



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΥΠΟΥ F3AE ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ 6785**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**ΠΑΤΡΑ 2018**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στα πλαίσια των εκπαιδευτικών διαδικασιών του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, απο τον Απρίλιο μέχρι και το Νοέμβριο του 2018.

Η εργασία έχει τίτλο “Σχεδιασμός, ανάλυση και αξιολόγηση αγωνιστικού πλαισίου τύπου FSAE από σύνθετα υλικά ” και η σημασία της έγκειται στην προσπάθεια επιλογής των κατάλληλων υλικών για το πλαίσιο ενός αγωνιστικού μονοθέσιου τύπου Formula SAE, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί αλλά και να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Σκοπός της κατασκευής αυτών των μονοθέσιων, είναι η συμμετοχή τους σε ένα διεθνή φοιτητικό διαγωνισμό σχεδιασμού αγωνιστικών μονοθέσιων που φέρει την ονομασία Formula SAE. Εκεί τα μονοθέσια δοκιμάζονται σε μια σειρά δυναμικών και στατικών δοκιμασιών, βάσει των οποίων κρίνονται ως προς την απόδοσή τους και άλλα χαρακτηριστικά τους. Συνεπώς, υπάρχουν αυστηροί κανονισμοί που στοχεύουν στην ασφάλεια των συμμετεχόντων, κάτι που αναπόφευκτα ισοδυναμεί με αρκετούς περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιηθούν κατά την διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης.

Η πτυχιακή αυτή εργασία περιλαμβάνει παρουσίαση των δράσεων της ομάδας FP ONE με έδρα το Α.Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. Έμφαση θα δοθεί στη συμμετοχή του γράφοντος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο από σύνθετα υλικά.

Βασικά εργαλεία ανάπτυξης ήταν το σχεδιαστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS με την βοήθεια του οποίου έγινε ο σχεδιασμός του πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψιν του περιορισμούς λόγω κανονισμών.

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στη μητέρα μου Ιωάννα και στα αδέρφια μου Βασιλική και Χαράλαμπο για όλα όσα μου έχουν προσφέρει στη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων και την αμέριστη υποστήριξή τους σε κάθε μου επιλογή.

Περισσότερος απο όλους, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο πατέρα μου Κωνσταντίνο, ο οποίος πίστευε πάντα στις δυνατότητές μου και χάρις τον οποίο έμαθα να διεκδικώ τους στόχους που θέτω στη ζωή μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γραμματικόπουλο Σπυρίδων, για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής και την αφιέρωση πολύτιμου χρόνου ώστε να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που συνέβαλλαν στην εργασία αυτή και ιδιαίτερα την ομάδα FP ONE και τον καθηγητή μου κ. Ευθυμίου Ανδρέα για την βοήθεια που μου προσέφεραν στο σχεδιασμό του πλαισίου.

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής  
(Ονοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό να παρουσιάσει τα πλέον κατάλληλα σύνθετα υλικά για την κατασκευή ενός σύνθετου πλαισίου σε ένα όχημα τύπου Formula SAE. Η όλη προσπάθεια ανάλυσης αυτών των υλικών έγινε στα πλαίσια της συμμετοχής του γράφοντος στην ομάδα FP ONE με έδρα το Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας. Κατά τη διάρκεια αυτής της πτυχιακής εργασίας, εκτός από τις επιλογές των σύνθετων υλικών, παρουσιάζεται και η δυναμική ανάλυση του σύνθετου πλαισίου της ομάδας, καθώς και μια αναφορά στο κόστος των σύνθετων υλικών αλλά και παρόμοιων κατασκευών άλλων ομάδων.

Αναλυτικότερα στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο διαγωνισμό Formula Student καθώς και στους στόχους της ομάδας του τμήματός μας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των σύνθετων πλαισίων αγωνιστικών μονοθεσίων, από την πρώτη εμφάνισή τους σε αγώνες έως και σήμερα. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι προσδιορίσει τον τρόπο με τον οποίο φτάσαμε στη χρήση των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι κανονισμοί της διοργάνωσης για το πλαίσιο του οχήματος, με σκοπό να προσδιοριστούν οι περιορισμοί που χρειάζεται να ακολουθήσει μια κατασκευαστική ομάδα ενός τέτοιου οχήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι περιπτώσεις φόρτισης του πλαισίου ενός οχήματος Formula SAE, βάσει των δοκιμασιών που πρέπει να ολοκληρώσει κατά τη συμμετοχή του στο διαγωνισμό.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αγωνιστικών μονοθεσίων, καθώς και οι διαφορετικές δομές του πλαισίου των οχημάτων αυτών. Γίνεται αναφορά στα υλικά των ινών, της μήτρας και του πυρήνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ενώ ταυτόχρονα παραθέτονται εικόνες και παραδείγματα για τις δομές αυτών των σύνθετων υλικών. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του πλαισίου από σύνθετα υλικά, όπως αυτός πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας, καθώς και η ανάλυση του πλαισίου. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει και το σχέδιο της ομάδας για το σωληνωτό πλαίσιο, το οποίο έχει ήδη κατασκευάσει.

Το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει τιμές κόστους για τα σύνθετα υλικά μαζί με ορισμένα παραδείγματα αναφορών κόστους για μονοθέσια Formula SAE. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτέλεσε μια πρόκληση, τόσο από άποψη έλλειψης εμπειρίας σχετικά με πλαίσια από σύνθετα υλικά, όσο και από άποψη πολυπλοκότητας μιας τέτοιας έρευνας και ανάλυσης. Ωστόσο τα συμπεράσματα που προέκυψαν θα αποτελέσουν ένα βοήθημα στην διαδικασία επιλογής των κατάλληλων σύνθετων υλικών για το όχημα της ομάδας του τμήματός μας, κάτι που αποτελούσε έναν από τους αρχικούς στόχους της εργασίας.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	iii
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	v
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	vii
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
1.1 Διαγωνισμός Formula Student .....	1
1.2 Στόχος εργασίας .....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ</b> .....	3
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ FORMULA STUDENT</b> .....	9
3.1 Δοκιμασίες.....	9
3.1.1 Στατικές δοκιμασίες .....	10
3.1.2 Δυναμικές δοκιμασίες .....	11
3.2 Κανονισμοί για πλαίσιο.....	14
3.2.1 Απαιτήσεις και περιορισμοί του οχήματος.....	14
3.2.2 Γενικές απαιτήσεις σχεδίασης.....	15
Διαμόρφωση οχήματος.....	15
Wheelbase .....	16
Vehicle track.....	16
Ορατή πρόσβαση (Visible Access) .....	16
Γενικές Προϋποθέσεις.....	16
3.2.3 Ελάχιστες απαιτήσεις υλικών.....	17
Μεταλλικά υλικά.....	18
Ενναλακτικά υλικά.....	19
3.2.4 Composite space frame .....	20
3.2.5 Monocoque.....	20
3.2.6 Space frame .....	22
Main Hoop.....	23
Front Hoop .....	23
Main Hoop Bracing .....	24
Front Hoop Bracing.....	25
Bulkhead.....	26
Front Bulkhead Support .....	26
Impact Attenuator Assembly .....	26
Anti-Intrusion Plate .....	28
Side Impact Structure .....	28

Cockpit.....	29
Κάθισμα οδηγού.....	30
Close-out floor.....	31
Firewall.....	31
Roll Bar Padding .....	32
Driver’s Leg Protection .....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ .....</b>	<b>33</b>
4.1 Στρεπτική κάμψη.....	33
4.2 Κατακόρυφη κάμψη.....	34
4.3 Πλευρική κάμψη .....	35
4.4 Οριζόντια ρόμβωση.....	35
4.5 Περιπτώσεις Τοπικού Φορτίου.....	36
4.6 Διαμήκης μεταφορά φορτίου .....	36
4.7 Διαγώνια μεταφορά φορτίου .....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΥΛΙΚΑ .....</b>	<b>39</b>
5.1 Διαφορετικές δομές πλαισίου.....	39
5.1.1 Space frame .....	39
5.1.2 Monocoque.....	40
5.1.3 Hybrid monocoque space frame .....	41
5.2 Διαδικασία επιλογής υλικών .....	42
5.3 Υλικά space frame.....	42
5.4 Υλικά monocoque .....	45
5.5 Υλικό ινών.....	47
5.5.1 Διαφορετικά υλικά .....	47
5.5.2 Ίνες άνθρακα .....	48
5.5.3 Ίνες αραμιδίου.....	53
5.5.4 Ίνες Zylon (PBO) .....	54
5.5.5 Εναλλακτικά υλικά ινών .....	63
5.6 Υλικό μήτρας .....	63
5.7 Προσανατολισμός ινών .....	65
5.8 Πυρήνας .....	66
5.8.1 Foam.....	67
5.8.2 Honeycomb .....	70
5.8.3 Πάχος πυρήνα.....	73
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ .....</b>	<b>79</b>
6.1 Σχέδιο .....	79



6.2 Ανάλυση.....	86
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΟΣΤΟΣ.....</b>	<b>91</b>
7.1 Η σημασία του κόστους .....	91
7.2 Τιμές κόστους για διάφορα υλικά .....	93
7.3 Παραδείγματα ανοφορών κόστους.....	94
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>97</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>103</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Διαγωνισμός Formula Student

Η διοργάνωση Formula SAE είναι ένας διεθνής διαγωνισμός μηχανικής για φοιτητές που διοργανώνεται από την SAE International. Στο διαγωνισμό παίρνουν μέρος ομάδες φοιτητών από όλο το κόσμο και κάθε ομάδα σχεδιάζει, κατασκευάζει και δοκιμάζει ένα αγωνιστικό μονοθέσιο τύπου Formula, με βάση κάποιους κανονισμούς που θέτει η διοργάνωση. Ο διαγωνισμός Formula SAE, ο οποίος ξεκίνησε το 1978 στην Αμερική, δίνει την ευκαιρία στους φοιτητές να εξασκήσουν και να εξελίξουν τις μηχανολογικές, επιχειρηματικές και οργανωτικές τους ικανότητες. Επίσης, ο διαγωνισμός είναι δομημένος με τέτοιο τρόπο, ώστε να παροτρύνει τους συμμετέχοντες στο να βρουν έξυπνες λύσεις σε προβλήματα αλλά και να παρουσιάσουν νέες ιδέες στο τομέα της μηχανικής. Το όχημα που κατασκευάζεται από κάθε ομάδα περνάει από μία σειρά στατικών και δυναμικών δοκιμασιών, που αφορούν μεταξύ άλλων την ταχύτητα που αναπτύσσει αλλά και τις καινοτομίες πάνω στο σχεδιασμό και την κατασκευή, το κόστος, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του, καθώς και την δυνατότητα παραγωγής του. Πολλές εταιρίες από τον τομέα της μηχανικής και όχι μόνο (Red Bull, Ferrari, Mercedes AMG, Yamaha, Bosch, Ford, Honda, ANSYS κ.α.) ενισχύουν με χορηγίες αυτά τα γεγονότα.



*Εικόνα 1.1 : Φωτογραφία με τους συμμετέχοντες στον διαγωνισμό Formula Student στη Γερμανία. [32]*

Μια από τις προϋποθέσεις συμμετοχής στο διαγωνισμό είναι η τήρηση συγκεκριμένων κανόνων και περιορισμών, σε τέτοιο βαθμό όμως, ώστε να μην περιορίζουν την ελευθερία στο σχεδιασμό και τη δημιουργικότητα των φοιτητών. Εξάλλου, κύριος λόγος ύπαρξης των κανονισμών είναι η ασφάλεια. Οι ομάδες καλούνται να αναζητήσουν καινοτόμες και ενδιαφέρουσες ιδέες για την κατασκευή του αγωνιστικού τους οχήματος, καθώς και να αναπτύξουν τις μηχανικές τους δυνατότητες έτσι ώστε το όχημα να μπορεί να διαγωνιστεί σε πίστα οδήγησης. Το όχημα θα πρέπει να είναι αξιόπιστο σε θέματα ασφάλειας αλλά και να έχει υψηλές αποδόσεις για να ανταπεξέλθει στις δυναμικές δοκιμασίες του διαγωνισμού. Επίσης θα πρέπει να συνδυάζει και κάποια άλλα χαρακτηριστικά όπως το χαμηλό κόστος, να είναι ελκυστικό αισθητικά και να έχει εύκολη κατασκευή. Ο ίδιος ο διαγωνισμός δίνει στις ομάδες την ευκαιρία να επιδείξουν αλλά και να αποδείξουν τόσο την δημιουργικότητά τους όσο και τις μηχανικές τους δεξιότητες, σε σύγκριση με ομάδες άλλων πανεπιστημίων ανα τον κόσμο.

Για να γίνει απόλυτα ρεαλιστικό το πλάνο μέσα στο οποίο θα εργαστούν οι φοιτητές, υποθετικά διατυπώνεται ότι το έργο αυτό χρηματοδοτείται από μία εταιρία που ζητάει την κατασκευή ενός πρωτότυπου τέτοιου οχήματος για να το παρέχει αργότερα στην αγορά και πιο συγκεκριμένα σε μη επαγγελματίες οδηγούς που συμμετέχουν περιστασιακά σε διαγωνισμούς. Από την στιγμή που ολοκληρωθεί και ελεγχθεί το όχημα, η ομάδα των φοιτητών είναι υπεύθυνη να το παρουσιάσει στην ενδιαφερόμενη “εταιρία” και να την πείσει ότι μπορεί να το διαθέσει με επιτυχία στην αγορά. Η αξιολόγηση όλων των οχημάτων γίνεται πάντοτε συγκριτικά και με κριτήριο τον ανταγωνισμό που υπάρχει μεταξύ όλων των ομάδων.

## **1.2 Στόχος εργασίας**

Το δικό μας εκπαιδευτικό ίδρυμα το ακαδημαϊκό έτος 2017-18 ξεκίνησε το σχεδιασμό ενός αγωνιστικού μονοθέσιου τύπου Formula Student. Το εγχείρημα αυτο το ανέλαβε μια ομάδα προπτυχιακών φοιτητών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών, πλαισιωμένη με καθηγητές του τμήματος. Η όλη διαδικασία ακολούθησε πολλά στάδια προσαρμογής και εξέλιξης απο την λήψη της ιδέας έως το σημείο που βρίσκεται τη χρονική περίοδο που γίνεται η συγγραφή αυτής της Πτυχιακής Εργασίας. Επομένως αφού το μονοθέσιο του τμήματος βρίσκεται υπο κατασκευή, σκοπός αυτής της Πτυχιακής Εργασίας είναι η συμβολή στην επιλογή των κατάλληλων υλικών απο τα οποία θα αποτελείται το πλαίσιο και τα οποία θα ικανοποιούν τους κανονισμούς της διοργάνωσης αλλά και θα καλύπτουν τους στόχους της ομάδας.

Είναι προφανές πως κάθε ομάδα που επιχειρεί το ίδιο εγχείρημα αποτελείται απο μικρότερες υποομάδες. Κάθε μια υποομάδα αναλαμβάνει ένα διαφορετικό τομέα στον σχεδιασμό, τη κατασκευή ή το μάρκετινγκ( ενημέρωση, χορηγούς κλπ) με στόχο το ευκολότερο, το ποιοτικότερο και πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα. Επομένως υπάρχει μια συνεχής αλληλεπίδραση και επικοινωνία μεταξύ των υποομάδων για τη λήψη αποφάσεων αλλά και την διατύπωση νέων ιδεών. Απώτερος σκοπός όλων είναι το μονοθέσιο να είναι ανταγωνιστικό και ικανό να φέρει διακρίσεις στο τεχνολογικό ίδρυμα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

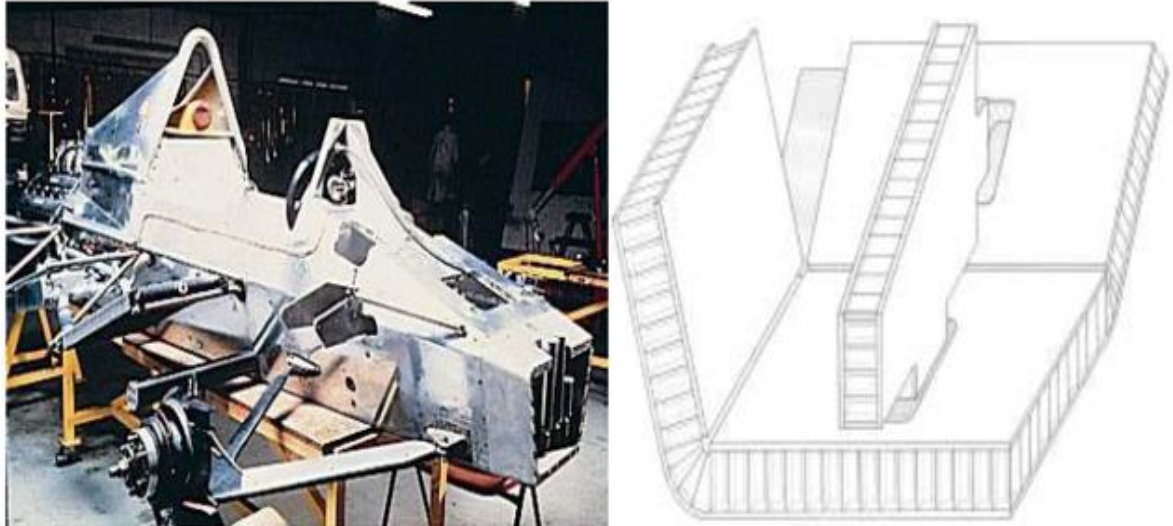
Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται μεταξύ άλλων την μελέτη του πλαισίου σε ένα πρότυπο αγωνιστικό όχημα Formula SAE. Πριν όμως παρουσιαστεί ο σχεδιασμός και οι τεχνολογικές τάσεις που αφορούν το πλαίσιο σε αυτά τα μονοθέσια, κρίνεται αναγκαίο να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο καταλήξαμε στο σημερινό αποτέλεσμα και στην επιλογή των υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Παρότι ο διαγωνισμός Formula Student, όπως ήδη αναφέρθηκε, ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η ιδέα των αγωνιστικών μονοθέσιων οχημάτων έχει χρησιμοποιηθεί αρχικά από ένα σπορ του μηχανοκίνητου αθλητισμού το οποίο είχε ξεκινήσει μερικές δεκαετίες νωρίτερα, το διαγωνισμό Formula 1. Επομένως, αφού η βάση είναι ίδια, πριν αναλυθεί η “μοντέρνα” εκδοχή των μονοθέσιων, χρειάζεται να παρουσιαστεί η εξέλιξη του σύνθετου πλαισίου τους, από τη πρώτη εμφάνισή τους σε αγώνες μηχανοκίνητου αθλητισμού.

Οι πρώτες τεκμηριωμένες χρήσεις της σύνθετης κατασκευής σε αγωνιστικά οχήματα χρονολογούνται από τα τέλη της δεκαετίας του 1920 και τις αρχές του 1930, με τη χρήση ξύλου και χάλυβα στη κατασκευή του σασί. Αυτά τα οχήματα στην πλειοψηφία τους ήταν κατασκευασμένα για προσωπική χρήση και έτσι υπάρχουν πολύ λίγα τεκμηριωμένα στοιχεία σχετικά με την απόδοσή τους. Είναι πολύ πιθανό, ωστόσο, πως η χρήση του ξύλου οφειλόταν κυρίως στην φθηνότητα και την ευκολία καταργασίας του και όχι στην βελτίωση της απόδοσης.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1950 η κυρίαρχη δομή του πλαισίου τύπου Formula 1, αποτελείται από ένα σωληνωτό πλαίσιο από αλουμίνιο που περιβάλλεται από πάνελ αλουμινίου. Εκείνη την εποχή μια έρευνα για στρώσεις από ίνες γυαλιού με τυχαίο προσανατολισμό και πολυεστερικές ρητίνες (Glass Reinforced Plastic, GRP) που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του πολέμου, έγινε ευρέως διαθέσιμη και τα υλικά αυτά άρχισαν να χρησιμοποιούνται στη διαδικασία της κατασκευής. Αυτό το υλικό επέτρεψε τη σχετικά φθηνή παραγωγή σύνθετων καμπυλομένων πλαισίων και αντικατέστησε το αλουμίνιο. Η χρήση των επενδύσεων GRP συνεχίστηκε μέχρι τα τέλη του 1980.

Το πρώτο πλαίσιο από σύνθετο υλικό κατασκευάστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 από τα αυτοκίνητα Cooper. Η δομή του αποτελούνταν από ένα εξωτερικό περίβλημα από αλουμίνιο, κυψελοειδή πυρήνα αλουμινίου και εσωτερικά από GRP. Παρόλο που το αυτοκίνητο δεν έφτασε ποτέ στην πίστα, αποτέλεσε τη βάση για το σχεδιασμό του πλαισίου της Formula 1 για τις επόμενες δύο δεκαετίες. Από τα μέσα έως τα τέλη της δεκαετίας του 1970, η προτιμώμενη μέθοδος σύνθετης κατασκευής πλαισίου ήταν η μέθοδος “cut and fold” με τη χρήση αλουμινίου.



**Εικόνα 2.1 :** Σασί με κυψελοειδή πυρήνα αλουμινίου κατασκευασμένο με τη μέθοδο *cut and fold*. [1]

Τα σύνθετα πλαίσια από carbon fibre παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από την ομάδα McLaren το 1980. Αποτελούσαν ψευδο-μονολιθικές διατάξεις που βρίσκονταν τοποθετημένες πάνω από ένα αρσενικό καλούπι ή άξονα, χρησιμοποιώντας μονόδρομη (UD) προ εμποτισμένη ταινία ινών άνθρακα. Ο άξονας, που αποτελούνταν από κατεργασμένο κράμα αλουμινίου, αποσυναρμολογούνταν για να απομακρυνθεί μέσω του ανοίγματος του cockpít ύστερα από την επεξεργασία του σύνθετου υλικού σε αυτόκλειστο φούρνο. Αυτή η διαδικασία κατασκευής παρέμεινε αμετάβλητη για πολλά χρόνια και εξακολούθησε να αποτελεί τη βάση του πλαισίου στη McLaren μέχρι το 1992.

Υπάρχει μια διαφωνία ως προς το ποιά ομάδα ήταν η πρώτη που παρήγαγε σύνθετο πλαίσιο ενισχυμένο με ίνες, δεδομένου ότι η Lotus διεξήγαγε παρόμοια έρευνα παράλληλα με τη McLaren. Σε αντίθεση με τη McLaren, το πλαίσιο της Lotus ακολούθησε την ήδη γνωστή "cut and fold" μεθοδολογία απλώς αντικαθιστώντας τα προσκολλημένα φύλλα αλουμινίου με ένα υβριδικό σύνθετο υλικό από carbon και Kevlar εποξειδικά ενισχυμένο. Ως εκ τούτου, το πλαίσιο της McLaren μπορεί να αναγνωριστεί ως πρόδρομος αυτών που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Το 1980 η φήμη των σύνθετων υλικών σε σχέση με την αντοχή τους σε κρούση, επισκιάστηκε από μερικές δραματικές αποτυχίες στα πρώτα αγωνιστικά οχήματα. Πράγματι, πολλοί σχεδιαστές εξέφρασαν σοβαρές αμφιβολίες ως προς τη καταλληλότητα τέτοιων εύθραυστων υλικών σε μια εφαρμογή με υψηλή φόρτιση. Παρά τις αμφιβολίες πολλών ανταγωνιστών τους, το McLaren MP4 / 1, το πρώτο μοτοποσοque αγωνιστικό μονοθέσιο από carbon fibre, αποδείχτηκε επιτυχημένο και σύντομα αντιγράφηκε από τις υπόλοιπες ομάδες.

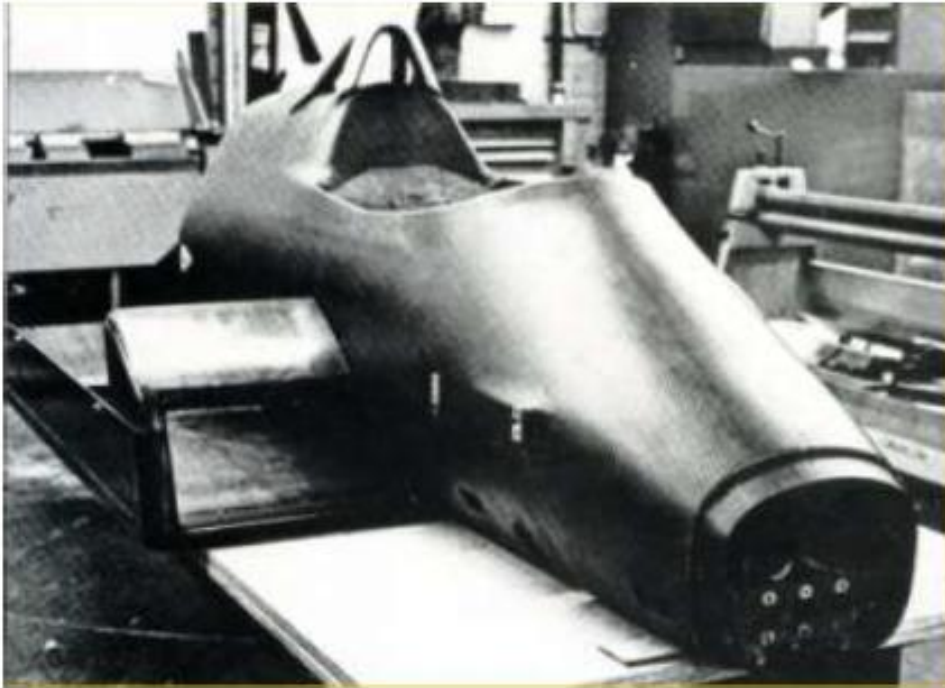


**Εικόνα 2.2 :** Το πρώτο monopocoque από carbon, McLaren MP4 / 1 (1980). [1]

Τη σεζόν του 1981 πολλά μονοθέσια της McLaren συνετρίβησαν τυχαία αρκετές φορές κατά τη διάρκεια των δοκιμών και των αγώνων. Ωστόσο, οι ζημιές που προκλήθηκαν από ατυχήματα περιορίστηκαν στην τοποθεσία του imract και έτσι οι επισκευές μπορούσαν να εκτελούνται γρήγορα και αποτελεσματικά με ελάχιστη ή καθόλου απώλεια στην απόδοση. Η ικανότητα να συντηρούνται και να υποβάλλονται εύκολα σε επισκευή οι μικρές ζημιές έκανε τη χρήση των σύνθετων επιτυχημένη, αλλά αυτό που αφορούσε περισσότερο τους σχεδιαστές ήταν η ικανότητα των σύνθετων πλαισίων να αντέχουν μια μεγάλη σύγκρουση. Το 1981 στο Ιταλικό Grand Prix, ο John Watson έχασε τον έλεγχο της McLaren και έσπασε βίαια στα εμπόδια. Παρότι το μονοθέσιο σχεδόν καταστράφηκε, ο ίδιος ήταν σε θέση να απομακρυνθεί περπατώντας από τα συντρίμια χωρίς να έχει τραυματιστεί. Αυτό το συμβάν προχώρησε σε μεγάλο βαθμό στην άρση των αμφιβολιών στο μυαλό αυτών που δεν ήταν πεπεισμένοι για την ασφάλεια των σύνθετων από carbon fibre υπό υψηλή φόρτιση. Η ικανότητα των σύνθετων υλικών να απορροφούν την ενέργεια της σύγκρουσης, έχει συμβάλει σημαντικά στην ασφαλή διεξαγωγή του αθλήματος. [Orus Book]

Η επόμενη μεγάλη πρόοδος στην κατασκευή του πλαισίου συνέβη το 1983 από τη γερμανική ομάδα ATS, η οποία ανέπτυξε μια δομή αποτελούμενη από δύο μέρη ενός σύνθετου υλικού. Τα δύο μισά της δομής κατασκευάστηκαν από woven fabric προεμπτισμένα. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε βελτίωσε την επιφάνεια του

πλαϊσίου και έτσι δεν χρειαζόταν αρκετή επιπλέον επεξεργασία. Το πλαίσιο αυτο αποτέλεσε ένα απο τα σκληρότερα πλαίσια της περιόδου. Οι εξελίξεις που ακολούθησαν στην αεροδυναμική διαμόρφωση, τη δομική ανάλυση και τις τεχνικές ελασματοποίησης, εξασφάλισαν συνεχή ανάπτυξη του πλαϊσίου και άλλων σύνθετων μερών του οχήματος.



*Εικόνα 2.3 : Πλαίσιο ATS D6 (1983). [1]*

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του MP4 / 1, η McLaren χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά άνθρακα οπουδήποτε πρόσφεραν πλεονεκτήματα στις μηχανικές ιδιότητες ή τη μείωση της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού. Από τότε έχει ξεκινήσει μια συνεχής διαδικασία αντικατάστασης μετάλλων μέσα στο άθλημα. Παράδειγμα αποτελούν τα σύνθετα μέλη ανάρτησης που ανέπτυξαν οι Savage και Leaper από τη McLaren στις αρχές της δεκαετίας του 1990, τα οποία χρησιμοποιούνται σήμερα από όλες τις ομάδες. [1]

Τα σύνθετα απο carbon fibre αποτελούν πλέον σχεδόν το 85% του όγκου ενός σύγχρονου αυτοκινήτου της Formula 1, ενώ παράλληλα αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 25% της μάζας του. Εκτός από το πλαίσιο, σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται και σε άλλα μέρη του οχήματος όπως στους αγωγούς ψύξης για τα θερμαντικά σώματα και τα φρένα, στο εμπρόσθιο, οπίσθιο και πλευρικό σύστημα συγκρούσεων, στις αναρτήσεις, στο κιβώτιο ταχυτήτων και το τιμόνι. Ένας αριθμός απο ειδικά σύνθετα χρησιμοποιούνται επίσης στα φρένα και τους συμπλέκτες (carbon-carbon), καθώς και στα αφαιρετικά μέρη μέσα και γύρω από τις θύρες της εξάτμισης.

Οι ειδικοί πιστεύουν ότι ενα ποσοστό κοντά στο 10% του παγκοσμίου πλυθησμού παρακολουθεί τους αγώνες Formula 1, ωστόσο λίγοι είναι αυτοι που καταλαβαίνουν με τι ακριβώς εμπλέκεται και γιατί εξελίχθηκε σε “τεχνολογικό πόλεμο”. Η χρήση νέων σύνθετων υλικών με καλύτερες ιδιότητες καθώς και οι



καινοτόμες ιδέες κατασκευής, έχουν συμβάλει στη ραγδαία εξέλιξη αυτού του τομέα. Κάθε δομή ανεξάρτητα από το προορισμό της, κατασκευάζεται από υλικά των οποίων η επιλογή και η συμπεριφορά καθορίζουν την μηχανική απόδοση του οχήματος. Η εισαγωγή του σύνθετου πλαισίου ενισχυμένου με ίνες ήταν μια από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην ιστορία των αγώνων Grand Prix. Οι τεχνολογικές προόδους που έχουν αποκτηθεί από αυτά τα υλικά έχουν παράγει μονοθέσια που είναι ελαφρύτερα, ταχύτερα και ασφαλέστερα από ποτέ. [3]

Την ίδια λογική ακολουθεί και ο διαγωνισμός Formula SAE, ο οποίος και αυτός από την ίδρυσή του έχει εξελιχθεί σε πολλούς τομείς, ακολουθώντας τις ιδέες και τις τάσεις που ακολούθησε και η διοργάνωση Formula 1. Ένας από αυτούς τους τομείς αφορά το καλύτερο σχεδιασμό του πλαισίου του οχήματος, κάτι που άλλωστε αποτελεί και έναν από τους στόχους της κάθε ομάδας. Οι ομάδες μπορούν να επιλέξουν ανάμεσα σε ένα μεγάλο εύρος από μέταλλα και σύνθετα υλικά, που οι ίδιες κρίνουν ως ιδανικότερα για την κατασκευή του μονοθέσιου, σε σχέση με τους περιορισμούς που έχουν κατά το σχεδιασμό. Ο βέλτιστος σχεδιασμός έτσι ώστε να συνδυάζονται η καλή επίδοση με την ασφάλεια και το χαμηλό κόστος είναι αυτό που αναζητά κάθε ομάδα, αλλά και αυτό που η ίδια η διοργάνωση προτρέπει. Το τρόπο με τον οποίο θα το καταφέρει αυτό η κάθε ομάδα εξαρτάται από την εμπειρία, τη γνώση αλλά και τη πρωτοτυπία πάνω στο σχεδιασμό του οχήματος. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει μια προσπάθεια να αναλυθούν ορισμένα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή του πλαισίου τέτοιων αγωνιστικών οχημάτων, με σκοπό να γίνει ευκολότερη η διαδικασία επιλογής υλικού για τον τομέα αυτό.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ FORMULA STUDENT

#### 3.1 Δοκιμασίες

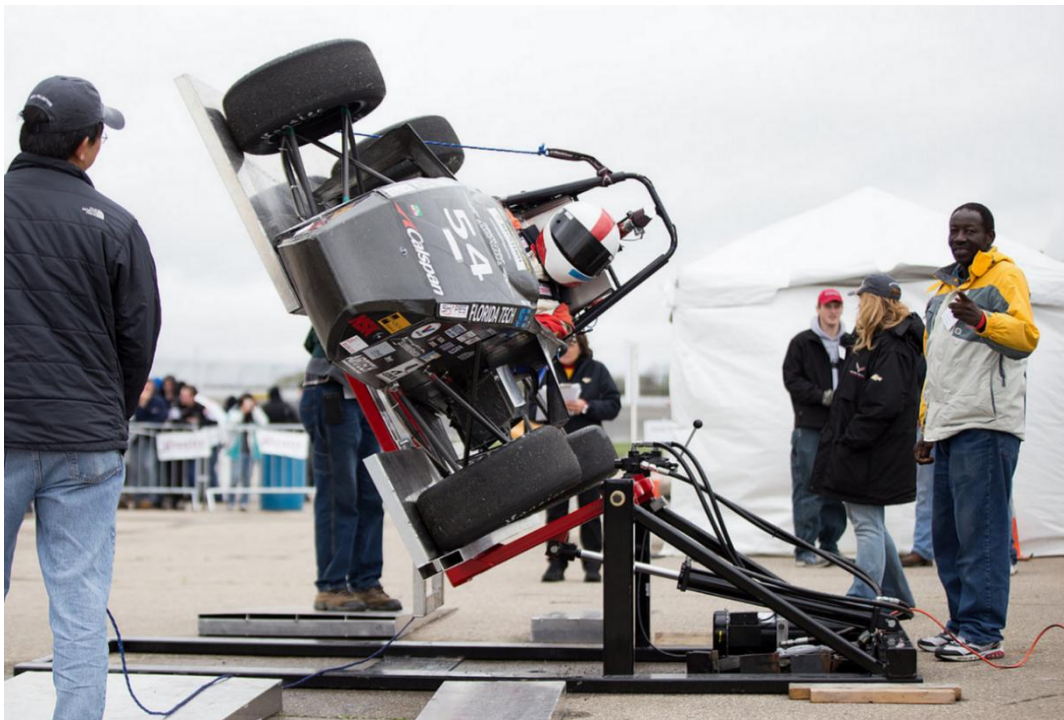
Η διοργάνωση Formula SAE αποτελεί ένα διεθνή διαγωνισμό, επομένως μπορούν να δηλώσουν συμμετοχή ομάδες απο όλο το κόσμο. Κάθε ομάδα-μέλος της διοργάνωσης μπορεί να λάβει μέρος σε οποιοδήποτε αγώνα επιθυμεί κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής περιόδου. Για την περίοδο 2017–18, υπάρχουν δέκα επίσημα αναγνωρισμένοι αγώνες αλλά διοργανώνονται και κάποιοι ανεπίσημοι για οχήματα με τέτοιες προδιαγραφές. Κάθε ένας απο τους αγώνες αυτούς διεξάγεται σε διαφορετική χώρα και διαρκεί περίπου 4 ημέρες. Κατά τη παρουσία τους εκεί οι ομάδες καλούνται να ολοκληρώσουν κάποιες δυναμικές και στατικές δοκιμασίες. Οι στατικές προηγούνται χρονικά των δυναμικών δοκιμασιών. Με βάση αυτές τις δύο κατηγορίες, βαθμολογούνται απο επιτροπές διεθνώς αναγνωρισμένων μηχανικών και έτσι προκύπτει η κατάταξη τους στη λίστα με τους συμμετέχοντες. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι επιμέρους δοκιμασίες των δύο κατηγοριών. Μια αναλυτικότερη αναφορά στις βαθμολογίες, τους περιορισμούς, τα έντυπα που πρέπει να καταθέσουν οι ομάδες κ.λ.π., μπορεί να βρεί κάποιος στην ιστοσελίδα της διοργάνωσης.



*Εικόνα 3.1 : Το μονοθέσιο της McGill Racing team σε event της Γερμανίας. [30]*

### 3.1.1 Στατικές δοκιμασίες

Οι στατικές δοκιμασίες ( static events ) αποτελούνται απο τέσσερις (4) υποκατηγορίες και κάθε μια απο αυτες έχει διαφορετική βαθμολόγηση. Πρώτα γίνεται η τεχνική επιθεώρηση των οχημάτων (Technical Inspection), η οποία αποτελεί σημαντική προϋπόθεση για να συνεχίσει το όχημα στα υπόλοιπα αγώνισματα του διαγωνισμού. Εκεί γίνεται έλεγχος για την ικανοποίηση των κανόνων και των περιορισμών της διοργάνωσης. Συνεπώς όλα τα οχήματα πρέπει να ολοκληρώσουν επιτυχώς τον έλεγχο πριν συμμετάσχουν σε κάποια δυναμική δοκιμασία. Όλα τα μέρη του οχήματος πρέπει να είναι ορατά κατά τον έλεγχο, κάτι που ίσως συνεπάγεται με την αφαίρεση των πλαισίων για την καλύτερη προσέγγιση. Η διαδικασία ακολουθείται απο τρία στάδια με πρώτο την ηλεκτρική και μηχανική επιθεώρηση. Στο δεύτερο στάδιο το όχημα δοκιμάζεται υπο κλίση για να κριθεί η σταθερότητά του και να διαπιστωθούν τυχόν διαρροές υγρών και καυσίμων. Στο τρίτο στάδιο δοκιμάζεται η λειτουργικότητα ορισμένων άλλων κατηγοριών (φρένα, θόρυβος, διακόπτες, κ.α.). Κάθε ομάδα μπορεί να διορθώσει κάποιο πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπίζει και που δεν ικανοποιεί τους κανονισμούς και να ξαναεπιστρέψει για να περάσει πάλι τον έλεγχο. Αυτη η κατηγορία του ελέγχου επιθεώρησης δεν βαθμολογείται.



**Εικόνα 3.2 :** Το μονοθέσιο της ομάδας Florida Tech κατά την δοκιμή υπό κλίση στο στάδιο της τεχνικής επιθεώρησης. [31]

Δεύτερη υποκατηγορία των στατικών δοκιμασιών είναι το κόστος και η παραγωγή (Cost and Manufacturing). Εκεί οι ομάδες παρουσιάζουν το συνολικό κόστος της κατασκευής και αποδुकνείουν οτι μπορούν να κάνουν σωστή διαχείριση υλικών και μπορούν να υλοποιήσουν πρωτότυπες ιδέες. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση (Presentation) της ιδέας της ομάδας με στόχο να πείσουν τους υποτιθέμενους αγοραστές οτι το όχημα που έχουν σχεδιάσει είναι το ιδανικό για ενα

ερασιτέχνη οδηγό που ενδιαφέρεται για την αγορά ενός τέτοιου οχήματος. Κάθε ομάδα έχει στην διάθεσή της δέκα λεπτά για την παρουσίαση και στην συνέχεια ακολουθούν ερωτήσεις απο την επιτροπή. Στη τελευταία κατηγορία, το σχεδιασμό (Design), παρουσιάζεται η μηχανική προσπάθεια που έγινε σε συνδυασμό με το σχεδιασμό, στα πλαίσια της καλύτερης απόδοσης αλλά και της ελαχιστοποίησης του κόστους.

### 3.1.2 Δυναμικές δοκιμασίες

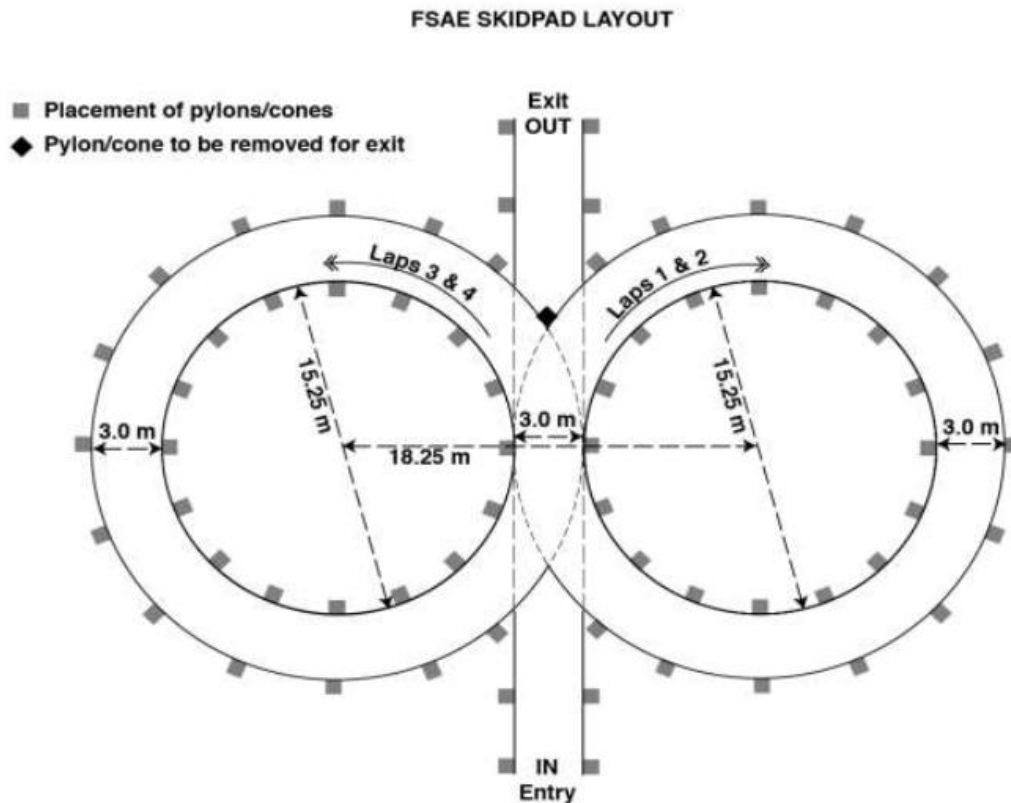
Στις δυναμικές δοκιμασίες, δοκιμάζονται οι δυνατότητες του οχήματος μέσα στην πίστα. Χωρίζονται σε πέντε υποκατηγορίες- δοκιμασίες και το κάθε μονοθέσιο βαθμολογείται απο την επιτροπή ανάλογα με την επίδοσή του σε κάθε μια απο αυτές. Βασική προϋπόθεση για την συμμετοχή ενός μονοθεσίου στις δυναμικές δοκιμασίες, είναι η επιτυχής ολοκλήρωση του τεχνικού ελέγχου που πραγματοποιήθηκε απο την επιτροπή σε προηγούμενο στάδιο. Σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα στο μονοθέσιο πριν τον αγώνα, η ομάδα μπορεί να το διορθώσει και στην συνέχεια να συμμετάσχει στις δοκιμασίες. Εάν προκύψει κατά τη διάρκεια της δοκιμασίας το μονοθέσιο αναγκαστικά αποβάλεται απο το συμβάν. Επίσης ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα και τη κατάσταση της πίστας οι κριτές ενημερώνουν τις ομάδες για το πρόγραμμα, καθώς και για τα ελαστικά που θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν. Τέλος σε κάποιες απο τις δοκιμασίες οι ομάδες έχουν το δικαίωμα να χρησιμοποιήσουν δύο οδηγούς, που μπορούν να αγωνιστούν διαδοχικά.

