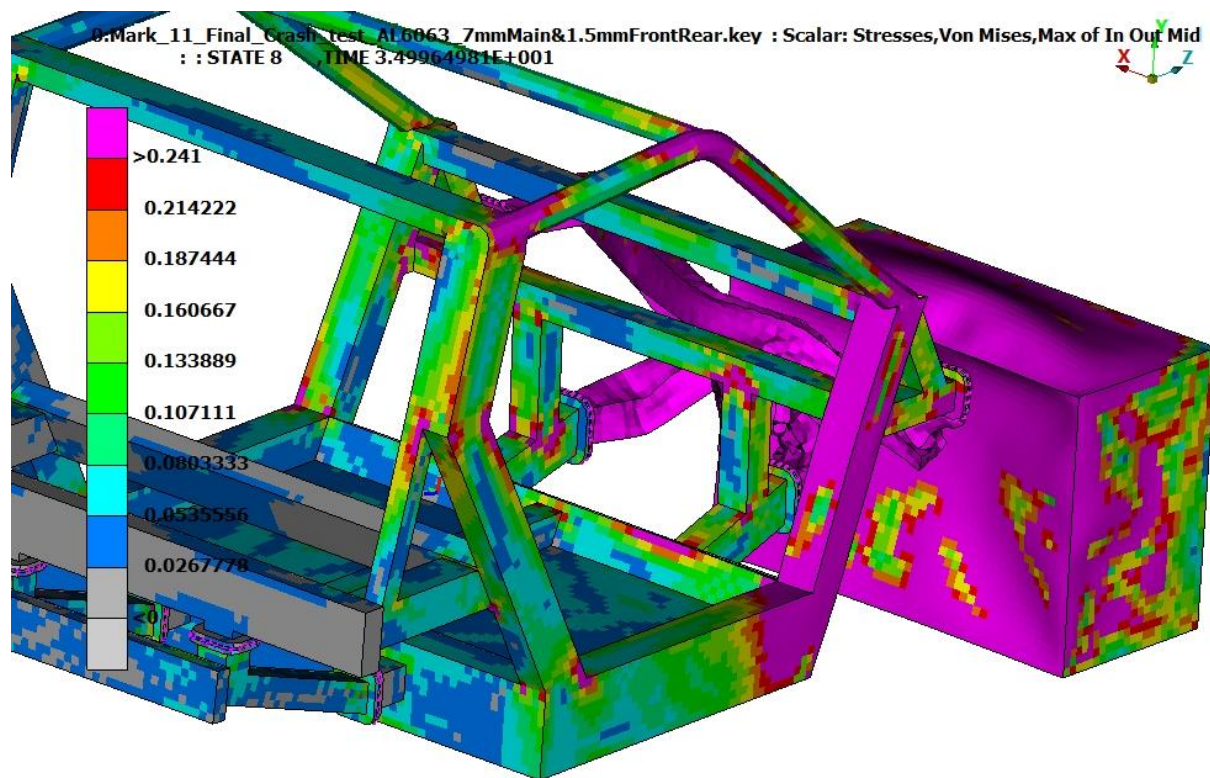
Εικόνα 5.25: State 5



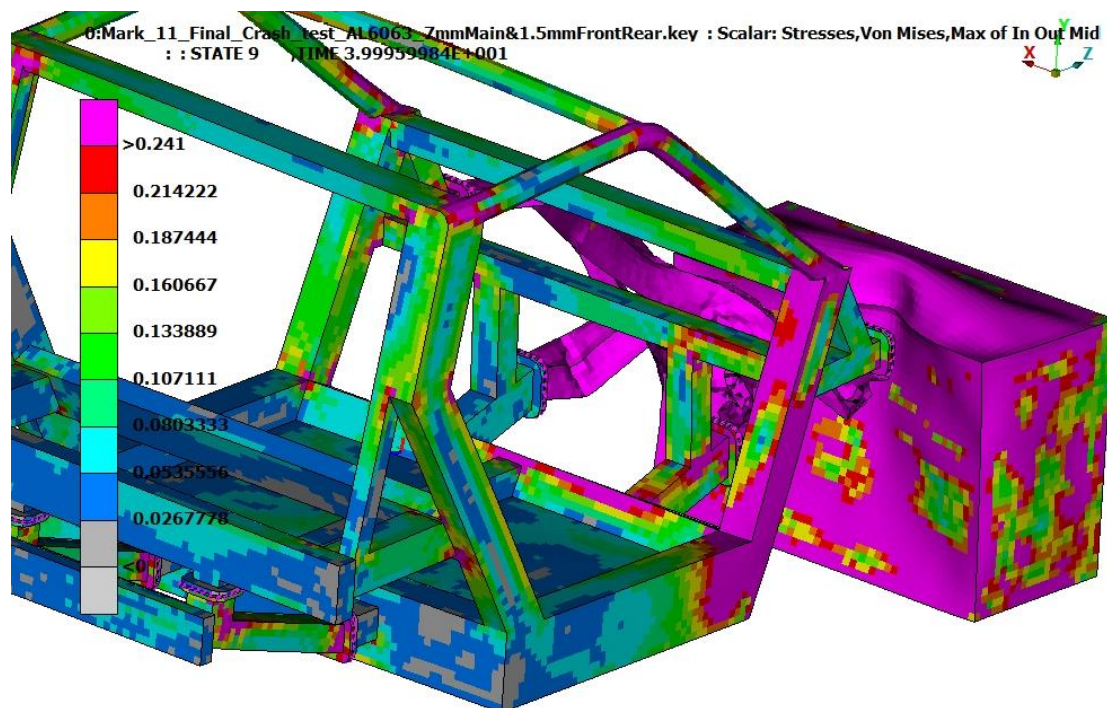
Εικόνα 5.26: State 6



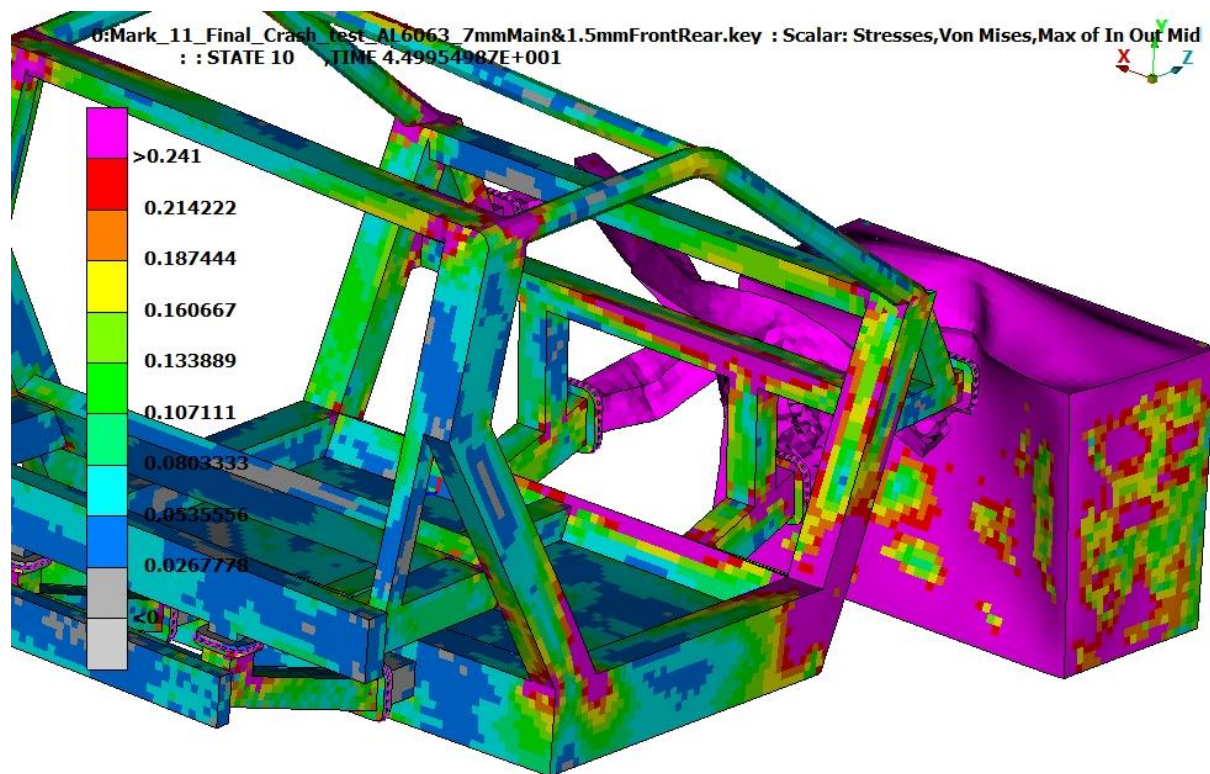
Εικόνα 5.27: State 7



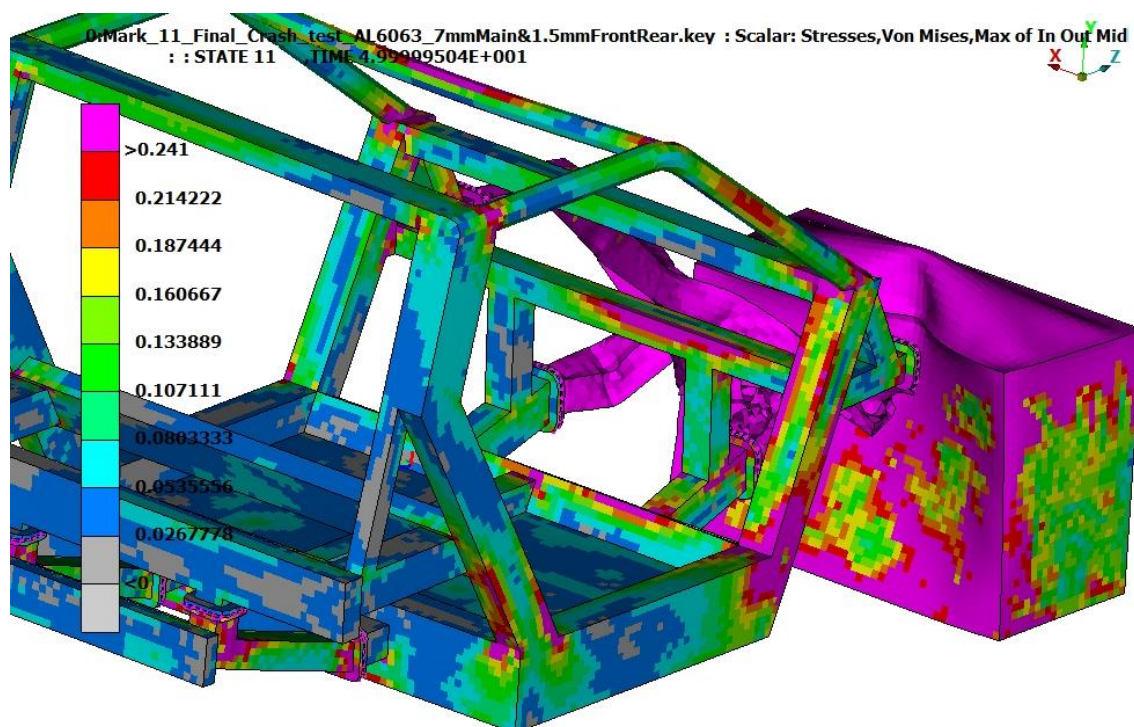
Εικόνα 5.28: State 8



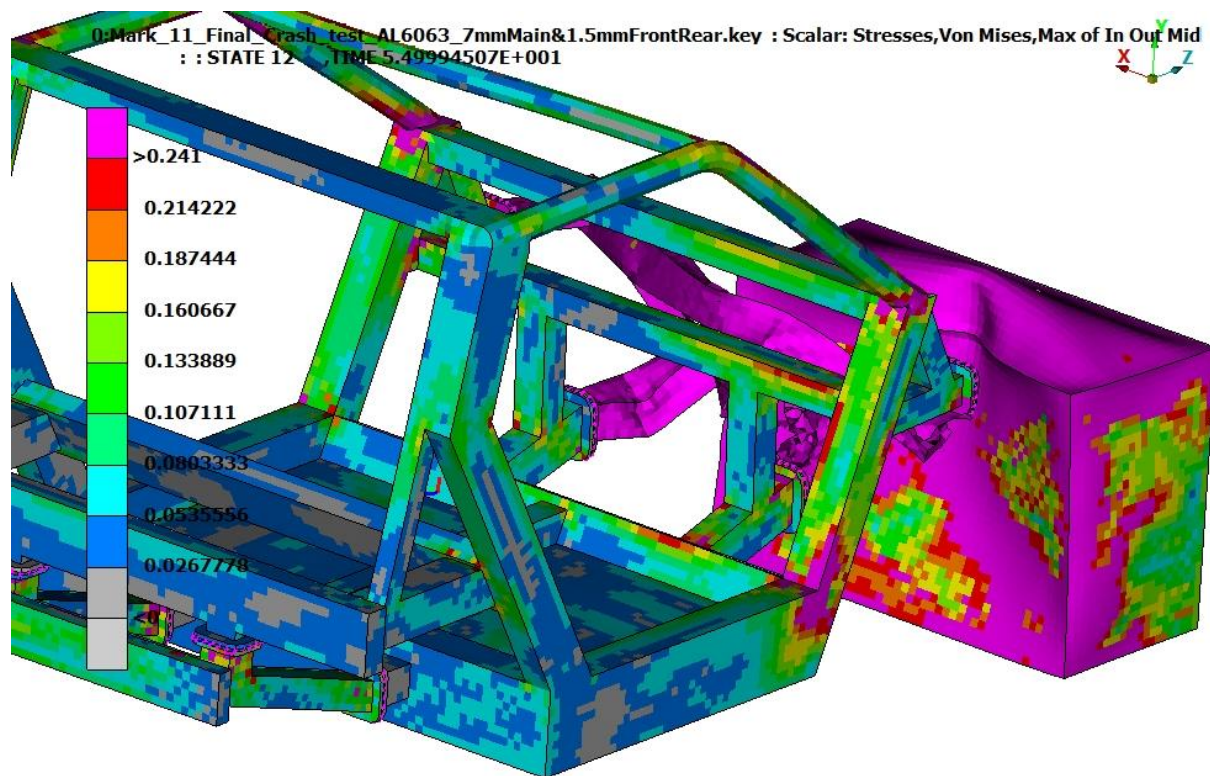
Εικόνα 5.29: State 9



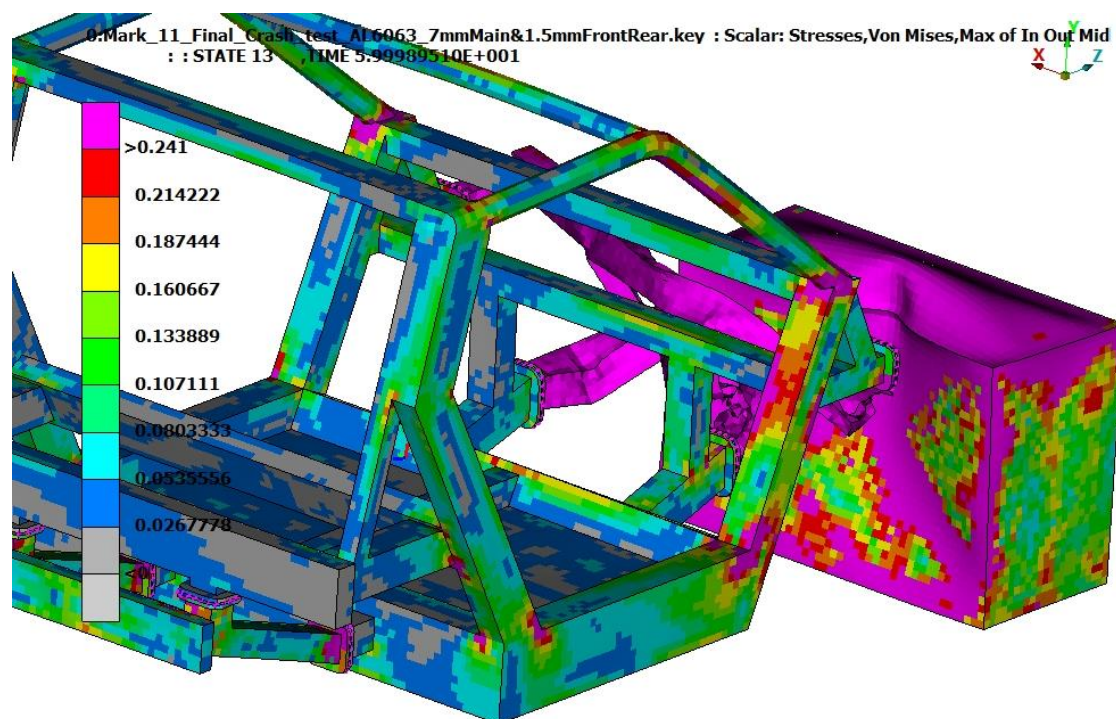
Εικόνα 5.30: State 10



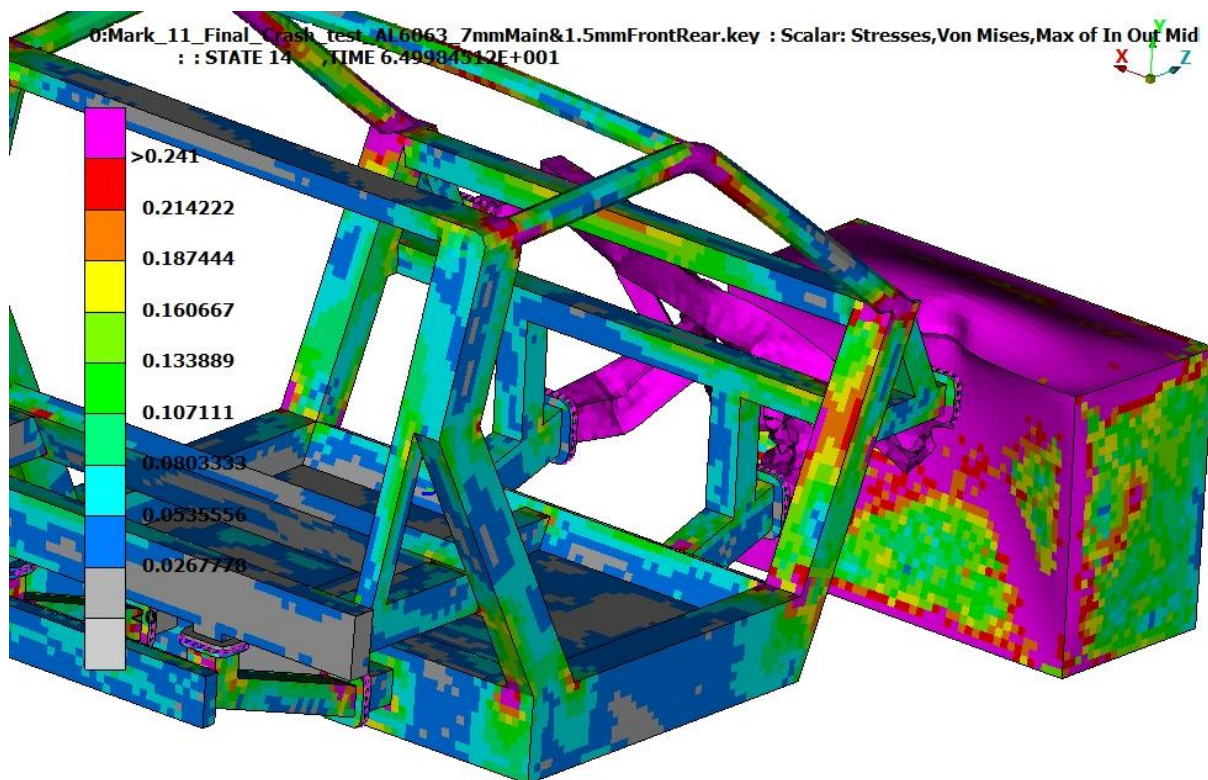
Εικόνα 5.31: State 11



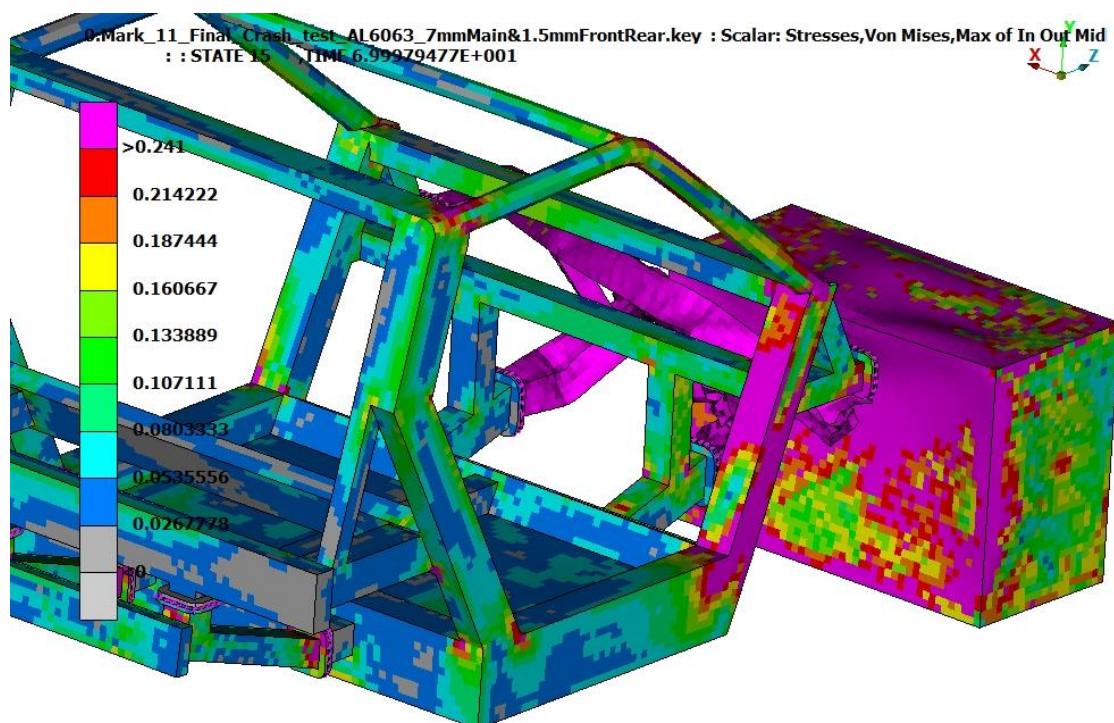
Εικόνα 5.32: State 12



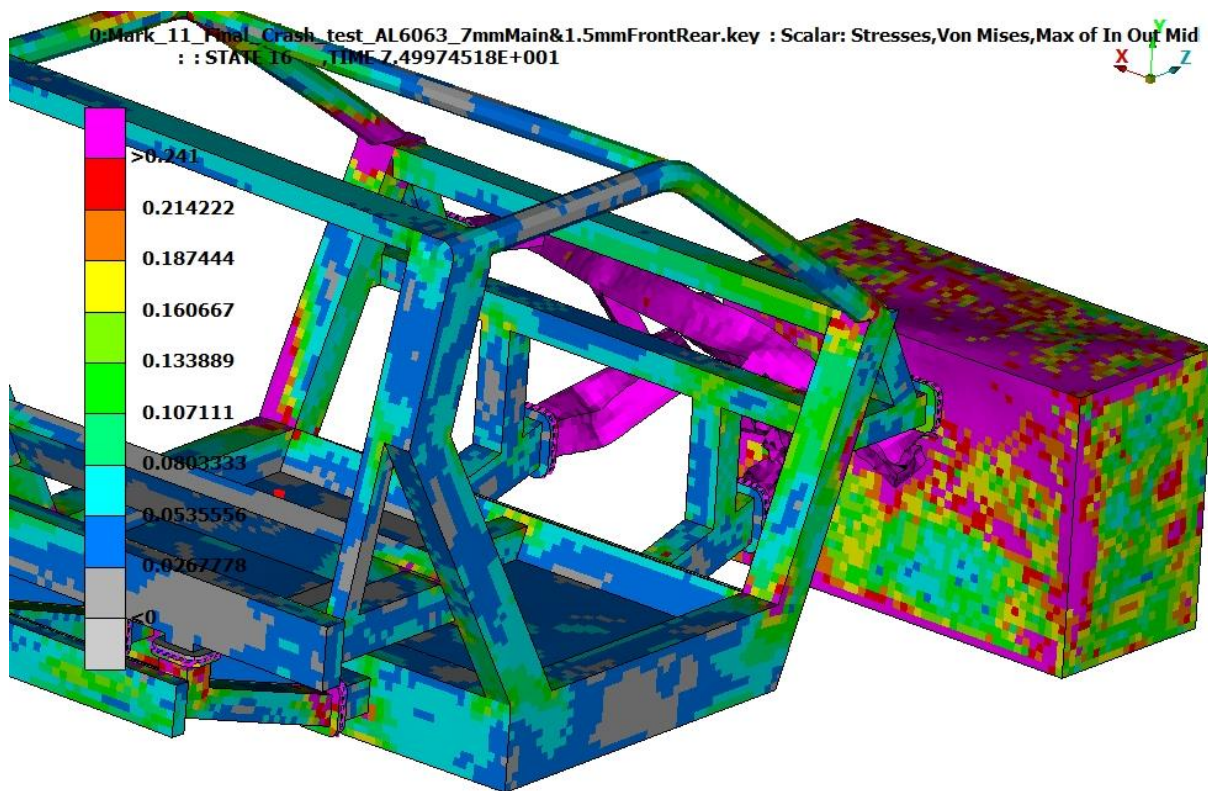
