



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΘΥΡΩΝ ΔΙΘΕΣΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΟΥ  
ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ CAD/CAE**

Εργασία που υποβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων  
για την απόκτηση διπλώματος

ΥΠΟ ΤΟΝ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΜΠΑΖΙΟ**

Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Τσουρβελούδης

σ' εκείνους που αγαπώ και μ'  
αγαπάνε χωρίς εξάρτηση

σ' εκείνους που δεν φοβούνται πως  
θα μας χωρίσουν οι δρόμοι γιατί  
ξέρουν ότι θα ξανασυναντηθούμε...

σ' εκείνους που το 'βαλαν πείσμα...  
να είναι ευτυχισμένοι

**Στον θείο μου Νίκο**

## Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Καθηγητή Νικόλαο Τσουρβελούδη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου και την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκπόνησης της εργασίας. Μου πρόσφερε τις γνώσεις του, την ενίσχυση και την ενθάρρυνση να παλεύω για το καλύτερο, ως προς τις σπουδές μου και τη ζωή. Επιπλέον, μου παρείχε αμέτρητες προτάσεις και εποικοδομητική κριτική, που με πολλούς τρόπους βοήθησαν το έργο μου. Τέλος θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να γίνω μέλος της ομάδας "Technical University of Crete Eco Racing Team" (TUCer) αποκομίζοντας, από την συμμετοχή μου αυτή, εμπειρίες ζωής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον αρχηγό της ομάδας TUCer, διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Σπανουδάκη Πολυχρόνη για τη συνεχή του υποστήριξη. Έχοντας μια συνεργασία δύο χρόνια, μου διεύρυνε τους ορίζοντες στο κόσμο της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τα μέλη της τεχνικής υποστήριξης της BETACAE Systems A.E. Παπαδόπουλο Θανάση και Εύα Ιορδανίδου για την πολύτιμη βοήθειά τους σε οποιαδήποτε μου ερώτηση σχετικά με τις λειτουργίες του πακέτου ANSA.

Τους γονείς μου για την υποστήριξη και τις συμβουλές τους σε κάθε δύσκολη στιγμή όλων αυτών των χρόνων προσπάθειας.



**ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΟΛΟΥΣ**

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Η φιλοσοφία του σχεδιασμού οχημάτων .....	5
1.1 Η ανάγκη για ασφαλέστερες κατασκευές.....	5
1.2 Οι συνέπειες των ατυχημάτων με οχήματα.....	6
1.3 Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού .....	7
1.4 Η φιλοσοφία σχεδιασμού θυρών οχημάτων .....	10
1.5 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας .....	10
1.5.1 Στοιχεία θεωρίας .....	10
1.5.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.....	11
Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση θύρας διθέσιου ηλεκτροκίνητου οχήματος .....	13
2.1 Εισαγωγή στις θύρες αυτοκινήτων - Τύποι θυρών .....	13
2.1 Σχεδιασμός κλωβού ασφαλείας και υποπλασίων .....	18
2.2 Σχεδιασμός θυρών διθέσιου ηλεκτροκίνητου οχήματος .....	19
2.2.1 Σχεδιασμός πλαινού ελάσματος .....	20
2.2.2 Σχεδιασμός θύρας οχήματος .....	22
2.2.3 Τελική συναρμολόγηση θύρας με τον κλωβό ασφαλείας .....	25
Κεφάλαιο 3: Η τεχνολογία παραγωγής των θυρών .....	26
3.1 Υλικά κατασκευής θυρών .....	26
3.2 Τύποι συγκολλήσεων .....	29
3.3 Γραμμή παραγωγής ελασμάτων θύρας .....	30
Κεφάλαιο 4: Η χρήση των CAE στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	32
4.1 Εισαγωγή .....	32
4.2 Το όραμα του ψηφιακού πρωτοτύπου .....	33
4.3 Οι δοκιμές παθητικής ασφάλειας .....	34
4.4 Σύγχρονες απαιτήσεις εξέλιξης .....	37
Κεφάλαιο 5: Θεωρητικό υπόβαθρο πλευρικής πρόσκρουσης .....	39
5.1 Ορισμός πλευρικής πρόσκρουσης .....	39
5.2 Δομικές απαιτήσεις .....	39
5.3 Μετρικές συγκρούσεων .....	41
5.4 Μοντελοποίηση απλών δομικών στοιχείων οχημάτων .....	42

5.4.1 Αναλυτική Προσέγγιση.....	42
5.4.2 Εμπειρική Προσέγγιση .....	44
5.5 Μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για σύγκρουση.....	47
5.5.1 Τύποι στοιχείων ανάλυσης .....	48
5.5.2 Το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay Shell (T2) .....	51
5.6 Η μέθοδος συ-περιστροφής .....	52
Κεφάλαιο 6: Έλεγχος αντοχής .....	53
6.1 Εισαγωγή .....	53
6.2 Θεωρίες Αστοχίας .....	54
6.3 Μοντελοποίηση.....	55
6.3.1 Δημιουργία πλέγματος.....	55
6.3.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων .....	56
6.3.3 Εισαγωγή της μπάρας πρόσκρουσης (Barrier).....	57
6.3.4 Μοντελοποίηση Υλικών .....	58
6.3.5 Μοντελοποίηση αρχικής ταχύτητας (Initial Velocity) .....	59
6.3.6 Μοντελοποίηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας .....	60
Κεφάλαιο 7: Επίλυση του Μοντέλου .....	61
7.1 Door crush_10: .....	61
7.2 Door_crush_11: .....	64
7.3 Door crush_12: .....	66
7.4 Door crush_13: .....	68
7.4.1 Μηχανολογικά σχέδια βέλτιστης λύσης .....	70
Συμπεράσματα .....	74
Βιβλιογραφία: .....	75

## Κεφάλαιο 1: Η φιλοσοφία του σχεδιασμού οχημάτων

### 1.1 Η ανάγκη για ασφαλέστερες κατασκευές

Στην εποχή μας, το ενδιαφέρον για ασφαλή μεταφορικά μέσα είναι έντονο. Και αυτό γιατί τα οχήματα εκτός από την εξυπηρέτηση που προσφέρουν στον χρήστη, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλα ατυχήματα. Έτσι οι σχεδιαστές των μεταφορικών μέσων προσπαθούν να εφεύρουν και να ενσωματώσουν σε αυτά, νέα συστήματα που αυξάνουν το επίπεδο της παρεχόμενης ασφάλειας.

Τα συστήματα αυτά διαχωρίζονται σε εκείνα που προορίζονται να βελτιώσουν την ενεργητική ασφάλεια, και σε εκείνα που βελτιώνουν την παθητική ασφάλεια του οχήματος [1]. Η ενεργητική ασφάλεια βοηθάει στην αποφυγή ενός ατυχήματος, ενώ αν αυτό τελικά συμβεί, η παθητική ασφάλεια είναι αυτή που περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό τις συνέπειες του. Για να το επιτύχουν αυτό, υιοθετούν στοιχεία και διατάξεις που περιορίζουν τις επιπτώσεις μιας πιθανής σύγκρουσης στους επιβάτες.

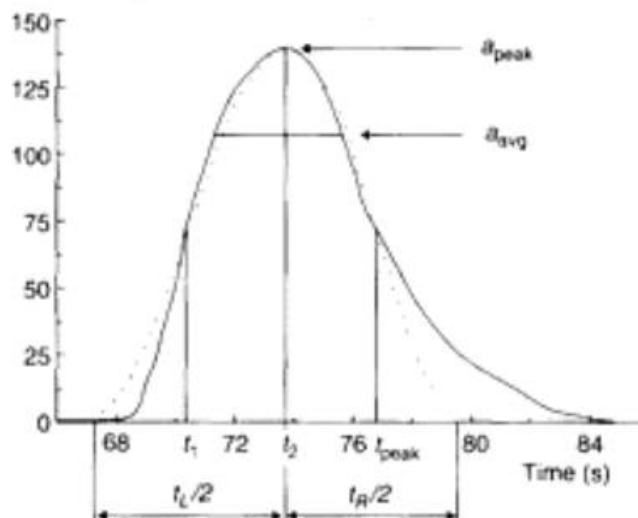
Η κατάσταση πριν από λίγες δεκαετίες ήταν διαφορετική. Τόσο το κοινό όσο και οι κατασκευαστές ουσιαστικά αγνοούσαν το πρόβλημα της επικινδυνότητας των οχημάτων. Ένα τυπικό σασί (chassis) αυτοκινούμενου οχήματος αποτελούνταν από συγκολλημένες στιβαρές ράβδους, πάνω στις οποίες βιδώνονταν τα καθίσματα και οι αναρτήσεις χωρίς να λαμβάνεται μέριμνα για την παραμόρφωση των μερών αυτών σε περίπτωση σύγκρουσης. Στον τομέα της ασφάλειας των επιβατών υπήρχε η λανθασμένη πεποίθηση ότι το αυτοκίνητο που δεν παραμορφώνεται σε περίπτωση σύγκρουσης ήταν και το ασφαλέστερο. Η άποψη αυτή πήγαζε από την παρατήρηση πραγματικών ατυχημάτων που συνέβαιναν όταν μικρά αυτοκίνητα συγκρούονταν με μεγαλύτερα. Οι επιβάτες των μεγαλύτερων αυτοκινήτων καταπονούνταν λιγότερο λόγω των μικρότερων επιβραδύνσεων που δεχόντουσαν κατά την σύγκρουση αφού η αυξημένη μάζα του μεγάλου οχήματος ανέπτυσσε, λόγω μεγάλης αδράνειας, μικρότερη επιβράδυνση από ότι ένα μικρότερο όχημα.

Η προστασία που προσέφεραν τα ογκωδέστερα οχήματα είχε λανθασμένα συνδεθεί με το γεγονός ότι τα μεγαλύτερα οχήματα παραμορφώνονταν λιγότερο σε μία σύγκρουση για τον απλούστατο λόγο ότι σε περίπτωση σύγκρουσης 2 βαρέων αυτοκινήτων το 1<sup>ο</sup> πρέπει να απορροφήσει την ενέργεια

του 2<sup>ου</sup>. Καθώς όμως περνούσαν τα χρόνια η ενεργειακή κρίση αλλά και οι αυξημένες ανάγκες για μετακίνηση των ανθρώπων, έκανε επιτακτική την κατασκευή φθηνών, ελαφρών και μικρών οχημάτων. Έτσι με την αύξηση των κυκλοφορούντων οχημάτων αυξήθηκε και ο αριθμός των τροχαίων ατυχημάτων. Αυτό είχε οδυνηρές συνέπειες τόσο για τους επιβάτες όσο και για την ίδια την κοινωνία. Η δραματική αυτή κατάσταση ανάγκασε τους κατασκευαστές να ασχοληθούν πιο διεξοδικά με το θέμα της ασφάλειας. Γίνεται αξιολόγηση αποτελεσμάτων της σύγκρουσης των οχημάτων στην προστασία των ανθρώπινων οργανισμών, και το εφαρμοσμένης μηχανικής ιστορικό των μελετών της ενεργειακής απορρόφησης των δομών και των υλικών αναθεωρείται. Οι γενικές αρχές που περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό των δομών και την επιλογή των υλικών με σκοπό την ενεργειακή απορρόφηση θέτονται επίσης σε νέα βάση.

### 1.2 Οι συνέπειες των ατυχημάτων με οχήματα

Είναι ευρέως γνωστό ότι όπως σε όλες τις συγκρούσεις, μια σύγκρουση οχήματος συμβαίνει σε έναν πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αρχικά, μια μέση δύναμη  $F$  που επικρατεί κατά τη διάρκεια του χρόνου  $t$  και που αναπτύσσεται στις προσκρουόμενες επιφάνειες παράγεται από την ανάγκη να αλλαχτεί η ορμή  $m \cdot u$ . Είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το  $t$  ( $F = m \cdot u / t$ ), και συνεπώς, ο πιο σύντομος χρόνος  $t$  προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη  $F$ . Αυτή η μεγάλη δύναμη θα προκαλέσει μια τεράστια επιτάχυνση (επιβράδυνση) στους επιβαίνοντες του οχήματος, ειδικά για τα κεφάλια τους, τα οποία είναι ασυγκράτητα από τις ζώνες ασφαλείας. Το κάτωθεν σχήμα επιδεικνύει έναν χαρακτηριστικό ρυθμό επιτάχυνσης, δείχνοντας έναν σύντομο (συνήθως 3-25ms) αλλά πολύ ισχυρό παλμό.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα επιτάχυνσης κατά την πρόσκρουση

Αυτή η μεγάλη δύναμη ή επιτάχυνση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ζημία ανθρώπων ή αντικειμένων. Τα αποτελέσματα μιας συντριβής οχήματος μπορούν να απαριθμηθούν ως εξής:

- Τραυματισμός έναντι των ανθρώπων (ή περιστασιακά σε άλλους οργανισμούς όπως ζώα), που καταλήγουν στο φυσικό ή/και ψυχολογικό τραυματισμό των επιβαινόντων του οχήματος ή των πεζών,
- Δομική ζημία, που αναφέρεται συνήθως στην πλαστική παραμόρφωση και το σπάσιμο της δομής του οχήματος και περιλαμβάνει επίσης τις καταστροφές από ενδεχόμενη πυρκαγιά,
- Ζημία στο φορτίο, όπως η ζημία που προκαλείται με τη μετατόπιση του φορτίου, διαρροές πετρελαίου από μεταφερόμενη δεξαμενή, κ.λ.π
- Ζημία στο περιβάλλον, όπως η ζημία στα αντικείμενα στις άκρες του δρόμου (δέντρα, προστατευτικά κιγκλιδώματα κ.λ.π)

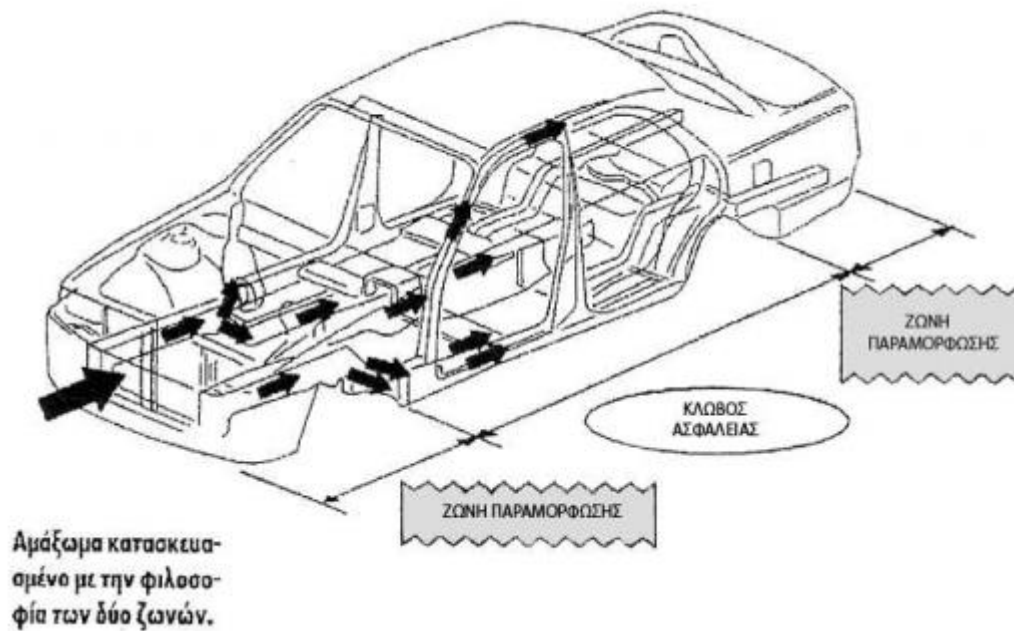
Όσον αφορά τη ζημία και τον τραυματισμό έναντι των επιβαινόντων του οχήματος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε ένα ατύχημα σύγκρουσης με γρήγορη επιβράδυνση, τα κεφάλια των επιβαινόντων δύναται να προσκρούσουν στα μέρη του εσωτερικού του οχήματος, όπως τα πλευρικά κιγκλιδώματα στυλοβατών, τη σκεπή ή τον ανεμοθώρακα. Αυτό καλείται δεύτερη σύγκρουση, και μπορεί επίσης να είναι πολύ επικίνδυνη.

### 1.3 Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού

Από όλες τις άνωθεν παρατηρήσεις προκύπτει έντονη η ανάγκη για σχεδιασμό οχημάτων που να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο για τραυματισμούς θανάτους ή ζημιές σε περίπτωση σύγκρουσης ή ατυχήματος.

Για το λόγο αυτό χρηματοδοτήθηκαν μεγάλα ερευνητικά προγράμματα που είχαν σκοπό τον σχεδιασμό συστημάτων που θα έδιναν στα οχήματα μεγάλα περιθώρια παθητικής ασφάλειας. Οι έρευνες αυτές οδήγησαν στην μέθοδο σχεδίασης του οχήματος με βάση τον διαχωρισμό του αμαξώματος σε δύο ζώνες. Την ζώνη παραμόρφωσης η οποία με την σειρά της διαχωρίζεται στην εμπρόσθια και στην οπίσθια ζώνη, και στην άκαμπτη ζώνη που σχηματίζει έναν κλωβό ασφαλείας γύρω από τους επιβάτες, εξασφαλίζοντάς τους τον αναγκαίο ζωτικό χώρο για να επιβιώσουν σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης. Στο κάτωθεν σχέδιο διακρίνεται η σχηματική διάταξη αμαξώματος διαχωρισμένου σε δύο ζώνες.



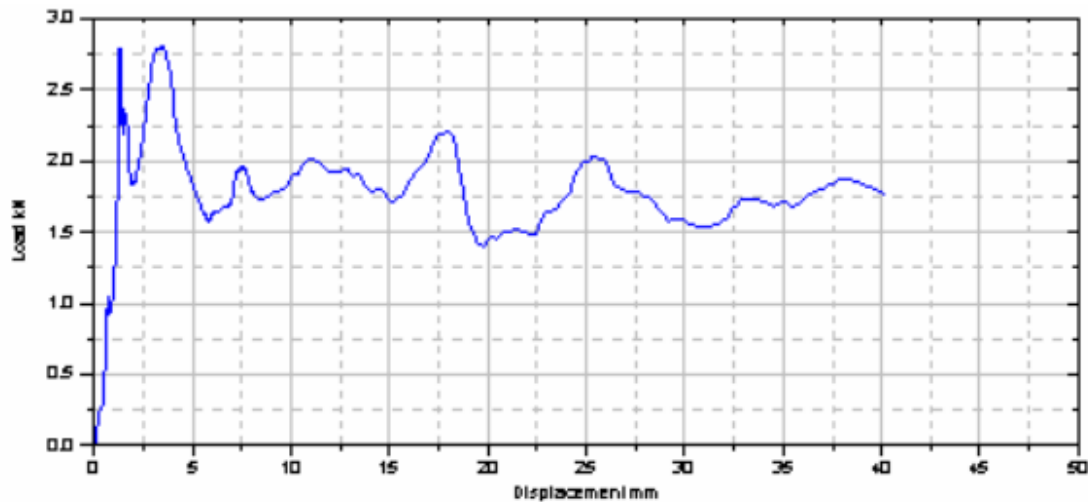


Εικόνα 1.2: Σχηματική διάταξη αμαξώματος διαχωρισμένου σε δύο ζώνες.

Κατά την διάρκεια μιας μετωπικής ή πλάγιας σύγκρουσης διακρίνουμε τα εξής τρία στάδια,

1. αρχική επαφή με το εμπρός ή το πλαινό παραμορφώσιμο τμήμα του οχήματος,
2. σταδιακή παραμόρφωση του αμαξώματος,
- 3 πιθανή παραμόρφωση της καμπίνας επιβατών.

Το επόμενο γράφημα φορτίου-μετατόπισης είναι χαρακτηριστικό και δείχνει τον τρόπο που αυξάνει το φορτίο συναρτήσει της συμπίεσης σε περίπτωση σύγκρουσης. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη αναπαριστά την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το αμάξωμα. Αυτή εξαρτάται από την μέγιστη παραμόρφωση και το φορτίο λυγισμού.



Εικόνα 1.3: Γράφημα φορτίου-μετατόπισης

Εφόσον υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση του οχήματος, για να αυξήσουμε το ποσό της ενέργειας που απορροφάται, πρέπει να αυξήσουμε το φορτίο λυγισμού κάνοντας την δομή στιβαρότερη. Αυτός είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Να μελετήσουμε τον τρόπο αύξησης της ποσότητας απορροφούμενης ενέργειας σε δομικά στοιχεία που σκοπό έχουν την προστασία έναντι συγκρούσεων.

Η βελτίωση της κατασκευαστικής αντοχής σε σύγκρουση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από ορισμένους περιορισμούς, όπως του καθορισμού ορίων στις παραμορφώσεις και στην μεταβίβαση φορτίων. Η φύση των τιθέμενων περιορισμών καθορίζει τους μηχανισμούς βελτίωσης της κατασκευαστικής αντοχής. Ένας βέλτιστος τρόπος, με τον οποίο μπορεί τούτο να επιτευχθεί, είναι μέσω αποκλειστικής χρήσης της παραμόρφωσης του φέροντος σκελετού, περιλαμβάνοντας εφαρμογή ειδικών κατασκευών απορρόφησης ενέργειας, όπως στρατηγικά τοποθετημένα σωληνωτά στοιχεία. Αξίζει όμως εδώ να τονιστεί ότι η σύγκρουση ενός οχήματος είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, όπου η ταυτόχρονη κατασκευαστική απόκριση πολλών διαφορετικών αλληλεπιδρουσών μονάδων σπάνια μπορεί να περιγραφεί αποδεκτά από την συνήθη λεπτομερή ανάλυση που έχει θεμελιωθεί για μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κάθε ενός από τα δομικά στοιχεία διαφέρει και εξαρτάται από τον τρόπο παραμόρφωσης και το υλικό κατασκευής τους.

## 1.4 Η φιλοσοφία σχεδιασμού θυρών οχημάτων

Ο σχεδιασμός των θυρών των σύγχρονων οχημάτων έχει πολλές πτυχές προς εξέταση από τον μηχανικό που είναι υπεύθυνος για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των θυρών:

- ασφάλεια πλευρικής πρόσκρουσης (προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια του οδηγού ή των επιβατών από την πλευρική πρόσκρουση, χρησιμοποιούνται κάποια υλικά και στοιχεία, όπως μπάρες αντι-πρόσκρουσης, με στόχο την απορρόφηση της ενέργειας κρούσης)
- ακαμψία του πλαισίου της πόρτας
- ο θόρυβος του ανέμου
- απόδοση ανοίγματος-κλεισίματος της θύρας και η αντοχή της
- αντοχή σε θερμοκρασία
- ακαμψία στο σημείο άρθρωσης και σύνδεσης της θύρας με τον κλωβό του οχήματος

## 1.5 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

### 1.5.1 Στοιχεία θεωρίας

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου, βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπιση), (βλ. άνωθεν σχήμα). Αρχικά το αντικείμενο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή  $P_{max}$ . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.

Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης (specific energy),  $W_s$ . Αυτή ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του  $W$ , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει,  $m_s$ , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο  $V_s$  πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού  $\rho$ .

### 1.5.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Το πρόβλημα της ασφάλειας των επιβατών, ή αλλιώς η "επιβιωσιμότητα" μετά από κάποιο ατύχημα έχει οδηγήσει τους ερευνητές και τις βιομηχανίες γενικότερα να εστιάσουν την προσοχή τους στην μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο περιβάλλοντας χώρος- ή ακόμα και ολόκληρη η κατασκευή σε καταστροφική καταπόνηση, με πρωταρχικής σημασίας παράγοντα την ικανότητα προς απορρόφηση ενέργειας.

Η μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε μία κατασκευή, δίδει το μηχανισμό βάσει του οποίου ένα ποσοστό της ενέργειας που προσδίδεται, απορροφάται από την κατασκευή, ενώ ένα ποσοστό της μεταβιβάζεται στον επιβάτη. Για να έχει η κατασκευή την απαιτούμενη συμπεριφορά, η μελέτη της κατασκευής σε καταστροφική καταπόνηση πρέπει να γίνει στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την εκπόνηση της πιο πάνω μελέτης [1]. Η πρώτη είναι με δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής. Η δεύτερη είναι με τη χρήση λεπτομερούς μαθηματικού μοντέλου με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το να ενσωματωθεί αυτή η αμιγώς θεωρητική ανάλυση στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, ιδίως όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για την κατασκευή και το υλικό της, είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη εργασία. Από την άλλη μεριά, η κατασκευή και εν συνεχεία η καταστροφική καταπόνηση των πρωτοτύπων, ανεβάζει πολύ το κόστος. Γι' αυτούς τους λόγους είναι απαραίτητο να διαθέτει ο μηχανικός ένα σύστημα, με βάση το οποίο να μπορεί να μελετήσει εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτούμενες συνθήκες φόρτισης.

Η τεχνική της ανάλυσης για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας κατασκευής συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια

1. Βάση δεδομένων των στοιχείων της κατασκευής: Αναπτύσσεται το σκεπτικό για την αρχή του σχεδιασμού. Συλλέγονται στοιχεία για το υλικό, που θα βρεθούν με δοκιμές ή με ανάλυση.
2. Απόκτηση στοιχείων μέσω δοκιμής ή ανάλυσης. Αν για ένα συγκεκριμένο στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων, το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του.
3. Συνολική ανάλυση της κατάρρευσης. Μόλις προσδιορισθούν όλες οι απαιτούμενες- μη γραμμικές- ιδιότητες για όλες τις συνιστώσες της κατασκευής (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας), εκτελείται στατική (quasi static) ανάλυση της κατασκευής, με σκοπό το προσδιορισμό της συνολικής ικανότητάς της να φέρει φορτίο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με βάση τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

(α) Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα, (β) Η διεύθυνση και φορά των φορτίων που αναπτύσσονται στην καταρρέουσα κατασκευή κατά την δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν.

4. Βελτιστοποίηση της κατασκευής. Μαζί με την ικανότητα της κατασκευής να φέρει φορτία, συνυπολογίζεται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου της. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν το σχεδιαστή να απομονώσει τα στοιχεία που δεν είναι "συμβατά" με την κατασκευή. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι αν και κατά πόσο κάθε στοιχείο μπορεί να μεταβιβάσει τα επιβαλλόμενα φορτία μέσω της κατασκευής και ταυτόχρονα να απορροφήσει ένα ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας.

5. Βελτιώσεις στην αντοχή και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου. Μόλις προσδιοριστούν τα "μη συμβατά" στοιχεία, μπορεί να αποφασιστεί το μέγεθος και το είδος της βελτίωσης.