Πρώτη δοκιμασία είναι η επιτάχυνση (Acceleration), κατά την οποία το μονοθέσιο επιταχύνει απο στάση έως ότου καλύψει μια απόσταση 75 μέτρων. Εάν το μονοθέσιο παρασύρει κάποιο κώνο που οριοθετεί την διαδρομή παίρνει μια ποινή κάποιων δευτερολέπτων (2 secs) ενώ αν βγει εκτός ορίων αποκλείεται απο την συνέχεια της δοκιμασίας.



**Εικόνα 3.3 :** Το μονοθέσιο της ομάδας RIT κατά την εκκίνηση στο acceleration event του Michigan. [33]

Στη δεύτερη δοκιμασία δοκιμάζεται η πλευρική επιτάχυνση (Skid- Pad). Η πίστα αποτελείται από δύο κυκλικές διαδρομές συγκεκριμένης διαμέτρου και πλάτους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Το μονοθέσιο καλύπτει δύο περιστροφές στο δεξιά κύκλο, από τις οποίες η δεύτερη είναι χρονομετρημένη και έπειτα κάνει το ίδιο στον αριστερά κύκλο. Η βαθμολογία βασίζεται στη πλευρική επιτάχυνση που αναπτύσει το μονοθέσιο.



**Σχήμα 3.1 :** Διάγραμμα χάραξης της πίστας στην δοκιμασία Skid-Pad. [4]

Η τρίτη δοκιμασία ονομάζεται Autocross και έχει ως στόχο να αξιολογήσει τις δυνατότητες ελιγμών και χειρισμού του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής που συνδυάζει επιτάχυνση, φρενάρισμα, σλάλομ, στροφές κ.α. Κάθε ομάδα έχει το δικαίωμα για δύο γύρους στη πίστα με κάθε έναν από τους δύο οδηγούς της. Η βαθμολόγηση της κάθε ομάδας γίνεται ανάλογα με το καλύτερο χρόνο της. Ωστόσο υπάρχει ποινή κάποιων δευτερολέπτων σε περίπτωση που κάποιος οδηγός παρασύρει κάποιο διακριτικό οριοθέτησης της πίστας, ενώ αν και οι 4 τροχοί του οχήματος περάσουν εκτός πίστας αυτό σημαίνει αποκλισμός από την συνέχεια της δοκιμασίας.

Η δοκιμασία αντοχής (Endurance) έχει σχεδιαστεί για να αξιολογεί τη συνολική απόδοση του μονοθεσίου και να δοκιμάζει την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία του. Και αυτός ο αγώνας αποτελείται από ευθείες, στροφές, σλάλομ κ.λ.π. αλλά είναι 22 χλμ. Ο κάθε οδηγός αγωνίζεται σε 11 χλμ και η βαθμολογία προκύπτει από το εάν η ομάδα καταφέρει να τερματίσει αλλά και από την επίδοσή της σε χρόνο.



**Εικόνα 3.4 :** Το μονοθέσιο της Oxford Brookes κατά τον τερματισμό στο Endurance event στη Γερμανία. [34]

Παράλληλα με την δοκιμασία αντοχής διεξάγεται και η δοκιμασία της αποδοτικότητας (Efficiency) κατά την οποία μετράται η ποσότητα του καυσίμου ή της ενέργειας που καταναλώνεται σε σχέση με την απόσταση της διαδρομής και κάθε ομάδα βαθμολογείται βάσει αυτού.

Στο τέλος του διαγωνισμού η κατάταξη της κάθε ομάδας γίνεται βάσει της βαθμολογίας που έχει συγκεντρώσει αθροιστικά στις στατικές και δυναμικές δοκιμασίες. Οι μέγιστες βαθμολογίες που μπορεί να συγκεντρώσει σε κάθε μια από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

**Πίνακας 3.1 :** Μέγιστες δυνατές βαθμολογίες στις στατικές και δυναμικές δοκιμασίες.[4]

<b>Static Events:</b>	
Presentation	75
Engineering Design	150
Cost Analysis	100
<b>Dynamic Events</b>	
Acceleration	100
Skid-Pad	75
Autocross	125
Efficiency	100
<u>Endurance</u>	<u>275</u>
<b>Total Points</b>	<b>1,000</b>

## **3.2 Κανονισμοί για πλαίσιο**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι κανονισμοί της διοργάνωσης Formula SAE σχετικά με το πλαίσιο των μονοθέσιων. Κάθε ομάδα πρέπει να σχεδιάσει και να κατασκευάσει το δικό της όχημα, λαμβάνοντας υπ' όψιν της τους περιορισμούς που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η επιτροπή της διοργάνωσης θα ελέγξει την ικανοποίηση των κανονισμών αυτών κατά την διαδικασία του τεχνικού ελέγχου (Technical Inspection), που αποτελεί μέρος των στατικών δοκιμασιών. Επομένως, πρέπει να δωθεί ιδιαίτερη έμφαση στο στάδιο του σχεδιασμού έτσι ώστε η τελική κατασκευή να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των κανονισμών. Κάθε αναγνώστης που επιθυμεί μπορεί να ανατρέξει στην σχετική ιστοσελίδα της διοργάνωσης, εκεί όπου μπορεί να βρει μια εκτενέστερη παρουσίαση των κανονισμών.

### **3.2.1 Απαιτήσεις και περιορισμοί του οχήματος**

#### **Τεχνική επιθεώρηση**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι ακόλουθες απαιτήσεις και περιορισμοί θα ελεγχθούν μέσω του τεχνικού ελέγχου. Η μη συμμόρφωση πρέπει να διορθωθεί και το αυτοκίνητο να επανεξεταστεί πριν τεθεί σε λειτουργία. Το όχημα πρέπει να διατηρεί όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές σε όλη τη διάρκεια του διαγωνισμού. Εάν υποστεί βλάβη κατά τη διάρκεια μια δοκιμασίας και χρειαστεί να αλλάξει κάποιο εξάρτημα, πρέπει να ελεγχθεί ξανά από την επιτροπή πριν επιστρέψει πάλι στη δοκιμασία.

#### **Τροποποιήσεις και επισκευές**

Απο τη στιγμή που το όχημα εγκριθεί για να διαγωνιστεί στις δυναμικές δοκιμασίες, επιτρέπονται μόνο οι τροποποιήσεις που αναφέρονται παρακάτω :

1. Ρύθμιση ζωνών, αλυσίδων και συμπλεκτών
2. Ρύθμιση της πόλωσης των φρένων
3. Ρύθμιση του συστήματος συγκράτησης του οδηγού, του προσκέφαλου, του καθίσματος και των πεντάλ.
4. Αντικατάσταση του προσκέφαλου ή του ενθέματος καθίσματος για διαφορετικούς οδηγούς.
5. Προσαρμογή στις παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα, π.χ. το μείγμα καυσίμου και το χρονοδιάγραμμα ανάφλεξης, και οποιεσδήποτε αλλαγές στη ρύθμιση του λογισμικού.
6. Ρύθμιση καθρεφτών.
7. Προσαρμογή της ανάρτησης όταν δεν απαιτείται αντικατάσταση εξαρτήματος,
8. Ρύθμιση της πίεσης των ελαστικών.
9. Ρύθμιση της γωνίας του πτερυγίου (wing), αλλά όχι της θέσης.
10. Αναπλήρωση υγρών.



11. Αντικατάσταση φθαρμένων ελαστικών ή τακάκια φρένων. Τα ελαστικά αντικατάστασης και τα τακάκια φρένων πρέπει να είναι πανομοιότυπα σε υλικό / σύνθεση / μέγεθος με αυτά που παρουσιάζονται και εγκρίνονται στην Τεχνική Επιθεώρηση.
12. Η αλλαγή των τροχών και των ελαστικών για συνθήκες "βροχής" ή "υγρασίας"
13. Επαναφόρτιση μπαταριών χαμηλής τάσης
14. Επαναφόρτιση συσσωρευτών υψηλής τάσης

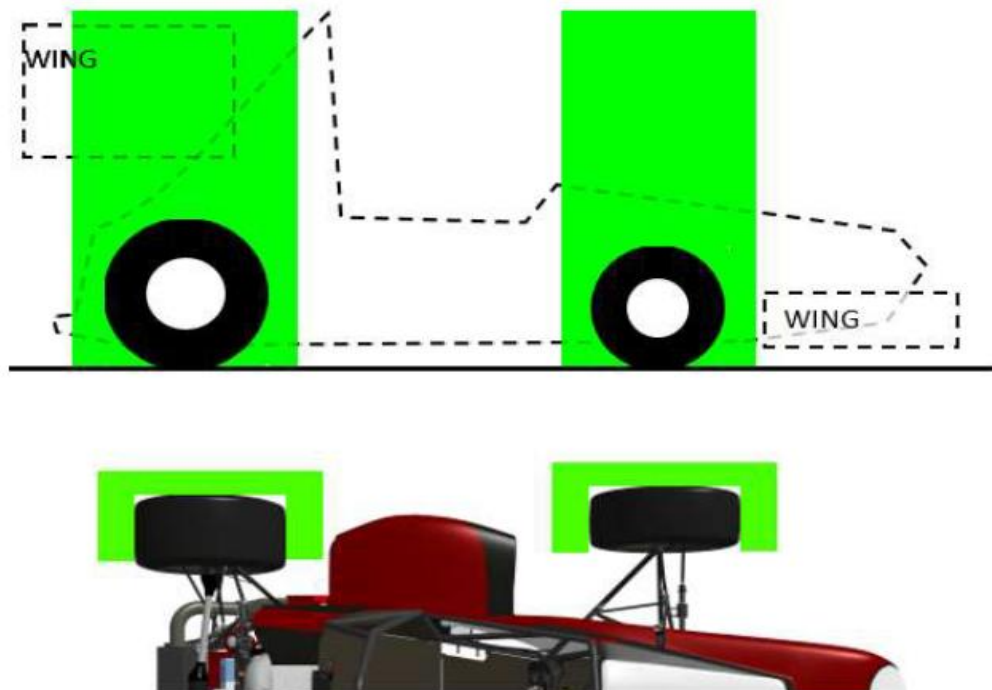
### 3.2.2 Γενικές απαιτήσεις σχεδίασης

#### Διαμόρφωση οχήματος

Το όχημα πρέπει να είναι open-wheeled και open-cockpit (μορφής Formula) με τέσσερις (4) τροχούς που δεν είναι σε ευθεία γραμμή.

Τα οχήματα Open Wheel πρέπει να πληρούν όλα τα ακόλουθα κριτήρια:

- Το πάνω μέρος των τροχών πρέπει να είναι εμφανές στον παρατηρητή αν το κοιτάζει από ψηλά και δεν πρέπει να καλύπτεται.
- Οι τροχοί / τα ελαστικά πρέπει να είναι εμφανή από το πλάι.
- Κανένα τμήμα του οχήματος δεν μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από 75mm μπροστά και πίσω από την εξωτερική διάμετρο των ελαστικών, με τους τροχούς να είναι ευθυγραμμισμένοι μπροστά. Αυτή η περιοχή ονομάζεται "keep-out-zone" (Εικόνα 3.2).
- Πρέπει επίσης να συμμορφώνεται με τις διαστάσεις / απαιτήσεις του σχετικού άρθρου για τις αεροδυναμικές κατασκευές.



Σχήμα 3.2 : Keep Out Zones. [4]

## Wheelbase

Το Wheelbase ή αλλιώς μεταξόνιο, πρέπει να έχει μήκος τουλάχιστον 1525 mm (60 inches). Η απόσταση μετράται από το κέντρο επαφής του δαπέδου με τα ελαστικά (μπροστά και πίσω) , όταν οι τροχοί είναι στραμμένοι ευθεία μπροστά.

## Vehicle track

Είναι η απόσταση μεταξύ των δυο μπροστά τροχών ή των δύο πίσω. Η πιο μικρή απόσταση από αυτές τις δύο, δεν μπορεί να είναι μικρότερη από το 75% της μεγαλύτερης.

## Ορατή πρόσβαση (Visible Access)

Όλα τα μέρη που αναγράφονται στο έντυπο επιθεώρησης πρέπει να είναι πλήρως ορατά κατά τον τεχνικό έλεγχο. Ωστόσο αυτό μπορεί να συνεπάγεται με την αφαίρεση κάποιων πλαισίων του οχήματος κατά τη διάρκεια του ελέγχου.

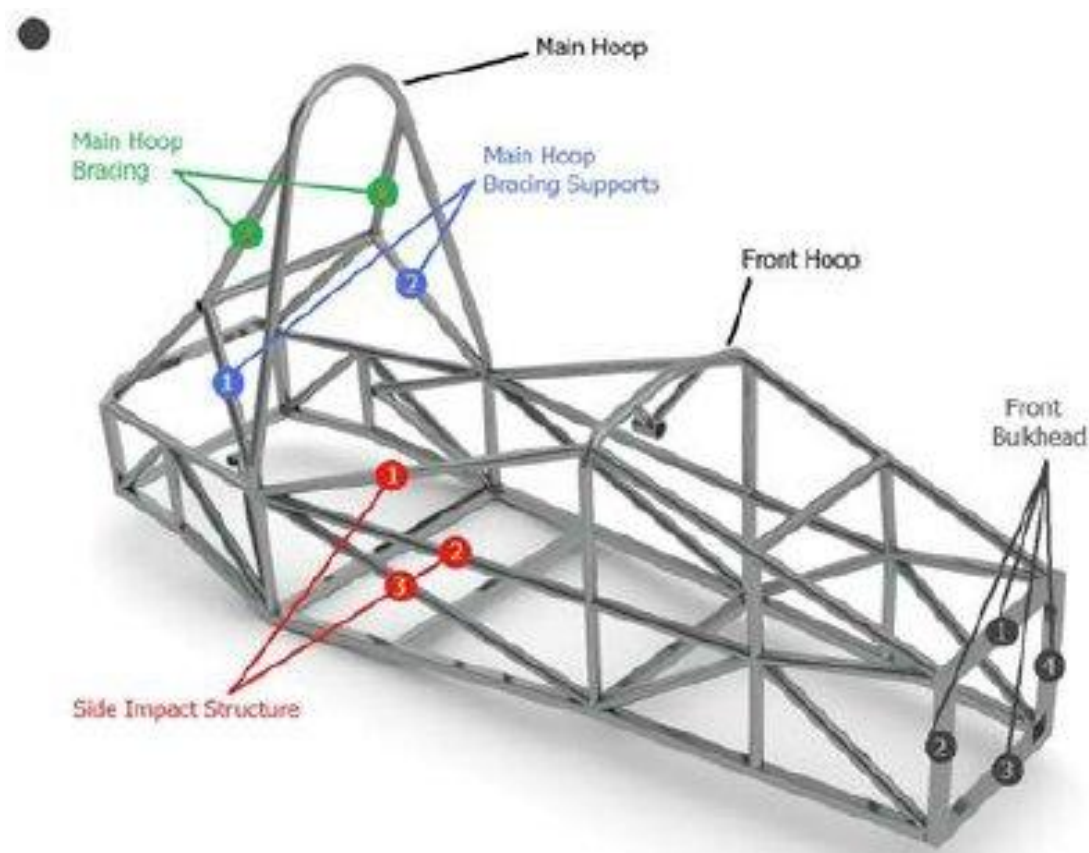
## Γενικές Προϋποθέσεις

Μεταξύ άλλων απαιτήσεων, η δομή του οχήματος πρέπει να περιλαμβάνει δύο roll hoops ενισχυμένα με στηρίξεις, μπροστινό bulkhead με σύστημα στήριξης και αποσβεστήρα σύγκρουσης (Impact Attenuator), καθώς και δομές πλευρικής κρούσης.

## Ορισμοί :

- **Main Hoop** - Ράβδος τοποθετημένη παραπλεύρως ή ακριβώς πίσω από τον κορμό του οδηγού.
- **Front Hoop** - Μία ράβδος ή αλλιώς μια κλειστή διαμόρφωση σωλήνα που βρίσκεται πάνω από τα πόδια του οδηγού, κοντά στο τιμόνι.
- **Roll Hoop** - Τόσο η εμπρόσθια ράβδος (Front Hoop) όσο και η κύρια (Main Hoop) χαρακτηρίζονται ως Roll Hoops. Στόχος τους είναι η αφάλεια του οδηγού σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος.
- **Roll Hoop Bracing** - Ράβδοι στήριξης των Roll Hoops.
- **Frame** - Το frame είναι το κατασκευασμένο δομικό συγκρότημα που υποστηρίζει όλα τα μέρη του οχήματος. Αυτό το συγκρότημα μπορεί να είναι μία συγκολλημένη δομή, πολλαπλές συγκολλημένες δομές ή ένας συνδυασμός σύνθετων και συγκολλημένων κατασκευών. Το πλαίσιο αποτελείται από τριγωνικά τμήματα και πάντα οι ενώσεις γίνονται σε κόμβους και όχι σε ευθύγραμμο τμήμα ράβδου.
- **Primary Structure** - Είναι η κύρια δομή του σκελετού του οχήματος και αποτελείται από τα ακόλουθα :
  1. Main Hoop,
  2. Front Hoop,
  3. Roll Hoop Braces και Supports,
  4. Side Impact Structure,
  5. Front Bulkhead
  6. Front Bulkhead Support System και

7. Όλα τα μέλη του πλαισίου και τα υποστηρίγματα που μεταφέρουν φορτίο από το σύστημα συγκράτησης του οδηγού στα στοιχεία από 1 έως 6
- **Front Bulkhead** - Μια επίπεδη δομή που καθορίζει το εμπρόσθιο επίπεδο της κύριας δομής του πλαισίου και λειτουργεί για την προστασία των ποδιών του οδηγού.
  - **Impact Attenuator** - Αποσβεστήρας σύγκρουσης ή αλλιώς μια παραμορφώσιμη, απορροφητική συσκευή που βρίσκεται μπροστά από το μπροστινό μέρος του Front Bulkhead.
  - **Side Impact Zone** - Η περιοχή της πλευράς του οχήματος που εκτείνεται από το κάτω μέρος του δαπέδου έως και 350 mm πάνω από το έδαφος και από το Front Hoop πίσω στο Main Hoop.



**Εικόνα 3.5 :** Τα κύρια μέρη της δομής ενός πλαισίου Formula SAE. [22]

### 3.2.3 Ελάχιστες απαιτήσεις υλικών

Οι ομάδες μπορούν να επιλέξουν το υλικό κατασκευής του πλαισίου του οχήματός τους επιλέγοντας ανάμεσα σε δύο κατηγορίες. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεταλλικά υλικά κατά τη κατασκευή ή να ακολουθήσουν έναν εναλλακτικό σχεδιασμό που περιλαμβάνει χρήση σύνθετων υλικών. Τόσο η πρώτη επιλογή όσο και η δεύτερη, απαιτούν κάποιους περιορισμούς κατά την κατασκευή.

Κάθε ομάδα ανεξαρτήτως του υλικού που θα επιλέξει, πρέπει να υποβάλει ένα έγγραφο όπου θα αναφέρει την επιλογή της και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, έτσι ώστε να μπορεί να ταυτοποιηθεί από την επιτροπή ότι το υλικό αυτό καλύπτει τους περιορισμούς που θέτουν οι κανονισμοί.

## Μεταλλικά υλικά

Η κατασκευή του σκελετού μπορεί να είναι από σωλήνες κυκλικής διατομής, μαλακού χάλυβα ή κραματωμένου, ( με ελάχιστο 0.1% άνθρακα). Οι ελάχιστες διαστάσεις που πρέπει να χρησιμοποιηθούν δίνονται στον πίνακα 3.2 .

**Πίνακας 3.2 : Ελάχιστες επιτρεπτές διαστάσεις χαλύβδινων σωληνώσεων. [4]**

ITEM or APPLICATION	OUTSIDE DIMENSION X WALL THICKNESS
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) or Round 25.0 mm x 2.50 mm metric
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment (except as noted above) EV: Accumulator Protection Structure	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) or Round 25.0 mm x 1.75 mm metric or Round 25.4 mm x 1.60 mm metric or Square 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch or Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm metric
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports, Shoulder Harness Mounting Bar Bracing EV: Tractive System Components Protection	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) or Round 25.0 mm x 1.5 mm metric or Round 26.0 mm x 1.2 mm metric
Bent Upper Side-Impact Member (T3.24.3a)	Round 1.375 inch (35.0mm) x 0.047 inch (1.20mm)

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές διατομές και διαστάσεις από αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2 ή ακόμα και διαφορετικά μεταλλικά υλικά. Ωστόσο η κατασκευή των Main Roll Hoop και των Main Roll Hoop Bracing πρέπει υποχρεωτικά να είναι από χάλυβα. Στην περίπτωση που κάποια ομάδα επιλέξει να χρησιμοποιήσει εναλλακτικές σωληνώσεις, πρέπει να συντάξει ένα έγγραφο SES (Structural Equivalency Form), στο οποίο θα αποδουκνύει την ικανότητα του υλικού να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν να κάνουν με το όριο διαρροής του υλικού, την αντοχή του σε εφελκυσμό, λυγισμό και κάμψη, καθώς και με το γινόμενο EI ( E: μέτρο ελαστικότητας, I: ροπή αδράνειας) ή αλλιώς Buckling Modulus. Τα ενδεικτικά όρια αυτά μπορεί να αλλάζουν κάθε χρόνο. Τέλος, σε αυτή τη περίπτωση επιλογής εναλλακτικών υλικών, οι ελάχιστες διαστάσεις που πρέπει να ικανοποιούνται παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 .

**Πίνακας 3.3 :** Ελάχιστες επιτρεπτές διαστάσεις εναλλακτικών σωληνώσεων. [4]

MATERIAL & APPLICATION	MINIMUM WALL THICKNESS
Steel Tubing for Front and Main Roll Hoops, and Shoulder Harness Mounting Bar	2.0 mm (0.079 inch)
Steel Tubing for Roll Hoop Bracing, Roll Hoop Bracing Supports, Side Impact Structure, Front Bulkhead, Front Bulkhead Support, Driver's Harness Attachment (except as noted above), Protection of HV accumulators, and protection of HV tractive systems	1.2 mm (0.047 inch)

Πρέπει να σημειωθεί ότι ως αποτέλεσμα του λεπτότερου σωλήνα, η εξωτερική διάμετρος πρέπει να αυξηθεί για να διατηρηθεί το γινόμενο EI. Επίσης θα πρέπει να διατηρηθεί και το εμβαδόν A της διατομής, για να διατηρηθεί η αντοχή σε εφελκυσμό του σωλήνα που προβλέπει ο κανονισμός. Όλα αυτά τα στοιχεία πρέπει να αναγράφονται στο έγγραφο SES ( Structural Equivalency Form) που συντάσσεται στην περίπτωση χρήσης εναλλακτικών διατομών από αυτές που προτείνονται.

Παρακάτω αναφέρονται οι ελάχιστες απαιτήσεις στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που πρέπει να ικανοποιούνται βάσει των κανονισμών :

- Μέτρο ελαστικότητας (E) : 200 GPa
- Όριο διαρροής ( $\sigma_y$ ) : 305 MPa
- Όριο θραύσης ( $\sigma_u$ ) : 365 MPa

Κάθε σωλήνωση με διαστάσεις μικρότερες από 25.0 mm x 1.20 mm δεν θεωρείται μέρος της δομής και θα αγνοηθεί κατά την διαδικασία του τεχνικού ελέγχου από την επιτροπή του διαγωνισμού.

## **Εναλλακτικά υλικά**

### **Αλουμίνιο**

- Ελάχιστο πάχος τοιχώματος : Σωλήνας αλουμινίου 3,0 mm (0,118 inch)
- Εάν οι σωληνώσεις αλουμινίου υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία για να αυξηθεί η αντοχή τους στη συγκολλημένη κατάσταση, η ομάδα πρέπει να παρέχει επαρκή τεκμηρίωση σχετικά με τον τρόπο διεξαγωγής της διαδικασίας.

### **Σύνθετο**

Εάν χρησιμοποιηθεί σύνθετο ή άλλο υλικό, η ομάδα πρέπει να :

- Παρουσιάζει τεκμηρίωση του τύπου υλικού, π.χ. απόδειξη παραλαβής, έγγραφο αποστολής, έγγραφο με τις ιδιότητες του υλικού.
- Υποβάλλει λεπτομέρειες σχετικά με τη τεχνική επίστρωσης καθώς και με το χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό (τύπος υφάσματος, βάρος, τύπος ρητίνης, αριθμός στρώσεων, υλικό μήτρας και υλικό ενίσχυσης).
- Υποβάλλει τους υπολογισμούς που αποδεικνύουν την ισοδυναμία της σύνθετης δομής του με μια παρόμοια γεωμετρία σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις που αναφέρονται στον κανονισμό.

### 3.2.4 Composite space frame

Τα composite space frames δεν απαγορεύονται από τους κανόνες, αλλά οποιαδήποτε ομάδα επιθυμεί να δημιουργήσει ένα σύνθετο υλικό πρέπει να ζητήσει έγκριση από το οργανωτικό σώμα. Η ομάδα ωστόσο, πρέπει να παρέχει τα δεδομένα από δοκιμές σχετικά με τις αρθρώσεις που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο. Οι δοκιμές αυτές πρέπει να περιλαμβάνουν δοκιμές στατικής αντοχής από όλα τα μέρη του πλαισίου. Οι πληροφορίες αυτές πρέπει να περιλαμβάνονται στο έγγραφο SES (Structural Equivalency Form) που συντάσσει η κάθε ομάδα. Λαμβάνοντας υπ'όψη την επιπλέον πολυπλοκότητα ενός πλαισίου κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά, οι ομάδες πρέπει να υποβάλουν τα έγγραφά τους αρκετά νωρίτερα από τη λήξη της προθεσμίας και να επιτύχουν την έγκριση πριν ξεκινήσουν την κατασκευή του οχήματος.

### 3.2.5 Monocoque

#### Γενικές απαιτήσεις monocoque

Όλοι οι υπολογισμοί ισοδυναμίας πρέπει να αποδεικνύουν ισοδυναμία σε σχέση με το τυποποιημένο χάλυβα SAE / AISI 1010.

Το monocoque απαιτεί ένα εγκεκριμένο έγγραφο ισοδυναμίας (SES). Το έγγραφο πρέπει να αποδεικνύει ότι ο σχεδιασμός είναι ισοδύναμος με ένα συγκολλημένο πλαίσιο όσον αφορά την απόσβεση ενέργειας, την απόδοση και την αντοχή σε κάμψη και λυγισμό. Οι πληροφορίες πρέπει να περιλαμβάνουν: τύπο υλικού, τύπο ρητίνης, προσανατολισμό ινών, αριθμό στρωμάτων, υλικό πυρήνα και τεχνική επίστρωσης. Τα μεταλλικά και σύνθετα monocoque έχουν τις ίδιες απαιτήσεις.

#### Επιθεώρηση του monocoque

Λόγω των κανονισμών του monocoque και των μεθόδων κατασκευής του, δεν είναι πάντοτε δυνατόν να επιθεωρούνται όλες οι πτυχές τους κατά την τεχνική επιθεώρηση. Είναι ευθύνη της ομάδας να παρέχει τεκμηρίωση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων, τόσο οπτική όσο και / ή γραπτή, για τα στοιχεία που δεν μπορούν

να επαληθευτούν από έναν επιθεωρητή. Γενικά, θα πρέπει να είναι δυνατή η επιβεβαίωση των ακόλουθων στοιχείων από το τεχνικό επιθεωρητή :

1. Επαλήθευση της εξωτερικής διαμέτρου του Main Hoop και του πάχους του, όπου προεξέχει πάνω από το monocoque
2. Οπτική επαλήθευση ότι το Main Hoop πηγαίνει στο χαμηλότερο μέρος της δομής.
3. Επιβεβαίωση ότι η μηχανική στερέωση του Main Hoop ικανοποιεί τις απαιτήσεις του κανονισμού.
4. Επιβεβαίωση οπτικά ή αισθητικά ότι έχει εγκατασταθεί το Front Roll Hoop, καθώς και ότι έχει στερεωθεί μηχανικά σύμφωνα με τους κανονισμούς.

### **Δομές επιφανειών**

Οι ομάδες πρέπει να κατασκευάσουν αντιπροσωπευτικό πάνελ με το ίδιο σχέδιο, και την ίδια μέθοδο κατασκευής όπως χρησιμοποιείται στα διάφορα μέρη του οχήματος ( π.χ. Side Impact ) και να εκτελέσουν μια δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε αυτό. Πρέπει να αποδείξουν με φυσικές δοκιμές ότι ένα πάνελ με διαστάσεις 275 mm x 500 mm έχει τουλάχιστον τις ίδιες ιδιότητες με τον αντίστοιχο αριθμό των χαλύβδινων ράβδων που αντικαθιστά σε ότι αφορά το συντελεστή λυγισμού, τη δύναμη απόδοσης, την αντοχή και την απορροφούμενη ενέργεια. Τα αποτελέσματα από αυτές τις δοκιμές πρέπει να περιλαμβάνονται στο SES. Το δοκίμιο πρέπει παρουσιαστεί στην επιτροπή κατά την τεχνική επιθεώρηση. Εάν το δοκίμιο δεν πληροί αυτές τις απαιτήσεις, τότε η αντίστοιχη περιοχή (π.χ. Side Impact) πρέπει να ενισχυθεί κατάλληλα.

Τα Roll Hoops καθώς και οι στηρίξεις τους απαιτούν τις ίδιες τεχνικές τοποθέτησης καθώς και τις ίδιες μηχανικές απαιτήσεις με αυτές του Space Frame. Το Main Hoop πρέπει να στηρίζεται σε έξι σημεία στο monocoque, τρία σε κάθε πλευρά. Οι συνδέσεις του Main Hoop πρέπει να μπορούν να φέρουν φορτίο 45 kN προς όλες τις κατευθύνσεις. Επίσης οποιαδήποτε σύνδεση μεταξύ του monocoque και της υπόλοιπης δομής του πλαισίου πρέπει να μπορεί να φέρει φορτίο 30 kN σε κάθε κατεύθυνση. Τα ελάχιστα φορτία που πρέπει να βρίσκεται σε θέση να φέρει κάθε μέρος του πλαισίου καθώς και κάθε σύνδεση αναγράφονται αναλυτικότερα στο κανονισμό της διοργάνωσης.

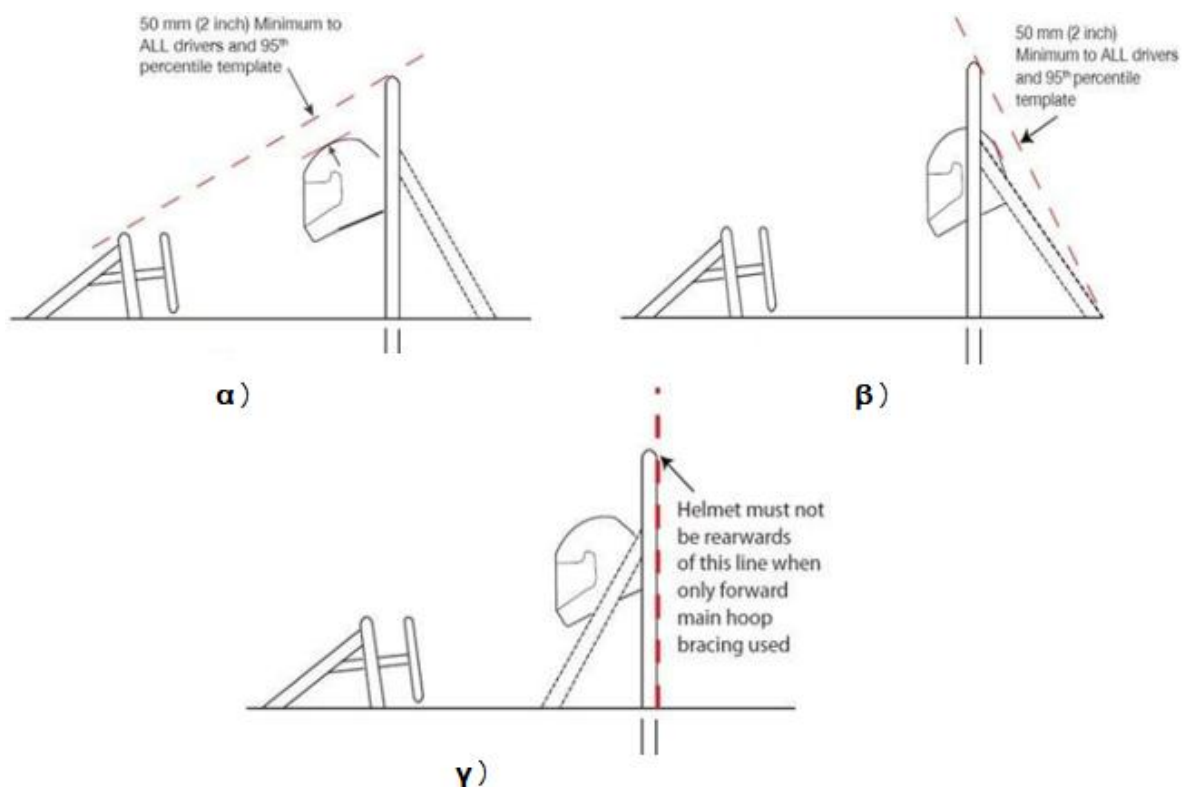
Οι κανονισμοί που αφορούν το monocoque απαιτούν σε γενικές γραμμές την απόδειξη της ισοδυναμίας του σύνθετου υλικού με το άθροισμα των χαλύβδινων σωληνώσεων που θα αντικαταστήσει, όσον αφορά το θέμα της αντοχής. Κάθε ομάδα πρέπει να παρουσιάσει τα δοκίμια αυτά, βάση των οποίων έχει αποδείξει την ισοδυναμία των επιμέρους πλευρών του monocoque. Όλα αυτά θα πρέπει να παρουσιάζονται στο έγγραφο SES που θα συντάξει και το οποίο θα ελεγχθεί από την επιτροπή του διαγωνισμού. Η απόδειξη της ισοδυναμίας του σύνθετου υλικού με τις ελάχιστες απαιτήσεις που προβλέπει ο κανονισμός, αποτελεί προϋπόθεση για την συνέχιση της κατασκευής του οχήματος. Αναλυτικότερα οι κανονισμοί για το Side Impact παρουσιάζονται στην ιστοσελίδα της διοργάνωσης.

### 3.2.6 Space frame

#### Απαιτήσεις για τα Roll Hoops και τις στηρίξεις τους

Τα Roll Hoops είναι δομές απο σωληνώσεις κατάλληλα διαμορφωμένες και βρίσκονται τοποθετημένα μπροστά και πίσω απο τον οδηγό με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλειά του. Πιο συγκεκριμένα αποτρέπουν τα χέρια και το κεφάλι του οδηγού απο την επαφή με το έδαφος σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος. Επομένως είναι απαραίτητο ο σκελετός του οχήματος να περιέχει τόσο το Main Hoop όσο και το Front Hoop. Οι βασικοί κανόνες που πρέπει να ισχύουν για κάθε οδηγό της ομάδας είναι :

- Το κράνος κάθε οδηγού πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 50.8 mm (2 inches) από την νοητή ευθεία που ενώνει την κορυφή του Main Hoop και την κορυφή του Front Hoop. (Σχήμα 3.3.α)
- Το κράνος κάθε οδηγού πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 50.8 mm (2 inches) κάτω από την νοητή ευθεία που ενώνει από την κορυφή του Main Hoop με το κατώτερο άκρο του Main Hoop Bracing, αν η στήριξη εκτείνεται προς τα πίσω. (Σχήμα 3.3.β)
- Το κράνος κάθε οδηγού δεν πρέπει να βρίσκεται πιο πίσω απο την πίσω πλευρά του Main Hoop, αν το Main Hoop Bracing εκτείνεται προς τα εμπρός. (Σχήμα 3.3.γ)



**Σχήμα 3.3 :** Αποστάσεις που ορίζουν την ελευθερία κίνησης του κράνους του οδηγού σε σχέση με τα Roll Hoops και τις στηρίξεις τους. [4]



Οι οδηγοί που δεν πληρούν τις απαιτήσεις περι ελευθερίας κίνησης του κράνους δεν θα επιτρέπεται να συμμετάσχουν στο διαγωνισμό. Επίσης η ελάχιστη ακτίνα κάθε κάμψης, μετρούμενη στην κεντρική γραμμή του σωλήνα, πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσια της εξωτερικής διαμέτρου του σωλήνα και οι στροφές πρέπει να είναι ομαλές και συνεχείς, χωρίς να υπάρχουν ενδείξεις πτύχωσης. Τέλος τα Roll Hoops πρέπει να είναι ενσωματωμένα με ασφάλεια στην κύρια δομή του οχήματος.

## **Main Hoop**

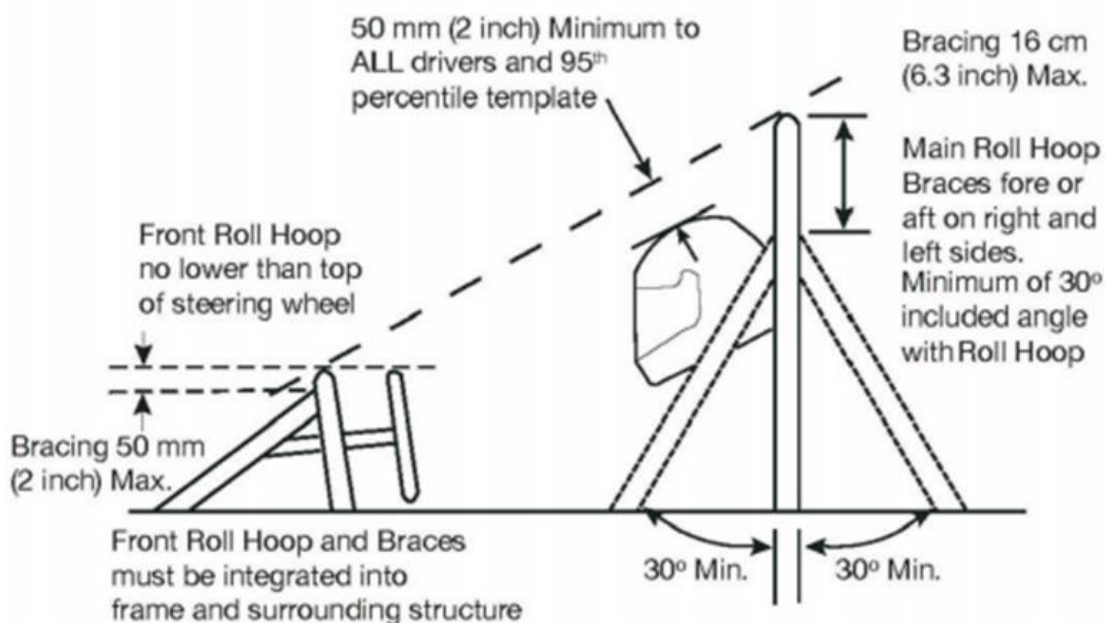
- Το Main Hoop πρέπει να είναι κατασκευασμένο από ένα ενιαίο συνεχές κομμάτι χαλύβδινου σωλήνα κλειστής διατομής, το οποίο πρέπει να πληρεί τις προδιαγραφές των υλικών.
- Απαγορεύεται η χρήση κραμάτων αλουμινίου, κραμάτων τιτανίου ή σύνθετων υλικών για το Main Hoop .
- Το Main Hoop πρέπει να εκτείνεται από το χαμηλότερο μέρος του σκελετού στη μια πλευρά έως το χαμηλότερο μέρος του σκελετού στην άλλη πλευρά, αφού πρώτα περάσει πάνω από την θέση του οδηγού.
- Στην πλάγια όψη του οχήματος, το τμήμα του Main Hoop που βρίσκεται πάνω από τον ανώτερο σωλήνα πλευρικής πρόσκρουσης, μπορεί να έχει έως 10 μοίρες (10 °) κλίση από το κατακόρυφο επίπεδο.
- Στην μπροστινή όψη του οχήματος, τα κατακόρυφα μέλη του Main Hoop στη θέση όπου είναι συνδεδεμένο το Main Hoop με την κύρια δομή, πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον 380 mm μεταξύ τους.

## **Front Hoop**

- Το Front Hoop, όπως και το Main Hoop, πρέπει να είναι κατασκευασμένο από κλειστής διατομής χαλύβδινου σωλήνα.
- Το Front Hoop πρέπει να εκτείνεται από το χαμηλότερο μέρος του σκελετού στη μια πλευρά έως το χαμηλότερο μέρος του σκελετού στην άλλη πλευρά, αφού πρώτα έχει περάσει πάνω από το σημείο όπου θα βρίσκονται τα πόδια του οδηγού.
- Με σωστή τριγωνοποίηση, επιτρέπεται η κατασκευή του Front Hoop με περισσότερα από ένα κομμάτια σωλήνα.
- Το ψηλότερο σημείο του Front Hoop δεν πρέπει να βρίσκεται χαμηλότερα από το πάνω μέρος του τιμονιού σε οποιαδήποτε γωνιακή θέση.
- Το Front Hoop δεν πρέπει να βρίσκεται περισσότερο από 250 mm (9,8 inches) μπροστά από το τιμόνι. Αυτή η απόσταση πρέπει να μετράται οριζόντια, στην αξονική γραμμή του οχήματος, από την πίσω επιφάνεια του Front Hoop μέχρι στην μπροστά επιφάνεια του τιμονιού, με το σύστημα διεύθυνσης στην ευθεία θέση.
- Στην πλάγια όψη, το Front Hoop ή οποιοδήποτε τμήμα του δεν μπορούν να έχουν κλίση μεγαλύτερη από 20 μοίρες (20 °) από το κατακόρυφο επίπεδο.

## Main Hoop Bracing

- Τα Main Hoop Bracing πρέπει να είναι κατασκευασμένα από σωλήνες χάλυβα κλειστής διατομής σύμφωνα με τους κανονισμούς.
- Το Main Hoop πρέπει να υποστηρίζεται από δύο ράβδους στήριξης (Main Hoop braces) που εκτείνονται προς τα εμπρός ή προς τα πίσω τόσο στην αριστερή όσο και στη δεξιά πλευρά του Main Hoop.
- Στην πλάγια όψη του πλαισίου, τα Main Hoop braces δεν πρέπει να έχουν την ίδια κλίση με το Main Hoop αλλά την αντίθετη. Για παράδειγμα εάν το Main Hoop έχει κλίση προς τα πίσω τα Main Hoop braces πρέπει να έχουν κλίση προς τα εμπρός, ενώ εάν το Main Hoop έχει κλίση προς τα εμπρός τα Main Hoop braces πρέπει να έχουν κλίση προς τα πίσω.
- Τα Main Hoop braces πρέπει να είναι τοποθετημένα όσο το δυνατόν ψηλότερα στο Main Hoop αλλά όχι περισσότερο από 160 mm κάτω από το ψηλότερο σημείο του. Η εσωτερική γωνία που σχηματίζεται από το Main Hoop και τα Main Hoop braces πρέπει να είναι τουλάχιστον τριάντα μοίρες (30 °).