Εικόνα 5.33: State 13



Εικόνα 5.34: State 14



Εικόνα 5.35: State 15



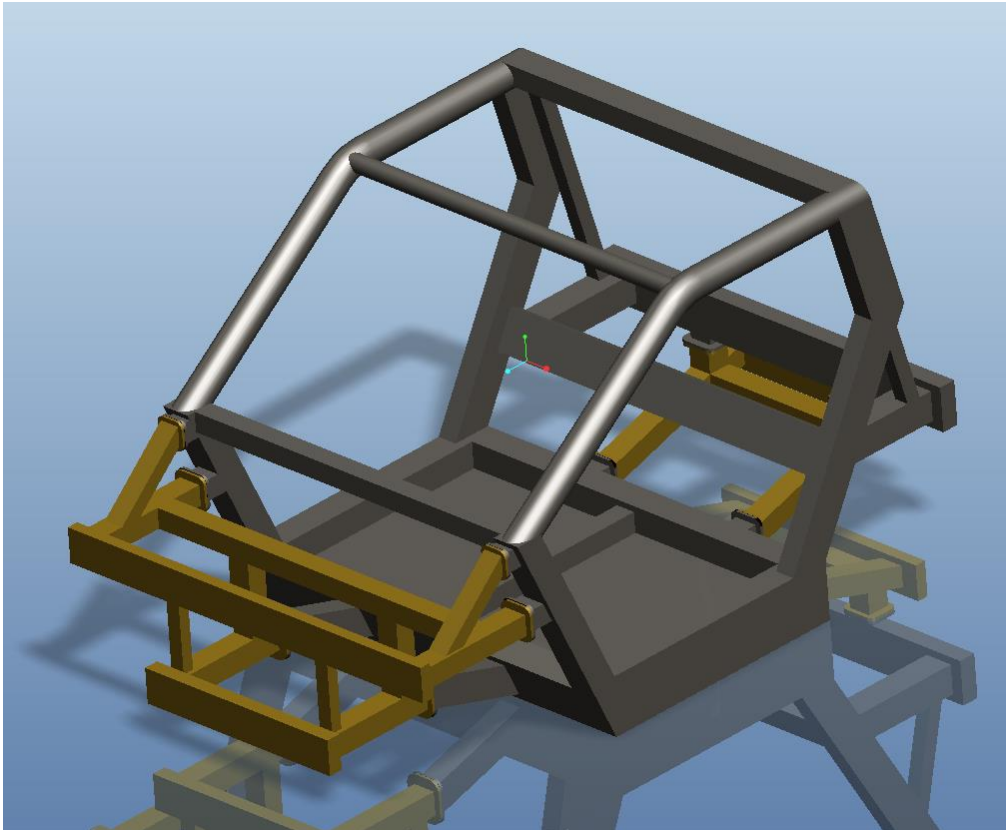
Εικόνα 5.36: State 16

Στα παραπάνω States παρατηρείται ότι το όριο διαρροής του υλικού μας ξεπερνιέται μόνο σε ορισμένα σημεία στην καμπίνα των επιβατών. Συγκεκριμένα εκεί όπου το χρώμα είναι φούξια, έχουν ξεπεραστεί τα 241 MPa τάσης που είναι και το όριο διαρροής του υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί. Αυτό παρατηρείται (όσον αφορά στο κεντρικό πλαίσιο) από το στιγμιότυπο 4 έως και το πέρας της προσομοίωσης. Συνεπώς ο