6. Υπολογισμός σε κάμψη. Έχοντας υπολογίσει τις απαιτούμενες ιδιότητες (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διαστάσεις του απλοποιημένου στοιχείου που, καταπονούμενο σε θλίψη ή κάμψη, θα φτάσει και θα διατηρήσει το απαιτούμενο εσωτερικό φορτίο.

7. Σχεδιασμός του στοιχείου. Παρά το γεγονός ότι το απλοποιημένο στοιχείο που υπολογίστηκε αρκεί για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, αποτελεί μόνο ένα οδηγό για τον υπολογισμό των τελικών διαστάσεων της κατασκευής. Εντούτοις, λόγω ποικίλων άλλων απαιτήσεων, ο υπολογισμός μετατρέπεται σε μια σύνθετη διεργασία, με αφετηρία τις αρχικά υπολογισμένες απλοποιημένες μορφές.

8. Δυναμική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή γίνεται με βάση δύο κριτήρια. Από τη μία, αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα κρούσης δεν είναι πολύ μεγάλη (π.χ. ανατροπή ή πλευρική πρόσκρουση οχήματος), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη του φορτίου που παρέχεται από τα προηγούμενα στάδια.

9. Προσομοίωση επιβάτη. Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 8, όπου η ταχύτητα και η υπό κατάρρευση κατασκευή είναι πια γνωστές, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή και του περιεχομένου της κατασκευής γενικότερα, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για όλα τα επιβατικά οχήματα.

10. Δυναμική βελτιστοποίηση. Αν στο στάδιο 9 προκύψουν μη παραδεκτά αποτελέσματα όσον αφορά την ασφάλεια του επιβάτη, χρησιμοποιείται και πάλι όλο το σύστημα ανάλυσης μέχρι την επίτευξη παραδεκτών αποτελεσμάτων, ειδ'άλλως ο σχεδιασμός της ασφαλούς κατασκευής έχει ολοκληρωθεί.



## Κεφάλαιο 2: Σχεδίαση θύρας διθέσιου ηλεκτροκίνητου οχήματος

### 2.1 Εισαγωγή στις θύρες αυτοκινήτων - Τύποι θυρών

Μια πόρτα οχήματος είναι ένα είδος πόρτας, τυπικά αρθρωτή, αλλά μερικές φορές συνδέεται με άλλους μηχανισμούς, η οποία χρησιμοποιείται για την είσοδο και την έξοδο από ένα όχημα. Παρακάτω αναλύονται όλοι οι τύποι θυρών οχημάτων.

#### Πόρτες βρετανικού τύπου

Η πόρτα “αυτοκτονίας”, όπως αλλιώς λέγεται, είναι ένας τύπος πόρτας που αρθρώνεται στο άκρο ρυμούλκησης του. Ο όρος «πόρτα αυτοκτονίας» επινοήθηκε λόγω της πιθανότητας η πόρτα να ανοίξει σε περίπτωση που το μάνταλο (βλ. σύρτης) απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια της ,προς τα εμπρός, κίνησης του οχήματος. Καλείται επίσης «πόρτα απαγωγέας» για προφανείς λόγους.



Εικόνα 2.1: Πόρτα βρετανικού τύπου

Πλεονέκτημα της θύρας βρετανικού τύπου:

Οι οπίσθιοι μεντεσέδες θυρών κάνουν την είσοδο και έξοδο από το όχημα ευκολότερη, επιτρέποντας σε έναν επιβάτη να εισέλθει γυρίζοντας το κάθισμα και να εξέλθει βαδίζοντας απλά προς τα εμπρός και έξω. Σε συνδυασμό με τις παραδοσιακές εμπρόσθιες θύρες, επιτρέπουν στον οδηγό την ευκολότερη πρόσβαση στην πίσω πόρτα.

Μειονέκτημα της θύρας βρετανικού τύπου:

Λόγω αεροδυναμικών παραγόντων οι οπίσθιοι μεντεσέδες των θυρών αναγκάζονται να ανοίξουν στις στροφές.

### Πόρτες τύπου ψαλιδιού

Οι πόρτες ψαλιδιού είναι πόρτες που περιστρέφονται κατακόρυφα προς τα άνω, και αρθρώνονται στο άκρο του παρμπρίζ.



Εικόνα 2.2: Πόρτα τύπου ψαλιδιού

### Πλεονεκτήματα θύρας ψαλιδιού

Προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας του αυτοκινήτου με την πόρτα ανοιχτή, με τέτοιο τρόπο που θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο σε ένα αυτοκίνητο με συμβατικές πόρτες.

Οι πόρτες παραμένουν εντός τροχιάς του αυτοκινήτου σε όλο τους το εύρος της κίνησης, και αυτό είναι χρήσιμο όταν παρκάρετε σε στενούς χώρους. Μία πόρτα τύπου Gullwing προσφέρει παρόμοια ορατότητα, αλλά οι πόρτες ταλαντεύονται έξω από τον χώρο του αυτοκινήτου ελαφρώς.



Η άρθρωση είναι τοποθετημένη σε μια παρόμοια θέση με μια συμβατική πόρτα, με αποτέλεσμα να καθιστά εφικτή την μετατροπή μίας συμβατικής πόρτας σε πόρτα ψαλιδιού.

#### Μειονεκτηματα θύρας ψαλιδιού

Η πόρτα εξακολουθεί να παρεμποδίζει την πρόσβαση / εξόδο πολύ περισσότερο από μία θύρα τύπου Gullwing και, σε ορισμένες περιπτώσεις, περισσότερο από ό, τι μία συμβατική πόρτα.

Το κόστος κατασκευής του μεντεσέ της πόρτας μπορεί να είναι μεγαλύτερο από μίας συμβατικής πόρτας.

Αν το ύψος του ανώτατου ορίου πάρκινγκ είναι ανεπαρκή, η πόρτα μπορεί να έρθει σε επαφή με αυτό, όταν ανοίξει.

Σε περίπτωση ανατροπής, η εξόδος έκτακτης ανάγκης μπορεί να είναι πιο δύσκολη από ό, τι με τις συμβατικές πόρτες, αν όχι αδύνατη.

#### Πόρτες τύπου πεταλούδα

Οι πόρτες πεταλούδα είναι ένα είδος πόρτας που είναι παρόμοιες με τις πόρτες τύπου ψαλιδιού, αλλά ενώ οι πόρτες ψαλιδιού κινούνται προς τα επάνω, οι πόρτες πεταλούδα κινούνται επίσης προς τα έξω, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την είσοδο / εξόδο, και εξοικονομεί χώρο.



Εικόνα 2.3: Πόρτα τύπου πεταλούδα



### **Πόρτες τύπου ανοίγματος φτερών**

Οι πόρτες “Gullwing” είναι ένα είδος πόρτας, που αρθρώνονται στο ανώτατο άκρο τους, στην οροφή και όχι στο πλάι. Ονομάζονται έτσι επειδή, όταν ανοίγουν, οι πόρτες θυμίζουν την εικόνα ενός γλάρου που ανοίγει τα φτερά του.



Εικόνα 2.4: Πόρτα τύπου ανοίγματος φτερών

Παρά την κοινή παρανόηση ότι οι πόρτες φτερών γλάρου είναι απλή στυλιστική επιτήδευση, ο σχεδιασμός τους είναι πολύ πρακτικός σε ένα στενό αστικό χώρο στάθμευσης. Όταν σχεδιαστεί σωστά, απαιτούν μικρό πλευρικό χώρο για να ανοίξουν και επιτρέπουν πολύ καλύτερη είσοδο / έξοδο από τις συμβατικές πόρτες. Το πιο προφανές μειονέκτημα είναι ότι, σε περίπτωση ανατροπής του αυτοκινήτου οι θύρες δεν θα μπορούν να ανοιξούν καθώς η διεύθυνση λειτουργίας τους παρεμποδίζεται από την ανατροπή του οχήματος.

### **Πόρτες τύπου θόλου**

Μια πόρτα θόλου είναι ένα είδος της πόρτας που βρίσκεται στην κορυφή ενός αυτοκινήτου και ανορθώνεται κατά κάποιο τρόπο, ώστε να παρέχει πρόσβαση στους επιβάτες. Είναι παρόμοια με ένα θόλο αεροσκάφους. Δεν υπάρχουν καθορισμένα πρότυπα για θόλους, έτσι μπορεί να αρθρώνεται στο μπροστινό μέρος, στο πλάι ή πίσω - αν και άρθρωση στο μπροστινό μέρος είναι πιο κοινή. Πόρτες τύπου θόλου σπάνια χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα παραγωγής.



Εικόνα 2.5: Πόρτα τύπου θόλου

Βασικό πλεονέκτημα των θυρών τύπου θόλου είναι ότι οι συμβατικές πόρτες του αυτοκινήτου ανοίγουν με τέτοιο τρόπο, που μπορεί να εμποδίσουν το δρόμο ή το πεζοδρόμιο όταν άνοιξουν. Αυτό δεν είναι ζήτημα με τις πόρτες-θόλους καθώς ανοίγουν κάθετα. Στον αντίποδα τα βασικά μειονεκτήματα αυτού του τύπου θύρας είναι ότι σε περίπτωση ατυχήματος ανατροπής, θα ήταν αδύνατη η έξοδος από το όχημα και σε περιπτώσεις κακών καιρικών συνθηκών όπως χιόνι, βροχή ή χαλάζι, είναι αδύνατο να μπαίνουν ή να βγαίνουν οι επιβάτες από το όχημα χωρίς να εισχωρήσει το νερό εντός του οχήματος.

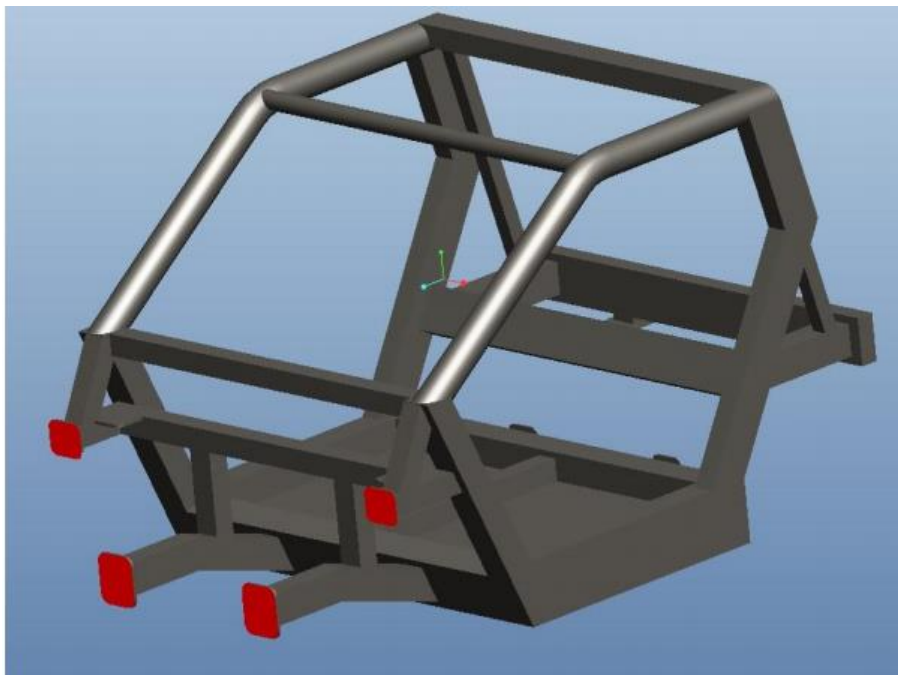
### **Συμπέρασμα και τελική επιλογή σχεδιασμού τύπου πόρτας**

Με βάσει όλους τους δυνατούς τύπους θύρας και με βασικό κριτήριο την μέγιστη ασφάλεια των επιβατών αλλά και την δυνατότητας εξόδου από το όχημα σε περίπτωση ατυχήματος, επιλέγουμε το σχεδιασμό συμβατικής πόρτας για το διθέσιο ηλεκτρικό όχημα διότι αυτή μας επιτρέπει την μέγιστη δυνατότητα διαφυγής σε συνθήκες τροχαίου ατυχήματος.

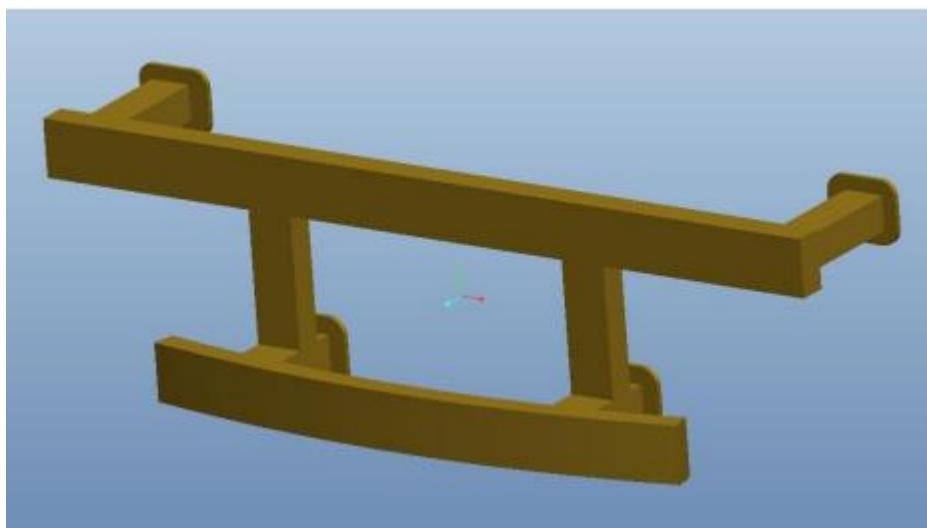
## 2.1 Σχεδιασμός κλωβού ασφαλείας και υποπλαισίων

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι συνέχεια προηγούμενης εργασίας η οποία επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό, και την βελτιστοποίηση σε συνθήκες πρόσκρουσης, του κλωβού ασφαλείας και των υποπλαισίων του [2].

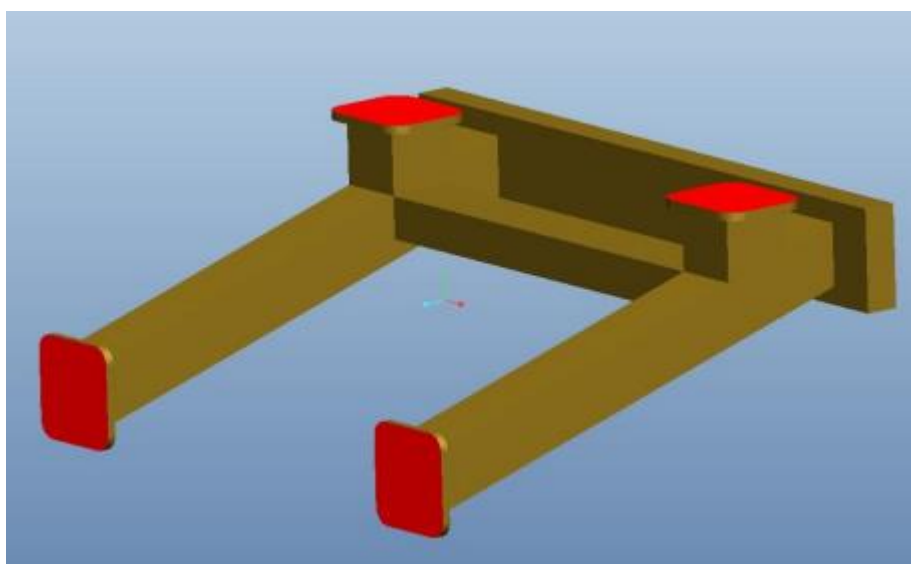
Στην αναφερθείσα διπλωματική αποφασίστηκε η χρήση του πλαισίου του Smart ως βάση. Στο στάδιο του σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο ευθύγραμμα τμήματα σωλήνων τετραγωνικής και ορθογώνιας παραλληλόγραμμης διατομής, ενώ στις περιπτώσεις που χρειάστηκαν καμπύλα τμήματα χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες κυκλικής διατομής. Ο κλωβός ασφαλείας είναι αυτός που φιλοξενεί τους επιβάτες καθώς επίσης και τις μπαταρίες του οχήματος. Το εμπρόσθιο υποπλαίσιο αποτελείται από έναν άνω και έναν κάτω προφυλακτήρα ενώ τέλος αποφασίστηκε το οπίσθιο υποπλαίσιο να εξυπηρετεί τις ίδιες ανάγκες με το υποπλαίσιο του Smart, δηλαδή να αποτελεί τις βάσεις στήριξης της οπίσθιας ανάρτησης και του οπίσθιου προφυλακτήρα.



Εικόνα 2.6: Τρισδιάστατη όψη κλωβού ασφαλείας



Εικόνα 2.7: Μπροστινή όψη του εμπρόσθιου υποπλαισίου



Εικόνα 2.8: Τρισδιάστατη όψη του οπίσθιου υποπλαισίου

## 2.2 Σχεδιασμός θυρών διθέσιου ηλεκτροκίνητου οχήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο στόχος της εργασίας είναι σε πρώτη φάση ο σχεδιασμός των θυρών που θα πληρούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

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

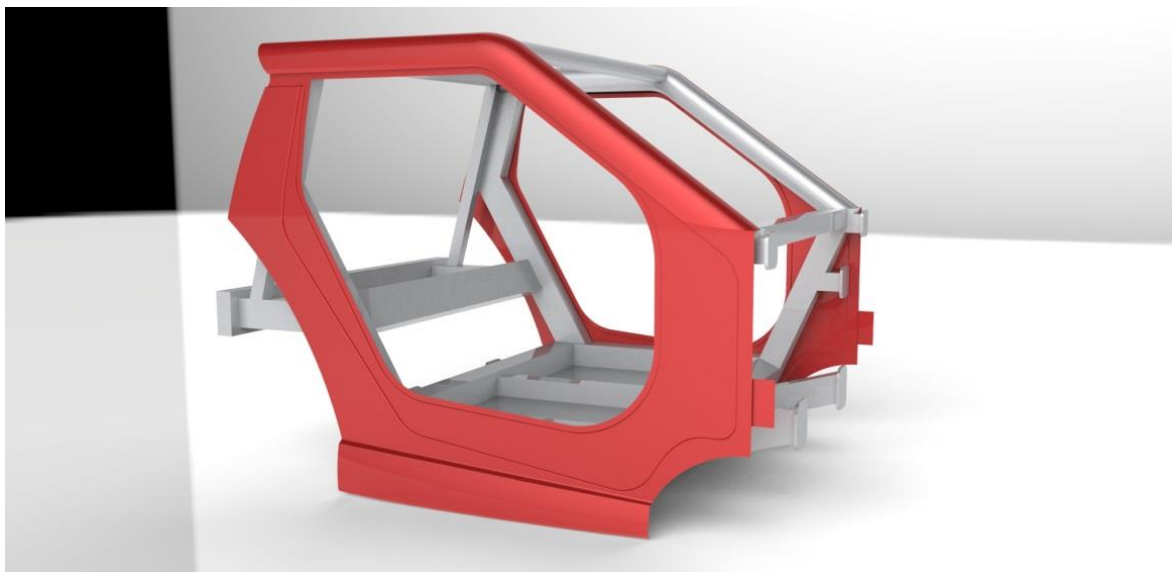
Με βάση τα παραπάνω αποφασίστηκε η χρήση συμβατικής πόρτας ως βάση. Στο στάδιο του σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο ελάσματα

ορθογωνικής διατομής ενώ στις περιπτώσεις που χρειάστηκαν καμπύλα τμήματα χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες κυκλικής διατομής. Η συναρμολόγηση της πόρτας με τον κλωβό του οχήματος αποτελείται συνολικά από πέντε κομμάτια:

- Πλαινό έλασμα
- Το εσωτερικό έλασμα της πόρτας
- Το εξωτερικό έλασμα της πόρτας
- Οι μπάρες αντιπρόσκρουσης
- Οι μεντεσέδες

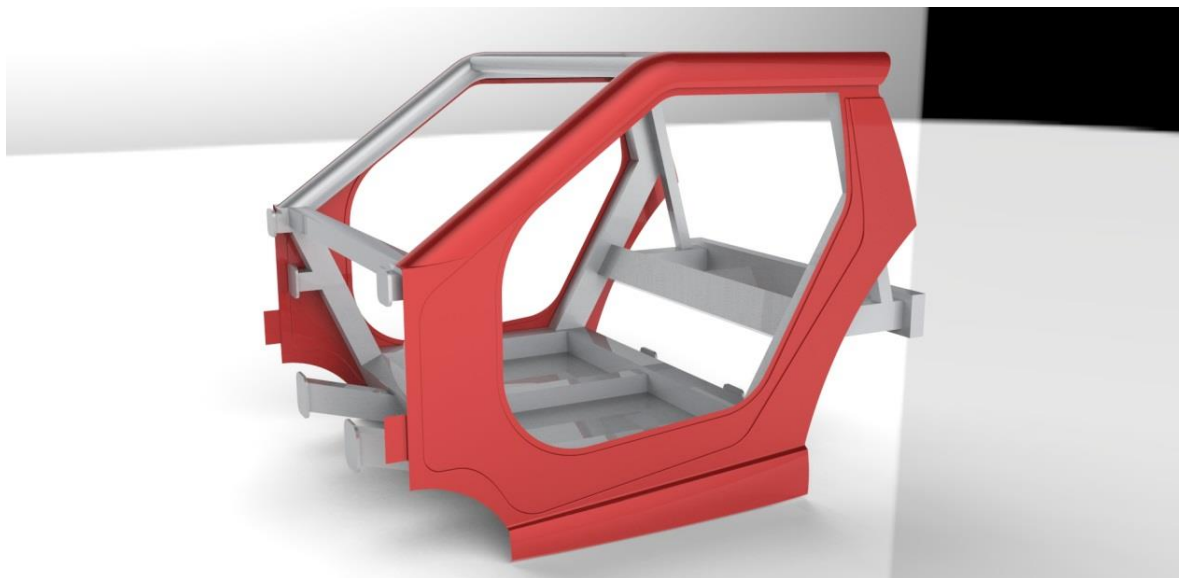
### 2.2.1 Σχεδιασμός πλαινού ελάσματος

Για την συναρμολόγηση της πόρτας και την εφαρμογή της στον υπάρχων κλωβό ασφαλείας σχεδιάστηκε ένα πλαινό έλασμα, το οποίο δημιουργεί τις γεωμετρικές συνθήκες ώστε να εφαρμοστεί πλήρως η πόρτα στον κλωβό και να καλύπτει τις απαραίτητες προδιαγραφές στεγανότητας. Παρακάτω παρουσιάζεται η σχεδίαση του πλαινού ελάσματος μέσω του τρισδιάστατου σχεδιαστικού προγράμματος Creo2.

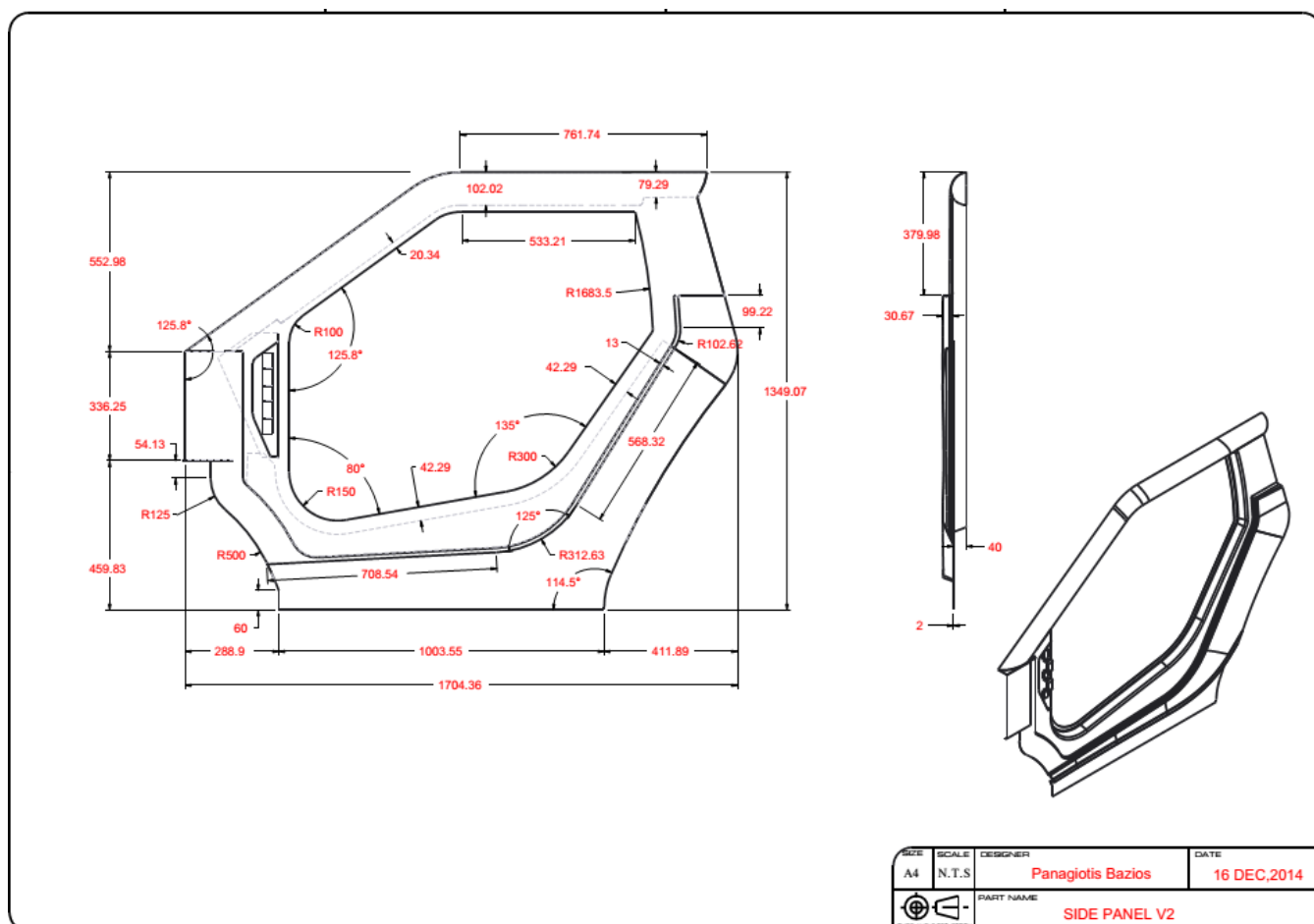


Εικόνα 2.9: Δεξιά πλάγια όψη πλαινού ελάσματος





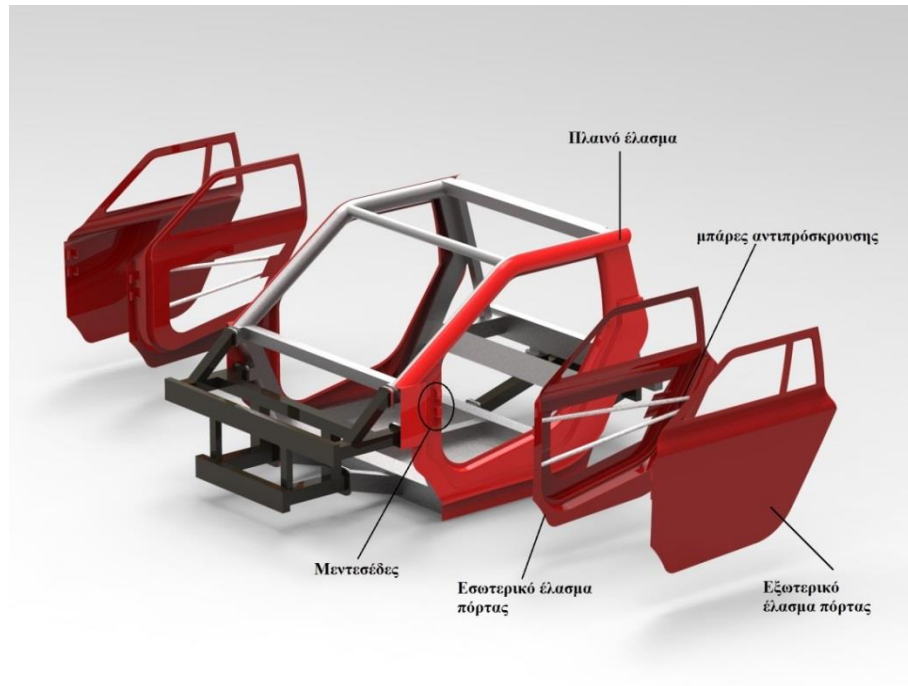
Εικόνα 2.10: Αριστερή πλάγια όψη πλαινού ελάσματος