**Σχήμα 3.4 :** Διαστάσεις και αποστάσεις ασφαλείας για τα Roll Hoops και τις στηρίξεις τους.[4]

- Τα Main Hoop braces πρέπει να είναι ευθύγραμμοι σωλήνες, χωρίς καμπύλωση.
- Τα Main Hoop braces πρέπει να είναι καλά ενσωματωμένοι στο πλαίσιο και να μπορούν να μεταδίδουν όλα τα φορτία από το Main Hoop στην κύρια δομή του πλαισίου.
- Το κατώτερο άκρο των Main Hoop braces πρέπει να στηρίζεται στο κύριο δάπεδο τουλάχιστον από δύο μέλη πλαισίου σε κάθε πλευρά του οχήματος, ένα άνω και ένα κάτω μέλος σε σωστή τριγωνική διαμόρφωση.

- A. Το άνω μέλος στήριξης πρέπει να συνδέεται με τον κόμβο όπου το άνω μέλος της πλευρικής πρόσκρουσης συνδέεται με το Main Hoop.
- B. Το κάτω μέλος στήριξης πρέπει να συνδέεται με τον κόμβο όπου το κάτω μέλος της πλευρικής πρόσκρουσης συνδέεται με το Main Hoop.

Κάθε ένα από τα παραπάνω μέλη μπορεί να είναι συνεχής ή λυγισμένοι σωλήνες υπό τον όρο ότι πληρούνται οι απαιτήσεις του κανονισμού.

- Εάν κάποιο αντικείμενο, που βρίσκεται εκτός της περιοχής που ορίζει το Primary Structure, στηρίζεται στα Main Hoop braces, τότε πρέπει να προστεθεί πρόσθετη στήριξη για να αποφευχθούν καμπτικά φορτία στις στηρίξεις σε περίπτωση ανατροπής.

## Front Hoop Bracing

- Τα Front Hoop braces πρέπει να είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό που θα κατασκευαστούν και τα Main Hoop braces, δηλαδή από σωλήνες χάλυβα με τις προδιαγραφές που προβλέπει ο κανονισμός.
- Το Front Hoop πρέπει να στηρίζεται από δύο ράβδους στήριξης (Front Hoop braces) που εκτείνονται προς τα εμπρός και βρίσκονται τόσο στην αριστερή όσο και στην δεξιά πλευρά.
- Τα Front Hoop braces πρέπει να είναι τοποθετημένα όσο το δυνατόν ψηλότερα στο Front Hoop αλλά όχι περισσότερο από 50.8 mm κάτω από την ψηλότερο σημείο του. (σχήμα 3.4)
- Εάν το Front Hoop κλίνει προς τα πίσω περισσότερο από δέκα μοίρες (10 °) από το κάθετο επίπεδο, πρέπει να υποστηρίζεται με πρόσθετες στηρίξεις από κατάλληλο υλικό.
- Τα Front Hoop braces πρέπει να είναι ευθύγραμμοι σωλήνες, χωρίς καμπύλωση
- Τα πόδια του οδηγού θα πρέπει να βρίσκονται συνεχώς εντός του σκελετού του οχήματος. Ακόμα και όταν ο οδηγός πατάει τα πεντάλ δεν επιτρέπεται να προεξέχει κανένα μέρος των ποδιών του εκτός των ορίων του σκελετού.

## Επιπλέον προδιαγραφές στηρίξεων

Όταν τα στηρίγματα δεν είναι συγκολλημένα σε χαλύβδινα μέλη του πλαισίου, πρέπει να είναι καλά στερεωμένα με κοχλίες 8 mm Metric Grade 8.8 (5/16 in SAE Grade 5), ή ισχυρότερους. Οι πλάκες στήριξης που συγκολλούνται στα Roll Hoop braces, πρέπει να είναι από χάλυβα και να έχουν πάχος τουλάχιστον 2.0 mm.

Εάν υπάρχει κάποιο Roll Hoop brace ή άλλος σωλήνας πλαισίου δίπλα στον οδηγό, στο ύψος του λαιμού του, ένας μεταλλικός σωλήνας ή ένα κομμάτι από λαμαρίνα πρέπει να στερεωθεί σταθερά στο πλαίσιο αποτρέποντας τους ώμους των οδηγών από το να περνούν κάτω από το στηρίγμα. Αυτό γίνεται για να μην υπάρξει τραυματισμός στο λαιμό του οδηγού.

## **Bulkhead**

- Το Bulkhead πρέπει να είναι κατασκευασμένο από σωλήνες κλειστής διατομής σύμφωνα με τους κανονισμούς.
- Πρέπει να βρίσκεται μπροστά από όλα τα αντικείμενα που είναι επικίνδυνα στις συγκρούσεις, π.χ μπαταρίες.
- Το Bulkhead πρέπει να είναι τοποθετημένο έτσι ώστε τα πέλματα των ποδιών του οδηγού, όταν ακουμπούν τα πενταλ, να βρίσκονται πίσω από αυτό.

## **Front Bulkhead Support**

- Το Front Bulkhead πρέπει να είναι καλά ενσωματωμένο στο πλαίσιο του οχήματος.
- Το Front Bulkhead πρέπει να στηρίζεται στο Front Hoop με τουλάχιστον 3 στηρίξεις σε κάθε πλευρά του οχήματος, μια που θα ξεκινά από το ψηλότερο σημείο του Bulkhead, μια που θα ξεκινά από το χαμηλότερο και μια διαγώνια ανάμεσά τους για να υπάρχει τριγωνοποίηση. Το άνω μέλος στήριξης πρέπει να είναι τοποθετημένο σε απόσταση 50 mm από το ψηλότερο σημείο του Front Bulkhead και να συνδέεται με το Front Hoop σε μια ζώνη που εκτείνεται 100 mm πάνω και 50 mm κάτω από το Side Impact . Αν το άνω μέλος στήριξης απ έχει περισσότερο από 100 mm από το πάνω μέρος του Side Impact, απαιτείται επιπλέον προσθήκη στήριξης σε τριγωνοποίηση για να μεταφερθούν τα φορτία στο Main Hoop. Το κάτω στήριγμα πρέπει να στερεωθεί στη βάση του Bulkhead και στη βάση του Front Hoop. Η διαγώνια στήριξη πρέπει να είναι τοποθετημένη έτσι ώστε να δημιουργείται τριγωνική κατανομή.

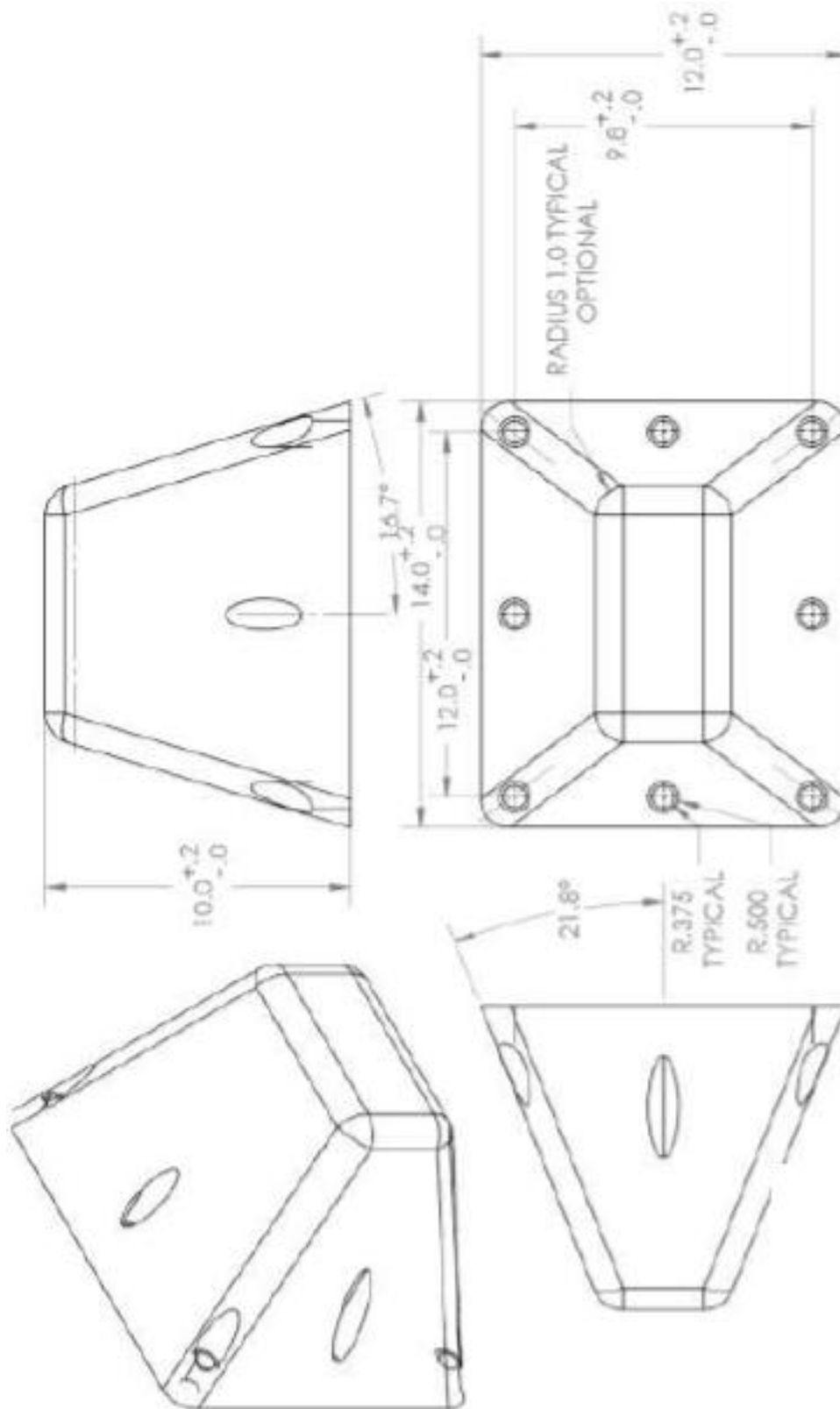
## **Impact Attenuator Assembly**

Μπροστά από το Front Bulkhead πρέπει να υπάρχει μια διάταξη απόσβεσης συγκρούσεων (Impact Attenuator Assembly), η οποία αποτελείται από έναν αποσβεστήρα σύγκρουσης (Impact Attenuator) και μια πλάκα (Anti-Intrusion Plate) που αποτρέπει την εισβολή αντικειμένων στο υπόλοιπο πλαίσιο σε περίπτωση σύγκρουσης. Αυτά τα δύο μέρη μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους είτε με συγκόλληση είτε με κοχλίες 8 mm Metric Grade 8.8 (5/16" SAE Grade 5) ή ισχυρότερους. Ο τρόπος σύνδεσης πρέπει να αναγράφεται στο έγγραφο SES.

Ο αποσβεστήρας σύγκρουσης (Impact Attenuator) πρέπει να :

1. Έχει τουλάχιστον 200 mm μήκος, προσανατολισμένο κατά μήκος του άξονα εμπρός / πίσω του πλαισίου.
2. Έχει τουλάχιστον 100 mm ύψος και 200 mm πλάτος για ελάχιστη απόσταση μήκους 200 mm .
3. Συνδέεται με ασφάλεια στην πλάκα “αντι-εισβολής” (Anti-Intrusion Plate) ή απευθείας στο Front Bulkhead.

Ένας επίσημος εγκεκριμένος «τυποποιημένος» αποσβεστήρας πρόσκρουσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5 .



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα τυποποιημένου αποσβεστήρα σύγκρουσης. [4]

## Anti-Intrusion Plate

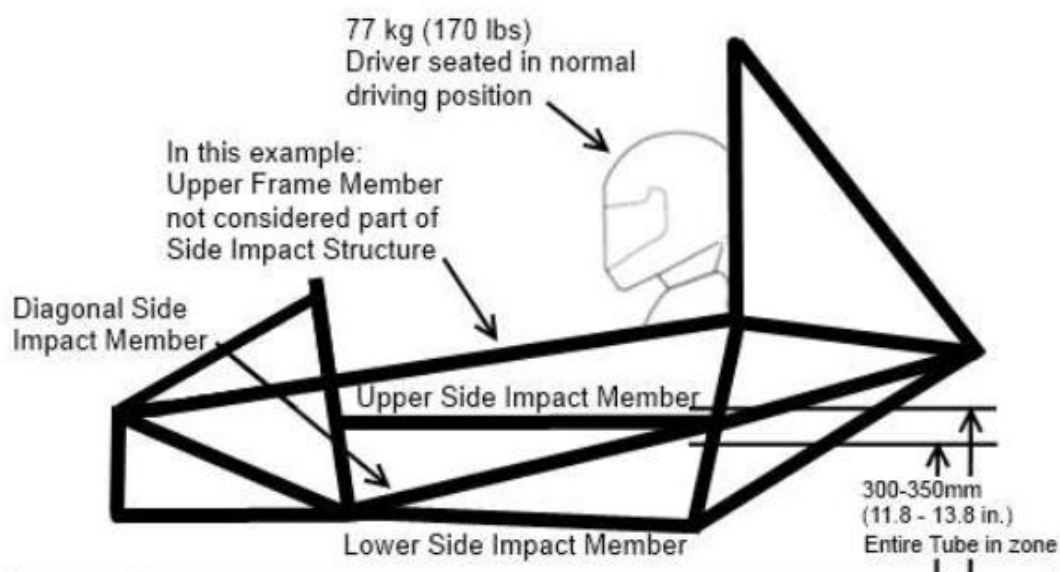
Η πλάκα αντι-εισβολής (Anti-Intrusion Plate) πρέπει:

- Να είναι συμπαγής χάλυβας 1,5 mm (0,060 inches) ή 4,0 mm (0,157 inches) συμπαγές αλουμίνιο ή κάποια εγκεκριμένη εναλλακτική λύση σύμφωνα με το κανονισμό.
- Να συνδέεται απευθείας και με ασφάλεια στο Front Bulkhead.

## Side Impact Structure

Το Side Impact Structure είναι η δομή του σκελετού που βρίσκεται δίπλα στον οδηγό και στις δύο πλευρές του οχήματος και προστατεύει τον οδηγό από πλευρικές συγκρούσεις. Αυτή η δομή πρέπει να πληροί κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις που αναφέρονται παρακάτω.

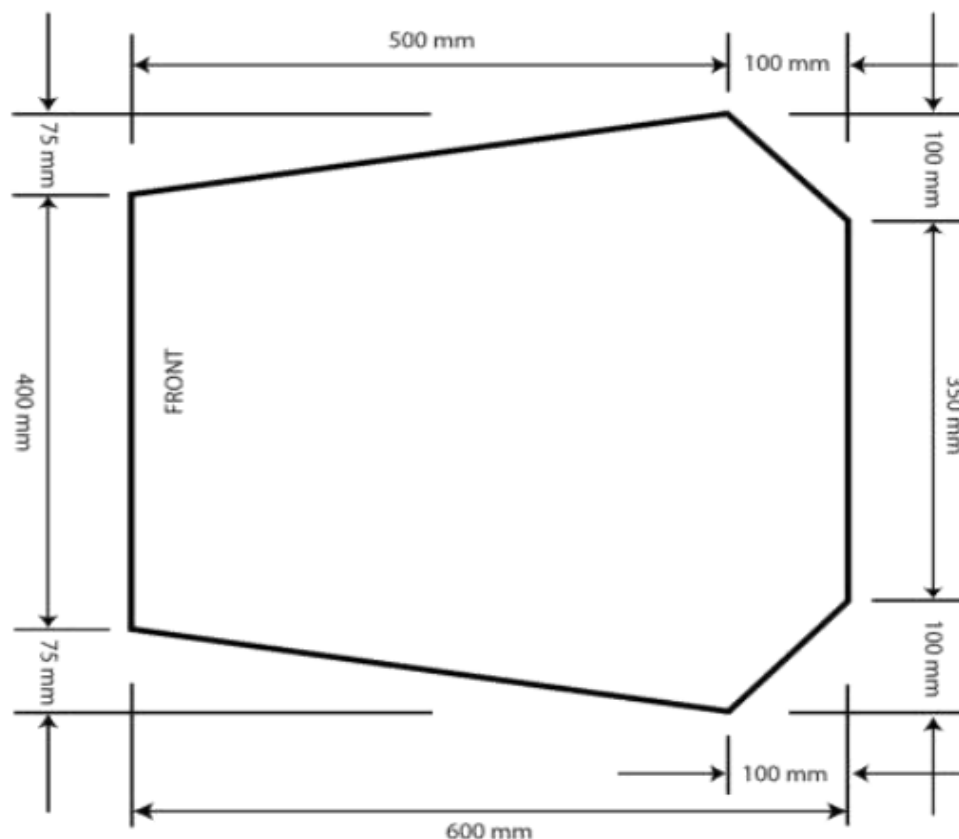
Η δομή του Side Impact πρέπει να αποτελείται από τουλάχιστον τρία (3) σωληνοειδή μέλη τοποθετημένα σε κάθε πλευρά του οδηγού και κατασκευασμένα από υλικά που προβλέπει ο κανονισμός. Ο ανώτερος σωλήνας συνδέει το Main Hoop με το Front Hoop και βρίσκεται σε ύψος μεταξύ 300 mm και 350 mm πάνω από το έδαφος, όταν επιβαίνει στο όχημα οδηγός βάρους 77 κιλών. Εάν ο σωλήνας είναι λυγισμένος ή μη συνεχής, το ελάχιστο μέγεθος πρέπει να είναι 35 mm x 1,2 mm (1 3/8 " x 0,047") ή ισοδύναμο. Ο κατώτερος σωλήνας συνδέει και αυτός το Main Hoop με το Front Hoop και ο διαγώνιος συνδέει το πάνω και κάτω μέρος της πλευρικής δομής.



Σχήμα 3.6 : Δομή του Side Impact. [4]

## Cockpit

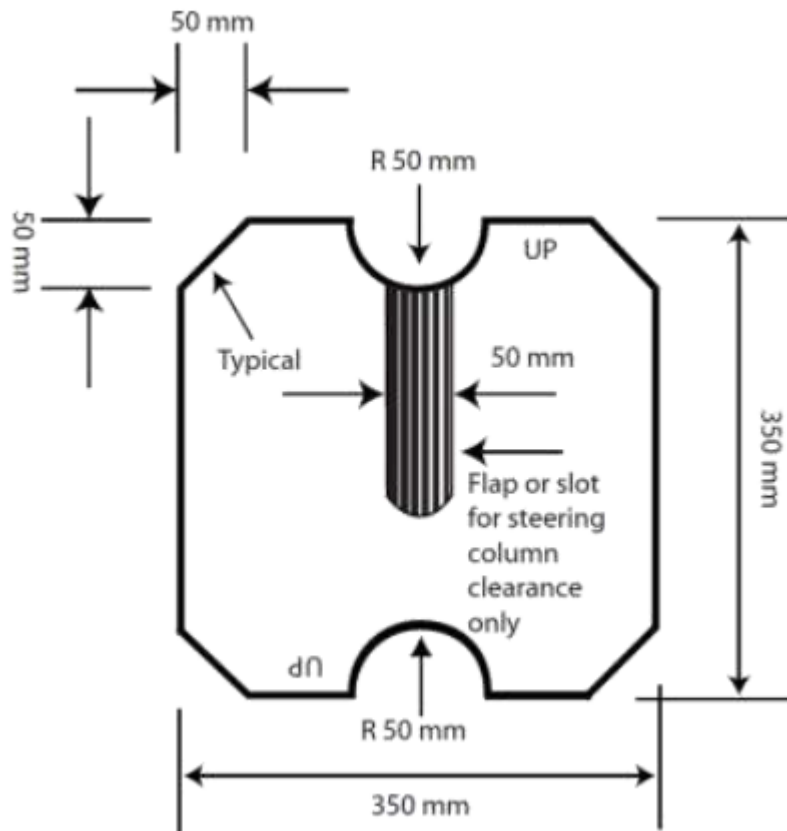
Για να εξασφαλιστεί ότι το άνοιγμα του cockpit είναι επαρκούς μεγέθους, θα εισαχθεί στο άνοιγμά του μια πλάκα με συγκεκριμένες διαστάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Η πλάκα αυτή θα εισαχθεί παράλληλα με το έδαφος και εισχωρήσει κατακόρυφα μέχρι να περάσει κάτω από τον ανώτερο σωλήνα του Side Impact. Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, μπορεί να αφαιρεθεί το τιμόνι και το κάθισμα. Ο μηχανισμός αλλαγής ταχυτήτων δεν χρειάζεται να αφαιρεθεί εκτός αν είναι ενσωματωμένος στο τιμόνι.



**Σχήμα 3.7 :** Πλάκα ελέγχου ανοίγματος του cockpit. [4]

### Εσωτερική διατομή cockpit :

Για να επιβεβαιωθεί ότι η διατομή του cockpit είναι επαρκής έτσι ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει με ασφάλεια τον οδηγό, πρέπει να επιτρέψει στη πλάκα που φαίνεται στο σχήμα 3.8, να περάσει οριζόντια μέσα από αυτό, μέχρι να φτάσει 100 mm πίσω από το τελευταίο πεντάλ, όταν αυτό βρίσκεται σε θέση εκτός λειτουργίας. Εάν τα πεντάλ είναι ρυθμιζόμενα, πρέπει να τοποθετηθούν στην πιο προωθημένη θέση τους. Η πλάκα αυτή, με μέγιστο πάχος 7 mm, θα κρατιέται κάθετα και θα εισάγεται στο άνοιγμα του cockpit πίσω από τα πεντάλ.



**Σχήμα 3.8 :** Πλάκα ελέγχου εσωτερικής διατομής του cockpiti. [4]

Τα μόνα στοιχεία που μπορούν να αφαιρεθούν για τη δοκιμή αυτή είναι το τιμόνι και οποιοδήποτε προστατευτικό για τα πόδια του οδηγού μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί χωρίς τη χρήση εργαλείων και με οδηγό στο κάθισμα. Το κάθισμα δεν μπορεί να αφαιρεθεί. Επίσης τα καλώδια, τα σύρματα, οι σωλήνες κ.λπ. δεν πρέπει να εμποδίζουν τη διέλευση των προτύπων που απαιτούνται για τον έλεγχο της διατομής του cockpiti.

## Κάθισμα οδηγού

Το χαμηλότερο σημείο του καθίσματος του οδηγού δεν πρέπει να βρίσκεται χαμηλότερα από το κατώτερο σωλήνα του σκελετού του οχήματος ή χαμηλότερα από ένα διαμήκη σωλήνα (ή σωλήνες) που πληροί τις απαιτήσεις του Side Impact και περνά κάτω από το κάθισμα.

Όταν ο οδηγός κάθεται σε κανονική θέση οδήγησης, πρέπει να παρέχεται επαρκής μόνωση για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα έρθει σε επαφή με κανένα μέταλλο ή άλλα υλικά που μπορούν να ξεπεράσουν τη θερμοκρασία των 60 ° C. Η σχεδίαση πρέπει να εξασφαλίζει την αντιμετώπιση και των τριών τύπων μεταφοράς θερμότητας, δηλαδή αγωγιμότητα, μεταφορά και ακτινοβολία, ανάμεσα στις πηγές θερμότητας και τις επιφάνειες που έρχεται σε επαφή ο οδηγός. Ανάλογα με τη μορφή μεταφοράς θερμότητας πρέπει να υπάρχει συγκεκριμένη μόνωση.



### Μόνωση απο αγωγή :

- Αποφυγή άμεσης επαφής μεταξύ της πηγής θερμότητας και του πάνελ που μπορεί να έρθει σε επαφή ο οδηγός.
- Με ενα θερμομονωτικό υλικό ελάχιστου πάχους 8 mm ανάμεσα στη πηγή θερμότητας και το πάνελ.

### Μόνωση απο συναγωγή :

- Με ελάχιστο κενό αέρα 25 mm μεταξύ της πηγής θερμότητας και του πάνελ.

### Μόνωση απο ακτινοβολία :

- Με μια στερεή μεταλλική θερμική ασπίδα με ελάχιστο πάχος 0,4 mm
- Αντανακλαστικό φύλλο ή ταινία

## **Close-out floor**

Όλα τα οχήματα πρέπει να έχουν κατάλληλα κατασκευασμένο δάπεδο, το οποίο μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ και ρόλος του είναι να διαχωρίζει τον οδηγό απο το οδόστρωμα. Εάν χρησιμοποιούνται πολλαπλά πάνελ, τα κενά μεταξύ τους δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 3 mm. Το δάπεδο πρέπει να εκτείνεται από την περιοχή των ποδιών έως το firewall και να αποτρέπει την είσοδο αντικειμένων στο χώρο του οχήματος. Τα πάνελ αυτά πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ένα στερεό, μη εύθραυστο υλικό.

## **Firewall**

Το Firewall πρέπει να χωρίζει το χώρο του οδηγού από όλα τα εξαρτήματα της τροφοδοσίας καυσίμου, του συστήματος λίπανσης, τα υγρά του συστήματος ψύξης και οποιοδήποτε σύστημα υψηλής τάσης. Πρέπει να εκτείνεται αρκετά προς τα πάνω και/ή προς τα πίσω, έτσι ώστε οποιοδήποτε σημείο λιγότερο από 100 mm κάτω από το κατώτερο μέρος του κράνους του ψηλότερου οδηγού δεν πρέπει να βρίσκεται σε ευθεία γραμμή με οποιοδήποτε μέρος του συστήματος καυσίμου, του συστήματος ψύξης ή του συστήματος λίπανσης.

Το Firewall πρέπει να είναι μια μη διαπερατή επιφάνεια κατασκευασμένη από άκαμπτο, πυρίμαχο υλικό. Επίσης πρέπει να έχει τέτοια στεγανοποίηση, ώστε να μην επιτρέπει τη διέλευση υγρών ειδικά στις πλευρές και το πάτωμα του cockpit. Επομένως δεν πρέπει να υπάρχουν οπές σε ένα firewall μέσω του οποίου να περνούν οι ζώνες ασφαλείας. Η διέλευση καλωδίων, συρμάτων κ.λπ. είναι επιτρεπτή εάν χρησιμοποιούνται ροδέλες (grommets) για τη στεγανοποίηση. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά πάνελ για την κατασκευή του firewall, αλλά πρέπει να στεγανοποιούνται οι ενώσεις τους.

## **Roll Bar Padding**

Οποιοδήποτε τμήμα του roll bar, των στηρίξεων του roll bar ή του σκελετού του οχήματος που μπορεί να έρθει σε επαφή με το κράνος του οδηγού, πρέπει να καλύπτεται από επένδυση με ελάχιστο πάχος 12 mm, που πληροί τις προδιαγραφές SFI 45.1 ή FIA 8857-2001.

## **Driver's Leg Protection**

Όλα τα κινούμενα συστήματα ανάρτησης και άλλες αιχμηρές άκρες μέσα στο χώρο που βρίσκεται ο οδηγός, μεταξύ του Front Hoop και ενός κατακόρυφου επιπέδου 100 mm πίσω από τα πεντάλ, πρέπει να είναι θωρακισμένα με ένα κάλυμμα κατασκευασμένο από συμπαγές υλικό. Αυτό γίνεται για να κρατηθούν τα πόδια του οδηγού μακριά από κινητά ή αιχμηρά εξαρτήματα. Τα κινούμενα εξαρτήματα περιλαμβάνουν ελατήρια, αμορτισέρ, βραχίονες, κ.α. Τα καλύμματα επί των συστημάτων ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης πρέπει να αφαιρούνται ώστε να επιτρέπουν την επιθεώρηση στα σημεία τοποθέτησης.

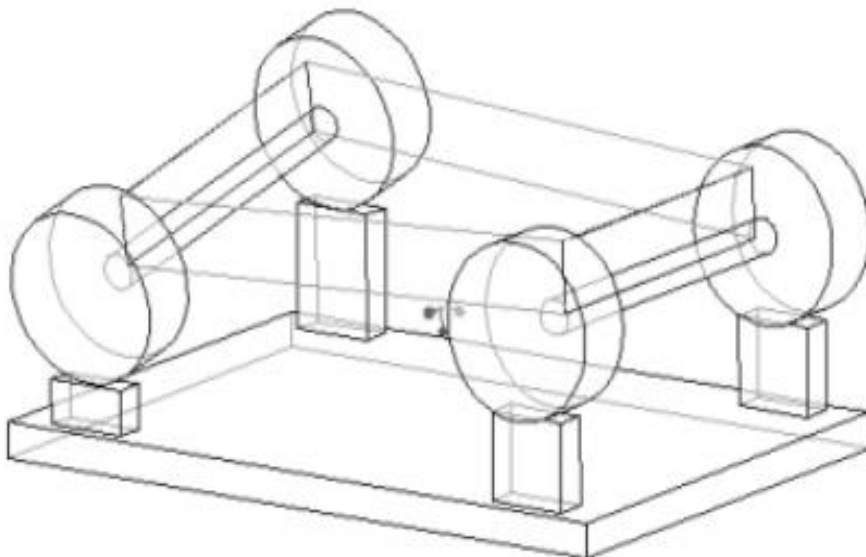
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Κατά το σχεδιασμό ενός πλαισίου είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πώς αυτό επηρεάζεται από τις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης που μπορεί να συμβούν κατά την οδήγησή του. Το πλαίσιο μπορεί να δεχθεί αρκετές διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης, είτε τοπικές φορτίσεις είτε ολικές φορτίσεις που επηρεάζουν όλο το πλαίσιο, καθώς και διαφορετικές διευθύνσεις φόρτισης. Κάποιες από αυτές θα περιγραφούν παρακάτω. [7]

#### 4.1 Στρεπτική κάμψη

Η στρεπτική κάμψη θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μελέτης κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός πλαισίου. Τα στρεπτικά φορτία επιχειρούν να στρέψουν το ένα άκρο του πλαισίου σε σχέση με το άλλο άκρο (σχήμα 4.1) επηρεάζοντας αρνητικά το χειρισμό του οχήματος.



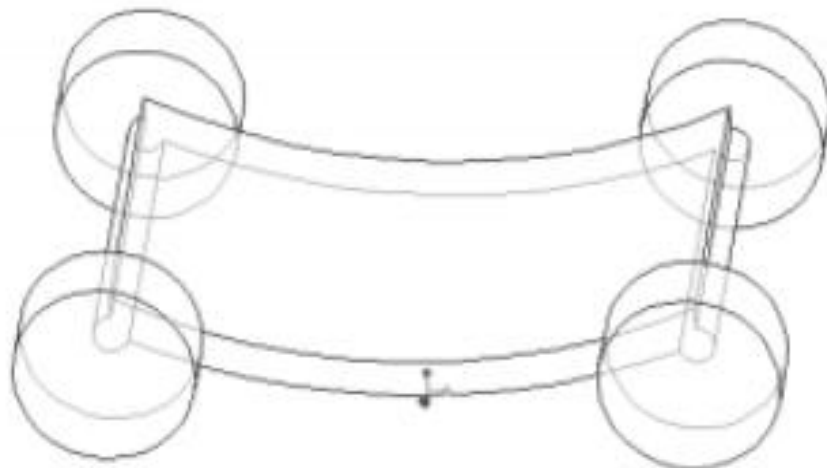
**Σχήμα 4.1 :** Αντίδραση του πλαισίου όταν ασκούνται στρεπτικά φορτία. [7]

Τα στρεπτικά φορτία προκύπτουν σε διαφορετικές καταστάσεις. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση στρεπτικού φορτίου είναι όταν ένας τροχός προσκρούει σε ένα εμπόδιο ενώ οι άλλοι τρεις παραμένουν στον αρχικό τους κατακόρυφο προσανατολισμό. Αυτό υποβάλλει μια ροπή στρέψης στο πλαίσιο, λόγω της προς τα πάνω κίνησης του τροχού που προσκρούει στο εμπόδιο. Αυτή η περίπτωση φορτίου είναι επίσης ο τυπικός τρόπος μέτρησης της στρεπτικής ακαμψίας ενός πλαισίου τόσο στην πραγματικότητα όσο και στις προσομοιώσεις των υπολογιστών. Η αντίσταση στη στρεπτική παραμόρφωση είναι εκφράζεται σε Nm / deg. [Milliken και Milliken 1995]

Είναι σημαντικό να εστιάζουμε στη στρεπτική ακαμψία του πλαισίου λόγω της υψηλής επιρροής του στη συμπεριφορά του οχήματος κατά τη διάρκεια παροδικών στροφών. Αυτή η συμπεριφορά είναι μια από τις πιο σημαντικές πτυχές της οδηγικής ικανότητας ενός αυτοκινήτου, ειδικά σε συνθήκες με συχνές αλλαγές κατεύθυνσης. Προκειμένου η ανάρτηση να κατανέμει φορτίο στα ελαστικά σε παροδικές στροφές, η σύνδεση μεταξύ του εμπρός και του πίσω μέρους του αυτοκινήτου πρέπει να είναι δύσκαμπτη. Ωστόσο, η δυσκαμψία σχετίζεται με το ποσότητα υλικού στην κατασκευή, η οποία είναι ανάλογη προς το βάρος. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται μια τιμή ακαμψίας έτσι ώστε να παρουσιάζει καλή συμπεριφορά το όχημα, με την ελάχιστη δυνατή αύξηση του βάρους.

## 4.2 Κατακόρυφη κάμψη

Η κατακόρυφη κάμψη σημαίνει ότι το σασί κάμπτεται υπό επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Αυτή η συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της διαμήκουσ μεταφοράς φορτίου που συμβαίνει κατά την ξαφνική αλλαγή ταχύτητας.



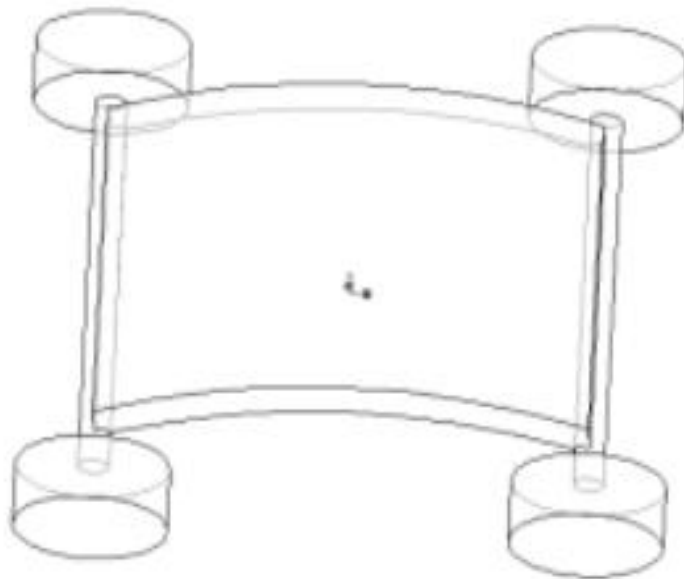
**Σχήμα 4.2 :** “κάθισμα” του σασί κατά την απότομη επιτάχυνση. [7]

Κατά το σχεδιασμό ενός πλαισίου, η κατακόρυφη κάμψη δεν αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα που πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς δεν θα επηρεάσει τα φορτία των τροχών. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι ένα σασί με καλή στρεπτική ακαμψία έχει επαρκή ακαμψία κατακόρυφα. [Milliken και Milliken 1995]

### 4.3 Πλευρική κάμψη

Η πλευρική κάμψη είναι τυπικά αποτέλεσμα των φυγόκεντρων δυνάμεων που συμβαίνουν όταν στρίβει το όχημα. Αυτές οι πλευρικές δυνάμεις τείνουν να αλλάξουν την διεύθυνση του οχήματος. Όταν το όχημα στρίβει τα ελαστικά ακολουθούν τη προβλεπόμενη κατεύθυνσή τους, δημιουργώντας μια ροπή που μεταφέρει κάποιο μέρος του φορτίου από τα εσωτερικά προς τα εξωτερικά ελαστικά. Η μεταφορά του φορτίου δεν έχει ως αποτέλεσμα μόνο την πλευρική κάμψη του σασί ( σχήμα 4.3), αλλά επίσης κάνει το αυτοκίνητο να κυλήσει. [Riley and George 2002]

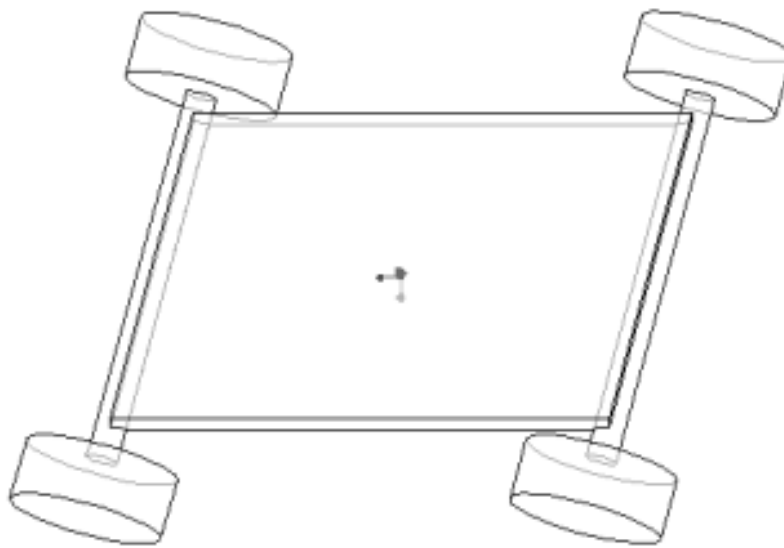
Η ποσότητα της κάμψης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το βάρος και το ύψος του αυτοκινήτου και την αντίσταση που προσφέρουν οι αναρτήσεις. [Smith 1978].



**Σχήμα 4.3** : Πλευρική κάμψη του πλαισίου κατά τη στροφή. [7]

### 4.4 Οριζόντια ρόμβωση

Η οριζόντια ρόμβωση εμφανίζεται συνήθως όταν η μία πλευρά του οχήματος έχει καλύτερη πρόσφυση από την άλλη. Σε αυτή τη περίπτωση, η αριστερή και η δεξιά πλευρά υπομένουν μια άνιση οριζόντια δύναμη, προκαλώντας παραμόρφωση του σκελετού σε σχήμα περισσότερο ρομβοειδές (σχήμα 4.4). [Riley και George 2002]



**Σχήμα 4.4 :** Οριζόντια παραμόρφωση του πλαισίου. [7]

Η ρόμβωση συνήθως συμβαίνει κάτω από έντονο φρενάρισμα, όταν ένα ελαστικό “κλειδώνει” ενώ τα υπόλοιπα συνεχίζουν να κυλούν. Μπορεί επίσης να προκληθεί από κάθετες παραλλαγές την επιφάνεια οδήγησης. Σε σύγκριση με την κατακόρυφη κάμψη και τη στρεπτική ακαμψία, οριζόντια η παγίδευση συχνά θεωρείται ότι είναι λιγότερο ανησυχητική. [Broad και Gilbert 2009]

#### **4.5 Περιπτώσεις Τοπικού Φορτίου**

Το πλαίσιο απορροφά όλα τα φορτία από την ανάρτηση, τον κινητήρα και άλλα μέρη του οχήματος. Συνεπώς, είναι σημαντικό να κατασκευαστεί με τρόπο που να επιτρέπει την αποτελεσματική απορρόφηση του φορτίου. Η εξασφάλιση ότι τα σημεία προσάρτησης των εξαρτημάτων του οχήματος τοποθετούνται σε δύσκαμπτα τμήματα του σασί μπορεί μερικές φορές να είναι πολύ δύσκολη. [Gaffney and Salinas 2004] Για παράδειγμα όταν σχεδιάζεται ένα σωληνοειδές πλαίσιο, ο κατασκευαστής μπορεί να αναγκαστεί να τοποθετήσει ένα κόμβο σωληνώσεων στο μέσο ενός σωλήνα, με αποτέλεσμα να παρουσιαστούν φορτία κάμψης σε αυτόν. Παρόλο που κάτι τέτοιο θα ήταν κακό για την απόδοση του πλαισίου, θα μπορούσε να είναι ένας συμβιβασμός που είναι απαραίτητος, δεδομένης της περιστάσης. [Costin and Phipps 1966] Σε γενικές γραμμές, οι περιπτώσεις τοπικής φόρτισης πρέπει να εξετάζονται κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

#### **4.6 Διαμήκης μεταφορά φορτίου**

Αυτή η μεταφορά φορτίου λαμβάνει χώρα στο διαμήκη επίπεδο του οχήματος καθώς αυτό επιταχύνει ή επιβραδύνει. Κατά την επιτάχυνση το βάρος του οχήματος μετατοπίζεται προς τα πίσω, μεταφέροντας περισσότερη δύναμη στα πίσω ελαστικά

και παρέχοντας περισσότερη πρόσφυση. Το αντίθετο συμβαίνει όταν επιβραδύνει και το φορτίο μεταφέρεται στο μπροστινό μέρος του οχήματος. [Milliken και Milliken 1995] Το σύνολο του βάρους παραμένει αμετάβλητο καθώς μεταφέρεται απλώς διαμήκως. Πολλές διαφορετικές πτυχές σχεδιασμού, όπως το κέντρο βάρους, το συνολικό βάρος και το μεταξόνιο, επηρεάζουν τη διαμήκη διαδρομή φορτίου. Η ελάχιστη διαμήκης μεταφορά φορτίου προσφέρει καλύτερη πρόσφυση για το χειρισμό, καθιστώντας δυνατή την αύξηση της επιτάχυνσης και τη μείωση του χρόνου επιβράδυνσης.