επανασχεδιασμός του πλαισίου είναι κάτι που δεν μπορεί να αποφευχθεί, σε μία προσπάθεια να γίνει το εμπρόσθιο υποπλαίσιο ακόμα μεγαλύτερο, πράγμα που θα επιτευχθεί φέρνοντας όσο το δυνατόν πιο πίσω τα σημεία πρόσδεσης του εμπρόσθιου υποπλαισίου στο κεντρικό πλαίσιο. Το επανασχεδιασμένο πλαίσιο που προκύπτει θα ονομάζεται από εδώ και στο εξής Mark_12.

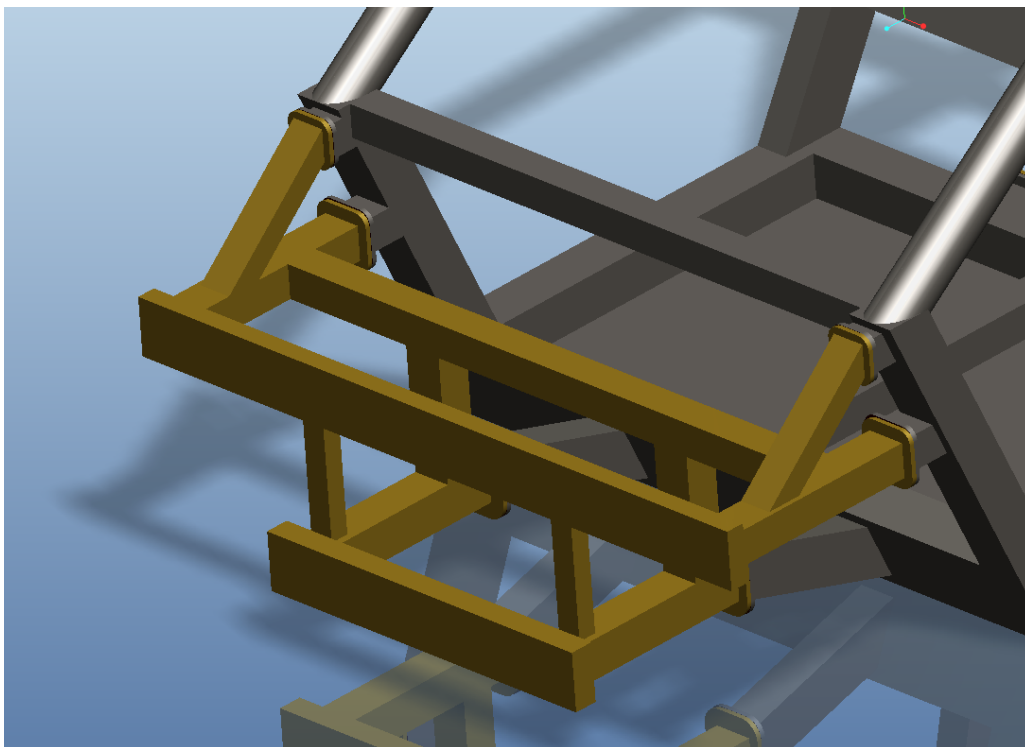
- **5.3 Mark_12:**

1. Main_Chassis: 7.5 mm
2. Front & Rear Subframe: 1.5 mm
3. Velocity: 64 km/h

Μία άποψη του Mark_12 φαίνεται παρακάτω εντός του περιβάλλοντος CAD:

