

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών



«Σχεδιασμός και κατασκευή πλαισίου από σύνθετα υλικά για
αγωνιστικό όχημα κατηγορίας Formula Student»

“Design and Manufacture of a Composite Frame for Formula
Student Racecar”

Διπλωματική Εργασία

Γεωργίου Δ. Τσουράκη

Επιβλέπων

Τσολάκης Αντώνιος

ΑΘΗΝΑ 2023

Η εξεταστική επιτροπή:

Τσολάκης Αντώνιος

An empty rectangular box with a black border, positioned below the name Τσολάκης Αντώνιος.

Στεργίου Κωνσταντίνος

An empty rectangular box with a black border, positioned below the name Στεργίου Κωνσταντίνος.

Ράπτης Κωνσταντίνος

An empty rectangular box with a black border, positioned below the name Ράπτης Κωνσταντίνος.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «**Σχεδιασμός και κατασκευή πλαισίου από σύνθετα υλικά για αγωνιστικό όχημα κατηγορίας Formula Student**» εκπονήθηκε κατά το έτος 2022-2023, υπό την αιγίδα του Κατασκευαστικού Τομέα των Μηχανολόγων Μηχανικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Τσολάκη Αντώνιο που αποδέχτηκε το αίτημά μου για την επίβλεψη της ανωτέρω διπλωματικής εργασίας καθώς και τον Πρόεδρο, τους Καθηγητές και όλα τα μέλη του Τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών για τη στήριξη που παρείχαν κατά τη σταδιοδρομία μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές του πρώην Τμήματος της Ενεργειακής Τεχνολογίας για τη στήριξη και την καθοδήγηση που παρείχαν κατά τα πρώτα μου χρόνια ως φοιτητής στο ΤΕΙ Αθήνας.

Η συμμετοχή μου στην ομάδα της PROM Racing του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τρία ολόκληρα έτη ήταν μεγάλη μου τιμή και αποτέλεσε μια μοναδική εμπειρία ζωής που με βελτίωσε ως Μηχανικό αλλά και ως Άνθρωπο. Οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους φίλους και συνεργάτες από την ομάδα της PROM Racing, με τους οποίους μοιράστηκα αμέτρητες χαρές και επιτυχίες κατά τη διάρκεια ενός εξαιρετικά απαιτητικού αλλά και μοναδικού έργου. Ευχαριστώ όλους αυτούς που δούλεψαν σκληρά στο πλάι μου, που ξενύχτησαν αμέτρητες φορές μαζί μου και που μαζί καταφέραμε όσα εκ πρώτης όψεως φάινονταν ακατόρθωτα στο μαγικό κόσμο του Formula Student.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη που μου παρείχε όλα τα χρόνια της διάρκειας των σπουδών μου καθώς και την κοπέλα μου που δεν σταμάτησε ποτέ να με στηρίζει και να με βοηθά.

Τέλος θα ήθελα να ήθελα να ευχαριστήσω τον λατρεμένο μου Πατέρα που πίστεψε σε εμένα σα Μηχανικό και παρόλο που δεν βρίσκεται πλέον εδώ, είμαι σίγουρος πως θα ήταν εξαιρετικά υπερήφανος να με βλέπει να αποφοιτώ και να καταφέρνω σπουδαία πράγματα στη ζωή μου.

Περίληψη

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αγωνιστικού οχήματος αποτελούν ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο στο χώρο της Μηχανολογίας. Η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης και του χαμηλότερου βάρους αποτελούν ένα μεγάλο στοίχημα για κάθε Μηχανικό που σχεδιάζει ένα αγωνιστικό όχημα καθώς καλείται να βρει τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων που θα τον οδηγήσει στην νίκη, μέσα από εκατομμύρια διαφορετικούς συνδυασμούς πιθανών εκδοχών. Μέσω αυτής της διαδικασίας, ο Μηχανικός αναπτύσσει την ικανότητα έρευνας, ανάλυσης δεδομένων, λήψης αποτελεσματικών αποφάσεων και επίλυσης προβλημάτων κάνοντας πάντα τους απαραίτητους συμβιβασμούς που θα τον οδηγήσουν στην επιτυχία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η μέθοδος ανάπτυξης ενός πλαισίου από σύνθετα υλικά για ένα αγωνιστικό όχημα της κατηγορίας Formula Student. Το πλαίσιο ενός οχήματος αποτελεί το κέντρο όλων των υποσυστημάτων του καθώς πάνω σε αυτό εδράζονται όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα ενώ ταυτόχρονα καλείται να παραλάβει υψηλά φορτία και δυνάμεις. Στη σημερινή εποχή η εξέλιξη πλαισίων αγωνιστικών οχημάτων έχει σημειώσει πολύ μεγάλη πρόοδο λόγω του του συνδυασμού έρευνας, επιστήμης και νέων τεχνολογιών. Για την επίτευξη υψηλής απόδοσης απαιτείται χαμηλό βάρος και υψηλή ακαμψία, ένας συνδυασμός απαιτήσεων που έρχεται να καλύψει ο τομέας των σύνθετων υλικών.

Αρχικά γίνεται εξοικείωση με τις σχετικές έννοιες και παρουσιάζεται η μηχανική που αφορά τα σύνθετα υλικά. Ύστερα γίνεται ανάλυση των σχετικών κανονισμών και περιορισμών που ορίζει ο διαγωνισμός και επεξηγούνται οι διαφορές μεταξύ ενός συμβατικού χαλύβδινου πλαισίου και ενός πλαισίου τύπου monocoque. Σύμφωνα με το υπολογιστικό εργαλείο που παρέχει ο διαγωνισμός για πλαίσια από σύνθετα υλικά, θα πρέπει να γίνεται πάντα σύγκριση με το ελάχιστο σημείο αναφοράς που είναι ένα αντίστοιχο χαλύβδινο πλαίσιο. Για την επίτευξη αυτό του στόχου πραγματοποιείται πλήθος φυσικών πειραμάτων κάμψης τριών σημείων και πειραμάτων διάτρησης έως ότου βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός στρώσεων για τη διαστρωμάτωση κάθε επιμέρους επιφάνειας του πλαισίου. Επιπλέον πραγματοποιούνται φυσικά πειράματα καταστροφικού ελέγχου για τα διαθέσιμα υλικά προκειμένου να βρεθούν οι μηχανικές ιδιότητές τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τομέας των πεπερασμένων στοιχείων και δημιουργείται ένα μοντέλο αντίστοιχο του πειράματος κάμψης τριών σημείων. Μέσω αυτής της προσομοίωσης υπολογίζεται η απόκλιση που φέρει η υπολογιστική μελέτη σε σχέση με το φυσικό πείραμα και ορίζονται οι βέλτιστες παράμετροι του μοντέλου για το οποίο επιτυγχάνεται σύγκλιση θεωρίας και φυσικού πειράματος. Με βάση αυτές τις παραμέτρους δημιουργείται το τελικό μοντέλο με τη γεωμετρία του τελικού πλαισίου και καθορίζονται οι τρεις βασικές περιπτώσεις καταπόνησης που θα πρέπει να μελετηθούν. Για τις τρεις αυτές περιπτώσεις προτείνονται διαφορετικές τεχνικές διαστρωμάτωσης για κάθε μέρος του πλαισίου που ορίζει ο διαγωνισμός και ελέγχεται ποιος από αυτούς τους συνδυασμούς φέρει τον καλύτερο λόγο ακαμψίας προς βάρους. Ύστερα εφόσον βρεθεί ο πιο αποδοτικός τρόπος διαστρωμάτωσης για κάθε επιμέρους περιοχή του πλαισίου, γίνεται έλεγχος αυτής της τεχνικής κατά τα χειρότερα σενάρια φόρτισης του πλαισίου σε αγωνιστικές συνθήκες. Μέσω των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις παραπάνω εξεταζόμενες περιπτώσεις, αξιολογείται η αντοχή του πλαισίου και διερευνάται εάν θα πρέπει να προστεθούν περαιτέρω στρώσεις για την ενίσχυσή του ή αν υπάρχει το περιθώριο μείωσής τους για την επίτευξη χαμηλότερου βάρους ακολουθώντας βέβαια πάντα τους κατασκευαστικούς περιορισμούς.

Τέλος γίνεται η παρουσίαση της διαδικασίας κατασκευής που σχεδιάστηκε και ακολουθήθηκε προκειμένου το υπό μελέτη πλαίσιο να λάβει πραγματική μορφή.

Πίνακας περιεχομένων

Ευρετήριο εικόνων	1
Ευρετήριο διαγραμμάτων	4
Ευρετήριο πινάκων	4
1 Εισαγωγή	5
1.1 Formula Student	5
1.2 Ιστορικά στοιχεία	6
1.3 Κατηγορίες πλαισίων	7
1.4 Κεντρική ιδέα και στόχοι	8
2 Σύνθετα Υλικά	10
2.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά	10
2.1.1 Γενικός ορισμός	10
2.1.2 Κατηγοριοποίηση και βασικοί ορισμοί	10
2.1.3 Ενίσχυση ινών	11
2.1.4 Μήτρα	13
2.1.5 Προεμποτισμένα υφάσματα (prepreg)	14
2.1.6 Δομή Sandwich	15
2.2 Βασικές αρχές και μηχανική πολυστρωτών	16
2.2.1 Ισότροπα Υλικά	16
2.2.2 Ανισότροπα υλικά	17
2.2.3 Χαρακτηριστικά στρώσης σύνθετου υλικού	17
2.2.4 Στρώση μονής διεύθυνσης	19
2.2.5 Πλεκτά υφάσματα	21
2.3 Μηχανική δομών Sandwich	22
2.3.1 Τάσεις	22
2.3.2 Παραμορφώσεις	23
2.3.3 Περιπτώσεις αστοχίας δομής sandwich	24
3 Κανονισμοί διαγωνισμού και κατασκευαστικοί περιορισμοί	26
3.1 Γενικές αναφορές	26
3.1.1 Πλαίσιο προστασίας από ανατροπή (Roll hoop)	27
3.1.2 Ελεύθερες διατομές πλαισίου (Cockpit opening / Internal cross section)	27
3.1.3 Τοποθέτηση οδηγού	28
3.1.4 Λοιπές αναφορές	29
3.2 Κατηγοριοποίηση μερών του πλαισίου	29
3.2.1 Front bulkhead	30
3.2.2 Front bulkhead support	30
3.2.3 Front hoop bracing	30

3.2.4	Front hoop	30
3.2.5	Main roll hoop	31
3.2.6	Side Impact Structure	31
3.2.7	Main hoop bracing support.....	31
3.3	SES (Structural Equivalency Spreadsheet).....	31
3.4	Φυσικά Πειράματα	33
4	Επιλογή υλικών και αποτελέσματα πειραμάτων	36
4.1	Επιλογή υλικών	36
4.1.1	Υλικό ενίσχυσης.....	37
4.2	Αποτελέσματα φυσικών πειραμάτων	42
4.2.1	Ακαμψία της πειραματικής διάταξης	42
4.2.2	Front Bulkhead	44
4.2.3	Front Bulkhead Support	46
4.2.4	Side Impact Structure (Vertical).....	47
4.2.5	Floor	49
4.2.6	Main Hoop Bracing Support / Front Hoop Bracing	50
5	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	52
5.1	Μέθοδος μοντελοποίησης και στοιχεία εισόδου	52
5.2	Μοντέλο δοκιμίου κάμψης.....	54
5.2.1	Δημιουργία αρχικού μοντέλου	54
5.2.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων	55
5.2.3	Έλεγχος μεγέθους κελιών.....	56
5.3	Βελτιστοποίηση γεωμετρίας.....	57
5.4	Στρεπτική δυσκαμψία.....	60
5.5	Μοντέλο ACP.....	63
5.6	Αξιολόγηση ακαμψίας.....	64
5.6.1	Στρέψη.....	64
5.6.2	Κάμψη	66
5.6.3	Camber	68
5.7	Συγκριτικά αποτελέσματα προτάσεων διαστρωμάτωσης	69
5.8	Περιπτώσεις μεγίστων φορτίσεων.....	71
5.8.1	Σημεία εφαρμογής δυνάμεων και οριακές συνθήκες	71
5.8.2	Μοντέλα αστοχίας.....	72
5.8.3	Επιβράδυνση 2.3g.....	73
5.8.4	Επιτάχυνση 1.4g.....	76
5.8.5	Πλευρική επιτάχυνση 2g	79
5.8.6	Συνδυασμός Πλευρικής και Διαμήκης Επιτάχυνσης (1g +1.4g).....	82

5.9	Ένθετα σύσφιξης.....	85
6	Κατασκευή	86
6.1	Σχεδιασμός Διαδικασίας.....	87
6.2	Σχεδιασμός και κατασκευή αρσενικού καλουπιού.....	89
6.3	Κατασκευή θηλυκού καλουπιού.....	92
6.4	Διαστρωμάτωση μοποσοque.....	95
7	Συμπεράσματα και μελλοντική μελέτη	100
7.1	Συμπεράσματα.....	100
7.2	Μελλοντική μελέτη	100
	Βιβλιογραφία.....	101

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1. Το μονοθέσιο της PROM Racing στο διαγωνισμό Formula Student Austria στο Red Bull Ring, 2019	5
Εικόνα 2. Η LOTUS 25, το πρώτο monopocoque που σχεδίασε και κατασκεύασε ο ιδιοκτήτης της Colin Chapman, 1962.....	6
Εικόνα 3. McLaren MP4/1C, 1983	7
Εικόνα 4. Monopocoque σύγχρονου μονοθεσίου F1	7
Εικόνα 5. Τυπικό πλαίσιο χωροδικτυώματος ενός οχήματος κατηγορίας Formula Student.....	7
Εικόνα 6. Hybrid Monopocoque Chassis	8
Εικόνα 7. Full Carbon Monopocoque	8
Εικόνα 8. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση σύνθετου υλικού με διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης.....	10
Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση παραμόρφωσης ενός ισότροπου, ενός ορθότροπου και ενός ανισότροπου υλικού	11
Εικόνα 10. Υφάσματα πολλαπλής διεύθυνσης με πλέξη και χωρίς πλέξης των ινών.....	13
Εικόνα 11. Διαφορετικοί τύποι πλεκτών υφασμάτων	13
Εικόνα 12. Δομή Sandwich	15
Εικόνα 13. Άξονες ισότροπου υλικού	16
Εικόνα 14. Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ισότροπο υλικό.....	16
Εικόνα 15. Σύγκριση καμπύλης ελαστικότητας μετάλλου και σύνθετου υλικού μονής διεύθυνσης.....	20
Εικόνα 16. Αντικατάσταση στρώσης πλεκτού υφάσματος δύο διευθύνσεων πάχους e με δύο επιμέρους στρώσεις μονής διεύθυνσης πάχους $e/2$	21
Εικόνα 17. Πάχος επιμέρους υλικών δομής sandwich.....	22
Εικόνα 18. Σχηματική αναπαράσταση τάσεων σε δομή sandwich κατά την εφαρμογή καμπτικής ροπής.....	23
Εικόνα 19. Σχηματική αναπαράσταση τάσεων σε μια δομή sandwich.....	23
Εικόνα 20. Δομή sandwich που υποβάλλεται σε κάμψη.....	24
Εικόνα 21. Περιπτώσεις αστοχίας κελύφους σε δομή sandwich	24
Εικόνα 22. Σχηματική απεικόνιση αστοχίας πυρήνα σε δομή sandwich	25
Εικόνα 23. Γεωμετρία και διαστάσεις Roll Hoop	27
Εικόνα 24. Ελάχιστες ελεύθερες διατομές πλαισίου	28
Εικόνα 25. Διαστασιολόγηση θέσης οδηγού.....	28
Εικόνα 26. Ονομασία των επιμέρους σημείων ενός monopocoque πλαισίου κατηγορίας Formula Student.....	30
Εικόνα 27. Side Impact Structure.....	31
Εικόνα 28. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης τριών σημείων.....	34
Εικόνα 29. Πειραματική διάταξη διάτρησης.....	35
Εικόνα 30. Κύκλοι θερμοσκλήρυνσης του επιλεγμένου υλικού	38
Εικόνα 31. Διάταξη πειράματος αντοχής διαστρωματικών τάσεων (MTM 28)	40
Εικόνα 32. Πείραμα δοκιμής για την εύρεση της ακαμψίας της διάταξης.....	42
Εικόνα 33. Πείραμα δοκιμής για την εύρεση της ακαμψίας της διάταξης (πλάγια όψη)	44
Εικόνα 34. Διαστρωμάτωση για το Front Bulkhead	44
Εικόνα 35. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead (3 Point Bending).....	45
Εικόνα 36. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead (Shear)	46
Εικόνα 37. Διαστρωμάτωση για το Front Bulkhead Support.....	46
Εικόνα 38. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead Support (3 Point Bending).....	46
Εικόνα 39. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead Support (Shear).....	47
Εικόνα 40. Διαστρωμάτωση για το Vertical Side Impact Structure.....	47

Εικόνα 41. Υπολογισμοί για το Vertical Side Impact Structure (3 Point Bending).....	48
Εικόνα 42. Υπολογισμοί για το vertical Side Impact Structure (Shear).....	49
Εικόνα 43. Διαστρωμάτωση για το πάτωμα.....	49
Εικόνα 44. Υπολογισμοί για το πάτωμα (3 Point Bending).....	50
Εικόνα 45. Υπολογισμοί για το πάτωμα (Shear).....	50
Εικόνα 46. Διαστρωμάτωση για το Main Hoop Bracing Support & Front Hoop Bracing.....	51
Εικόνα 47. Υπολογισμοί για το Main Hoop Bracing Support & Front Hoop Bracing (3 Point Bending).....	51
Εικόνα 48. Παραμόρφωση δοκιμίου n1 υπό την επίδραση δύναμης 7kN (θεωρητικές ιδιότητες).....	55
Εικόνα 49. Παραμόρφωση δοκιμίου n1 υπό την επίδραση δύναμης 7kN (ιδιότητες όπως προέκυψαν από το φυσικό πείραμα).....	55
Εικόνα 50. Γεωμετρία προηγούμενου πλαισίου της ομάδας Prom Racing (P18).....	58
Εικόνα 51. Αρχικές γεωμετρικές βελτιστοποιήσεις στο πλαίσιο.....	59
Εικόνα 52. Γεωμετρική βελτιστοποίηση του σημείου περιμετρικά του ανοίγματος για το θάλαμο του οδηγού.....	59
Εικόνα 53. Γεωμετρική βελτιστοποίηση της κάθετης περιοχής του Side Impact Structure.....	60
Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής πίστας του διαγωνισμού Formula Student (Πίστα FSG).....	61
Εικόνα 55. Προσέγγιση οχήματος ως ένα σύστημα τριών ελατηρίων σε σειρά.....	62
Εικόνα 56. Πλέγμα διακριτοποίησης (mesh) πλαισίου και ανάρτησης.....	63
Εικόνα 57. Ποσοτικά χαρακτηριστικά πλέγματος.....	64
Εικόνα 58. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της στρέψης του εμπρός άξονα.....	65
Εικόνα 59. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της στρέψης και των δύο αξόνων.....	65
Εικόνα 60. Απεικόνιση αποτελέσματος στρέψης λόγω άσκησης ροπής στον μπροστά άξονα.....	65
Εικόνα 61. Απεικόνιση αποτελέσματος στρέψης λόγω άσκησης αντίθετης ροπής της δύο άξονες.....	66
Εικόνα 62. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της κάμψης του εμπρός άξονα.....	67
Εικόνα 63. Απεικόνιση αποτελέσματος κάμψης του εμπρός άξονα.....	67
Εικόνα 64. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της κάμψης και των δύο αξόνων.....	67
Εικόνα 65. Απεικόνιση αποτελέσματος κάμψης και των δύο αξόνων.....	68
Εικόνα 66. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση παραμόρφωσης camber.....	68
Εικόνα 67. Απεικόνιση αποτελέσματος παραμόρφωσης camber.....	69
Εικόνα 68. Μοντελοποίηση επιβράδυνσης 2.3g.....	74
Εικόνα 69. Επιβράδυνση 2.3g (Von Mises).....	74
Εικόνα 70. Επιβράδυνση 2.3g (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu).....	74
Εικόνα 71. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους).....	75
Εικόνα 72. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους).....	75
Εικόνα 73. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους) ..	75
Εικόνα 74. Μοντελοποίηση επιτάχυνσης 1.4 g.....	77
Εικόνα 75. Επιτάχυνση 1.4g (Von Mises).....	77
Εικόνα 76. Επιτάχυνση 1.4g (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu).....	77
Εικόνα 77. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους).....	78
Εικόνα 78. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους).....	78
Εικόνα 79. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους).....	78
Εικόνα 80. Μοντελοποίηση πλευρικής επιτάχυνσης 2g.....	80
Εικόνα 81. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Von Mises).....	80
Εικόνα 82. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu).....	80
Εικόνα 83. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)....	81
Εικόνα 84. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)....	81