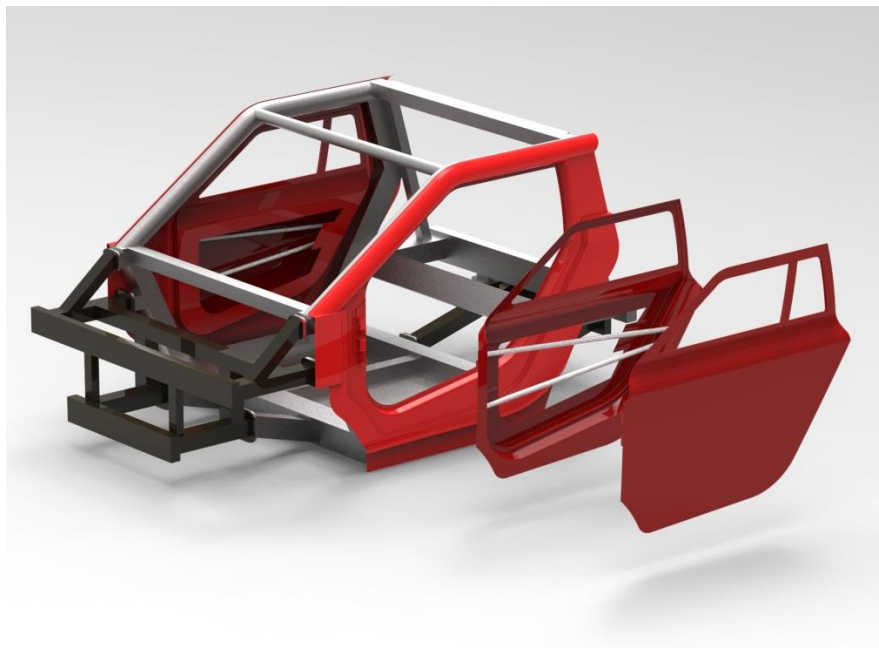
Εικόνα 2.11: Μηχανολογικό σχέδιο πλαινού ελάσματος

### 2.2.2 Σχεδιασμός θύρας οχήματος

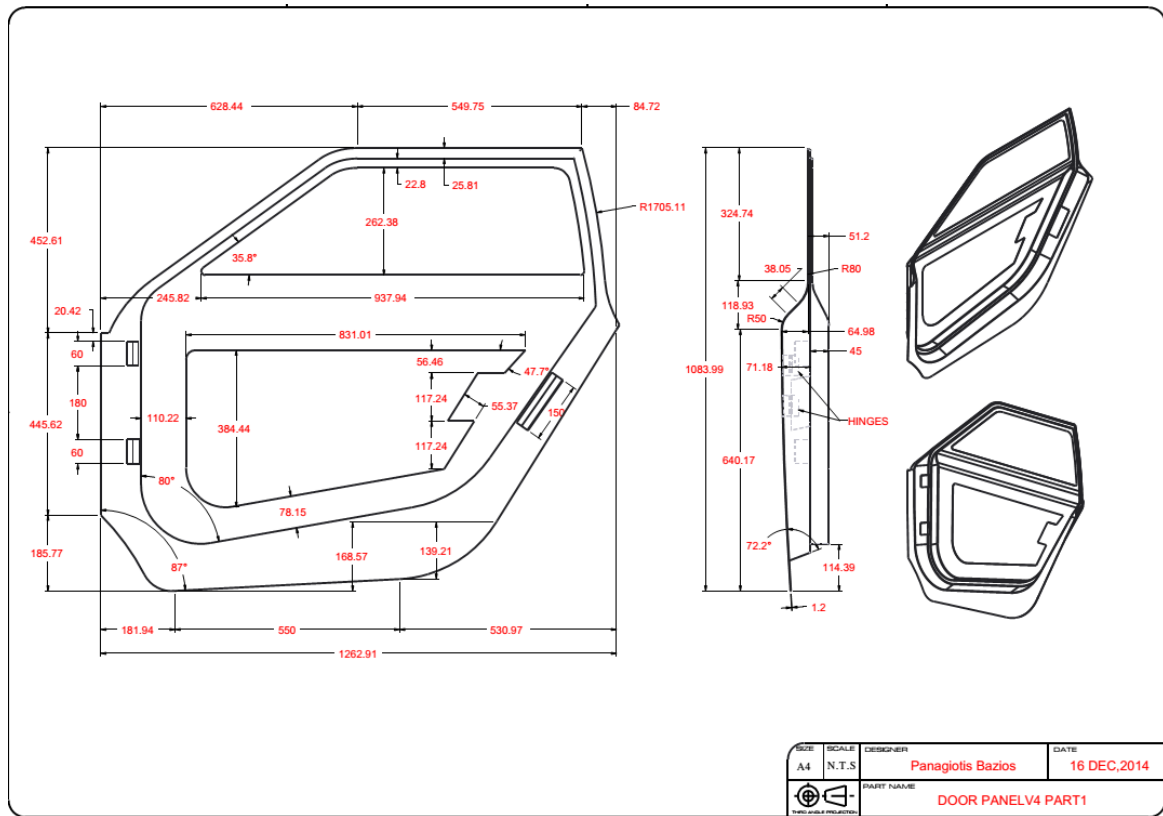
Έχοντας τώρα δημιουργήσει όλες τις απαραίτητες γεωμετρικές συνθήκες για την συναρμολόγηση της θύρας με το κλωβό ασφαλείας, μπορούμε να σχεδιάσουμε την θύρα του οχήματος. Η θύρα είναι το βασικότερο κομμάτι για την απορρόφηση ενέργειας σε πλάγια πρόσκρουση. Η σχεδιάσή της παρουσιάζεται παρακάτω.



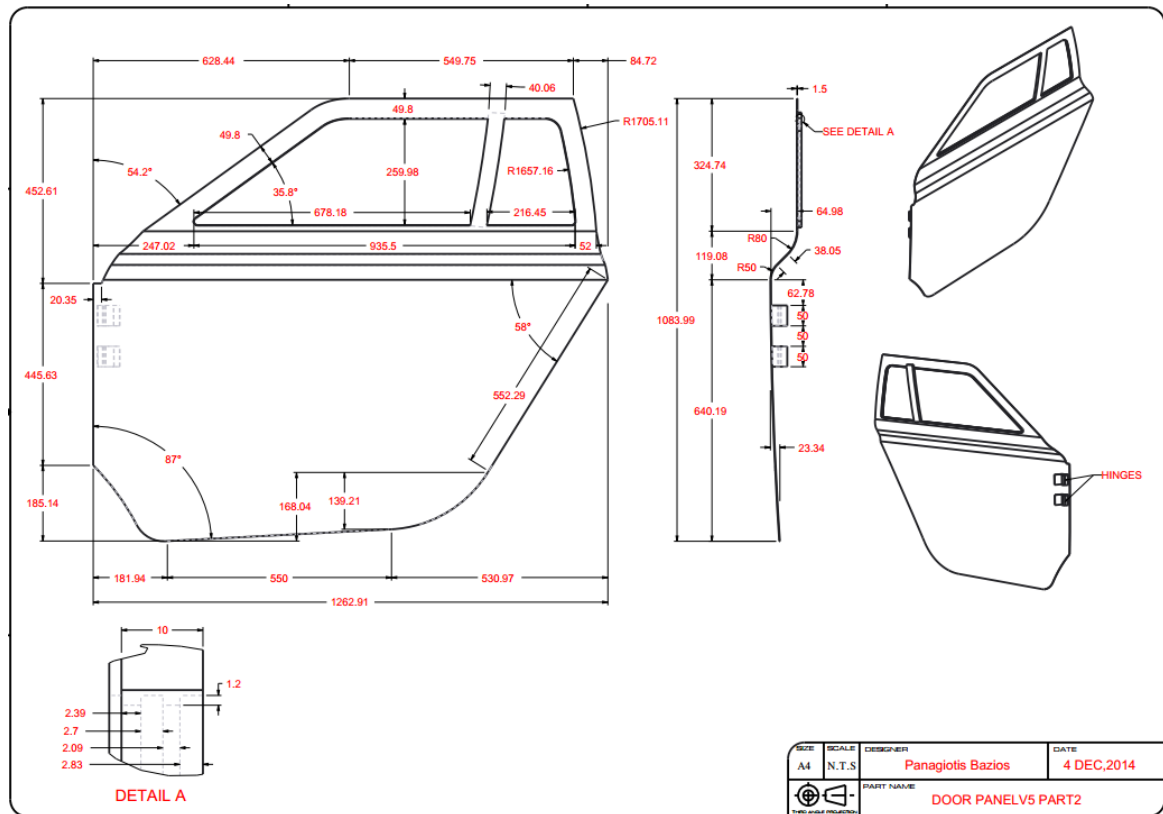
Εικόνα 2.12: Τρισδιάστατη όψη θύρας οχήματος



Εικόνα 2.13: Τρισδιάστατη όψη θύρας οχήματος

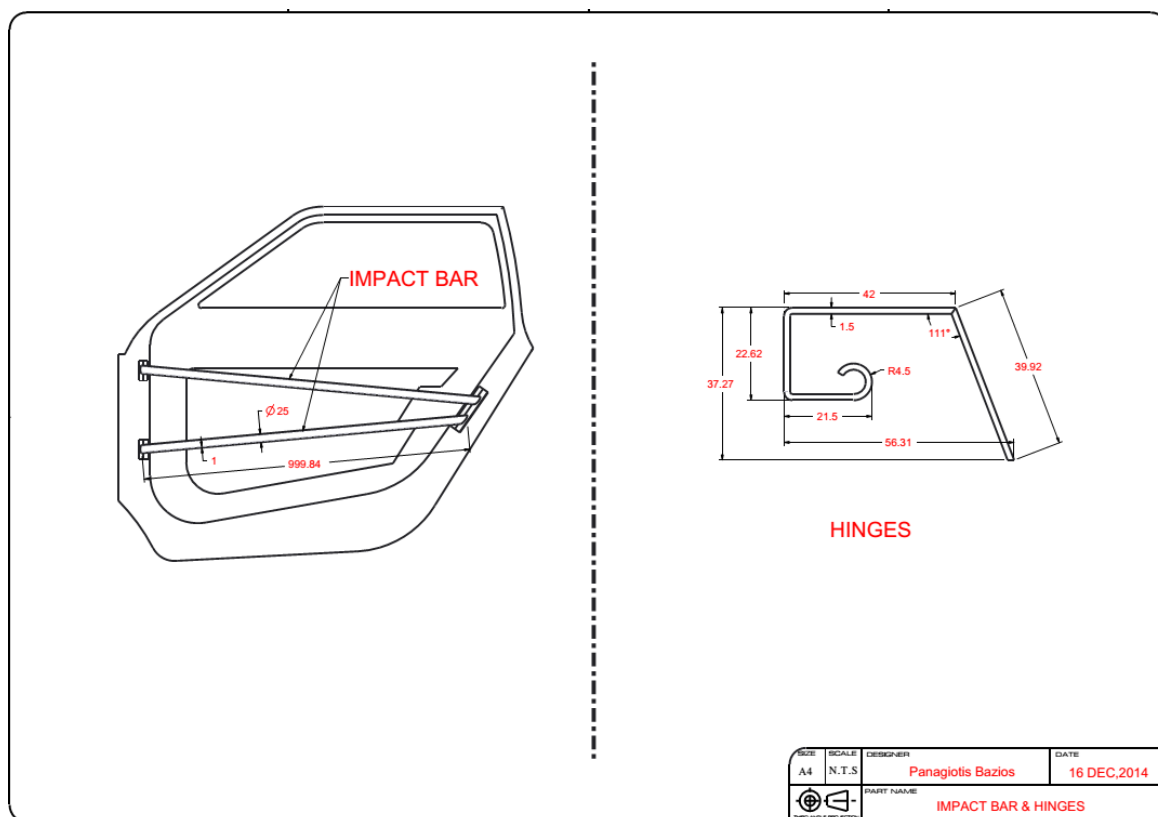


Εικόνα 2.14: Μηχανολογικό σχέδιο εσωτερικού ελάσματος θύρας οχήματος

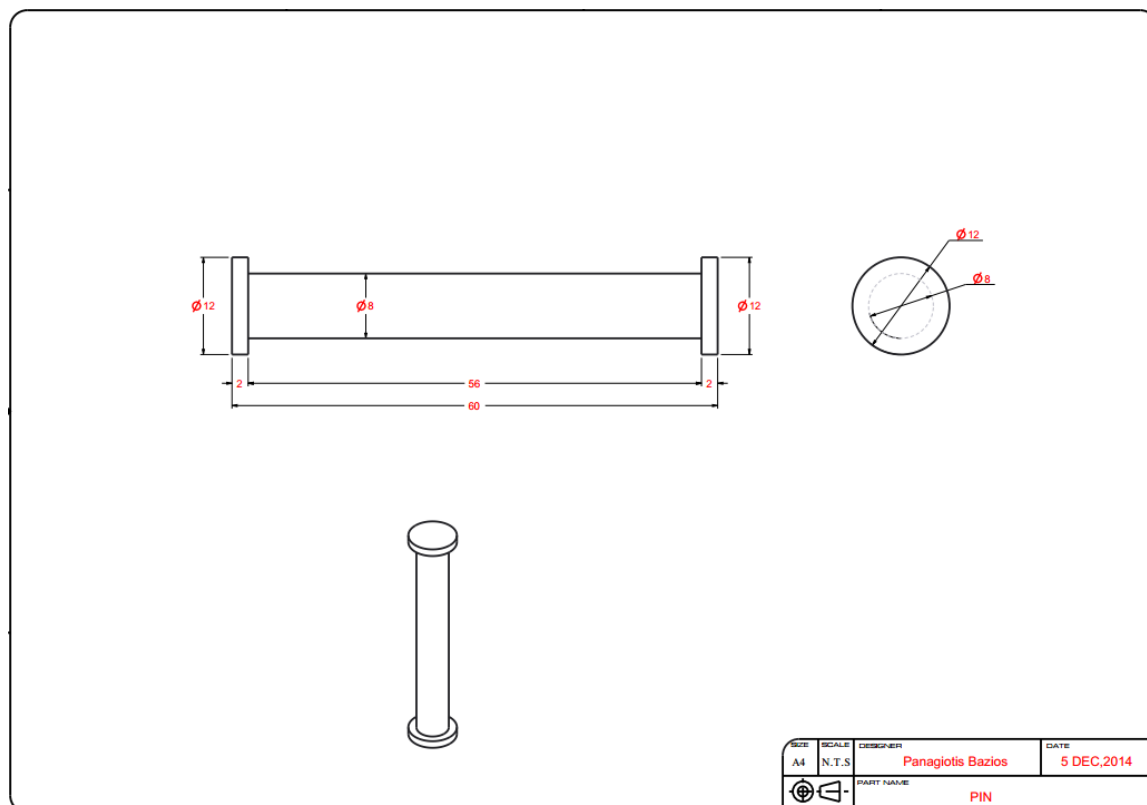


Εικόνα 2.15: Μηχανολογικό σχέδιο εξωτερικού ελάσματος θύρας οχήματος





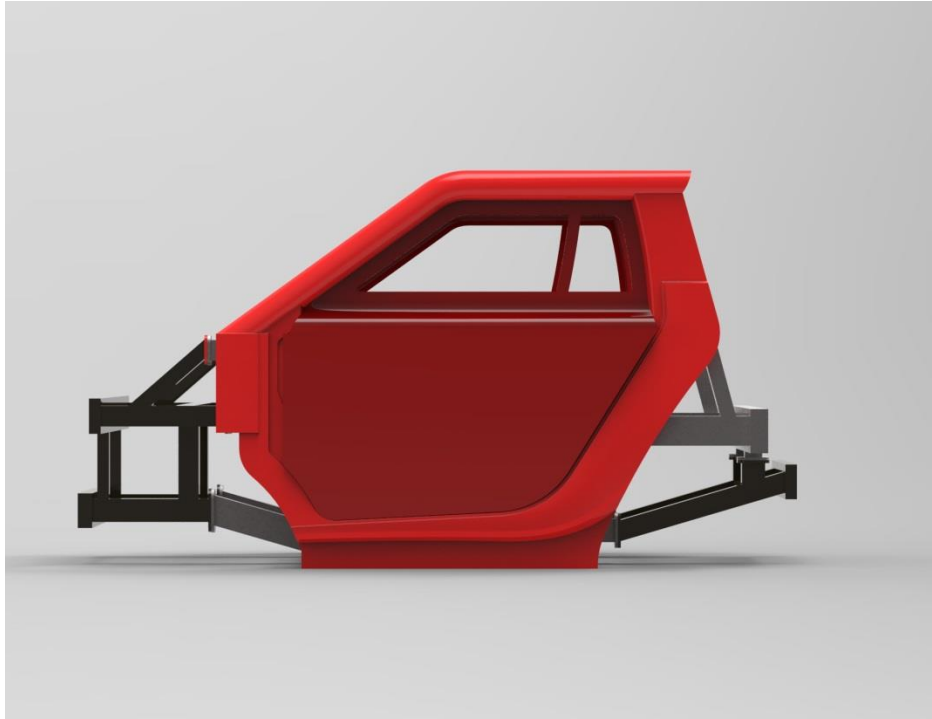
Εικόνα 2.16: Μηχανολογικό σχέδιο ράβδων αντιπρόσκρουσης και μεντεσέδων θύρας οχήματος



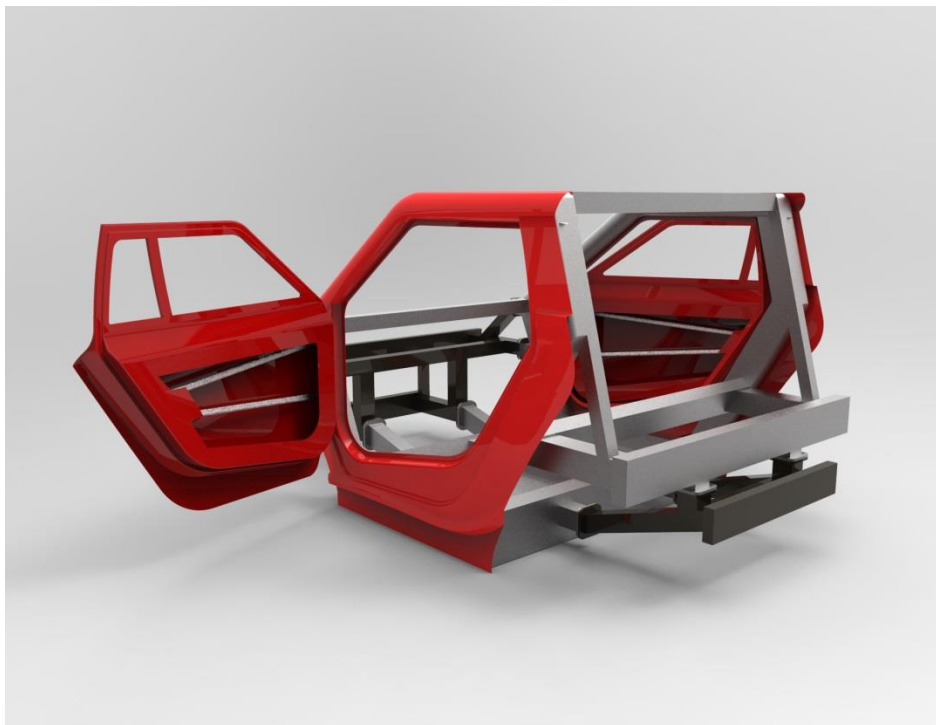
Εικόνα 2.17: Μηχανολογικό σχέδιο πύρου μεντεσέδων θύρας οχήματος

### 2.2.3 Τελική συναρμολόγηση θύρας με τον κλωβό ασφαλείας

Παρακάτω παρουσιάζεται η τελική συναρμολόγηση της θύρας με τον κλωβό ασφαλείας του οχήματος. Η σύνδεση του κλωβού ασφαλείας με τις θύρες γίνεται μέσω της ύπαρξης μεντεσέδων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στο πλαινό έλασμα.



Εικόνα 2.18: Τρισδιάστατη πλάγια όψη συναρμολόγησης



Εικόνα 2.19: Τρισδιάστατη πλάγια όψη συναρμολόγησης



Εικόνα 2.20: Τρισδιάστατη κάτοψη συναρμολόγησης

## Κεφάλαιο 3: Η τεχνολογία παραγωγής των θυρών

### 3.1 Υλικά κατασκευής θυρών

Το πιο κλασικό υλικό κατασκευής θυρών αυτοκινήτου είναι τα ελάσματα από ατσάλι σε διαφορετικές μορφές ανάλογα την εφαρμογή. Με το πέρασμα του χρόνου χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

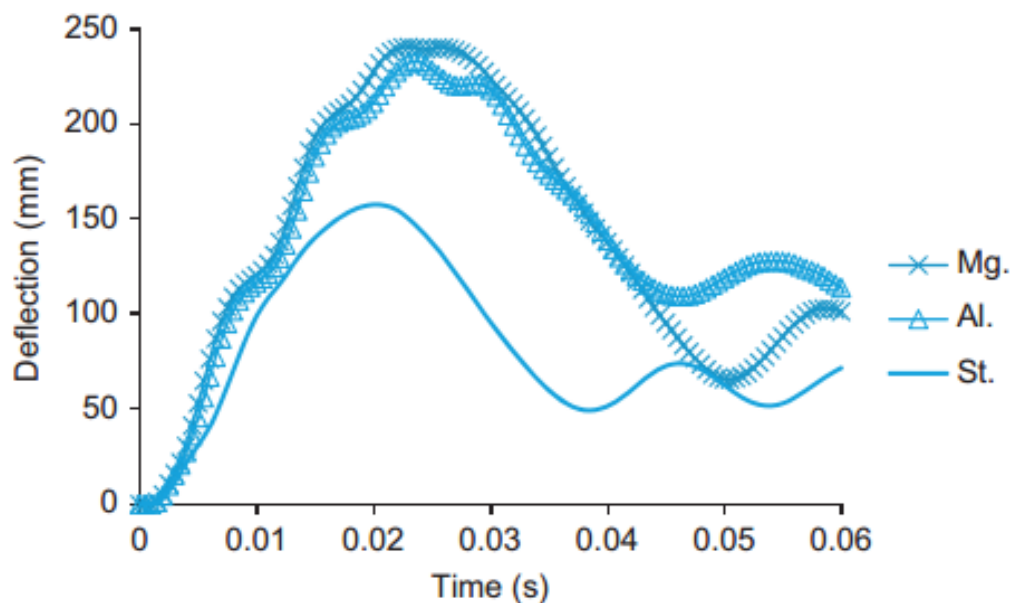
Ατσάλι	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Φθηνό	Μικρή αντοχή στην διάβρωση
	Υψηλή διαθεσιμότητα	Υψηλό βάρος
	Υψηλή ακαμψία και αντοχή	
	Υψηλό όριο πλαστικής παραμόρφωσης	

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

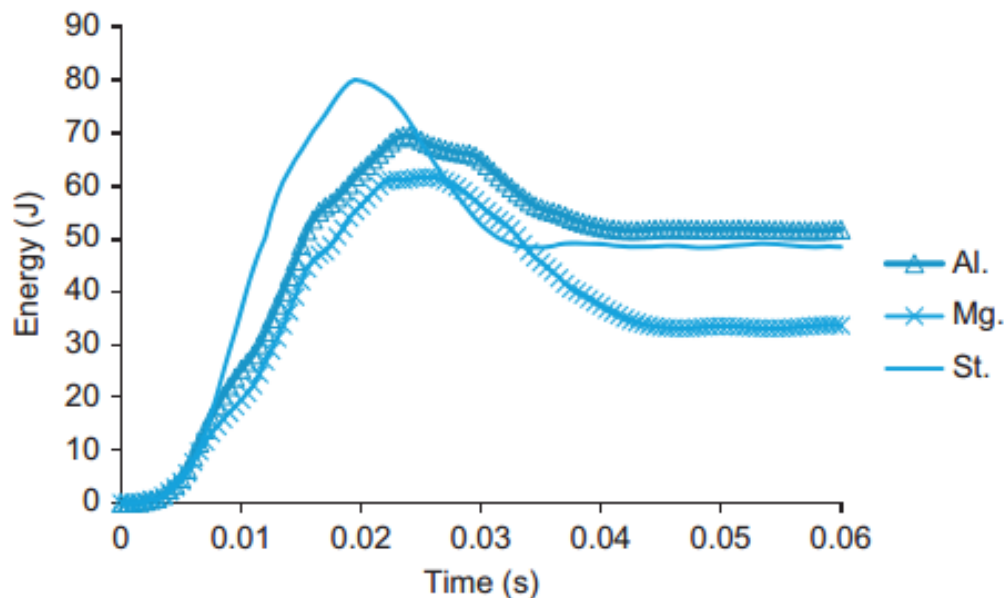
Ανθρακονήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Δυνατότητα δημιουργίας πληθώρας σχεδίων με χρήση κατάλληλων καλουπιών	Υψηλό κόστος
	Μικρό βάρος	Απαιτείται πολύς χρόνος επεξεργασίας καθώς και πολύ εξειδικευμένοι τεχνίτες
	Υψηλή ακαμψία αντοχή	

Μαγνήσιο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Υψηλή αντοχή στην κόπωση	Υψηλό κόστος
	Χαμηλό βάρος	
	Υψηλή αντοχή στην διάβρωση	

Με κριτήριο το χαμηλό κόστος κατασκευής των θυρών, αποκλείουμε την επιλογή κατασκευής με την χρήση ανθρακονημάτων διότι έχουν υψηλό κόστος προμήθειας και απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό. Η διαδικασία επιπλέον θα έχει πολύ χαμηλή παραγωγικότητα λόγω των σύνθετων και χρονοβόρων διαδικασιών που απαιτούνται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συμπεριφορές των υπόλοιπων υλικών σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης [3].