#### **4.7 Διαγώνια μεταφορά φορτίου**

Η διαγώνια μεταφορά φορτίων είναι η πιο συνηθισμένη και η πιο δύσκολη περίπτωση μεταφοράς φορτίου για μελέτη. Εμφανίζεται όταν συνδυάζονται οι πλευρικές και οι διαμήκεις δυνάμεις, για παράδειγμα όταν το όχημα στρίβει και επιταχύνει ή επιβραδύνει. Το μέγεθος του φορτίου που μεταφέρεται στη διαγώνια κατεύθυνση εξαρτάται από τη στρεπτική ακαμψία του πλαισίου καθώς και από τις αναρτήσεις, το μεταξόνιο και το πλάτος της τροχιάς. [Smith 1978]





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΥΛΙΚΑ

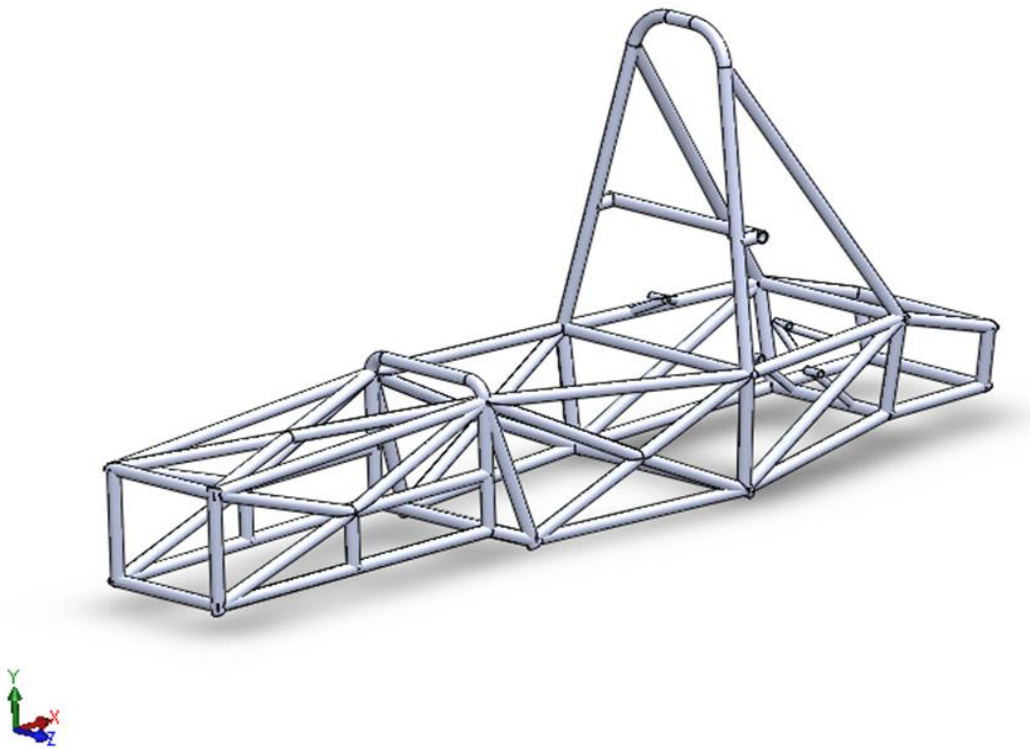
#### 5.1 Διαφορετικές δομές πλαισίου

Το κύριο μέλημα αυτής της πτυχιακής εργασίας αφορά την σωστή επιλογή των σύνθετων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη κατασκευή ενός οχήματος τύπου Formula SAE. Γενικότερα, σύνθετα ονομάζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη και έχουν ιδιότητες καλύτερες από αυτές των επιμέρους συστατικών τους. Πρωτού όμως αναλυθούν οι επιλογές των σύνθετων υλικών για μια τέτοια κατασκευή, πρέπει να αναφερθούν οι διαφορετικές δομές που μπορεί να παρουσιάζει ένα παρόμοιο όχημα.

Υπάρχουν διαφορετικές δομές πλαισίου που επιλέγονται για τη κατασκευή ενός τέτοιου οχήματος. Τρεις από αυτές χρησιμοποιούνται συχνότερα, το σωληνωτό πλαίσιο (space frame), το μονοκόμμο και το υβριδικό πλαίσιο (hybrid).

##### 5.1.1 Space frame

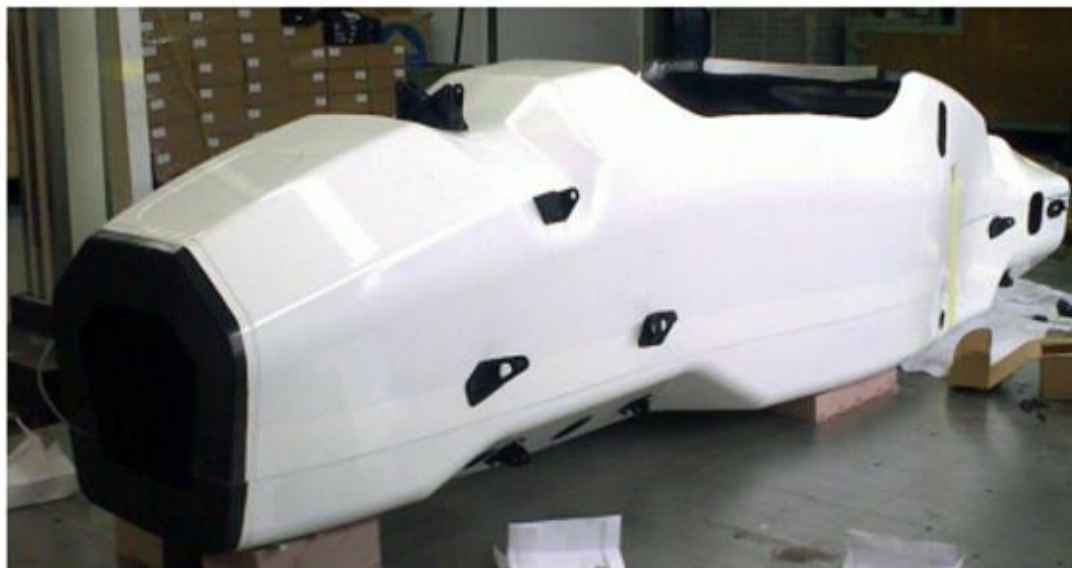
Η γενική αρχή του space frame απαιτεί τη κατασκευή του πλαισίου μόνο με τη χρήση ράβδων που φορτίζονται σε τάση ή συμπίεση. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συγκόλληση των μελών του πλαισίου μαζί στους κόμβους. Οι κόμβοι μπορούν να απορροφήσουν όλα τα φορτία, έχοντας μια δοκό στήριξης σε όλες τις φορτωμένες κατευθύνσεις. Επειδή τα μέλη του συγκεκριμένου πλαισίου φορτίζονται μόνο σε τάση και συμπίεση, αποφεύγεται η κάμψη, η οποία επηρεάζει τη στρεπτική ακαμψία.



**Εικόνα 5.1 :** Space frame δομή [ FP ONE 2018 ].

### 5.1.2 Monocoque

Το monocoque είναι μια ενιαία δομή η οποία καθορίζει το συνολικό σχήμα του οχήματος. Χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά ευρέως σε αεροσκάφη τη δεκαετία του 1930. Τα αγωνιστικά οχήματα της δεκατίας του 1960 που χρησιμοποίησαν monocoque, είχαν κυλινδρικά διαμορφωμένη κατασκευή για να βελτιώσουν τη στρεπτική ακαμψία. Το monocoque παρέχει τη κύρια δομική υποστήριξη και απορροφά όλα τα φορτία που μπορεί να επηρεάζουν το όχημα. Στα αγωνιστικά οχήματα σήμερα, ο πιο συνηθισμένος τύπος monocoque κατασκευάζεται από διάφορους τύπους σύνθετων υλικών, όπως για παράδειγμα ενισχυμένα πολυμερή με ίνες άνθρακα [ Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)] . Άλλα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι ίνες γυαλιού και αλουμίνιο. Τα πλεονεκτήματα του monocoque, ειδικότερα του σύνθετου monocoque, περιλαμβάνει στρεπτική ακαμψία και μικρό βάρος. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως ο δύσκολος και περίπλοκος σχεδιασμός και το υψηλό κόστος.



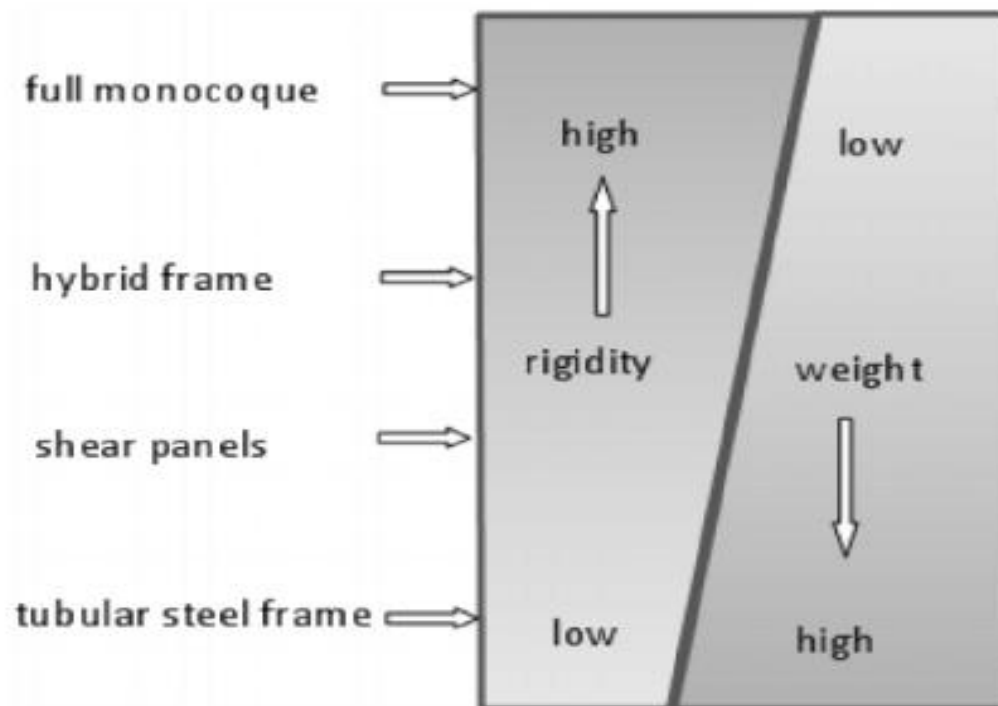
*Εικόνα 5.2 : Μονocoque δομή πλαισίου [7].*

### **5.1.3 Hybrid monocoque space frame**

Το hybrid monocoque space frame είναι ένας συνδυασμός από σύνθετο monocoque και ένα πίσω μέρος από space frame. Το πλεονέκτημα της κατασκευής είναι ότι συνδυάζει το χαμηλό βάρος και την υψηλή στρεπτική δυσκαμψία του monocoque με την εύκολη κατασκευή του space frame, που στις περισσότερες περιπτώσεις παρέχει καλύτερη πρόσβαση στο κινητήρα. Μερικές επιπλοκές που μπορούν να εμφανιστούν όταν χρησιμοποιείται υβριδικό πλαίσιο είναι στην ομαλή συνοχή των δύο τμημάτων και στη δυνατότητα πρόβλεψης των διαδρομών του φορτίου μεταξύ τους.



*Εικόνα 5.3 : Υβριδική δομή πλαισίου [7].*



**Σχήμα 5.1:** Τύποι πλαισίων και σχετικά πλεονεκτήματα [23].

## 5.2 Διαδικασία επιλογής υλικών

Η επιλογή υλικού είναι ένα από τα πιο σημαντικά και κρίσιμα βήματα στη δομική ή μηχανική διαδικασία σχεδιασμού. Αν δεν γίνει η επιλογή υλικού σωστά, ο σχεδιασμός ενδέχεται να παρουσιάζει κακή απόδοση, μπορεί να απαιτεί συχνή συντήρηση, επισκευή ή αντικατάσταση και εν τέλει, μπορεί να αποτύχει, προκαλώντας ζημιά, τραυματισμούς ή θανάτους. Η διαδικασία επιλογής υλικού απαιτεί τη γνώση των απαιτήσεων απόδοσης της εξεταζόμενης δομής ή του κατασκευαστικού στοιχείου.

## 5.3 Υλικά space frame

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για space frame πλαίσιο είναι διαφορετικοί τύποι χάλυβα οι οποίοι συνδυάζουν χαρακτηριστικά όπως αντοχή, στιβαρότητα, ευκολία στη διαμόρφωση και χαμηλό κόστος. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας τύπος χάλυβα ο οποίος έχει χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα και συνεπώς είναι σχετικά μαλακός. Μια δημοφιλής λύση ενός τέτοιου τύπου χάλυβα, είναι το CrMo4130.

Το κράμα 4130 είναι ένα ιδιαίτερα δημοφιλές υλικό στις βιομηχανίες αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής, λόγω της σχετικής ευκολίας της διαδικασίας

συγκόλλησης (σε σύγκριση με άλλα προϊόντα της ομάδας chromoly) και της αντίστασης σε φθορά που παρουσιάζει. Επειδή το προϊόν είναι απο την φύση του εξαιρετικά κατεργάσιμο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για δομικές σωληνώσεις όπου απαιτείται κοπή και διαμόρφωση χωρίς οποιαδήποτε σχετική απώλεια αντοχής. Παράδειγμα αποτελούν οι σκελετοί των ποδηλάτων, εκεί όπου χρειάζεται υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος. Ακόμα μια δημοφιλής χρήση του 4130 είναι σε μέρη αεροσκαφών, όπου το μικρό βάρος και η ακαμψία είναι σημαντικά χαρακτηριστικά. Το ομαλό φινίρισμα και η αντοχή στην οξείδωση αυτού του κράματος το καταστούν ιδανικό όταν η αντίσταση λόγω αέρα πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο, όπως στα πλαίσια των αεροσκαφών. Για το λόγο αυτό ο σωλήνας 4130 αναφέρεται πολλές φορές ως “aircraft tubing”, αφού αυτός είναι ο σκοπός για τον οποίο αναπτύχθηκε αρχικά. Οι μηχανικές ιδιότητες του κραματοποιημένου χάλυβα AISI 4130 περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 5.1 : Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα AISI4130.**

Properties	Metric	Imperial
<b>Tensile strength, ultimate</b>	560 MPa	81200 psi
<b>Tensile strength, yield</b>	460 MPa	66700 psi
<b>Modulus of elasticity</b>	190-210 GPa	27557- 30458 ksi
<b>Bulk modulus (Typical for steel)</b>	140 GPa	20300 ksi
<b>Shear modulus (Typical for steel)</b>	80 GPa	11600 ksi
<b>Poissons ratio</b>	0.27-0.30	0.27-0.30
<b>Elongation at break (in 50 mm)</b>	21.50%	21.50%
<b>Reduction of area</b>	59.6	59.60%
<b>Hardness, Brinell</b>	217	217
<b>Hardness, Knoop (Converted from Brinell hardness)</b>	240	240
<b>Hardness, Rockwell B (Converted from Brinell hardness)</b>	95	95
<b>Hardness, Vickers (Converted from Brinell hardness)</b>	228	228

Παρότι μπορούν να κατασκευαστούν σωληνώσεις απο σύνθετα υλικά, δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται στη δομή του πλαισίου ενός οχήματος τέτοιου τύπου, μιας και τα υλικά αυτά δεν μπορούν να συγκολληθούν στους επιμέρους κόμβους της δομής. Ο μοναδικός τρόπος για να ενωθούν στους κόμβους είναι μέσω

κάποιων ενώσεων, όπως φαίνονται στην εικόνα 5.4. Ωστόσο, ράβδοι από σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στις αναρτήσεις των μονοθεσίων, αφού μπορούν να συνδυάσουν το χαμηλό βάρος με την υψηλή αντοχή (εικόνα 5.5).



*Εικόνα 5.4 : Ενώσεις σωληνώσεων από σύνθετα υλικά. [21]*



*Εικόνα 5.5 : Μέρος ανάρτησης από carbon fiber [22].*

## 5.4 Υλικά monocoque

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη. Το ένα από τα συστατικά μέρη χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της ενίσχυσης. Στη πλειοψηφία τους, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή του πλαισίου ενός οχήματος τύπου Formula, αφορούν τη δομή του monocoque. Ένα monocoque με τις ιδιότητες που θα αναλυθούν στη συνέχεια, μπορεί να αποτελείται από ένα ενιαίο στερεό κομμάτι (solid shell), ή από μια ή πολλαπλές στρώσεις υλικού που περιβάλλουν ένα πυρήνα.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τα αγωνιστικά οχήματα στις μέρες μας είναι η χρήση πολλαπλών στρώσεων από CFRP γύρω από ένα πυρήνα, δημιουργώντας έτσι ένα υλικό τύπου σάντουιτς. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή monocoque.

**Πίνακας 5.2 :** Μηχανικές ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δομής monocoque. [7]

Material	Density, $\rho$ ( $g/cm^3$ )	Tensile strength, $\sigma$ (MPa)	Tensile Modulus, E (GPa)	Specific strength, $\sigma/\rho$	Specific modulus, $E/\rho$
Steel	7.8	1300	200	167	26
Aluminum	2.81	350	73	125	26
Titanium	4	900	108	225	27
Magnesium	1.8	270	45	150	25
E glass*	2.1	1100	75	524	36
Aramid	1.32	1400	45	1061	34
IM Carbon***	1.51	2500	151	1656	100
HM Carbon**	1.54	1550	212	1006	138

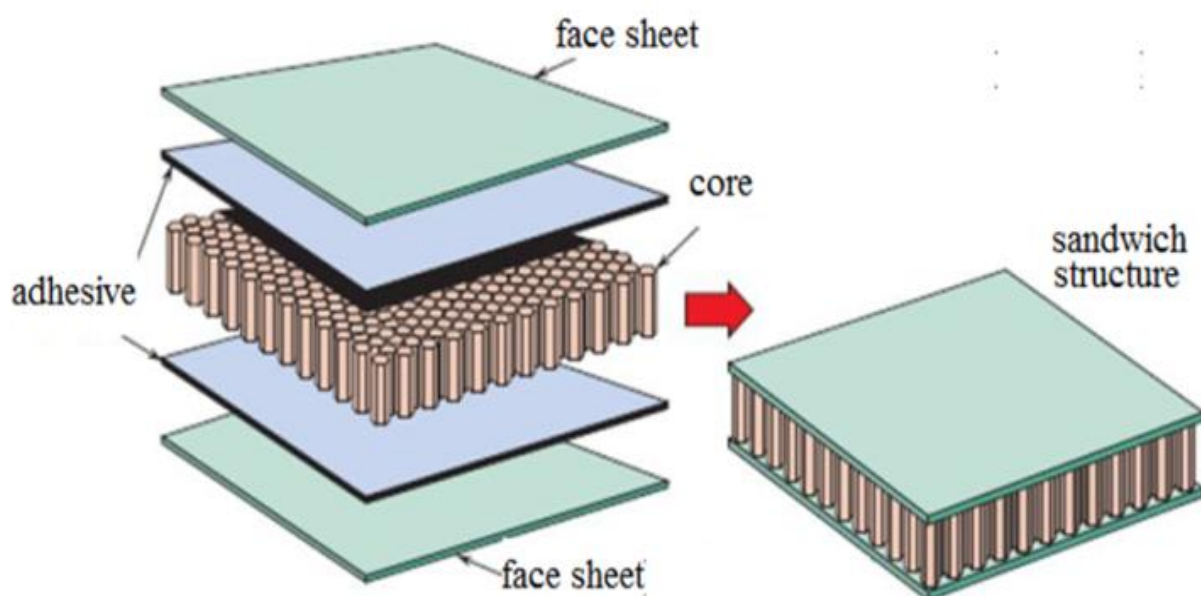
\* Το E glass (αλουμινο-βοριοπυριτικό γυαλί) είναι το πιο συνηθισμένο υλικό σε ίνες γυαλιού.

\*\* Υψηλής περιεκτικότητας carbon fibre

\*\*\* Μεσαίας περιεκτικότητας carbon fibre

Όσο πολλοί κατασκευαστές προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την ακαμψία στην αναλογία βάρους, στο πίνακα παραπάνω απεικονίζεται γιατί το CFRP είναι το κυρίαρχο υλικό. Προφανώς μια ευρεία ποικιλία άλλων παραγόντων πρέπει να εξεταστεί επίσης κατά την επιλογή ενός υλικού, αλλά το CFRP αποδίδει πολύ καλά σε εφαρμογές όπως το πλαίσιο ενός αγωνιστικού οχήματος. Με βάση τα γεγονότα που καθιστούν το CFRP ένα τόσο προτιμητέο υλικό για αγωνιστικά οχήματα, το υλικό θα μελετηθεί πιο διεξοδικά στη συνέχεια.

Όταν ένα μίγμα μήτρας/ινών συνδυάζεται με άλλο υλικό και δομή, δημιουργείται αυτό που είναι γνωστό ως δομή σάντουιτς. Αυτή η δομή αποτελείται από δύο πλευρές ενός προσώπου (face), όπως το CFRP, το οποίο περιβάλλει έναν πυρήνα (core) στην πάνω και κάτω πλευρά του, όπως στο σχήμα 5.2. Ένας καλός συνδυασμός προσώπου και πυρήνα δίνει μια δομή υψηλής αντοχής σε κάμψη.



**Σχήμα 5.2** : Τα μέρη μιας δομής sandwich.

Για να επιτευχθούν τα απαιτούμενα όρια απόδοσης, η δομή του υλικού του πυρήνα έχει μεγάλη σημασία και μπορεί να δημιουργηθεί με διάφορους τρόπους. Διαφορετικοί τύποι foam, είναι κοινές επιλογές υλικού πυρήνα. Ένας άλλος τρόπος κατασκευής του πυρήνα χρησιμοποιεί μια κυψελοειδή δομή, η οποία μπορεί να αποτελείται από διάφορα υλικά. Ο πυρήνας μπορεί επίσης να αποτελείται από ένα στερεό υλικό, όπως το ξύλο.

Οι κύριες ιδιότητες μιας δομής σάντουιτς που πρέπει να αποφασιστούν κατά το σχεδιασμό, περιλαμβάνουν το υλικό των ινών, το υλικό της μήτρας, το



προσανατολισμό των ινών και τις ιδιότητες του πυρήνα. Επομένως, το επόμενο κείμενο θα χωριστεί σε αυτές τις ενότητες.

## 5.5 Υλικό ινών

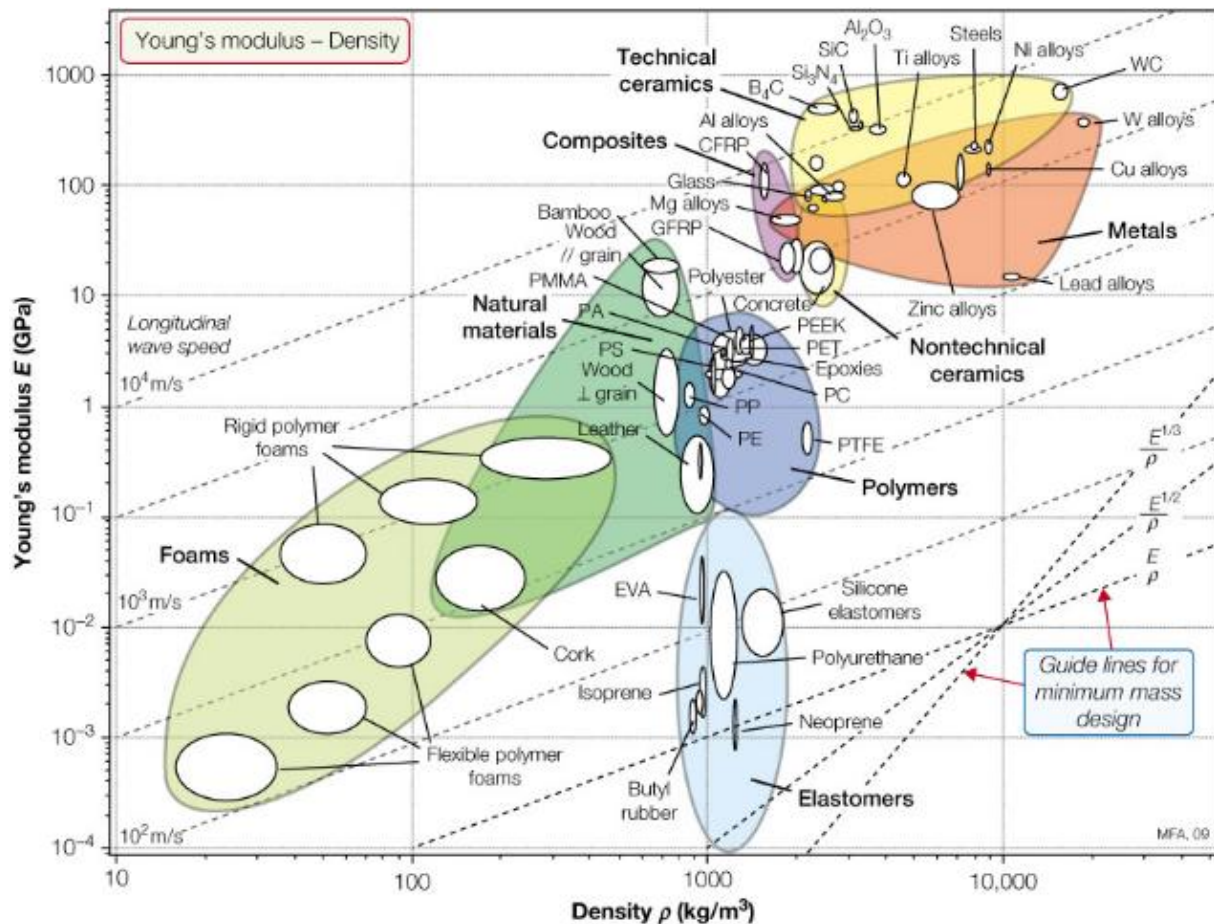
Κατά το σχεδιασμό του ποσοστού ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου, η επιλογή του σωστού υλικού είναι προφανώς μεγάλης σημασίας. Οι ιδιότητες του επιλεγμένου υλικού έχουν μεγάλη σημασία καθώς υπαγορεύουν την επιτυχία του σασί.

### 5.5.1 Διαφορετικά υλικά

Η πρώτη λεπτομέρεια που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του υλικού ίνας είναι η σκοπούμενη χρήση του συστατικού και οι περιπτώσεις φόρτισης στις οποίες θα εκτεθεί. Εάν επιδιώκεται μια υψηλή ακαμψία στην αναλογία βάρους, η αναλογία  $\frac{E}{\rho}$  πρέπει να μεγιστοποιηθεί. Ωστόσο, εάν το στοιχείο φορτώνεται κάτω από συμπίεση και κάμψη, η αναλογία που πρέπει να μεγιστοποιηθεί αλλάζει σε  $\frac{E^{1/2}}{\rho}$  και  $\frac{E^{1/3}}{\rho}$  αντίστοιχα. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποια υλικά στις περιπτώσεις φόρτισης που αναφέρθηκαν.

**Πίνακας 5.3 :** Λόγοι αντοχής υλικών σε διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης.[7]

Material	Tension ( $E/\rho$ )	Compression ( $E^{1/2}/\rho$ )	Bending ( $E^{1/3}/\rho$ )
Steel	26	1.8	0.7
Aluminum	26	3	1.5
Titanium	27	2.6	1.2
Magnesium	25	3.7	2
E glass	36	4.1	2
Aramid	34	5	2.7
IM Carbon	100	8.1	3.5
HM Carbon	138	9.5	3.9



**Εικονα 5.7:** Γραφική απεικόνιση της κατάταξης των υλικών σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) και της πυκνότητας ( $\rho$ ) [Ashby]

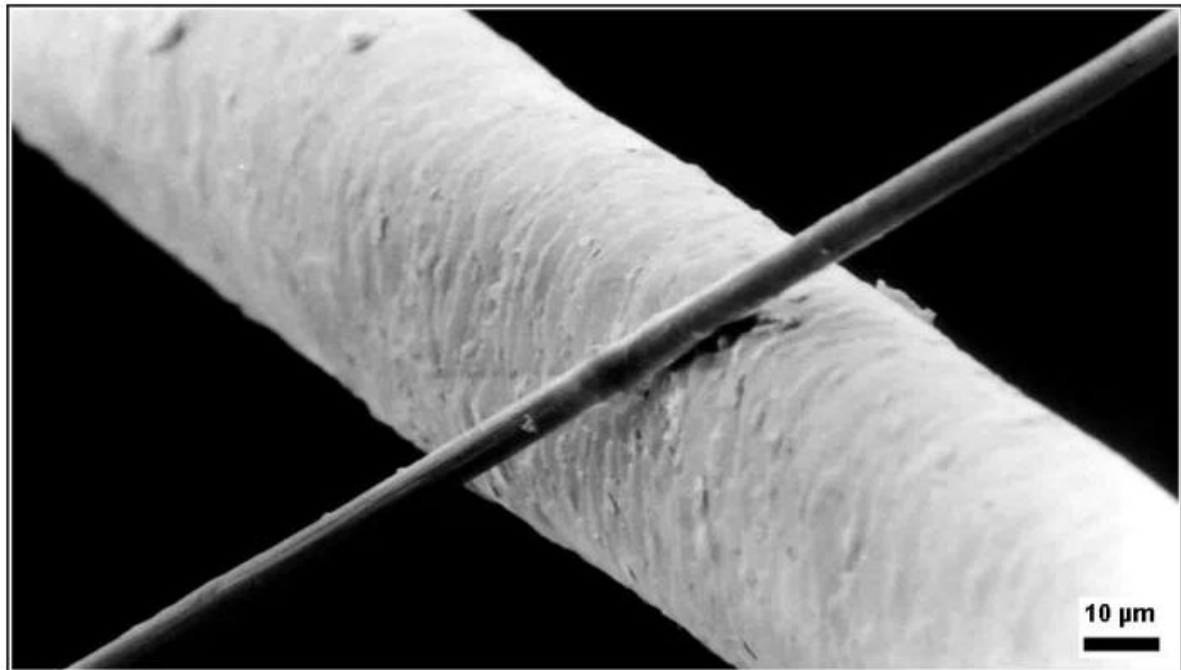
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν έως τώρα, το CFRP φαίνεται να είναι το καταλληλότερο υλικό για την κατασκευή του monopocoque σε αγωνιστικά οχήματα, ενώ αποτελεί και ένα από τα υλικά που κυριαρχούν στη παραγωγή των αγωνιστικών οχημάτων.

### 5.5.2 Ίνες άνθρακα

Το carbon fiber ή αλλιώς ανθρακόνημα, είναι ένα υλικό που ψηφίστηκε από την National Academy of Engineering ως ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα του 20ου αιώνα αλλά και ένα υλικό που μόλις τα τελευταία χρόνια άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως από την βιομηχανία αυτοκινήτου. Αποτελείται από ίνες άνθρακα διαμέτρου 5 έως 10  $\mu\text{m}$ , οι οποίες σχηματίζουν ένα θύσανο. Δομικό στοιχείο των ινών αυτών είναι το άτομο του άνθρακα.

Η πρώτη εφαρμογή των ανθρακονημάτων χρονολογείται στο 1879, όταν ο Thomas Edison μέσα από μια σειρά χημικών διεργασιών με πρώτη ύλη ίνες βαμβακιού και λεπτές επιμήκεις λωρίδες μπαμπού, «ανθρακοποίησε» τις πρώτες αυτές ύλες ώστε να παράγει ίνες καθαρού άνθρακα που χρησιμοποίησε στη συνέχεια για να την κατασκευή των νημάτων των λαμπτήρων πυράκτωσης. Το 1958 ο Roger

Bacore παρουσίασε τις πρώτες ίνες άνθρακα “υψηλών επιδόσεων” οι οποίες αργότερα άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ορισμένα μέρη του αμαξώματος στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και σε μονοθέσια της Formula 1.



*Εικόνα 5.8 : Ίνα άνθρακα (διατρέχει την εικόνα από κάτω αριστερά έως πάνω δεξιά) σε σύγκριση με μια ανθρώπινη τρίχα.*

### Κατηγορίες ινών άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Πρώτος τρόπος είναι με βάση το πρόδρομο υλικό των ινών. Οι ίνες άνθρακα ειδικότερα κατασκευάζονται από πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN), ίνες τεχνητού μεταξιού-κυτταρίνη (rayon) ή πίσσα. Οι ίνες PAN, που είναι η πιο δημοφιλής πρώτη ύλη για ίνες άνθρακα αυτή τη στιγμή, κατασκευάζονται σε τρία στάδια, με διαδοχικές φάσεις θερμικής και χημικής επεξεργασίας που ξεκινά από την οξείδωση τους σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 °C) και καταλήγει στην γραφίτιωση που συμβαίνει σε θερμοκρασίες που μπορεί να φτάσουν τους 2500-3000 °C. Αυτές οι ίνες συνδυάζονται στη συνέχεια με την εποξική ρητίνη για να δημιουργηθούν αυτά που ονομάζουμε απλοϊκά “άνθρακονήματα” – το συνθετικό υλικό.

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής τους σε εφελκυσμό, αποτελούν το δεύτερο τρόπο κατηγοριοποίησης, με τις εξής κατηγορίες :

- Πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας, Ultra High Modulus [  $E > 500$  GPa]. Παράγονται από ίνες που προέρχονται από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) και πίσσα.
- Υψηλού μέτρου ελαστικότητας, High Modulus [  $E$  μεταξύ 350-500 GPa] . Παράγονται από ίνες PAN και πίσσας.
- Μεσαίου μέτρου ελαστικότητας IM, Intermediate Modulus [  $E$  μεταξύ 200-350 GPa]

- Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, HT (High Tensile) [ $E < 100 \text{ GPa}$ , αντοχή σε εφελκυσμό  $> 3 \text{ GPa}$ ]
- Πολύ υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, Super High Tensile [αντοχή σε εφελκυσμό πάνω από  $4500 \text{ MPa}$ ]. Παρασκευάζονται από ίνες PAN.

Τέλος διακρίνονται ανάλογα με τη διαδικασία παρασκευής τους σε ίνες υψηλών θερμοκρασιών [HHT, High Heat Treated], ενδιάμεσων θερμοκρασιών [IHT, Intermediate Heat Treated] και χαμηλών θερμοκρασιών [LHT, Low Heat Treated].

## Ιδιότητες ινών άνθρακα

### Μηχανικές Ιδιότητες

Οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα οφείλονται στο πολύ ισχυρό δεσμό μεταξύ των ατόμων άνθρακα. Η ισχύς του δεσμού μεταξύ των ατόμων του πλέγματος ενός υλικού ελέγχει κατευθείαν την ελαστική συμπεριφορά του. Η υψηλή ενέργεια δεσμού μεταξύ των ατόμων C οφείλεται στην ομοιοπολική φύση τους, ενώ οι πολύ ασθενείς δεσμοί μεταξύ των ατόμων γειτονικών στιβάδων (δυνάμεις van der Waals) εξηγούν τη χαμηλή αντοχή των ινών στην εγκάρσια διεύθυνση του κρυσταλλικού πλέγματος.

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα αποτελούν πολύ σημαντικές ενδείξεις της ποιότητάς τους. Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό εξαρτώνται από τη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης. Για παράδειγμα, οι ίνες άνθρακα με τη βάση του PAN εμφανίζουν μέτρο ελαστικότητας  $200\text{-}400 \text{ GPa}$  κατά το διαμήκη εφελκυσμό της ίνας, ενώ κατά τον εγκάρσιο εφελκυσμό το μέτρο ελαστικότητας είναι  $5\text{-}25 \text{ GPa}$  και η αντοχή σε θλίψη είναι  $6 \text{ GPa}$ . Κατά κύριο λόγο το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό αναφέρονται κατά το διαμήκη άξονα της ίνας. Η μέτρηση της αντοχής σε εφελκυσμό των ινών άνθρακα αποτελεί κριτήριο για την επολογή τους στη κατασκευή σύνθετων υλικών με πολυμερικά ή ανόργανα συγκολλητικά μέσα και επίσης στην πρόβλεψη του χρόνου ζωής του σύνθετου υλικού. Επειδή οι ίνες άνθρακα εμφανίζουν δομή στοιβάδων, το περίβλημα της ίνας καθώς και ο πυρήνας της χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο βαθμό τάξης. Η αντοχή του πυρήνα καθώς και του περιβλήματος, είναι διαφορετικές κατά την εφαρμοζόμενη τάση. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τον προσανατολισμό των γραφιτικών κρυσταλλιτών της ίνας άνθρακα ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό προσδιορίζεται από τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων και τις δομικές ατέλειές της.

Ο τανυσμός κατά τη θερμική επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί σε ορισμένες δομικές αναδιατάξεις που δίνουν καλύτερη ομοιομορφία ( με την έννοια της επανάληψιμότητας) στις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Η αύξηση της αντοχής των ινών άνθρακα μπορεί να επιτευχθεί επουλώνοντας τις επιφανειακές ατέλειες. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορες διεργασίες περιλαμβανομένου της οξειδωσης με θέρμανση σε αέρα στους  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  για σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς και με ηπιότερες οξειδωτικές αλλά και ηλεκτροχημικές επεξεργασίες.

**Πίνακας 5.4 :** Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα με βάση το PAN. [16]

Ιδιότητες Ινών Ανθρακα	Χαμηλού Μέτρου Ελαστικότητας	Μεσαίου Μέτρου Ελαστικότητας	Υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	220-241	290-297	345-448
Αντοχή σε εφελκυσμό, MPa	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Επιμήκυνση στο όριο θραύσης, (%)	1.5-2.2	1.3-2.0	0.7-1.0
Ηλεκτρική αντίσταση, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1650	1450	900
Θερμική αγωγιμότητα, $\text{W/m} \cdot \text{K}$	20	20	50-80
Συντελεστής θερμικής διαστολής, (αξονική διεύθυνση, $10^{-6} \text{ K}$ )	-0.4	-0.55	-0.75
Πυκνότητα, $\text{g/cm}^3$	1.8	1.8	1.9
Περιεκτικότητα σε άνθρακα, (%)	95	95	+99
Διάμετρο τις ίνας, $\mu\text{m}$	6-8	5-6	5-8

**Πίνακας 5.5 :** Ιδιότητες ινών άνθρακα. [16]

Fibre	Type	Fibre diameter ( $\mu\text{m}$ )	Approximate HTT ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Failure Strain (%)	Density ( $\text{gcm}^{-3}$ )
T300	Standard modulus	7	1000-1300	3530	230	1.5	1.79
T800	Intermediate modulus	5	1500	5490	294	1.9	1.81
T1000	Intermediate modulus	4.5	1500	6370	294	2.1	1.80
M46J	High modulus	4.4	2350	4210	436	1.0	1.84
M55J	Ultra-high modulus	4.4	2500	3780	540	0.7	1.93
M60	Ultra-high modulus	4.4	2600	3920	588	0.7	1.94

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα μπορούν να βελτιωθούν επικαλύπτοντας την επιφάνειά τους με καρβίδια πυριτίου και ζirkονίου, ή νιτρίδια ζirkονίου και τιτανίου. Έχει αποδειχθεί ότι η αντοχή τους αυξάνεται εάν το

επικαλυπτικό δεν ξεπερνά σε πάχος τα 0.05 mm. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι ο σχηματισμός πυροάνθρακα ως επικαλυπτικού επιφέρει καλά αποτελέσματα. Η αντοχή της ίνας αυξάνεται κατά 10-30 % με εναπόθεση πυροάνθρακα 0.005-1 μm με θερμική επεξεργασία στους 1000-1400 °C σε ατμούς C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>, θείου ή οργανομεταλλικών ενώσεων. [14]

### **Χημική σταθερότητα**

Μια σημαντική ιδιότητα των ινών άνθρακα είναι η σταθερότητά τους σε διαβρωτικά μέσα. Η σταθερότητα των ινών άνθρακα έναντι οξέων είναι μεγαλύτερη για ίνες που έχουν παραχθεί με θερμική επεξεργασία σε υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτό γίνεται διότι αυξάνει η αναλογία των σταθερών δεσμών που σχηματίζονται. Επιπλέον, η δομή αυτή εμποδίζει τη διάχυση του χημικού μέσου προκειμένου να εισέλθει στη κύρια μάζα των μονοϊνών.

Σε θερμοκρασία δωματίου παρατηρείται μικρή μεταβολή στις ίνες άνθρακα ακόμα και μετά από εκτεταμένες περιόδους έκθεσης σε διαβρωτικά υγρά (<12 μήνες). Η σταθερότητα των ινών άνθρακα σε αυξημένες θερμοκρασίες ελαττώνεται, ειδικότερα εάν τα χημικά είναι οξειδωτικά. Σε αυξημένες θερμοκρασίες τα χημικά αυτά προάγουν την οξείδωση που οδηγεί στη καταστροφή του άμορφου άνθρακα [59]

Η χημική σταθερότητα των ινών άνθρακα εξαρτάται από το αρχικό πολυμερές. Έτσι, ίνες που παράγονται σε θερμοκρασίες θερμικής επεξεργασίας 900 °C με βάση την αναγεννημένη κυτταρίνη έχουν υψηλότερη χημική σταθερότητα συγκριτικά με τις αντίστοιχες με βάση το PAN. Η χημική δραστηριότητα των ινών άνθρακα εξαρτάται σημαντικά από τα δομικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται από το θερμοκρασιακό προφίλ κατά την παραγωγή τους και σε μικρότερο βαθμό από τις ιδιότητες και τη δομή του πρόδρομου πολυμερούς.

### **Θερμοφυσικές ιδιότητες**

Οι ίνες άνθρακα έχουν υψηλή θερμική αντίσταση. Σε αδρανή ατμόσφαιρα η αντοχή καθώς και το μέτρο ελαστικότητάς τους, παραμένουν αμετάβλητα μέχρι και τους 1500°C, ενώ παρουσία αέρα η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία τα χαρακτηριστικά της δομής, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες παραμένουν αμετάβλητες, είναι 300 °C για τις μη γραφίτικές ίνες άνθρακα και 400 °C για τις γραφίτικές.

Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι για να αυξηθεί η θερμική ανθεκτικότητα των ινών άνθρακα. Ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους είναι ο σχηματισμός ενός προστατευτικού επιστρώματος χρησιμοποιώντας δύστηκτα υλικά ανθεκτικά στην οξείδωση. Ένας από τους τρόπους επικάλυψης των ινών είναι η εναπόθεση πυράνθρακα από την αέρια φάση κατά την αποικοδόμηση μεθανίου ή κάποιου άλλου υδρογονάνθρακα. Το επίστρωμα αυτό βελτιώνει τις μηχανικές αντοχές των επικαλυμμένων υλικών, αλλά και την ικανότητά τους να ανθίστανται στην οξείδωση. [15]

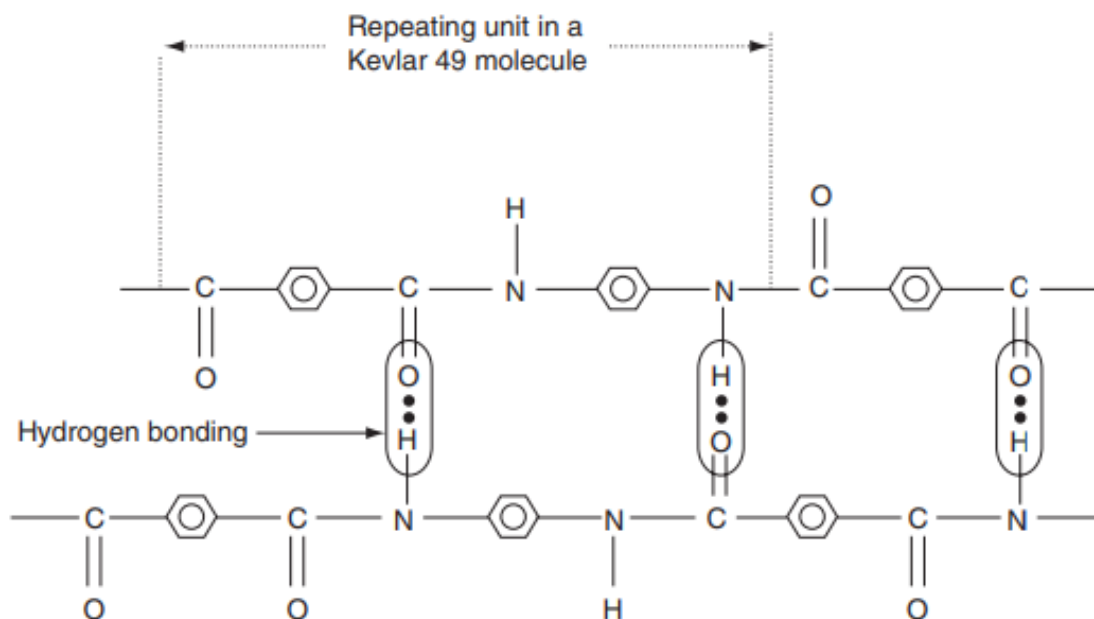
Εάν προτιμηθούν ιδιότητες άλλες από εκείνες που προσφέρουν οι ίνες άνθρακα (carbon fibre), μια σχετικά κοινή εναλλακτική στην κατασκευή αγωνιστικών οχημάτων

είναι η χρήση πολυμερών ινών (polymeric fibre). Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πολυμερή με ίνες είναι το αραμίδιο (aramid) και το zylon.