Εικόνα 85. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους)	81
Εικόνα 86. Μοντελοποίηση στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)	83
Εικόνα 87. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Von Mises).....	83
Εικόνα 88. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu)	83
Εικόνα 89. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)	84
Εικόνα 90. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)	84
Εικόνα 91. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους).....	84
Εικόνα 92. Σχηματική απεικόνιση διατομής ενθέτου (insert) σύσφιξης.....	85
Εικόνα 93. Ένθετο βάσης στήριξης αμορτισέρ.....	86
Εικόνα 94. Πραγματοποίηση φυσικού πειράματος μικρότερης κλίμακας.....	89
Εικόνα 95. Διαχωρισμός γεωμετρίας πλαισίου για τη δημιουργία αρσενικών καλουπιών.....	90
Εικόνα 96. Αρσενικά καλούπια.....	90
Εικόνα 97. Κάτοψη αρσενικών καλουπιών.....	90
Εικόνα 98. Κατασκευή αρσενικών καλουπιών	91
Εικόνα 99. Επιδιόρθωση και βαφή αρσενικών καλουπιών	91
Εικόνα 100. Φινίρισμα αρσενικών καλουπιών.....	92
Εικόνα 101. Διαστρωμάτωση θηλυκού καλουπιού.....	93
Εικόνα 102. Διαστρωμάτωση και εφαρμογή πυρήνα στο θηλυκό καλούπι.....	93
Εικόνα 103. Ενισχυτικά μέρη θηλυκού καλουπιού.....	93
Εικόνα 104. Μεθοδολογία διάτρησης θηλυκών καλουπιών	94
Εικόνα 105. Θηλυκό καλούπι με οπές για τη μεταφορά των σημείων συναρμογής στο monocoque	94
Εικόνα 106. Ένωση θηλυκών καλουπιών	95
Εικόνα 107. Εφαρμογή 1ης στρώσης εξωτερικού κελύφους	95
Εικόνα 108. Τοποθέτηση ενθέτων στον πυρήνα	96
Εικόνα 109. Διαμόρφωση πυρήνα αλουμινίου.....	96
Εικόνα 110. Πλακίδια ευθυγράμμισης ενθέτων.....	96
Εικόνα 111. Τοποθέτηση πλακιδίων ευθυγράμμισης ενθέτων.....	97
Εικόνα 112. Κατασκευή σακούλας και εφαρμογή κενού αέρος στο εσωτερικό της (Πίεση 0.05 bar).....	97
Εικόνα 113. Τοποθέτηση του θηλυκού καλουπιού στον ειδικό φούρνο για τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης	98
Εικόνα 114. Απόσταση μεταξύ σημείων της ανάρτησης (Σχέδιο).....	98
Εικόνα 115. Μετρούμενη απόσταση μεταξύ σημείων της ανάρτησης (Κατασκευή)	99
Εικόνα 116. Monocoque μετά το διαχωρισμό από το καλούπι.....	99

Ευρετήριο διαγραμμάτων

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων ενίσχυσης σύνθετων υλικών	12
Πίνακας 2. Ελάχιστο πάχος και επιφάνεια διατομής των χαλύβδινων σωλήνων αναφοράς...	32
Πίνακας 3. Ιδιότητες υλικού ενίσχυσης (MTM28 245gsm).....	41
Πίνακας 4. Ιδιότητες πυρήνα honeycomb αλουμινίου	41
Πίνακας 5. Συγκριτικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης 3 σημείων για το Δοκίμιο n1	55
Πίνακας 6. Συγκριτικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης 3 σημείων για το Δοκίμιο n2	56
Πίνακας 7. Απόκλιση αποτελεσμάτων μελέτης πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων	57
Πίνακας 8. Σύγκριση μεταξύ των γεωμετρικών βελτιώσεων του πλαισίου	60
Πίνακας 9. Συγκριτικά αποτελέσματα διαφορετικών τύπων διαστρωμάτωσης.....	70
Πίνακας 10. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση επιβράδυνσης 2.3g.....	73
Πίνακας 11. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση επιβράδυνσης 2.3 g.....	76
Πίνακας 12. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση επιτάχυνσης 1.4g	76
Πίνακας 13. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση επιτάχυνσης 1.4 g	79
Πίνακας 14. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση πλευρικής επιτάχυνσης 2g.....	79
Πίνακας 15. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση πλευρικής επιτάχυνσης 2g..	82
Πίνακας 16. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)	82
Πίνακας 17. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)	85

1 Εισαγωγή

1.1 Formula Student

Το Formula Student είναι ένας παγκόσμιος διαπανεπιστημιακός διαγωνισμός στον οποίο οι φοιτητές καλούνται να μελετήσουν, να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ένα πλήρως λειτουργικό αγωνιστικό όχημα. Ο συγκεκριμένος διαγωνισμός αποτελεί ένα κομμάτι του μηχανοκίνητου αθλητισμού καθώς οι φοιτητές ζητούνται να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ένα αγωνιστικό όχημα που να είναι αποδοτικό και αξιόπιστο, επιτρέποντάς τους να νικήσουν επιτυγχάνοντας καλύτερες επιδόσεις από τον ανταγωνισμό. Φυσικά ως ένας φοιτητικός διαγωνισμός, το Formula Student έχει κάποιες ιδιαιτερότητες ως προς την ύπαρξη και τους στόχους του καθώς αποτελείται από ένα θεωρητικό και ένα πρακτικό μέρος.

Όσον αφορά το θεωρητικό μέρος, μέσα από αυτό το διαγωνισμό ο φοιτητής αποκτά τη δυνατότητα να μελετήσει τη βιβλιογραφία, να διευρύνει τις ακαδημαϊκές του γνώσεις και να εφαρμόσει την θεωρία της μηχανικής μέσω πρακτικών εφαρμογών. Ουσιαστικά μαθαίνει να προσεγγίζει τα προβλήματα χρησιμοποιώντας αναλυτικό τρόπο και κατανοεί τη σημασία της αιτιολόγησης σε όλες του τις σχεδιαστικές αποφάσεις. Αυτό άλλωστε οφείλει να κάνει και στα στατικά αγωνίσματα του διαγωνισμού όπου έρχεται αντιμέτωπος με τις ερωτήσεις έμπειρων μηχανικών (κριτών) και καλείται να απαντήσει γιατί επέλεξε τη συγκεκριμένη σχεδιαστική μέθοδο για κάθε εξάρτημα που βρίσκεται πάνω στο όχημα που κατασκεύασε. Επιπλέον στα στατικά αγωνίσματα καλείται να παρουσιάσει ποιο ήταν το κόστος του οχήματος που κατασκεύασε καθώς ένα επιχειρηματικό πλάνο που να παρουσιάζει τους λόγους για τους οποίους το συγκεκριμένο εγχείρημα αποτελεί μια αποδοτική επιλογή για κάποιον που θα ήθελε να επενδύσει σε αυτό το προϊόν.

Όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το Formula Student αποτελεί ένα κομμάτι του μηχανοκίνητου αθλητισμού και ο φοιτητής καλείται να κατασκευάσει ένα αποδοτικό και αξιόπιστο μονοθέσιο. Στα δυναμικά χρονομετρημένα αγωνίσματα που λαμβάνουν χώρα μετά τα στατικά αγωνίσματα του θεωρητικού μέρους, το όχημα δοκιμάζεται σε 4 διαφορετικά αγωνίσματα όπου μελετάται η επίδοσή του στην επιτάχυνση σε ευθεία, στην πλευρική επιτάχυνση σε στροφές καθώς και στην αντοχή στην καταπόνηση. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως ο φοιτητής καλείται να κάνει τους απαραίτητους σχεδιαστικούς συμβιβασμούς προκειμένου να επιτύχει τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό βάρους, ακαμψίας, ιπποδύναμης και αξιοπιστίας του οχήματός του βάσει των δεδομένων του εκάστοτε διαγωνισμού.[1]



Εικόνα 1. Το μονοθέσιο της PROM Racing στο διαγωνισμό Formula Student Austria στο Red Bull Ring, 2019

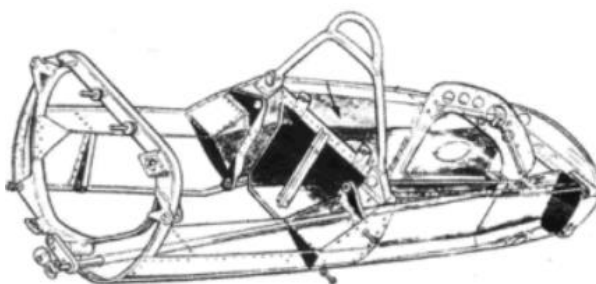
Επιπρόσθετα απαραίτητη είναι και η αναφορά στους κανονισμούς ασφαλείας. Οι διαγωνισμοί Formula Student δημοσιοποιούν κάθε χρόνο ένα έγγραφο[1] που περιέχει όλους του κανονισμούς που θα πρέπει να ακολουθεί κάθε ομάδα. Ανώτερος στόχος των κανονισμών είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας όλων των συμμετεχόντων κάθε διαγωνισμού, τόσο στα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής όσο και στη διάρκεια του διαγωνισμού, μέσω σχεδιαστικών περιορισμών, διατύπωσης ορθών μηχανολογικών πρακτικών και κανόνων συμπεριφοράς. Τέτοιοι περιορισμοί ορίζονται φυσικά και για το πλαίσιο του οχήματος το οποίο θα πρέπει να προστατεύει τόσο τον οδηγό όσο και τους υπόλοιπους συμμετέχοντες από πιθανούς κινδύνους όπως μια σύγκρουση ή μια δυσλειτουργία ενός υποσυστήματος του οχήματος. Επιπροσθέτως προκειμένου μια ομάδα να πάρει την τελική έγκριση προκειμένου να συμμετάσχει στα δυναμικά αγωνίσματα του διαγωνισμού, το όχημά της θα πρέπει να περάσει επιτυχώς από τη διαδικασία του μηχανολογικού ελέγχου κατά την οποία κάθε εξάρτημα και υποσύστημα του οχήματος ελέγχεται για το αν πληροί όλους τους κανονισμούς που έχουν τεθεί. Φυσικά η αδυναμία επιτυχούς ολοκλήρωσης του μηχανολογικού ελέγχου είναι σύνηθες φαινόμενο και αν αντίστοιχη ομάδα δεν έχει τη δυνατότητα να κάνει τις απαραίτητες μετατροπές συμμόρφωσης με τους κανονισμούς, τότε δεν μπορεί να πάρει την τελική έγκριση συμμετοχής στα δυναμικά αγωνίσματα.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως μέσα από το διαγωνισμό Formula Student, ο φοιτητής έχει τη δυνατότητα να εξελίξει τις μηχανολογικές του γνώσεις, να αναπτύξει πλήθος πολύτιμων δεξιοτήτων και να αλληλεπιδράσει με φοιτητές άλλων ομάδων από όλο τον κόσμο που μοιράζονται το ίδιο πάθος για τον τομέα της μηχανολογίας και του μηχανοκίνητου αθλητισμού.

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Είναι κοινά αποδεκτό πως το αγώνισμα της Formula 1 αποτελεί την υψηλότερη κατηγορία στο χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού και αποτελεί το «βασιλιά» των αγωνισμάτων τα τελευταία τουλάχιστον εξήντα χρόνια. Τη σημερινή δε εποχή, τα υλικά, οι μέθοδοι κατασκευής καθώς και τα υπολογιστικά εργαλεία έχουν φτάσει σε εξαιρετικά υψηλό επίπεδο που θα μπορούσαν να συγκριθούν ακόμα και με τομείς όπως η αεροδιαστημική. Φυσικά αυτή η εξέλιξη πραγματοποιήθηκε μέσα από σειρά πολλών ετών όπου ο υψηλός ανταγωνισμός, η υγιής καινοτομία και πολλοί επαναληπτικοί βρόχοι επανεκτιμήσεων και τελειοποίησης οδήγησαν στο σημερινό επίπεδο όπου η Formula 1 αποτελεί πλέον την αιχμή του δόρατος στο χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Ορόσημα για αυτή την πορεία εξέλιξης αποτελούν τα έτη 1962, 1965, 1980 και 1993.

Πιο συγκεκριμένα μέχρι τη δεκαετία του 1960, όλες οι ομάδες χρησιμοποιούσαν πλαίσια που ακολουθούσαν τη σχεδιαστική αρχή του χωροδικτύωματος και ήταν κατασκευασμένα από χάλυβα ή αλουμίνιο. Κατά το έτος 1962 ο Colin Chapman, ιδρυτής της ομάδας LOTUS εισήγαγε στο χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού τον σχεδιασμό του monocoque στην αρχική του μορφή επιλέγοντας ως βασικό υλικό το αλουμίνιο και επιτυγχάνοντας σημαντική αύξηση στην ακαμψία του πλαισίου.



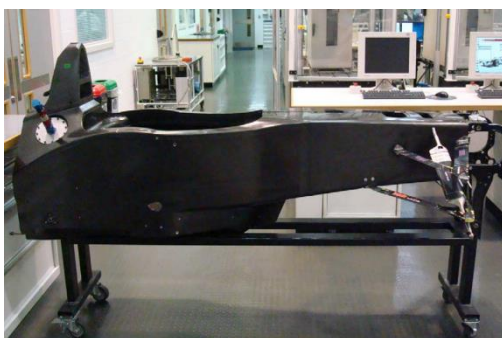
Εικόνα 2. Η LOTUS 25, το πρώτο monocoque που σχεδίασε και κατασκεύασε ο ιδιοκτήτης της Colin Chapman, 1962

Στη συνέχεια κατά το έτος 1965 η McLaren M2A ήταν το πρώτο αγωνιστικό όχημα στο monocoque του οποίου χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά αντί αποκλειστικά αλουμινίου.

Η σημαντικότερη δε σχεδιαστική καινοτομία πραγματοποιήθηκε από την ομάδα της McLaren το έτος 1981 όπου έγινε για πρώτη φορά χρήση ανθρακονημάτων για περαιτέρω μείωση του βάρους και αύξηση της ακαμψίας. Την ίδια περίοδο πλήθος ομάδων χρησιμοποίησε διαφορετικούς συνδυασμούς υλικών για την επίτευξη των παραπάνω στόχων ωστόσο το ανθρακόνημα αποτέλεσε το κυρίαρχο υλικό για σειρά ετών. Τέλος σημείο ορόσημο για το χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού αποτέλεσε το έτος 1993 όταν σημειώθηκε ο θάνατος του κορυφαίου οδηγού Ayrton Senna. Μέχρι το έτος αυτό, βασικός γνώμονας σχεδιασμού για όλες τις ομάδες ήταν ο λόγος βάρους προς ακαμψίας προκειμένου να επιτύχουν τις καλύτερες δυνατές επιδόσεις, αφήνοντας όμως σε δεύτερη μοίρα τον τομέα της ασφάλειας του οδηγού. Αυτό το τραγικό συμβάν αποτέλεσε την αφορμή για την αναθεώρηση των σχεδιαστικών κανονισμών βάζοντας στο επίκεντρο την ασφάλεια των οδηγών προκειμένου να μην επαναληφθεί ξανά κάποιος θάνατος κατά τη διάρκεια ενός αγώνα.[2]



Εικόνα 3. McLaren MP4/1C, 1983



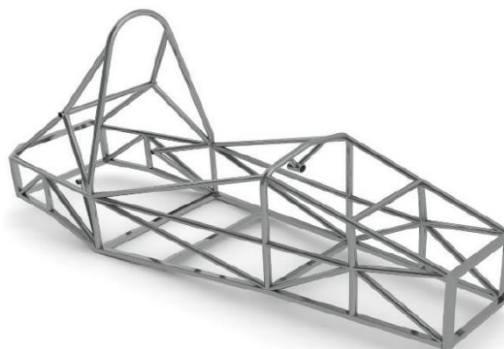
Εικόνα 4. Μονocoque σύγχρονου μονοθεσίου F1

1.3 Κατηγορίες πλαισίων

Καθώς το πλαίσιο αποτελεί ένα από τα δομικά μέρη του οχήματος με τις σημαντικότερες προς αναφορά διαστάσεις, ο σχεδιασμός του θα πρέπει να εστιάζει στην επίτευξη ικανοποιητικού βάρους χωρίς ωστόσο να γίνονται συμβιβασμοί στα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την απόδοσή του. Στην πραγματικότητα, η απόδοση μιας κατασκευής πλαισίου αξιολογείται μέσω της στρεπτικής του δυσκαμψίας, της ικανότητάς του να παραλαμβάνει φορτία από άλλα υποσυστήματα και της γενικότερης συνεισφοράς του στο τελικό βάρος του οχήματος.

Μπορούν λοιπόν να οριστούν τρεις βασικές κατηγορίες πλαισίου για ένα αγωνιστικό όχημα στην κατηγορία του Formula Student:

Πλαίσιο τύπου χωροδικτύωματος (Spaceframe). Ένα τέτοιο πλαίσιο αποτελείται από ένα σύνολο συγκολλητών δοκών οι οποίες είναι σχεδιασμένες και τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν τριγωνικές διατάξεις και να φορτίζονται μόνο σε εφελκυσμό και θλίψη, στις βέλτιστες δηλαδή περιπτώσεις καταπόνησης που αντέχουν τα περισσότερα υλικά. Βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία κατασκευής καθώς και το χαμηλό κόστος συγκριτικά με ένα πλαίσιο τύπου monocoque.



Εικόνα 5. Τυπικό πλαίσιο χωροδικτύωματος ενός οχήματος κατηγορίας Formula Student

Υβριδικό Monocoque (Hybrid Monocoque)

Ένα τέτοιο πλαίσιο συνήθως αποτελεί ένα συνδυασμό ενός monocoque και ενός spaceframe. Το μπροστινό μέρος του πλαισίου όπου βρίσκεται ο οδηγός είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά έχοντας τη μορφή του monocoque και το πίσω μέρος του πλαισίου όπου βρίσκεται ο κινητήρας είναι ουσιαστικά ένα χωροδικτύωμα δοκών. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο συνδυασμός χαμηλού βάρους και υψηλής ακαμψίας του πλαισίου συγκριτικά με ένα spaceframe αλλά η μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία στο χώρο που εδράζεται ο κινητήρας λόγω του «ανοικτού» χωροδικτυώματος που τον περικλείει. Η συναρμογή των δύο κομματιών γίνεται συνήθως με κοχλιοσύνδεση και η παραπάνω μέθοδος επιλέγεται συνήθως λόγω της ευκολίας κατασκευής σε σχέση με ένα πλήρες monocoque.[3]



Εικόνα 6. Hybrid Monocoque Chassis

Monocoque με ενίσχυση ανθρακονημάτων (Full carbon monocoque)

Ένα πλήρες monocoque με ενίσχυση ανθρακονημάτων αποτελεί συνήθως την αποδοτικότερη επιλογή λόγω του υψηλότερου λόγου βάρους προς ακαμψία συγκριτικά με τους δύο τύπους πλαισίου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το κλειστό του κυλινδρικό κέλυφος αποτελεί τη βέλτιστο σχήμα για την επίτευξη στρεπτικής δυσκαμψίας ενώ λόγω της ελευθερίας σχεδιασμού καθώς και της δυνατότητας επίτευξης πολύπλοκης γεωμετρίας, μπορεί επιφέρει υψηλότερη αεροδυναμική απόδοση. Η συγκεκριμένη σχεδιαστική επιλογή επιλέγεται όταν απαιτείται η υψηλότερη δυνατή απόδοση του οχήματος και δεν αποτελούν εμπόδιο το υψηλό κόστος και η περιπλοκότητα της κατασκευής.



Εικόνα 7. Full Carbon Monocoque

1.4 Κεντρική ιδέα και στόχοι

Κατά την αγωνιστική σεζόν του 2019, η ομάδα της Prom Racing είχε αποφασίσει από κοινού πως όλες οι σχεδιαστικές επιλογές που θα πραγματοποιηθούν θα αποσκοπούν στην υψηλότερη απόδοση του οχήματος στην ιστορία της ομάδας, στοχεύοντας να κατακτήσει μια από τις πρώτες 5 θέσεις σε όλους τους διαγωνισμούς στους οποίους θα συμμετείχε.