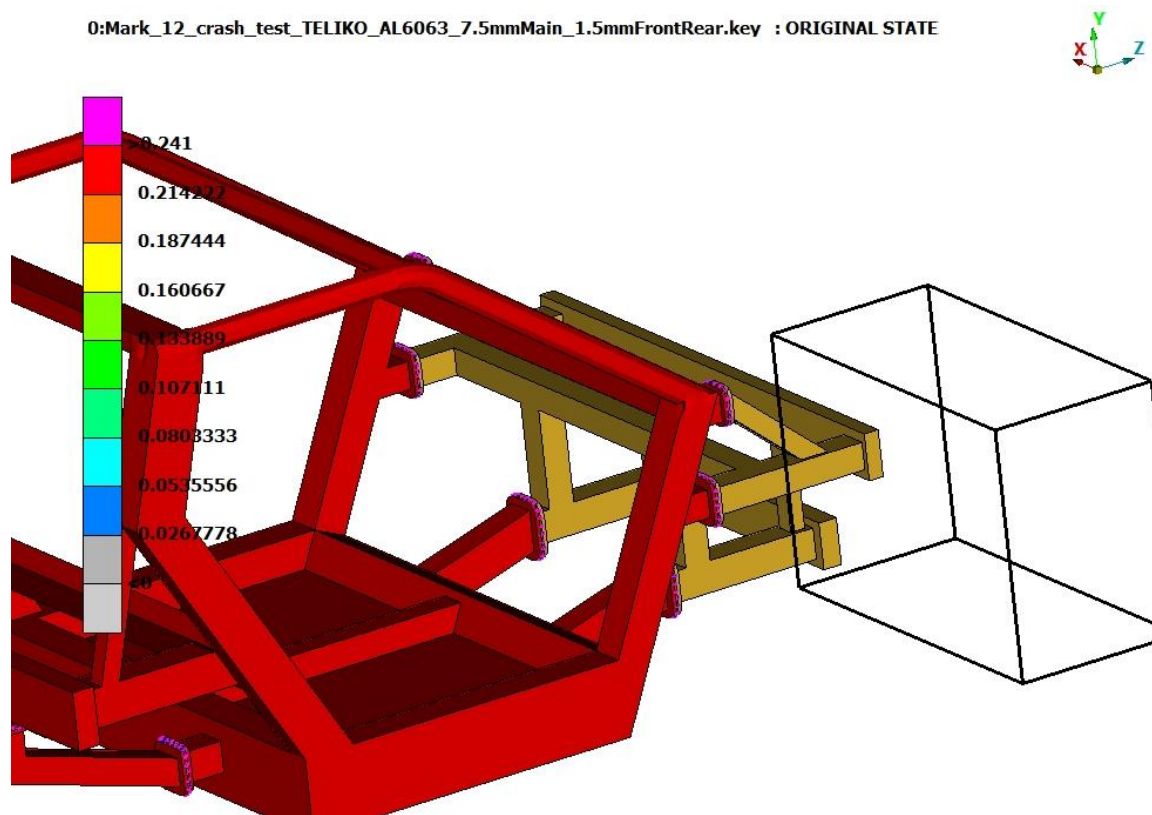


Εικόνα 5.37: Τρισδιάστατη όψη του Mark_12

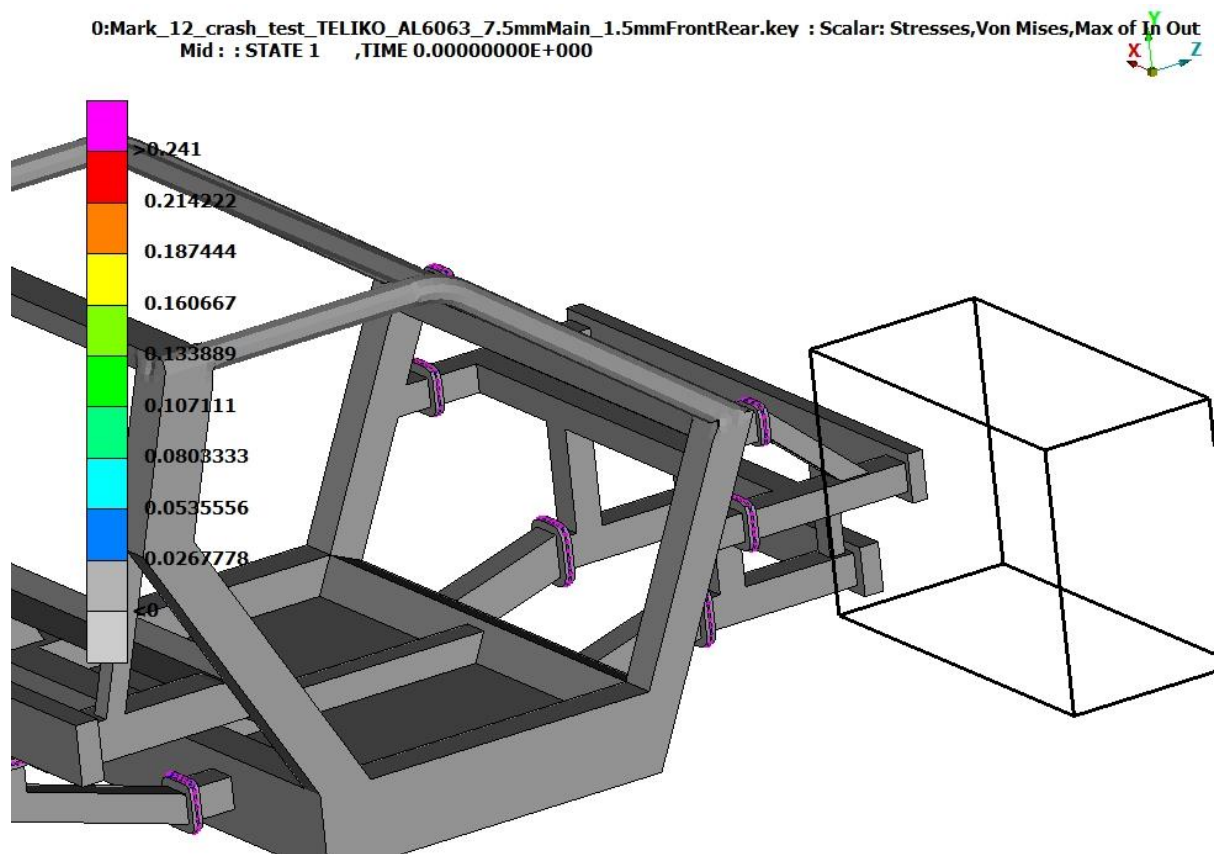


Εικόνα 5.38: Τρισδιάστατη όψη του Mark_12

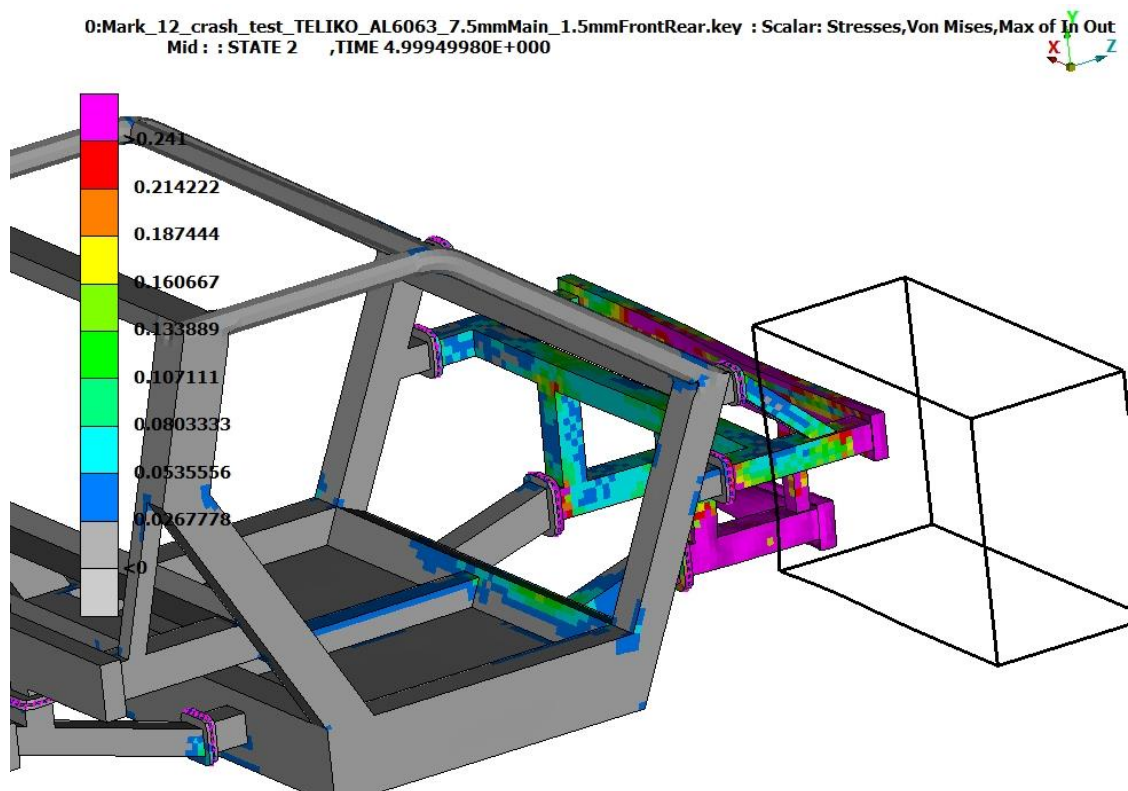
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης-τάσης της πρώτης δοκιμής του Mark12 (εικόνες 5.37-5.55):