### 5.5.3 Ίνες αραμιδίου

Οι ίνες αραμιδίου είναι πολυκρυσταλλικές αρωματικές ίνες πολυαμιδίου που έχουν τη χαμηλότερη πυκνότητα και την υψηλότερη αναλογία αντοχής σε εφελκυσμό προς το βάρος, μεταξύ των ενισχυτικών ινών. Το αραμίδιο είναι συνήθως γνωστό με την εμπορική επωνυμία του, Kevlar. Οι ίνες αραμιδίου είναι κατάλληλες για χρήση όταν η ανθεκτικότητα έχει μεγάλη σημασία, καθώς η ανθεκτικότητά τους σε γενικές γραμμές είναι καλύτερη από εκείνη των ινών άνθρακα. Έχουν χαμηλότερη πυκνότητα από τις ίνες άνθρακα και μπορούν επίσης να διαμορφωθούν σε σύνθετα υλικά χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές. Επίσης έχουν αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής στη διαμήκη κατεύθυνση, όπως οι ίνες άνθρακα, η οποία χρησιμοποιείται στη σχεδίαση σύνθετων πάνελ χαμηλής θερμικής διαστολής. Τα κύρια μειονεκτήματα των σύνθετων ενισχυμένων με ίνες αραμιδίου, είναι η χαμηλή αντοχή σε θλίψη και η δυσκολία τους στη κοπή και τη μηχανική κατεργασία. Επομένως η κατασκευή της πλειονότητας ενός πλαισίου από ίνες αραμιδίου δεν συνιστάται, δεδομένου ότι έχουν πολύ χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη από τις ίνες άνθρακα. [20]

Η μοριακή δομή των ινών αραμιδίου, όπως οι ίνες Kevlar 49, είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 5.3. Η επαναλαμβανόμενη μονάδα στα μόρια της περιέχει μια αμιδική (-NH) ομάδα (η οποία επίσης βρίσκεται στα νάυλον) και έναν αρωματικό δακτύλιο. Ο αρωματικός δακτύλιος δίνει υψηλότερη ακαμψία στη αλυσίδα καθώς και καλύτερη χημική και θερμική σταθερότητα σε σχέση με άλλες εμπορικές οργανικές ίνες, όπως το νάυλον.



Σχήμα 5.3 : Μοριακή δομή της ίνας Kevlar 49. [20]

Αυτό οδηγεί στο γεγονός ότι οι ίνες αραμιδίου χρησιμοποιούνται κυρίως όταν οι καλές ιδιότητες κρούσης και τριβής προτιμώνται. Μια χαρακτηριστική περιοχή για τη χρήση των ινών αραμιδίου είναι κάτω από το όχημα, έτσι ώστε να αποτρέπεται η διείσδυση συντριμμιών στο χώρο του οδηγού. Επίσης, η χρήση του Kevlar είναι υποχρεωτική μέσα στη δομή των εμπρόσθιων πτερυγίων και άλλων αεροδυναμικών εξαρτημάτων στο μπροστινό μέρος ενός μονοθέσιου Formula 1. Αυτό γίνεται με σκοπό τη μείωση της πιθανότητας βλάβης των ελαστικών από αιχμηρά θραύσματα σύνθετων εξαρτημάτων, που έχουν υποστεί βλάβη από κρούσεις.

## Χημικές ιδιότητες

Όλα τα αραμίδια περιέχουν δεσμούς αμιδίου που είναι υδρόφιλοι. Ωστόσο, δεν απορροφούν την ίδια υγρασία όλα τα προϊόντα αραμιδίου. Για παράδειγμα, η ίνα PPD-T (πολυ-φαινυλενο-τερεφθαλαμίδιο) έχει πολύ καλή αντίσταση σε πολλούς οργανικούς διαλύτες και άλατα, αλλά τα ισχυρά οξέα μπορούν να της προκαλέσουν σημαντική απώλεια αντοχής. Οι ίνες αραμιδίου είναι δύσκολο να βαφούν λόγω της σύνθεσής τους. Επίσης, η αρωματική φύση του π-αραμιδίου είναι υπεύθυνη για οξειδωτικές αντιδράσεις όταν εκτίθεται σε υπεριώδες φως, που οδηγεί σε αλλαγή χρώματος και απώλεια ορισμένης αντοχής.

## Θερμικές ιδιότητες

Οι ίνες αραμιδίου δεν τήκονται με τη συμβατική έννοια, αλλά αποσυντίθενται. Καίγονται μόνο με δυσκολία λόγω των περιορισμένων τιμών του δείκτη οξυγόνου [Limited Oxygen Index (LOI)]. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε 300 βαθμούς Celsius ορισμένοι τύποι αραμιδίων μπορούν ακόμα να διατηρήσουν περίπου το 50% της δύναμης τους. Επιπλέον, τα αραμίδια παρουσιάζουν υψηλή κρυσταλλικότητα που έχει ως αποτέλεσμα αμελητέα συρρίκνωση σε υψηλή θερμοκρασία.

---

### 5.5.4 Ίνες Zylon (PBO)

Το PBO (Poly (p-phenylene-2, 6-benzobisoxazole)) είναι πολυμερές υγρών κρυστάλλων που εφευρέθηκε και αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1980, με την εμπορική ονομασία Zylon. Όπως το Kevlar, έτσι και το Zylon, χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές που απαιτούν πολύ μεγάλη αντοχή με εξαιρετική θερμική σταθερότητα. Οι ρακέτες του τένις, οι ρακέτες του πινγκ πονγκ, αλεξίσφαιρα γιλέκα, formula 1 και δομές διαστημικών εξοπλισμών, είναι μερικές από τις πιο γνωστές εφαρμογές αυτού του υλικού. [17]

Το Zylon είναι μια χρυσοκίτρινη ίνα με αρχικό συντελεστή που είναι σημαντικά υψηλότερος από άλλα νήματα υψηλής αντοχής, συμπεριλαμβανομένων των



αραμιδίων, τις ισχυρότερες τεχνητές ίνες στον κόσμο, με τέσσερα εξαιρετικά χαρακτηριστικά:

- Εξαιρετική αντοχή σε εφελκυσμό - είναι ισχυρότερη από το χάλυβα και διπλάσια από του Kevlar.
- Εξαιρετικά υψηλή αντοχή των ινών σε εφελκυσμό - επίσης διπλάσιο από το Kevlar.
- Αντοχή στη φλόγα - θα καεί μόνο όταν εκτίθεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες που αποτελούνται από τουλάχιστον 68% οξυγόνο, μια κατάσταση που δεν συναντάται φυσιολογικά στη γήινη ατμόσφαιρα.
- Απίστευτη θερμική σταθερότητα - θα αποσυντεθεί μόνο σε θερμοκρασίες άνω των 800°C (1470 ° Fahrenheit).



**Εικόνα 5.9 :** Ύφασμα zylon διαγώνιας πλέξης 2x2. [26]

### **Βασικές ιδιότητες**

Το zylon είναι η επόμενη γενιά super fiber με αντοχή σχεδόν διπλάσια από εκείνη των ινών αραμιδίου. Το Zylon εμφανίζει υψηλότερη θερμοκρασία αποσύνθεσης κατά 100°C από τις ίνες αραμιδίου. Ο περιοριστικός δείκτης οξυγόνου είναι 68, ο οποίος είναι ο υψηλότερος μεταξύ των οργανικών ινών.

Υπάρχουν δύο τύποι ινών, AS (as spun) και HM (high modulus). Οι HM διαφέρουν από τις AS στην αντοχή και κάποιες άλλες ιδιότητες.

**Πίνακας 5.6 :** Μηχανικές ιδιότητες ινών ZYLON AS και ZYLON HM.

	ZYLON® AS	ZYLON® HM
Filament decitex	1.7	1.7
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.56
Tensile Strength (cN/dtex)	37	37
(GPa)	5.8	5.8
(kg/mm <sup>2</sup> )	590	590
Tensile Modulus (cN/dtex)	1150	1720
(GPa)	180	270
(kg/mm <sup>2</sup> )	18000	28000
Elongation at break(%)	3.5	2.5
Moisture regain(%)	2.0	0.6
Decomposition Temp.(°C)	650	650
LOI	68	68
Thermal expansion coefficient	-	-6x10 <sup>-6</sup>

### Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων με άλλες ίνες

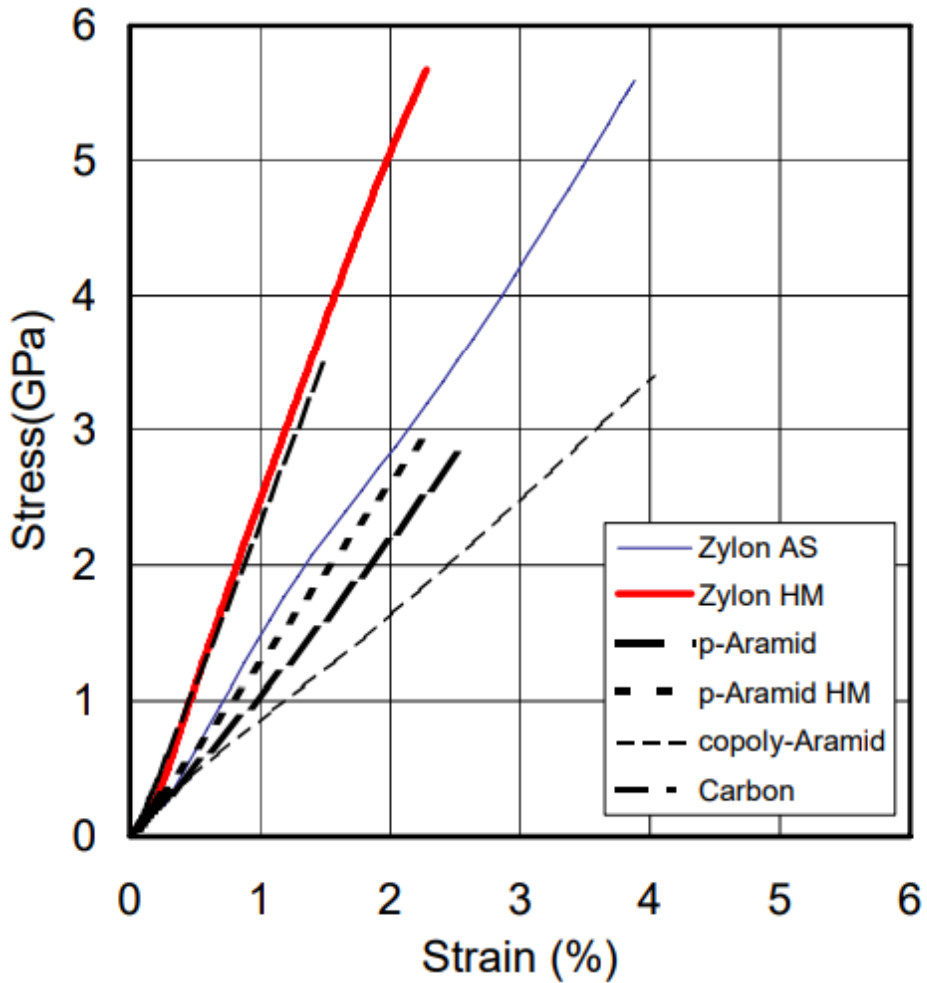
Το zylon έχει την υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού και τον υψηλότερο συντελεστή εφελκυσμού μεταξύ των ινών υψηλών επιδόσεων.

**Πίνακας 5.7 :** Σύγκριση ινών zylon με άλλες ίνες.

	Tenacity		Modulus		Elonga- tion	Density	Moisture Regain	LOI	Heat Resistance*
	cN/dtex	GPa	cN/dtex	GPa	%	g/cm <sup>3</sup>	%		C
<b>Zylon® AS</b>	37	5.8	1150	180	3.5	1.54	2.0	68	650
<b>Zylon® HM</b>	37	5.8	1720	270	2.5	1.56	0.6	68	650
p-Aramid(HM)	19	2.8	850	109	2.4	1.45	4.5	29	550
m-Aramid	4.5	0.65	140	17	22	1.38	4.5	29	400
Steel Fiber	3.5	2.8	290	200	1.4	7.8	0		
HS-PE	35	3.5	1300	110	3.5	0.97	0	16.5	150
PBI	2.7	0.4	45	5.6	30	1.4	15	41	550
Polyester	8	1.1	125	15	25	1.38	0.4	17	260

\*Melting or Decomposition Temperature

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του zylon σε σύγκριση με άλλες ίνες υψηλής απόδοσης φαίνονται παρακάτω.



**Εικόνα 5.10 :** Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του zylon σε σύγκριση με άλλες ίνες υψηλής απόδοσης.

### Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη του ZYLON είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού, όπως και στην αραμιδική ίνα.

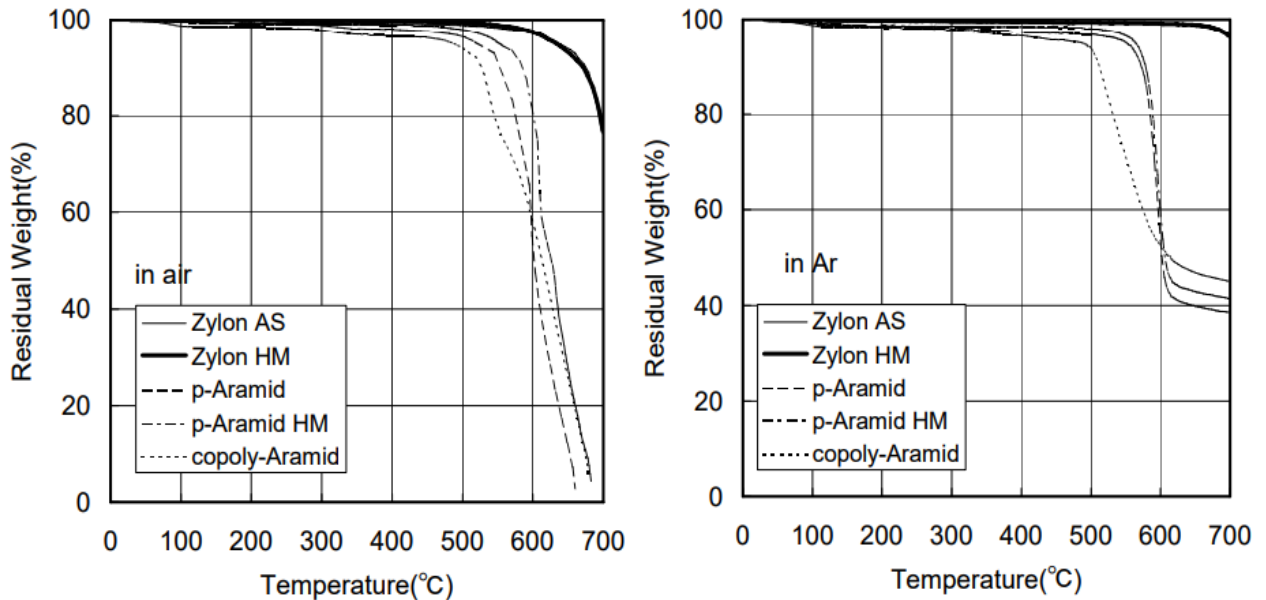
**Πίνακας 5.8 :** Αντοχή των ινών zylon σε θλίψη και εφελκυσμό σε σύγκριση με τις ίνες αραμιδίου.

Sample	Critical Strain (%)	Tensile Modulus (GPa)	Compressive Strength (GPa)
ZYLON AS	0.217	216	0.469
ZYLON HM	0.227	247	0.561
Aramid HM	0.633	118	0.749

## Θερμικές ιδιότητες

### Θερμοκρασία αποσύνθεσης

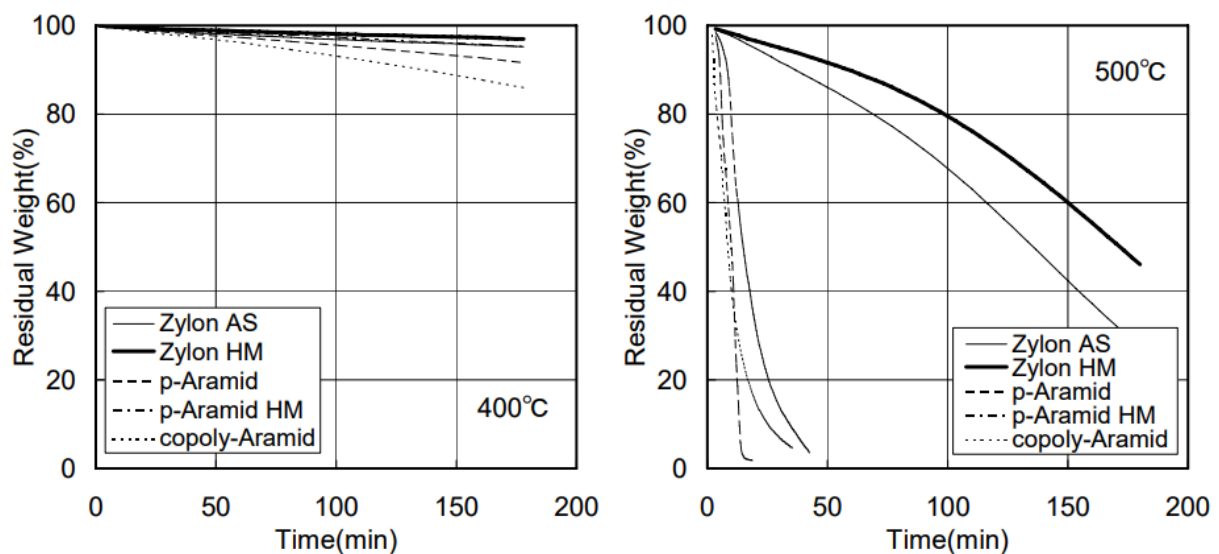
Το ZYLON έχει υψηλότερη θερμοκρασία αποσύνθεσης κατά 100 °C από τις ίνες αραμιδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται θερμικά γραφήματα βαρυμετρικής ανάλυσης σε αέρα και το αέριο αργόν. Ο ρυθμός θέρμανσης είναι 20 °C / λεπτό.



Εικόνα 5.11 : Θερμικά γραφήματα βαρυμετρικής ανάλυσης σε αέρα και αργόν.

### Ισοθερμική απώλεια βάρους

Σημαντική διαφορά συμπεριφοράς απώλειας βάρους παρατηρείται στους 500 °C μεταξύ του zylon και των ινών αραμιδίου.

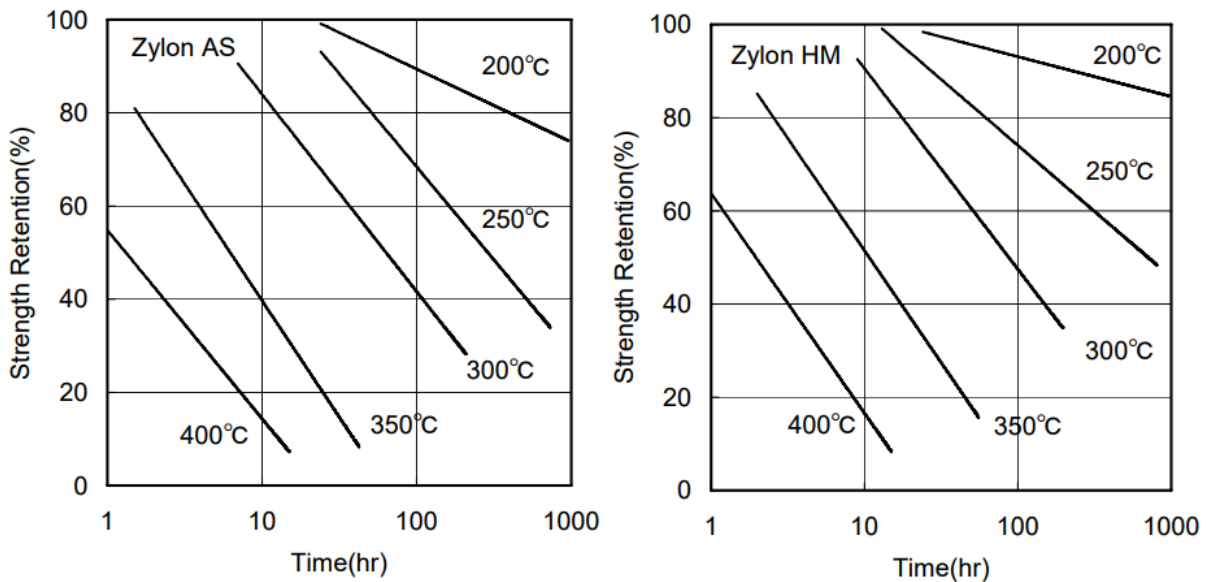


Εικόνα 5.12 : Καμπύλες μεταβολής βάρους του zylon και των ινών αραμιδίου σε σχέση με το χρόνο, για θερμοκρασίες 400°C και 500°C.

## Διατήρηση της αντοχής μετά από θερμική επεξεργασία

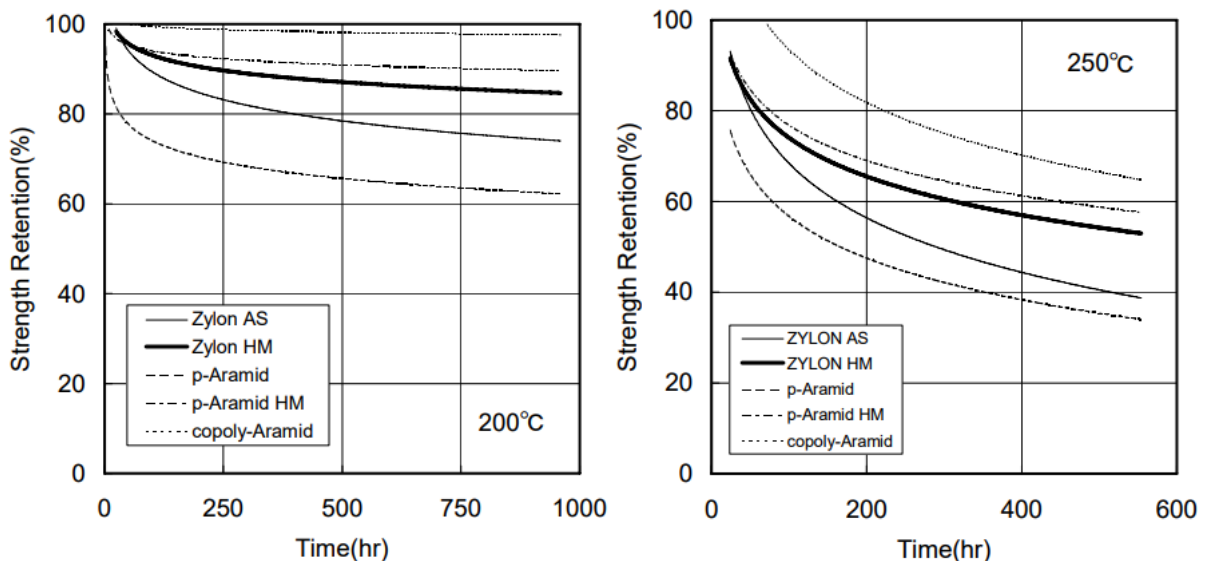
Αυτά τα σχήματα δείχνουν την επίδραση της θερμικής επεξεργασίας σε αέρα επί της παραμένουσας αντοχής.

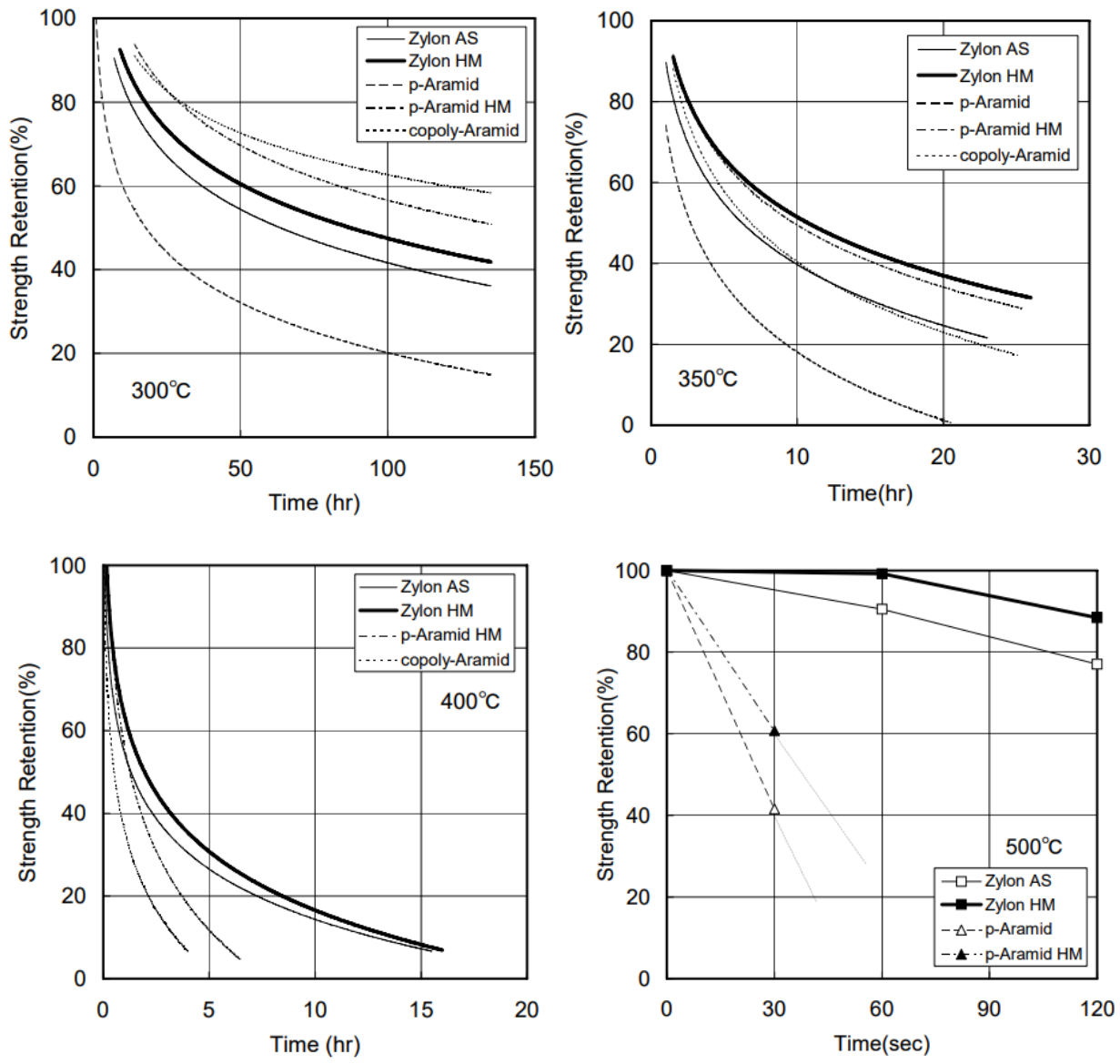
Το ZYLON HM παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερη αντίσταση στη θερμότητα από το ZYLON AS.



**Εικόνα 5.13** : Η επίδραση της θερμικής επεξεργασίας σε αέρα επί της παραμένουσας αντοχής για Zylon AS και Zylon HM.

Η συγκράτηση της αντοχής μετά από θερμική επεξεργασία συγκρίνεται με τις ίνες αραμιδίου σε αρκετές θερμοκρασίες.





**Εικόνα 5.14 :** Ποσοστό παραμένουσας αντοχής μετά απο διαφορετικές τιμές θερμικής επεξεργασίας.

## Αντοχή στη φλόγα

Το zylon παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή αντοχή στη φλόγα. Σε δοκιμή κατακόρυφης φλόγας, το μήκος της καύσης είναι σχεδόν μηδέν.

**Πίνακας 5.9 :** Η αντοχή σε φλόγα του Zylon σε σύγκριση με των ινών αραμιδίου.

	Zylon		p-Aramid		m-Aramid	
	warp	fill	warp	fill	warp	fill
Char length(cm)	<0.5	<0.5	3	2	6	6
After flame(sec)	0	0	0	0	0	0
After glow(sec)	1	1	16	16	2	2
LOI	68		29		29	

Plain woven fabrics with 20's spun yarn

## Προϊόντα καύσης

Τα παραγόμενα αέρια σε θερμοκρασία 750 ° C μετρήθηκαν σύμφωνα με τα Ιαπωνικά Βιομηχανικά πρότυπα (JIS). Η ποσότητα τοξικών αερίων όπως τα HCN, NOx και SOx από το zylon είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με τις ίνες αραμιδίου.

**Πίνακας 5.10 :** Σύγκριση ποσοτήτων τοξικών αερίων που παράγονται απο θέρμανση του zylon και των ινών αραμιδίου αντίστοιχα.

	Temp.	CO	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HCN	HCl	NOx	SOx
Zylon	500	6.9	35.8	0.35	1.48	<0.01	0.15	<0.01
	750	1>	2660	0.05>	0.57	<0.01	0.16	0.1
p-Aramid	500	107	1230	3.95	14.8	<0.01	1.00	1.40
	750	112	2010	0.05>	25.1	<0.01	0.47	1.04

mg/g

## Αντοχή στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ισχύς του zylon μειώνεται με την έκθεσή του στο ηλιακό φως. Η αντοχή του στο φως αξιολογήθηκε με τη χρήση μετρητή Xenon για συνθήκες φωτός και παρατηρήθηκε ότι μειώνεται απότομα στο αρχικό στάδιο της έκθεσης. Για το λόγο αυτό τα τελικά προϊόντα του zylon για υπαίθρια χρήση πρέπει να προστατεύονται με υλικά επίστρωσης. Η παραμένουσα αντοχή του zylon μετά από έκθεση στο φως της ημέρας είναι περίπου 35%.

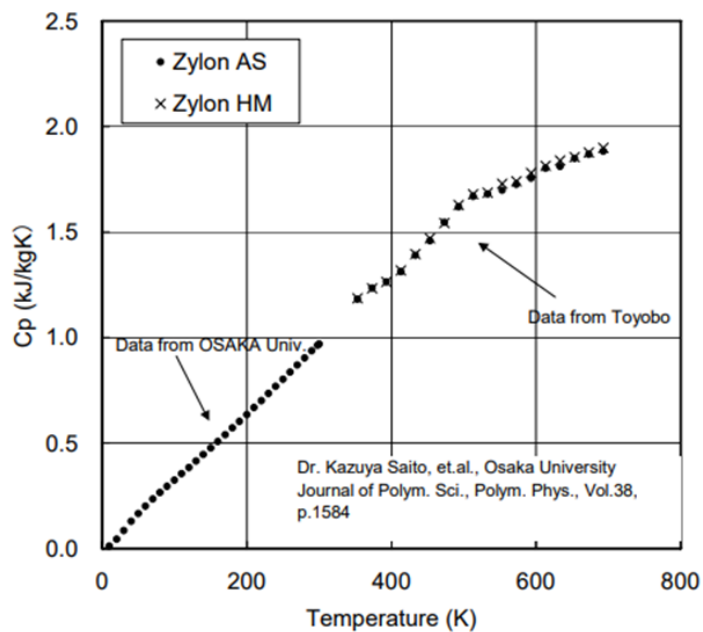
## Χημική αντοχή

### Οργανικά μέσα

Το zylon είναι σταθερό με τα περισσότερα από τα οργανικά μέσα. Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται το ποσοστό της παραμένουσας αντοχής, μετά απο την εμβάπτιση για 500 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου σε διαφορετικά οργανικά μέσα.

**Πίνακας 5.11 :** Το ποσοστό της παραμένουσας αντοχής των δύο τύπων zylon, μετά απο την εμβάπτιση για 500 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου σε διαφορετικά οργανικά μέσα.

Chemicals	Strength retention(%) after immersion for 500 hrs at room temperature	
	Zylon AS	Zylon HM
Methylethylketone	100	99
Dimethylformamide	100	97
Methanol	100	99
Gasoline	100	95
Brake Fluid	100	96



**Εικόνα 5.15 :** Η μεταβολή του συντελεστή θερμοχωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία.



### 5.5.5 Εναλλακτικά υλικά ινών

Άλλοι τύποι πολυμερών ινών που χρησιμοποιούνται σε σασί αγωνιστικών αυτοκινήτων, που έχουν εξαιρετική αντοχή και χαμηλή πυκνότητα, είναι οι συνεχείς ίνες πολυαιθυλενίου με εμπορικά ονόματα Dyneema και Spectra. Ωστόσο, όπως μπορεί να γίνει κατανοητό, δεν υπάρχει “ιδανικό υλικό” χωρίς μειονεκτήματα. Αυτό ισχύει επίσης για το Dyneema και το Spectra, καθώς οι άριστες ιδιότητές τους ισχύουν μόνο κάτω από τους 90 °C. [7]

Δεδομένου ότι υπάρχουν προφανώς περισσότερα από ένα κατάλληλα υλικά για την κατασκευή του πλαισίου ενός αγωνιστικού οχήματος και καθένα από αυτά παρέχει διαφορετικές ιδιότητες που μπορούν να βελτιώσουν τη συμπεριφορά του οχήματος, είναι σημαντικό να μην παρασυρθεί κάποιος στην προσπάθεια να βρεί το κατάλληλο. Οι πιο έμπειροι κατασκευαστές τέτοιων οχημάτων, επισημαίνουν τη σημασία της χρήσης όσο το δυνατόν λιγότερων διαφορετικών υλικών, υποστηρίζοντας ότι αυτό επιτρέπει καλύτερο ποιοτικό έλεγχο και πληρέστερη κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών.

Είναι επίσης σημαντικό μια ομάδα κατασκευαστών να μην επικεντρωθεί αποκλειστικά στην προσπάθεια να μεγιστοποιήσει την ακαμψία σε σχέση με το βάρος του οχήματος, αλλά να προβεί σε τέτοιο σχεδιασμό και επιλογή υλικών, έτσι ώστε να καλύπτει όλες τις καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το όχημα (π.χ. επισκευή κάποιου μέρους του).

### 5.6 Υλικό μήτρας

Κατά τη σχεδίαση ενός σύνθετου πλαισίου είναι σημαντικό να μην διακυβεύεται η επιλογή του υλικού μήτρας. Ακόμη και οι καλύτερες ίνες δεν θα αποδίδουν ικανοποιητικά εάν το υλικό της μήτρας δεν έχει τις σωστές ιδιότητες. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά μήτρας είναι θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά πολυμερή.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή επεξεργάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργήσουν ένα εύθραυστο στερεό. Ένα παράδειγμα από θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές είναι ο πολυεστέρας. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή έχουν υψηλό μοριακό βάρος και είναι άμορφα και μερικώς κρυσταλλικά, παρέχοντας αντοχή και σταθερό σχήμα σε θερμοκρασία δωματίου. Θερμοπλαστικά πολυμερή είναι για παράδειγμα το πολυανθρακικό (polycarbonate) και το νάιλον. Ο Πίνακας 5.12 παραθέτει διάφορα υλικά μήτρας που έχουν χρησιμοποιηθεί είτε εμπορικά είτε πειραματικά. Μεταξύ αυτών, τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, όπως εποξικά, οι πολυεστέρες και οι βινυλεστέρες, χρησιμοποιούνται συχνότερα ως υλικό μήτρας σε σύνθετα με συνεχείς ή κοντές ίνες. Αυτό συμβαίνει επειδή το χαμηλό ιξώδες τους, προσφέρει ευκολία στην επεξεργασία. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή χρησιμοποιούνται πιο συχνά σε σύνθετα ενισχυμένα με κοντές ίνες, που ακολουθούν την διαδικασία της χύτευσης. Οι μεταλλικές και κεραμικές μήτρες χρησιμοποιούνται κυρίως για υψηλής θερμοκρασίας εφαρμογές. Στη παραγωγή σασί των αγωνιστικών οχημάτων, κυριαρχούν τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. [7]

**Πίνακας 5.12 : Υλικά μήτρας. [7]**

### **Πολυμερικές**

#### **Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή**

- Εποξικά: χρησιμοποιούνται κυρίως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές και εφαρμογές αεροσκαφών
- Πολυεστέρες, εστέρες βινυλίου: χρησιμοποιούνται συνήθως στην αυτοκινητοβιομηχανία, χημικές και ηλεκτρικές εφαρμογές.
- Φαινολικά
- Πολυϊμίδια, πολυβενζιμιδαζόλια (PBI), πολυφαινουλοκινοξαλίνη (PPQ): για υψηλών θερμοκρασιών αεροδιαστημικές εφαρμογές (εύρος θερμοκρασίας: 250°C-400°C)
- Κυανικός εστέρας

#### **Θερμοπλαστικά πολυμερή**

Τα νάυλον (όπως νάιλον 6, νάιλον 6,6), θερμοπλαστικοί πολυεστέρες (όπως PET, PBT), πολυανθρακικό (PC), πολυακετάλες: χρησιμοποιούνται με ασυνεχείς ίνες σε injection –molded.

- Πολυαμιδο-ιμίδιο (PAI), πολυαιθερο αιθερική κετόνη (PEEK), πολυσουλφόνη (PSUL), πολυφαινυλένιο σουλφίδιο (PPS), πολυαιθεριμίδιο (PEI): κατάλληλο για εφαρμογές μέτριας θερμοκρασίας με συνεχείς ίνες

### **Μεταλλικές**

- Αλουμίνιο και τα κράματά του, κράματα τιτανίου, κράματα μαγνησίου, κράματα με βάση το χαλκό, νικέλιο υπερκράματων, ανοξειδωτος χάλυβας: κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας (εύρος θερμοκρασίας: 300°C-500°C)

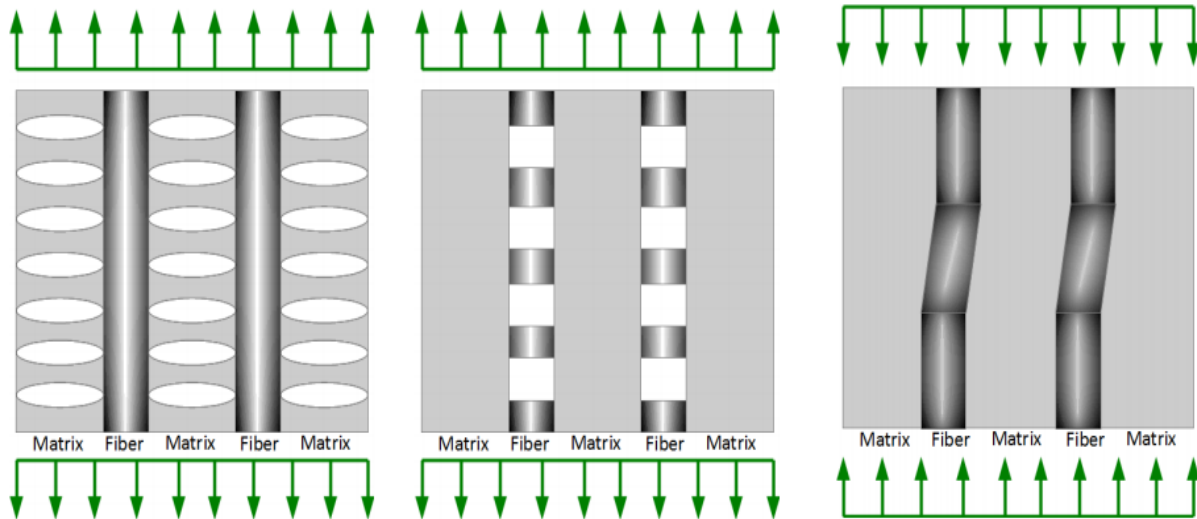
### **Κεραμικές**

- Οξειδίο αργιλίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), άνθρακας, καρβίδιο του πυριτίου (SiC), νιτρίδιο πυριτίου (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>): κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας

Όπως προαναφέρθηκε, το υλικό της μήτρας πρέπει να μεταδίδει το φορτίο στις ίνες, να προστατεύει τις ίνες από επιβλαβής εξωτερικούς παράγοντες και να παρέχει όλκιμότητα και ανθεκτικότητα. Η όλκιμοτητα και η ανθεκτικότητα της μήτρας δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό που αποτελείται, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο επεξεργάζεται κατά τη διαδικασία παραγωγής. Για το λόγο αυτό, οι δύο αυτές κατηγορίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη θερμοκρασία επεξεργασίας και την εφαρμοσμένη τάση κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η δύναμη του πολυακρilonιτριλίου με βάση τις ίνες άνθρακα, φθάνει σε μια αιχμή σε θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας περίπου στους 1500 °C. Εξαιτίας αυτού του περιορισμού πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι εάν απαιτείται δύναμη υψηλότερη από αυτή που λαμβάνεται στη μέγιστη θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας.

Ένα σύνθετο, όπως όλα τα υλικά, έχει ένα περιορισμό στο φορτίο που μπορεί να εκτεθεί πριν από την αστοχία. Επομένως, γνωρίζοντας πότε και πως θα αστοχήσει ένα σύνθετο είναι πολύ σημαντικό. Εάν η σύνθετη δομή αποτελείται από ένα μόνο στρώμα μονοκατευθυντικών ινών (ενισχυμένο με υλικό μήτρας), η δομή

μπορεί να φορτωθεί σε πίεση ή εφελκυσμό έως ότου οι ίνες ή το υλικό της μήτρας αστοχήσει.



**Σχήμα 5.4 :** Τυπικοί τρόποι αστοχίας μιας δομής ινών και μήτρας (τα πράσινα βέλη δείχνουν τη φορά της φόρτισης). [7]

Η τάση οδηγεί συνήθως είτε στη ρωγμή μήτρας είτε στη ρωγμή ινών. Μια τυπική περίπτωση αποτυχίας στη συμπίεση είναι στρέβλωση των ινών. Όλοι αυτοί οι τρόποι αποτυχίας απεικονίζονται στο σχήμα 5.4. Όπως και με την αλυσίδα, η οποία δεν έχει μεγαλύτερη αντοχή απ' ότι ο πιο αδύναμος κρίκος της, το ίδιο συμβαίνει και με μια σύνθετη δομή. Έχοντας ισχυρές ίνες μπορεί να είναι άσκοπο αν χρησιμοποιείται ένα κακό υλικό μήτρας το οποίο θα ραγίσει εύκολα κάτω από ενταση. Η ιδανική λύση είναι επομένως να επιλεγθούν ίνες και υλικό μήτρας που θα αστοχήσουν ταυτόχρονα.