Στα αρχικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού έπρεπε να ληφθούν σημαντικές αποφάσεις για τα κύρια υποσυστήματα του αγωνιστικού οχήματος όπως η γεωμετρία της ανάρτησης, η αεροδυναμική καθώς και ο τύπος πλαισίου που θα επιλεγόταν. Κατά το προηγούμενο έτος (2018) η ομάδα αποφάσισε να κατασκευάσει το αγωνιστικό της όχημα κάνοντας τη σχεδιαστική επιλογή του υβριδικού τύπου πλαισίου, μια απόφαση που τελικά στέφθηκε με επιτυχία έχοντας όμως κάποια αξιοσημείωτα μειονεκτήματα που παρατηρήθηκαν εκ των υστέρων. Επιπλέον κατά τα προηγούμενα έτη στην ιστορία της ομάδας, επιλέχθηκε η κατασκευή πλαισίου τύπου χωροδικτυώματος, κάτι που επέτρεψε στην ομάδα να αποκτήσει τη

γνώση τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή ενός τέτοιου τύπου πλαισίου. Οι δύο παραπάνω κρίσιμες λεπτομέρειες αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες στη διαδικασία αξιολόγησης των δεδομένων και λήψης της τελικής απόφασης περί του τύπου πλαισίου που θα επιλεγόταν. Έτσι λοιπόν τέθηκαν τα κριτήρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, όπου γίνεται ξεκάθαρο πως η επιλογή του τύπου full carbon monocoque αποτελεί την καλύτερη επιλογή όσον αφορά την απόδοση. Βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου αποτελούν το υψηλό κόστος καθώς και η υψηλή περιπλοκότητα κατά τη μεγάλη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής, παράγοντες που τελικά δεν αποτέλεσαν εμπόδια μιας και η ομάδα ήταν σε θέση να καλύψει τους απαιτούμενους πόρους. Επιπλέον, μια τέτοια απόφαση αποτέλεσε υψηλή πρόκληση για την ομάδα, τόσο για την επίτευξη των υψηλών στόχων που είχαν τεθεί όσο και για την απόκτηση της γνώσης που απαιτείται για μια τέτοια σύνθετη κατασκευή, γνώση που θα αποτελούσε πολύτιμο εφόδιο για τις επόμενες γενιές της ομάδας.

Προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία σχεδιασμού, τέθηκαν κάποια βασικά κριτήρια.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε έρευνα για τα υλικά που θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν (ενίσχυση ανθρακονημάτων και πυρήνας αλουμινίου) και έπειτα από συγκριτική μελέτη επιλέχθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός υλικών που κάλυπταν τις απαιτήσεις που είχαν τεθεί.

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας πως ο συνδυασμός υλικών (κατασκευή sandwich) θα πρέπει να πληροί τα κριτήρια αντοχής που έχουν θέσει οι διοργανωτές των διαγωνισμών, έγινε επαλήθευση του συνδυασμού υλικών τόσο μέσω υπολογισμών όσο και μέσω φυσικών πειραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ως συγκριτικό σημείο αναφοράς ορίζεται ένα χαλύβδινο πλαίσιο (χωροδικτύωμα) και μέσω υπολογισμών και φυσικών πειραμάτων ο φοιτητής καλείται να αποδείξει πως το σύνθετο υλικό τύπου sandwich που έχει σχεδιάσει και κατασκευάσει φέρει ισάξια ή υψηλότερη αντοχή. Η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να γίνει για όλα τα απαραίτητα σημεία του πλαισίου που ορίζει ο διαγωνισμός μιας και υπάρχει διαφοροποίηση της ελάχιστης αντοχής για λόγους ασφαλείας.

Παράλληλα, είχε ξεκινήσει ήδη η διαδικασία δημιουργίας και βελτιστοποίησης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μέσω μιας διαδικασίας ανατροφοδότησης. Πιο συγκεκριμένα, αφού έγινε η μέτρηση των διαστάσεων των πειραματικών διατάξεων και πραγματοποιήθηκαν τα απαιτούμενα φυσικά πειράματα για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών, δημιουργήθηκε το αρχικό μοντέλο προσομοίωσης με τη χρήση λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό το μοντέλο προσομοίωνε το αντίστοιχο απαιτούμενο πείραμα κάμψης τριών σημείων και μετά από αρκετές αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου έγινε σύγκλιση με τα φυσικά πειράματα και καθορίστηκαν οι βέλτιστες παράμετροι για δύο διαφορετικά μοντέλα. Το πρώτο αποτέλεσε ένα απλοποιημένο «ελαφρύ» μοντέλο με ισότροπο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πλαισίου και την αξιολόγηση πρωταρχικών παραμέτρων, πληροφορίες απαραίτητες για όλα τα βασικά υποσυστήματα του οχήματος όπως το ίδιο το πλαίσιο, η δυναμική του οχήματος και η αεροδυναμική. Το δεύτερο αποτέλεσε ένα πιο σύνθετο ορθότροπο μοντέλο στο οποίο λήφθηκαν υπόψη οι ιδιότητες κάθε επιμέρους υλικού (διαστρωμάτωση ενίσχυσης ανθρακονημάτων και πυρήνα) και χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή υπολογισμό των τελικών παραμέτρων του πλαισίου τόσο για την δυσκαμψία (torsional, bending & camber) όσο και για τη συνολική αντοχή του. Επιπλέον θα πρέπει να αναφερθεί πως οι παραπάνω παράμετροι αποτέλεσαν σημαντικές πληροφορίες για όλα τα υποσυστήματα καθώς χρησιμοποιήθηκαν σαν είσοδο σε πιο σύνθετα μοντέλα δυναμικής του οχήματος προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις του κάθε υποσυστήματος (ανάρτηση, αεροδυναμική) για κάθε δυναμικό αγώνισμα που συμμετείχε το αγωνιστικό όχημα. Τέλος ακολουθεί η κατασκευή του πλαισίου μέσω μιας σύνθετης διαδικασίας επιλογής υλικών, φυσικών πειραμάτων, δημιουργίας του καλουπιού και κατασκευής του τελικού πλαισίου.

2 Σύνθετα Υλικά

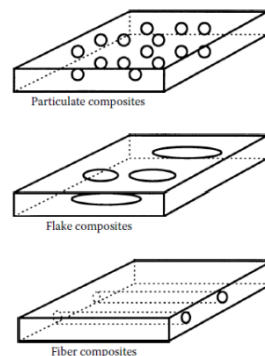
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εισαγωγή στα σύνθετα υλικά και τις επιμέρους κατηγορίες τους προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τις ορολογίες και έννοιες που χρησιμοποιούνται στα επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον θα γίνει παρουσίαση της τελικής επιλογής υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και την κατασκευή του πλαισίου. Τέλος θα γίνει αναφορά στη μηχανική των σύνθετων υλικών που πραγματεύεται αυτή τη εργασία προκειμένου να γίνουν κατανοητές και να αιτιολογηθούν όλες οι αποφάσεις που λήφθηκαν στην πορεία που ακολουθήθηκε.

2.1 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

2.1.1 Γενικός ορισμός

Η ανάγκη για δημιουργία κατασκευών χαμηλού βάρους και υψηλής αντοχής οδήγησε στην υιοθέτηση των σύνθετων υλικών σε ένα ευρύ φάσμα τομέων και εφαρμογών. Ο όρος «σύνθετα» αναφέρεται στα υλικά που δημιουργούνται από δύο ή περισσότερα άλλα διαφορετικά υλικά, ο συνδυασμός των οποίων επιτρέπει τη δημιουργία ενός νέου υλικού με βελτιωμένες ιδιότητες. Τα επιμέρους υλικά συνήθως φέρουν χαμηλές μηχανικές ιδιότητες όταν χρησιμοποιούνται μόνα τους ωστόσο ο συνδυασμός τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου «σύνθετου» υλικού του οποίου οι ιδιότητες είναι συνήθως εξαιρετικά υψηλότερες σε σχέση με αυτά.

Σήμερα ως σύνθετα υλικά αναφέρονται κυρίως υλικά που περιέχουν ισχυρές ίνες -συνεχείς ή ασυνεχείς- τοποθετημένες μέσα σε ένα άλλο υλικό που χαρακτηρίζεται ως μήτρα. Η μήτρα εξασφαλίζει το γεωμετρικό προσανατολισμό των ινών και μεταφέρει στις ίνες το φορτίο που εφαρμόζεται στο σύνθετο υλικό. Το τελικό σύνθετο υλικό φέρει ενδιάμεσες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα δύο υλικά που το αποτελούν, οι οποίες είναι πολύ υψηλότερες από το υλικό της μήτρας αλλά κατώτερες από το υλικό της ενίσχυσης. Επιπλέον μπορεί να παρουσιάζει κάποιες νέες μοναδικές ιδιότητες οι οποίες δεν εμφανίζονται στα επιμέρους υλικά που το αποτελούν.



Εικόνα 8. Απλοποιημένη σχηματική απεικόνιση σύνθετου υλικού με διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης

2.1.2 Κατηγοριοποίηση και βασικοί ορισμοί

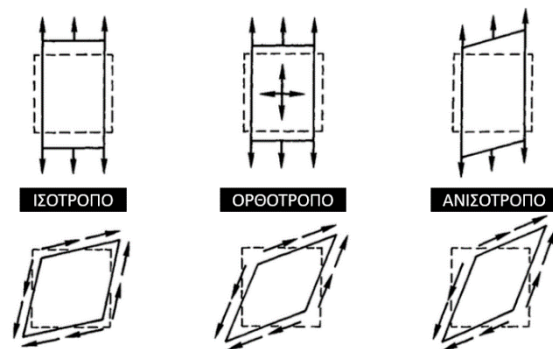
Κατά τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ενός ελαστικού σώματος υπό φορτίο (θεωρία της ελαστικότητας), μπορούμε να κάνουμε τις εξής παραδοχές:

- Ένα ελαστικό σώμα που υπόκειται σε τάσεις, παραμορφώνεται με αναστρέψιμο τρόπο.
- Σε κάθε σημείο στο εσωτερικό ενός σώματος, μπορούν να εντοπισθούν κύρια επίπεδα (principal planes) στα οποία υπάρχουν μόνο ορθές τάσεις.
- Οι κύριες διευθύνσεις σε αυτά τα επίπεδα ονομάζονται διευθύνσεις ορθών τάσεων.
- Μια μικρή σφαίρα υλικού που περιβάλλει ένα σημείο ενός σώματος, γίνεται ελλειπτική ύστερα από την εφαρμογή φορτίου.

Επιπλέον σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κάποιες βασικές κατηγορίες και υποκατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους:

- **Ισότροπα υλικά:** Ως ισότροπο υλικό χαρακτηρίζεται ένα υλικό που έχει μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που παραμένουν ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις. Για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) σε ένα σώμα από χάλυβα παραμένει ίδιο σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις.
- **Ομογενή υλικά:** Ένα ομογενές υλικό έχει ιδιότητες που παραμένουν ίδιες σε όλα τα σημεία στο εσωτερικό του σώματος. Τέτοια υλικά μπορούν να είναι τα μέταλλα, τα πολυμερή, τα κεραμικά. Ωστόσο η θερμοκρασία στο περιβάλλον ή το εσωτερικό του σώματος μπορεί να επηρεάσει την κατηγοριοποίηση ενός σώματος στα ομογενή υλικά. Για παράδειγμα μια ράβδος από χάλυβα είναι ένα ομογενές σώμα. Αν ωστόσο θερμάνουμε τη ράβδο στη μια άκρη της, η θερμοκρασία στο εσωτερικό της θα είναι διαφορετική και συνεπακόλουθα το μέτρο ελαστικότητας θα μεταβληθεί ανά τη μάζα της ράβδου, εφόσον είναι ανάλογο της θερμοκρασίας. Το σώμα λοιπόν παύει να είναι ομογενές ωστόσο παραμένει ισότροπο μιας και οι ιδιότητες σε κάθε διαφορετικό σημείο παραμένουν ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις.

- **Ανισότροπα υλικά:** Ως ανισότροπο ορίζεται ένα υλικό το οποίο περιέχει σημεία στα οποία οι ιδιότητες του παραμένουν διαφορετικές προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένα παράδειγμα ανισότροπου υλικού είναι ένα σύνθετο υλικό με ενίσχυση ινών μονής κατεύθυνσης και μήτρα πολυμερούς υλικού. Το παραπάνω υλικό χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενές και οι μηχανικές του ιδιότητες είναι διαφορετικές σε όλους τους κύριους άξονες x,y,z.



Εικόνα 9. Σχηματική απεικόνιση παραμόρφωσης ενός ισότροπου, ενός ορθότροπου και ενός ανισότροπου υλικού

- **Ορθότροπα υλικά:** Τα ορθότροπα υλικά είναι μια υποκατηγορία των ισότροπων υλικών. Ως ορθότροπα υλικά χαρακτηρίζονται αυτά που οι μηχανικές ή θερμικές τους ιδιότητες είναι μοναδικές και ανεξάρτητες για τρεις αμοιβαίες διαφορετικές κατευθύνσεις.[4]

2.1.3 Ενίσχυση ινών

Στα περισσότερα σύγχρονα σύνθετα υλικά γίνεται χρήση ινών σαν μέσο ενίσχυσης. Η σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας επιτυγχάνεται κατά τη διαδικασία κατασκευής του σύνθετου υλικού και έχει εξέχουσα σημασία στις μηχανικές ιδιότητες του προς κατασκευή σύνθετου υλικού. Η ενίσχυση με τη μορφή ινών μπορεί να έχει διάφορες μορφές και σχήματα όπως μικρές ίνες μερικών χιλιοστών ή εκατοστών καθώς και μεγαλύτερο μήκος ανάλογο του τελικού προς κατασκευή σώματος.

Τα πιο συνηθισμένα υλικά ενίσχυση ινών που μπορεί να συναντήσει κάποιος στη βιομηχανία είναι:

- **Γυαλί (glass fiber):** Η επιλογή του γυαλιού γίνεται συνήθως σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται υψηλή αντοχή του τελικού σύνθετου υλικού ενώ το επιθυμητό κόστος θα πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλό επίπεδο. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ενίσχυσης:

- **Αραμίδιο (Kevlar):** Η ενίσχυση από Kevlar γίνεται συνήθως στις εφαρμογές όπου υπάρχει απαίτηση για υψηλή αντοχή στην διάτρηση και την κρούση λόγω των αντίστοιχων χαρακτηριστικών που φέρει το συγκεκριμένο υλικό.
- **Ανθρακόνημα (carbon fiber):** Τα ανθρακονήματα είναι η πιο κοινή μορφή ενίσχυσης που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία. Βασικό του χαρακτηριστικό είναι η υψηλή αντοχή του σε συνδυασμό με το χαμηλό του βάρος. Αυτό το κάνει ιδανικό υλικό για χρήση σε απαιτητικές εφαρμογές όπου απαιτείται ο βέλτιστος λόγος ακαμψίας προς βάρος. Στη βιομηχανία είναι διαδεδομένοι δύο τύποι αυτού του υλικού που επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής: Ίνες ανθρακονημάτων υψηλής αντοχής (high strength) και ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus).

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων ενίσχυσης σύνθετων υλικών

© 2003 by CRC Press LLC

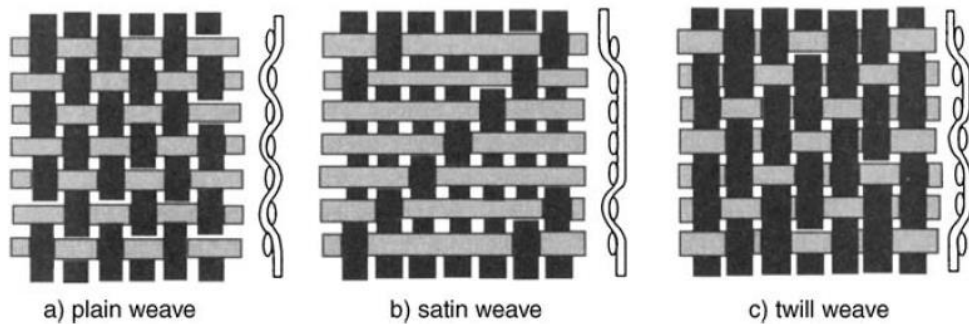
Table 1.3 Properties of Commonly Used Reinforcements

Reinforcements	Fiber Diameter $d(\mu\text{m})$	Density $\rho(\text{kg/m}^3)$	Modulus of Elasticity $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{\text{ult}} (\text{Mpa})$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W/M}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $c(\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{\text{max}} (^{\circ}\text{C})$	Price 1993 (\$/kg)
"R" glass, high performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	14
"E" glass, common applications	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1400		70
"HT" graphite, high strength	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	70
"HM" graphite, high modulus	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	140

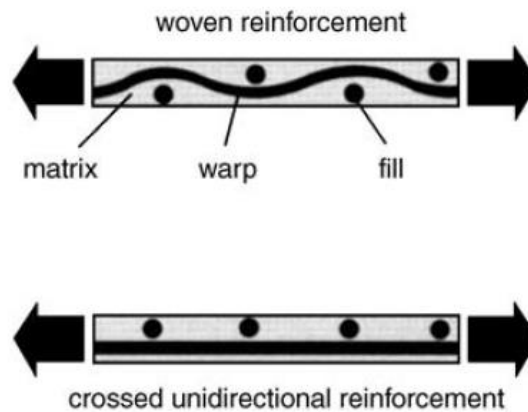
Επιπλέον βάσει της διεύθυνσης και της διαμόρφωσης των ινών σε ένα σύνθετο υλικό ορίζονται οι παρακάτω κατηγορίες:

- **Υφάσματα μονής διεύθυνσης (single directional):** Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου υφάσματος γίνεται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και ακαμψία σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Φορτίσεις με μικρή απόκλιση από τη συγκεκριμένη διεύθυνση ή λάθος υπολογισμοί φορτίσεων, μπορούν να αποφέρουν καταστροφικά αποτελέσματα κατά τη χρήση υφασμάτων αποκλειστικά μονής κατεύθυνσης. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική μελέτη κατά την επιλογή χρήσης τους.

- Υφάσματα πολλαπλής διεύθυνσης:** Τα υφάσματα πολλαπλών διευθύνσεων είναι ο πιο κοινός τύπος υφασμάτων στη βιομηχανία. Την πιο συνηθισμένη μορφή τους αποτελούν τα πλεκτά υφάσματα όπου ανάλογα την απαιτούμενη εφαρμογή, μπορούν να έχουν διαφορετικές πλέξεις (Εικόνα 10). Ωστόσο τα υφάσματα πολλαπλής διεύθυνσης μπορούν να αποτελούνται από πολλές στρώσεις υφασμάτων μονής κατεύθυνσης χωρίς να είναι απαραίτητο να γίνει πλέξη των ινών (Εικόνα 11).



Εικόνα 11. Διαφορετικοί τύποι πλεκτών υφασμάτων



Εικόνα 10. Υφάσματα πολλαπλής διεύθυνσης με πλέξη και χωρίς πλέξης των ινών

- Υφάσματα τύπου Mat:** Τα υφάσματα τύπου Mat είναι υφάσματα που περιέχουν ίνες μικρού μήκους μερικών εκατοστών τα οποία είναι τοποθετημένα με τυχαίο τρόπο προς όλες τις διευθύνσεις. Προκειμένου να συγκρατηθούν μεταξύ τους με συνοχή χρησιμοποιείται ειδικός παράγοντας σε μορφή spray στην μια πλευρά του υφάσματος και σε πολύ μικρή ποσότητα προκειμένου να μην αυξήσει το βάρος του. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου υφάσματος γίνεται σε εφαρμογές όπου δεν απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες αλλά σημαντικότερος παράγοντας είναι το βάρος.

2.1.4 Μήτρα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μήτρα είναι ο δεύτερος παράγοντας ενός σύνθετου υλικού. Ο ρόλος της μήτρας είναι να συγκρατεί το μέσο ενίσχυσης στην επιθυμητή γεωμετρία με τις συγκολλητικές της ιδιότητες, να μεταφέρει φορτία από και μεταξύ της ενίσχυσης και να την προστατεύει από εξωτερικούς παράγοντες όπως η διάβρωση, η υγρασία, οι χημικές μεταβολές κ.τ.λ. Στην περίπτωση χρήσης ινών ως ενισχυτικό μέσο, η μήτρα μεταφέρει και διαμοιράζει τα φορτία κατά μήκος των ινών και κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει στις ίνες να λειτουργούν

ομοιόμορφα και κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο δηλαδή αποκλειστικά σε θλίψη και εφελκυσμό.

Συγκριτικά με το μέσο ενίσχυσης η μήτρα φέρει πολύ χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες, κάτι που σημαίνει πως ο σχεδιασμός του τελικού σύνθετου υλικού θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η εμφάνιση ορθών τάσεων σε αυτή.