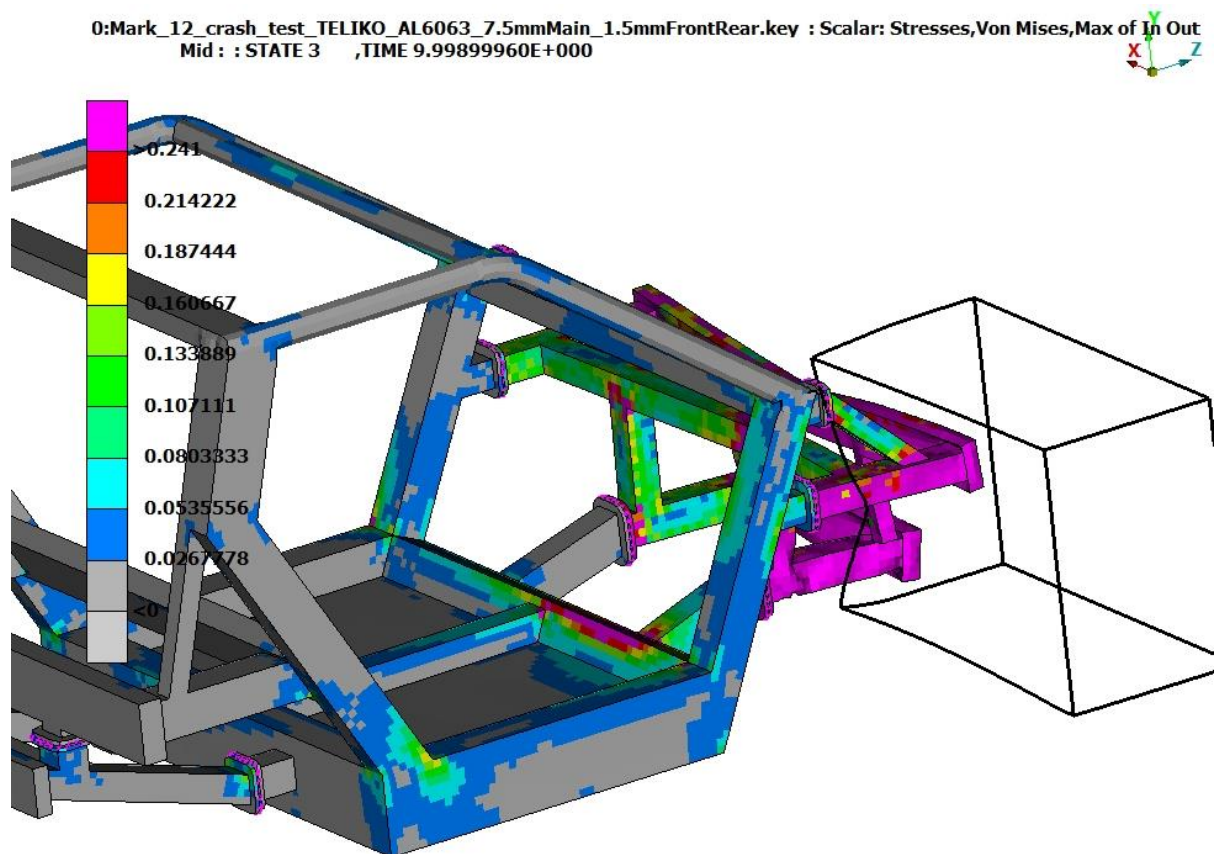
Εικόνα 5.38: Αρχική Κατάσταση



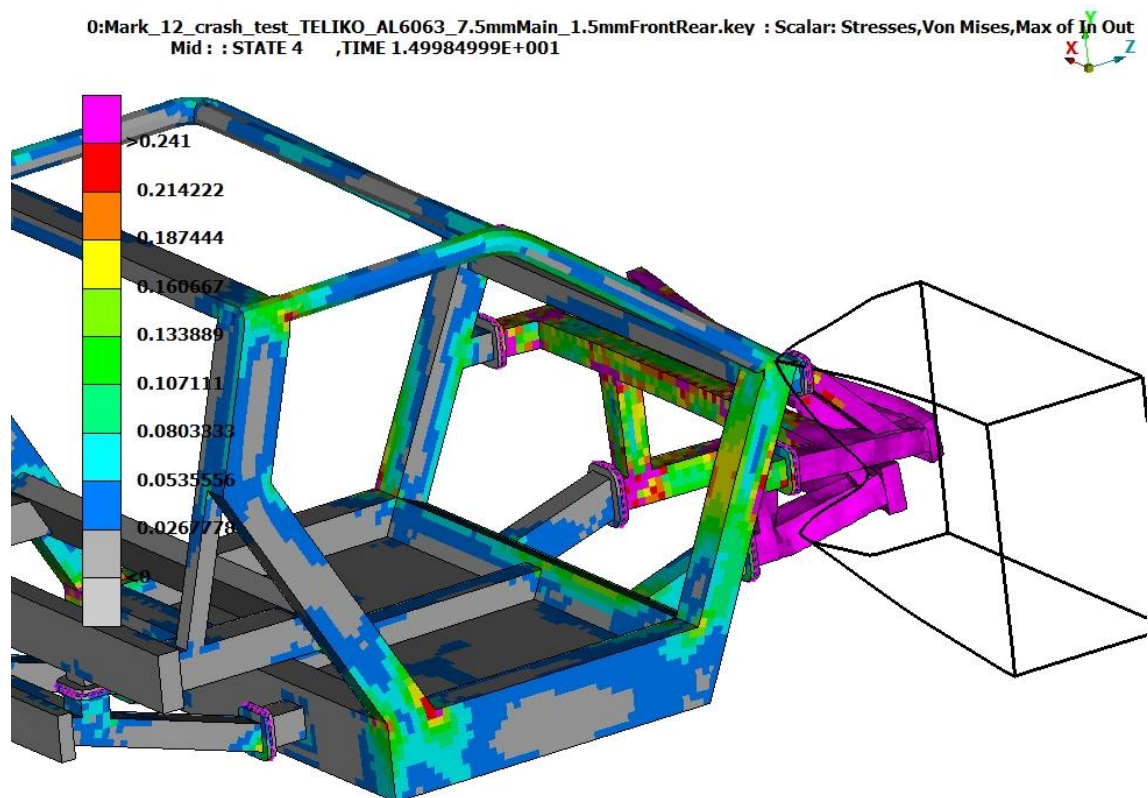
Εικόνα 5.39: State 1



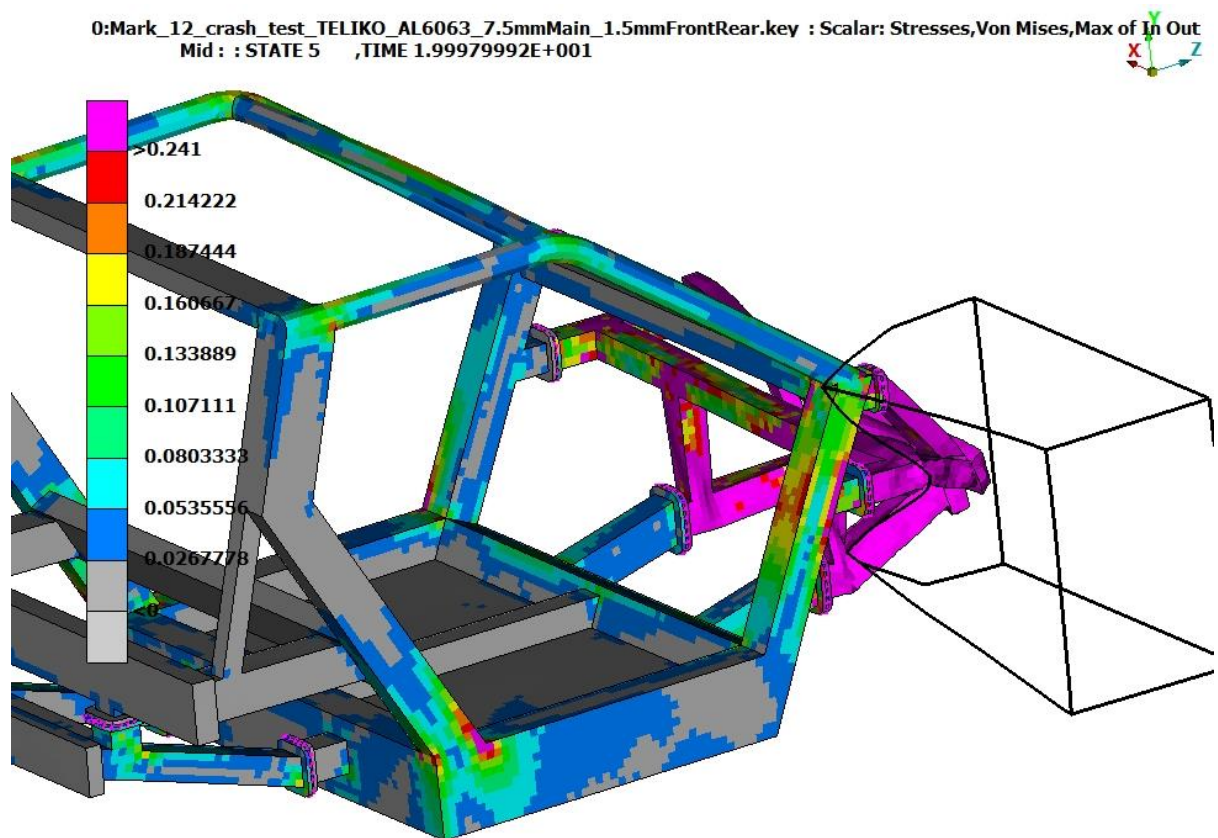
Εικόνα 5.40: State 2



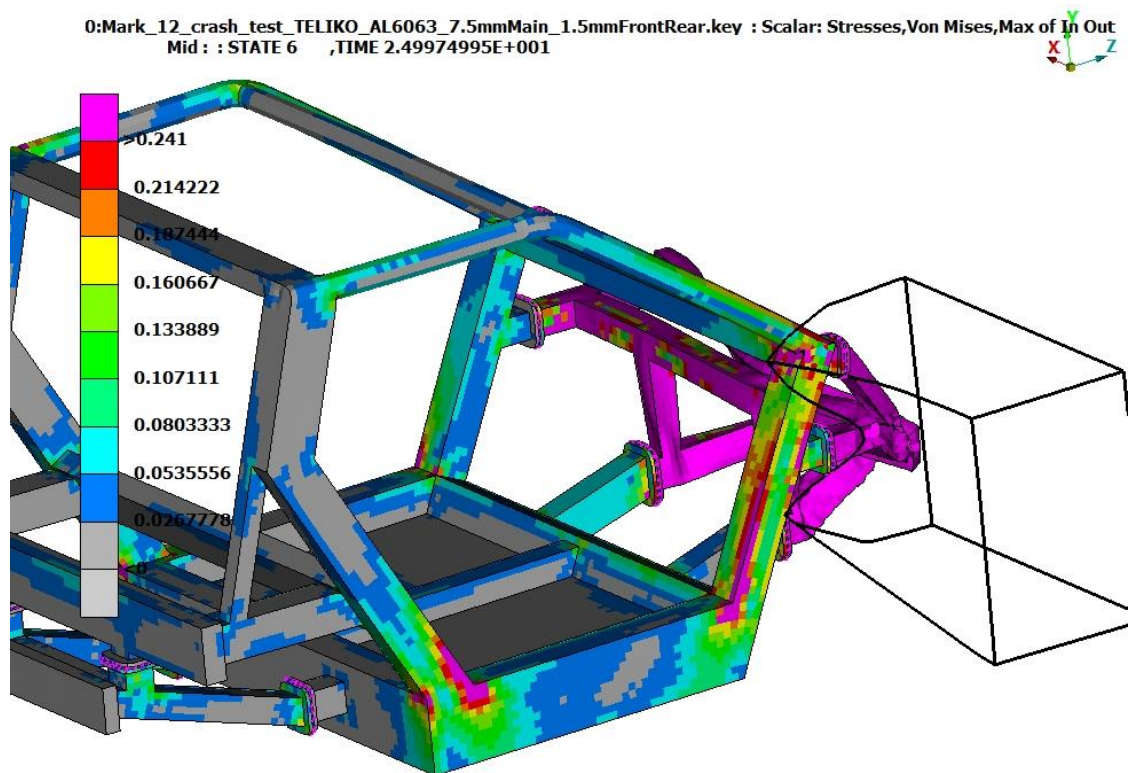
Εικόνα 5.41: State 3



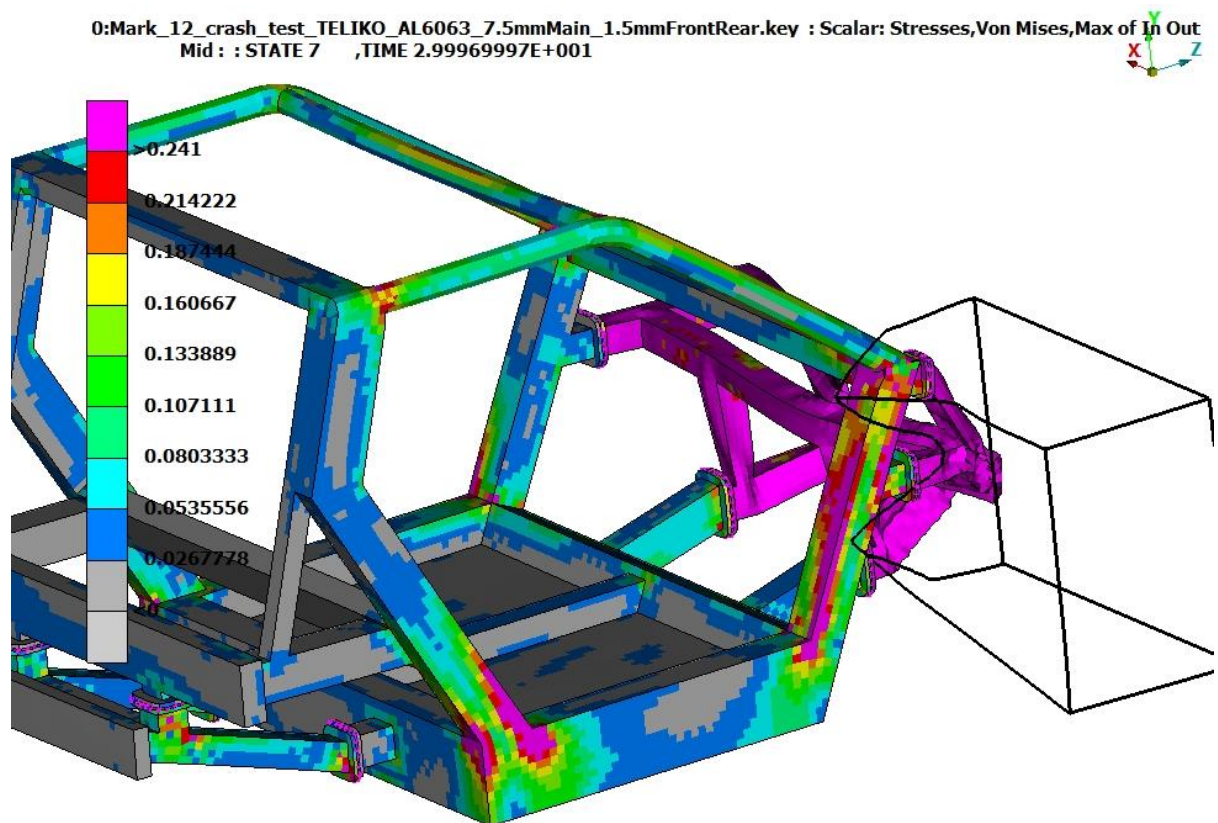
Εικόνα 5.42: State 4



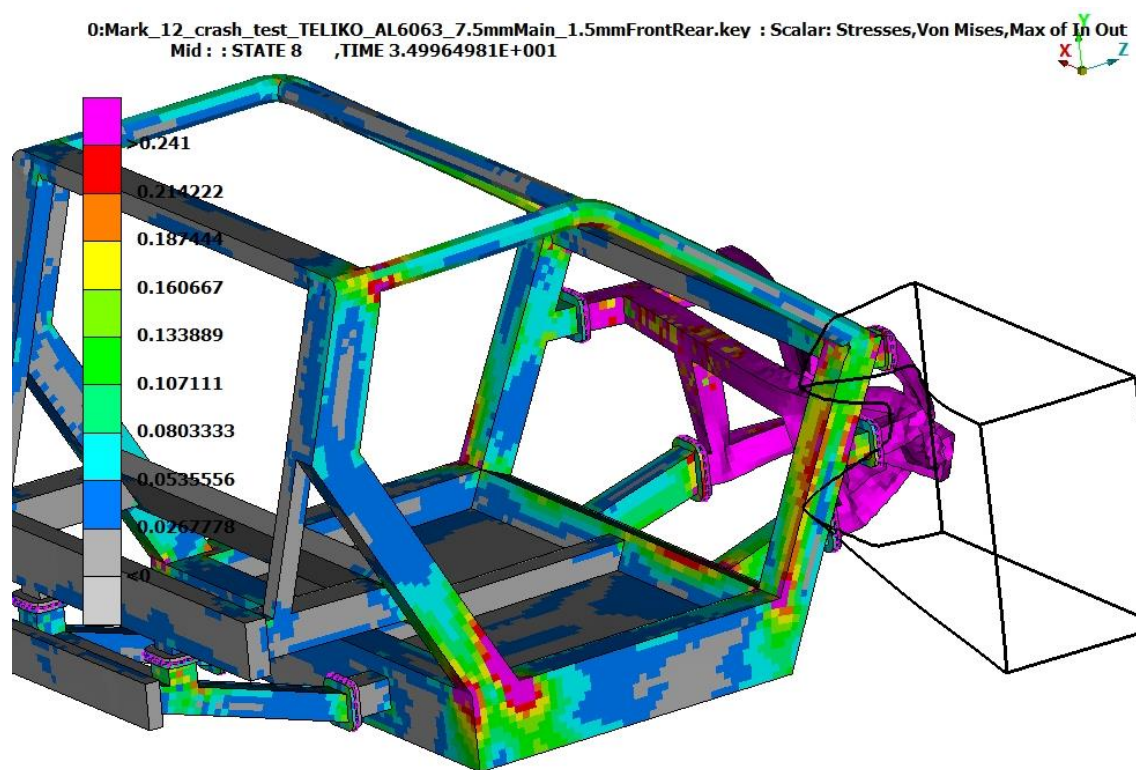
Εικόνα 5.43: State 5



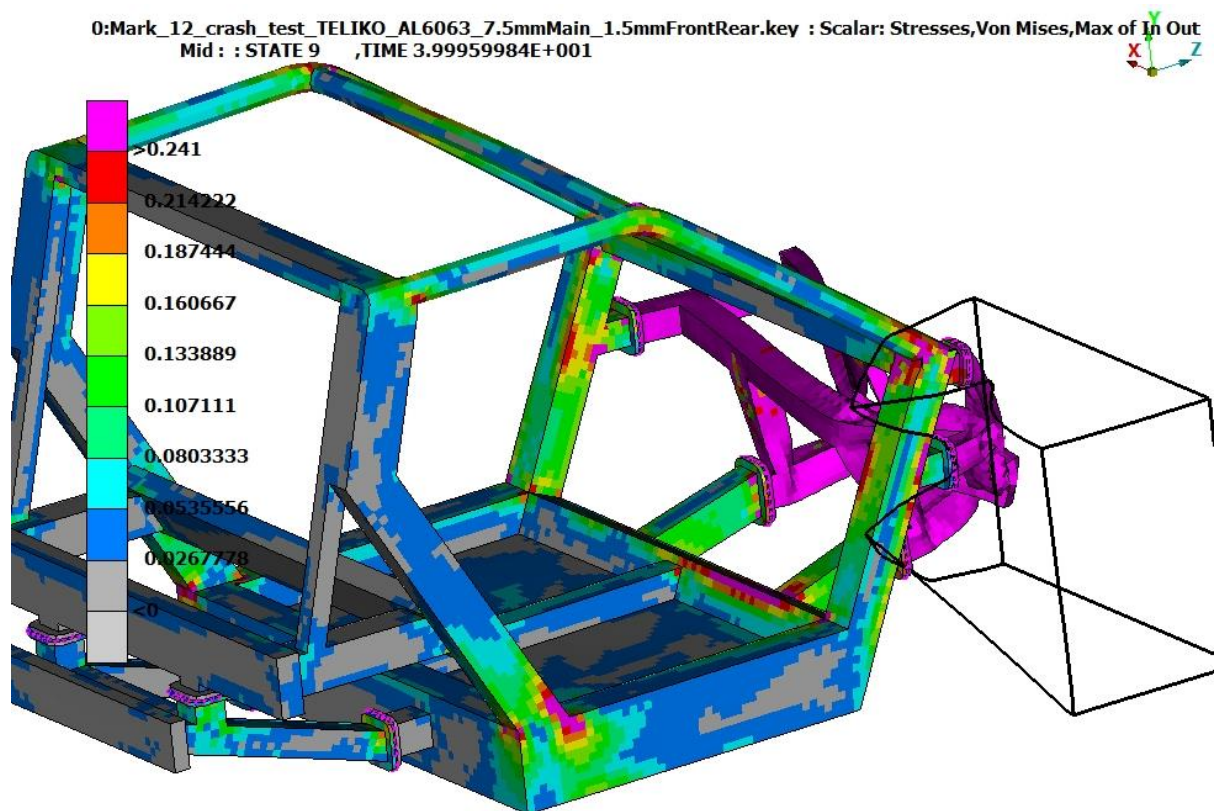
Εικόνα 5.44: State 6



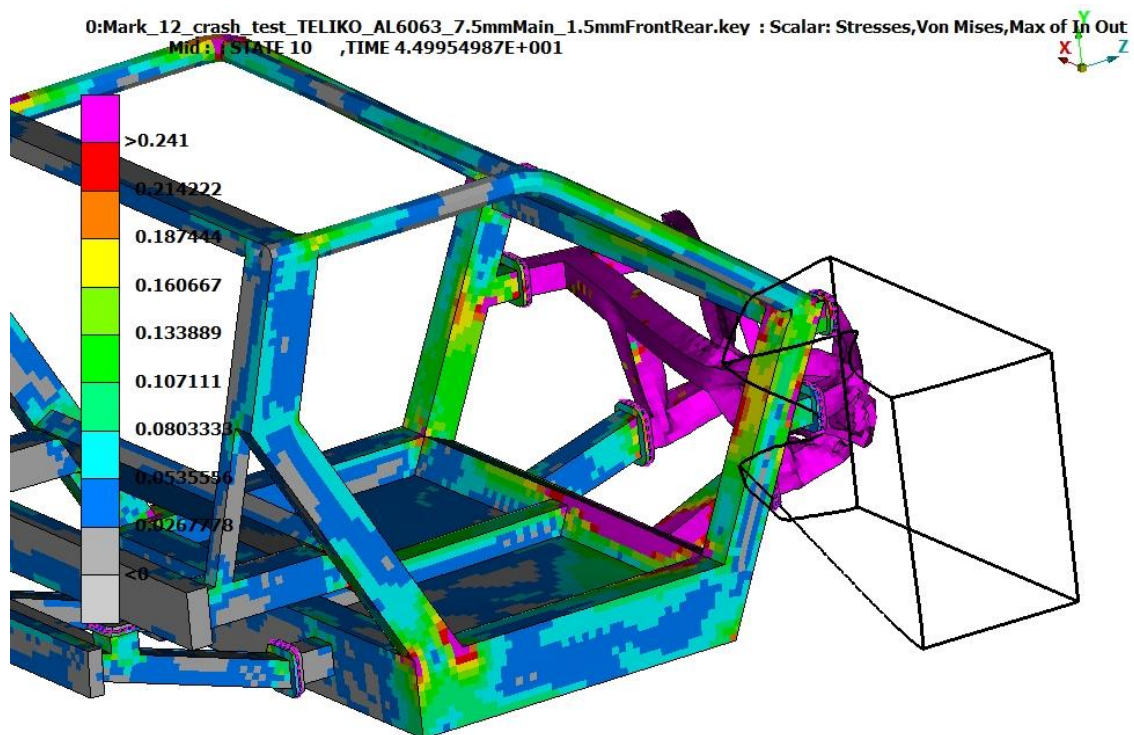
Εικόνα 5.45: State 7



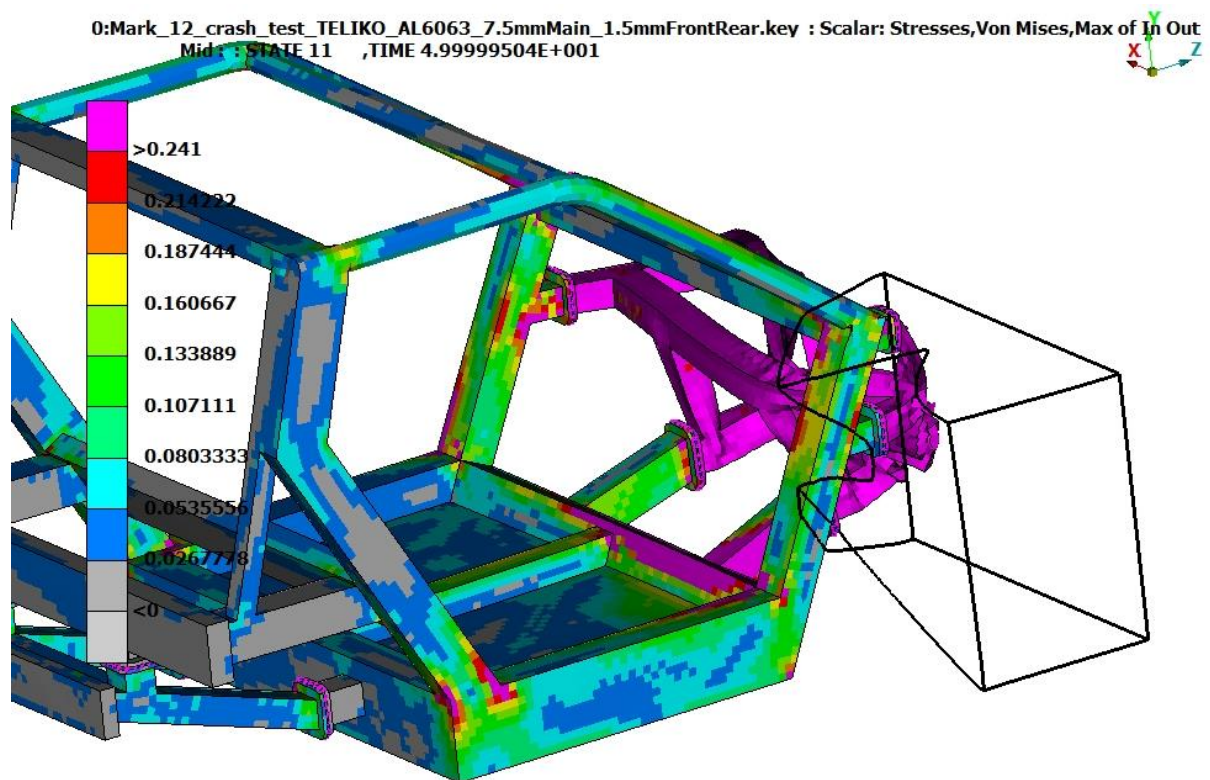
Εικόνα 5.46: State 8



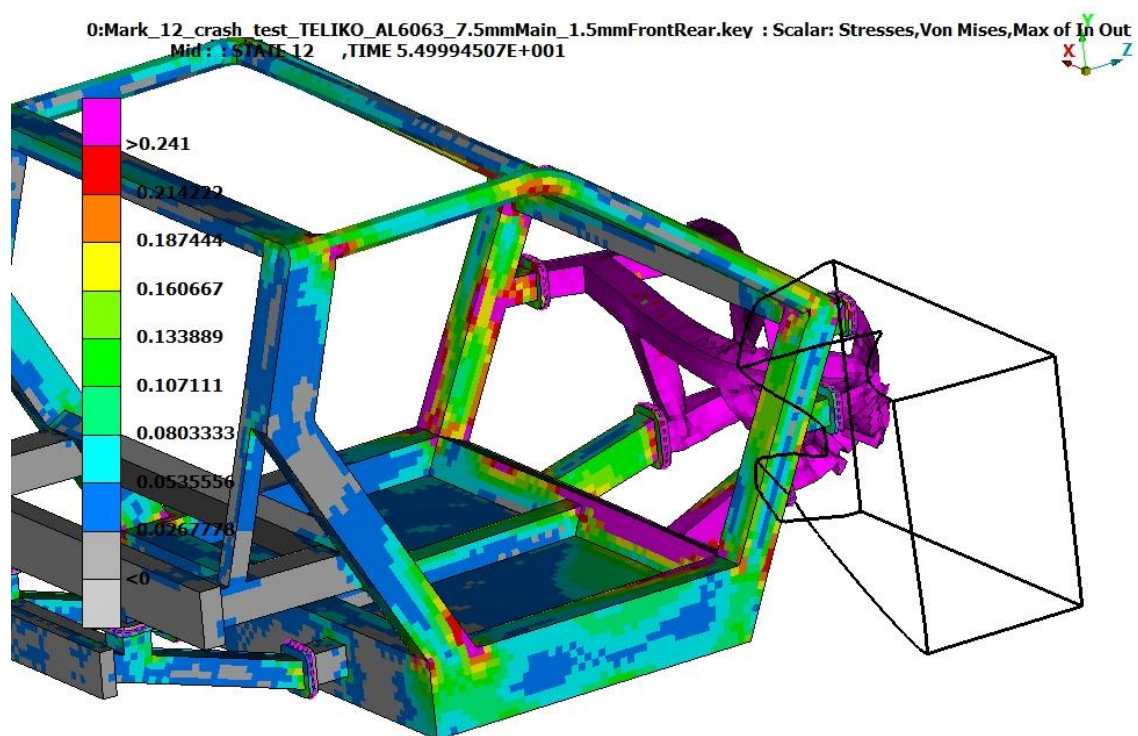
Εικόνα 5.47: State 9



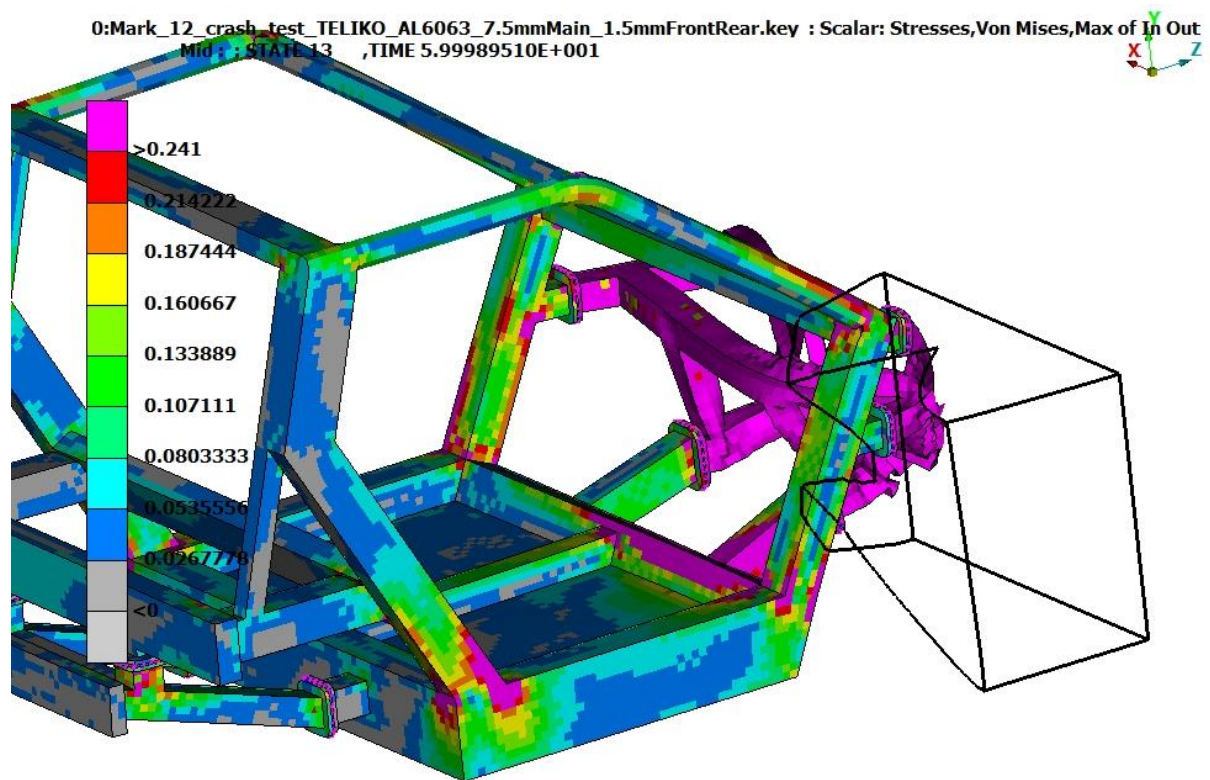
Εικόνα 5.48: State 10



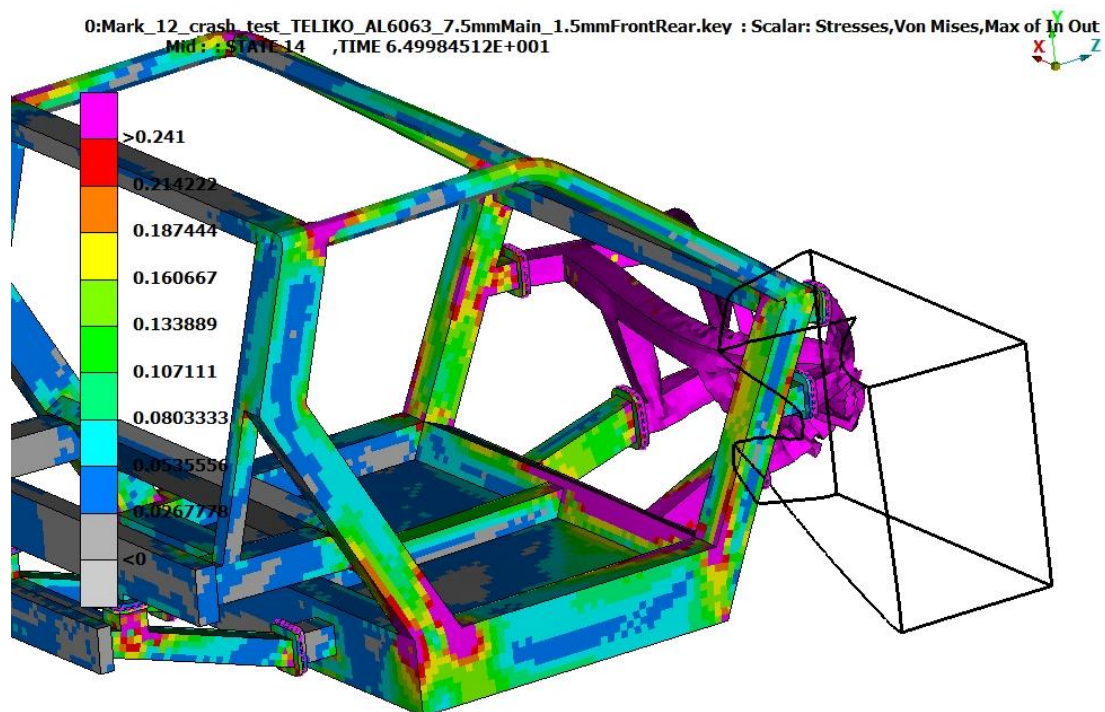
Eικόνα 5.49: State 11



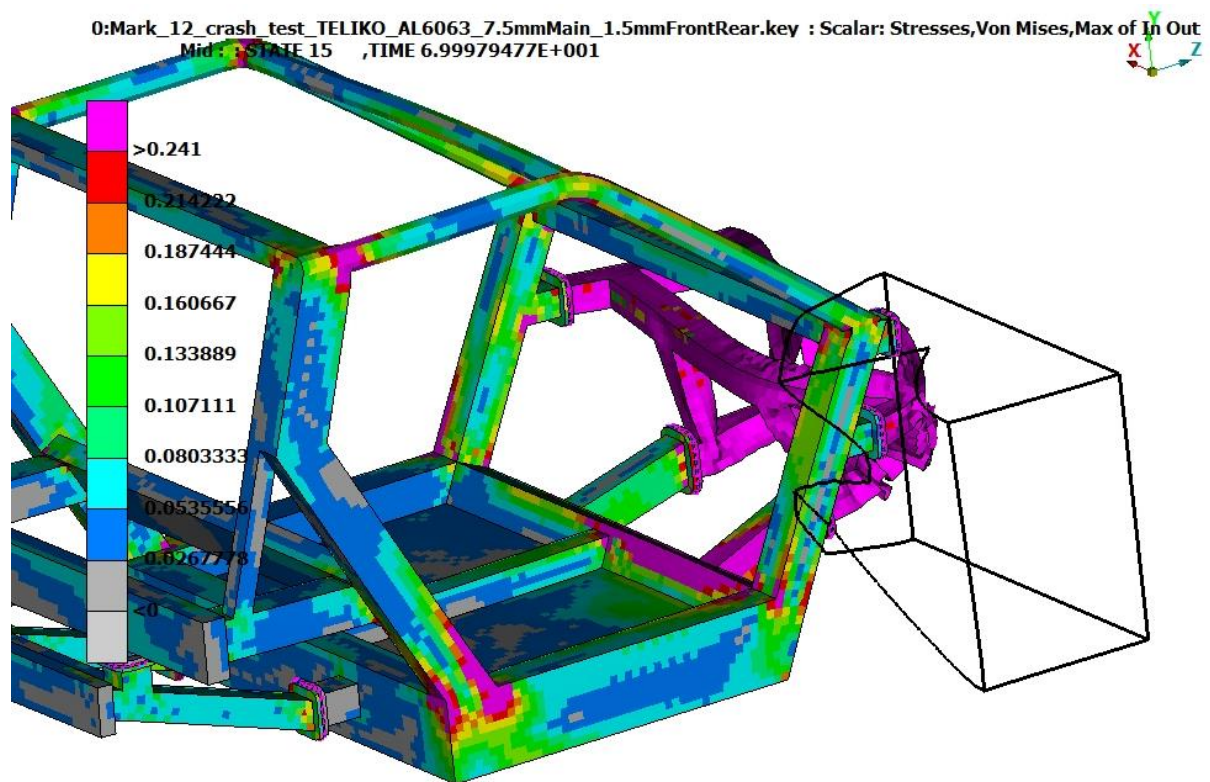
Eικόνα 5.50: State 12



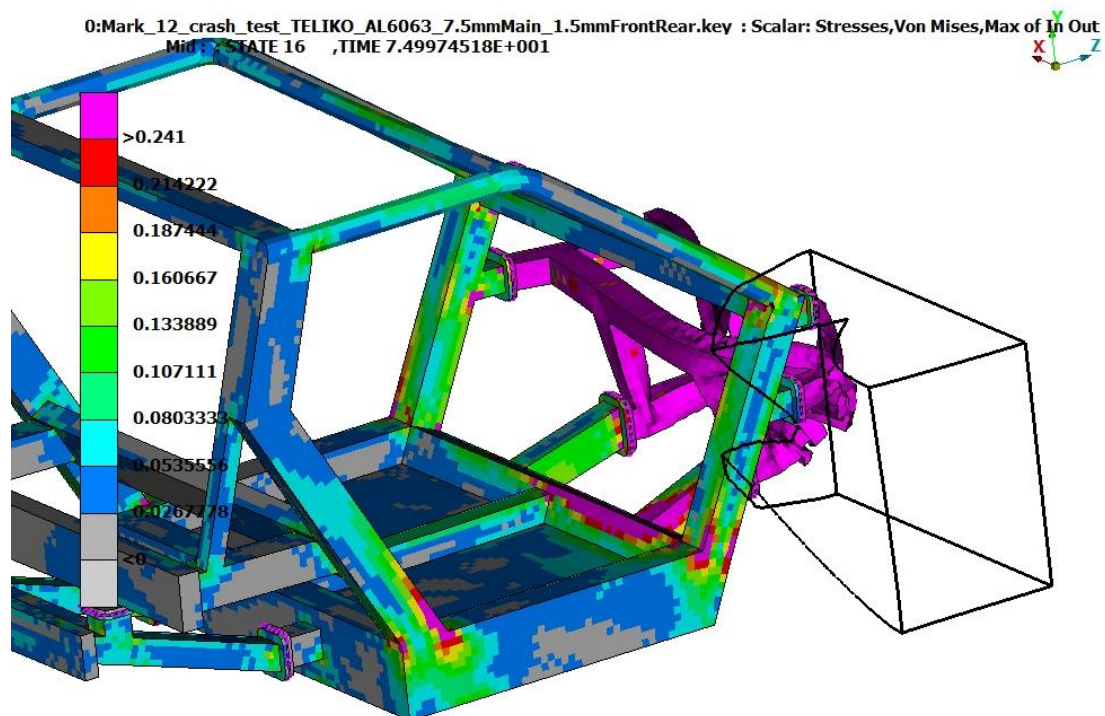
Εικόνα 5.51: State 13



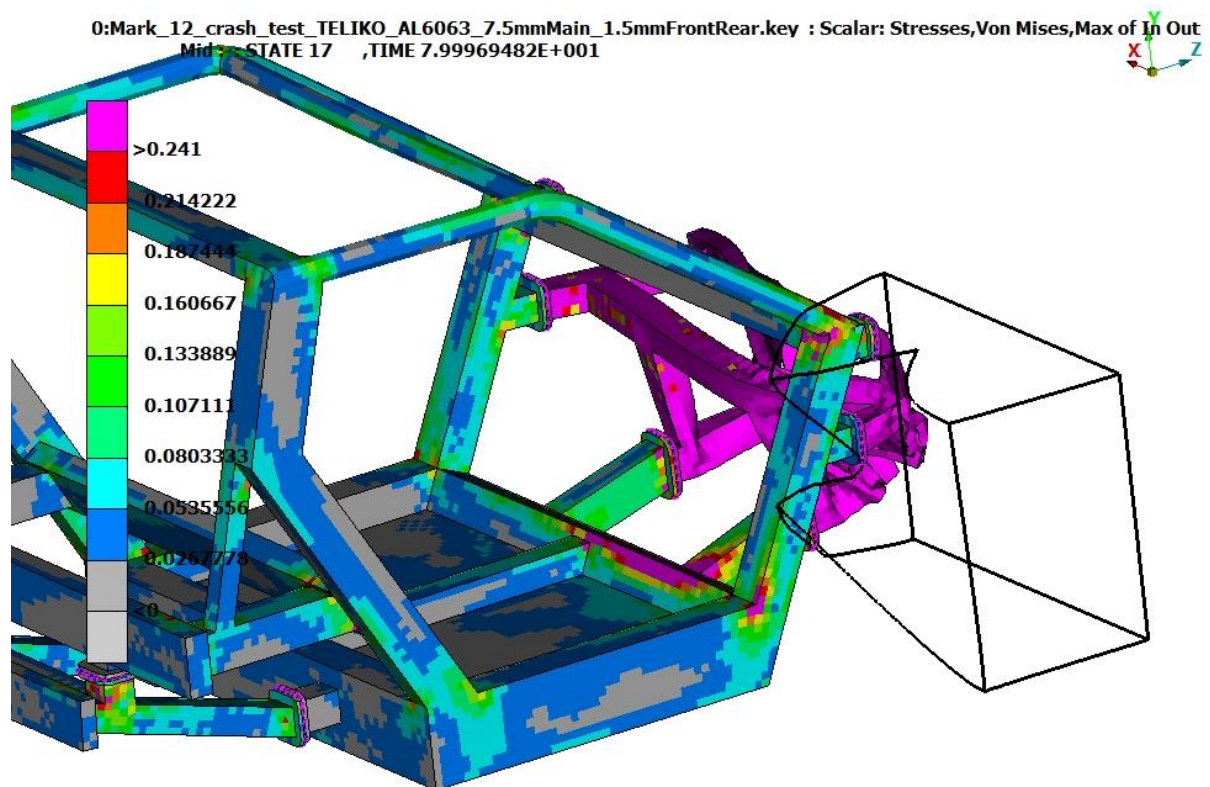
Εικόνα 5.52: State 14



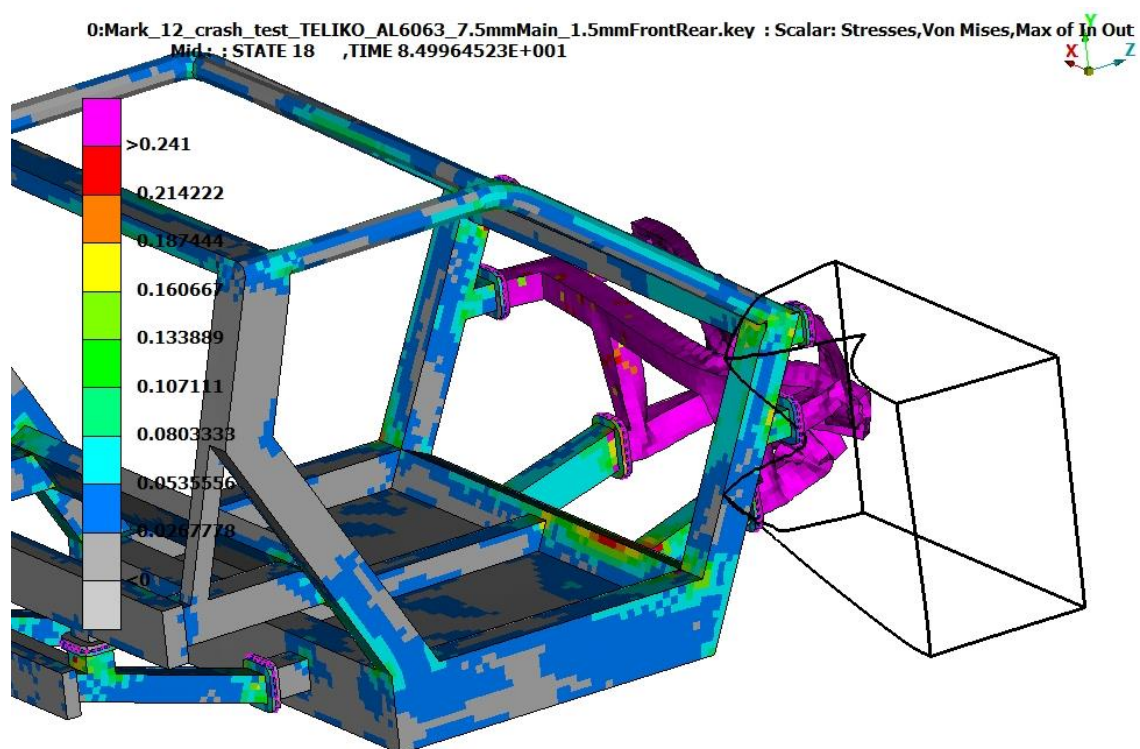
Εικόνα 5.53: State 15



Εικόνα 5.54: State 16



Eikóna 5.55: State 17



Eikóna 5.56: State 18

Τα στοιχεία του κεντρικού πλαισίου όπου οι τάσεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν το όριο διαρροής (τα στοιχεία που έχουν χρώμα φούξια) είναι πολύ λίγα. Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε από το λογισμικό, η μετακίνηση-παραμόρφωση των στοιχείων (elements) σε αυτά είναι πολύ μικρή (της τάξης του 1 έως 2 χιλιοστών) και μέσα στα επιτρεπτά και αναμενόμενα όρια. Έτσι λοιπόν αυτό είναι το πλαίσιο που καλύπτει τις προδιαγραφές που τέθηκαν στην αρχή. Πρόκειται για το Mark_12 με πάχος του κλωβού ασφαλείας στα 7.5 χιλιοστά και πάχος του εμπρόσθιου και οπίσθιου υποπλαισίου στα 1.5 χιλιοστά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συνολική μάζα των εξαρτημάτων του αυτοκινήτου χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το πλαίσιο αυτό καθαυτό είναι:

1. μπαταρίες: 150 kg
2. καθίσματα: $25 * 2 = 50$ kg
3. τροχοί: 51,6 kg
4. κινητήρας: Wheel-Hub Motors 60 kg
5. λοιπός εξοπλισμός: τζάμια, πάνελς, αμάξωμα, υγρά, ανάρτηση κλπ.: 250 kg

Σύνολο: 560 kg περίπου

Ανάλυση μάζας πλαισίου Mark_12:

1. Βάρος εμπρόσθιου υποπλαισίου: 6,55 kg
2. Βάρος οπίσθιου υποπλαισίου: 4,7 kg
3. Βάρος κεντρικού πλαισίου: 196 kg

Σύνολο: 207,25 kg

Με βάση τα παραπάνω το συνολικό βάρος του ολοκληρωμένου αυτοκινήτου θα είναι στα 767,25 kg και δεδομένου ότι το Smart Fortwo Electric Drive έχει μάζα περίπου στα 1200 kg προκύπτει ότι το Mark_12 είναι μία πολύ καλή βελτίωση σε σχέση με το Smart.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός και η εν συνεχεία μελέτη της αντοχής ενός πλαισίου για διαθέσιμο ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο πόλης.