## 5.7 Προσανατολισμός ινών

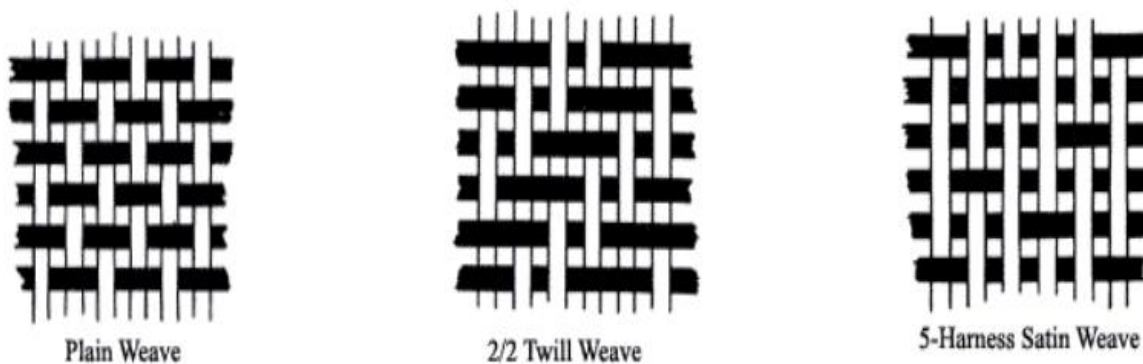
Δεδομένου ότι οι ίνες μπορούν να θεωρηθούν ως η ραχοκοκαλιά ενός σύνθετου, ο προσανατολισμός τους έχει προφανώς μεγάλη σημασία. Οι πρωτογενείς μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων στο μεγαλύτερο μέρος τους βασίζονται στις ιδιότητες των ινών, το κλάσμα όγκου τους, τον προσανατολισμό στην εφαρμοσμένη τάση και την «αρχιτεκτονική τους» μέσα στη δομή.

Οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν με δύο τρόπους, σε μονή κατεύθυνση (unidirectional, UD), όπου όλες οι ίνες μιας στρώσης έχουν την ίδια κατεύθυνση, ή υφασμένες (bidirectional) για να δημιουργηθεί μια πλέξη. Ανεξάρτητα από το πως είναι δομημένες όλες αποτελούνται από μικρότερες δέσμες/ ρολά ινών (νηματίδια). Οι εμπορικές ίνες παίρνουν τη μορφή ρολών (tow) παράλληλων μονοϊνών, που αποτελούνται από 1000 έως 32000 μονές ίνες ανά κλωστή, όπου η κάθε μια έχει

μέγεθος 5 έως 8  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 1$  χιλιοστό του χιλιοστού του μέτρου). Για παράδειγμα, μια 12K δέσμη περιέχει περίπου 12.000 ίνες.

Στην μονή κατεύθυνση (UD), οι ίνες πλέκονται η μία παράλληλα με την άλλη με ορισμένες κάθετες στην πλέξη ίνες αποκλειστικά και μόνο για να ευθυγραμμίζονται οι κύριες ίνες. Αυτού του είδους η πλέξη προσφέρει κορυφαία αντοχή σε εφελκυσμό αλλά μόνο στην κατεύθυνση των ινών. Από την άλλη, η bidirectional πλέξη, έχει τις ίνες κάθετες η μία στην άλλη ώστε η αντοχή σε εφελκυσμό να είναι περίπου η ίδια σε δύο άξονες. Ακόμα και αυτή όμως, έχει υποκατηγορίες. Οι πιο συνηθισμένες είναι η απλή, η twill και η σατέν. Πολλές φορές όμως, τοποθετούνται πολλαπλά στρώματα unidirectional ή/και birectional υφασμάτων σε ενδιάμεσες γωνίες για να πετύχουμε την καλύτερη δυνατή κάλυψη. Άλλα πλεονεκτήματα του υφασμένου layup περιλαμβάνουν επίσης την απόδοσή τους σε σύνθετη γεωμετρία, χαμηλότερο χρόνο κατασκευής και καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση.

Μια σύνθετη ύφανση περιγράφεται συνήθως από ένα δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων όπου ο άξονας x και y αντίστοιχα ονομάζονται η κατεύθυνση ύφανσης (weft) και στρέβλωσης (warp). Η πιο συνηθισμένοι τύποι ύφανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σύνθετων υλικών είναι η απλή, η twill και η σατέν.



**Εικόνα 5.16 :** Διαφορετικοί τύποι πλέξεων. [7]

## 5.8 Πυρήνας

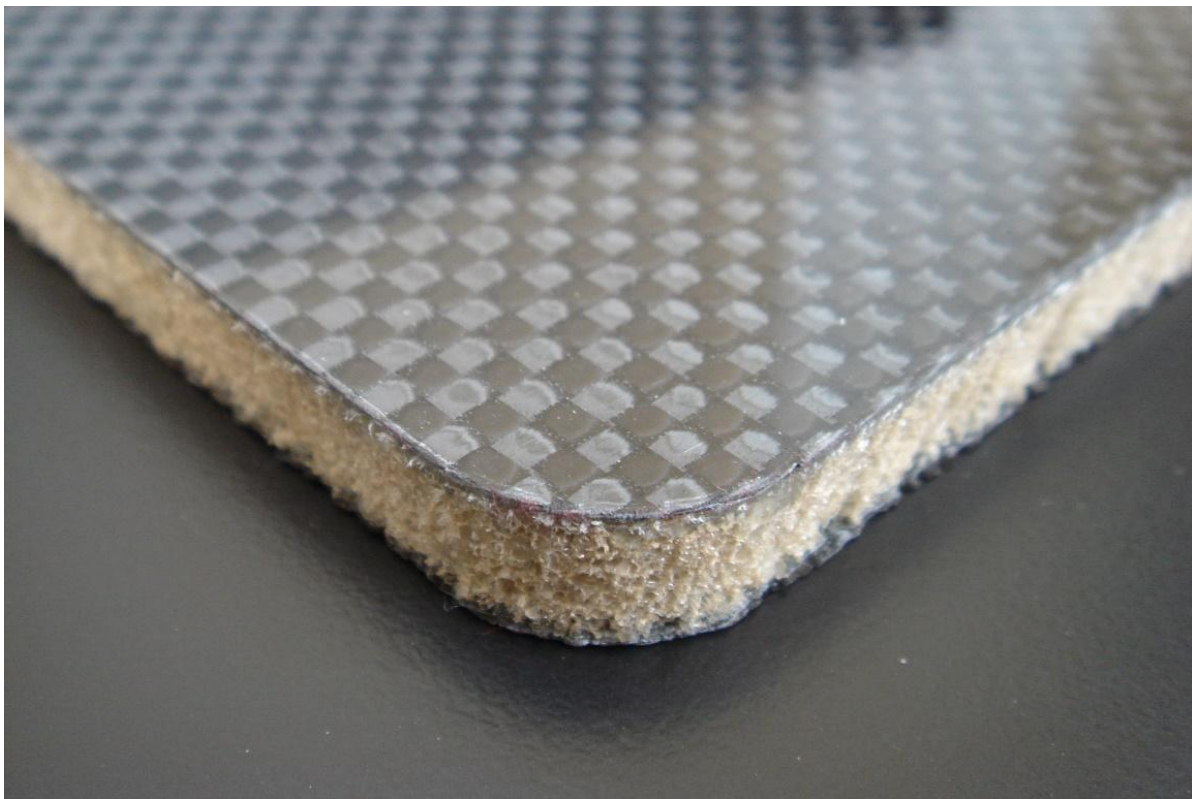
Όπως εξηγείται νωρίτερα σε αυτή την εργασία, μια δομή σάντουιτς αποτελείται από έναν πυρήνα που καλύπτεται με στρώσεις (faces) πάνω και κάτω από αυτό. Δεδομένου ότι αυτές οι στρώσεις φέρουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, πρέπει να είναι δύσκαμπτες και ισχυρές. Όντας η εξωτερική επιφάνεια της δομής σάντουιτς, πρέπει να είναι σε θέση να αντέξουν οποιοδήποτε τύπο "διάβρωσης" από αυτούς που συναντώνται στο περιβάλλον λειτουργίας τους.

Δεδομένου ότι ο πυρήνας αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του όγκου μιας δομής σάντουιτς, πρέπει να είναι ελαφρύς και δύσκαμπτος. Ο πυρήνας πρέπει επίσης να είναι αρκετά ισχυρός για να απορροφά τις δυνάμεις, κυρίως διάτμησης,

όταν το πάνελ υπόκειται σε φορτία. Πιθανώς η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση του πυρήνα, καθώς και το σύνολο της δομής τύπου σάντουιτς, είναι ο τύπος του πυρήνα που χρησιμοποιείται. Στο κοινό πλαίσιο, οι πιο κοινοί τύποι είναι το foam και η κυψελοειδής δομή (honeycomb). [7]

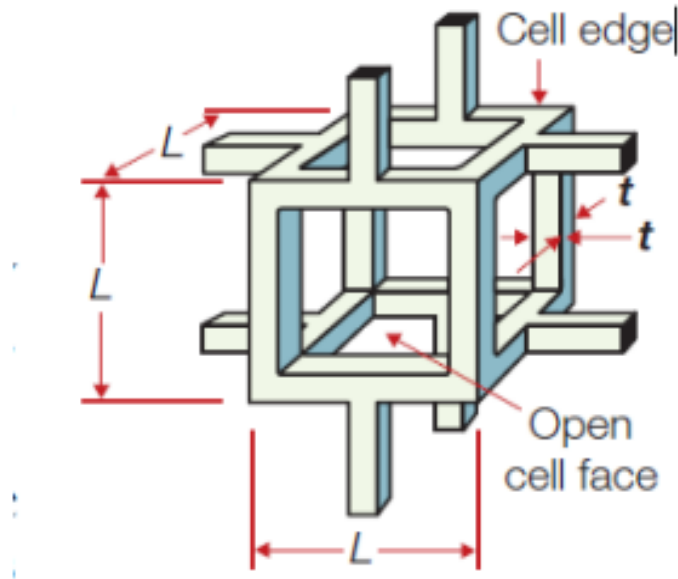
### 5.8.1 Foam

Το foam είναι μια κυτταρική δομή, ένα υβρίδιο ενός στερεού και ενός αερίου. Το στερεό δίνει στο foam τις μηχανικές του ιδιότητες, ενώ το αέριο είναι υπεύθυνο για τις θερμικές ιδιότητες. Το στερεό κατασκευάζεται συνήθως από ορισμένα πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά ή γυαλιά.



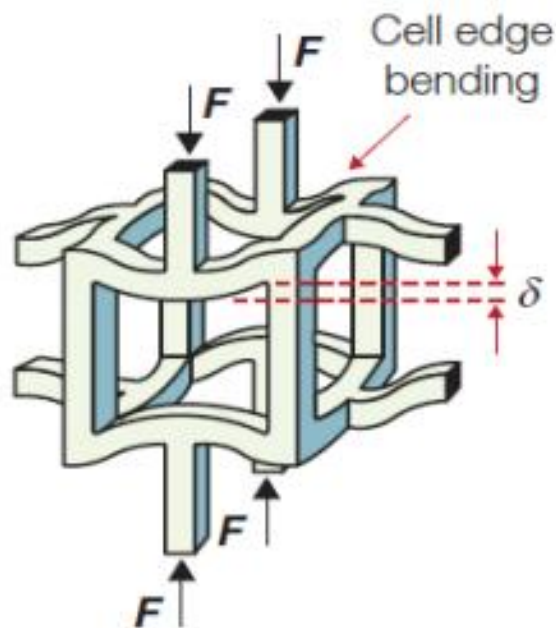
*Εικόνα 5.17 : Δομή σάντουιτς με πυρήνα foam. [27]*

Μια ιδιότητα που έχει μεγάλη επίδραση στον τρόπο συμπεριφοράς του foam είναι η πυκνότητά του. Η πυκνότητα μετράται με τη ποσότητα του συνολικού όγκου που απορροφάται από τα τοιχώματα των κυψελών. Μια απεικόνιση ενός κυττάρου foam μπορεί να φανεί στο σχήμα 5.5 παρακάτω:



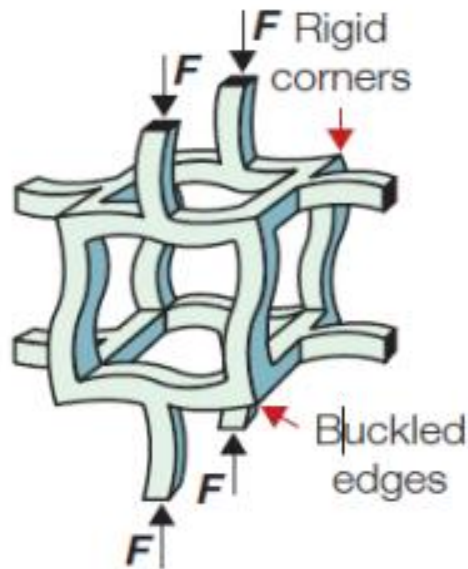
**Σχήμα 5.5** : Πρότυπο κελί αφρού [Ashby].

Το υλικό και η πυκνότητα του κυττάρου foam είναι ιδιαίτερα σημαντικά λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του όταν φέρει φορτίο. Συνήθως οι πλευρές κυψελών, όπου εφαρμόζεται το φορτίο, κάμπτονται προς τα μέσα σε μια σχεδόν σταθερή τάση όταν επιτευχθεί το ελαστικό τους όριο, όπως στο σχήμα 5.6 παρακάτω. Δεδομένου ότι το υλικό είναι αρκετά εύπλαστο για να μην σπάσει, αυτή η διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι το ένα άκρο της κυψέλης να έρθει σε επαφή με το άλλο στην απέναντι πλευρά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πύκνωση και η περαιτέρω κάμψη ή λυγισμός δεν είναι εφικτά. Η τάση τώρα θα αυξηθεί γρήγορα, δεδομένου ότι το φορτίο μεταφέρεται μόνο από τα υλικά των προσώπων που έρχονται σε επαφή.



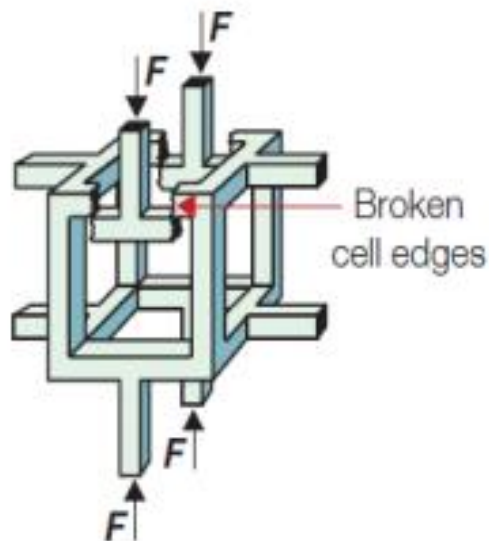
**Σχήμα 5.6** : Παραμόρφωση ενός κυττάρου foam, πριν από τη συμπίκνωση [Ashby].

Εάν το foam είναι κατασκευασμένο από πολυμερές υλικό, ο τρόπος αστοχίας θα είναι πιθανώς παρόμοιος με αυτόν που εξηγείται παραπάνω. Αν το foam παράγεται από ένα ελαστομερές, είναι πιθανότερο να αστοχήσει με λυγισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.



**Σχήμα 5.7 :** Ένα κύτταρο foam παραμορφώνεται μέσω λυγισμού [Ashby].

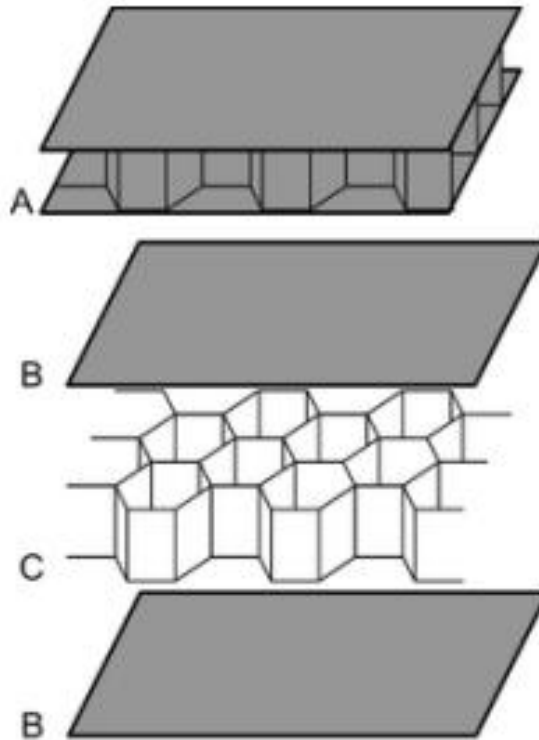
Από την άλλη πλευρά, ένα εύθραυστο υλικό θα προκαλέσει θραύση των άκρων των κυψελών, όπως στο σχήμα 5.8 παρακάτω.



**Σχήμα 5.8 :** Ένα κύτταρο foam παραμορφωμένο κατά τη θραύση της άκρης [Ashby].

## 5.8.2 Honeycomb

Ένας κυψελοειδής πυρήνας αποτελείται από ένα εξαγωνικό, συμμετρικό μοτίβο, όπως αυτό στην εικόνα 5.18 παρακάτω. Αυτή η δομή παρέχει σχετικά υψηλές ιδιότητες συμπίεσης και διάτμησης, σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα.



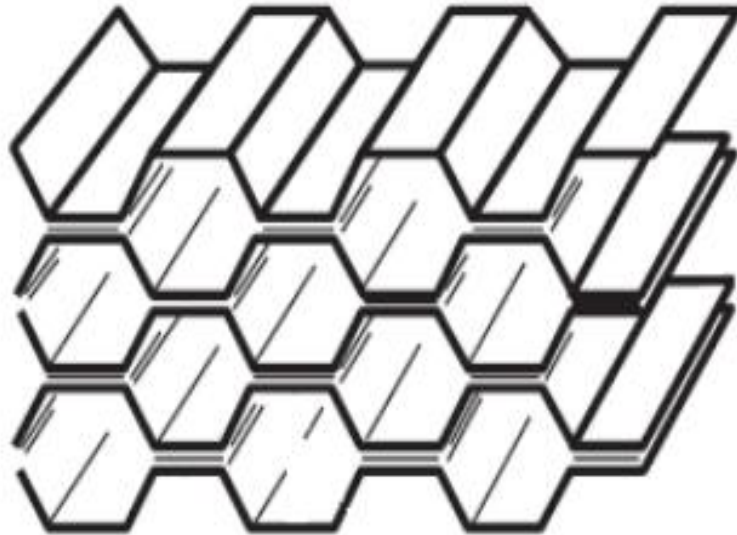
**Εικόνα 5.18** : Δομή σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα. [7]

Οι παράμετροι που έχουν μεγάλη σημασία για την απόδοση μιας δομής σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα, είναι το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ο πυρήνας, το σχήμα των κυψελών και το πώς στερεώνεται ο πυρήνας στα πρόσωπα. Η στερέωση γίνεται συνήθως με τη χρήση κάποιου είδους κόλλας. Είναι σημαντικό ότι το συγκολλητικό στερεώνει σταθερά τις όψεις στον πυρήνα, διαφορετικά το ποσό φορτίου που θα μπορούσε να μεταδοθεί από την μία όψη στην άλλη θα ήταν περιορισμένο. Για το λόγο αυτό το συγκολλητικό θα πρέπει να είναι ισχυρό.

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως σε αυτή την ενότητα, η επιλογή υλικού εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο πρόκειται να το στοιχείο να χρησιμοποιηθεί και σε ποιό περιβάλλον θα λειτουργήσει. Αυτό ισχύει προφανώς και για τον κυψελοειδή πυρήνα. Πρέπει να προσδιορίζονται με μεγάλη προσοχή ποιές ιδιότητες είναι πιο σημαντικές για το τρέχον στοιχείο, καθώς υπάρχουν πολλά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε κυψελοειδή πυρήνα. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα υλικά είναι το αλουμίνιο, το αραμίδιο, το Kevlar, το fiberglass και το carbon.

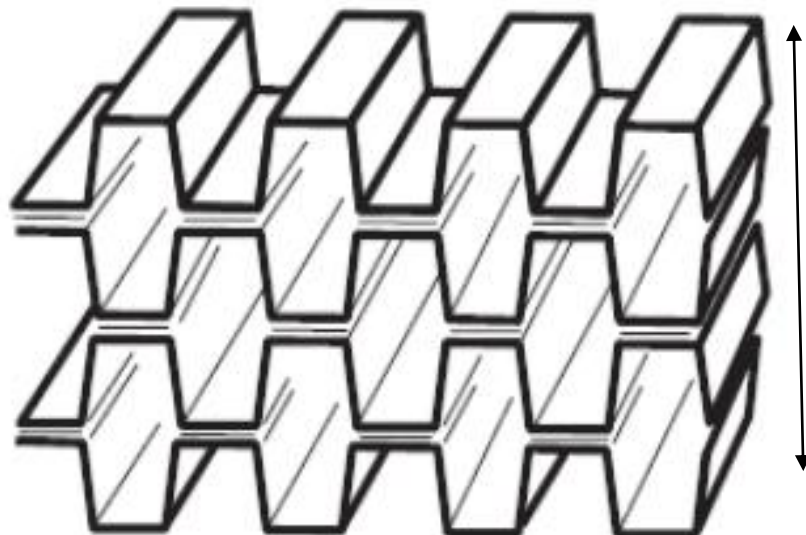


Ο πιο συνηθισμένος τύπος σχήματος της κυψέλης, είναι πιθανώς το εξαγωνικό σχήμα, όπως στην εικόνα 5.19. Αυτή η δομή παρέχει πολύ χαμηλή πυκνότητα για δεδομένη ποσότητα υλικού.



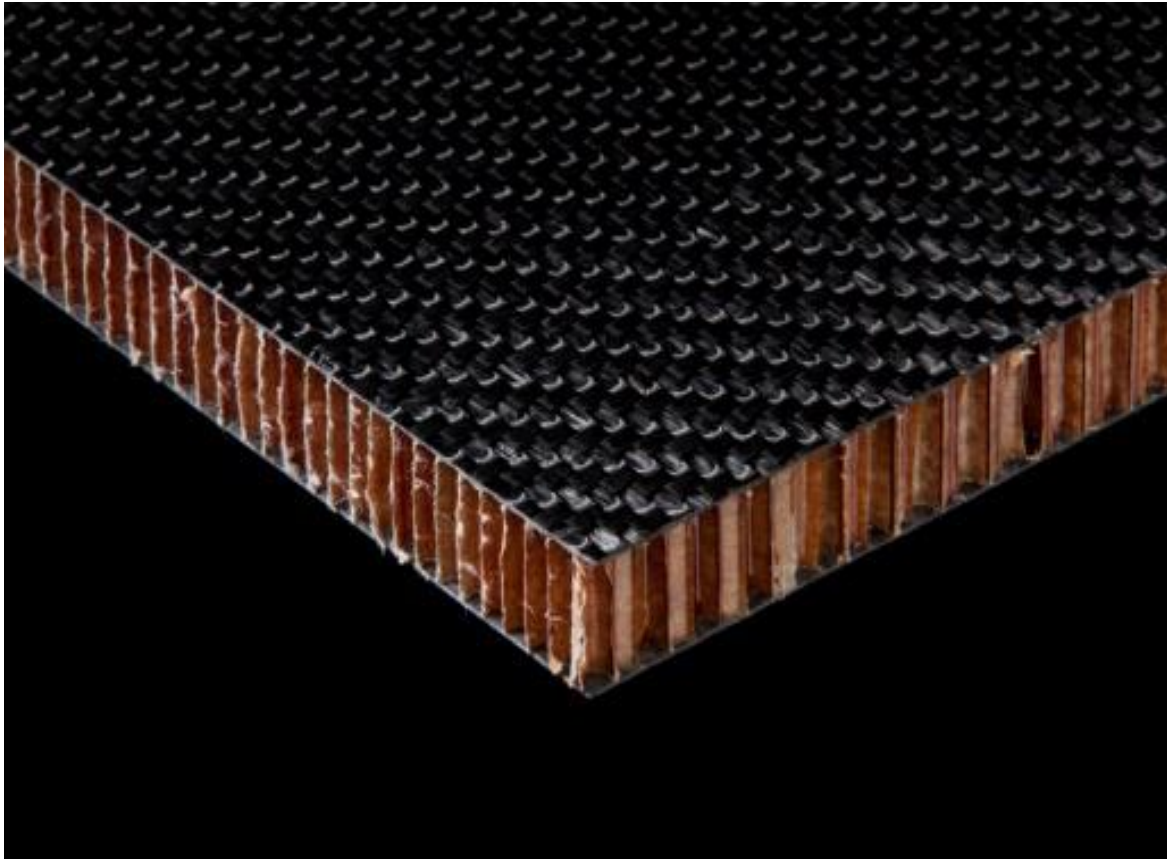
**Εικόνα 5.19 :** Μια κυψελοειδής δομή με εξαγωνικά κελιά. [7]

Μια εναλλακτική λύση στα εξαγωνικά κύτταρα είναι τα ορθογώνια, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.20. Το κύριο πλεονέκτημα για αυτό το τύπο κυψέλης είναι ευκολότερος σχηματισμός στην κατεύθυνση W (φορά βέλους στο παρακάτω σχήμα).



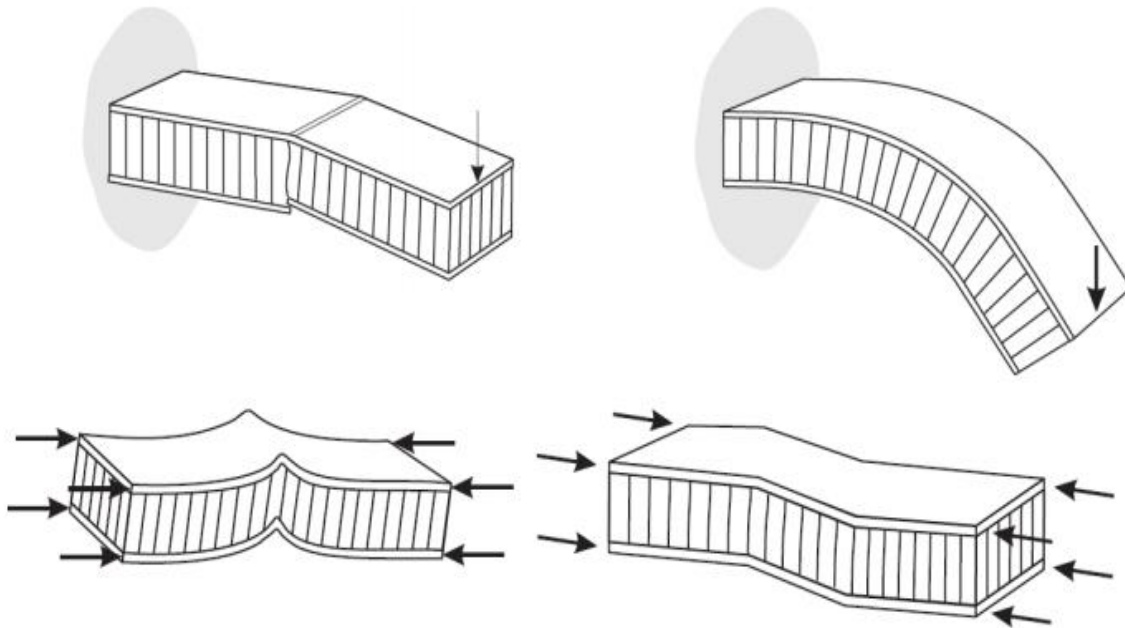
**Εικόνα 5.20 :** Μια κυψελοειδής δομή με ορθογώνια κελιά. [7]

Επίσης, το μέγεθος των cells μπορεί να ποικίλει, μεταβάλλοντας έτσι τις ιδιότητες. Γενικά, τα μεγάλα κελιά είναι σχετικά φθηνά στην αγορά, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μια πτυχωτή εξωτερική επιφάνεια της δομής sandwich εάν τα πρόσωπα είναι λεπτά. Μικρότερα cells μειώνουν τον κίνδυνο μίας πτυχομένης επιφάνειας, έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια συγκόλλησης αλλά είναι συνήθως πιο ακριβά.



*Εικόνα 5.21 : Δομή σάντουιτς με πυρήνα honeycomb. [25]*

Ο κυψελοειδής πυρήνας πρέπει να σχεδιάζεται για να αποφεύγονται ορισμένες συνήθεις λειτουργίες αστοχίας ολόκληρης της δομής σάντουιτς. Ο πυρήνας πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός ώστε να αποφεύγεται η συμπίεση του προσώπου (εικόνα 5.22 επάνω αριστερά), άκαμπτος ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική κάμψη (εικόνα 5.22 επάνω δεξιά), να είναι αρκετά παχύρρευστος και να έχει συντελεστή διάτμησης αρκετά υψηλό ώστε να αποφευχθεί ο λυγισμός του πάνελ (εικόνα 5.22 κάτω αριστερά) και η στρέβλωση (εικόνα 5.22 κάτω δεξιά). Επίσης, ο συντελεστής συμπίεσης του προσώπου και η θλιπτική αντοχή του πυρήνα πρέπει να είναι αρκετά υψηλά ώστε να αποφεύγεται η συρρίκνωση του δέρματος και η τοπική συμπίεση. Προφανώς, ο πυρήνας πρέπει να είναι σχεδιασμένος για να ικανοποιεί τις προκαθορισμένες απαιτήσεις απόδοσης. [HexWeb 2000]



**Εικόνα 5.22** : Συνήθεις τρόποι αστοχίας δομής σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα [HexWeb]

### 5.8.3 Πάχος πυρήνα

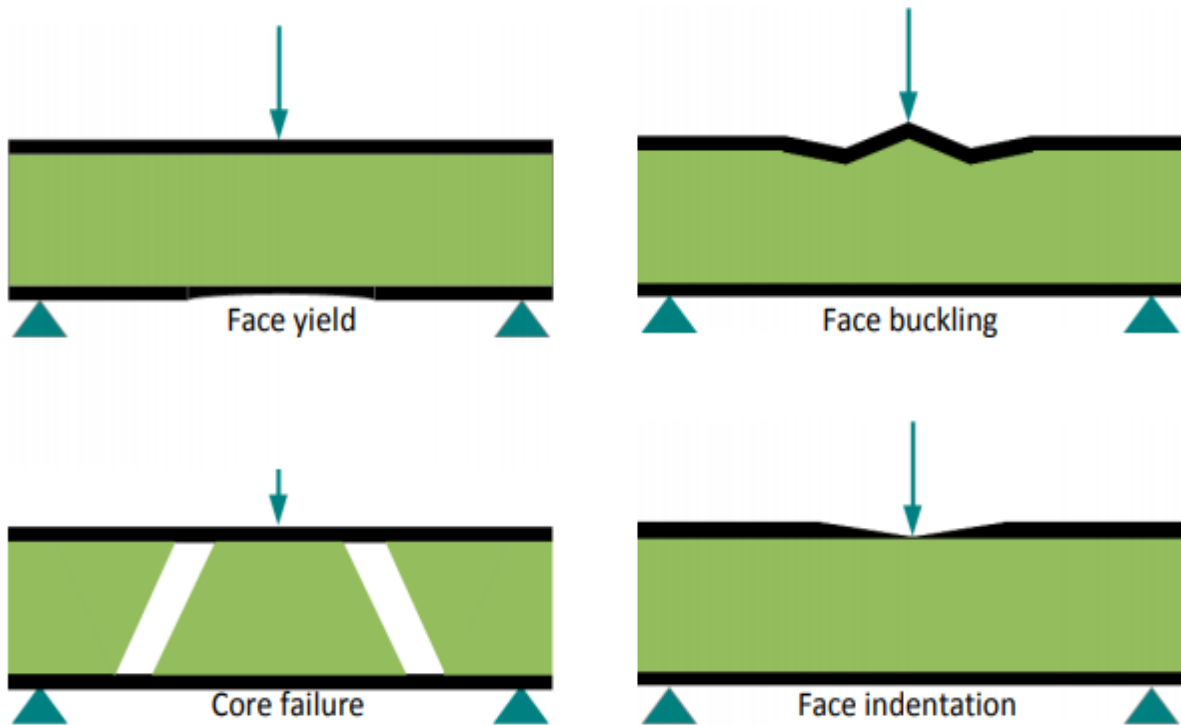
Μια άλλη παράμετρος μεγάλης σημασίας είναι το πάχος του πυρήνα. Το γεγονός ότι το πάχος του πυρήνα σχετίζεται άμεσα με την ακαμψία, τη δύναμη και το βάρος της δομής σάντουιτς, δείχνει πόσο σημαντικό είναι να βρεθεί ένας ιδανικός συμβιβασμός. Στο πίνακα παρακάτω, απεικονίζεται πόσο μπορεί να βελτιωθεί η ακαμψία και η αντοχή με μια μικρή αύξηση του πάχους. [Savage 2008]

**Πίνακας 5.13** : Εικόνα της σύνδεσης μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων μιας δομής σάντουιτς και του πάχους του πυρήνα της. [7]

	Solid material	Core thickness $t$	Core thickness $3t$
<b>Stiffness</b>	1	7	37
<b>Flexural strength</b>	1	3.5	9.2
<b>Weight</b>	1	1.03	1.06

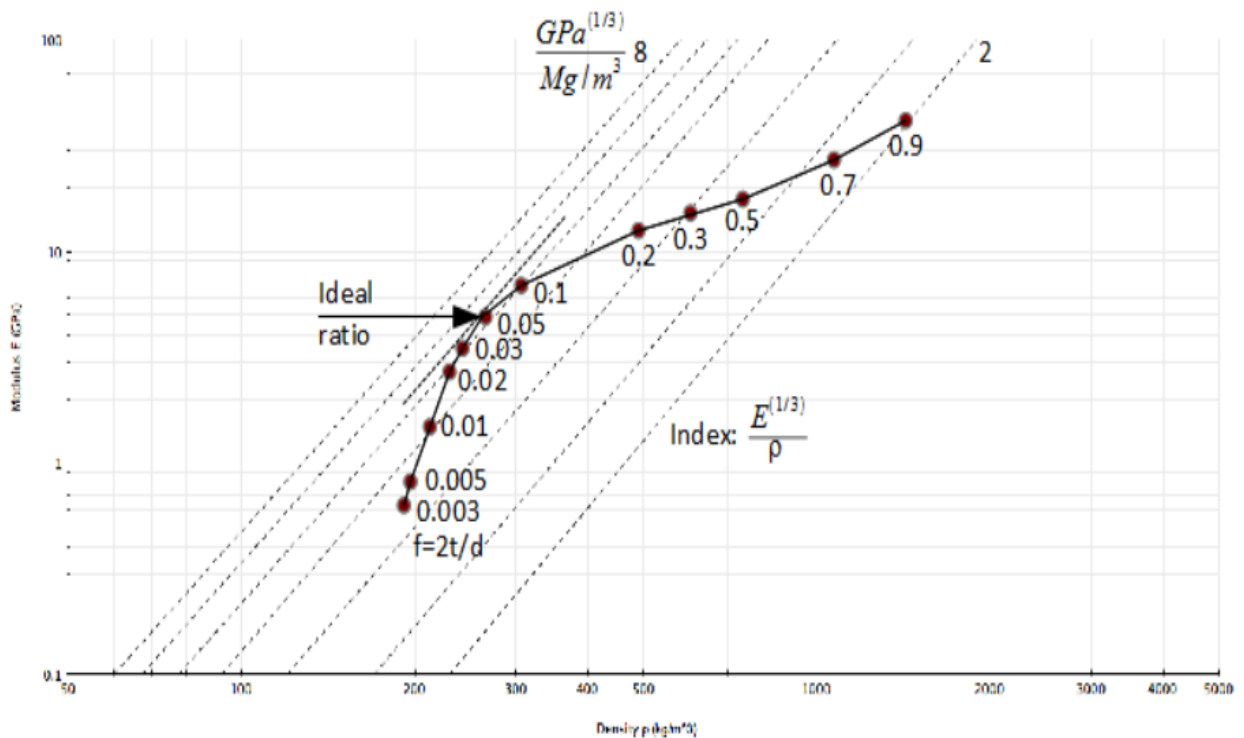
Ωστόσο, δεν υπάρχει τέλεια λύση σε αυτόν τον τομέα, αφού ένας πυκνότερος πυρήνας προκαλεί άλλες επιπλοκές όπως την απαίτηση περισσότερου χώρου και το περιορισμό στο σχήμα της δομής.

Για να υπολογίσει κάποιος το πάχος που χρειάζεται να έχει ο πυρήνας, πρέπει πρώτα να εξοικειωθεί με τους τυπικούς τρόπους αστοχίας μιας δομής σάντουιτς. Οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αποτύχει μια δομή σάντουιτς απεικονίζονται στην εικόνα 5.23 παρακάτω.



**Εικόνα 5.23 :** Συνήθεις τρόποι αστοχίας δομών σάντουιτς. [7]

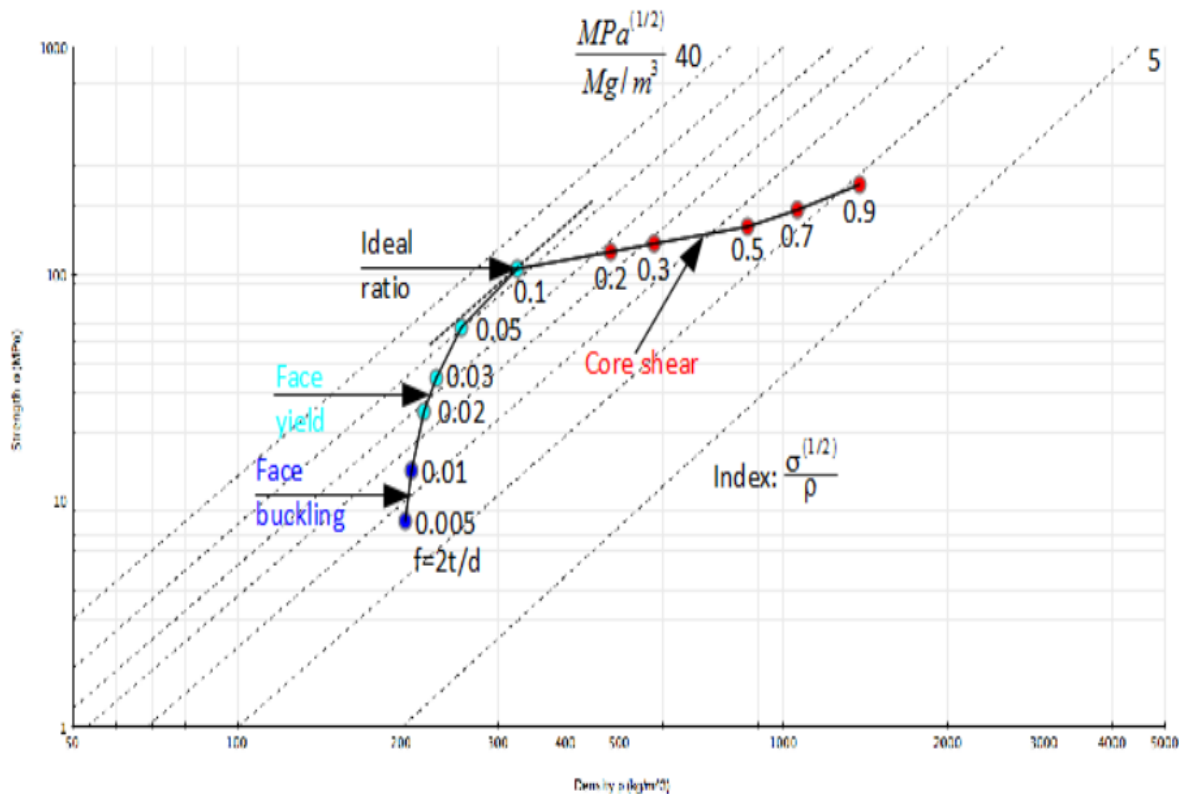
Θεωρήστε ένα πάνελ σάντουιτς που έχει τοποθετηθεί σε κάμψη όπως αυτή που περιγράφεται παραπάνω. Αν τα πάχη των δύο προσώπων,  $2t$ , διαχωρίζονται από το πάχος του πυρήνα,  $d$ , λαμβάνεται ένα πηλίκιο  $f = \frac{2t}{d}$ . Χρησιμοποιώντας μια δομή σάντουιτς με CFRP πρόσωπα και πυρήνα foam ως παράδειγμα, μπορεί να υπολογιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα συμπεριφερθεί η δομή βάσει του μέτρου ελαστικότητας και της πυκνότητας, για διαφορετικές τιμές του  $f$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 5.24 παρακάτω.



**Εικόνα 5.24 :** Γραφική απεικόνιση [άξονας x : E (GPa), άξονας y : ρ (kg/m<sup>3</sup>)] της σύνδεσης μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων μιας δομής σάντουιτς) και του πάχους του πυρήνα του. [7]

Οι βοηθητικές γραμμές με ένδειξη  $\frac{E^{1/3}}{\rho}$ , αντιστοιχούν στα δεδομένα ενός πάνελ που έχει φορτωθεί σε κάμψη. Ο στόχος εδώ είναι να βρεθεί το βέλτιστο σημείο στη γραμμή που συνδέει τις διαφορετικές τιμές του f. Αυτό το βέλτιστο σημείο προκύπτει όταν μια εφαπτομένη στη γραμμή, είναι παράλληλη με την κλίση των βοηθητικών γραμμών. Όπως δείχνει το γράφημα, αυτό δίνει ένα βέλτιστο πηλίκο  $f = \frac{2t}{d} = 0.05$ , για ένα πάνελ με ιδανική αναλογία βάρους / δυσκαμψίας.

Αν αναλύεται η αντοχή, η κατάσταση γίνεται λίγο διαφορετική, επειδή το πάνελ θα αποτύχει τώρα με διαφορετικούς τρόπους αστοχίας, ανάλογα με την αναλογία μεταξύ του πυρήνα και του πάχους του προσώπου. Όπως φαίνεται στην γραφική απεικόνιση, για  $f < 0.025$  κυριαρχεί ο λυγισμός του προσώπου (face buckling), για  $0.025 < f < 0.1$  κυριαρχεί η διαρροή του προσώπου (face yield) και για  $f > 0.1$  κυριαρχεί η διάτμηση του πυρήνα (core shear). Ο δείκτης  $\frac{\sigma^{1/2}}{\rho}$  αντιστοιχεί στα δεδομένα ενός πάνελ που έχει φορτωθεί σε κάμψη.



**Εικόνα 5.25 :** Γραφική απεικόνιση [άξονας x : E (GPa), άξονας y : ρ (kg/m<sup>3</sup>)] της σύνδεσης μεταξύ μηχανικών ιδιοτήτων δομής σάντουιτς και πάχους του πυρήνα του. [7]

Όπως φαίνεται στη γραφική απεικόνιση παραπάνω, ο βέλτιστος λόγος είναι λίγο κάτω από 0.1. Προφανώς, είναι πολύ υψηλότερο από το 0.05 που ελήφθη όταν ζητήθηκε η βέλτιστη αναλογία δυσκαμψίας προς βάρος. Για το λόγο αυτό, όταν επιλέγεται ένας σχεδιασμός, πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της αναλογίας ακαμψίας προς το βάρος και της αντοχής σε αστοχία. [Ashby 2011]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αριθμός των στρώσεων και το πάχος του πυρήνα είναι οι σημαντικότεροι παράμετροι για την αντοχή της δομής σάντουιτς. Φυσικά αυτοί δεν είναι οι μόνοι παράγοντες που καθορίζουν το σχεδιασμό. Άλλοι παράγοντες που χρειάζεται να γνωρίζει κάποιος κατά τον σχεδιασμό ενός carbon fibre monocoque παρατίθενται παρακάτω:

- Πάχος στρώσης, συνήθως μετρημένο σε grams ανά τετραγωνικό μέτρο
  - Με λεπτότερα στρώματα, ο αριθμός των στρωμάτων μπορεί να αυξηθεί, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία στον προσδιορισμό των γωνιών των στρώσεων.
- Τύπος ύφανσης
  - Υφαντά
    - Twill
    - Απλό
    - Σατέν
  - Μονοκατευθυντική

- Προσανατολισμός των στρώσεων
  - Περισσότερες στρώσεις οδηγούν σε περισσότερες διαφορετικές διαμορφώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Βασικό υλικό
  - Κυψέλη αλουμινίου, ελαφριά, καλές μηχανικές ιδιότητες
  - Nomex foam, ελαφρύ, εύκολη κατεργασία
- Ασύμμετρη εφαρμογή στρώματος
  - Τα φορτία είναι μεγαλύτερα στο εξωτερικό του πυρήνα και επομένως είναι ευεργετικό να έχουμε περισσότερα στρώματα στο εξωτερικό και κατά συνέπεια λιγότερα στρώματα στο εσωτερικό. Περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητο σε αυτό το πεδίο, προκειμένου να αποφευχθεί κάθε συμβιβασμός ποιότητας ή απόδοσης που μπορεί να υπάρχουν.
- Ακτίνα κάμψης και άλλα θέματα σχεδιασμού
  - Τα φύλλα ινών άνθρακα είναι ευαίσθητα σε καμπύλες μικρής ακτίνας και πρέπει να αποφεύγονται.