Τα πιο κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά είναι εποξειδικές, πολυεστερικές και βινυλεστερικές ενώσεις με τη μορφή ρητίνης, υλικά που ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων (thermosets) πολυμερών. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας υλικών (thermoset polymers) είναι πως μετά το τελικό στάδιο της επεξεργασίας τους και με την επίδραση θερμότητας αποκτούν διασταυρούμενες συνδέσεις προς σχηματισμό πλέγματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως μεταβαίνουν από υγρή σε στερεή φάση και δεν μπορούν να επανέλθουν στην προηγούμενη μορφή τους καθώς η διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης είναι μη αντιστρεπτή.

Ο πιο συνήθης συνδυασμός υλικών για εφαρμογές χαμηλών μηχανικών αντοχών και χαμηλού κόστους είναι η χρήση ενίσχυσης γυαλιού (glass fiber) με μήτρα πολυεστερικής ή βινυλεστερικής ρητίνης. Αντιθέτως στις περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων με το βέλτιστο λόγο ακαμψίας προς βάρος γίνεται η επιλογή ενίσχυσης ανθρακονήματος με μήτρα εποξειδικής ρητίνης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των εποξειδικών έναντι των υπολοίπων υλικών της κατηγορίας θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών αναγράφονται παρακάτω:

- Υψηλή μηχανική αντοχή
- Χαμηλό ιξώδες που επιτρέπει την καλύτερη ανάμιξη με το ενισχυτικό μέσο ελαχιστοποιώντας την παγίδευση φυσαλίδων αέρα (voids)
- Ομαλή μετάβαση από την υγρή στη στερεά φάση κατά το στάδιο της θερμοσκλήρυνσης
- Χαμηλός συντελεστής διαστολής κατά την αλλαγή φάσης, παράγοντας που εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση εμφάνισης παραμενουσών διατμητικών τάσεων μεταξύ της μήτρας και του ενισχυτικού μέσου
- Πλήθος διαφορετικών τύπων που καλύπτουν τα περισσότερα απαραίτητα χαρακτηριστικά απαιτητικών εφαρμογών (μηχανική αντοχή, αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, χαμηλός χρόνος σκλήρυνσης και τα λοιπά)

2.1.5 Προεμποτισμένα υφάσματα (prepreg)

Μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών αποτελούν τα προεμποτισμένα υφάσματα. Σε αντίθεση με τις συνήθεις κατασκευές όπου η εφαρμογή της ρητίνης γίνεται ύστερα από την τοποθέτηση των στεγνών υφασμάτων στο καλούπι ως δύο διαφορετικά υλικά, στην κατηγορία των prepreg η ένωση μήτρας και ενίσχυσης πραγματοποιείται κατά το στάδιο της κατασκευής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται μια διαδικασία θερμοσκλήρυνσης της χρησιμοποιούμενης ρητίνης μέσω ενός αυστηρά -ορισμένου από τον κατασκευαστή- κύκλου κατεργασίας υπό συνθήκες κενού, υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

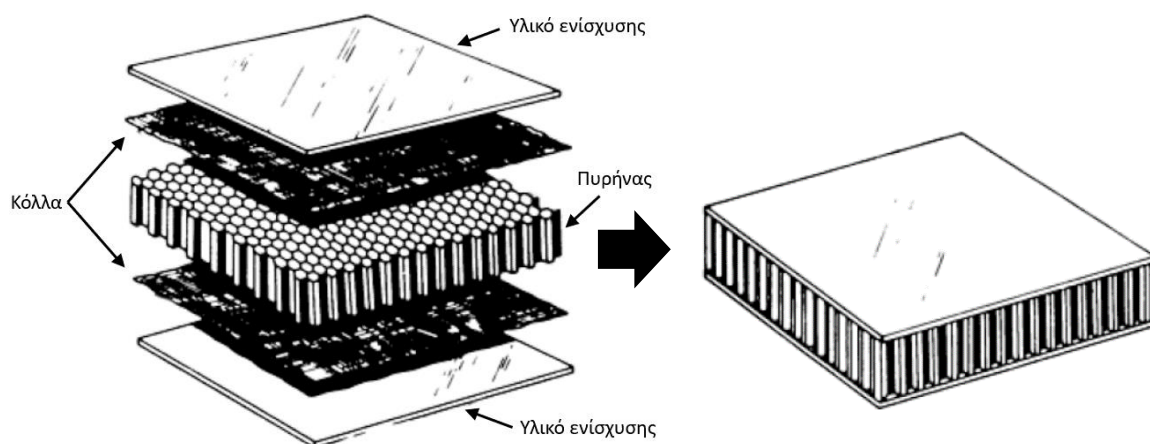
Η χρήση prepreg σε αντίθεση με τις συνήθειες εφαρμογές “in-line” εμποτισμού μπορεί να προσφέρει κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα προεμποτισμένα υφάσματα έχουν αναλογία υφασμάτων-ρητίνης ελεγχόμενη με υψηλή ακρίβεια, ελεγχόμενη ροή ρητίνης κατά την διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης και επιτρέπουν την τοποθέτηση των υφασμάτων στη γεωμετρία του καλουπιού με υψηλή ακρίβεια γωνίας και θέσης. Λόγω του εμποτισμού με ρητίνη κατά την κατασκευή τους, η αποθήκευση και ο χειρισμός τους θα πρέπει να γίνεται με πολύ προσεκτικό τρόπο προκειμένου να μην γίνει υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της μήτρας και να μην ξεκινήσει ο πολυμερισμός της. Για το λόγο αυτό η αποθήκευσή τους συνήθως γίνεται σε θερμοκρασίες περίπου -20°C ενώ η διάρκεια ζωής τους είναι αυστηρά καθορισμένη από τον κατασκευαστή. Μια τυπική διάρκεια ζωής ενός προεμποτισμένου

υφάσματος είναι περίπου 12 μήνες στις προβλεπόμενες συνθήκες αποθήκευσης ενώ με το πέρασμα της διάρκειας ζωής που ορίζει ο κατασκευαστής ξεκινάει η υποβάθμιση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων του τελικού υλικού. Οι απαιτούμενοι πόροι καθώς και η σύνθετη διαδικασία της κατασκευής τους έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του τελικού υλικού. Επιπλέον η απαίτηση αποθήκευσης σε πολύ περιορισμένες συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας αυξάνουν το κόστος του τελικού υλικού λόγω της δαπάνης σε ενέργεια. Για το λόγο αυτό η χρήση υλικών τύπου prepreg γίνεται κατά κύριο λόγο σε τομείς όπου η ανάγκη υψηλών μηχανικών απαιτήσεων και χαμηλού βάρους υπερβαίνουν τον παράγοντα του κόστους ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται ακριβές πλάνο χρήσης του υλικού εντός της περιορισμένης διάρκειας ζωής του. Τέτοιοι τομείς είναι η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία και ο μηχανοκίνητος αθλητισμός.[5]

2.1.6 Δομή Sandwich

Η δομή sandwich αποτελεί μια έξυπνη σχεδιαστική μέθοδο για την επίτευξη του βέλτιστου λόγου ακαμψίας προς βάρος, έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στην κατασκευή των σύνθετων υλικών. Μια δομή sandwich προκύπτει από τη σύνθεση δύο λεπτών υλικών που αποτελούν τον ενισχυτικό παράγοντα μεταξύ των οποίων τοποθετείται ένα υλικό χαμηλότερης πυκνότητας που χαρακτηρίζεται ως πυρήνας. Με αυτή την κατασκευαστική μέθοδο επιτυγχάνεται αύξηση της ροπής αδράνειας του υλικού (λόγω της αύξησης του πάχους) χωρίς παράλληλα να αυξάνεται σημαντικά το βάρος του τελικού υλικού sandwich.

Η δομή sandwich παρουσιάζεται στην Εικόνα 12:



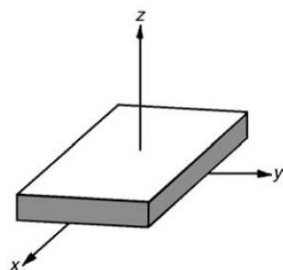
Εικόνα 12. Δομή Sandwich

Η αρχή λειτουργίας των κατασκευών sandwich στηρίζεται στην εμφάνιση ορθών τάσεων στα υλικά ενίσχυσης (κέλυφος) και διατμητικών στο υλικό του πυρήνα. Όταν για παράδειγμα ασκηθεί μια καμπτική ροπή σε μια κατασκευή sandwich, το υλικό ενίσχυσης της μιας πλευράς θα παραλάβει θλιπτικό φορτίο και το υλικό της άλλης εφελκυστικό. Η μεταφορά των τάσεων από τη μια πλευρά στην άλλη θα γίνει μέσω διάτμησης με τη βοήθεια του πυρήνα. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως τα υλικά ενίσχυσης θα πρέπει επιλέγονται με γνώμονα τις μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν στις περιπτώσεις εφελκυσμού και θλίψης.[6]

2.2 Βασικές αρχές και μηχανική πολύστρωτων

2.2.1 Ισότροπα Υλικά

Οι παρακάτω σχέσεις ισχύουν για υλικά που θεωρούνται ελαστικά και ισότροπα.



Εικόνα 13. Άξονες ισότροπου υλικού

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε ένα ισότροπο υλικό ορίζεται από τον παρακάτω πίνακα:

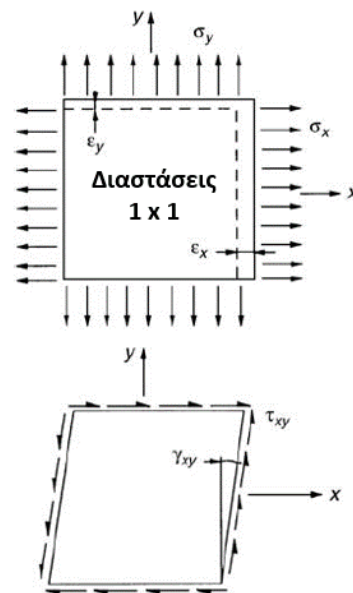
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

όπου:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{xy} \frac{\sigma_y}{E_y}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}$$



Εικόνα 14. Ορθές και διατμητικές τάσεις σε ισότροπο υλικό

Γνωρίζοντας πως υπάρχουν τρεις ελαστικές σταθερές (E , ν , G), η μεταξύ τους σχέση ορίζεται ως:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει πως ένα ισότροπο και ελαστικό υλικό χαρακτηρίζεται από δύο ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές: E και ν . [7]

2.2.2 Ανισότροπα υλικά

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε ένα ανισότροπο υλικό ορίζεται από τον παρακάτω πίνακα:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Ο παραπάνω πίνακας τάσης – παραμόρφωσης είναι συμμετρικός και ο αριθμός των διακριτών ελαστικών σταθερών είναι πέντε:

- Δύο μέτρα ελαστικότητας: E_x και E_y
- Δύο λόγοι poisson: ν_{yx} και ν_{xy}
- Ένα μέτρο διάτμησης: G_{xy}

Στην πραγματικότητα υπάρχουν 4 ελαστικές σταθερές: E_x , E_y , G_{xy} και ν_{yx} . Η πέμπτη σχέση μπορεί να προκύψει από τις υπόλοιπες ως:

$$\nu_{xy} = \nu_{yx} \frac{E_x}{E_y}$$

2.2.3 Χαρακτηριστικά στρώσης σύνθετου υλικού

Βασική αρχή: Ο συνδυασμός υλικού ενίσχυσης και μήτρας ορίζουν μια στρώση.
(Στην υπό μελέτη περίπτωση ως στρώση αναφέρεται ο συνδυασμός ινών και ρητίνης)

i. Λόγος μάζας ινών - μήτρας

Ο λόγος μάζας ινών ορίζεται ως:

$$M_f = \frac{\text{Μάζα ινών}}{\text{Ολική μάζα}}$$

Συνεπακόλουθα ο λόγος μάζας ρητίνης ορίζεται ως:

$$M_m = \frac{\text{Μάζα ρητίνης}}{\text{Ολική μάζα}}$$

Όπου, $M_m = 1 - M_f$

ii. Λόγος όγκου ινών:

Ο λόγος όγκου ινών ορίζεται ως:

$$V_f = \frac{\text{Όγκος ινών}}{\text{Ολικός όγκος}}$$

Συνεπακόλουθα ο λόγος όγκου ρητίνης ορίζεται ως:

$$V_m = \frac{\text{Όγκος ρητίνης}}{\text{Ολικός όγκος}}$$

Όπου, $V_m = 1 - V_f$

Σημειώνεται πως ο λόγος μάζας μπορεί να μετατραπεί σε λόγο όγκου και το αντίστροφο. Εάν ρ_f και ρ_m είναι οι πυκνότητες των ινών και της μήτρας αντίστοιχα, τότε προκύπτει πως:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}}$$

$$M_f = \frac{v_f \rho_f}{v_f \rho_f + v_m \rho_m}$$

iii. Πυκνότητα στρώσης

Η πυκνότητας μιας στρώσης ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{\text{συνολική μάζα}}{\text{συνολικός όγκος}}$$

Ενώ μπορεί να γραφτεί και ως:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

iv. Πάχος στρώσης:

Το πάχος μιας στρώσης ορίζεται ως ο αριθμός γραμμαρίων (g) μάζας ινών m_{of} ανά τετραγωνικού μέτρου επιφάνειας. Το πάχος στρώσης, αναφερόμενο ως b , προκύπτει ως:

$$b \times 1(\text{m}^2) = \text{συνολικός όγκος} = \text{συνολικός όγκος} \times \frac{m_{of}}{\text{όγκος ινών} \times \rho_f}$$

ή

$$b = \frac{m_{of}}{V_f \rho_f}$$

2.2.4 Στρώση μονής διεύθυνσης

i. Μέτρο ελαστικότητας

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της σύνθεσης ινών/μήτρας μπορούν να οριστούν βάσει των επιμέρους χαρακτηριστικών του κάθε παραγώγου. Έτσι λοιπόν προκύπτουν:

Μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος των ινών E_l :

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m$$

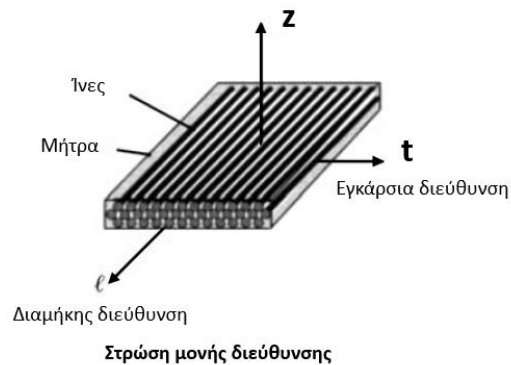
ή

$$E_l = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Στην πραγματικότητα το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από το μέτρο ελαστικότητας των ινών καθώς για τη μήτρα ισχύει: $E_m \ll E_f$

Μέτρο ελαστικότητας στην εγκάρσια διεύθυνση των ινών E_t :

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{f_t}} V_f} \right]$$



Μέτρο διάτμησης G_{lt} :

Το μέτρο διάτμησης των ινών προκύπτει από τη σχέση:

$$G_{lt} = G_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_{f_t}} V_f} \right]$$

Λόγος Poisson ν_{lt} :

Ο λόγος Poisson αναπαριστά την παραμόρφωση στην εγκάρσια διεύθυνση t όταν μια στρώση υποβάλλεται σε εφελκυσμό στην διαμήκη διεύθυνση l και ορίζεται ως:

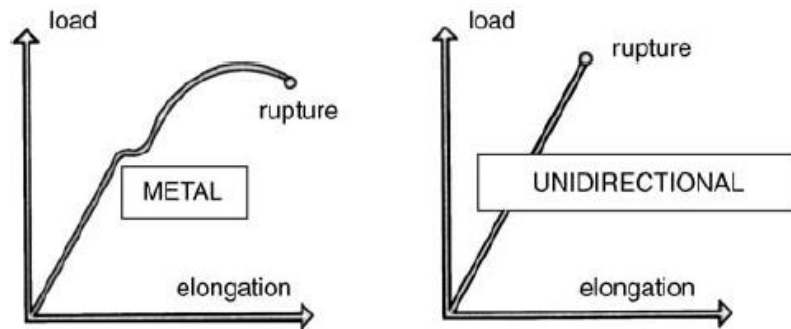
$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m$$

Μέτρο ελαστικότητας προς κάθε διεύθυνση

Το μέτρο ελαστικότητας προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση στον άξονα lt διαφορετική από το διαμήκη ή τον εγκάρσιο δίνεται από την παρακάτω σχέση, όπου $c = \text{συν}\theta$ και $s = \eta\mu\theta$.

Σημείωση: Το παρακάτω μέτρο μειώνεται ραγδαία όταν μεγαλώνει η γωνία από τη διεύθυνση των ινών.

$$E_x = \frac{1}{\frac{c^4}{E_l} + \frac{s^4}{E_t} + 2c^2s^2 \left(\frac{1}{2G_{lt}} - \frac{\nu_{lt}}{E_t} \right)}$$



Εικόνα 15. Σύγκριση καμπύλης ελαστικότητας μετάλλου και σύνθετου υλικού μονής διεύθυνσης

ii. Μέγιστη αντοχή στρώσης

Οι καμπύλες στην Εικόνα 15 παρουσιάζουν τη σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά ενός μετάλλου και ενός σύνθετου υλικού μονής στρώσης. Οι βασικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών υλικών μπορούν να οριστούν και ως οι παρακάτω:

- Δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση στην στρώση μονής διεύθυνσης, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί και ως μειονέκτημα.
- Η μέγιστη αντοχή της στρώσης μονής διεύθυνσης είναι υψηλότερη.
- Στη στρώση μονής διεύθυνσης παρατηρείται σημαντική ελαστική παραμόρφωση, κάτι που ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να θεωρηθεί τόσο ως πλεονέκτημα όσο και ως μειονέκτημα.

Όταν οι ίνες αστοχούν πριν αστοχήσει η μήτρα κατά τη φόρτιση κατά μήκος των ινών, τότε μπορεί να οριστεί η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{l rupture} = \sigma_{f rupture} \left[V_f + (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \right]$$

ή προσεγγιστικά:

$$\sigma_{l rupture} = \sigma_{f rupture} \times V_f$$

Η μέγιστη αντοχή σε κάθε διεύθυνση δίνεται από την παρακάτω σχέση όπου:

$\sigma_{l rupture}$ = Αντοχή στη διεύθυνση των ινών

$\sigma_{t rupture}$ = Αντοχή στον εγκάρσιο άξονα της διεύθυνσης των ινών

$t_{lt rupture}$ = Αντοχή διάτμησης στον άξονα (l,t) της στρώσης

$c = \cos\theta$

$s = \sin\theta$

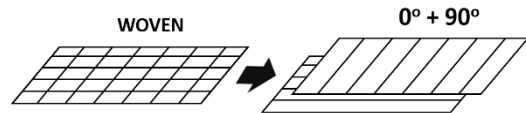
$$\sigma_{x rupture} = \frac{1}{\sqrt{\frac{c^4}{\sigma_{l rupture}^2} + \frac{s^4}{\sigma_{l rupture}^2} + \left(\frac{1}{\tau_{lt}^2} - \frac{1}{\sigma_l^2}\right) c^2 s^2}}$$

2.2.5 Πλεκτά υφάσματα

Τα πλεκτά υφάσματα αποτελούνται από ίνες που τοποθετούνται σε δύο διευθύνσεις, στις 0 (warp) και στις 90 (weft) μοίρες. Ορισμένα υφάσματα (π.χ. plain weave) έχουν ίδιο ποσοστό ινών προς τις δύο κατευθύνσεις ενώ άλλα (π.χ. twill ή 5-harness satin) έχουν αποκλίσεις ανάλογα με τον τύπο της πλέξης τους.