Εικόνα 3.1: Διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα χρόνου-απορροφούμενης ενέργειας σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτει ότι την βέλτιστη μηχανική συμπεριφορά την κατέχει ο χάλυβας διότι έχει την ελάχιστη παραμόρφωση και την μέγιστη απορροφούμενη ενέργεια πρόσκρουσης. Όμως ο χάλυβας έχει μεγάλη πυκνότητα και αυτό τον ορίζει ως ένα βαρύ υλικό κάτι το οποίο θέλουμε να αποφύγουμε στην κατασκευή του οχήματος λόγω εξοικονόμησης καυσίμου. Η επόμενη βέλτιστη λύση είναι το αλουμίνιο, το οποίο είναι ελαφρύ μέταλλο και με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Το αλουμίνιο παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις αλλά είναι παρόμοιο με τον χάλυβα ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης. Τέλος το μαγνήσιο προσεγγίζει σε παραμορφώσεις το αλουμίνιο αλλά υστερεί σε ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Το μαγνήσιο είναι πολύ ελαφρύ μέταλλο αλλά παράλληλα έχει πολύ υψηλό κόστος προμήθειας και αυτό μας οδηγεί στον αποκλεισμό του από την χρήση του στην κατασκευή των θυρών.

Βάσει όλων των ανωτέρω καταλήγουμε στην κατασκευή θύρας οχήματος η οποία θα συνδιάζει την χρήση χάλυβα και αλουμινίου.

### 3.2 Τύποι συγκολλήσεων

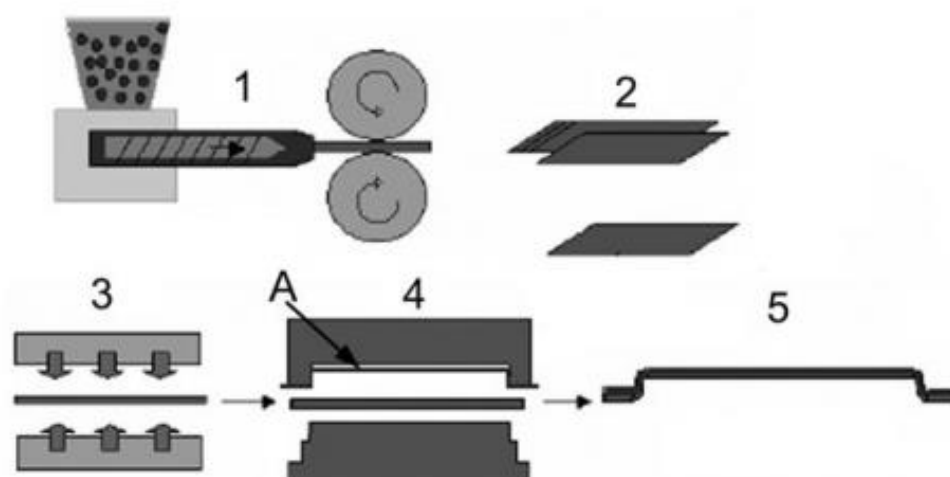
Ανεξάρτητα από τον τύπο θύρας που χρησιμοποιείται για ένα όχημα ή το υλικό κατασκευής, κάποια στιγμή τα διάφορα κομμάτια θα χρειαστεί να συγκολληθούν μεταξύ τους. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις μεθόδους συγκόλλησης των θυρών.

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Συγκόλληση ραφής	Πολύ ισχυρή κόλληση	Υψηλός χρόνος επεξεργασίας
	Δυνατότητα αυτοματοποίησης με χρήση ρομπότ για γραμμες 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

### 3.3 Γραμμή παραγωγής ελασμάτων θύρας

Θέτοντας ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής των θυρών για την μεγιστοποίηση της παραγώμενης ποσότητας, οι αυτοκινητοβιομηχανίες υιοθέτησαν την παρακάτω γραμμή παραγωγής ελασμάτων θυρών.



Εικόνα 3.3: Γράφημα παραγωγής ελασμάτων πόρτας. Βήματα παραγωγής: 1.συνεχής χύτευση και έλαση, 2.εξωθημένα ελάσματα, 3.θέρμανση των ελασμάτων, 4.βαθεία κοίλανση, 5.διαμορφωμένο έλασμα πόρτας.

- Συνεχής χύτευση. Κατά την συνεχή χύτευση το τήγμα τοποθετείται σε ειδική δεξαμενή στην οποία μεταφέρεται από το φούρνο. Το τήγμα παραμένει μέσα στη δεξαμενή κατά μέσο όρο τα 10 λεπτά και στη συνέχεια περνά (σε κατακόρυφη διεύθυνση) μέσα από ψυχόμενη με νερό μήτρα, της οποίας η διατομή είναι αυτή του τελικού χυτού. Με την ψύξη στερεοποιείται το εξωτερικό περίβλημα του μετάλλου και αποκτά κάποια αντοχή.

- Έλαση. Το μέταλλο περνά μέσα από έλαστρα και από πολλαπλά ακροφύσια τα οποία εκτοξεύουν νερό και ψύχουν επιπλέον το μέταλλο. Με χρήση κατάλληλων ελαστρων το έλασμα οριζοντιώνεται, επαναθερμαίνεται και κόβεται σε κατάλληλες αποστάσεις. Για την κατασκευή των ελασμάτων των θυρών πραγματοποιείται θερμή έλαση. Κατά την θερμή έλαση παρουσιάζεται δυναμική ανακρυστάλλωση του μετάλλου. Οι μεγάλοι σχετικά κόκκοι του μετάλλου που προέρχονται από την χύτευση παραμορφώνονται πλαστικά με τη διέλευση του μέσα από τα έλαστρα και αποκτούν διαμήκη μορφή κατά τη διεύθυνση της έλασης. Ταυτόχρονα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, πραγματοποιείται ανακρυστάλλωση του μετάλλου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Κατά τη θερμή έλαση το μέταλλο γίνεται πιο μαλακό, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ισχύς για την πραγματοποίηση της πλαστικής παραμόρφωσης.
- Βαθεία κοίλανση. Για την δημιουργία των κατάλληλων κοιλοτήτων των ελασμάτων της θύρας χρησιμοποιείται η μέθοδος της βαθείας κοίλανσης. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η διατήρηση του αρχικού πάχους του ελάσματος. Η διατήρηση του αρχικού πάχους του ελάσματος μας διασφαλίζει την αποφυγή αστοχίας στην δοκιμή αντοχής της θύρας σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης.



## Κεφάλαιο 4: Η χρήση των CAE στην αυτοκινητοβιομηχανία

### Περίληψη

Ο συνεχώς αυξανόμενος ανταγωνισμός στο χώρο της βιομηχανίας αυτοκινήτων δημιουργεί την ανάγκη για δραστική συντόμευση της φάσης εξέλιξης των προϊόντων και τη μείωση του κόστους της εξέλιξης αυτής. Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογίες με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (Computer Aided Technologies) έχουν ήδη βοηθήσει προς την κατεύθυνση αυτή, όμως οι σύγχρονες εξελίξεις δημιουργούν νέες απαιτήσεις από τα συστήματα λογισμικού που υποστηρίζουν τις τεχνολογίες αυτές. Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται συνοπτικά η διερεύνηση τέτοιων σύγχρονων απαιτήσεων με σκοπό τον καθορισμό νέων προδιαγραφών και χαρακτηριστικών λειτουργίας συστημάτων λογισμικού προεπεξεργασίας (pre-processing) δεδομένων και μεθεπεξεργασίας (post-processing) αποτελεσμάτων προσομοίωσης πρόσκρουσης οχημάτων.

### 4.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανία αυτοκινήτων ήταν πρωτοπόρος στην ένταξη των τεχνολογιών με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (Computer Aided Technologies), κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας των προϊόντων της, του υψηλού τους κόστους, του αυξανόμενου ανταγωνισμού και των υψηλών απαιτήσεων για την ποιότητα και ασφάλεια των νέων παραγομένων μοντέλων.

Ήδη κατά τη δεκαετία του 1990 συντελέστηκαν σημαντικές αλλαγές στην διαδικασία ανάπτυξης των νέων αυτοκινήτων και τη μεθοδολογία βελτίωσης των υπάρχοντων μοντέλων. Η ένταξη των συστημάτων λογισμικού μηχανολογικών υπολογισμών με την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων ("Computer Aided Engineering"-CAE) καθώς και η ανάπτυξη προγραμμάτων προεπεξεργασίας δεδομένων και μεθεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων, σε διαδραστικό, γραφικό περιβάλλον, οδήγησε σε σημαντική μείωση του χρόνου και του κόστους της έρευνας και ανάπτυξης.

Κάποιες από τις στρατηγικές εφαρμογής, τις αρχές και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συστημάτων λογισμικού προεπεξεργασίας και μεθεπεξεργασίας των συστημάτων CAE, προδιαγράφηκαν από της αρχές της δεκαετίας του 1990. (Hose και Rutherford (1993), Dabke (1993), Jushenh και Nan (1993), Wu J.K. κ.ά. (1992), Baguley και Hose (1994)).

Παρόλο που από το 1991 έως το 1996 ο μέσος χρόνος προετοιμασίας των υπολογιστικών μοντέλων μειώθηκε κατά 27% και ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης της ανάλυσης μειώθηκε κατά 48%, εξακολούθησε να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω εξέλιξη και αυτοματοποίηση στο πεδίο εφαρμογής των τεχνολογιών CAE (Halpern (1997), Tang A. (1996), Samareh J.A. (1998)). Κύριος στόχος ήταν και εξακολουθεί να

είναι η μείωση του απαιτούμενου χρόνου για την προετοιμασία των υπολογιστικών μοντέλων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

#### 4.2 Το όραμα του ψηφιακού πρωτοτύπου

Κατά την συμβατική μέθοδο ανάπτυξης όλων των μηχανολογικών προϊόντων, όχι μόνο των αυτοκινήτων, ακολουθείται γενικά η αλληλουχία των βημάτων: σύλληψη, σχεδιασμός, δημιουργία πρωτοτύπου, πειραματική αξιολόγηση και παραγωγή (Εικόνα 1). Εάν κατά την πειραματική αξιολόγηση προκύψει ότι απαιτείται βελτίωση του σχεδιασμού, τότε απαιτούνται επαναλαμβανόμενοι διορθωτικοί κύκλοι μέχρι την επίτευξη των προδιαγραφών του προϊόντος.

Η ένταξη των υπολογισμών με την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων (“Computer Aided Engineering”-CAE) στην αλληλουχία ανάπτυξης των προϊόντων επιτρέπει την έγκαιρη αξιολόγηση της συμπεριφοράς του προϊόντος και συμβάλει στην μείωση των διορθωτικών αναδράσεων που προκύπτουν από την αξιολόγηση των φυσικών πρωτοτύπων (Εικόνα 2).

Ως απώτερος στόχος, σήμερα, τίθεται το να γίνει εφικτό να εξαλειφθεί η ανάγκη της δαπανηρής και χρονοβόρας αξιολόγησης του φυσικού πρωτοτύπου με την αντικατάστασή της από την πλήρη αξιολόγηση και πιστοποίηση ενός ψηφιακού πρωτοτύπου (Εικόνα 3). (Kojima (2000), Keul (2001)).

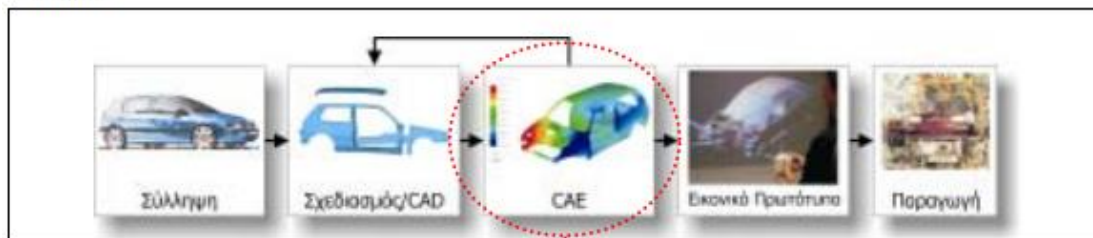
Έτσι, το CAE καλείται να παίξει το ρόλο του αξιόπιστου ψηφιακού πειράματος με αποτέλεσμα να απορρέουν νέες απαιτήσεις για την προεπεξεργασία των δεδομένων και την μεθεπεξεργασία των αποτελεσμάτων του. (Εικόνα 4).



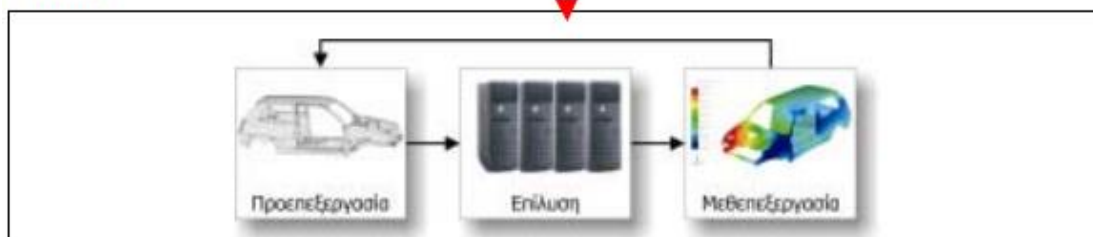
Εικόνα 1



Εικόνα 2



Εικόνα 3

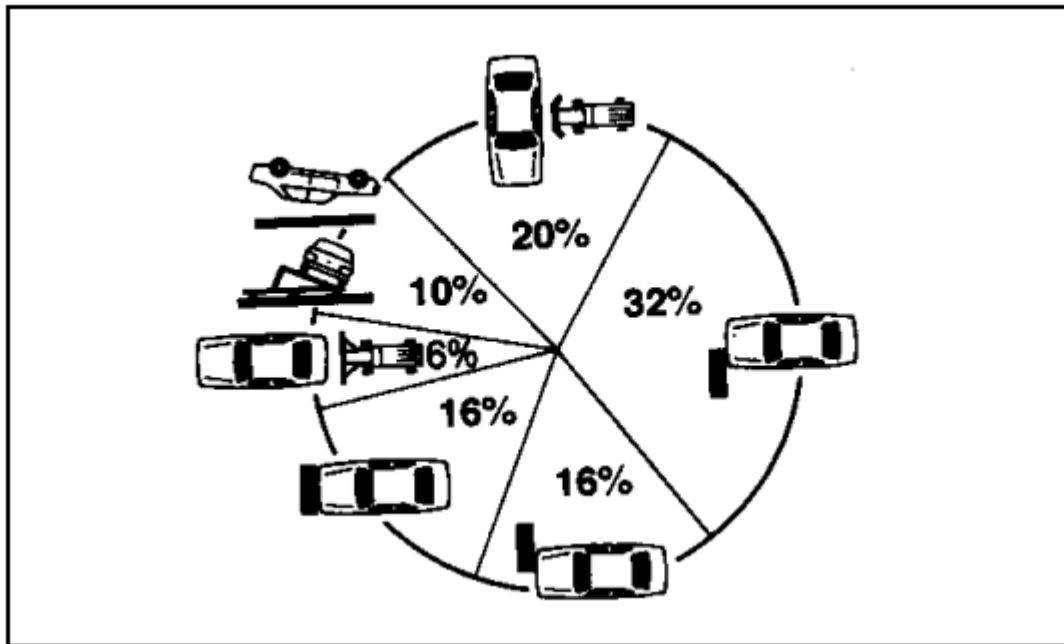


Εικόνα 4

### 4.3 Οι δοκιμές παθητικής ασφάλειας

Οι δοκιμές των αυτοκινήτων ως προς την συμπεριφορά τους σε πρόσκρουση και η ανάλυση της παθητικής ασφάλειας που παρέχουν αποτελούν ένα κρίσιμο σημείο για την έγκριση του, προς κυκλοφορία, προϊόντος και για την αξιολόγηση του από τους καταναλωτές. Σήμερα, οι δοκιμές επί φυσικών πρωτοτύπων αυτοκινήτων και η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων επιβάλλεται από εθνικές νομοθεσίες και πρότυπα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής εφαρμόζονται τα πρότυπα FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) τα οποία αναπτύχθηκαν και παρακολουθούνται από την NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) στα πλαίσια του προγράμματος αξιολόγησης νέων αυτοκινήτων US-NCAP (New Car Assessment Program). Στο πλαίσιο του αντίστοιχου Ευρωπαϊκού προγράμματος (Euro-NCAP), η ευρωπαϊκή επιτροπή EENC (European Enhanced Vehicle-safety committee) τροποποίησε και διεύρυνε τα πρότυπα για το χώρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η ανάπτυξη των νομοθετημένων αυτών εθνικών προτύπων βασίζεται

κυρίως στις κατά τόπους στατιστικές που αφορούν σε συμβάντα σύγκρουσης (Εικόνα 4.5, Bauer (1996)) (Stucki κ.ά. (1998), Tang A. (1996), Crashtest.com Inc. (2003)).



Εικόνα 4.5: Συμβάντα πρόσκρουσης

Οι πρότυπες αυτές δοκιμές αφορούν στην εμπρόσθια, οπίσθια και πλαϊνή σύγκρουση και στην ανατροπή του οχήματος. Οι προδιαγεγραμμένες δοκιμές των πρωτοτύπων οι οποίες επιβάλλεται να γίνουν ποικίλουν ως προς τις ταχύτητες και γωνίες πρόσκρουσης, το είδος των ανδρείκελων (dummies) και στις μηχανικές ιδιότητες των εμποδίων. Στην πράξη, οι τυποποιημένες δοκιμές συχνά εμπλουτίζονται από τους κατασκευαστές με μη τυποποιημένες (Thomke (1998), Giebelier (1999), Schick (2001), Rabe (2002), Petschl (2002), Batke (2003)).

Στην Εικόνα 4.6 φαίνονται μια δοκιμή εμπρόσθιας πρόσκρουσης με 50% μετατόπιση (offset), και στην Εικόνα 4.7 μία δοκιμή πλάγιας πρόσκρουσης αντίστοιχα, κατά Euro-NCAP.



Εικόνα 4.6: Δοκιμή εμπρόσθιας πρόσκρουσης με 50% μετατόπιση



Εικόνα 4.7: Δοκιμή πλάγιας πρόσκρουσης

Ενώ οι εργαστηριακές δοκιμές σύγκρουσης είναι καθοριστικές για την εξέλιξη και την έγκριση των νέων και πιο ασφαλών πρωτοτύπων, παρουσιάζουν πολλούς περιορισμούς. Μερικοί από αυτούς είναι:

- οι εργαστηριακές αυτές δοκιμές μπορούν να γίνουν μόνο αφού έχει κατασκευαστεί ένα πρωτότυπο,
- απαιτείται υψηλού κόστους εξοπλισμός, όπως είναι το πρωτότυπο, τα ανδρείκελα δοκιμών σύγκρουσης (crash test dummies), κινηματογραφικές μηχανές μεγάλης ταχύτητας και ακρίβειας,

- απαιτείται πολύς χρόνος για την εγκατάσταση και ρύθμιση των διατάξεων της δοκιμής,
- ο χρόνος κατά τον οποίο λαμβάνουν χώρα όλα τα φυσικά φαινόμενα που συνοδεύουν τη σύγκρουση είναι πάρα πολύ μικρός,
- απαιτείται επίπονη και χρονοβόρα ανάλυση των συμβάντων ώστε να κατανοηθούν αυτά, να ποσοτικοποιηθούν τα αποτελέσματα και να εξαχθούν συμπεράσματα.

Για τους παραπάνω λόγους, οι δοκιμές σύγκρουσης και παθητικής ασφάλειας αποτέλεσαν πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή μεθόδων προσομοίωσης με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και την πλήρη ένταξη των τεχνολογιών CAE στο κύκλο αυτό της εξέλιξης των κατασκευών.

#### 4.4 Σύγχρονες απαιτήσεις εξέλιξης

Οι εξελίξεις στις μεθόδους μοντελοποίησης διεύρυναν τη γνώση γύρω από τη δυναμική των κατασκευών και επέτρεψαν τη μελέτη συγκεκριμένων παραμέτρων κατά τα πρώιμα στάδια σχεδιασμού των αυτοκινήτων. Έτσι, άνοιξε ο δρόμος για τη ανάλυση εικονικών πρωτοτύπων μέσα σε ψηφιακά εργαστήρια δοκιμών με μικρό κόστος και σύντομο χρόνο ανάδρασης και διορθωτικών ενεργειών.

Παρόλα αυτά, τα υπολογιστικά εργαλεία προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ακόμα ως βοηθητικά για την κατανόηση και την ερμηνεία των εργαστηριακών δοκιμών. Κι αυτό, γιατί εξακολουθούν να υπάρχουν περιορισμοί, οι οποίοι όμως με τη σειρά τους δημιουργούν νέες προκλήσεις για την παραπέρα ανάπτυξη των συστημάτων λογισμικού CAE για την προσομοίωση των δοκιμών πρόσκρουσης.

Το κυριότερο εμπόδιο σήμερα για την επίτευξη του εικονικού ψηφιακού εργαστηρίου δοκιμών πρόσκρουσης είναι ότι οι σημερινές μέθοδοι δημιουργίας των μοντέλων, υπολογισμού και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων απαιτούν κόπο και χρόνο μέχρι την τελική εξαγωγή συμπερασμάτων, τα οποία δεν είναι πάντα αξιόπιστα.

Παράλληλα με την εξέλιξη στους κώδικες επίλυσης προβλημάτων όπως η πρόσκρουση αυτοκινήτων και η παθητική ασφάλεια με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργούνται νέες απαιτήσεις και τάσεις για την ταυτόχρονη εξέλιξη των συστημάτων προεπεξεργασίας των δεδομένων και μεθεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων της εικονικής δοκιμής σύγκρουσης.

Κάποιες από τις προκλήσεις για την περαιτέρω εξέλιξη των προγραμμάτων προεπεξεργασίας των δεδομένων είναι:



- η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για μεγαλύτερα υπολογιστικά μοντέλα, που θα αποτελούν ένα εικονικό πρωτότυπο μεγάλης ακρίβειας και αξιοπιστίας,
- η ευέλικτη δημιουργία μοντέλων σύμφωνα με τα ποικίλα εθνικά πρότυπα διενέργειας δοκιμών ασφάλειας,
- η ανάγκη για περαιτέρω μείωση του χρόνου δημιουργίας αξιόπιστων και ορθών υπολογιστικών μοντέλων,
- η αναγκαιότητα επαναχρησιμοποίησης υπαρχόντων μοντέλων και η ευέλικτη τροποποίηση αυτών,
- η απαίτηση για υποστήριξη πολλών διαφορετικών προγραμμάτων επίλυσης με ταυτόχρονη αντιμετώπιση των ιδιοτεροτήτων τους, ακόμα και με τη μέγιστη δυνατή μετατροπή δεδομένων από τη μορφή ενός προγράμματος στη μορφή ενός άλλου,
- η αναγκαιότητα υποστήριξης και διαχείρισης ποικίλων μοντέλων ανδρείκελων, αερόσκαρων και συστημάτων ασφαλείας,
- η χρήση συστημάτων προεπεξεργασίας δεδομένων ακόμα και από χρήστες χωρίς υψηλή εξειδίκευση, σε πρώιμα στάδια σχεδιασμού.

Κάποιες από τις προκλήσεις στις οποίες πρέπει να αντεπεξέλθει ένα σύγχρονο σύστημα μεθεπεξεργασίας αποτελεσμάτων είναι :

- η ανάγκη διαχείρισης όλο και μεγαλύτερων αρχείων αποτελεσμάτων σε ικανοποιητικό σύντομο χρόνο,
- η απαίτηση για επεξεργασία αποτελεσμάτων από ποικίλους κώδικες επίλυσης,
- η ανάγκη άμεσης απεικόνισης, σύγκρισης, επεξεργασίας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών των φυσικών δοκιμών, συμπεριλαμβανόμενων των εμβιομηχανικών κριτηρίων τραυματισμού των επιβατών,
- η επιθυμία για αμεσότερη σύγκριση των ψηφιακών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα φυσικών δοκιμών με σκοπό τη γρήγορη διακρίβωση και επαλήθευση της ορθότητας της διαδικασίας προσομοίωσης.

## Κεφάλαιο 5: Θεωρητικό υπόβαθρο πλευρικής πρόσκρουσης

### 5.1 Ορισμός πλευρικής πρόσκρουσης

Η πλευρική πρόσκρουση είναι η δεύτερη πιο συχνή μορφή των ατυχημάτων. Έχει οριστεί ως το περιστατικό όταν ένα όχημα χτυπά ένα άλλο όχημα στην περιοχή του ενός ή περισσοτέρων πυλώνων του, κατά την οποία η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε παραμόρφωση και των δύο οχημάτων. Ωστόσο, σε περίπτωση πλευρικής πρόσκρουσης, τα συστήματα συγκράτησης παίζουν λιγότερο ρόλο στην προστασία του επιβάτη λόγω της εγγύτητας του επιβάτη προς το εσωτερικό (πόρτες). Η ακαμψία της πλευρικής δομής παίζει σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του επιβάτη, δηλαδή, πρέπει να είναι ισχυρή για να αντισταθεί της εισβολής. Οι εγκαρσίες ράβδοι είναι επίσης σημαντικές στον έλεγχο της παραμόρφωσης για να προστατεύσουν τον επιβάτη. Τέλος, η εσωτερική διαρρύθμιση είναι ένας σημαντικός παράγοντας, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεταξύ του σώματος του επιβάτη και το εσωτερικό του οχήματος όσον αφορά την ελαχιστοποίηση πρόκλησης τραυματισμών. Για πλευρικές συγκρούσεις, τα σχέδια του οχήματος ρυθμίζονται από FMVSS 214 στις ΗΠΑ, από CMVSS 214 στον Καναδά, και από την ECE R-59 στην Ευρώπη [4-6].