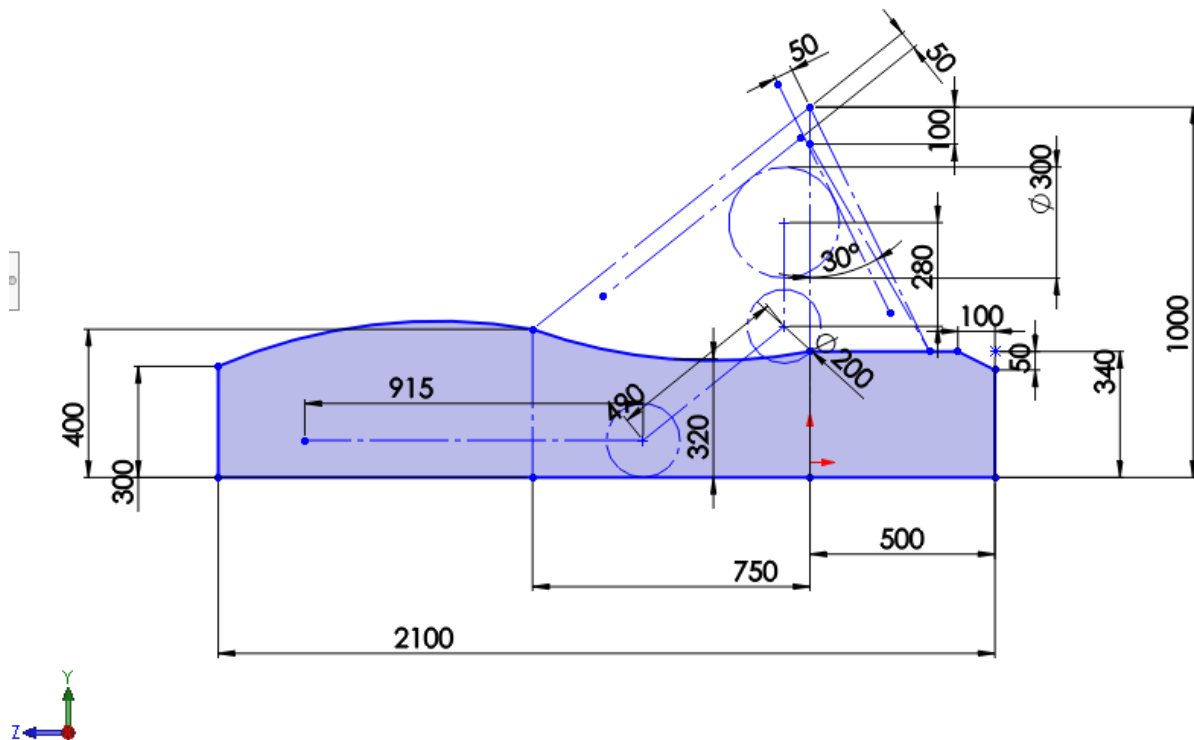
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

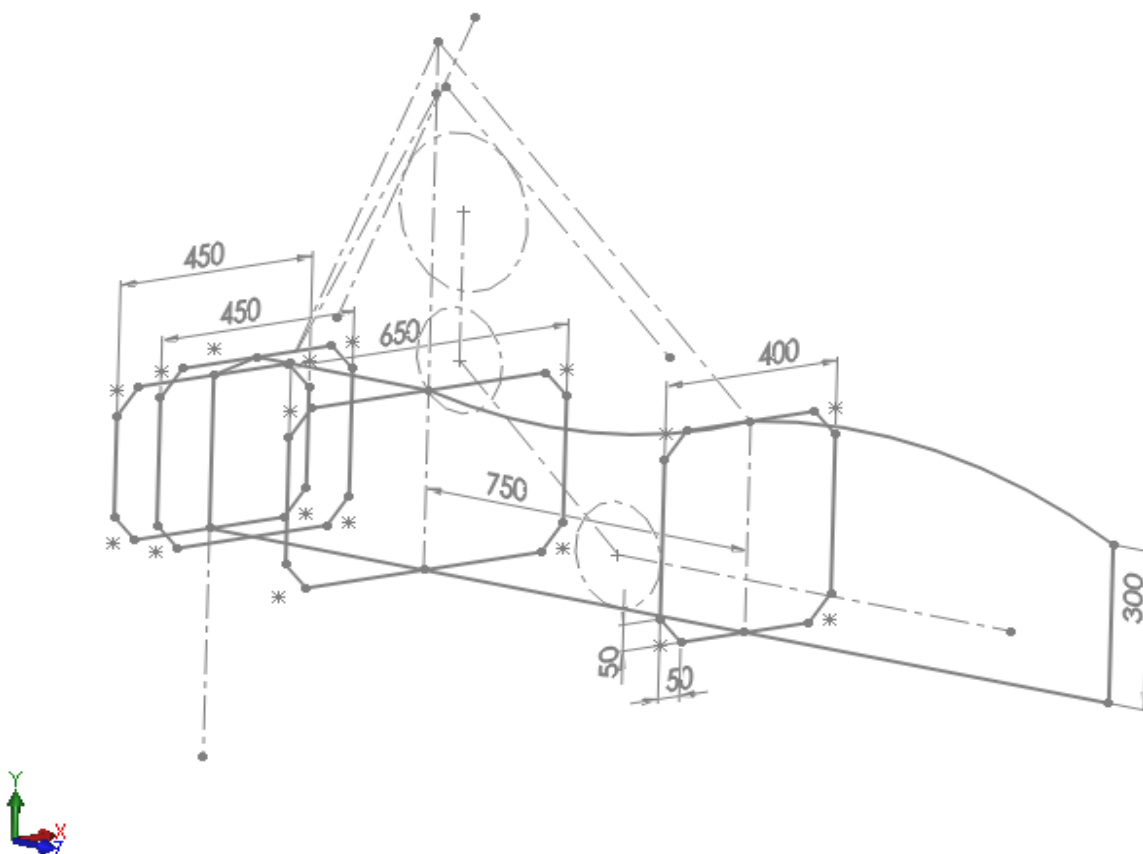
Για να είναι επιτυχημένη η κατασκευή του πλαισίου και για να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες, είναι σημαντική η ύπαρξη μιας σωστής και σαφώς καθορισμένης φάσης σχεδιασμού. Δεδομένης της πολυπλοκότητας της κατασκευής, ο σχεδιασμός του πλαισίου συχνά είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, τα αποτελέσματα της οποίας καθορίζουν τη συνέχεια της κατασκευής.

#### 6.1 Σχέδιο

Το σχέδιο που παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες, απεικονίζει το πλαίσιο από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής αυτής εργασίας και έχει ως στόχο να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες στην ομάδα FP ONE, σχετικά με τις δυνατότητες ενός σύνθετου πλαισίου τύπου FSAE. Σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού δεν λήφθηκε υπ' όψιν η αεροδυναμική συμπεριφορά του πλαισίου, δεδομένου ότι τη χρονική αυτή περίοδο διεξάγεται παρόμοια έρευνα από την αρμόδια υποομάδα της FP ONE. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση του πλαισίου, πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Solidworks.



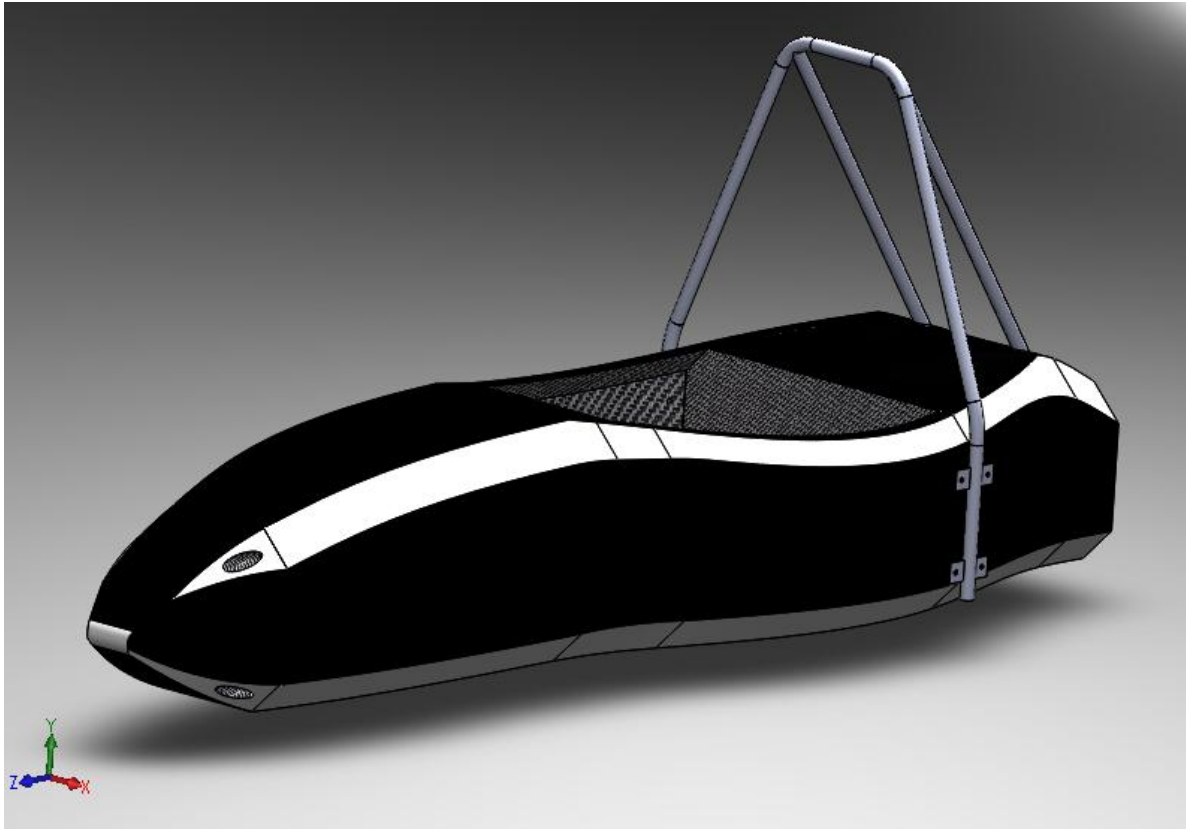
**Εικόνα 6.1 :** Το σχέδιο για το τοποσομε πλαίσιο, όπως αυτό σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας.



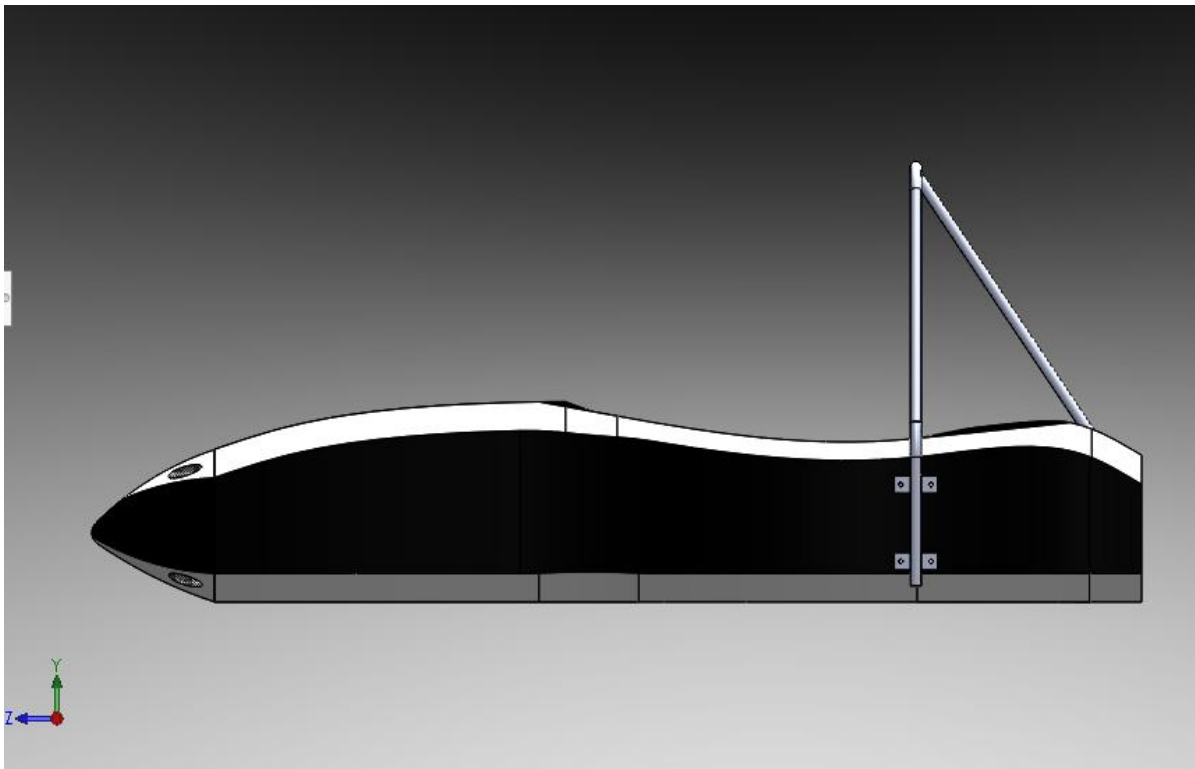
**Εικόνα 6.2 :** Το σχέδιο για το τοποσοφμε πλαίσιο, όπως αυτό σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας.

Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για τον σχεδιασμό του πλαισίου αποτελούν ένα βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων του κανονισμού και των αναγκών της ομάδας. Στο σημείο αυτό ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί πως το πλαίσιο αυτό δεν αποτελεί το τελικό πλαίσιο της ομάδας, αλλά ένα προσωρινό σχέδιο με πολλές προοπτικές βελτίωσης, που σκοπό έχει να βοηθήσει στη διαδικασία προσομοίωσης μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος.

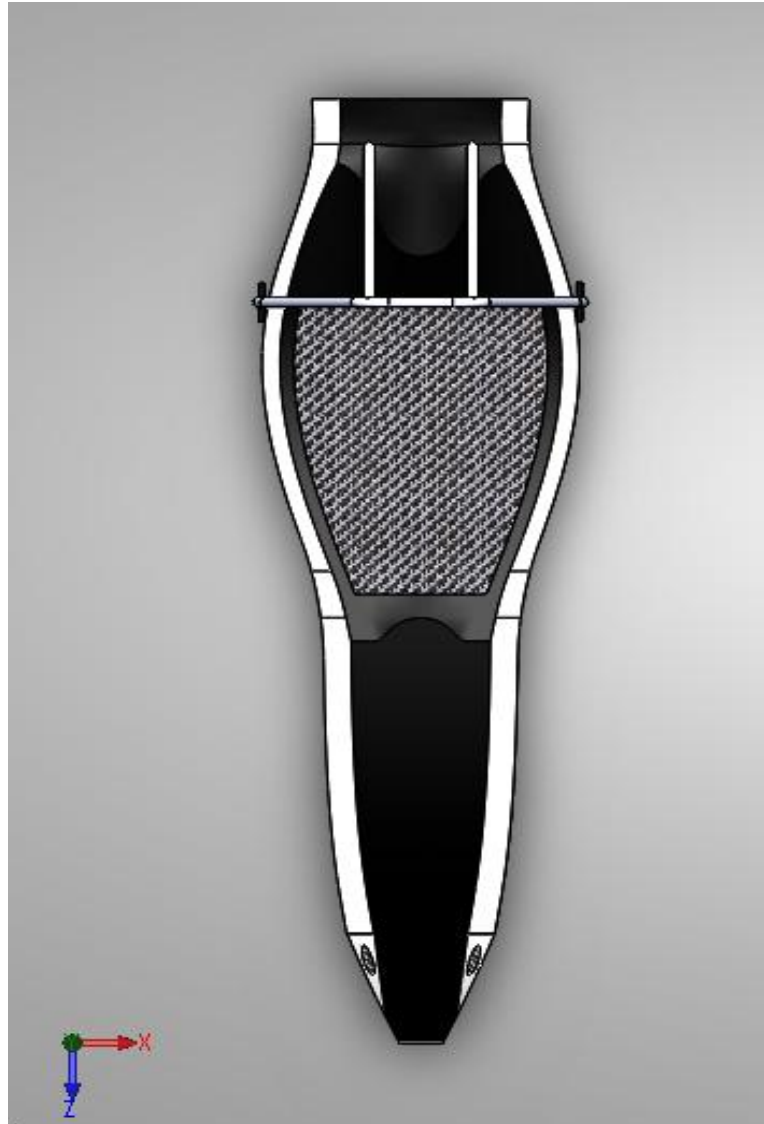
Στις εικόνες που παραθέτονται παρακάτω, απεικονίζεται η τρισδιάστατη μορφή του πλαισίου, όπως προέκυψε κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Solidworks.



*Εικόνα 6.3 : Η 3D μορφή του πλαισίου.*

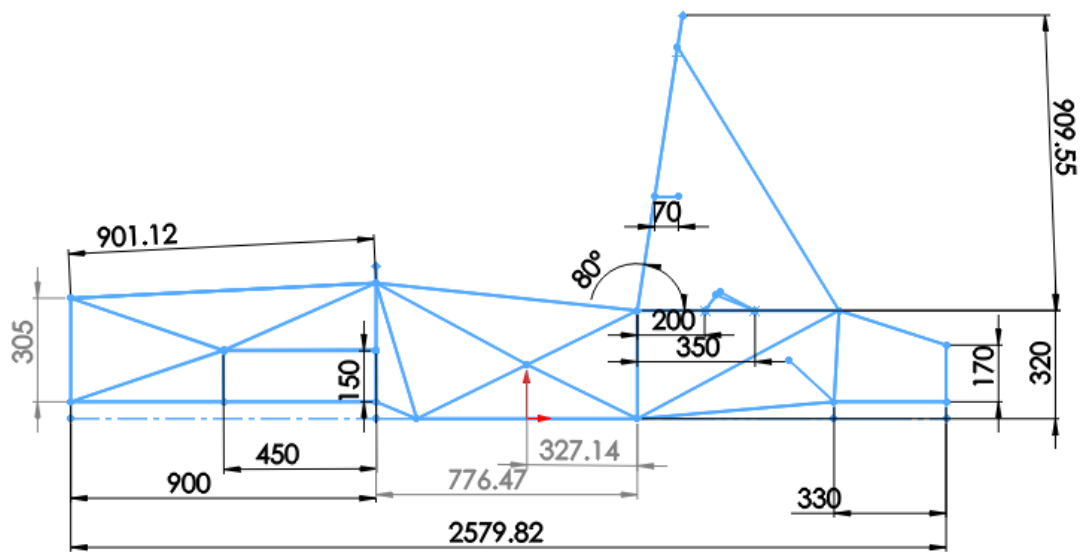


*Εικόνα 6.4 : Πλάγια όψη του πλαισίου.*

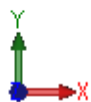
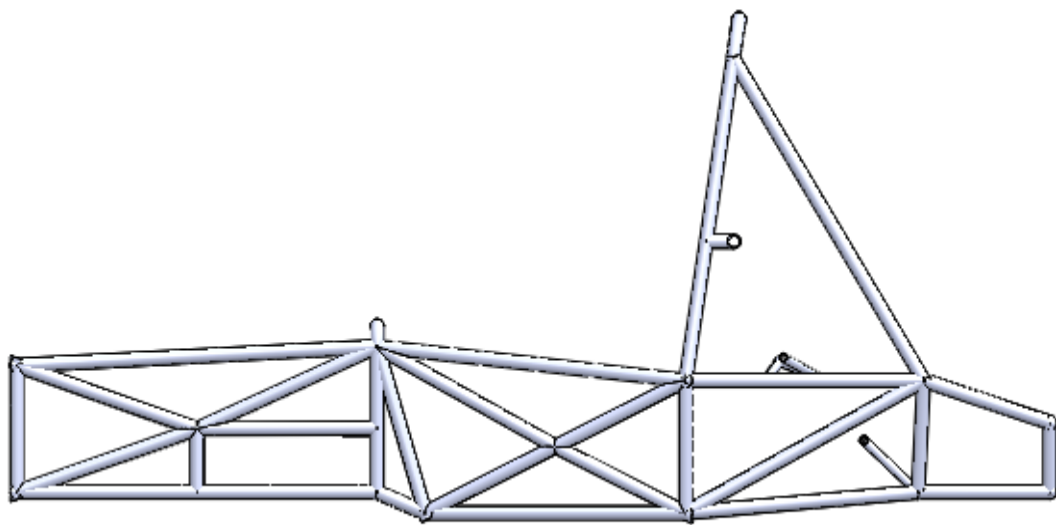


**Εικόνα 6.5 :** Επάνω όψη του πλαισίου.

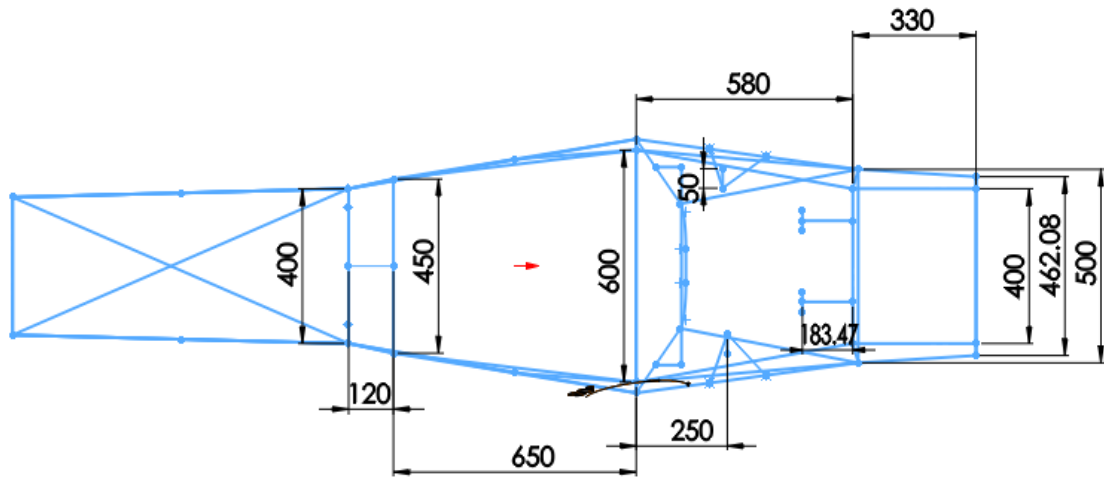
Τη περίοδο συγγραφής της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, η ομάδα FP ONE έχει ήδη κατασκευάσει ένα πλαίσιο από σωλήνες χάλυβα το οποίο πληρεί τις προϋποθέσεις του διαγωνισμού. Το σχέδιο του μονοκόμμε πλαισίου που σχεδιάστηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής εργασίας, βασίστηκε σε αρκετές από τις σχεδιαστικές προσεγγίσεις που έγιναν από την ομάδα κατά τη διαδικασία κατασκευής του σωληνωτού πλαισίου. Το σχέδιο με τις διαστάσεις του σωληνωτού πλαισίου καθώς και το τρισδιάστατο σχέδιο αυτού, παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



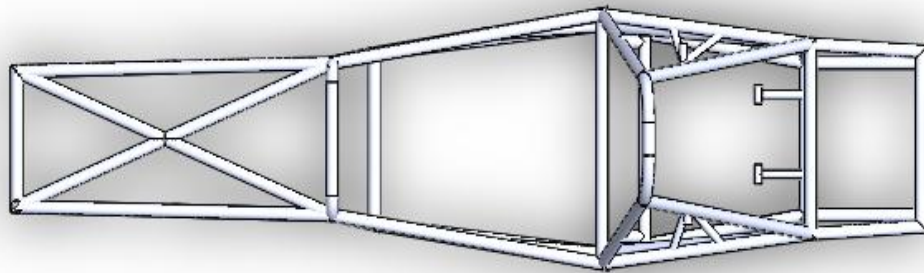
**Εικόνα 6.6 :** Η πλάγια όψη του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE, με τις διαστάσεις που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό.



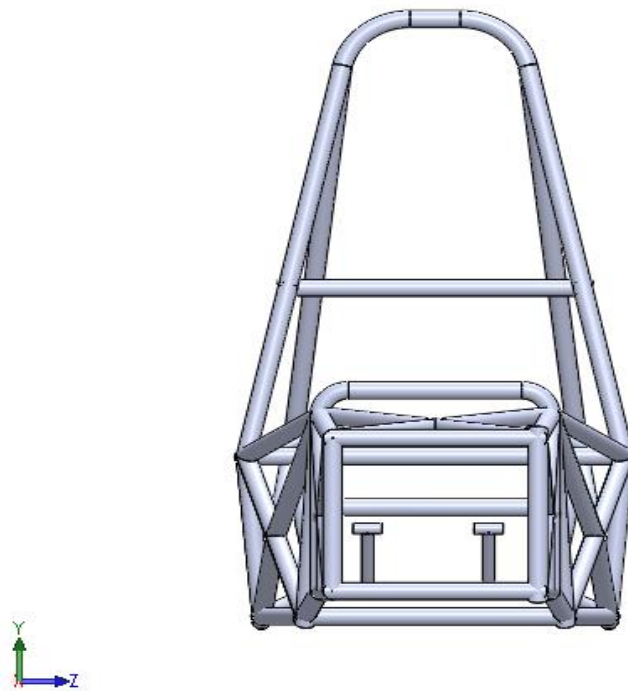
**Εικόνα 6.7 :** Η πλάγια όψη του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE.



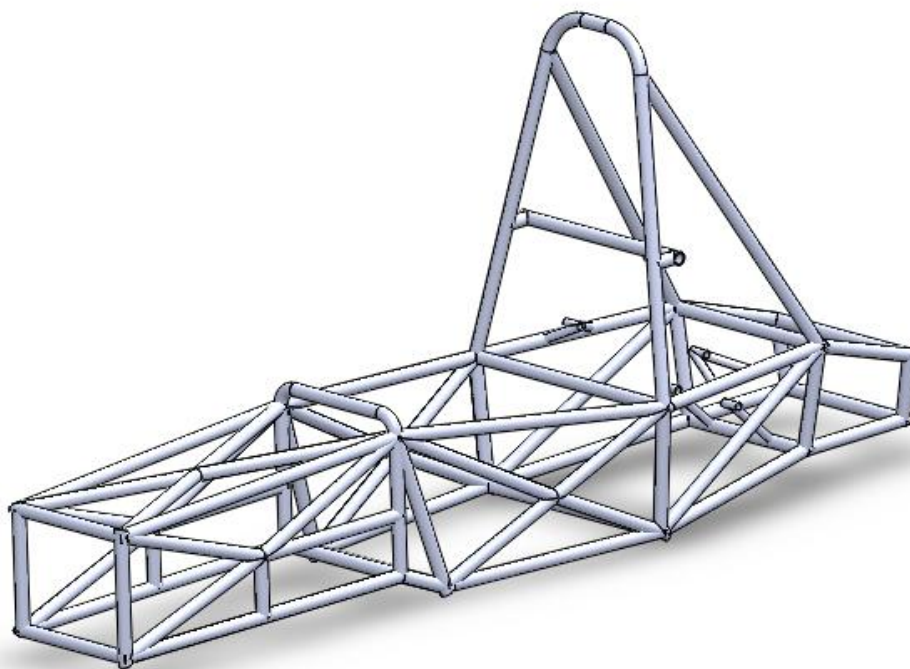
**Εικόνα 6.8 :** Η πάνω όψη του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE, με τις διαστάσεις που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό.



**Εικόνα 6.9 :** Η πάνω όψη του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE.



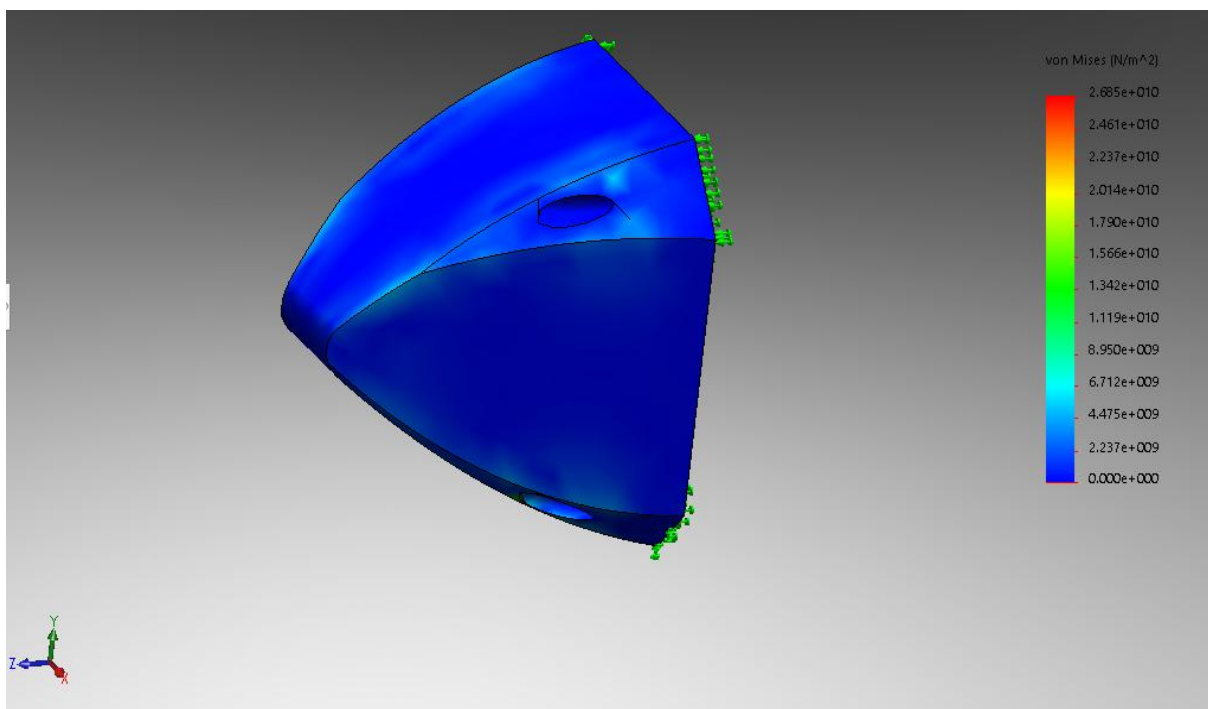
**Εικόνα 6.10 :** Η μπροστά όψη του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE.



**Εικόνα 6.11 :** Το 3D σχέδιο του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE.

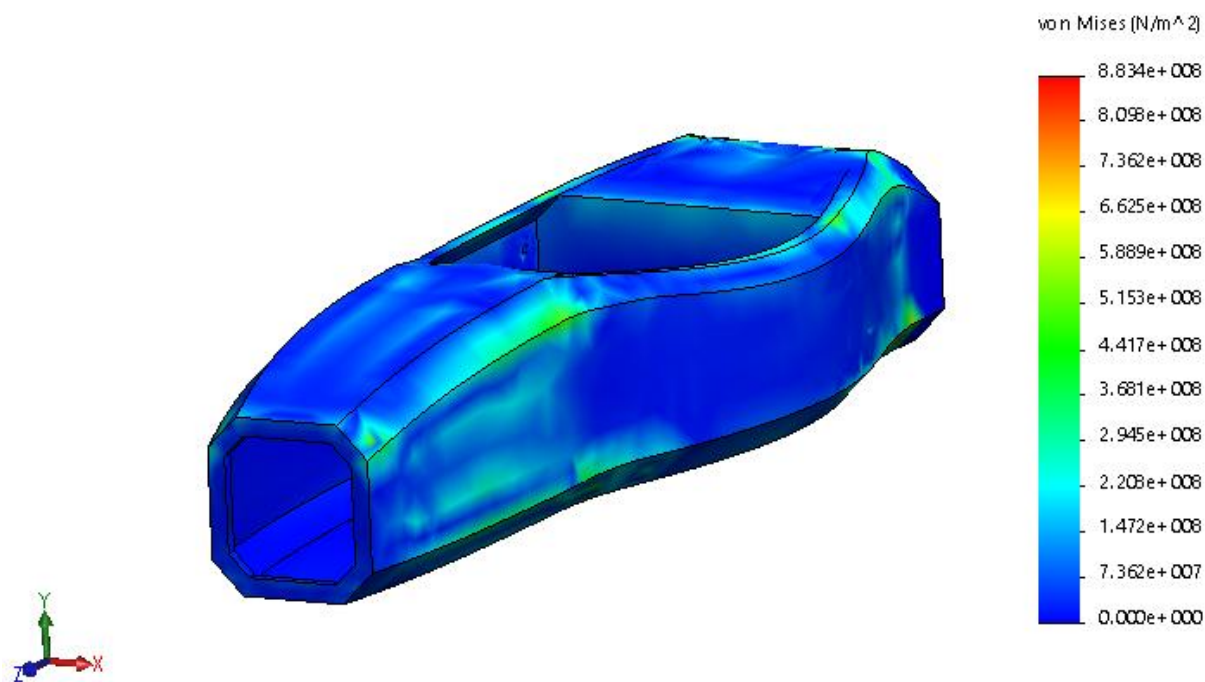
## 6.2 Ανάλυση

Με βάση το σχέδιο για το monopocoque που παρουσιάστηκε στις παραπάνω εικόνες και με τη βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος Solidworks, πραγματοποιήθηκε δυναμική ανάλυση του πλαισίου. Για την ανάλυση που παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες, επιλέχθηκε δομή σάντουιτς. Στα πρόσωπα της δομής χρησιμοποιήθηκε ως επιλογή το ύφασμα από ίνες άνθρακα (carbon fiber,  $E=280$  GPa) και ως υλικό πυρήνα επιλέχθηκε δομή aluminium honeycomb. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης δοκιμάστηκαν διαφορετικά πάχη πυρήνα καθώς και διαφορετικό πλήθος στρώσεων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με πάχη πυρήνα 10 mm, 15 mm και 20mm, καθώς και μεταξύ 3, 5 και 7 στρώσεων carbon fiber, πάχους 0.1 mm. Εκτός από το πλήθος των στρώσεων και το πάχος του πυρήνα, δοκιμάστηκαν διαφορετικές γωνίες ανάμεσα στις στρώσεις. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες, αφορούν την προσέγγιση που έγινε για το πλαίσιο δομής σάντουιτς με 7 στρώσεις carbon fiber και πάχος πυρήνα 20 mm. Η γωνία των στρώσεων επιλέχθηκε να αλλάζει κατά  $90^\circ$  σε κάθε επίστρωση. Το φορτίο που επιλέχθηκε στην προσομοίωση ήταν 30kN σε όλα τα μέρη του πλαισίου.



**Εικόνα 6.12 :** Ανάλυση της δομής *impact*, με εφαρμογή φορτίου συμπίεσης 30 kN.



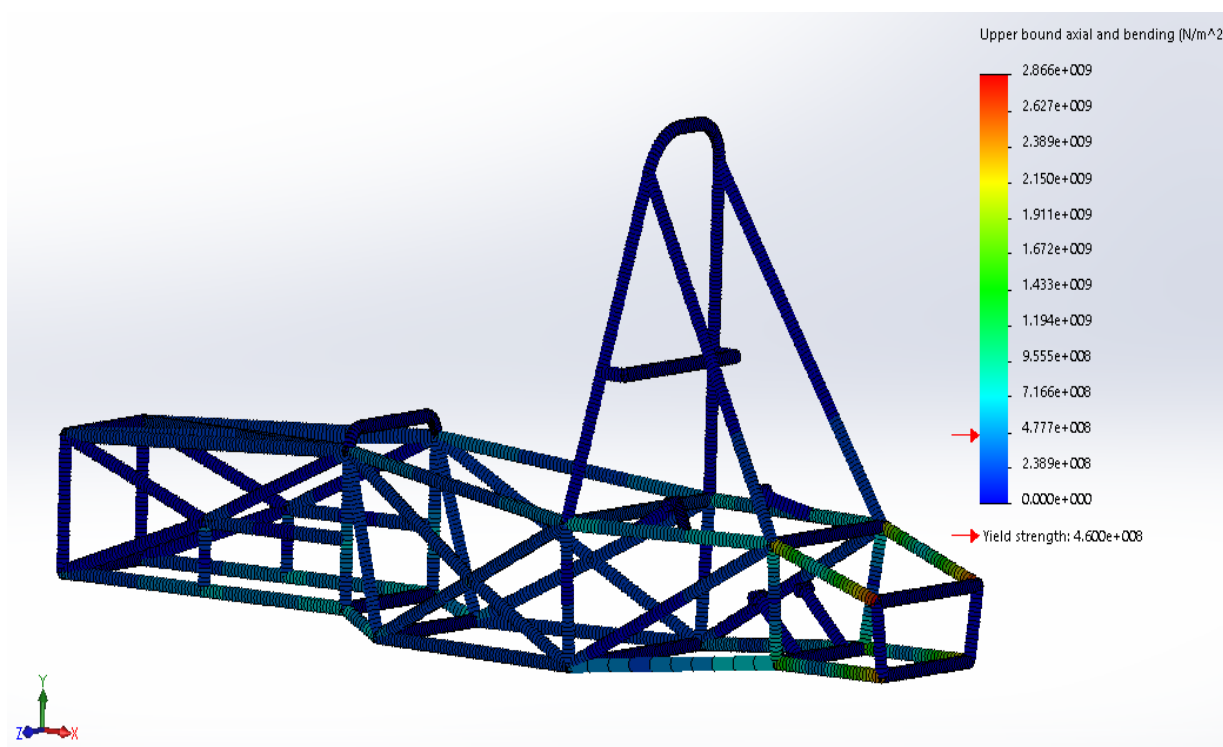


**Εικόνα 6.13 :** Ανάλυση του τοποσομε πλαισίου υπό την εφαρμογή φορτίου συμπίεσης 30kN σε όλες τις επιφάνειες της δομής του.

Για την δομή των Roll Hoops χρησιμοποιήθηκε υλικό CrMo4130. Ωστόσο, η ανάλυση δεν περιλαμβάνει τα Roll Hoops, αλλά μόνο τη δομή του τοποσομε πλαισίου από σύνθετα υλικά, έτσι ώστε να παρουσιαστεί αναλυτικότερα η αντοχή των συγκεκριμένων υλικών σε φόρτιο. Το κόστος και οι ιδιότητες των υλικών παρουσιάζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Όπως φαίνεται από την ανάλυση, το μεγαλύτερο μέρος της δομής μπορεί να φέρει με ασφάλεια το φορτίο που απαιτείται από τον κανονισμό (T.2.40.1), δεδομένου ότι το carbon fiber που χρησιμοποιήθηκε έχει όριο αντοχής 4410 MPa. Κάποια σημεία ωστόσο, λόγω της γεωμετρίας του πλαισίου, ίσως χρειαστούν διαφορετική προσέγγιση για να μπορέσουν να φέρουν με ασφάλεια το φορτίο. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται με αύξηση του αριθμού στρώσεων ή αύξηση του πάχους του πυρήνα. Με την προσθήκη των Roll Hoops, τα οποία βάσει του κανονισμού είναι υποχρεωτικά, υπολογίζεται πως το σύνολο της δομής, είναι σε θέση να φέρει με ασφάλεια τη φόρτιση που προβλέπει ο κανονισμός.

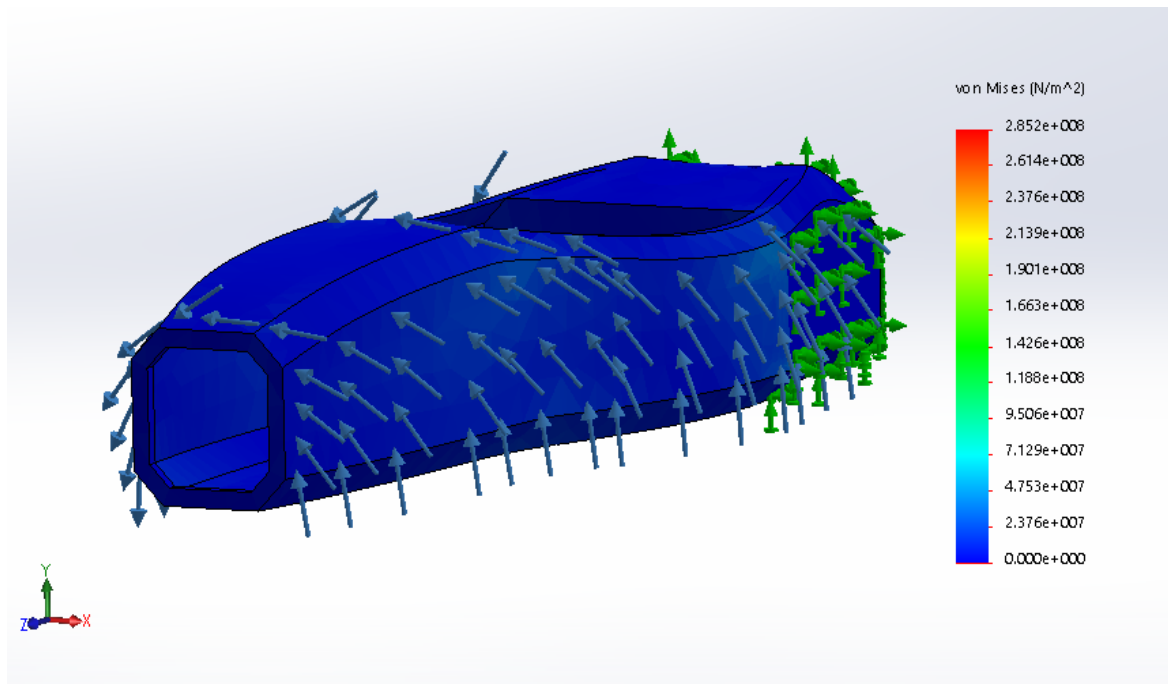
Στην εικόνα 6.14 παρουσιάζεται η ανάλυση του σωληνωτού πλαισίου της ομάδα FP ONE, όταν ασκείται σε αυτό φορτίο κάμψης στην φορά του άξονα x. Λόγω της πολυπλοκότητας και του πλήθους των συνδέσεων σε ένα σωληνωτό πλαίσιο, είναι πολύ σημαντικό να δοκιμάζεται η αντοχή τους στη φάση του σχεδιασμού. Στην προσομοίωση που πραγματοποίησε η ομάδα, επέλεξε ως υλικό το CrMo4130. Από το αποτέλεσμα γίνεται σαφές ότι η δομή από σωληνές χάλυβα και πιο συγκεκριμένα το μέρος της δομής του πλαισίου που φέρει τον οδηγό, μπορούν επίσης να φέρουν με ασφάλεια μια μεγάλη φόρτιση (120 kN), όπως προβλέπει ο κανονισμός [T.2.24].