Προσεγγιστικά οι ελαστικές ιδιότητες μιας στρώσης ενός πλεκτού υφάσματος μπορούν να οριστούν και ως οι ιδιότητες που θα είχε ένα πολύστρωτο δύο στρώσεων μονής κατεύθυνσης τοποθετημένες με γωνία 90 μοιρών. Έτσι λοιπόν ορίζονται οι παρακάτω ιδιότητες:

- e = συνολικό πάχος στρώσης
- n_1 = πλήθος ινών διεύθυνσης 0° ανά μέτρο
- n_2 = πλήθος ινών διεύθυνσης 90° ανά μέτρο
- $k = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$
- V_f = όγκος ινών (%)



Εικόνα 16. Αντικατάσταση στρώσης πλεκτού υφάσματος δύο διευθύνσεων πάχους e με δύο επιμέρους στρώσεις μονής διεύθυνσης πάχους $e/2$

Το πάχος των ινών της στρώσης των 0° (warp) ορίζεται ως:

$$e_{warp} = e \times \frac{n_1}{n_1 + n_2} = k \times e$$

Το πάχος των ινών της στρώσης των 90° (weft) ορίζεται ως:

$$e_{weft} = e \times \frac{n_2}{n_1 + n_2} = (1 - k) \times e$$

Συνεπακόλουθα, προκειμένου να υπολογιστούν οι μηχανικές ιδιότητες μιας στρώσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια από τις δύο παρακάτω περιπτώσεις:

Περίπτωση Α: Η στρώση του πλεκτού υφάσματος πάχους e αντικαθίσταται από δύο επιμέρους στρώσεις μονής διεύθυνσης πάχους $e/2$ που τοποθετούνται υπό γωνία 90 μοιρών. Σε αυτή την περίπτωση οι μηχανικές ιδιότητες της στρώσης ορίζονται ως εξής:

$$e_{warp} = k \times e$$

$$e_{weft} = (1 - k) \times e$$

Ο μέσος όγκος V_f είναι ήδη γνωστός και οι μηχανικές ιδιότητες E_l , E_t , G_{lt} , ν_{lt} αυτών των στρώσεων μπορούν να καθοριστούν σύμφωνα με τις σχέσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Περίπτωση Β: Η στρώση του πλεκτού αντικαθίσταται από μια ανισότροπη στρώση πάχους e , όπου x είναι η διεύθυνση των 0 μοιρών και y είναι η διεύθυνση των 90 μοιρών. Έτσι λοιπόν ορίζονται οι παρακάτω σχέσεις:

$$E_x \approx k \times E_l + (1 - k) \times E_t$$

$$E_y \approx (1 - k) \times E_l + k \times E_t$$

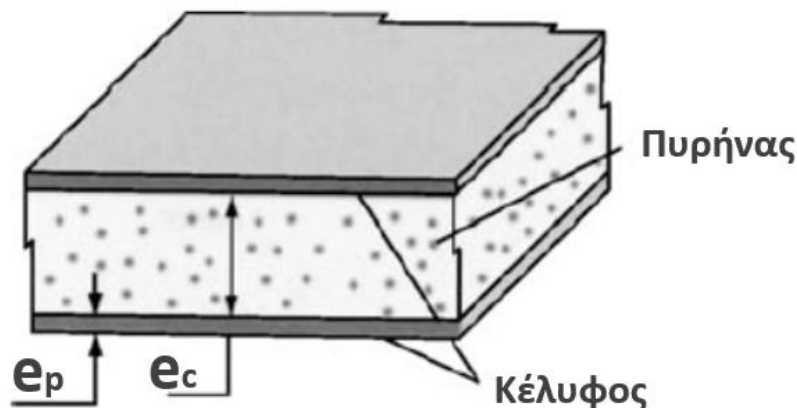
$$G_{xy} = G_{lt}$$

$$\nu_{xy} \approx \frac{\nu_{lt}}{k + (1 - k) \frac{E_l}{E_t}}$$

Σημαντική σημείωση: Η ακαμψία που έχει ένα πλεκτό ύφασμα είναι χαμηλότερη από ότι θα είχε αν το θεωρούσαμε ως δύο ξεχωριστές στρώσεις μισού πάχους και μονής διεύθυνσης τοποθετημένες κάθετα μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της κυρτότητας που έχουν οι ίνες του πλεκτού προκειμένου να είναι πλεγμένες μεταξύ τους, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία καμπτικών ροπών κατά τον εφελκυσμό του υφάσματος. Με απλά λόγια, εφόσον οι ίνες που αποτελούν το πλεκτό ύφασμα δεν είναι απόλυτα ευθείες αλλά εμφανίζουν κυρτότητα, τότε οι μηχανικές ιδιότητες είναι μερικώς υποβαθμισμένες σε σχέση με τα θεωρητικά χαρακτηριστικά τους.

2.3 Μηχανική δομών Sandwich

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι δομές sandwich αποτελούνται από το κέλυφος (skin) και τον πυρήνα (core). Στις περισσότερες εφαρμογές η αναλογία πάχους μεταξύ κελύφους (e_p) και πυρήνα (e_c) βρίσκεται στο εύρος: $10 < e_c/e_p < 100$.

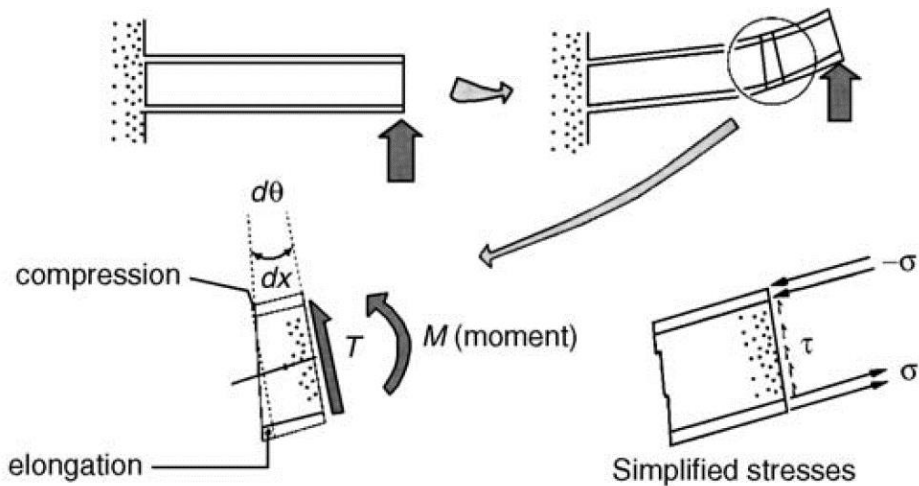


Εικόνα 17. Πάχος επιμέρους υλικών δομής sandwich

Στην πραγματικότητα όμως εμφανίζεται μεταξύ τους και ένα πολύ λεπτό στρώμα κόλλας το οποίο ενώνει τα δύο μέρη. Το πάχος αυτού του πολύ λεπτού στρώματος λαμβάνει τιμές μεταξύ του εύρους: $0.0025 \text{ mm} < e_{\text{adhesive}} < 0.2 \text{ mm}$. Όπως γίνεται αντιληπτό από τις βασικές αρχές της μηχανικής, το ιδανικό πάχος κόλλας τείνει στο μηδέν και δεν εμφανίζει ορθές αλλά μόνο διατμητικές τάσεις. Στην πραγματικότητα όμως το πάχος της κόλλας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να επιφέρει σημαντική απόκλιση από τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται.[8]

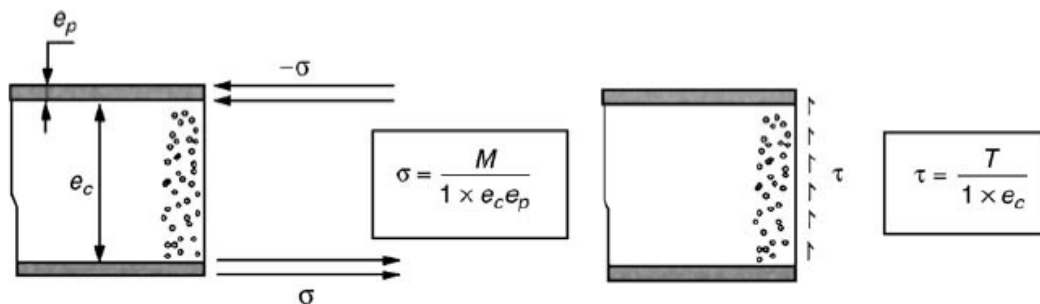
2.3.1 Τάσεις

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 18, κατά την εφαρμογή μιας καμπτικής ροπής σε μια δοκό sandwich αναπτύσσονται ορθές τάσεις στα κέλυφη και διατμητικές τάσεις στον πυρήνα.



Εικόνα 18. Σχηματική αναπαράσταση τάσεων σε δομή sandwich κατά την εφαρμογή καμπτικής ροπής

Στην παραπάνω περίπτωση η αριστερή άκρη της κατασκευής sandwich θεωρείται πακτωμένη και μια δύναμη T εφαρμόζεται στο δεξιό άκρο. Απομονώνοντας και μεγεθύνοντας ένα τμήμα της διατομής, παρατηρείται μια αντίδραση διάτμησης T και μια ροπή M . Η αντίδραση διάτμησης T προκαλεί διατμητικές τάσεις τ και η εφαρμοζόμενη ροπή προκαλεί ορθές τάσεις σ . [9]



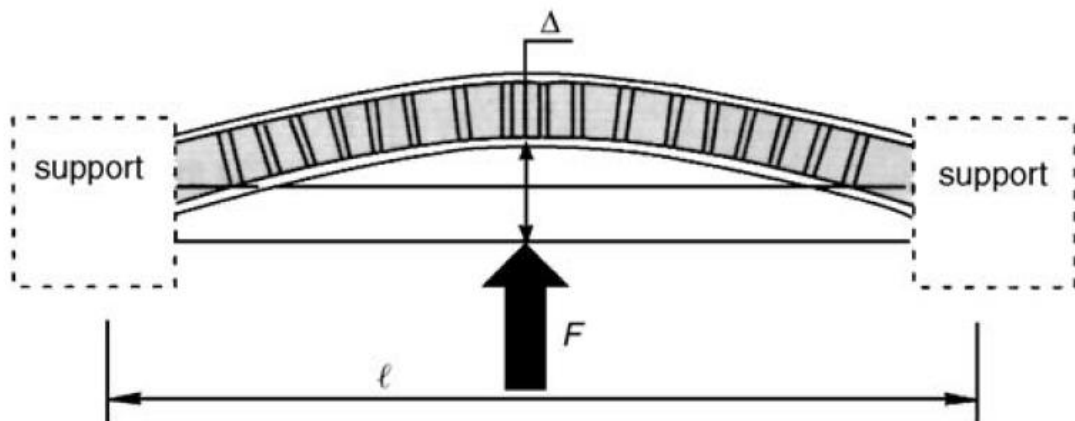
Εικόνα 19. Σχηματική αναπαράσταση τάσεων σε μια δομή sandwich

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι τιμές τ και σ , γίνονται οι παρακάτω απλουστεύσεις:

- Στα κελύφη (skins) εμφανίζονται μόνο ορθές τάσεις οι οποίες είναι ομοιόμορφες στο σύνολο της διατομής του κελύφους.
- Στον πυρήνα (core) εμφανίζονται μόνο διατμητικές τάσεις οι οποίες είναι ομοιόμορφες στο σύνολο της διατομής του πυρήνα.

2.3.2 Παραμορφώσεις

Στο παρακάτω παράδειγμα δοκού sandwich που υποβάλλεται σε κάμψη, η παραμόρφωση Δ είναι αποτέλεσμα τόσο της παραμόρφωσης λόγω ορθών τάσεων σ όσο και της παραμόρφωσης λόγω διατμητικών τάσεων τ .



Εικόνα 20. Δομή sandwich που υποβάλλεται σε κάμψη

Προκειμένου να καθορισθεί η παραμόρφωση Δ , μεταξύ άλλων μεθόδων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το θεώρημα Castigliano:

$$w = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{\langle EI \rangle} dx + \frac{1}{2} \int \frac{k}{\langle GS \rangle} T^2 dx$$

όπου:

W = ελαστική ενέργεια,

$\frac{1}{2} \int \frac{M^2}{\langle EI \rangle} dx$ = Συμβολή λόγω κάμψης

$\frac{1}{2} \int \frac{k}{\langle GS \rangle} T^2 dx$ = Συμβολή λόγω διάτμησης

και το οποίο μπορεί να γραφτεί και ως:

$$\Delta = \frac{\partial W}{\partial F}$$

όπου:

M = Αντίδραση ροπής

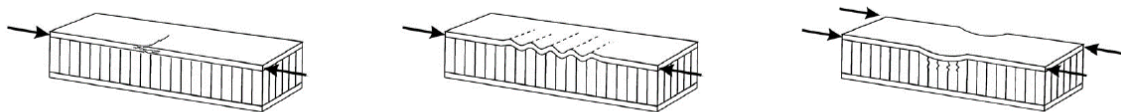
T = Αντίδραση διατμητικών τάσεων

E_p = Μέτρο ελαστικότητας καλύφους

G_c = Μέτρο διάτμησης του πυρήνα

2.3.3 Περιπτώσεις αστοχίας δομής sandwich

- **Αστοχία κελύφους (skin failure)**



(a) Face yielding

(b) Intra-cell dimpling

(c) Face wrinkling

Εικόνα 21. Περιπτώσεις αστοχίας κελύφους σε δομή sandwich

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, η αστοχία του κελύφους είναι μια συνήθης περίπτωση στις κατασκευές sandwich και μπορεί να παρουσιάσει διάφορες μορφές όπως:

a) Αστοχία του κελύφους (skin yield)

Σε αυτή την περίπτωση λόγω των αξονικών θλιπτικών δυνάμεων εμφανίζεται αστοχία του κελύφους καθώς φτάνει την μέγιστη αντοχή του.

$$\sigma_{fx} = \sigma_{fY}$$

b) Λυγισμό στο μέγεθος των κελιών του πυρήνα (intracell buckling)

Σε αυτή την περίπτωση το κέλυφος αστοχεί λόγω της μη υποστήριξης από τα τοιχώματα του πυρήνα. Η συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει συχνότερα σε περιπτώσεις χρήσης πυρήνα κυψελών με μεγάλο μέγεθος κυψέλης. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία του λυγισμού για ελαστικές δοκούς:

$$\sigma_{fi} = \frac{2E_{fx}}{1 - \nu_{fxy}^2} \left(\frac{2t}{a} \right)^2$$

όπου:

a = είναι το μέγεθος κελιού της κυψέλης

E_{fx} = το μέτρο ελαστικότητας

ν_{fxy} = ο λόγος Poisson του κελύφους κατά τη φόρτισή του στην διαμήκη διεύθυνση

c) Λυγισμός με πιθανή τοπική θλίψη του πυρήνα

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ρυτίδωση του κελύφους με μήκος κύματος μεγαλύτερο από το πλάτος του κελιού της κυψέλης. Ο λυγισμός μπορεί να προκληθεί και στις δύο κατευθύνσεις (εσωτερικά και εξωτερικά) ανάλογα την αντοχή του πυρήνα σε θλίψη καθώς και την αντοχή της κόλλας. Η σχέση που μπορεί να περιγράψει την κρίσιμη θλιπτική τάση σ_{fw} που θα προκαλέσει το λυγισμό του πάνω κελύφους είναι η παρακάτω:

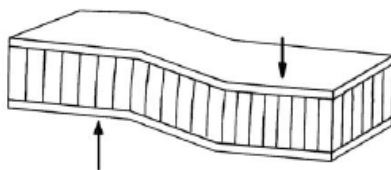
$$\sigma_{fw} = \frac{3}{(12(3 - \nu_{cxz})^2(1 + \nu_{cxz})^2)^{-1/3}} E_{fx}^{1/3} E_3^{2/3}$$

όπου:

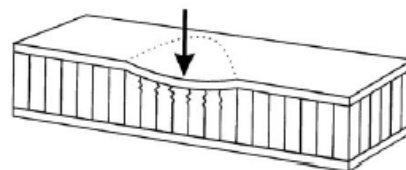
ν_{cxz} = λόγοι Poisson στον εγκάρσιο άξονα

E_3 = μέτρο ελαστικότητας πυρήνα στον εγκάρσιο άξονα

• **Αστοχία πυρήνα (core failure)**



(a) Core shear



(b) Local indentation

Εικόνα 22. Σχηματική απεικόνιση αστοχίας πυρήνα σε δομή sandwich

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 22, στην περίπτωση αστοχίας του πυρήνα διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

a) Πτύχωση του πυρήνα

Θεωρώντας μια απλή συμπεριφορά δοκούς, οι διατμητικές τάσεις διαφέρουν μεταξύ κελύφους και πυρήνα με παραβολικό τρόπο στην περίπτωση κάμψης 3 σημείων. Εάν τα κελύφη είναι αρκετά πιο άκαμπτα και λεπτά σε σχέση με τον πυρήνα τότε οι διατμητικές τάσεις μπορούν να θεωρηθούν ως γραμμικές στο κέλυφος και σταθερές στον πυρήνα. Προκύπτει λοιπόν πως η μέση διατμητική τάση στον πυρήνα δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_{cxz} = \frac{w}{2d}$$

Θεωρώντας ψαθυρή συμπεριφορά, η αστοχία επέρχεται όταν η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση τ_{xz} γίνεται ίση με τη διατμητική τάση τ_{cs} του πυρήνα σε αυτή τη διεύθυνση.

$$\tau_{cxz} = \tau_{cs}$$

b) Τοπική θλίψη του πυρήνα

Στην περίπτωση αυτή η αστοχία επέρχεται κατά την τοπική αστοχία του πυρήνα υπό θλιπτικές τάσεις. Η συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται αρχικά να μοιάζει με την περίπτωση του λυγισμού του κελύφους λόγω του μεγέθους των κελιών του πυρήνα ωστόσο στην πραγματικότητα υπάρχει διαφοροποίηση καθώς στην περίπτωση της τοπικής θλίψης του πυρήνα, το κέλυφος αστοχεί αφού πρώτα υπάρξει η αστοχία στον πυρήνα που υποχωρεί πρώτος.[10] Προκύπτει λοιπόν πως η αστοχία του πυρήνα επέρχεται όταν οι θλιπτικές τάσεις στον πυρήνα εξισώνονται με τη μέγιστη θλιπτική αντοχή του:[11]

$$\sigma_{zz} = \sigma_{cc}$$

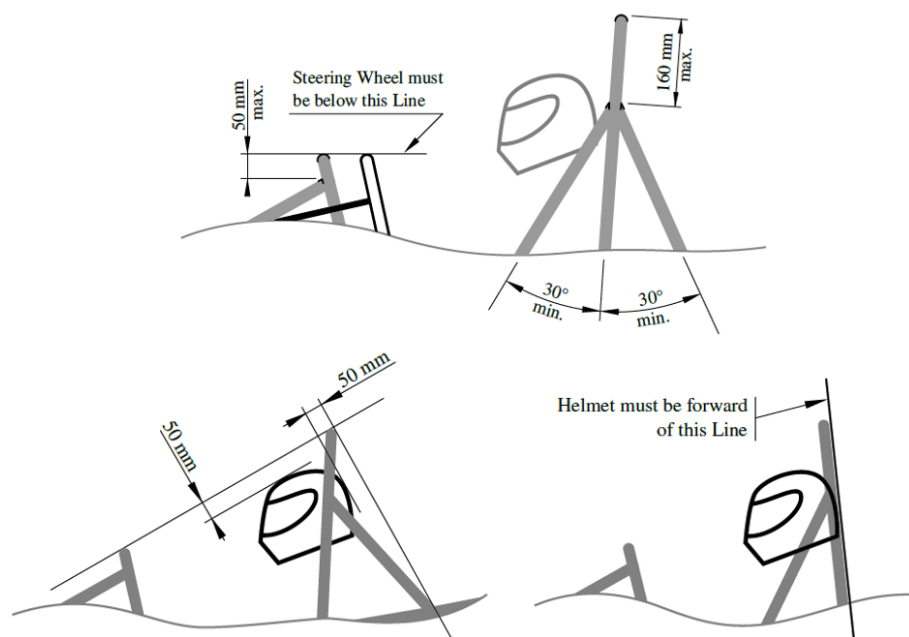
3 Κανονισμοί διαγωνισμού και κατασκευαστικοί περιορισμοί

3.1 Γενικές αναφορές

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, ο κάθε διαγωνισμός Formula Student ορίζει πλήθος κανονισμών οι οποίοι αφορούν διάφορα υποσυστήματα και εξαρτήματα του υπό κατασκευή αγωνιστικού οχήματος. [σ.σ. οι κανονισμοί που ανακοινώνει κάθε χρόνο η διοργάνωση που λαμβάνει χώρα στη Γερμανία (FSG), λαμβάνονται ως σημείο αναφοράς από την πλειοψηφία των υπολοίπων διοργανώσεων και όλες οι αναφορές στην εν λόγω εργασία γίνονται πάνω σε αυτούς). Ένα από τα κρισιμότερα μέρη του οχήματος για το οποίο ορίζεται πλήθος σχεδιαστικών και κατασκευαστικών περιορισμών είναι το πλαίσιο (σασί), κατασκευή στην οποία εδράζονται όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα και αποτελεί το χώρο που βρίσκεται ο οδηγός. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως το πλαίσιο πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένες σχεδιαστικές παραμέτρους προκειμένου να είναι ασφαλές τόσο για τον οδηγό όσο και για τους υπόλοιπους συμμετέχοντες κατά τη διάρκεια των δοκιμών ή του αγώνα.