### 5.2 Δομικές απαιτήσεις

Εξ' ορισμού, η αντοχή στις συγκρούσεις είναι το μέτρο της ικανότητας της δομής για την προστασία του επιβαίνοντων κατά την πρόσκρουση, ως εκ τούτου, η δομή πρέπει να πληροί ορισμένες απαιτήσεις, οι οποίες συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η δομή πρέπει να απορροφήσει την μέγιστη δυνατή ενέργεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης με ελεγχόμενο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται η υπολοιπούμενη ενέργεια κρούσης η οποία μπορεί στη συνέχεια να αντιμετωπιστεί από το σύστημα συγκράτησης των επιβατών.

Η δομή θα πρέπει να διατηρεί τουλάχιστον τον ελάχιστο χώρο επιβίωσης για να κρατήσει τον τραυματισμό και τα επίπεδα θνησιμότητας όσο το δυνατόν χαμηλότερα.

Ένας καλός σχεδιασμός θα πρέπει να επιτύχει αυτούς τους δύο στόχους ταυτόχρονα και την ίδια στιγμή, πρέπει να συμμορφώνεται με άλλους στόχους του σχεδιασμού, όπως την άνεση, την προσβασιμότητα, το βάρος, την κατανάλωση καυσίμων, ... κλπ. Έτσι, η πλήρης διαδικασία σχεδιασμού είναι πολύ περίπλοκη και απαιτεί υψηλά επίπεδα επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών κλάδων.

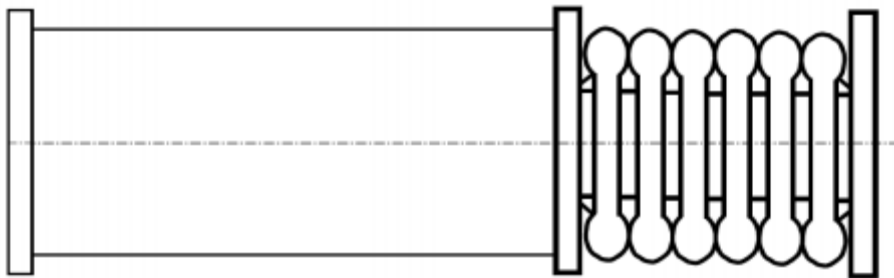
Για την επίτευξη αυτών των στόχων, μια καλή κατανόηση της διαδικασίας της δομικής παραμόρφωσης αλλά και του μηχανισμού της θα πρέπει να διατηρηθούν.



Σε γενικές γραμμές, οι τρόποι παραμόρφωσης (κατάρρευση) της δομής μπορεί να χωριστούν σε δύο τρόπους:

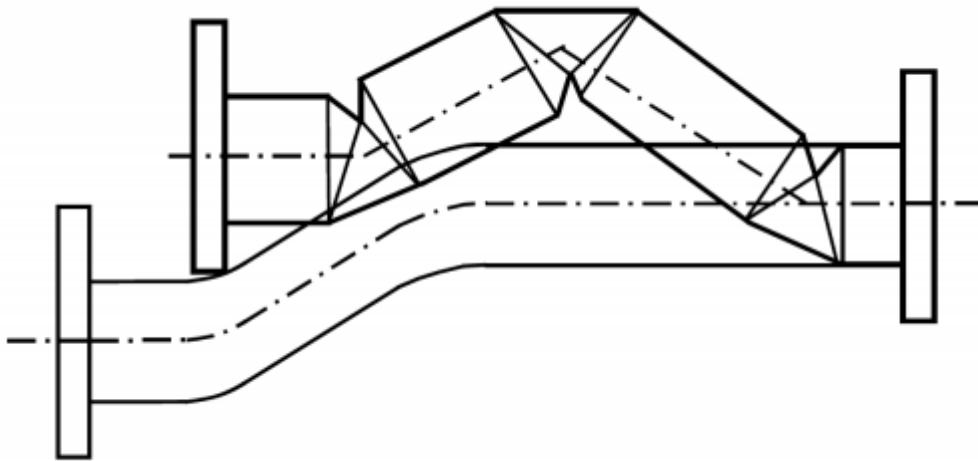
1. Ο Αξονικός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την τακτική αναδίπλωση τύπου ακορντεόν ή το ακανόνιστο τσαλάκωμα των τοιχωμάτων της δομής.
2. Ο καμπτικός τρόπος κατάρρευσης, όπου σχηματίζονται διακριτές πλαστικές αρθρώσεις και η δομή καταρρέει γύρω τους σε έναν τύπο σύνδεσης.

Η καθαρή αξονική κατάρρευση όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1 είναι η πλέον επιθυμητή μορφή κατάρρευσης, η οποία παραλαμβάνει την μέγιστη απορρόφηση ποσότητας ενέργειας. Μια αξονική κατάρρευση, επίσης, που ονομάζεται προοδευτικός λυγισμός, περιλαμβάνει το σχηματισμό πλήρων πτυχώσεων κατά μήκος της δοκού / σωλήνα. Ωστόσο, είναι η πιο δύσκολη να επιτευχθεί και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο κατά τη διάρκεια μιας κεφαλής σε σύγκρουση, σε άμεσα εμπρόσθια- οπίσθια ατυχήματα, ή σε ελαφρώς γωνιακές ( $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ) συγκρούσεις.



Εικόνα 5.1: Αξονικός τρόπος κατάρρευσης

Από την άλλη πλευρά, ο καμπτικός τρόπος κατάρρευσης είναι ο πιο συχνός να συμβεί καθώς διαθέτει το ελάχιστο ενεργειακό μονοπάτι κατά την πρόσκρουση, και η δομή θα ακολουθήσει αυτό το μονοπάτι, εκτός εάν είναι καλά σχεδιασμένη για να εξαναγκάζονται σε αξονική κατάσταση κατάρρευσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, αυτή η λειτουργία περιλαμβάνει μια συνολική κάμψη η οποία ξεκίνησε με τη δημιουργία συγκέντρωσης τάσεων σε ένα αδύναμο σημείο μέχρι να γίνει υπέρβαση του ορίου διαρροής και η δομή κάμπτεται γύρω από αυτό το σημείο. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός δεν πρέπει να επιτρέψει την συγκέντρωση τάσεων σε αυτή την δομή αλλά θα πρέπει να διατηρεί μια ομοιόμορφη παραμόρφωση κατά μήκος του αντικειμένου, η οποία οδηγεί στην σταθερότητα της αξονικής κατάρρευσης.



Εικόνα 5.2: Καμπτικός τρόπος κατάρρευσης

### 5.3 Μετρικές συγκρούσεων

Η αντοχή στη σύγκρουση μετράται με διαφορετικές μετρήσεις ανάλογα με τον τύπο της ανάλυσης που διεξάγεται. Υπάρχουν κυρίως τρεις τύποι αναλύσεων [7]:

- Δομική ανάλυση, στην οποία η απόκριση της κατασκευής σε συνθήκες πρόσκρουσης είναι καθαρά θέμα της μηχανικής. Σε αυτό το είδος της ανάλυσης, το ποσό της ενεργειας πρόσκρουσης (ΕΠ) που απορροφάται είναι μεγάλης σημασίας. Όσο είναι μεγαλύτερη η τιμή, τόσο πιο ασφαλής ο σχεδιασμός. Ο κύριος στόχος της διαδικασίας σχεδιασμού είναι να αυξηθεί η απορροφούμενη ενέργεια πρόσκρουσης. Διαιρώντας το ΕΠ με την συνολική μάζα της κατασκευής προκύπτει η ειδική απορροφούμενη ενέργεια (ΕΑΕ), η οποία αντιπροσωπεύει το ποσό της ενέργειας που απορροφάται σε σχέση με τη μάζα της κατασκευής. Πρόκειται ουσιαστικά για την σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών δομών. Μια άλλη σημαντική ποσότητα είναι η μέγιστη δύναμη αντίδρασης που επιτυγχάνεται κατά την πρόσκρουση. Ο στόχος της διαδικασίας σχεδιασμού είναι να περιορίσει τις τιμές αιχμής από υψηλότερες τιμές που μπορεί να προκαλέσουν μεγάλη επιβράδυνση με αποτέλεσμα την δημιουργία μη ανακτήσιμων σωματικών βλαβών.
- Ανάλυση τραυματισμού, κατά την οποία επικεντρωνόμαστε στις επιπτώσεις μίας πρόσκρουσης για τους επιβαίνοντες. Η επίδραση αυτή καθορίζεται από τα όρια ανοχής της ζημίας που καθορίζονται από την εμβιομηχανική. Αυτό το είδος της ανάλυσης μελετά επίσης την αλληλεπίδραση μεταξύ επιβατών και το εσωτερικό πλαίσιο του οχήματος σε καταστάσεις συντριβής, και πώς

τα συστήματα συγκράτησης μπορούν να περιορίσουν το επίπεδο της σοβαρότητας των τραυματισμών.

- Ανάλυση τραυματισμού πεζού, κατά την οποία επικεντρωνόμαστε στις επιπτώσεις μίας πρόσκρουσης για τους πεζούς. Αυτό το είδος της ανάλυσης ασχολείται με τη βελτίωση του προφυλακτήρα του οχήματος, την οροφή του οχήματος και τον σχεδιασμό του παρμπρίζ, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι τραυματισμοί πεζών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην δομική ανάλυση του οχήματος σε συνθήκες πλάγιας πρόσκρουσης με στόχο την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς της ενέργειας πρόσκρουσης στην καμπίνα των επιβατών.

## 5.4 Μοντελοποίηση απλών δομικών στοιχείων οχημάτων

Τα δομικά τμήματα των οχημάτων αποτελούνται κυρίως από λεπτά τοιχώματα (ελάσματα). Οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιούνται αναλυτικές και πειραματικές προσεγγίσεις για την μελέτη της συμπεριφοράς των απλών λεπτών ελασμάτων σε μορφή σωλήνων υπό την επίδραση πρόσκρουσης. Οι προσεγγίσεις αυτές παρέχονται στις ακόλουθες ενότητες.

### 5.4.1 Αναλυτική Προσέγγιση

Η εργασία για την ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων σωλήνων λεπτού τοιχώματος υπό αξονική φόρτιση ξεκίνησε από τον Alexander [8]. Αυτός έκφρασε μια απλή αναλυτική εξίσωση για τον υπολογισμό της μέσης δύναμης κρούσης η οποία απαιτείται για να παραμορφωθεί πλαστικά ένα λεπτό κυλινδρικό τοίχωμα. Εξίσωσε το απαιτούμενο έργο για την παραμόρφωση των τοιχωμάτων του σωλήνα, εντός πτυχώσεων, με τη μέση δύναμη κρούσης πολλαπλασιασμένη με την ποσότητα της παραμόρφωσης, και δημιούργησε την ακόλουθη εξίσωση:

$$Pm = Ct^{1.5}\sqrt{D}$$

Όπου

$Pm$ : Η μέση δύναμη κρούσης

$C$ : Μία σταθερά η οποία έχει προσδιοριστεί από πειραματικές μετρήσεις

$t$ : Το πάχος του τοιχώματος

$D$ : Η μέση διάμετρος

Η εξίσωση του βελτιώθηκε αργότερα να διαμορφώνει την μηχανική και την κινηματική διαδικασία αναδίπλωσης του δοκιμίου με τον αξονικό τρόπο κατάρρευσης [9, 10]. Τα μοντέλα συνδιάζουν απλές σχέσεις μεταξύ των σημαντικών χαρακτηριστικών πρόσκρουσης την γεωμετρία του δοκιμίου και ιδιότητες του υλικού. Αυτά τα μοντέλα βασίζονται σε απλουστευτικές υποθέσεις, όπως, ότι η ουδέτερη επιφάνεια δεν τεντώνει ούτε συστέλλεται, κάτι το οποίο περιορίζει τις δυνατότητες των μοντέλων πρόβλεψης. Αργότερα, ο Wierzbicki και ο Abramowicz [11] ανέπτυξαν μία αναλυτική προσέγγιση για τη κρουστική απόκριση στήλων λεπτού τοίχους, με βάση την θεωρία της πλαστικότητας. Χρησιμοποιώντας το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ των εξωτερικών φορτίων και την εσωτερική ενέργεια που μεταφέρεται από τα παραμορφωμένα τμήματα, ανέπτυξαν μια εξίσωση για το μέσο φορτίο σύνθλιψης:

$$P_m = 38.12 M_o C^{1/3} t^{-1/3}$$

Όπου

$P_m$  = Μέση δύναμη κρούσης

$M_o = \sigma_o t^2 / 4$  = Στιγμή πλήρως πλαστικής παραμόρφωσης

$\sigma_o = (0.9 - 0.95) \sigma_u$  = Μέση τάση διαρροής

$\sigma_u$  = Απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού

$C = (b + d) / 2$  = Είναι οι πλευρές μίας στήλης ορθογωνικής διατομής

$t$  = Πάχος του τοιχώματος

και για ένα κυκλικό σωλήνα, όπου το  $R$  είναι η μέση ακτίνα:

$$P_m = 2(\pi t)^{3/2} R^{1/2} \sigma_o / 3^{1/4}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, η επίδραση των δυνάμεων αδράνειας παραμελείται καθώς είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με το στατικό φορτίο κρούσης. Είναι επίσης δεδομένο ότι η στατική καταπόνηση ( $\sigma_o$ ) είναι ανεξάρτητη από τον ρυθμό καταπονήσεως. Αυτή η τελευταία απλούστευση παραμελήθηκε λόγω του γεγονότος ότι ορισμένα υλικά εμφανίζουν μια αλλαγή στην απόκριση κατά την επιβολή της κρούσης και αυτό οφείλεται στην μεταβολή του ρυθμού καταπόνησης. Αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται ως ρυθμός ευαισθησίας του υλικού σε καταπόνηση.

Ο ρυθμός ευαισθησίας του υλικού σε καταπόνηση είναι τα φαινόμενο στο οποίο η δυναμική ροή τάσης ( $\sigma_d$ ) εξαρτάται από το ρυθμό καταπόνησης ( $\dot{\epsilon}$ ). Οι Cowper και Symonds [12], πρότειναν μια συστατική εξίσωση για τον υπολογισμό της δυναμικής ροής τάσης ( $\sigma_d$ ) ως συνάρτηση της στατικής ροής τάσης ( $\sigma_0$ ), του ρυθμού καταπόνησης ( $\dot{\epsilon}$ ), καθώς και δύο υλικών παραμέτρων  $q$  και  $D$  τα οποία, μπορούν να περιγραφούν ως:

$$\sigma_d = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \right]$$

Οι Abramwicz και Jones [13] ενημέρωσαν την εξίσωση της μέσης δύναμης κρούσης για να υπολογίσουν το ρυθμό ευαισθησίας χρησιμοποιώντας την τελευταία εξίσωση και κατέληξαν στον αναλυτικό τύπο για το  $P_m$ :

$$P_m = 2(\pi t)^{3/2} R^{1/2} \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{V}{4RD} \right)^{1/q} \right] / 3^{1/4}$$

#### 5.4.2 Εμπειρική Προσέγγιση

Άλλοι ερευνητές παρακολούθησαν μια άλλη προσέγγιση, αντί της καθαρά αναλυτικής, χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα των συνθλιβομένων σωλήνων για την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων. Οι Magee και Thornton [14] χρησιμοποίησαν δεδομένα κρούσης διαφορετικών στήλων (χάλυβες που κυμαίνονται σε αντοχή σε εφελκυσμό από 276 έως 1310 MPa, κράματα αλουμινίου και σύνθετα) με διαφορετικές γεωμετρίες και ανέπτυξαν μια σχέση για τη μέση τιμή του φορτίου κρούσης για σωλήνες κυκλικής διατομής:

$$P_m = \eta \sigma_u \varphi A_0$$

Όπου

$\eta$  = δομική αποτελεσματικότητα

$\sigma_u$  = απόλυτη δύναμη

$\varphi$  = σχετική πυκνότητα

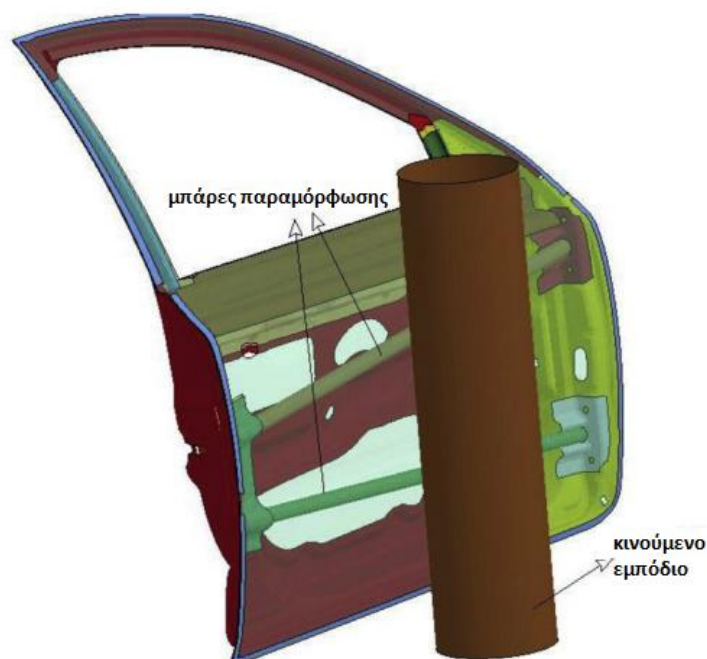
$A_0$  = συνολικό εμβαδόν διατομής που ορίζεται από την εξωτερική περιφέρεια

Για να καθαρίσουμε την βασική αρχή των διαφορετικών αλγορίθμων κρούσης, η ενέργεια παραμόρφωσης ορίζεται από την Εξ. 5.1 που σημαίνει ότι η δυνητικά απορροφούμενη ενέργεια αντιστοιχεί στο έργο που συσσωρεύεται σε ένα υλικό όταν παραμορφώνεται. Η ολοκλήρωση είναι στον όγκο του κάθε στοιχείου με βάση την εφαρμοζόμενη δύναμη, την επιμήκυνση που δημιουργήθηκε και την κατανομή των τάσεων. Η ειδική ενέργεια απορρόφησης, SEA, εξετάζει την ικανότητα ενός υλικού να απορροφά την ενέργεια των στοιχείων που έχουν λιγότερο βάρος επιτυγχάνοντας βελτιωμένη συμπεριφορά κρούσης ή ίση με την τρέχουσα δομή από την Εξ. 5.2.

$$U_e = \frac{1}{2} \int_v \sigma \times \varepsilon \times dv = \frac{1}{2} K_{eq} \delta^2_{max} \quad \text{Εξ. 5.1}$$

$$SEA = U_e / Mass \quad \text{Εξ. 5.2}$$

Όπου,  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  και το  $v$  ίσο με το τανυστή της τάσης, τανυστή της πίεσης και τον όγκο του στοιχείου αντίστοιχα.  $K_{eq}$ , ένα εγγενή χαρακτηριστικό του υλικού, είναι η ακαμψία του σώματος σχετικά με τις παραμορφώσεις ( $\delta$ ) και τις προκύπτουσες δυνάμεις. Σε περίπτωση σύγκρουσης, είναι αρκετά σημαντικό να διακρίνει δύο τύπους σύγκρουσης. Στην τέλεια ελαστική σύγκρουση, οι μάζες θα μπορούσαν να έχουν διαφορετικές ταχύτητες μετά την κρούση και μια ασήμαντη ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται μεταξύ τους.





Ωστόσο, τα αντικείμενα θα μπορούσαν να λάβουν την ίδια ταχύτητα μετά την σύγκρουση.

Τα ατυχήματα αυτοκινήτων περιλαμβάνουν ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις ανάλογα με τη δριμύτητα των δυνάμεων πρόσκρουσης όπως αυτή η μελέτη υποδηλώνει για την κρούση ενός άκαμπτου εμποδίου στη δομή του αυτοκινήτου-πόρτα σε συνθήκες χαμηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά, οι κατασκευαστές οχημάτων πάντα αγωνίζονται να ενισχύουν τα εξαρτημάτα των αυτοκινήτων για να εμποδίσουν την αποτυχία πρόκλησης πλαστικών παραμορφώσεων. Έχοντας πρόβλημα δυναμικού είδους, το οποίο προκαλεί ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων κατά μήκος της επιφάνειας επαφής της πόρτας με το εμπόδιο, αναμένεται το ενδιαφέρον της ανάλυσης σε αυτήν την μελέτη να επικεντρωθεί στην περιοχή αυτή.

Η βάση της διατήρησης της ενέργειας σε ανελαστικές κρουστικές συνθήκες συνεπάγεται ότι οι μάζες πρέπει να έχουν την ίδια μετατροπή κινητικής ενέργειας από την έναρξη της κίνησης μέχρι το μέγιστο σημείο παραμόρφωσης.

$$\frac{1}{2}m_p v_p^2 = \frac{v^2}{2}(m_p + m_d) + \frac{1}{2}K_{eq}\delta_{max}^2$$

Όπου  $m_p$  η μάζα του εμποδίου,  $M_d$  είναι η μάζα της πόρτας,  $v_p$  είναι η ταχύτητα του εμποδίου πριν από τη συντριβή και είναι η τελική ίδια ταχύτητα των δύο μαζών μετά την κρούση. Σε αυτή τη μελέτη, η αρχική ταχύτητα της πόρτας υποτίθεται ότι είναι μηδέν. Η ώθηση (ορμή) αλλάζει το θεώρημα ότι το ποσό της ορμής παραμένει σταθερό πριν και μετά την σύγκρουση και εκφράζεται ως εξής:

$$m_p v_p = (m_p + m_d)v$$

Η εξίσωση της κινητικής ενέργειας και της διατήρησης της ορμής μετά το σημείο διαχωρισμού θα μπορούσε να οριστεί ως παρακάτω:

$$\frac{1}{2}m_p v_p^2 = \frac{1}{2}m_p v_p'^2 + \frac{1}{2}m_d v_d'^2$$

$$m_p v_p = m_p v_p' + m_d v_d'$$

Όπου  $v_p'$  και  $v_d'$  είναι οι τελικές ταχύτητες του εμποδίου και της πόρτας αντίστοιχα, από την έναρξη της κατάστασης μέχρι το σημείο διαχωρισμού. Ένα άλλο ντετερμινιστικό κριτήριο στις συγκρουόμενες μάζες είναι ο συντελεστής της επιστροφής, COR, ο οποίος είναι η αναλογία των διαφορών των ταχυτήτων μετά και πριν από το χτύπημα.

$$COR = \left( \frac{v'_p - v'_d}{v_p - v_d} \right)$$

Δεδομένου ότι σε περίπτωση σύγκρουσης, οι μάζες των εξαρτημάτων επαφής δεν μπορούν να αλλάξουν, ενώ οι ταχύτητες των αντικειμένων αλλάζουν γρήγορα, ο παράγοντας COR είναι μία χρήσιμη παράμετρος για να ελέγξετε την μεταβλημένη ενέργεια και την παραγόμενη παραμόρφωση. Η τιμή του COR που ισούται με 1,0 αντιπροσωπεύει ελαστικές συγκρούσεις, ενώ η τιμή του μηδέν είναι για τελείως πλαστική κρούσεις εξηγώντας την υψηλή ποσότητα ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα και παραμορφώσεις. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι για την ελαστοπλαστική κρούση αυτής της μελέτης, η πραγματική τιμή του COR είναι εντοπισμένη κάπου μεταξύ αυτού του διαστήματος. Η ενέργεια πλαστικής φόρτισης σχετίζεται άμεσα με τη μόνιμη ζημιά της πλάκας της πόρτας και την λαμβάνουμε άμεσα υπόψιν αφαιρώντας την κινητική ενέργεια της πόρτας και του εμποδίου πριν και μετά την σύγκρουση.

$$E_{Plastic} = \frac{1}{2} m_p v_p^2 + \frac{1}{2} m_d v_d^2 - \frac{1}{2} m_p v'_p{}^2 - \frac{1}{2} m_d v'_d{}^2$$

### 5.5 Μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για σύγκρουση

Η προσομοίωση των τροχαίων είναι ένα από τα πιο δύσκολα μη γραμμικά προβλήματα μηχανικού σχεδιασμού, καθώς περιλαμβάνει όλες τις πηγές μη γραμμικότητας. Η δομή του οχήματος αποτελείται από πολλαπλά τμήματα με πολύπλοκη γεωμετρία και κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά. Κατά την διάρκεια της σύγκρουσης, τα τμήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλά κρουστικά φορτία που προκύπτουν από υψηλές τάσεις. Μόλις τα φορτία αυτά υπερβούν το όριο λυγισμού ή το κρίσιμο όριο διαρροής, τα δομικά μέρη υφίστανται μεγάλες προοδευτικές ελαστικές-πλαστικές παραμορφώσεις. Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Η χρήση αριθμητικής προσέγγισης, ειδικά της μη γραμμικής μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, καθίσταται αναπόφευκτη. Υπάρχουν μερικά λογισμικά πακέτα αφιερωμένα στην μη-γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ABAQUS, RADIOSS, PAM-CRASH και το LS-DYNA. Το LS-DYNA έχει αποδειχθεί ότι είναι η καλύτερη λύση για την μοντελοποίηση μη γραμμικών προβλημάτων, όπως τα προβλήματα αντοχής στις συγκρούσεις. Παρακάτω παρουσιάζεται η θεωρητική θεμελίωση της μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

### 5.5.1 Τύποι στοιχείων ανάλυσης

Τα περισσότερα δομικά μέρη του οχήματος είναι λεπτά ελάσματα τα οποία προσομοιώνονται με τη χρήση στοιχείων κελύφους (shell elements). Το LS-DYNA περιλαμβάνει μια περιεκτική βιβλιοθήκη διαφόρων τύπων στοιχείων από την οποία ο αναλυτής μπορεί να επιλέξει το καλύτερο στοιχείο σύμφωνα με τον τύπο του προβλήματος. Υπάρχουν επί του παρόντος 14 διαφορετικά στοιχεία κελύφους στο LS-DYNA, όπως προβλέπεται στον παρακάτω πίνακα:

Στοιχεία κελύφους στο LS-DYNA	
El #	Element
1	Hughes-Liu
2	Belytschko-Lin-Tsay
3	BCIZ triangular shell
4	$C^0$ triangular shell
6	S/R Hughes-Liu
7	S/R co-rotational Hughes-Liu
8	Belytschko-Leviathan shell
10	Belytschko-Wong-Chiang Shell
11	Co-rotational Hughes-Liu
16	Fully integrated shell element
17	Fully integrated DKT, triangular shell element
25	Belytschko-Tsay shell with thickness stretch
26	Fully integrated shell with thickness stretch
27	$C^0$ triangular shell with thickness stretch

Μια σύντομη περιγραφή των διαφορετικών στοιχείων που είναι διαθέσιμα στο LS-DYNA μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Το στοιχείο Hughes-Liu (T1) διαμορφώνεται με βάση ένα εκφυλισμένο στερεό στοιχείο [15, 16]. Αυτή η σύνθεση έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ωστόσο, είναι αποτελεσματική όταν αναμένονται πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί ένα σημείο τετραγωνισμού στο μεσαίο επίπεδο.