Ο έλεγχος της κατασκευής αποτελεί την πιστοποίηση της ορθότητας και καταλληλότητας της σχεδίασης του πλαισίου λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραμέτρους και κανόνες ασφαλείας όπως αυτοί χρησιμοποιούνται από την Euro-NCAP. Με χρήση ειδικού λογισμικού σχεδίασης (CAD) και λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (FEA) εκτελέστηκαν συγκεκριμένες δοκιμές από τις οποίες προέκυψαν τα παραπάνω αποτελέσματα. Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών επιβεβαιώθηκε η καταλληλότητα του σχεδίου.

Βρέθηκε ότι η τελική σχεδίαση του πλαισίου (Mark_12) αντέχει στα προτεινόμενα από την Euro-NCAP σενάρια δυναμικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, οι τάσεις που αναπτύσσονται στον κεντρικό κλωβό ασφαλείας και ξεπερνούν το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου υλικού αφορούν σε λίγα στοιχεία με αποτέλεσμα να μην υπάρχει διείσδυση των τάσεων και των παραμορφώσεων που ξεπερνούν τους δείκτες ασφαλείας στην καμπίνα των επιβατών. Το παραπάνω ικανοποιεί τις επιβολές των κανονισμών ασφαλείας και άρα πιστοποιεί την καταλληλότητα της κατασκευής.

Βιβλιογραφία

1. Ευριπίδης Παπαμίχος, Χαραλαμπίδης Νίκος, *Αντοχή των υλικών*
2. G. Niemann , *Στοιχεία Μηχανών 1 & 2*
3. Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger, *Product Design & development*
4. Charles E. Knight Jr, *The FEM in mechanical design*
5. V. Ramamurti, *CA Mechanical Design & Analysis*
6. Robert D. Cook, *Finite Elements Analysis*
7. Keith J. Wakeham, *Introduction to Chassis Design Revision 1.0*