3.1.1 Πλαίσιο προστασίας από ανατροπή (Roll hoop)

Ένας από τους βασικούς κανονισμούς που εξασφαλίζουν την προστασία του οδηγού σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος είναι η ύπαρξη δύο συνεχών πλαισίων (hoop) εκατέρωθεν του οδηγού. Τα hoop πρακτικά ορίζουν το χώρο που μπορεί να καταλάβει ο οδηγός εκτός του θαλάμου του πλαισίου και σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος εξασφαλίζουν πως δεν θα υπάρξει επαφή του οδηγού με το οδόστρωμα. Κατασκευάζονται από χαλύβδινο σωλήνα συγκεκριμένης γεωμετρίας και διαστάσεων και η σύνδεσή τους με το σασί γίνεται μέσω κοχλιοσύνδεσης συγκεκριμένων προδιαγραφών (Εικόνα 23).



Εικόνα 23. Γεωμετρία και διαστάσεις Roll Hoop

Οι προδιαγραφές που σχετίζονται με το main & front hoop παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υλικό κατασκευής: Ανθρακούχος χάλυβας με μέγιστη περιεκτικότητα άνθρακα 0.3%, μαγνήσιο 1.7% και 0.6% από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο.
- Ελάχιστο πάχος τοιχωμάτων 2 mm.
- Ελάχιστη επιφάνεια διατομής 175 mm².
- Ελάχιστη ροπή αδράνειας 11320 mm⁴.
- Front hoop: επιτρέπεται η χρήση δοκού ή σωλήνα από οποιοδήποτε μέταλλο με την προϋπόθεση πως η αντοχή του είναι ανάλογη των ελάχιστων απαιτήσεων χρήσης χαλύβδινου σωλήνα. Για την απόδειξη αυτού απαιτείται η πραγματοποίηση φυσικού πειράματος όπου αποδεικνύεται η αντοχή και η επιμήκυνση κατά τη θραύση, η παρουσίαση των χαρακτηριστικών του υλικού από τον κατασκευαστή καθώς και η επαρκής τεκμηρίωση της θερμικής κατεργασίας και διεργασίας συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκε κατά την κατασκευή του.

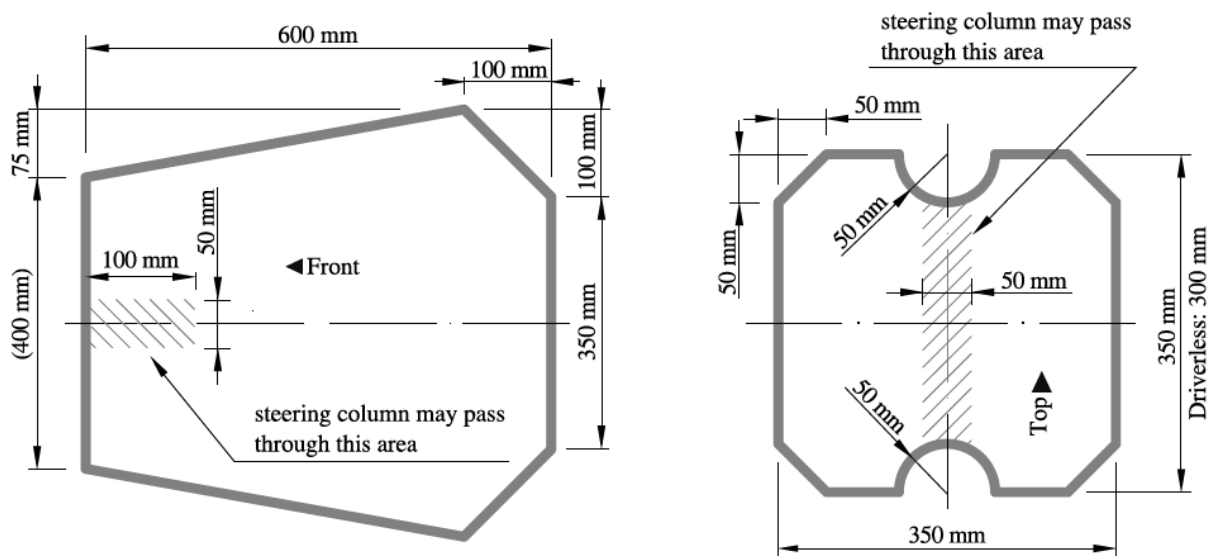
3.1.2 Ελεύθερες διατομές πλαισίου (Cockpit opening / Internal cross section)

Ένας από τους βασικούς σχεδιαστικούς περιορισμούς του πλαισίου αφορά τις ελάχιστες διαστάσεις που θα πρέπει να φέρει ο θάλαμος του οδηγού. Προκειμένου να καθοριστεί αυτός

ο όγκος χρησιμοποιούνται δύο σχήματα διδιάστατης γεωμετρίας που καθορίζουν δύο παραμέτρους:

A. Την ελεύθερη επιφάνεια στην κάτοψη του πλαισίου προκειμένου να εισέρχεται και να εξέρχεται με ασφάλεια ο οδηγός.

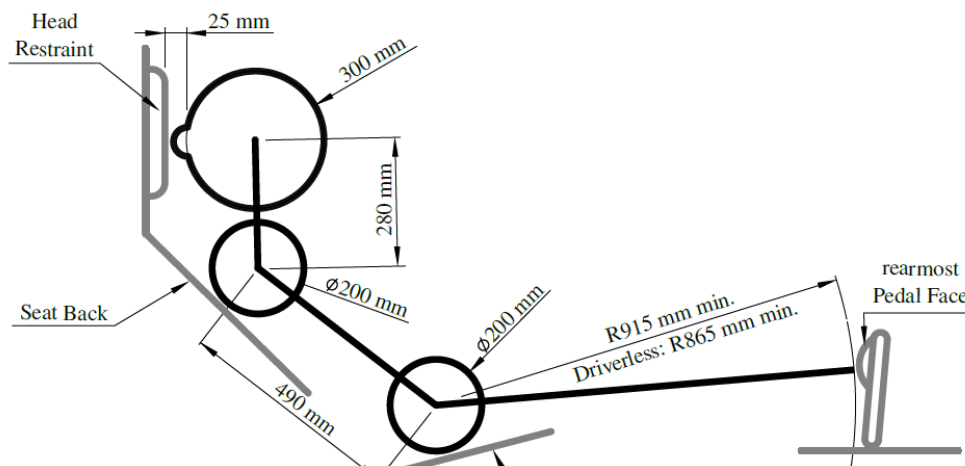
B. Την ελεύθερη επιφάνεια στη διατομή του πλαισίου που περικλείει τα πόδια του οδηγού. (Εικόνα 24)



Εικόνα 24. Ελάχιστες ελεύθερες διατομές πλαισίου

3.1.3 Τοποθέτηση οδηγού

Για τον ορισμό της θέσης του οδηγού στο θάλαμο του πλαισίου, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω διαστάσεις (Εικόνα 25) οι οποίες αντικατοπτρίζουν τα ανθρωπομετρικά χαρακτηριστικά ενός μέσου άνδρα (95th percentile male). Ο καθορισμός της παρακάτω θέσης γίνεται με γνώμονα την ασφάλεια και την εργονομία του οδηγού και πρακτικά μαζί με την



Εικόνα 25. Διαστασιολόγηση θέσης οδηγού

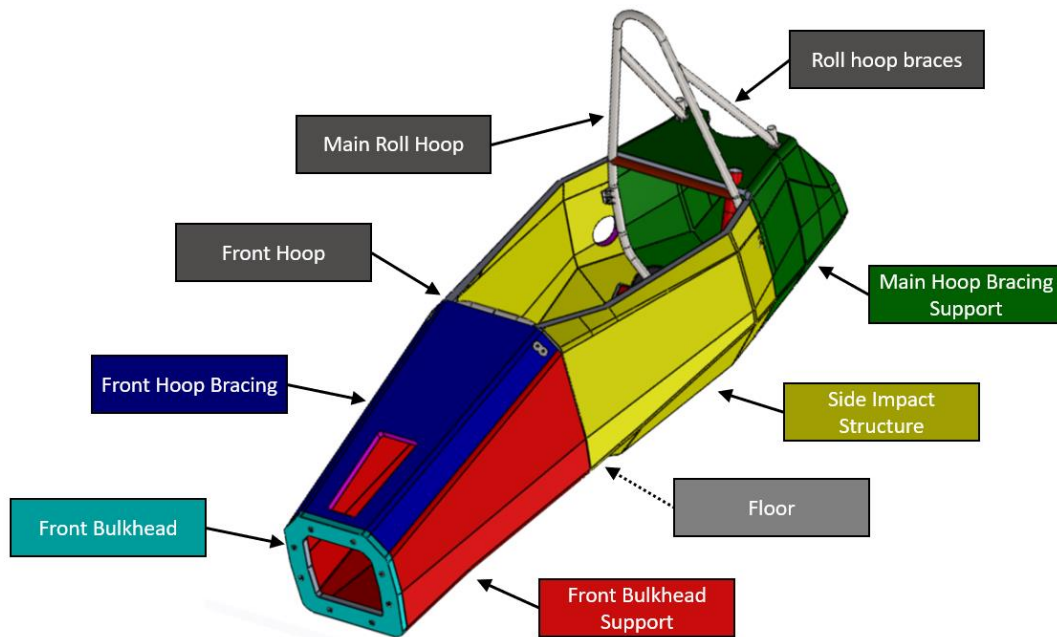
ελάχιστη διατομή του πλαισίου, ορίζουν το ελάχιστο μέγεθος που μπορεί να έχει ένα πλαίσιο οχήματος αυτής της κατηγορίας.

3.1.4 Λοιπές αναφορές

- Το πλαίσιο θα πρέπει να φέρει πάτωμα το οποίο να διαχωρίζει τον οδηγό από το έδαφος, κατασκευασμένο από ένα ενιαίο ή περισσότερα πάνελ, τα διάκενα μεταξύ των οποίων δεν θα ξεπερνούν τα 3mm.
- Ο θάλαμος του οδηγού θα πρέπει να διαχωρίζεται από το εξωτερικό περιβάλλον με τη χρήση κατάλληλων υλικών με μοναδική εξαίρεση τα ελάχιστα δυνατά κενά για τα υποσυστήματα διεύθυνσης και ανάρτησης.
- Ο θάλαμος του οδηγού θα πρέπει να διαχωρίζεται πλήρως από τους χώρους που βρίσκονται άλλα υποσυστήματα όπως ο κινητήρας, το σύστημα καυσίμου, κτλ με τέτοιο τρόπο όπου να καθίσταται αδύνατη η διαρροή υγρών από τον ένα χώρο στον άλλο. Ο διαχωρισμός θα πρέπει να γίνεται με κάποιο εξάρτημα κατασκευασμένο από υλικά συγκεκριμένων προδιαγραφών που εξασφαλίζουν προστασία από φωτιά σύμφωνα με τα πρότυπα UL94V-0 ή FAR25.853 ενώ στην περίπτωση διόδου καλωδίων θα πρέπει να γίνεται πλήρης στεγάνωση με τη βοήθεια κατάλληλων παρεμβυσμάτων.
- Το πλαίσιο του οχήματος θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο και κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει την έξοδο του οδηγού από την αγωνιστική θέση οδήγησης μέσα σε 5 δευτερόλεπτα.
- Πλαίσια τύπου monopocoque θα πρέπει να φέρουν δύο οπές διαμέτρου τουλάχιστον 25mm στο χαμηλότερο σημείο τους για την αποτροπή συσσώρευσης υγρών.
- Το πλαίσιο θα πρέπει να φέρει στο εμπρός του μέρος εξάρτημα απορρόφησης ενέργειας (impact attenuator) για την περίπτωση σύγκρουσης, το οποίο να μην επιφέρει ρυθμό επιτάχυνσης μεγαλύτερο των 40 g στιγμιαία και 20 g κατά μέσο όρο στη διάρκεια της σύγκρουσης. Ο έλεγχος θα πρέπει να γίνεται σε εγκεκριμένη πειραματική διάταξη και η απορροφούμενη ενέργεια θα πρέπει να ισούται ή να υπερβαίνει τα 7350 J.

3.2 Κατηγοριοποίηση μερών του πλαισίου

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη προστασία που μπορεί να φέρει ένα πλαίσιο για τον οδηγό του, οι κανονισμοί του διαγωνισμού Formula Student περιέχουν συγκεκριμένους σχεδιαστικούς και κατασκευαστικούς περιορισμούς και προδιαγραφές για κάθε επιμέρους σημείο του. Ως σημείο αναφοράς για κάθε μέρος του λαμβάνεται υπόψη η αντιστοιχία με ένα σωληνωτό πλαίσιο τα οποίο φέρει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κατασκευής που σχετίζονται με το πλήθος και τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων μελών (σωλήνων).



Εικόνα 26. Ονομασία των επιμέρους σημείων ενός monopocoque πλαισίου κατηγορίας Formula Student

3.2.1 Front bulkhead

Ως front bulkhead ορίζεται μια επίπεδη κατασκευή η οποία αποτελεί το μπροστινό άκρο του πλαισίου και προστατεύει τα πόδια του οδηγού. Ως ελάχιστη κατασκευαστική απαίτηση ορίζονται 2 χαλύβδινοι σωλήνες πάχους 1.6 χιλιοστών και διαμέτρου 25.4 χιλιοστών.

3.2.2 Front bulkhead support

Ως front bulkhead support ορίζεται μια κατασκευή η οποία ορίζει το πλαϊνό μέρος του πλαισίου ξεκινώντας από το front bulkhead και καταλήγοντας μέχρι το front hoop. Ως ελάχιστη κατασκευαστική απαίτηση ορίζονται 3 χαλύβδινοι σωλήνες πάχους 1.2 χιλιοστών και διαμέτρου 25.4 χιλιοστών.

3.2.3 Front hoop bracing

Ως front hoop bracing ορίζεται η κατασκευή που ξεκινάει από το πάνω μέρος του front roll hoop και καταλήγει μέχρι το bulkhead. Ως ελάχιστη κατασκευαστική απαίτηση ορίζεται ένας χαλύβδινος σωλήνας πάχους 1.6 χιλιοστών και διαμέτρου 25.4 χιλιοστών.

3.2.4 Front hoop

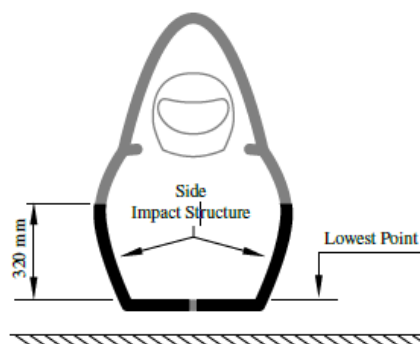
Ως front hoop ορίζεται μια κατασκευή που είναι ενσωματωμένη με το πλαίσιο, βρίσκεται πάνω από τα πόδια του οδηγού και τον προστατεύει σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος. Συνήθως βρίσκεται στο ύψος του τιμονιού και το υλικό κατασκευής του είναι ο χάλυβας ή το αλουμίνιο). Σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο το front hoop συνδέεται με το υπόλοιπο πλαίσιο μέσω συγκόλλησης ενώ στην περίπτωση monopocoque συνδέεται με αυτό μέσω κοχλιοσύνδεσης συγκεκριμένων προδιαγραφών. Το ελάχιστο πάχος θα πρέπει να είναι 2 χιλιοστά και η ελάχιστη επιφάνεια διατομής θα πρέπει να είναι 175 mm².

3.2.5 Main roll hoop

Ως main roll hoop ορίζεται μια κατασκευή που είναι ενσωματωμένη με το πλαίσιο, βρίσκεται πάνω από τους ώμους του οδηγού και τον προστατεύει στην περίπτωση ανατροπής του οχήματος (Εικόνα 27). Σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο το main hoop συνδέεται με το υπόλοιπο πλαίσιο μέσω συγκόλλησης ενώ στην περίπτωση monocoque συνδέεται με αυτό μέσω κοχλιοσύνδεσης συγκεκριμένων προδιαγραφών. Το main hoop πρέπει να κατασκευάζεται από ένα συνεχές κομμάτι κυλινδρικού σωλήνα κλειστής διατομής. Το ελάχιστο πάχος θα πρέπει να είναι 2 χιλιοστά και η ελάχιστη επιφάνεια διατομής θα πρέπει να είναι 175 mm².

3.2.6 Side Impact Structure

Ως side impact structure ορίζεται μια κατασκευή που συνδέει το front hoop με το main hoop και το πάτωμα με το χαμηλότερο εσωτερικό σημείο του πλαισίου, μεταξύ του front και του main hoop. Το side impact structure έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του οδηγού καθώς παρέχει προστασία στην περίπτωση πλευρικής σύγκρουσης. Ως ελάχιστη κατασκευαστική απαίτηση για τα πλαινά μέρη ορίζονται δύο χαλύβδινοι σωλήνες πάχους 1.6 χιλιοστών και διαμέτρου 25.4 χιλιοστών ενώ για το πάτωμα ορίζεται ένας σωλήνας ιδίων διαστάσεων.



Εικόνα 27. Side Impact Structure

3.2.7 Main hoop bracing support

Ως main (roll) hoop bracing support ορίζεται μια κατασκευή που συνδέει το χαμηλότερο σημείο των main hoop braces με το main hoop. Ως ελάχιστη κατασκευαστική απαίτηση ορίζονται 2 χαλύβδινοι σωλήνες πάχους 1.2 χιλιοστών και διαμέτρου 25.4 χιλιοστών.

3.3 SES (Structural Equivalency Spreadsheet)

Στην περίπτωση κατασκευής πλαισίου τύπου monocoque όλες οι παραπάνω κατασκευές σωλήνων (εκτός των roll hoops) αντικαθίσταται από κατασκευές sandwich οι οποίες θα πρέπει να αποδεικνύεται πως έχουν ίση ή μεγαλύτερη αντοχή από τους αντίστοιχους σωλήνες κάθε επιμέρους σημείου. Για το λόγο αυτό κάθε διαγωνισμός χρησιμοποιεί ένα κοινό υπολογιστικό εργαλείο που ονομάζεται SES στο οποίο υπολογίζεται η καμπτική ακαμψία των επιμέρους μερών με σημείο αναφοράς τους αντίστοιχους χαλύβδινους σωλήνες κάθε περιοχής του πλαισίου. Οι διαστάσεις των επιμέρους σωλήνων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 2. Ελάχιστο πάχος και επιφάνεια διατομής των χαλύβδινων σωλήνων αναφοράς

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm ²	11 320 mm ⁴
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm ²	6695 mm ⁴

Οι παραπάνω υπολογισμοί της καμπτικής ακαμψίας πραγματοποιούνται θεωρώντας το υλικό ως ένα flat panel. Ωστόσο στους υπολογισμούς για τα main hoop bracing support, front hoop bracing και front bulkhead support η γεωμετρία των επιφανειών του πλαισίου λαμβάνονται υπόψη.

Οι μηχανικές ιδιότητες των σωλήνων αναφοράς που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς του SES είναι οι παρακάτω:

Συνεχείς σωλήνες που δεν έχουν υποστεί κατεργασία συγκόλλησης:

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) → (E) = 200 GPa
- Όριο διαρροής (Yield Strength) → (Sy) = 305 MPa
- Μέγιστη αντοχή (Ultimate Strength) → (Su) = 365 MPa

Μορφοποιημένοι σωλήνες που έχουν υποστεί κατεργασία συγκόλλησης"

- Όριο διαρροής (Yield Strength) → (Sy) = 180 MPa
- Μέγιστη αντοχή (Ultimate Strength) → (Su) = 300 MPa

Στην περίπτωση κατασκευής monopocoque στο SES θα πρέπει να περιλαμβάνονται αναλυτικές πληροφορίες για όλα τα επιμέρους υλικά όπως:

- Τύπου υλικών
- Βάρος υφασμάτων
- Τύπος ρητίνης
- Διεύθυνση ινών
- Αριθμός στρώσεων
- Τύπος υλικού πυρήνα
- Τεχνική κατασκευής
- Δεδομένα πειραμάτων κάμψης τριών σημείων
- Δεδομένα πειραμάτων διάτμησης

Επιπλέον σε όλα τα χρησιμοποιούμενα υλικά ορίζεται περιορισμός για το βάρος των παράλληλων ινών (+/-10°) καθώς δεν θα πρέπει να ξεπερνούν το 50% του συνολικού βάρους όλων των υφασμάτων.