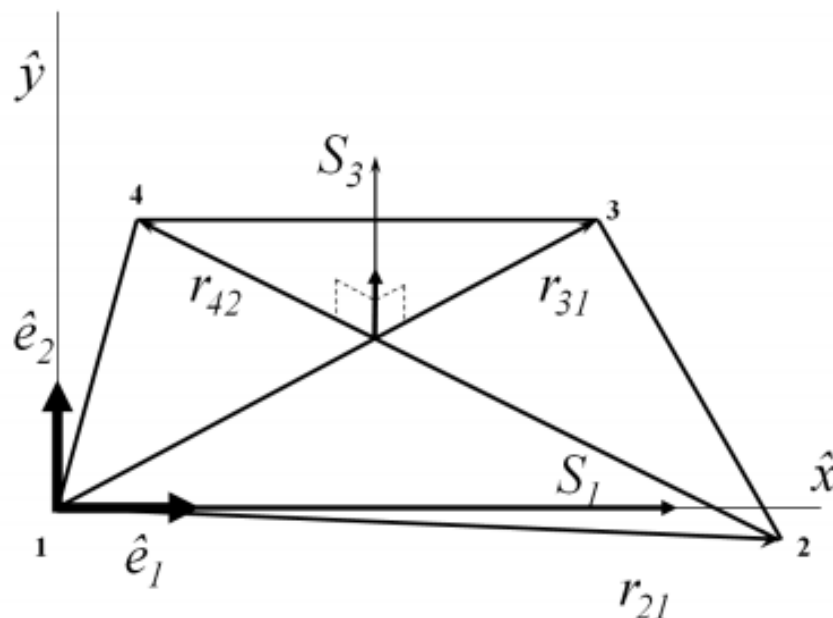
2. Το Belytschko-Lin-Tsay στοιχείο (T2) είναι το πλέον υπολογιστικά αποτελεσματικό μεταξύ όλων των στοιχείων του κελύφους [17]. Το στοιχείο αυτό δεν μπορεί να αντιμετωπίσει στρεβλωμένες διαμορφώσεις με ακρίβεια και επίσης, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε χονδροειδή πλέγματα [18].
3. Το BCIZ τριγωνικό στοιχείο (T3) βασίζεται σε μια θεωρία του Kirchhoff [19]. Χρησιμοποιεί τρία σημεία ολοκλήρωσης στο επίπεδο, κάτι το οποίο αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.
4. Το C<sup>o</sup> τριγωνικό στοιχείο (T4) βασίζεται σε μια θεωρία των Mindlin-Reissner και χρησιμοποιεί τα πεδία γραμμικής ταχύτητας [20]. Ένα σημείο τετραγωνισμού χρησιμοποιείται στο στοιχείο εφαρμογής. Το στοιχείο αυτό είναι ελαφρώς δύσκαμπτο σε σχέση με το στοιχείο τετραγωνισμού [20]. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μεταβατική ζώνη μεταξύ διαφορετικών πλεγμάτων και όχι ένα ενιαίο πλέγμα.
5. Το στοιχείο S/R Hughes-Liu (T6) είναι ίδιο όπως το Hughes-Liu, ωστόσο, αντί να χρησιμοποιεί ένα σημείο τετραγωνισμού, χρησιμοποιεί επιλεκτικά μειωμένη ολοκλήρωση σε σημεία ενσωμάτωσης τετραγωνισμού τύπου Gauss. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.
6. Το S/R co-rotational Hughes-Liu στοιχείο (T7) είναι ίδιο όπως το S/R Hughes Liu εκτός από το ότι χρησιμοποιεί το σύστημα περιστροφής [17].
7. Το στοιχείο Belytschko-Leviathan (T8) προσθέτει το βαθμό διάτρησης της ελευθερίας στο σημείο εφαρμογής το οποίο αναστέλλει το σχηματισμό της μηδενικής ενέργειας [21]. Μπορεί να διαμορφώσει με ακρίβεια την συνεστραμμένη δοκό και ως εκ τούτου συνιστάται για στρεβλωμένες δομές.
8. Το στοιχείο Belytschko-Wong-Chiang (T10) είναι μια βελτίωση σε σχέση με το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay (T2) για να λύσει το πρόβλημα της συνεστραμμένης δοκού, όμως, είναι σχετικά δαπανηρό υπολογιστικά (περίπου 10% περισσότερο σε σύγκριση με T2) [22].
9. Το co-rotational Hughes-Liu στοιχείου (T11) χρησιμοποιεί το σύστημα περιστροφής ωστόσο, είναι υπολογιστικά δαπανηρό σε σύγκριση με το στοιχείο Hughes-Liu (T1).

10. Το πλήρως ενσωματωμένο στοιχείο Belytschko-Tsay (T16) χρησιμοποιεί το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του στοιχείου που ορίζεται από δύο διανύσματα βάσης παράλληλα προς το επίπεδο και ένα τρίτο διάνυσμα κάθετο προς το επίπεδο της [23]. Είναι περίπου ως 2,5 φορές πιο αργό από ό, τι το στοιχείο Belytschko-Tsay (T2).
11. Το πλήρως ενσωματωμένο DKT τριγωνικό στοιχείο (T17) βασίζεται στην συνθήκη διακριτών Kirchhoff Τριγωνικών στοιχείων (DKT) που αναπτύχθηκε από τον Batoz[24], η οποία είναι μια επέκταση για το μετέπειτα έργο που γίνεται από τον Morley [25]. Η καμπτική συμπεριφορά αυτού του στοιχείου είναι καλύτερη από το τριγωνικό στοιχείο C°.
12. Τα στοιχεία (T25 και T26) είναι στοιχεία Belytschko-Tsay και είναι πλήρως ενσωματωμένα στοιχεία κελύφους με δύο επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για να επιτρέψει μια γραμμική μεταβολή του στελέχους διαμέσου του πάχους. Τα στοιχεία αυτά είναι τα πλέον κατάλληλα για εφαρμογές διαμόρφωσης μετάλλου.

Το προεπιλεγμένο στοιχείο στο LS-DYNA είναι το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay (T2). Αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε μοντελοποίηση σύγκρουσης λόγω της υπολογιστικής του απόδοσης και της αποδεκτής ακρίβειάς του. Ως εκ τούτου, αυτό επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματός μας.

### 5.5.2 Το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay Shell (T2)

Το στοιχείο κελύφους Belytschko-Lin-Tsay είναι ένα τετράπλευρο στοιχείο, στο οποίο καθένας από τους τέσσερις κόμβους έχει 5 βαθμούς ελευθερίας (3 μεταφορικούς και 2 περιστροφικούς), στο οποίο 2 άξονες περιστροφής βρίσκονται εντός του επιπέδου στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Οι τέσσερις κόμβοι βρίσκονται στο επίπεδο και τα μοναδιαία διανύσματα  $\hat{e}_1$  και  $\hat{e}_2$  εφάπτονται στο μέσο επίπεδο του κελύφους και το  $\hat{e}_3$  είναι κατά τη διεύθυνση του πάχους. Το σήμα (^) υποδηλώνει τις τοπικές συντεταγμένες.



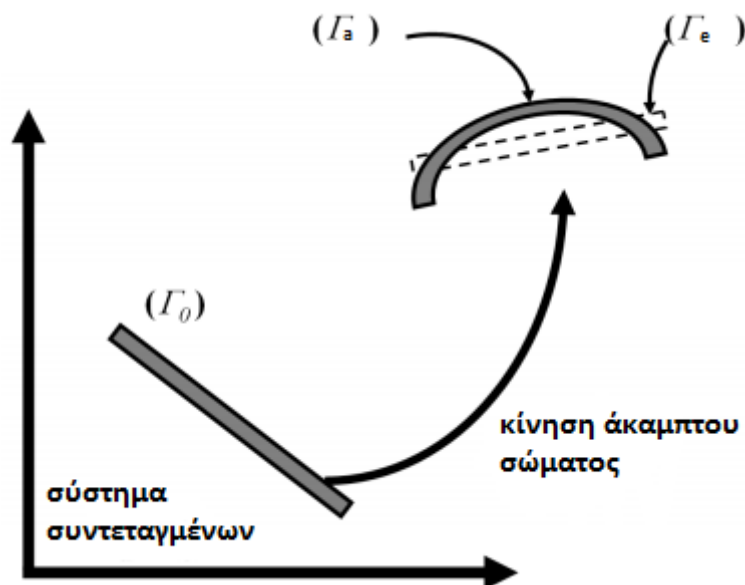
Εικόνα 5.3: Το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay

Το στοιχείο Belytschko-Lin-Tsay έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη βιομηχανία, ιδίως στη μοντελοποίηση συγκρούσεων κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών [17]. Αυτό οφείλεται στην υπολογιστική αποδοτικότητα και τη σταθερότητα που απορρέει από την αποτελεσματική διατύπωση του. Η διατύπωσή του βασίζεται στην μέθοδος συ-περιστροφής (CR), η οποία αναλύεται παρακάτω.



### 5.6 Η μέθοδος συ-περιστροφής

Η συν-περιστροφική μέθοδος είναι η πιο πρόσφατη λαγκρατζιανή κινηματική περιγραφή ανάλυσης μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από πολλούς ερευνητές για την επίλυση ιδιαίτερα γεωμετρικών μη γραμμικών προβλημάτων [26,27]. Η μέθοδος CR διασπάται σε κίνηση άκαμπτου σώματος και σε καθαρή περιστροφή. Ένα ενσωματωμένο σύστημα συντεταγμένων ακολουθεί το στοιχείο (όπως η σκιά του) κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα, η τρέχουσα διαμόρφωση  $\Gamma_a$  είναι ένας συνδυασμός της κίνησης του άκαμπτου σώματος και της καθαρής παραμόρφωσης που επιτυγχάνεται με την εξάλειψη της κίνησης του άκαμπτου σώματος χρησιμοποιώντας την διαμόρφωση  $(\Gamma_o)$  και την διαμόρφωση CR  $(\Gamma_e)$ .



## Κεφάλαιο 6: Έλεγχος αντοχής

### 6.1 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 πλάγιας 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.

## 6.2 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 θεωρίας 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  $\sigma'$ , 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.

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

### 6.3 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.

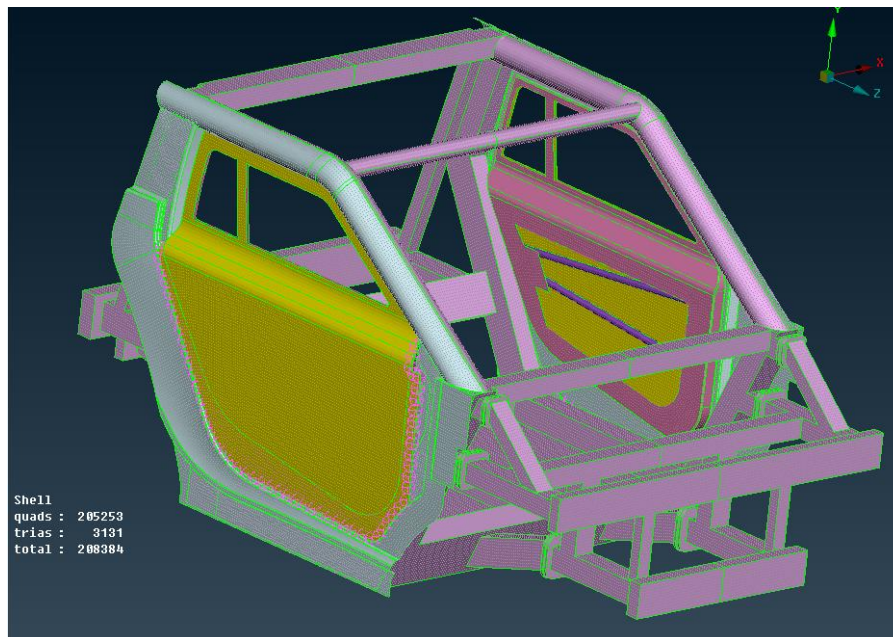
#### 6.3.1 Δημιουργία πλέγματος

Αρχικά εισάγεται το τρισδιάστατο μοντέλο του οχήματος στον προ-επεξεργαστή (ANSA) όπου δημιουργείται πλέγμα με χρήση στοιχείων κελύφους (Shell) τύπου ELFORM 2 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.

Στις παραμέτρους των στοιχείων του πλέγματος τέθηκε μέγιστη διάσταση τα 10mm και ελάχιστη 3mm, κι αυτό για να έχουμε καλή ακρίβεια στο πλέγμα καθώς η γεωμετρία του πλαισίου σε συνδιασμό με την γεωμετρία της πόρτας είναι σύνθετη.

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.

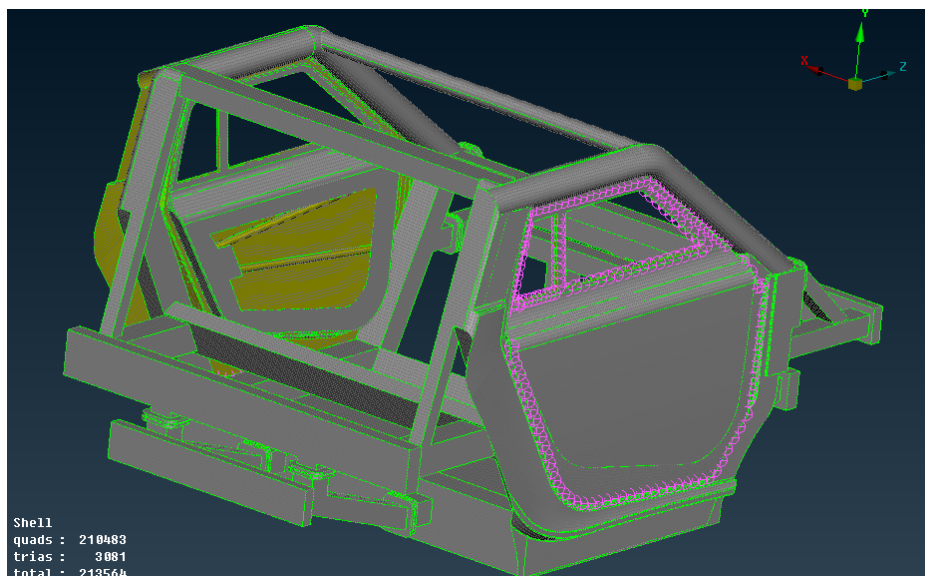
Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 6.1) φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο. Για την δημιουργία του χρησιμοποιήθηκε η εντολή Shell Batch Mesh, δηλαδή η δημιουργία πλέγματος κελύφους (σε επιφάνειες και όχι σε όγκους). Αυτό γιατί στην πραγματικότητα όλες οι σωλήνες στο σχέδιο δεν είναι συμπαγείς και τα ελάσματα έχουν μικρό πάχος. Χρησιμοποιώντας πλέγμα κελύφους μπορεί να δοθεί μέσω του πάχους (Thickness) οποιοδήποτε πάχος τοιχωμάτων είναι επιθυμητό.



Εικόνα 6.1: Εμπρόσθια άποψη του συνολικού πλέγματος

### 6.3.2 Μοντελοποίηση συνδέσεων

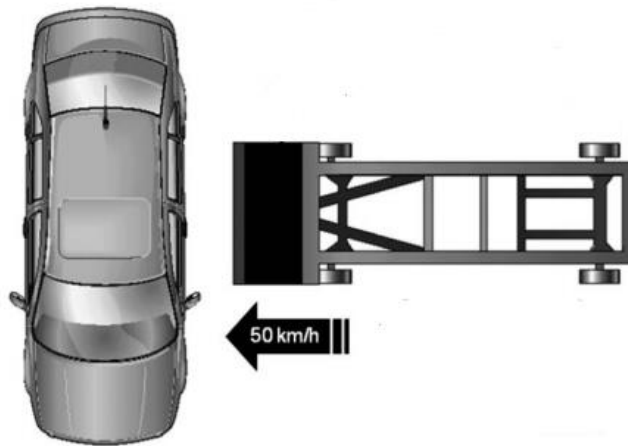
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το τελικό σχέδιο, που υπόκειται σε πλάγια πρόσκρουση, αποτελείται από 3 κομμάτια: η πόρτα, το πλαινό έλασμα και το κεντρικό πλαίσιο. Αυτά θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με σημειακές κολλήσεις επειδή αυτός ο τύπος ένωσης δίνει την δυνατότητα αποφυγής παραμορφώσεων λόγω μειωμένης θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Παρακάτω φαίνονται οι ενώσεις (εικόνα 6.2):



Εικόνα 6.2: Συνδέσεις μεταξύ των ελασμάτων πόρτας και του πλαινού πάνελ με τον κλωβό ασφαλείας

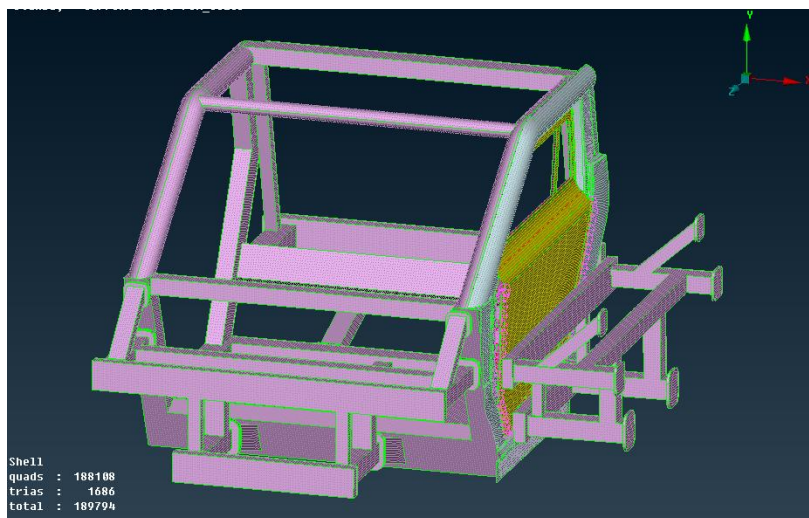
### 6.3.3 Εισαγωγή της μπάρας πρόσκρουσης (Barrier)

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 πλάγια σύγκρουση του οχήματος με μία μπάρα πρόσκρουσης κατασκευασμένη από αλουμίνιο 3003 και 100% επικάλυψη, με ταχύτητα 50 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 6.3: Γραφική αναπαράσταση των προδιαγραφών της πλάγιας κρούσης της EuroNCAP

Στην συνέχεια μέσω του ANSA τοποθετήθηκε πλέγμα, μοντελοποιήθηκε το υλικό κατασκευής του και δόθηκε πάχος στα 1.5 χιλιοστά, όπως έχει βρεθεί από την βελτιστοποίηση του εμπρόσθιου υποπλασιδίου στην μελέτη εμπρόσθιας πρόσκρουσης [2]. Τέλος, εισήχθη στο αρχείο με την ολοκληρωμένη συναρμογή του οχήματος. Παρακάτω δίνεται εικόνα όπου φαίνεται η μπάρα πρόσκρουσης τοποθετημένη ακριβώς στην περιοχή των θυρών του οχήματος.



Εικόνα 6.4: Εμπρόσθια-πλάγια όψη του εμποδίου μπροστά από την περιοχή της θύρας



### 6.3.4 Μοντελοποίηση Υλικών

Ως υλικό κατασκευής για όλα τα μέρη, εκτός από τις μπάρες παραμόρφωσης, επιλέχθηκε το αλουμίνιο 6063 T-6. Το αλουμίνιο μοντελοποιείται ως ισотροπικό ελαστικο-πλαστικό μέταλλο σε λογισμικά FEA. Στην περίπτωση του LS-Dyna μπορούμε να το μοντελοποιήσουμε και ως MAT\_ELASTIC χωρίς να υπάρχει διαφορά στα αποτελέσματα. Οι μπάρες παραμόρφωσης επιλέχθηκαν να μοντελοποιηθούν με χάλυβα 304.

Η διαδικασία μοντελοποίησης έχει ως εξής:

- Εισαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού
- Ορισμός κριτηρίων αστοχίας

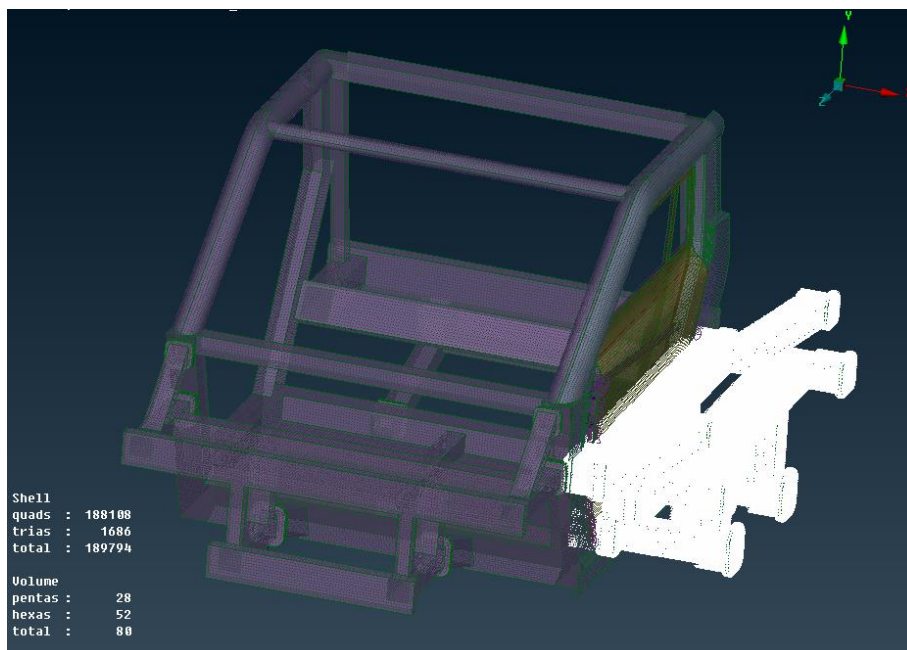
Στη συνέχεια εισάγουμε τις ιδιότητες του κράματος αλουμινίου 6063 T-6 (AluminiumMagnesium-Silicon Wrought Alloy (6000-Series)) και του χάλυβα 304:

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

Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 304	
Πυκνότητα (x 1000 kg/m <sup>3</sup> )	7,8
Μέτρο Ελαστικότητας / Young (GPa)	210
Λόγος Poisson	0,30
Όριο Διαρροής (MPa)	215

### 6.3.5 Μοντελοποίηση αρχικής ταχύτητας (Initial Velocity)

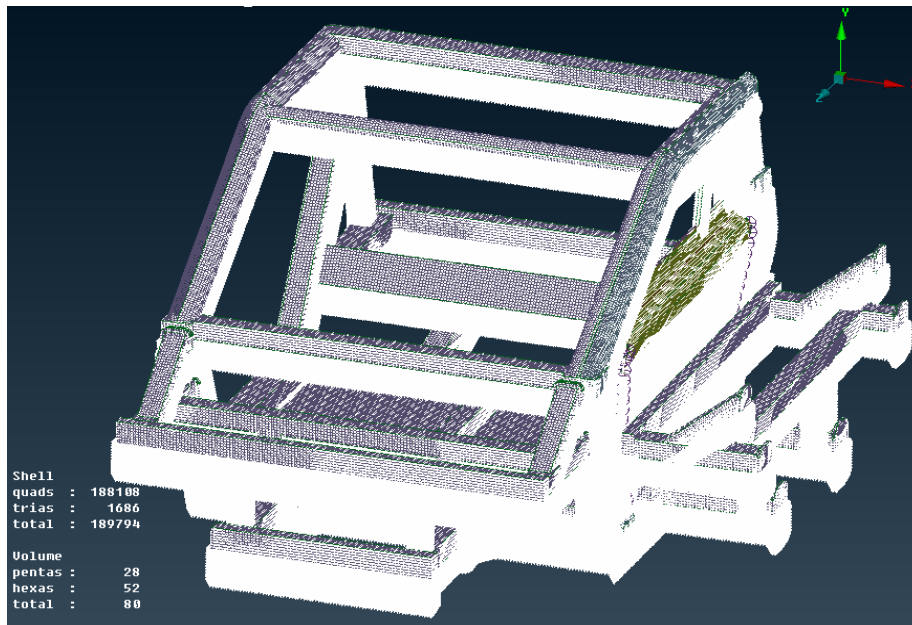
Η αρχική ταχύτητα τοποθετήθηκε σε όλα τα στοιχεία (elements) του πλέγματος του εμποδίου. Οι μονάδες μέτρησης της ταχύτητας είναι mm/msec ή m/sec, οπότε τα 50 km/h θα είναι 13.88 m/s . Παρακάτω φαίνεται μία εικόνα με την αρχική ταχύτητα (εικόνα 6.5)



Εικόνα 6.5: Αρχική ταχύτητα 13.88m/s σε κάθε στοιχείο του πλέγματος του εμποδίου

### 6.3.6 Μοντελοποίηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας

Η βαρύτητα μοντελοποιήθηκε επηρεάζοντας τόσο το πλαίσιο όσο και το εμπόδιο, πράγμα που φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 6.6). Δεδομένων των μονάδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, η επιτάχυνση της βαρύτητας ορίστηκε στα  $0,00981 \text{ (mm/(msec)}^2\text{)}$ .