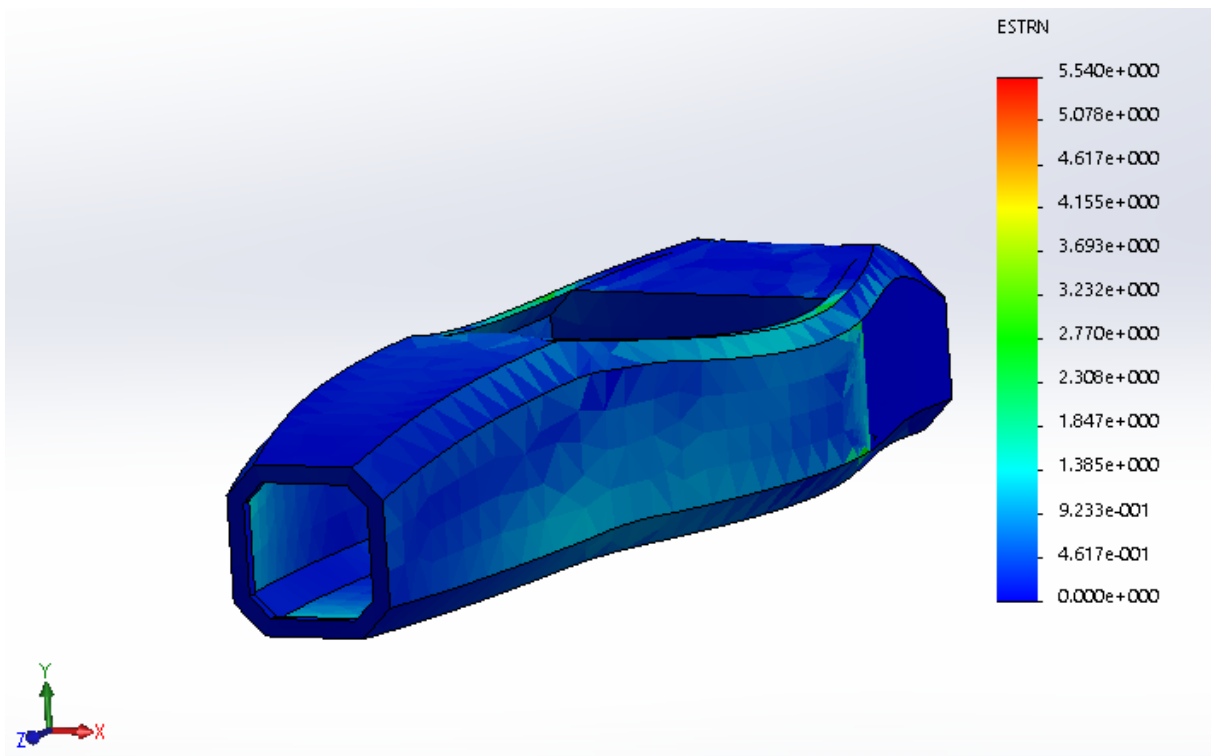
**Εικόνα 6.14 :** Ανάλυση του σωληνωτού πλαισίου της ομάδας FP ONE, όταν εφαρμόζεται σε αυτό φορτίο 120 kN στη φορά του άξονα χ.

Παρότι η αντοχή του πλαισίου σε φορτία κάμψης είναι σημαντική, η σωστή αντίδραση ενός αγωνιστικού πλαισίου σε στρεπτική φόρτιση αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέλημα μιας ομάδας κατασκευαστών. Δεδομένης της προσπάθεια που γίνεται στη παρούσα πτυχιακή για την ανάλυση του πλαισίου ενός αγωνιστικού οχήματος, η στρεπτική αμαψία του πλαισίου μελετήθηκε λεπτομερώς. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του πλαισίου σε στρεπτικά φορτία βάση του κανονισμού.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6.15, κατά τη διαδικασία της ανάλυσης το πίσω μέρος του πλαισίου παρέμεινε σταθερό, ενώ στρεπτικό φορτίο ασκήθηκε μόνο στο μπροστά μέρος του οχήματος. Σκοπός ήταν να προσομοιωθεί η αντίδραση του πλαισίου σε στρεπτικά φορτία στα σημεία των μπροστά τροχών και αναρτήσεων.



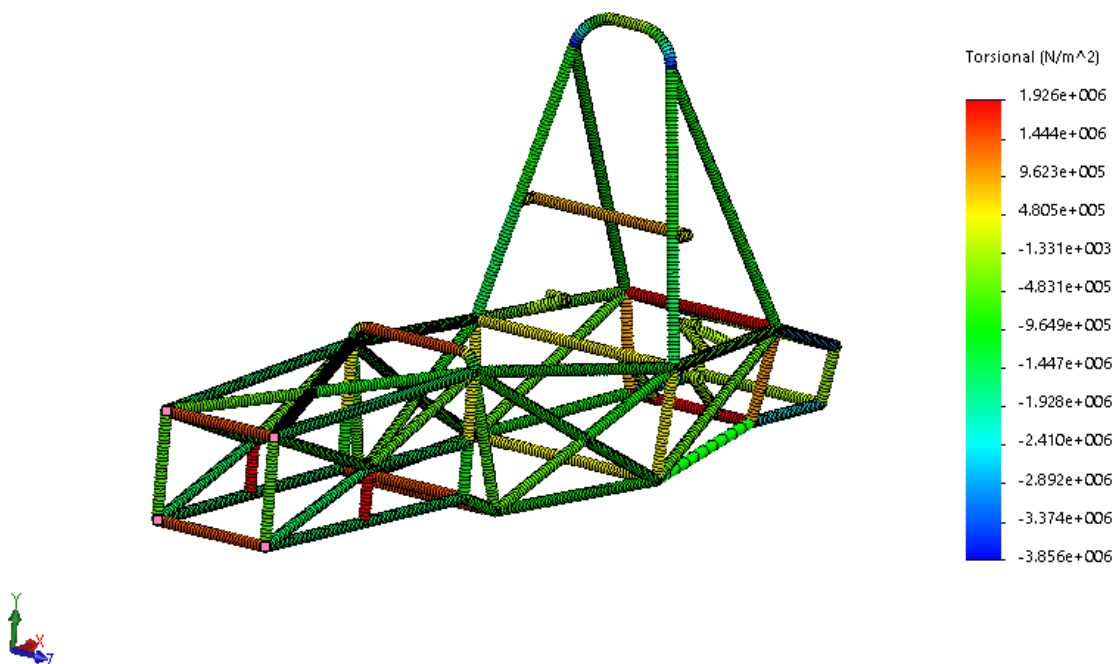
**Εικόνα 6.15 :** Ανάλυση του πλαισίου κάτω από στρεπτική φόρτιση ( με πράσινα βέλη απεικονίζονται τα σημεία που επιλέχθηκαν να παραμείνουν σταθερά, ενώ με μπλέ βέλη η φορά της φόρτισης).



**Εικόνα 6.16 :** Ανάλυση του τοποσομε πλαισίου κάτω από στρεπτική φόρτιση.

Στο σχήμα 6.16 απεικονίζεται η παραμόρφωση του πλαισίου από το στρεπτική φόρτιση. Συγκεκριμένα μετράται η παραμόρφωση (strain)  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ . Όπως προκύπτει από την ανάλυση, το πλαίσιο έχει επαρκή στρεπτική ακαμψία και παρουσιάζει μια ασφαλή αντίδραση στα φορτία που τείνουν να το περιστρέψουν κατά τον άξονα z. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο συνδυασμός της αντοχής σε στρεπτικά φορτία και η τοποθέτηση σωστών αναρτήσεων, παρέχει ένα ασφαλέστερο και αποδοτικότερο όχημα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η στρεπτική ακαμψία του σωληνωτού πλαισίου όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση, όταν ασκείται σε αυτό στρεπτικό φορτίο κατά τον άξονα x.



**Εικόνα 6.17 :** Ανάλυση του σωληνωτού πλαισίου κάτω από στρεπτική φόρτιση γύρω από τον άξονα x.

Μπορεί να γίνει κατανοητό πως ένα σωστά σχεδιασμένο σωληνωτό πλαίσιο, μπορεί να φέρει με ασφάλεια τα φορτία που παρουσιάζονται σε ένα όχημα τύπου FSAE. Για το λόγο αυτό η δομή monocoque επιλέγεται όταν άλλες ιδιότητες είναι σημαντικές. Συγκεκριμένα το σύνθετο monocoque πλαίσιο παρέχει, έναντι του σωληνωτού πλαισίου, χαμηλότερο βάρος και στιβαρότητα. Επίσης, λόγω της συνέχειας που παρουσιάζει στη δομή του, μειώνεται η πολυπλοκότητα της κατασκευής και είναι πιο εύκολο να προβλεφθεί ο τρόπος αστοχίας του. Ωστόσο, όταν επιλέγεται υβριδική δομή που συνδυάζει monocoque και space frame, είναι σημαντικό τα σημεία σύνδεσης να μπορούν να φέρουν τη φόρτιση (30kN) που προβλέπει ο κανονισμός [T.2.40.1].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

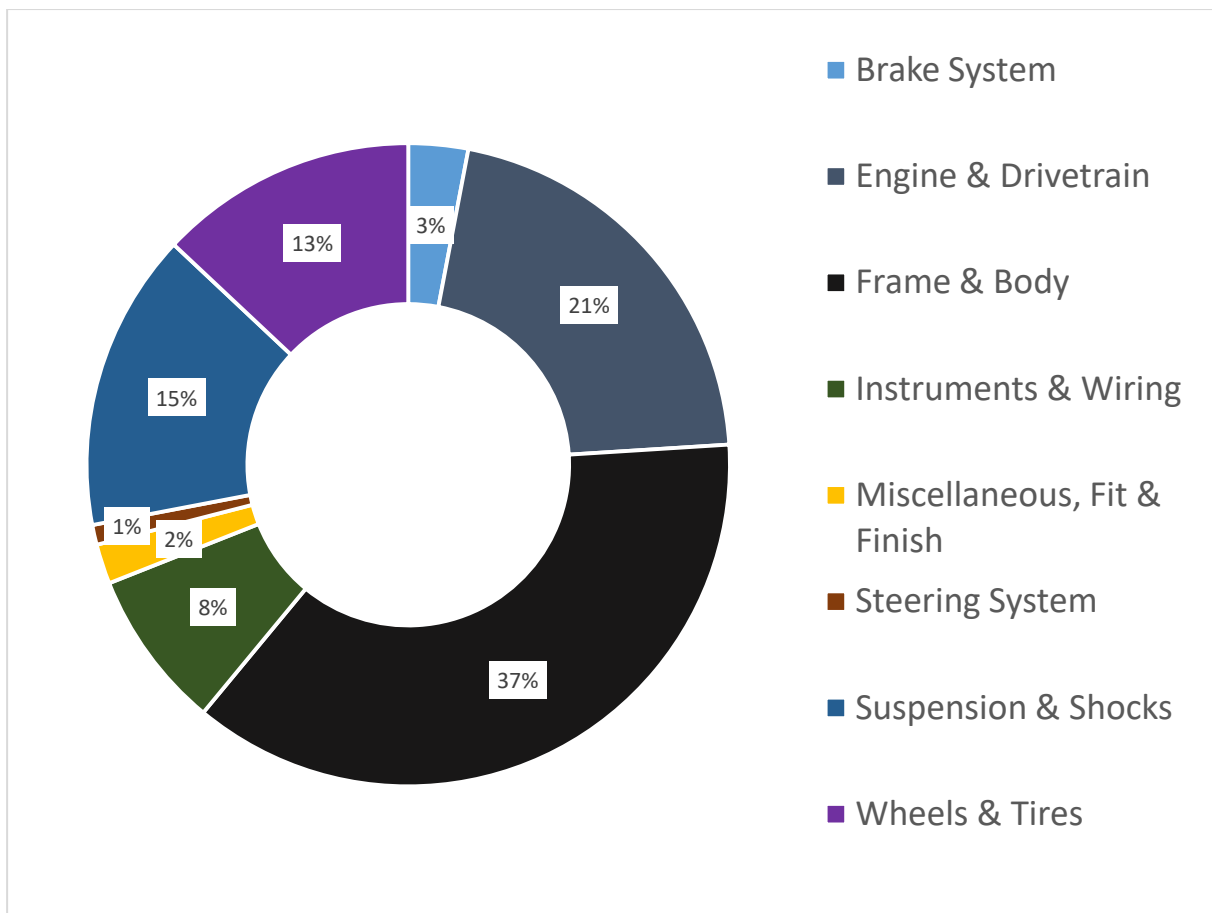
### ΚΟΣΤΟΣ

#### 7.1 Η σημασία του κόστους

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κατασκευή ενός αγωνιστικού οχήματος είναι το οικονομικό κόστος του. Όταν αναφερόμαστε σε σύνθετα υλικά με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, τα οποία φέρουν σημαντικό ρόλο στην επίδοση του οχήματος και στην ασφάλεια του οδηγού, είναι λογικό να γίνεται λόγος για υψηλό κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις, ο κατασκευαστής έρχεται αντιμέτωπος με ένα δίλλημα ανάμεσα στην επιλογή ενός υλικού με πολυ καλές μηχανικές ιδιότητες αλλά με υψηλό κόστος και ενός άλλου υλικού με όχι τόσο καλές μηχανικές ιδιότητες αλλά με χαμηλό κόστος. Τις περισσότερες φορές το κόστος είναι αυτό που θα αναγκάσει το κατασκευαστή να συμβιβαστεί σε μία ενδιάμεση επιλογή, που θα προσφέρει τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες που χρειάζεται η κατασκευή, χωρίς όμως να αυξάνει υπερβολικά το κόστος. Κάτω απο αυτές τις συνθήκες επιλογής, είναι εύκολο να καταλάβει κανείς γιατί το κόστος αποτελεί ένα καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει την εξέλιξη της κατασκευής και γιατί οι ομάδες το λαμβάνουν υπόψιν τους απο τη διαδικασία του σχεδιασμού κιόλας.

Το κόστος της κατασκευής του μονοθεσίου, περιλαμβάνεται στη γραπτή αναφορά κάθε ομάδας και παρουσιάζεται κατά τη διαδικασία του Cost Analysis. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί ένα απο τα κριτήρια που θα οδηγήσει στη τελική βαθμολογία της κάθε ομάδας, αφού μέσω αυτής αποδεκνείται οτι η ομάδα μπορεί να κάνει σωστή διαχείρηση υλικών κατά την κατασκευή πρωτότυπων ιδεών. Επομένως, είναι απαραίτητο στη γραπτή αναφορά να αναγράφεται αναλυτικά, εκτός απο το κόστος των υλικών, το κόστος όλης της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένου του κόστους των εργαλείων, των μηχανικών και ηλεκτρολογικών μερών και εξαρτημάτων.

Το κόστος των υλικών, που αποτελεί ένα μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους, χωρίζεται σε υποκατηγορίες και υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε μέρος του μονοθεσίου. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε μέρος του οχήματος απαιτεί διαφορετική προσέγγιση σε θέματα επιλογής υλικών, αριθμό στρώσεων ( αν αποτελείται απο σύνθετα υλικά), κατεργασίες, χρήση εργαλείων, εργατώρες κ.λ.π. Για το λόγο αυτό, η κατηγορία του κόστους των υλικών συνήθως αποτελείται απο αρκετές υποκατηγορίες, με τη κάθε μια να αναφέρεται σε ένα διαφορετικό μέρος του οχήματος. Συνεπώς, είναι σημαντικό κατά τη διαδικασία κατασκευής να καταγράφονται απο την αρμόδια ομάδα, όλα τα είδη κόστους που θα προκύψουν έτσι ώστε να παρέχεται στο τέλος μια ολοκληρωμένη εικόνα, σχετικά με το συνολικό κόστος μιας τέτοιας κατασκευής.



**Εικόνα 7.1 :** Η ποσοστιαία κατανομή κόστους για όλα τα μέρη ενός μονοθεσίου απο σύνθετα υλικά, όπως αυτή προέκυψε απο την παρουσίαση της ομάδας Cornell University, (2010 -11). [28]

Όπως έχει αναφερθεί ήδη και σε προηγούμενα κεφάλαια, η πτυχιακή αυτή εργασία, έχει στόχο να παρουσιάσει τις επιλογές των σύνθετων υλικών για την κατασκευή ενός οχήματος τύπου Formula SAE, με σκοπό να παρέχει πληροφορίες στους σπουδαστές του τμήματος αλλά και τους υπόλοιπους αναγνώστες, σχετικά με την επιλογή του πλέον κατάλληλου υλικού για την κατασκευή ενός τέτοιου οχήματος. Τη περίοδο συγγραφής αυτής της πτυχιακής εργασίας, δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για το κόστος της κατασκευής του οχήματος του τμήματός μας, δεδομένου ότι βρίσκεται ακόμα στο στάδιο του σχεδιασμού. Επομένως, δεν μπορούν να παρουσιαστούν τα ακριβή τελικά αποτελέσματα που αφορούν το κόστος της κατασκευής, με βάση το σχεδιασμό του οχήματος όπως αυτός έγινε απο την ομάδα του τμήματός μας. Το κόστος θα μπορούσε να υπολογισθεί μόνο προσεγγιστικά αλλά είναι προφανές πως όσο ικανοποιητική και αν είναι μια προσέγγιση, το τελικό αποτέλεσμα θα διαφέρει έστω και ελάχιστα απο το πραγματικό κόστος.

Η διοργάνωση, θέλοντας να προσδώσει ένα σαφές παράδειγμα σχετικά με τη σύνταξη της αναφοράς κόστους, παρέχει στην ιστοσελίδα της κάποιες παλαιότερες αναφορές κόστους απο ομάδες που έχουν συμμετάσχει στο διαγωνισμό. Με το τρόπο αυτό, μπορεί κάποιος να αποκτήσει μια ευρύτερη εικόνα, όχι μόνο για το κόστος του πλαισίου αλλά και για το συνολικό κόστος ενός τέτοιου εγχειρήματος.

## 7.2 Τιμές κόστους για διάφορα υλικά

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό, είναι σχεδόν αδύνατο να παρουσιαστούν οι τιμές κόστους για όλα τα συστατικά μέρη των σύνθετων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη κατασκευή ενός οχήματος τύπου Formula SAE. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος για κάθε υλικό μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την προμηθεύτρια εταιρία, τη συνολική ποσότητα της παραγγελίας, την διαθεσιμότητα του υλικού την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, κ.α.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές κόστους για μερικά υλικά υφάνσεων και πυρήνων που χρησιμοποιούνται στις δομές σύνθετων υλικών κατά τη διαδικασία κατασκευής ενό οχήματος Formula SAE. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται σε αυτούς τους πίνακες αφορούν τα προϊόντα της προμηθεύτριας εταιρίας *Fibermax Composites*, τα οποία μπορεί κάποιος να βρεί και στην ηλεκτρονική της διεύθυνση.

**Πίνακας 7.1 :** Κατάλογος διαφορετικών υλικών υφάσματος [26]

Υλικό Ινών	Ονομασία	Αντοχή εφελκυσμού (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση στη θραύση (%)	Βάρος ( $g/m^2$ )	Είδος πλέξης	Κόστος ( $€/m^2$ )
carbon fiber	C100U	4900	240	2	80	μονής κατεύθυνσης	9.00 €
	C201P	4410	235	1.9	125	απλή πλέξη	13.00 €
	C160T2	4200	240	1.8	160	διαγώνια πλέξη 2x2	15.00 €
	C285T4	3530	230	1.5	285	διαγώνια πλέξη 4x4	13.00 €
	C285S8	3530	230	1.5	285	πλέξη satin 8H	22.00 €
	C470P	1860	135	1.3	470	απλή πλέξη	17.00 €
	C120P	3530	230	1.5	120	απλή πλέξη	70.00 €
	C90P	3530	230	1.5	94	απλή πλέξη	55.00 €
C250S4	4410	235	1.9	250	πλέξη satin 4H	20.00 €	
aramid fiber	K165P	3600	112	2.4	165	απλή πλέξη	12.00 €
	K170T2	2987	91	3.1	170	διαγώνια πλέξη 2x2	13.00 €
	K300T2	2930	102	2.9	300	διαγώνια πλέξη 2x2	20.00 €
	K468P	2863	67	3.7	460	απλή πλέξη	22.00 €
nylon fabric	Z300T2	5800	270	2.5	300	διαγώνια πλέξη 2x2	82.00 €

**Πίνακας 7.2 :** Κατάλογος διαφορετικών τύπων foam πυρήνα [26]

Υλικό πυρήνα	Ονομασία	Βάρος υλικού ( $kg/m^3$ )	Πάχος υλικού (mm)	Διαστάσεις πάνελ (mm x mm)	Συνολική επιφάνεια ενός πάνελ ( $m^2$ )	Κόστος (EUR/πάνελ)
foam	95/02	100	2	950x2050	1.95	20.42 €
	60/03	60	3	1150x2450	2.82	19.09 €
	80/03	80	3	1000x2150	2.15	24.77 €
	95/03	100	3	950x2050	1.95	24.62 €
	95/05	100	5	950x2050	1.95	40.61 €

Στο πίνακα 7.2 παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι foam κατάλληλοι για χρήση ως υλικό πυρήνα σε μια δομή σάντουιτς. Οι συγκεκριμένοι τύποι foam έχουν υψηλή αντοχή, καλή θερμική μόνωση και μικρή απορρόφηση υγρασίας, ενώ ταυτόχρονα έχουν υψηλό λόγο ακαμψίας προς βάρος. Στην εικόνα 7.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται ως πυρήνας σε δομή sandwich, η κυψέλη αραμιδίου. Οι πυρήνες σε σχήμα κυψέλης, διατίθενται σε διαφορετικές διαστάσεις και πάχοι, καθώς και σε διαφορετικά υλικά, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία στις τιμές κόστους.

#### **Κυψέλη Nomex αραμιδίου**

92.32 EUR / πάνελ

Ελάχιστο μέγεθος πάνελ: 1.25 X 2.50 μ.

Συνολική επιφάνεια ενός πάνελ: 3.125 τ.μ.

Πάχος: 3 χιλ

Πυκνότητα: 48 kg / m<sup>3</sup>

Μέγεθος κυψέλης: 3.2 χιλ (εξαγωνική)

#### **ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

Συμπίεση :

Αντοχή: 300 PSI

Ελαστικότητα: 18.5 KSI

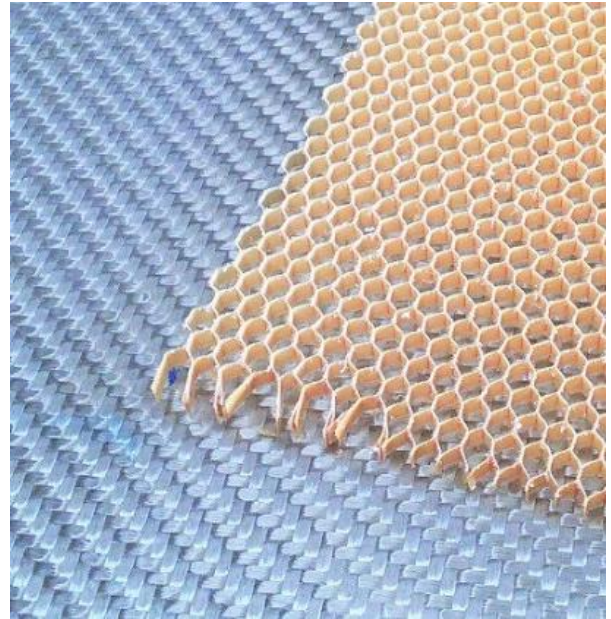
Επιφάνεια διάτμησης :

Αντοχή (PSI "L" κατευθ.): 160

Αντοχή (PSI "W" κατευθ.): 90

Ελαστικότητα (KSI "L" κατευθ.): 5.3

Ελαστικότητα (KSI "W" κατευθ.): 3.1



**Εικόνα 7.2 :** Μηχανικές ιδιότητες και κόστος κυψέλης nomex Kevlar [26]

### **7.3 Παραδείγματα ανοφορών κόστους**

Στην προσπάθεια να παρουσιαστεί μια αναφορά κόστους με πραγματικά δεδομένα και με βάση τις αναφορές κόστους που έχουν συντάξει στο παρελθόν ομάδες-μέλη της διοργάνωσης (π.χ. Cornell University, University of Akron), πραγματοποιήθηκε μια σχετική έρευνα για το κόστος του πλαισίου. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, τόσο για ένα σωληνωτό πλαίσιο (space frame), όσο και για ένα monocoque πλαίσιο με σκοπό να αποκτήσει ο αναγνώστης μια ολοκληρωμένη άποψη για το κόστος μια παρόμοιας κατασκευής.



**Πίνακας 7.3 :** Η ανάλυση κόστους για το μονocoque πλαίσιο της ομάδας Cornell University. [28]

Component	Description	Unit Cost	Quantity	Material Cost	Process Cost	Fastener Cost	Tooling Cost	Total Cost
Monocoque		-	1.00	-	-			-
monocoque		\$ 6,829.47	1.00	\$ 3,165.19	\$ 3,259.28	-	\$ 405.00	\$ 6,829.47
Front Roll Hoop		\$ 16.04	1.00	\$ 5.38	\$ 10.66	-	-	\$ 16.04
Insert		\$ 92.28	1.00	\$ 34.60	\$ 57.68	-	-	\$ 92.28
Sidepod		\$ 441.21	2.00	\$ 277.25	\$ 117.56	\$ 1.40	\$ 45.00	\$ 882.42
Impact Attenuator		\$ 62.29	1.00	-	\$ 54.72	\$ 7.57	-	\$ 62.29
Crushable		\$ 252.50	2.00	\$ 237.50	\$ 15.00	-	-	\$ 505.00
Anti-Intrusion plate		\$ 121.99	2.00	\$ 28.22	\$ 93.77	-	-	\$ 243.98
Nose Cone		\$ 172.92	1.00	\$ 136.58	\$ 27.05	\$ 8.86	\$ 0.43	\$ 172.92
Frame-Monocoque-Engine		\$ 47.00	1.00	-	\$ 24.40	\$ 22.60	-	\$ 47.00
SubFrame		\$ 67.41	1.00	\$ 10.20	\$ 55.21	-	\$ 2.00	\$ 67.41
Steel Space Frame		\$ 123.46	1.00	\$ 22.61	\$ 98.18	-	\$ 2.67	\$ 123.46
Endcaps		\$ 0.11	10.00	\$ 0.01	\$ 0.10	-	-	\$ 1.10
Forward engine mounts		\$ 6.62	2.00	\$ 0.33	\$ 3.62	-	\$ 2.67	\$ 13.24
Rear Upper Engine Mounts		\$ 7.23	2.00	\$ 0.37	\$ 4.19	-	\$ 2.67	\$ 14.46
Rear Lower Engine Mounts		\$ 5.59	2.00	\$ 0.25	\$ 2.67	-	\$ 2.67	\$ 11.18
Lower Rear Susp Rodend Cones		\$ 0.38	8.00	\$ 0.04	\$ 0.34	-	-	\$ 3.04
Upper Rear Susp Rodend Cones		\$ 0.40	8.00	\$ 0.04	\$ 0.36	-	-	\$ 3.20
monocoque Connection Tabs		\$ 94.84	1.00	\$ 3.08	\$ 91.73	-	\$ 0.03	\$ 94.84
<b>Area Total</b>				\$ 3,921.65	\$ 3,916.52	\$ 40.43	\$ 463.14	\$ 9,183.33

**Πίνακας 7.4** : Η ανάλυση κόστους για το σωληνωειδές πλαίσιο της ομάδας Akron University. [29]

Component	Description	Unit Cost	Quantity	Material Cost	Process Cost	Fastener Cost	Tooling Cost	Total Cost
	All body Parts included	-	1.00	-	-			-
Tube Frame	Complete tube space frame	\$ 442.47	1.00	\$ 60.93	\$ 294.43	-	\$ 87.11	\$ 442.47
Tab Points	All tabs and stock	\$ 94.58	1.00	\$ 1.85	\$ 87.40	-	\$ 5.33	\$ 94.58
	All Body Parts Attached	-	1.00	-	-	-	-	-
Structural Reinforcements	Floor and side panels	\$ 162.83	1.00	\$ 118.33	\$ 44.50	-	-	\$ 162.83
Right Side Panels		\$ 93.29	1.00	\$ 63.20	\$ 10.90	\$ 16.80	\$ 2.39	\$ 93.29
Left Side Panels		\$ 93.29	1.00	\$ 63.20	\$ 10.90	\$ 16.80	\$ 2.39	\$ 93.29
Nose Cone		\$ 93.40	1.00	\$ 85.05	\$ 6.07	\$ 0.96	\$ 1.32	\$ 93.40
Hood		\$ 56.12	1.00	\$ 36.40	\$ 6.34	\$ 12.00	\$ 1.38	\$ 56.12
<b>Area Total</b>				\$ 428.96	\$ 460.54	\$ 46.56	\$ 99.92	\$ 1,035.98

Στα παραδείγματα αναφορών κόστους, που παρουσιάζονται στους πίνακες 7.3 και 7.4, μπορεί να επιβεβαιωθεί η μεγάλη απόκλιση των τιμών κόστους για τις δύο διαφορετικές δομές του πλαισίου. Τα υλικά χάλυβα που επιλέγονται συχνά για τη κατασκευή ενός πλαισίου, παρουσιάζουν χαμηλότερο κόστος από τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται όταν επιλέγεται δομή monocoque.

Ένας ακόμα παράγοντας που αυξάνει το κόστος κατασκευής ενός monocoque πλαισίου, είναι η διαδικασία κατασκευής του. Όπως φαίνεται στο πίνακα 7.3, ένα μεγάλο ποσοστό του τελικού κόστους αφορά τη διαδικασία κατασκευής. Αυτό οφείλεται τόσο στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, όσο και στις δαπανηρές, από άποψη κόστους, κατεργασίες που χρειάζεται η δομή και ειδικότερα οι επιφάνειες της κατασκευής. Λόγω των υψηλών απαιτήσεων της κατασκευής, είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση των ατελειών της δομής. Αυτό σημαίνει πως το καλούπι που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και οι τελικές επιφάνειες της δομής, χρειάζονται λεπτομερή κατεργασία και αρκετές εργατοώρες ώστε να επιτευχθεί ένα αποδοτικό αποτέλεσμα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας ήταν να παρουσιάσει στην ομάδα FP ONE χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις επιλογές υλικών και να παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και τη κατασκευή του πλαισίου ενός οχήματος Formula Student. Οι ενότητες αυτές εξετάστηκαν σε βάθος κατά τη διάρκεια της πτυχιακής και τα πορίσματα συνοψίζονται σε αυτό το κεφάλαιο.

Όντας το κεντρικό στοιχείο του αγωνιστικού οχήματος, το monocoque είναι ίσως το κλειδί για τη συνολική απόδοσή του. Επειδή άλλα εξαρτήματα που φέρουν φορτίο είναι συνδεδεμένα στο monocoque, το πλαίσιο πρέπει να απορροφά και να αντιδρά σε ένα πλήθος δυνάμεων. Ένα σύνθετο monocoque προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το πιο παραδοσιακό space frame, αλλά για να αξιοποιήσουμε αποτελεσματικά αυτά τα πλεονεκτήματα, είναι σημαντικό να υιοθετήσουμε μια καλή σκέψη μέσω του σωστού και δομημένου σχεδιασμού.

Δεδομένου ότι το σασί είναι μια αναπόσπαστη ραχοκοκαλιά του αγωνιστικού αυτοκινήτου, αποτελεί μια εξαιρετική ευκαιρία για εξοικονόμηση βάρους, μια απαραίτητη προϋπόθεση για αποτελεσματική και ισχυρή απόδοση. Επιλέγοντας ένα σύνθετο monocoque μπορεί να εξοικονομηθεί σημαντική ποσότητα βάρους. Ίσως το καλύτερο παράδειγμα για αυτή την εξοικονόμηση βάρους είναι το γεγονός ότι τα σύνθετα από ανθρακονήματα αποτελούν σχεδόν στο 85% του όγκου ενός σύγχρονου οχήματος formula 1, ενώ αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 25% της μάζας του.

Εκτός από τη μείωση του βάρους, ένα σύνθετο monocoque παρέχει επίσης την ευκαιρία ενός χαμηλότερου κέντρου βάρους. Καθώς ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο συνεχώς επιταχύνει, είτε θετικά είτε αρνητικά, το χαμηλότερο κέντρο βάρους επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά χειρισμού του.

Ένας βασικός δείκτης απόδοσης του πλαισίου είναι η στρεπτική ακαμψία του. Η ακαμψία του πλαισίου είναι σημαντική γιατί κάνει το πλαίσιο καλύτερο στο χειρισμό όταν διαγωνίζεται, αλλά μεγάλη στρεπτική ακαμψία συνεπάγεται με αυξημένο βάρος. Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι ο ρόλος της ακαμψίας του πλαισίου μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της στρεπτικής δυσκαμψίας.

Το monocoque παρουσιάζει αυξημένη στρεπτική ακαμψία σε σχέση με το σωληνωτό πλαίσιο. Ωστόσο η στρεπτική ακαμψία που προσφέρει το σωληνωτό πλαίσιο μπορεί ήδη να είναι επαρκής. Επομένως, το μεγαλύτερο ίσως όφελος του monocoque πλαισίου είναι το μειωμένο του βάρος.

Λόγω των ικανοποιητικών ιδιοτήτων των ινών που χρησιμοποιούνται στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας (π.χ. ίνες άνθρακα), ένα πλαίσιο από σύνθετα υλικά (monocoque) έχει αποδειχθεί ότι ικανοποιεί εύκολα τις απαιτήσεις ακαμψίας. Επομένως είναι σημαντικό να επικεντρωθούμε σε άλλους παράγοντες, όπως η δυνατότητα κατασκευής και το κόστος του πλαισίου.

Ένας ακόμα βασικός παράγοντας απόδοσης του πλασίου είναι οι αεροδυναμικές του ιδιότητες, οι οποίες ωστόσο δεν μελετήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία. Η αεροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος είναι σημαντικό να μελετηθεί κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, έτσι ώστε να βελτιωθεί η συνολική απόδοση του οχήματος.

Καθώς το monocoque είναι τόσο το σασί όσο και το σώμα του αγωνιστικού αυτοκινήτου, μειώνει σημαντικά τη πολυπλοκότητα του σχεδιασμού. Αποτελούμενο ουσιαστικά από ένα μέρος (ανάλογα με την επιλεγμένη προσέγγιση στη κατασκευή), ένα monocoque επιτρέπει μια πιο αρθρωτή στρατηγική συναρμολόγησης, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Ωστόσο, η σύνθετη παραγωγή ενός monocoque εξακολουθεί να είναι μια σχετικά νέα τεχνική και αν δοκιμαστεί χωρίς επαρκή εμπειρία, η παραγωγή μπορεί να είναι κουραστική και χρονοβόρα, με αμφισβητήσιμη ποιότητα.

Ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα για την επιλογή υλικού είναι ότι δεν υπάρχει μια ιδανική επιλογή που να ικανοποιεί όλες τις πιθανές απαιτήσεις. Όλα τα υλικά και οι δομές έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή υλικού σχετίζεται ως επί το πλείστον με τον καλύτερο συμβιβασμό που μπορεί να υπάρξει ανάμεσα στις παραμέτρους απόδοσης, για να λειτουργήσει το όχημα κάτω από τις συνθήκες του διαγωνισμού.

Λόγω της φύσης των φορτίων που εμφανίζονται σε ένα πλαίσιο αγωνιστικού οχήματος, η δομή σάντουιτς αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Οι επιφάνειες της δομής σάντουιτς θα πρέπει κατά προτίμηση να αποτελούνται από ίνες που προσφέρουν υψηλή ακαμψία, αντοχή και χαμηλό βάρος (π.χ. ίνες άνθρακα).

Τα σύνθετα carbon fibre είναι ινώδη, προσφέροντας υψηλή αντοχή και ακαμψία, με τις ίνες να λειτουργούν ως το κύριο φέρον συστατικό. Έτσι, ένα σύνθετο monocoque από carbon, προσφέρει σημαντική ακαμψία και στιβαρότητα, ενώ ταυτόχρονα έχει χαμηλό βάρος. Μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν περισσότερα από ένα σύνθετα υλικά στην δομή του πλαισίου. Για παράδειγμα, σε σημεία που δέχονται διαφορετική καταπόνηση, όπως το κάτω μέρος του πλαισίου το οποίο πρέπει να είναι ταυτόχρονα ανθεκτικό σε διείσδυση θραυσμάτων, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια επένδυση από zylon ή kevlar, όπως συμβαίνει και σε κάποια μονοθέσια Formula 1. Ένα άλλο μέρος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό υλικό, είναι το μέρος της πλευρικής δομής του οχήματος. Όπως φάνηκε στη προσομοίωση του monocoque πλαισίου, το σημείο αυτό λόγω της γεωμετρίας του χρειάζεται διαφορετική προσέγγιση.

Όσον αφορά τα Roll Hoops του οχήματος, τα οποία βάσει του κανονισμού πρέπει να αποτελούνται από χάλυβα, η επιλογή του CrMo4130 είναι μια αποδεκτή λύση και χρησιμοποιείται συχνά, κυρίως λόγω της εύκολης επεξεργασίας του υλικού. Είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου, ότι όσο περισσότερα υλικά χρησιμοποιούνται στη δομή, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η κατασκευή. Όπως προέκυψε από τη προσομοίωση που έγινε για το monocoque πλαίσιο της ομάδας FP ONE, μια δομή σάντουιτς αποτελούμενη από ισχυρές ίνες μπορεί να φέρει τη στρεπτική φόρτιση, καθώς και τις φορτίσεις από κρούσεις που απαιτούνται από το κανονισμό.

Το κόστος των σύνθετων υλικών επηρεάζει το ποσοστό χρήσης τους σε παρόμοιες κατασκευές. Για το λόγο αυτό πολλές ομάδες κατασκευαστών, επιλέγουν τη δομή του space frame, αφού με τον τρόπο αυτό μειώνουν κατά πολύ το κόστος

του οχήματος. Τα σύνθετα από carbon και kevlar που χρησιμοποιούνται πιο συχνά όταν αποφασίζεται η δομή monoplace, προσφέρουν έναν αποδεκτό συμβιβασμό, ανάμεσα στις μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν και στο κόστος τους. Υλικά όπως το zylon, που θεωρείται η επόμενη γενιά super fiber και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από πολλές γνωστές ίνες, χρησιμοποιούνται λιγότερο σε τέτοιες κατασκευές λόγω του αυξημένου κόστους τους.

Εν ολίγοις, η κατασκευή ενός πλασίου τύπου Formula Student είναι συχνά χρονοβόρα και περίπλοκη. Για να μπορέσει το όχημα να είναι ανταγωνιστικό, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα στη διαδικασία κατασκευής του. Ένα καλά σχεδιασμένο carbon monoplace είναι ελαφρύ, άκαμπτο, στιβαρό, απλό και παρουσιάζει πολύ καλή αναλογία κόστους-απόδοσης. Όπως αποδείχθηκε από τη προσομοίωση που έγινε στο κεφάλαιο 6, ένα πλαίσιο από σύνθετα υλικά μπορεί να παρέχει επαρκή ασφάλεια αλλά και καλή απόδοση. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα πλεονεκτήματα όμως είναι επιτακτική η ύπαρξη μιας αυστηρής και σαφώς καθορισμένης φάσης σχεδιασμού.





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. G.Savage, "Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing" (Honda Racing F1 Team)
2. Opus Book, "The Official Formula1 , The Whole Story"
3. Monocoque – survival cell, <http://www.formula1-dictionary.net>
4. Κανονισμοί Formula Student, [www.fsaeonline.com](http://www.fsaeonline.com)
5. Reid Olsen, Andrew Bookholt, Eric Melchiori , "Composite Suspension for Formula SAE Vehicle", 2010
6. Matthew Hagan, John Rappolt, John Waldrop, " Formula SAE Hybrid Carbon Fiber Monocoque / Steel Tube Frame Chassis, for the Cal Poly Formula SAE Team", 2014
7. "Analysis of Composite chassis", Bachelor Thesis in Applied Mechanics, Carl Andersson, Eurenus, Niklas Danielsson, Aneesh Khokar, Erik Krane, Martin Olofsson, Jacob Wass
8. Smith, C (1978) Tune to Win, Aero Publishers
9. Milliken, D., Milliken, W. (1995) Race Car Vehicle Dynamic, Society of Automotive Engineers
10. George, A., Riley, W. (2002) Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis, Cornell University, SAE technical paper
11. Gaffney, E., Salinas, A. (2004) Introduction to Formula SAE Suspension and Frame Design, University of Missouri, SAE technical paper
12. Costin, M., Phipps, D. (1966) Racing and Sports Car Chassis Design, Bentley Pub
13. Broad, M., Gilbert, T. (2009) Design, Development and Analysis of the NCSHFH.09 Chassis, North
14. M Paul j. Walsh, Zoltek Corporation, „Carcon Fibers“, ASM Handbook, Volume 21, Composites, 2001
15. I.N. Ermolenko, I.P. Lyubliner and N.V. Gulko, "Chemically Modified Carbon Fibers and their Applications", VCH Verlagsgesellschaft, mbH, Weinheim, 1990, Ch.3, p.31-73.
16. Κουτρουμάνης Νικόλαος (2014), "Χαρακτηρισμός ινών άνθρακος υψηλής αντοχής", μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών, Πανεπιστήμιο Πατρών
17. Toyobo - Global, ZYLON®(PBO fiber) Technical Information (2005)
18. Ashby, M. (2010) Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann (CORE MATERIALS)
19. HexWeb honeycomb manual, Hexcel co., 2000
20. P.K. Mallick (2007), "FIBERREINFORCED COMPOSITES Materials, Manufacturing, and Design", Department of Mechanical Engineering University of Michigan-Dearborn

21. <https://www.prweb.com/>
22. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol14-issue4/Version-5/G1404053844.pdf>
23. [https://www.researchgate.net/figure/Primary-structures-FSAE-Rules-2014\\_fig1\\_288154402](https://www.researchgate.net/figure/Primary-structures-FSAE-Rules-2014_fig1_288154402)
24. Production\_of\_a\_Composite\_Monocoque\_Frame\_for\_a\_Formula\_SAE\_Racecar,  
<https://www.researchgate.net/publication/296642077>
25. <https://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel>
26. <http://www.fibermaxcomposites.com>
27. <https://www.fibrefusion.com>
28. Cornell University, Cost Report, 2011
29. University of Akron, Cost Report, 2011
30. <https://reporter.mcgill.ca>
31. <http://adastra.fit.edu/blog/uncategorized/florida-techs-formula-sae-team>
32. <https://www.simscale.com/blog/2015/12/formula-sae-how-to-optimize-a-fuel-tank-in-motorsports>
33. <https://www.rit.edu>
34. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oxford\\_Brookes\\_Racing\\_finishing\\_endurance\\_at\\_Formula\\_Student\\_Germany\\_2016.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oxford_Brookes_Racing_finishing_endurance_at_Formula_Student_Germany_2016.jpg)