3.4 Φυσικά Πειράματα

Στην περίπτωση κατασκευής πλαισίου τύπου monopocoque είναι απαιτούμενη η διεξαγωγή φυσικών πειραμάτων για κάθε διαφορετικό συνδυασμό υλικών ενώ τα δεδομένα των φυσικών πειραμάτων θα χρησιμοποιηθούν για τη συμπλήρωση του SES. Σκοπός των πειραμάτων είναι η απόδειξη πως κάθε επιμέρους σημείο του πλαισίου φέρει ίση ή μεγαλύτερη καμπτική δυσκαμψία από το αντίστοιχο σημείο αναφοράς χαλύβδινων σωλήνων ενώ μέσω των φυσικών πειραμάτων μπορεί να προβλεφθεί και ο τρόπος όπου θα αστοχήσει κάθε διαφορετικός συνδυασμός υλικών (αστοχία του πυρήνα, αστοχία του κελύφους, τύπος αστοχίας κ.τ.λ.). Επιπλέον τα φυσικά δοκίμια θα πρέπει να αποθηκευτούν προκειμένου να παρουσιαστούν στους κριτές κατά τη διαδικασία του τεχνικού ελέγχου μαζί με το συμπληρωμένο υπολογιστικό εργαλείο SES. Τα φυσικά πειράματα πρέπει να έχουν τη μορφή επίπεδων sandwich panel και η διαδικασία κατασκευής τους θα πρέπει να είναι η ίδια με αυτή του πλαισίου (υλικά, αριθμός στρώσεων, διεύθυνση στρώσεων, τύπος πυρήνα κ.τ.λ.) ενώ για κάθε μέρος του πλαισίου με διαφορετικές κατασκευαστικές απαιτήσεις θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και ένα ξεχωριστό πείραμα. Για παράδειγμα για το front bulkhead θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πείραμα που να αποδεικνύει ίση ή μεγαλύτερη καμπτική δυσκαμψία από 2 σωλήνες αντίστοιχων διαστάσεων, για το front bulkhead support ίση ή μεγαλύτερη από 3 σωλήνες αντίστοιχων διαστάσεων και ούτω καθεξής. [12]

Τα απαιτούμενα πειράματα που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες και πραγματοποιούνται με τη βοήθεια μιας μηχανής εφελκυσμού.

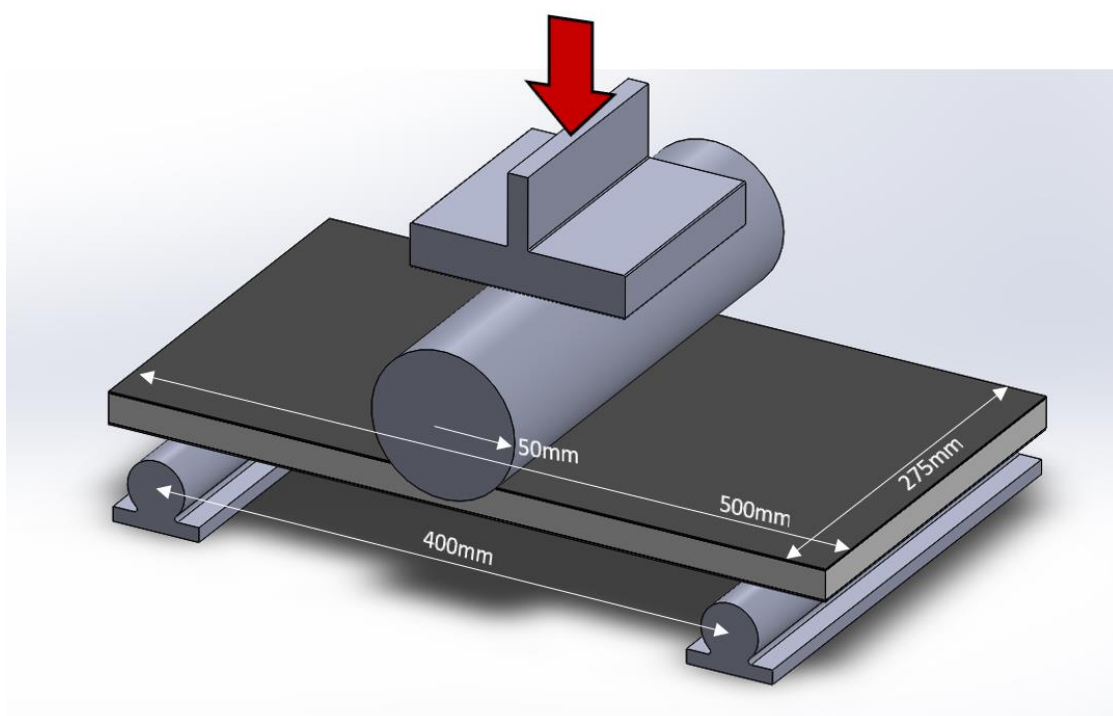
I. Πειράματα κάμψης τριών σημείων

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, κάθε διαφορετικός συνδυασμός υλικών θα πρέπει να φέρει ίση ή μεγαλύτερη καμπτική δυσκαμψία σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο αναφοράς χαλύβδινων σωλήνων που αντικαθιστά. Για την επαλήθευση των ιδιοτήτων κάθε επιμέρους συνδυασμού υλικών απαιτείται η πραγματοποίηση ενός πειράματος κάμψης τριών σημείων με τη χρήση μιας μηχανής εφελκυσμού. Κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος επιλέγεται μια σταθερή πρόωση της κεφαλής στον κατακόρυφο άξονα και μετράται η αντίδραση F από το εξεταζόμενο δοκίμιο. Τόσο το εξεταζόμενο δοκίμιο όσο και η πειραματική διάταξη θα πρέπει να ακολουθούν τους καθορισμένους κανονισμούς προκειμένου να θεωρηθούν έγκυρα από τους κριτές των διαγωνισμών. Οι κανονισμοί που θα πρέπει να πληρούνται είναι οι εξής:

- Κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που θα κατασκευαστεί το αντίστοιχο σημείο του πλαισίου.
- Το δοκίμιο θα πρέπει να είναι επίπεδο και η περίμετρός του να μην καλύπτεται με ύφασμα προκειμένου να είναι ορατός ο πυρήνας.
- Οι διαστάσεις του δοκιμίου θα πρέπει να είναι 500 x 275 χιλιοστά.
- Πειράματα που φέρουν την ίδια διαστρωμάτωση με διαφορετικό πάχος πυρήνα απαιτούν ένα τουλάχιστον πείραμα καθώς οι ιδιότητες των υπόλοιπων κατασκευών μπορούν να καθοριστούν με τη βοήθεια υπολογισμών.
- Στην περίπτωση πειράματος για το Side Impact Structure θα πρέπει να αποδειχθεί πως το σύνθετο υλικό πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις του αντίστοιχου σημείου αναφοράς χαλύβδινων σωλήνων για: το μέτρο ελαστικότητας (λυγισμός), το όριο διαρροής και τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια.
- Η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων έδρασης του δοκιμίου θα πρέπει να είναι 400 χιλιοστά.

- Το εξάρτημα εφαρμογής της δύναμης θα πρέπει να είναι κυλινδρικό, κατασκευασμένο από μέταλλο και να έχει ακτίνα 50 χιλιοστών.
- Το μήκος του εξαρτήματος εφαρμογής της δύναμης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του δοκιμίου για να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων στα άκρα του δοκιμίου.
- Μεταξύ του εξεταζόμενου δοκιμίου και του εξαρτήματος εφαρμογής δύναμης δεν θα πρέπει να βρίσκεται κανένα άλλο εξάρτημα ή υλικό.

Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή όλων των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων η οποία είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς που ορίζει ο διαγωνισμός:



Εικόνα 28. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης τριών σημείων

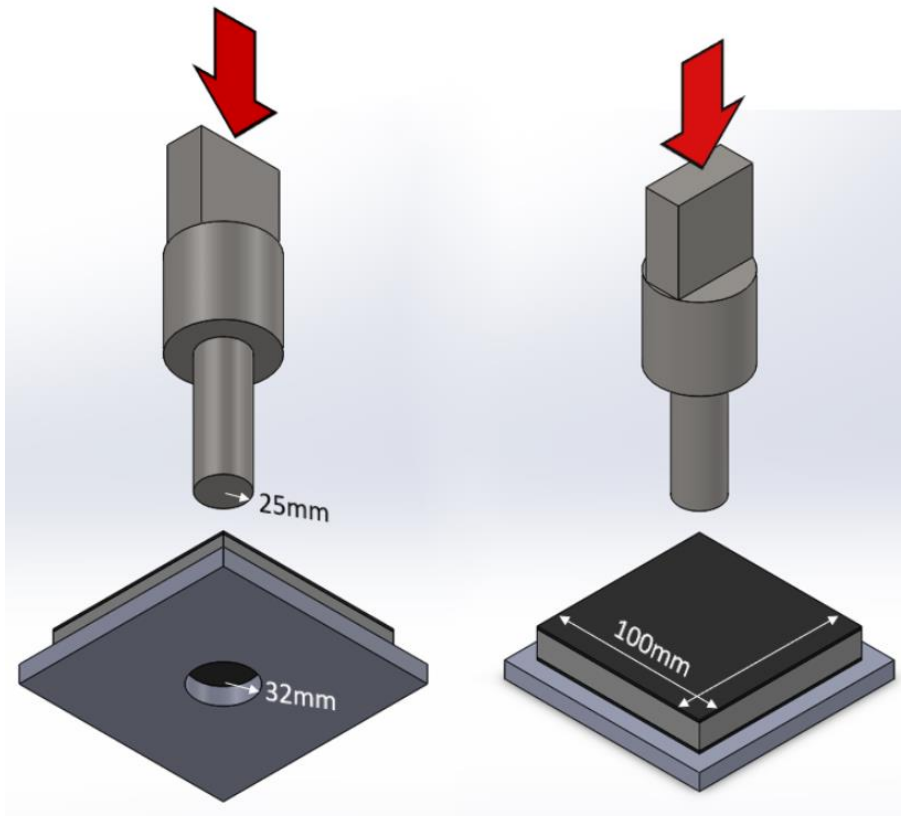
II. Πειράματα διάτρησης

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του διαγωνισμού για κάθε επιμέρους σημείο του πλαισίου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα κάμψης τριών σημείων και ένα πείραμα διάτρησης. Στα πειράματα διάτρησης ελέγχεται η αντοχή σε διάτμηση κάθε επιμέρους σημείου του πλαισίου προκειμένου ουσιαστικά να βρεθεί η δύναμη που χρειάζεται για να εισχωρήσει ένας κύλινδρος καθορισμένων διαστάσεων στην κατασκευή του sandwich panel. Οι κανονισμοί που θα πρέπει να πληρούνται είναι οι εξής:

- Κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που θα κατασκευαστεί το αντίστοιχο σημείο του πλαισίου.
- Το δοκίμιο θα πρέπει να είναι επίπεδο και η περιμετρός του να μην καλύπτεται με ύφασμα προκειμένου να είναι ορατός ο πυρήνας.
- Οι διαστάσεις του δοκιμίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 x 100 χιλιοστά.
- Το εξάρτημα εφαρμογής της δύναμης θα πρέπει να είναι κυλινδρικό, κατασκευασμένο από μέταλλο και να έχει διάμετρο 25 χιλιοστών.

- Η επιφάνεια έδρασης θα πρέπει να καλύπτει όλη την επιφάνεια του δοκιμίου εκτός από μια σπή διαμέτρου 32 χιλιοστών, ομόκεντρη με τον κύλινδρο εφαρμογής της δύναμης.

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή όλων των πειραμάτων διάτρησης η οποία είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς που ορίζει ο διαγωνισμός:



Εικόνα 29. Πειραματική διάταξη διάτρησης

4 Επιλογή υλικών και αποτελέσματα πειραμάτων

4.1 Επιλογή υλικών

Κατά τον πρωταρχικό σχεδιασμό μιας σύνθετης κατασκευής όπως ένα monopocoque απαιτεί τη λήψη αποφάσεων τόσο για τη γεωμετρία όσο και για τα υλικά της κατασκευής. Η επιλογή των υλικών θα προκύψει μέσα από μια διαδικασία αξιολόγησης πολλών παραμέτρων οι οποίοι θα ληφθούν υπόψη προκειμένου η τελική επιλογή να μπορεί να δικαιολογηθεί επαρκώς και να επιφέρει το μέγιστο κέρδος. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή των υλικών είναι οι εξής:

- **Κατασκευαστικοί περιορισμοί – Κανονισμοί**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε κατασκευή monopocoque θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς που ορίζουν οι διαγωνισμοί και να αποδεικνύεται η εγκυρότητά του μέσω του υπολογιστικού εργαλείου SES. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ο συνδυασμός των επιλεγμένων υλικών για κάθε επιμέρους σημείο του πλαισίου θα πρέπει να φέρει ισάξια ή μεγαλύτερη αντοχή από τα αντίστοιχα σημεία αναφοράς χαλύβδινων σωλήνων, κάτι που θα πρέπει να αποδειχθεί μέσω των φυσικών πειραμάτων. Συνδυασμοί υλικών που δεν πληρούν τις ελάχιστες κατασκευαστικές απαιτήσεις δεν είναι αποδεκτά και τελικά δεν θα επιλεγθούν.

- **Μηχανικές Ιδιότητες (Ακαμψία)**

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή υλικών είναι η τελική δυσκαμψία του πλαισίου. Υλικά που πληρούν τους κανονισμούς του SES αλλά βρίσκονται αρκετά υψηλότερα από τα ελάχιστα όρια θα προτιμηθούν έναντι των υλικών που πληρούν μεν τα όρια αλλά βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά. Ο συνδυασμός υλικών με υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες θα δώσει θεωρητικά τη δυνατότητα να αυξηθεί η δυσκαμψία για την ίδια γεωμετρία πλαισίου και συνεπακόλουθα να επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση του οχήματος.

- **Βάρος**

Η τελική απόδοση του οχήματος είναι θεωρητικά ανάλογη του λόγου βάρους προς ακαμψίας του πλαισίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ένα όχημα με υψηλότερη ακαμψία και χαμηλότερο βάρος θα έχει υψηλότερη απόδοση σε σχέση με ένα όχημα με χαμηλότερο αντίστοιχο λόγο, κρατώντας φυσικά σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Στην περίπτωση λοιπόν όπου η δυνατότητα αύξησης της ακαμψίας είναι αδύνατο να αυξηθεί περαιτέρω, η μεγαλύτερη απόδοση του οχήματος θα επιτευχθεί με τη μείωση του βάρους. Άρα μεταξύ δύο υλικών με ίδιες μηχανικές ιδιότητες τελικά θα επιλεγθεί αυτό με το χαμηλότερο βάρος.

- **Κόστος**

Πέρα από τις παραμέτρους που έχουν σχέση με την υψηλότερη απόδοση του οχήματος (ακαμψία, βάρος), εξίσου σημαντική είναι και η παράμετρος του κόστους. Στον σύγχρονο κόσμο και την παγκόσμια αγορά οι επιλογές των υλικών είναι πολυάριθμες και το κόστος των υλικών έχουν υψηλή διακύμανση. Υλικά με υψηλές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλό βάρος όπως τα ανθρακονήματα έχουν συνήθως υψηλότερη τιμή από αντίστοιχα υλικά υποδεέστερων ιδιοτήτων όπως ο χάλυβας και τα πολυμερή. Επιπλέον υλικά με μεγάλη ζήτηση και χαμηλή διαθεσιμότητα θα έχουν υψηλότερη τιμή συγκριτικά με τα υπόλοιπα διαθέσιμα υλικά της αγοράς. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η

τελική επιλογή υλικών θα πρέπει να γίνει με γνώμονα το συνολικό κόστος που μπορεί να διαθέσει κάθε ομάδα.

- **Διαθεσιμότητα**

Μια πολύ σημαντική παράμετρος ανάλογη του κόστους είναι η διαθεσιμότητα των επιθυμητών υλικών. Κάθε ομάδα προκειμένου να επιτύχει τους καθορισμένους στόχους της εντός του χρονικού πλαισίου που έχει ορίσει, θα πρέπει να έχει διαθέσιμα τα επιλεγμένα υλικά κατά την καθορισμένη κατασκευαστική περίοδο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως υλικά με πολύ υψηλό χρόνο παράδοσης ή υλικά που δεν μπορούν να είναι διαθέσιμα στο επιθυμητό χρονικό διάστημα δε θα ληφθούν υπόψη κατά την τελική απόφαση επιλογής υλικών παρόλο που μπορεί να φέρουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά.

- **Κατασκευασιμότητα**

Η κατασκευασιμότητα είναι μια παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των διαθέσιμων επιλογών. Υλικά που απαιτούν σύνθετες κατασκευαστικές μεθόδους και διεργασίες οι οποίες δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν από κάποια ομάδα λόγω των διαθέσιμων πόρων της, θα πρέπει να αποκλειστούν από την τελική επιλογή υλικών. Για παράδειγμα εάν μια ομάδα δεν μπορεί να έχει πρόσβαση σε ένα μηχάνημα θερμικής κατεργασίας (autoclave) δεν θα κάνει τελικά την επιλογή των προεμποτισμένων υφασμάτων (prepreg) τα οποία απαιτούν θερμοσκλήρυνση σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η επιλογή των τελικών υλικών προκύπτει μέσα από μια σύνθετη διαδικασία αξιολόγησης, κατά την οποία είναι απαραίτητο να γίνουν αρκετοί συμβιβασμοί μεταξύ των εξεταζόμενων παραμέτρων

4.1.1 Υλικό ενίσχυσης

Το υλικό ενίσχυσης που επιλέχθηκε είναι ένα προεμποτισμένο ύφασμα (prepreg) της εταιρίας Solvay, με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υλικό υφάσματος: Ανθρακόνημα (T300)
- Τύπος πλέξης: Twill 3k 2x2
- Βάρος υφάσματος: 245gsm (γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο)
- Υλικό μήτρας: Θερμοσκληρυνόμενη εποξειδική ρητίνη (MTM28-B)

Οι εφαρμοζόμενοι κύκλοι θερμοσκήρυνσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 30:

CURE CYCLE

Oven Vacuum Bag Cure

Vacuum bag pressure	Minimum of 980mbar (29"Hg)* †
Ramp rate	1 to 3°C (1.8 to 5.4°F)/minute
Recommended cure cycle	1 hour at 120°C, +5/-0°C (248°F, +9/-0°F)
Cool down	Maximum of 3°C (5.4°F)/minute to 60°C (140°F)

*This is the ideal vacuum level, however, it is recognised that it is not always possible to attain. If in doubt, please contact our technical support staff for advice.