Εικόνα 6.6: Βαρύτητα τοποθετημένη σε όλα τα στοιχεία του οχήματος και του εμποδίου

## Κεφάλαιο 7: Επίλυση του Μοντέλου

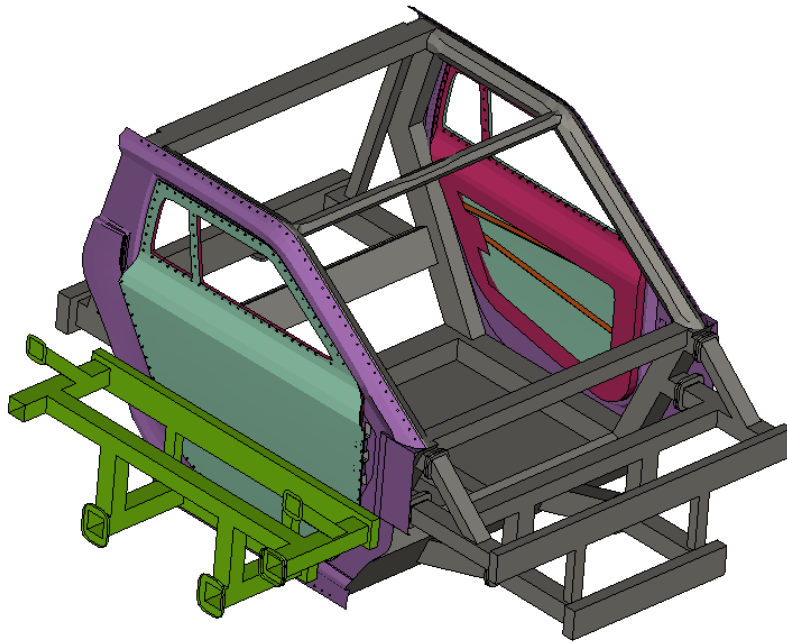
Σε αυτό το στάδιο, το ολοκληρωμένο μοντέλο που προετοιμάστηκε χρησιμοποιώντας τον προ-επεξεργαστή ANSA, εξήχθη χρησιμοποιώντας την εντολή `outprt` σε αρχείο `.key` του LS-DYNA. Έπειτα έγινε η επίλυση του μοντέλου από τον επιλυτή LS-DYNA. Ο χρόνος επίλυσης κυμαίνεται από 13 έως 15 ώρες. Τέλος, το αρχείο `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  $\Delta t$  δηλαδή το `crash time-step`. Αυτό εξαρτάται από το εκάστοτε υλικό, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:  $\Delta t = L * \sqrt{\frac{\rho}{E}}$ , όπου  $E$  είναι το μέτρο του Young,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού και  $L$  είναι το `Target Length` των πεπερασμένων στοιχείων.

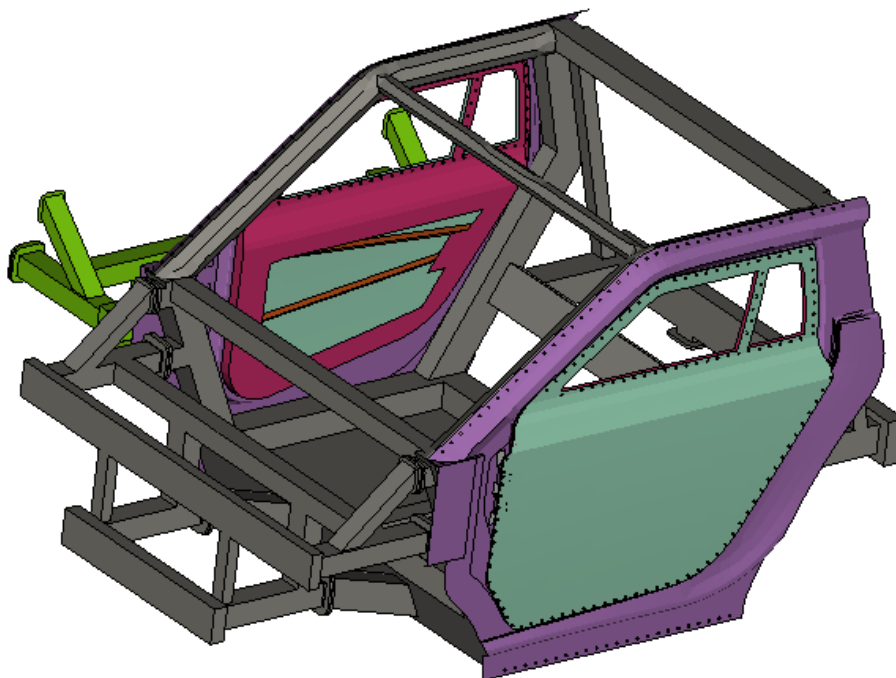
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμόρφωσης-τάσης της πρώτης δοκιμής της θύρας με κωδικό `Door crash_10`. Η παραμετροποίησή της έγινε βάση των εξής στοιχείων:

### 7.1 Door crush\_10:

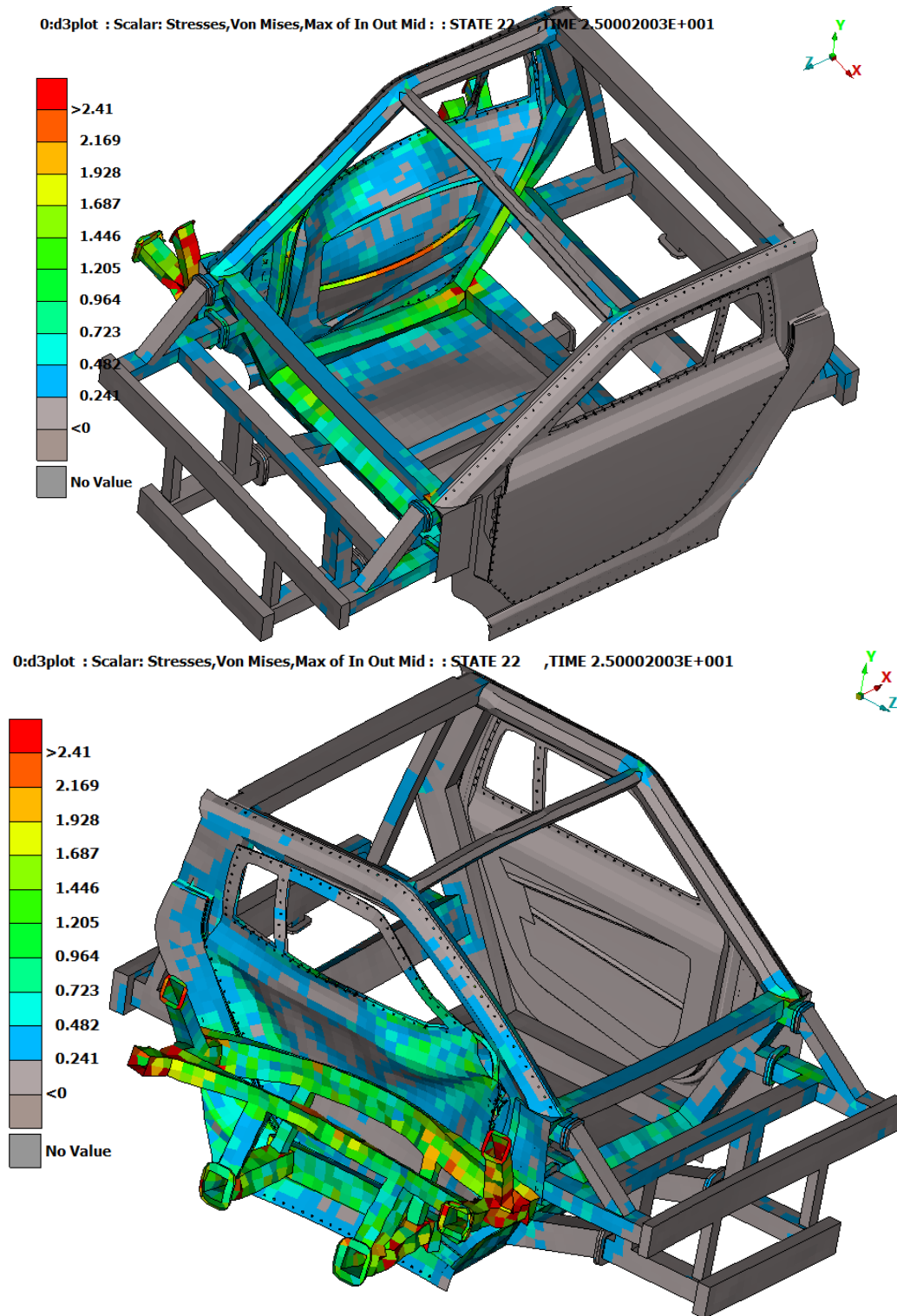
1. Side panel: 2mm
2. Outer panel: 1.5mm
3. Inner panel: 1.2mm
4. Impact bars: 1mm



Εικόνα 7.1: Προβολή του μοντέλου εντός του μΕΤΑ



Εικόνα 7.2: Προβολή του μοντέλου εντός του μΕΤΑ



Εικόνα 7.3: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_10

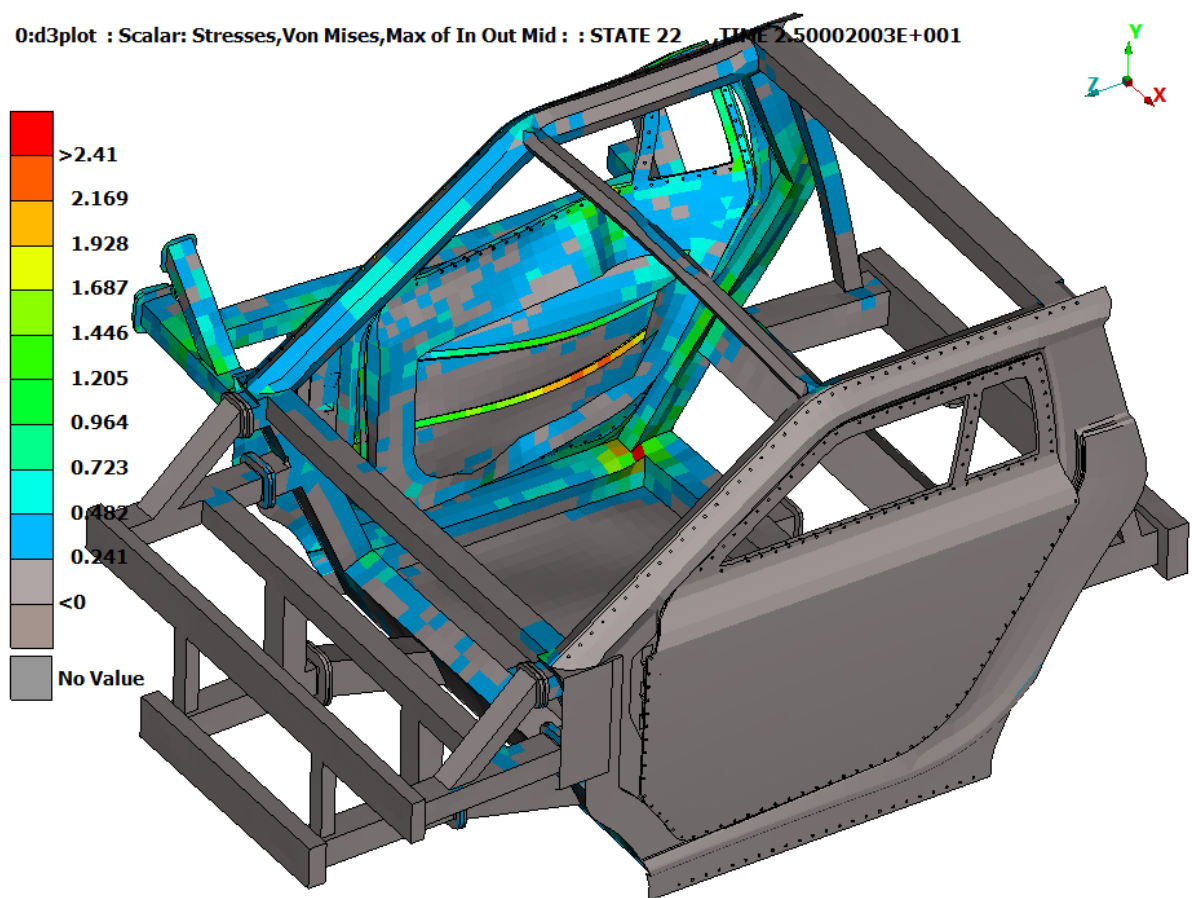
Όπως φαίνεται από το παραπάνω αποτέλεσμα, η θύρα δεν άντεξε την ενέργεια της πρόσκρουσης με αποτέλεσμα να έχουμε παραμόρφωση στο εσωτερικό έλασμα της θύρας αλλά σε επιτρεπτά όρια και η αστοχία της εντοπίζεται κυρίως στις μπάρες αντιπρόσκρουσης. Αυτό φαίνεται από την μπάρα στα



αριστερά της εικόνας: Η πορτοκαλί ένδειξη αντιστοιχεί στο όριο διαρροής του χάλυβα (215Mpa) και η ερυθρή ένδειξη αντιστοιχεί στο όριο διαρροής του αλουμινίου (241Mpa). Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στις μπάρες αντιπρόσκρουσης, η οποία είναι οριακά μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού της μπάρας.

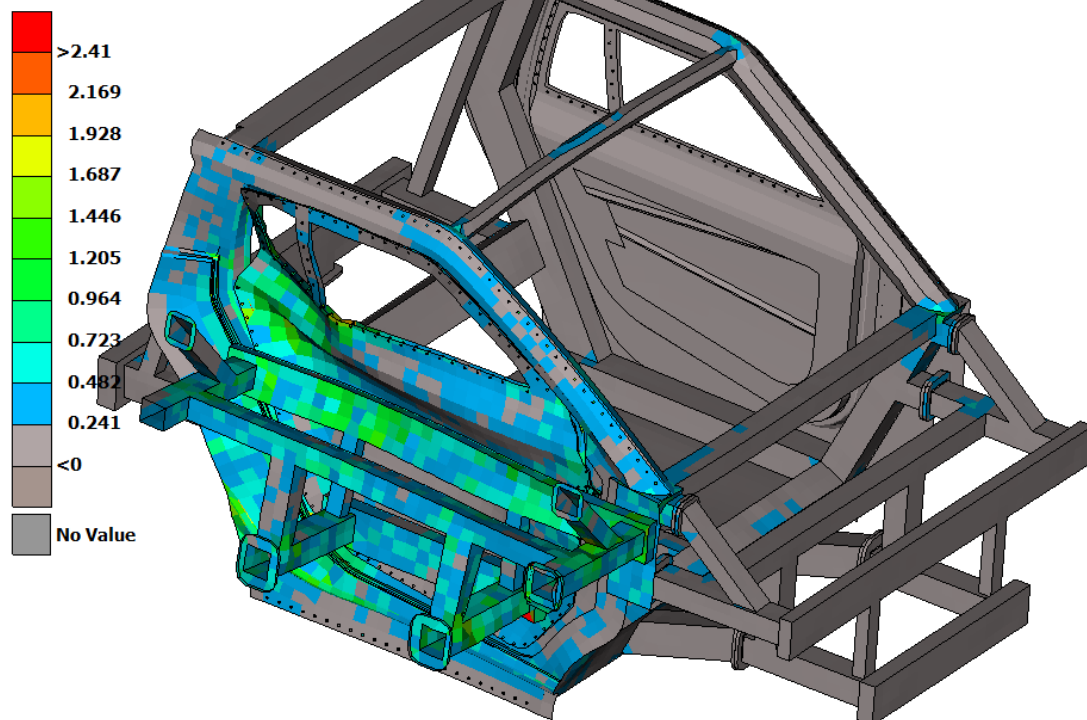
## 7.2 Door\_crush\_11:

1. Side panel: 2mm
2. Outer panel: 2mm
3. Inner panel: 1.5mm
4. Impact bars: 2mm



Εικόνα 7.4: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_11

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mises : STATE 22 ,TIME 2.50002003E+001

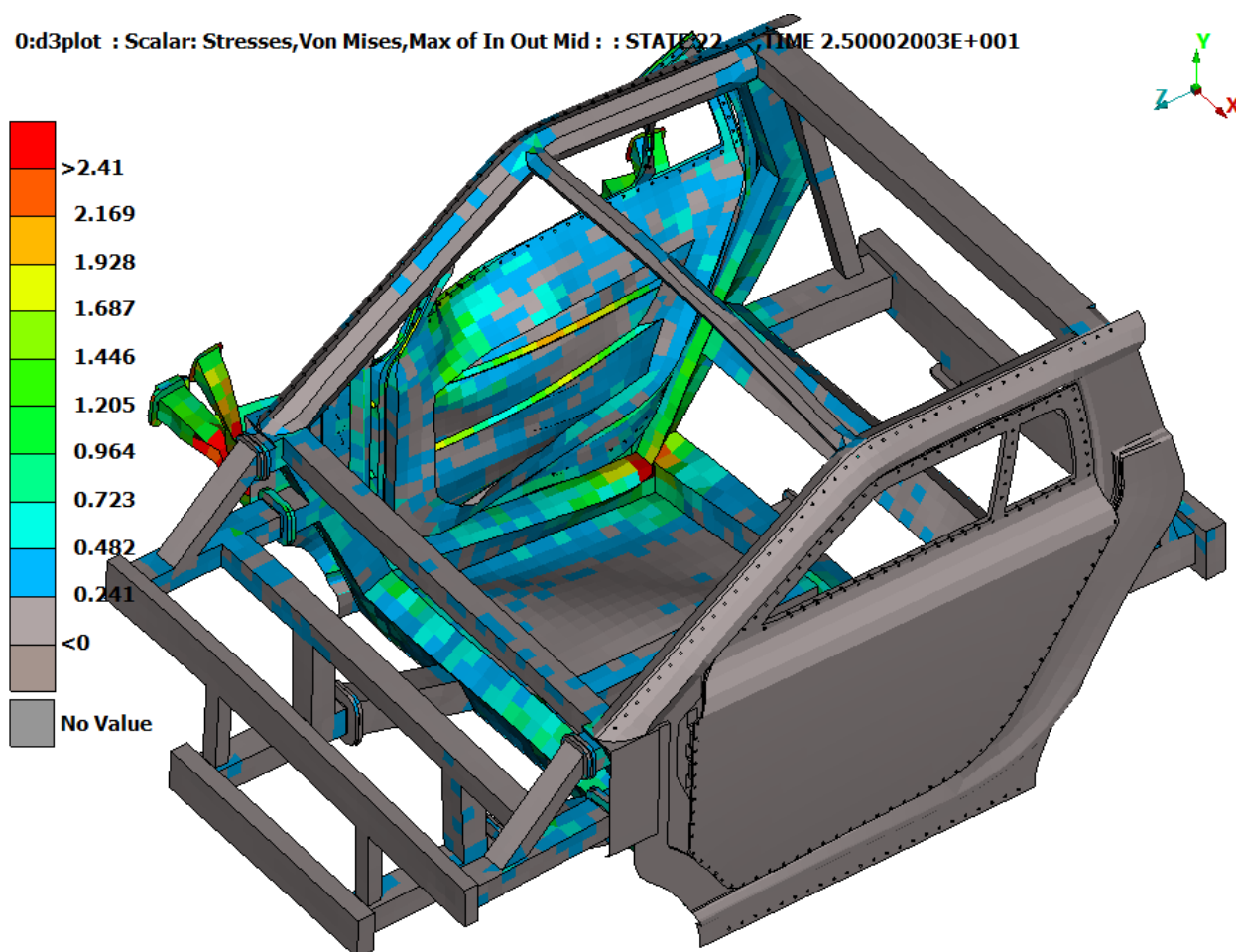


Εικόνα 7.5: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_11

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο θύρα είναι μεγαλύτερη από το όριο διαρροής του υλικού, με αποτέλεσμα να έχουμε πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή των ραβδών αντιπρόσκρουσης. Παρόλο που αυξήσαμε το πάχος του εξωτερικού ελάσματος κατά 0.5mm και του εσωτερικού ελάσματος κατά 0.3mm παρατηρούμε ότι κύριος παραγόντας μείωσης της παραμόρφωσης των ραβδών είναι η αύξηση του ίδιου του πάχους των μπαρών. Η αύξηση βέβαια του πάχους των ελασμάτων οδήγησε σε μείωση των παραμορφώσεων στην ευρύτερη περιοχή της θύρας, κάτι το οποίο όμως ήταν ήδη σε επιτρεπτά όρια από την πρώτη δοκιμή. Στόχος μας είναι ο βέλτιστος συνδιασμός πάχους των επιμέρους μερών της θύρας ώστε να έχουμε την μέγιστη ακαμψία κρατώντας όσο το δυνατόν χαμηλά το βάρος της θύρας για λόγους εξοικονόμησης καυσίμου.

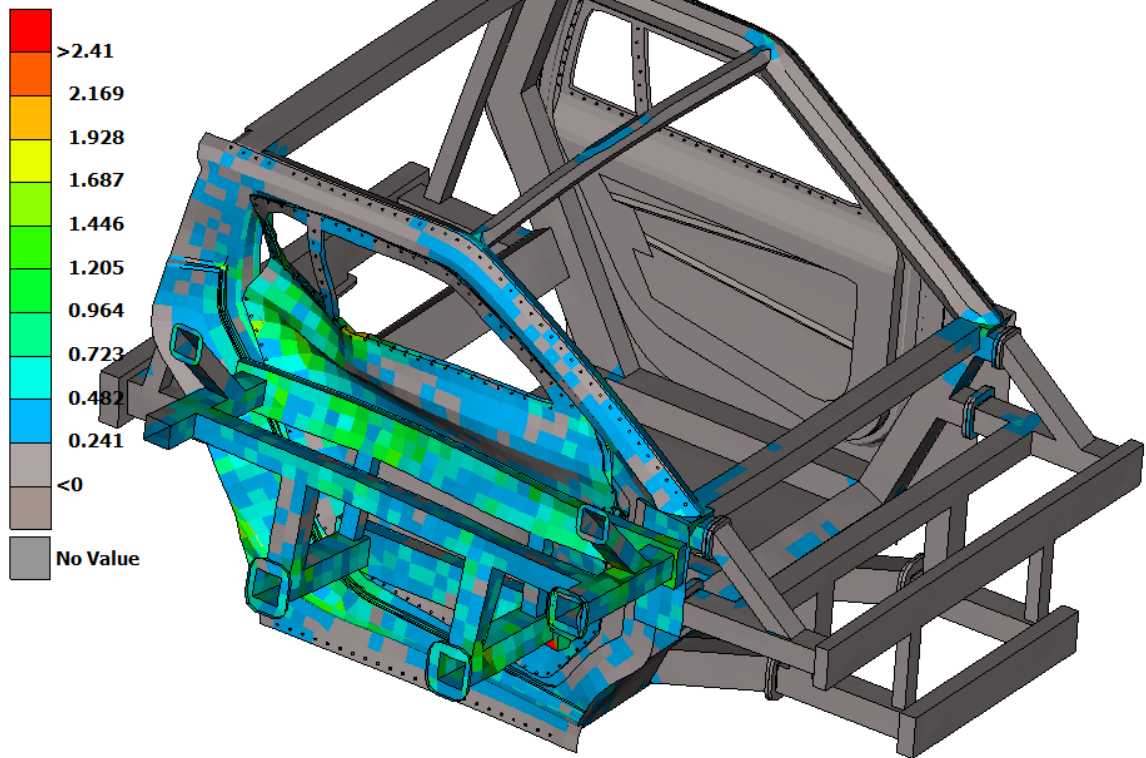
### 7.3 Door crush\_12:

1. Side panel: 2mm
2. Outer panel: 1.5mm
3. Inner panel: 1.5mm
4. Impact bars: 3mm



Εικόνα 7.6: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_12

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Min : STATE 22 ,TIME 2.50002003E+001



Εικόνα 7.7: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_12

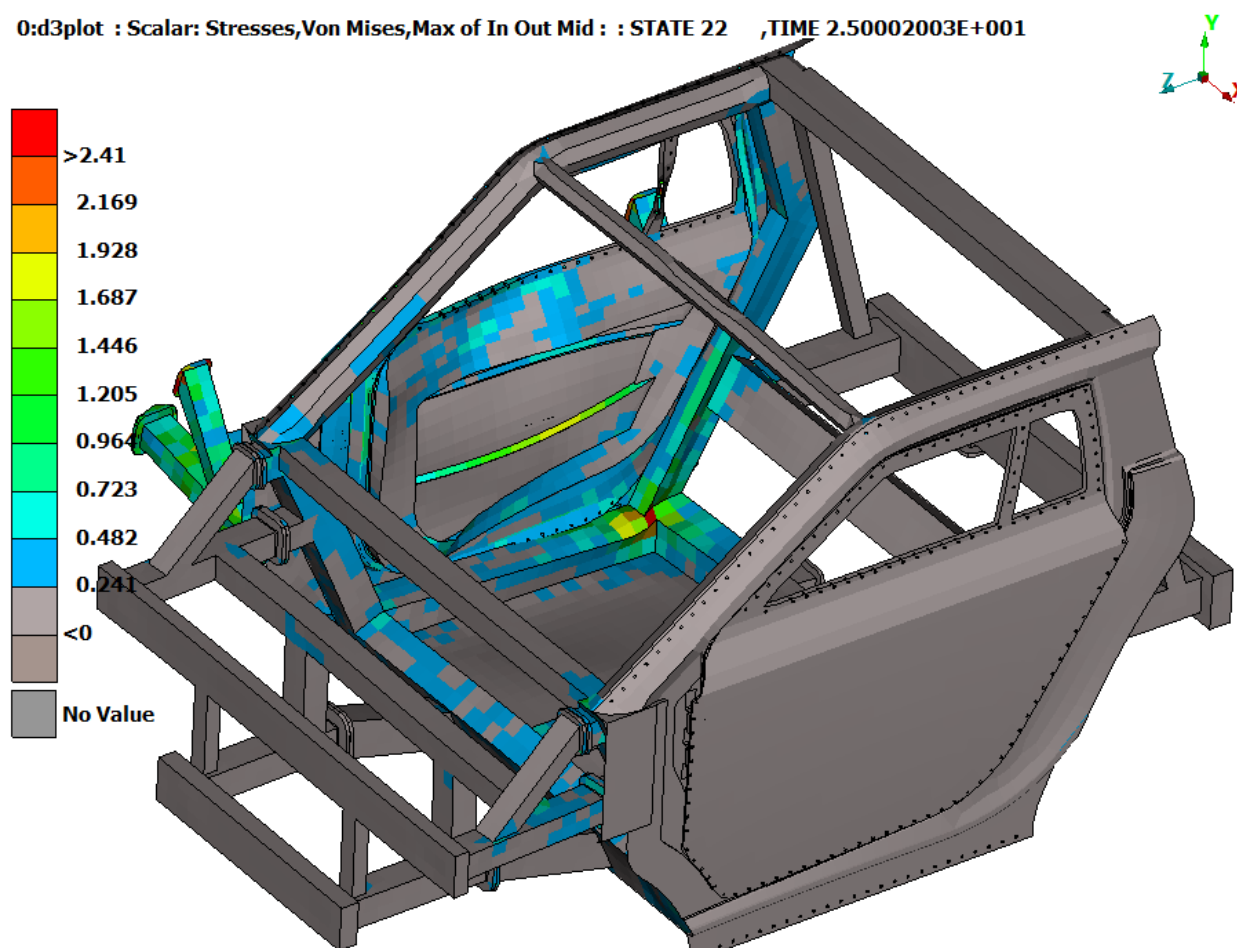
Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι όλα τα μέρη της θύρας βρίσκονται σε τάσεις μικρότερες των ορίων διαρροής τους. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τάσεις της θύρας βρίσκονται και πάλι στις μπάρες αντιπρόσκρουσης οι οποίες υπόκεινται σε τάση 192 Mpa, δηλαδή κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα που είναι 215 Mpa. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τάσεις στην ευρύτερη περιοχή της θύρας είναι εκτεταμένες αλλά σε επιτρεπτά όρια. Όμως το χαμηλό πάχος των ελασμάτων έχει ως αποτέλεσμα την ευκαμψία της θύρας και αυτό έχει ως αντίκτυπο της μεταφορά των τάσεων στις μπάρες αντιπρόσκρουσης καθώς τα υπόλοιπα μέρη δεν είναι ικανά να απορροφήσουν την ενέργεια πρόσκρουσης. Ολά τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο κύριος μηχανισμός απορρόφησης της ενέργειας πρόσκρουσης είναι μπάρες αλλά δεν μπορεί όλη η ασφάλεια της θύρας να βασίζεται μόνο σε αυτές. Τα ελάσματα πρέπει να απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ώστε να μην επιβαρύνουν περισσότερο τις μπάρες αντιπρόσκρουσης που μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευσή τους.