8. Πλουμάκης Ευάγγελος, *Μελέτη και κατασκευή του συστήματος Τροχού-Πλήμνης για χρήση σε πειραματικό όχημα χαμηλής κατανάλωσης*
9. Michael Broad and Terry Gilbert, *Design, Development and Analysis of the NCSHFH.09 Chassis*
10. Thanapon Chotika, Jan-Welm Biermann and Saiprasit Koetnuyom, *Energy Absorption Analysis of Various Vehicles under Crash Test Simulation*

Ευχαριστίες

Κατά την διάρκεια της συγγραφής της παρούσας εργασίας, υπήρξαν αρκετοί άνθρωποι που συνέβαλλαν στην ολοκλήρωσή της, ο καθένας με τον δικό του τρόπο. Θεωρώ λοιπόν αναγκαίο να αφιερώσω μερικές γραμμές σε αυτούς, προκειμένου να τους ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης και υπεύθυνο του Εργαστηρίου Εργαλειομηχανών κύριο Νίκο Τσουρβελούδη, για την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου και για την ουσιαστική συμβολή του στην ολοκλήρωση της, με τις παρατηρήσεις, ιδέες και διορθώσεις του σε κάθε βήμα μου.

Τον κύριο Πολυχρόνη Σπανουδάκη, διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, για την συνεχή του βοήθεια σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή του ζητήθηκε, τις πολύτιμες παρατηρήσεις του και για την επιμονή του στην τελειότητα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τα μέλη της τεχνικής υποστήριξης της BETA-CAE Systems A.E. Παπαδόπουλο Θανάση και Νίκο Δριβάκο για την πολύτιμη βοήθειά τους σε οποιαδήποτε μου ερώτηση σχετικά με τις λειτουργίες του πακέτου ANSA.