Με βάση τα παραπάνω οδηγούμαστε στην επόμενη περίπτωση.

#### 7.4 Door crush\_13:

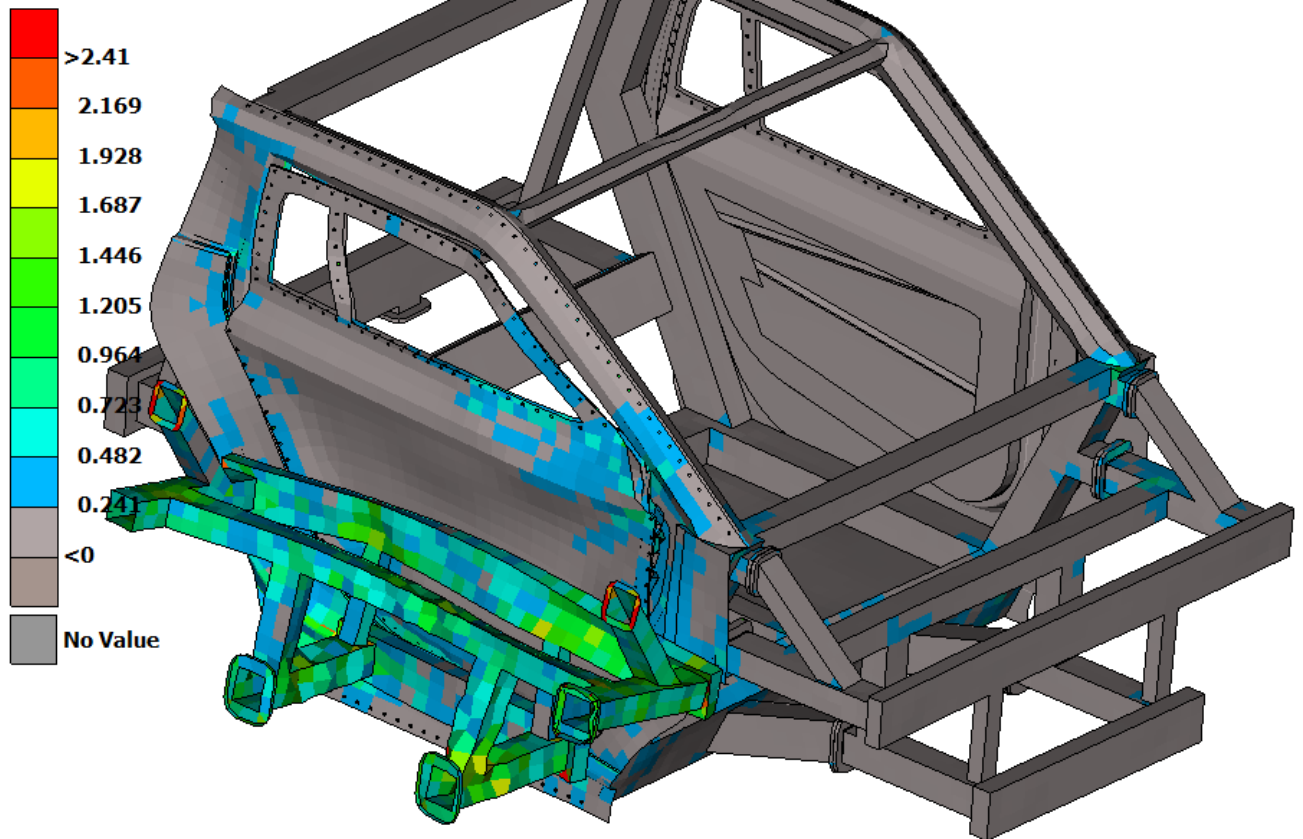
1. Side panel: 2mm
2. Outer panel: 2mm
3. Inner panel: 2mm
4. Impact bars: 3mm

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid : : STATE 22 ,TIME 2.50002003E+001



Εικόνα 7.8: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_13

0:d3plot : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of In Out Mid- : STATE 22 ,TIME 2.50002003E+001

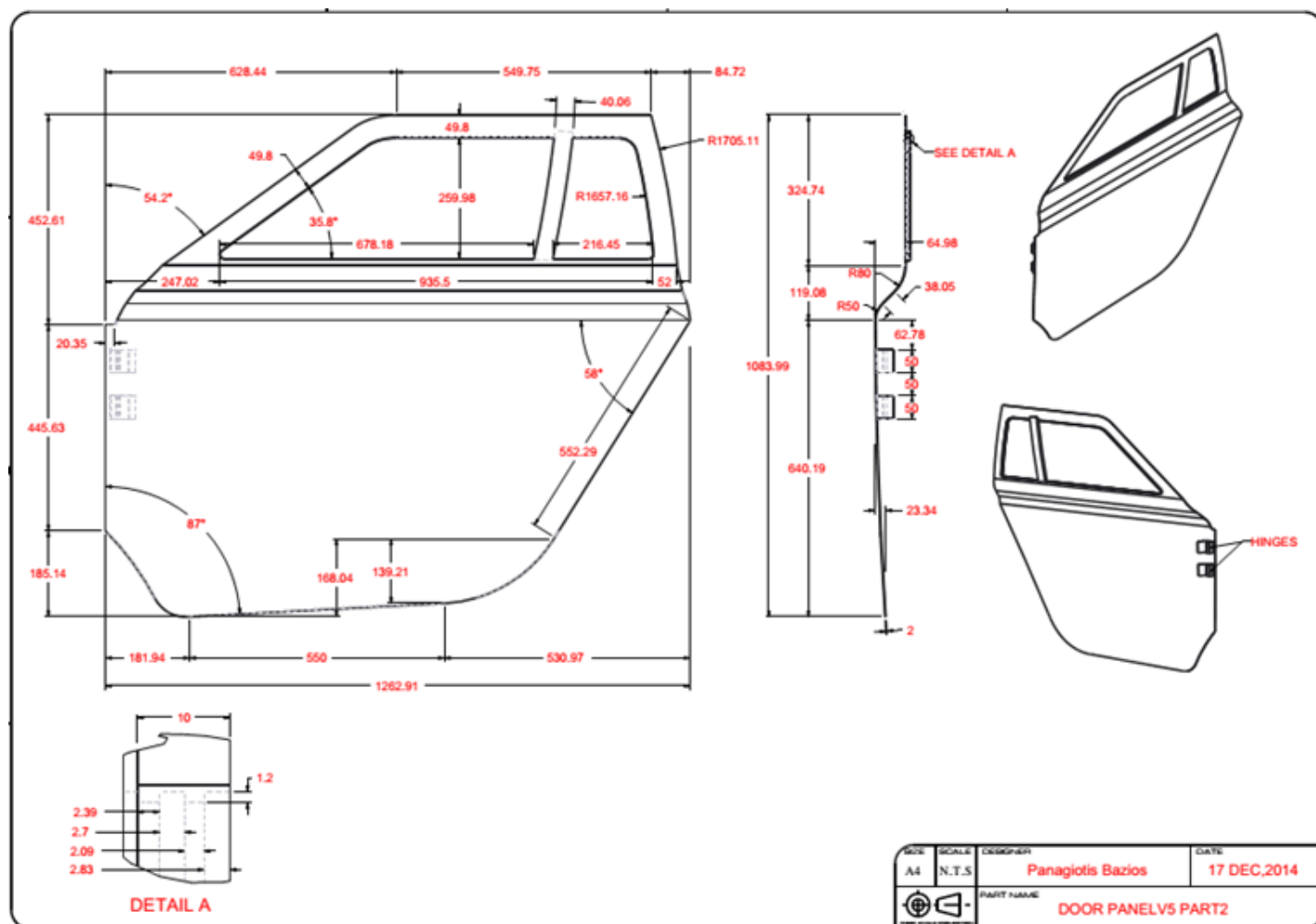


Εικόνα 7.9: Μέγιστη Τάση Von Mises μοντέλου Door\_crush\_13

Η παρούσα προσομοίωση είναι η βέλτιστη καθώς όλα τα μέρη της είναι κάτω από τα όρια διαρροής και στο σύνολο της η θύρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως άκαμπτη διότι στο σύνολο της δεν ξεπερνούν οι τάσεις παραμόρφωσης τα 100 MPa, εκτός από μία μικρή περιοχή στην ζώνη των μπαρών παραμόρφωσης, οι οποίες προσεγγίζουν τα 160 MPa. Έτσι λοιπόν αυτή είναι η σχεδίαση θύρας που καλύπτει τις προδιαγραφές που τέθηκαν στην αρχή. Πρόκειται για το μοντέλο Door\_crush\_13 με πάχος εξωτερικού και εσωτερικού ελάσματος 2 χιλιοστά, πάχος ραβδών αντιπρόσκρουσης στα 3 χιλιοστά και πάχος πλαινού ελάσματος στα 2 χιλιοστά.

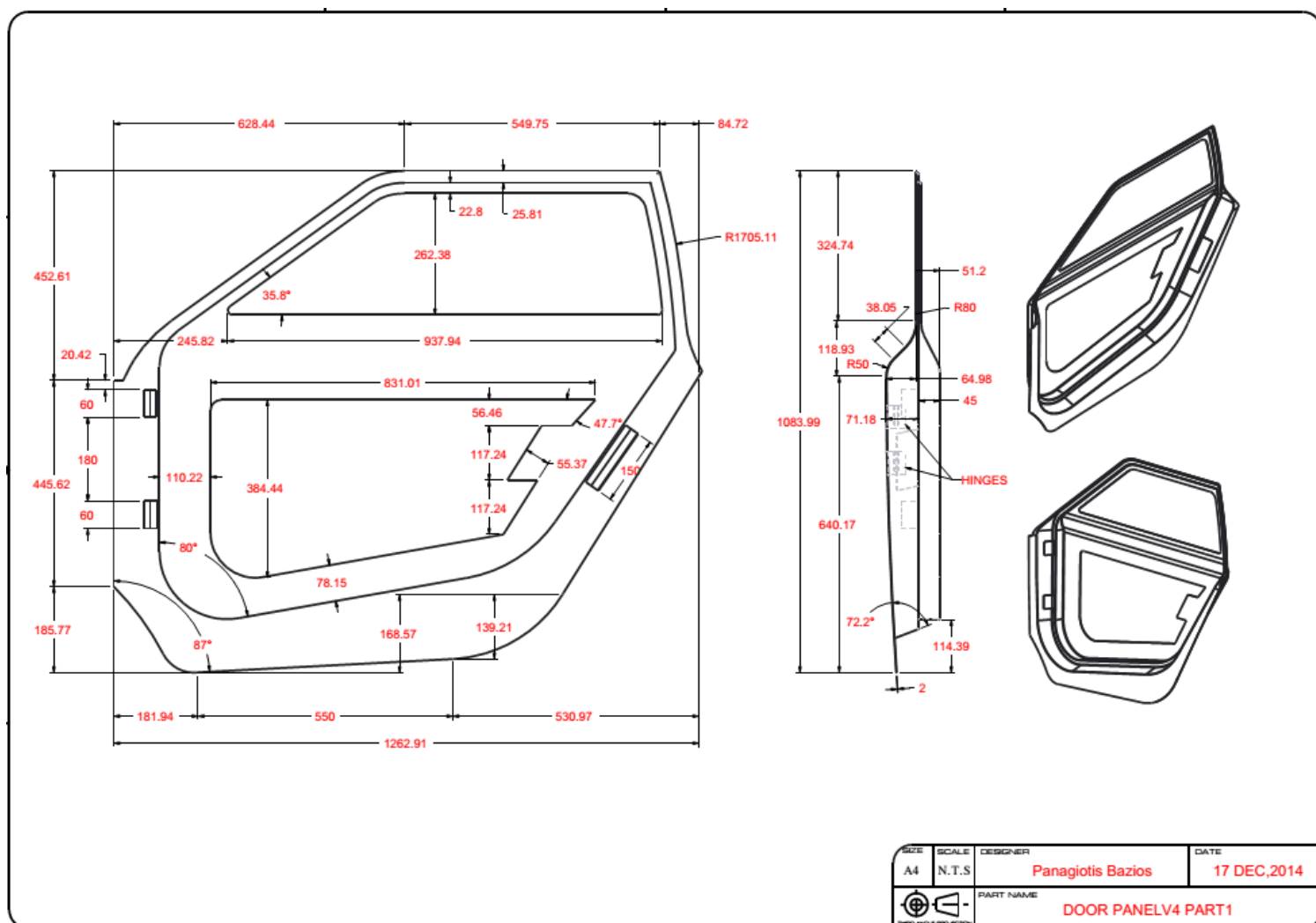


### 7.4.1 Μηχανολογικά σχέδια βέλτιστης λύσης

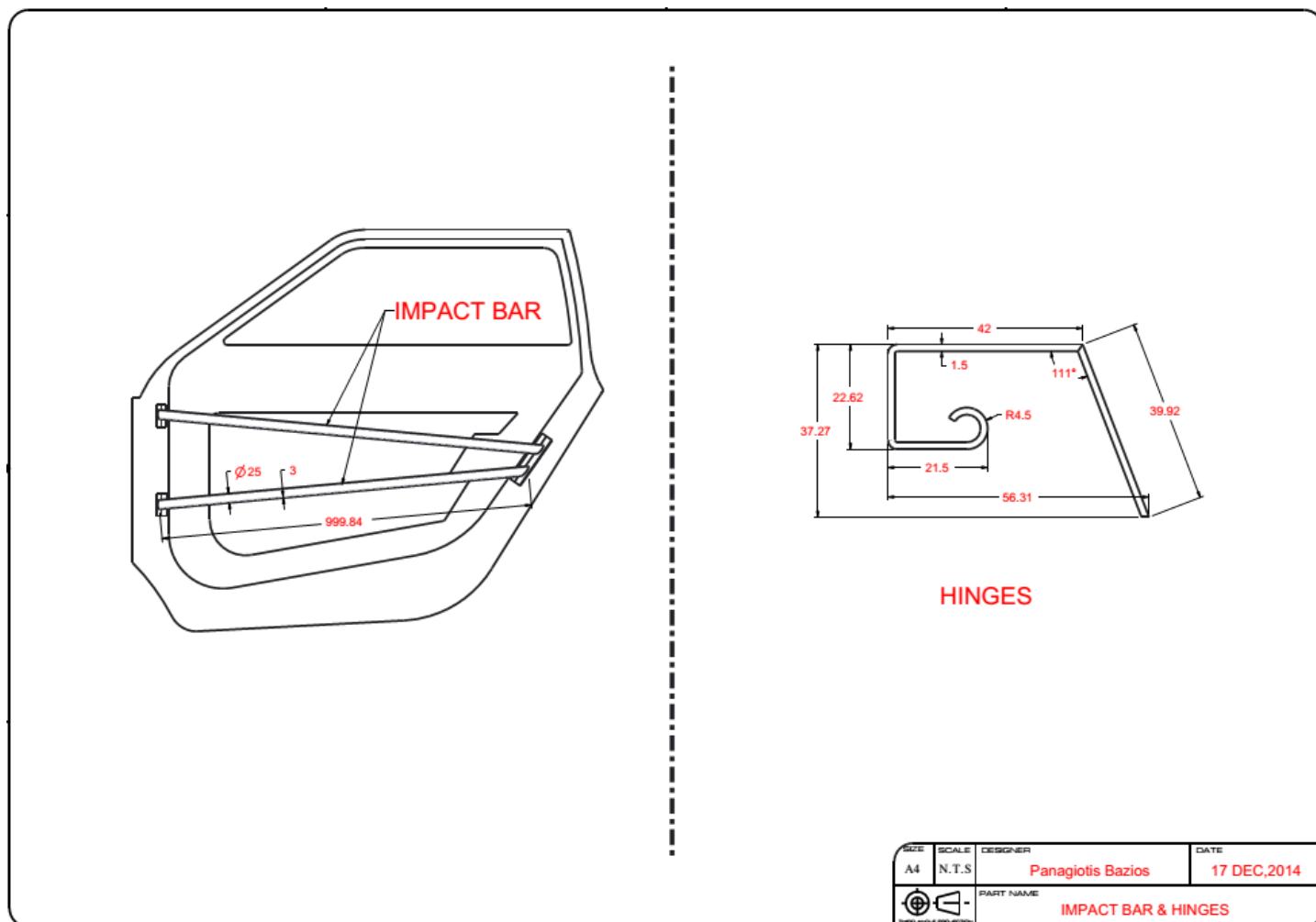


Εικόνα 7.10: Μηχανολογικό σχέδιο εξωτερικού ελάσματος του Door\_crush\_13

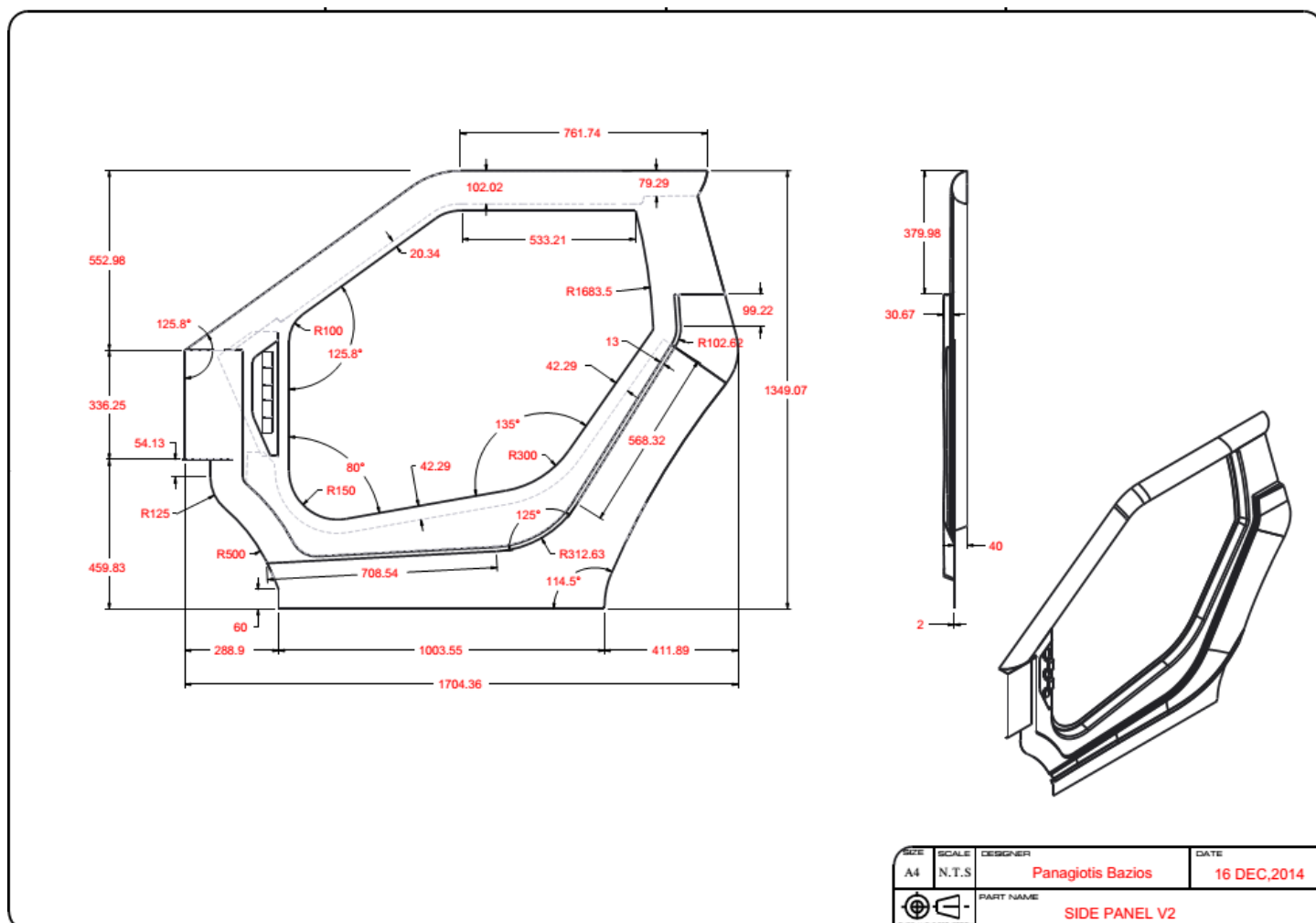




Εικόνα 7.11: Μηχανολογικό σχέδιο εσωτερικού ελάσματος του Door\_crush\_13



Εικόνα 7.12: Μηχανολογικό σχέδιο ραβδών αντιπρόσκρουσης και μεντεσέδων του Door\_crush\_13



Εικόνα 7.13: Μηχανολογικό σχέδιο πλαινού ελάσματος του Door\_crush\_13

## Συμπεράσματα

Βασικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο σχεδιασμός και η εν συνεχεία μελέτη της αντοχής θυρών για διθέσιο ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο πόλης.

Ο έλεγχος της κατασκευής αποτελεί την πιστοποίηση της ορθότητας και καταλληλότητας της σχεδίασης της θύρας λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες παραμέτρους και κανόνες ασφαλείας όπως αυτοί χρησιμοποιούνται απο την Euro-NCAP. Με χρήση ειδικού λογισμικού σχεδίασης (Creo2) και λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Ansa- Ls-Dyna) 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 της θύρας (Door\_crush\_13) αντέχει στα προτεινόμενα από την Euro-NCAP σενάρια δυναμικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, οι τάσεις που αναπτύσσονται στην θύρα δεν ξεπερνούν τα όρια διαρροής των χρησιμοποιούμενων υλικών με αποτέλεσμα να μην υπάρχει διείσδυση των τάσεων και των παραμορφώσεων που ξεπερνούν τους δείκτες ασφαλείας στην καμπίνα των επιβατών. Η ανωτέρω θύρα ικανοποιεί τις επιβολές των κανονισμών ασφαλείας και άρα πιστοποιεί την καταλληλότητα της κατασκευής.

## Βιβλιογραφία:

1. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, "Crashworthiness of composite thin-walled structural components", Technomic Publishing Co., Athens, 1998.
2. Ν. Τσουρβελούδης, Θ. Κατσαρός, "Σχεδιασμός και μελέτη αντοχής πλαισίου διθέσιου ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου σε περιβάλλον CAD/CAE", διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013.
3. Ali Ghadianlou, Shahrir Bin Abdullah, "Crashworthiness design of vehicle side door beams under low-speed pole side impacts", 2013.
4. "Federal motor vehicle safety standards and regulations, <http://www.nhtsa.dot.gov/cars/rules/import/fmvss/index.html>," accessed on May 2009.
5. "Canadian motor vehicle safety regulations, <http://www.tc.gc.ca/actsregulations/regulations/crc-c1038/menu.html>," accessed on May 2009.
6. "European regulations related to crash testing, <http://www.crashnetwork.com/regulations/ece-regulations/ece-regulations.html>," accessed on May 2009.
7. U. Seiirt and L. Wech, Automotive safety handbook, SAE International, Warrendale, Pa. 2007.
8. J. M. Alexander, "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," Q J Mechanics Appl Math 13(1), pp. 10-15, 1960.
9. T. Wierzbicki and T. Akerstrom, "Dynamic crushing of strain rate sensitive box columns," SAE Technical Paper 770592 , 1977.
10. W. Johnson, P. D. Soden, and S. T. S. Al-Hassani, "Inextensional collapse of thin-walled tubes under axial compression," The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 12(4), pp. 317-330, 1977.
11. T. Wierzbicki and W. Abramowicz, "On the crushing mechanics of thin-walled structures," Journal of Applied Mechanics 50, pp. 727-739, 1983.

12. G. R. Cowper and P. S. Symonds, "Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams", Brown University Division of Applied Mathematics, 1957.
13. W. Abramowicz and N. Jones, "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes", International Journal of Impact Engineering 4(4), pp. 243-270, 1986.
14. C. L. Magee and P. H. Thornton, "Design considerations in energy absorption by structural collapse," SAE Technical Paper 780434 , 1978.
15. T. Hughes and W. Liu, "Nonlinear Finite Element Analysis of Shells: Part I. Three-Dimensional Shells", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 26(3), pp. 331-362, 1981.
16. T. Hughes and W. Liu, "Nonlinear finite element analysis of shells. Part II Two-dimensional shells", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 27, pp. 167-181, 1981.
17. LSTC, LS-DYNA 971 manual, Livermore Software Technology Company, 2007
18. T. Belytschko and W. Bachrach, "Efficient implementation of quadrilaterals with high coarse-mesh accuracy", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 54(3), pp. 279-302, 1986.
19. A. H. Marchertas and T. B. Belytschko, "Nonlinear Finite Element Formulation for Transient Analysis of Three Dimensional Thin Structures", Technical Report ANL-8104, Argonne National Laboratory, 1974.
20. J. Kennedy, T. Belytschko, and J. Lin, "Recent developments in explicit finite element techniques and their application to reactor structures", Nuclear Engineering and Design 97(1), pp. 1-24, 1986.
21. T. Belytschko and I. Leviathan, "Projection schemes for one-point quadrature shell elements", Computer methods in applied mechanics and engineering 115(3-4), pp. 277-286, 1994.
22. T. Belytschko, B. Wong, and H. Chiang, "Improvements in low-order shell elements for explicit transient analysis", Analytical and computational models of shells , pp. 383-398, 1989.
23. B. Engelmann, R. Whirley, and G. Goudreau, "A simple shell element formulation for large-scale elastoplastic analysis", Winter annual meeting of the American Society of Mechanical Engineers, 1989.

24. J. L. Batoz, K. J. Bathe, and L. W. Ho, "A study of three-node triangular plate bending elements", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 15, pp. 1771-1812, 1980.
25. L. S. D. Morley, "The constant-moment plate-bending element", *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 6(1), pp. 20-24, 1971.
26. G. Wempner, "Finite elements, finite rotations and small strains of flexible shells", *International Journal of Solids and Structures* 5, pp. 117-153, 1969.
27. P. Khosravi, R. Ganesan, and R. Sedaghati, "Corotational non-linear analysis of thin plates and shells using a new shell element", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 69(4), pp. 859-885, 2007.