Autoclave Cure

Vacuum bag pressure	Minimum of 980mbar (29"Hg)* †
Autoclave pressure	6.2 bar (90 psi)**
Ramp rate	1 to 3°C (1.8 to 5.4°F)/minute
Recommended cure cycle	1 hours at 120°C, +5/-0°C (248°F, +9/-0°F)
Cool down	Maximum of 3°C (5.4°F)/minute to 60°C (140°F)

Alternative Cure Cycles

Temperature	Duration
85°C (185°F)	13 hours
140°C (284°F)	25 minutes
150°C (302°F)	15 minutes
160°C (320°F)	7 minutes

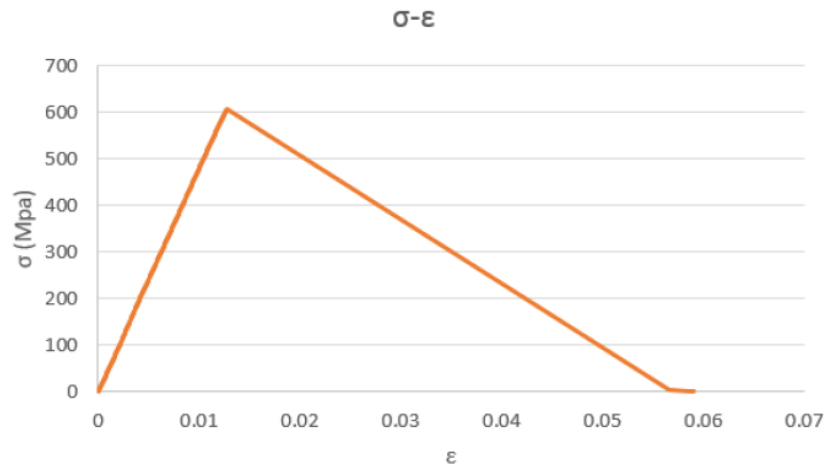
Εικόνα 30. Κύκλοι θερμοσκλήρυνσης του επιλεγμένου υλικού

Το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών των διαθέσιμων κύκλων θερμοσκλήρυνσης αποτέλεσε έναν από τους βασικούς λόγους επιλογής του παραπάνω υλικού καθώς ύστερα από δοκιμές προέκυψε πως ο χαμηλότερος κύκλος των 85 βαθμών (13 ώρες) είναι συμβατός με όλα τα υλικά κατασκευής του καλουπιού τα οποία θα πρέπει να παραμείνουν στο θάλαμο της θερμικής κατεργασίας για αυτό το χρονικό διάστημα.[13]

Οι μηχανικές ιδιότητες που έχει το υλικό ακολουθώντας τον παραπάνω κύκλο θερμοσκλήρυνσης προέκυψαν από φυσικά πειράματα με τη βοήθεια μηχανής εφελκυσμού και παρουσιάζονται παρακάτω:

Πείραμα εφελκυσμού

- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) = 49.7 GPa
- Μέγιστη αντοχή (Tensile strength) = 607MPa

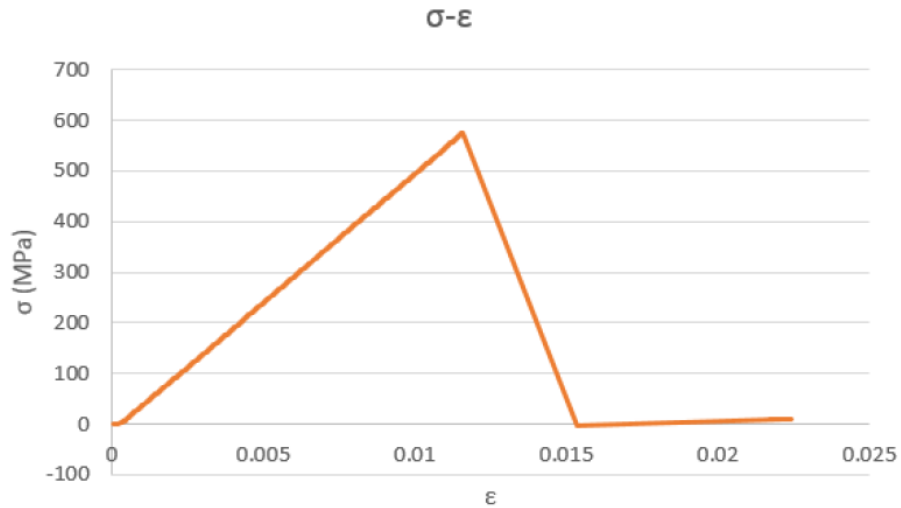


Επιμήκυνση κατά το σημείο θραύσης (ϵ) = 1.27

Διάγραμμα 1. Διάγραμμα Δύναμης – Παραμόρφωσης πειράματος Front Bulkhead Support (shear)

Πείραμα θλίψης

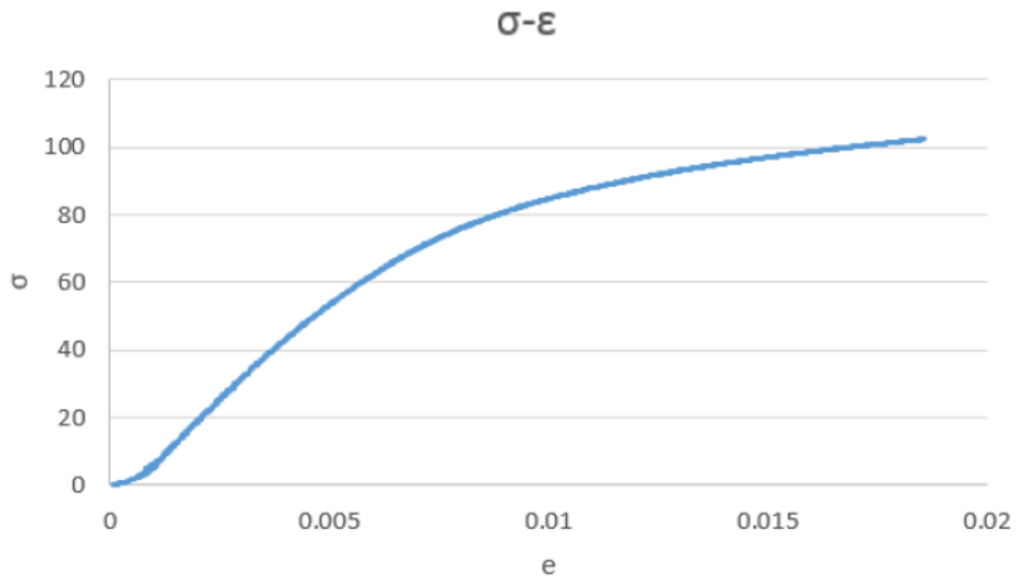
- Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) = 47.7 GPa
- Μέγιστη αντοχή (Tensile strength) = 550MPa



Διάγραμμα 2. Αποτελέσματα πειράματος θλίψης (MTM28 - 4 plies - 0 deg)

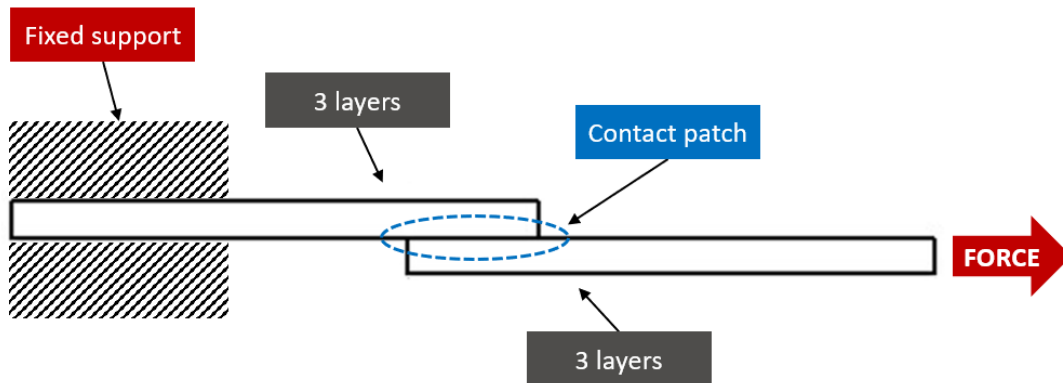
Πείραμα διάτμησης:

- Μέτρο διάτμησης (shear modulus xy): 4.3 GPa



Διάγραμμα 3. Αποτελέσματα πειράματος εφελκυσμού (MTM28 - 4 plies - 45 deg)

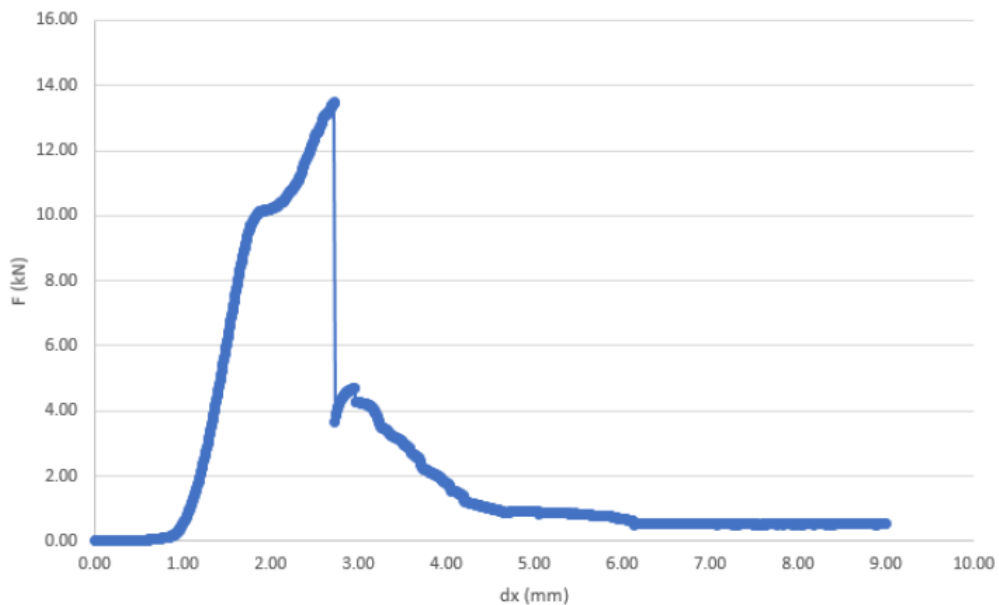
Πείραμα αντοχής διαστρωματικών τάσεων Inter-laminar shear strength (ILSS) = 80 MPa



Εικόνα 31. Διάταξη πειράματος αντοχής διαστρωματικών τάσεων (MTM 28)

Πείραμα αντοχής σε διάτμηση (διάτρηση)

Διάμετρος εξαρτήματος εφαρμογής δύναμης = 25 χιλιοστά
Διάμετρος οπής έδρασης: 32 χιλιοστά
Δοκίμιο με 8 στρώσεις συνολικού πάχους 2.4 χιλιοστών
Μέγιστη αντοχή σε διάτμηση: 72 MPa



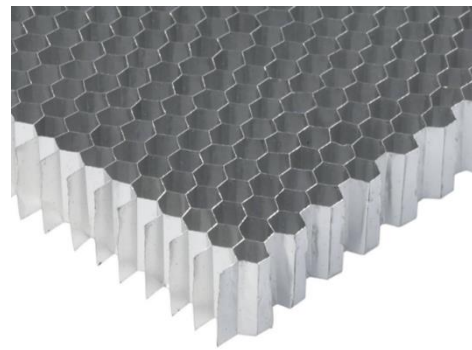
Διάγραμμα 4. Αποτελέσματα πειράματος διάτρησης (MTM28 - 8 plies - Df=25mm)

Πίνακας 3. Ιδιότητες υλικού ενίσχυσης (MTM28 245gsm)

Density (km/m ³)	1.33
Ply thickness	0.25
Pattern	Twill
Young's Modulus (GPa)	49.7
Tensile Strength (MPa)	607
Strain (%)	1.27
Poisson Ratio (ν)	0.04
Compressive Modulus (GPa)	47.7
Compressive Strength (MPa)	550
Shear Modulus (GPa)	4.3
Shear Strength (MPa)	72
ILSS (MPa)	80
Fiber volume	0.48

Υλικό πυρήνα

Το υλικό που επιλέχθηκε για τον πυρήνα της κατασκευής sandwich είναι τύπου κυψέλης και κατασκευάζεται από αλουμίνιο 5052. Στην περίπτωση του πυρήνα λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές ιδιότητες που αναγράφονται στο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή.



Οι ιδιότητές του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4. Ιδιότητες πυρήνα honeycomb αλουμινίου

Product Data

Colour	Silver	
Chemistry / Material	Aluminium	
Brand	Corex	
Cell Size	3.2	mm
Density (Dry)	72.1	kg/m ³
Thickness	20	mm

Mechanical Properties

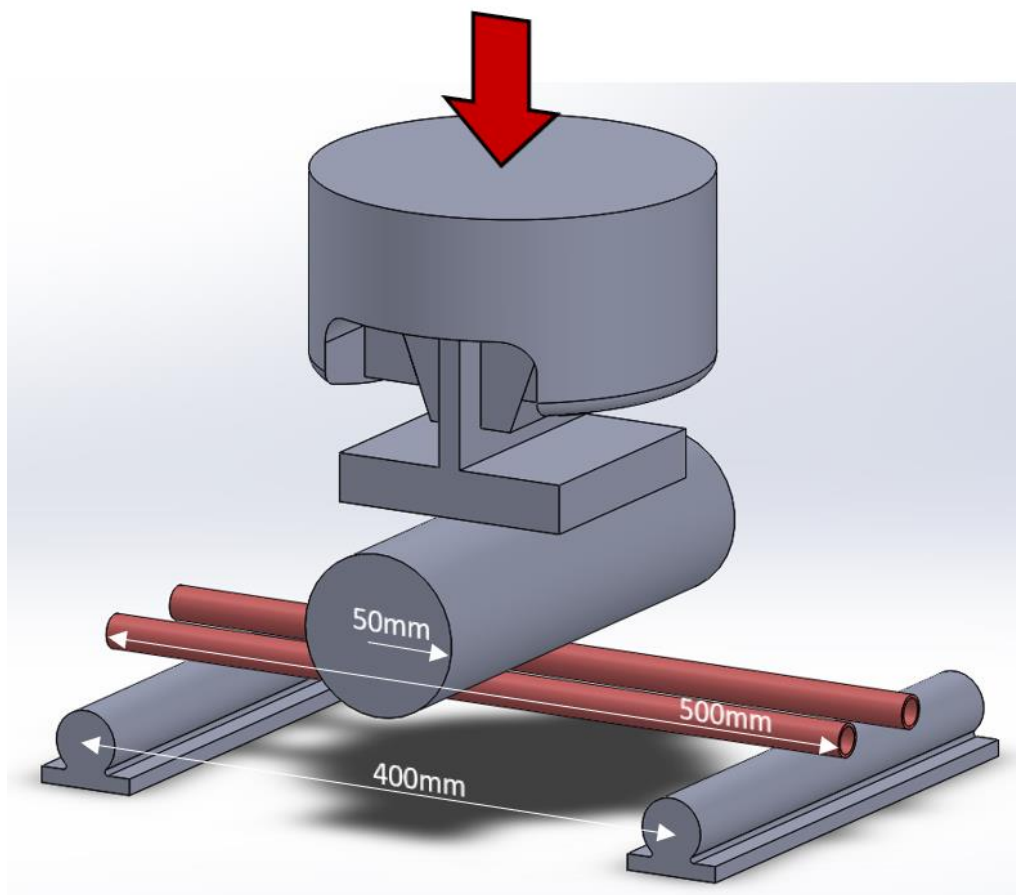
Max Service Temp	120	°C
Compressive Strength (Stabilised)	3.85	MPa
Plate Shear Strength (lengthways)	2.34	MPa
Plate Shear Modulus (lengthways)	482	MPa
Plate Shear Strength (widthways)	1.52	MPa
Plate Shear Modulus (widthways)	214	MPa

4.2 Αποτελέσματα φυσικών πειραμάτων

4.2.1 Ακαμψία της πειραματικής διάταξης

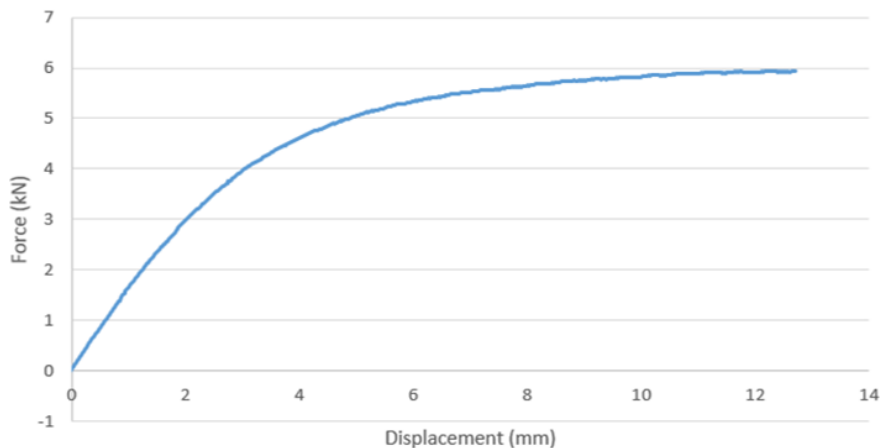
Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, προκειμένου να αποδειχθεί πως το υλικό που επιλέχθηκε για την κατασκευή κάθε επιμέρους σημείου του πλαισίου είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς, απαιτείται η διεξαγωγή φυσικών πειραμάτων κάμψης και διάτρησης. Σε προηγούμενο κεφάλαιο (Εικόνα 28) παρουσιάστηκε η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων ωστόσο πριν τη λήψη οποιασδήποτε μέτρησης θεωρείται απαραίτητη η διεξαγωγή ενός δοκιμαστικού πειράματος προκειμένου να βρεθεί η ακαμψία της πειραματικής διάταξης, δηλαδή το κατά πόσο συμμετέχει στα τελικά αποτελέσματα που δίνει η μηχανή εφελκυσμού.

Για τη διεξαγωγή αυτού του πειράματος χρησιμοποιούνται δύο χαλύβδινοι σωλήνες γνωστών διαστάσεων για τους οποίους μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η καμπτική δυσκαμψία EI και πραγματοποιείται ένα πείραμα κάμψης τριών σημείων υπό τις ίδιες συνθήκες πραγματοποίησης των πειραμάτων για τις κατασκευές sandwich. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 32:



Εικόνα 32. Πείραμα δοκιμής για την εύρεση της ακαμψίας της διάταξης

3 Point Bending (Base Tubes)



Διάγραμμα 5. Αποτελέσματα πειράματος κάμψης τριών σημείων για την εύρεση της ακαμψίας της διάταξης

Ύστερα από τη διεξαγωγή του πειράματος λαμβάνονται τα δεδομένα αντίδρασης και παραμόρφωσης ενώ παράλληλα από τη στατική είναι γνωστό πως η παραμόρφωση λόγω κάμψης στο κέντρο του δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (4.1)$$

Όπου:

- δ : Παραμόρφωση στο κέντρο του δοκιμίου (m)
- P : Ασκούμενη δύναμη (N)
- l : Απόσταση των δύο σημείων έδρασης (m)
- E : Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) (MPa)
- I : Ροπή αδράνειας (mm^4)

Επίσης επιλέγουμε δύο σημεία εντός της γραμμικής ελαστικής περιοχής:

$$x_1 \text{ (mm)} = 0.03$$

$$x_2 \text{ (mm)} = 0.99$$

$$y_1 \text{ (N)} = 62.2$$

$$y_2 \text{ (N)} = 1643$$

$$\text{Όπότε προκύπτει η κλίση: } k = (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1) = 1647 \text{ (N/mm)}$$

Η παραμόρφωση δ και η αντίδραση P είναι γνωστές λόγω των δεδομένων του πειράματος. Έτσι λοιπόν λύνοντας προς EI προκύπτει η πειραματική καμπτική δυσκαμψία:

$$EI_{\text{tested}} = k \times l^3 / 48 = 2.2 \times 10^9 \text{ (GPa)}$$

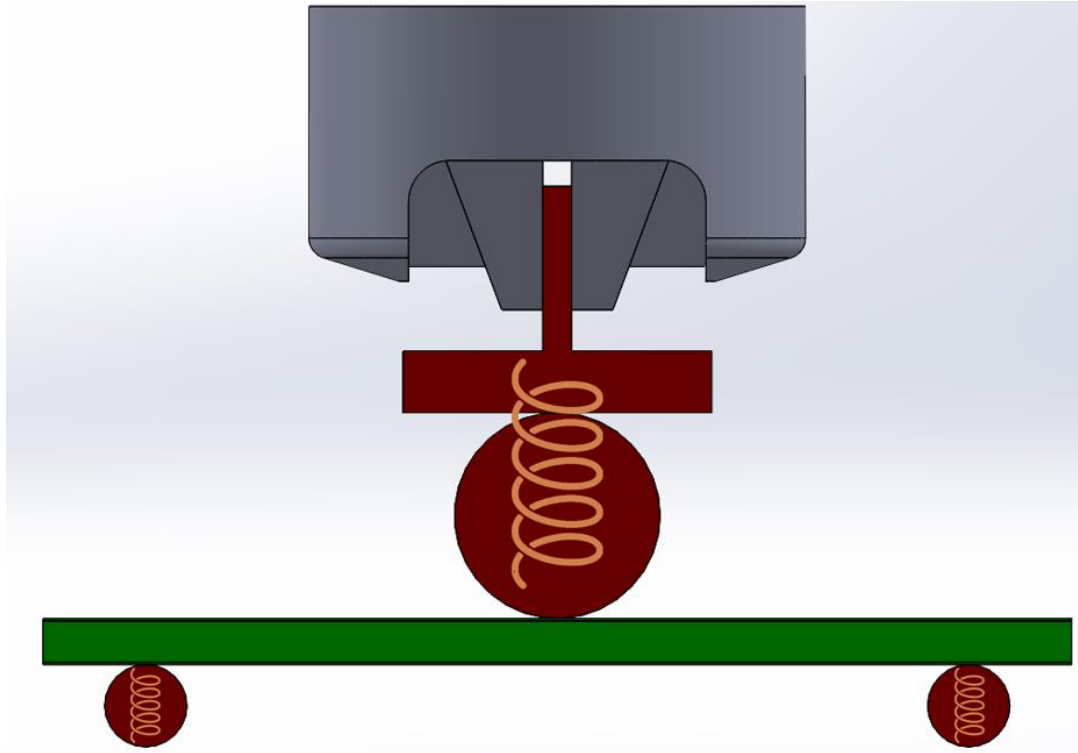
Με τη χρήση της σχέσης (4.1) και γνωρίζοντας το μέτρο ελαστικότητας E καθώς και τη ροπή αδράνειας I , προκύπτει η θεωρητική καμπτική δυσκαμψία των σωλήνων:

$$EI_{\text{theoretical}} = 2 \times \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \times 200000 = 3.4 \times 10^9 \text{ (GPa)}$$

Τελικά γνωρίζοντας τις δύο παραπάνω τιμές υπολογίζεται ο βαθμός συμμετοχής της διάταξης στο πραγματοποιούμενο πείραμα (Υπολογισμός από SES):

$$\text{Rig compliance} = (EI_{\text{tested}}^{-1} - EI_{\text{theoretical}}^{-1})^{-1} = 4640 \text{ (N/mm)}$$

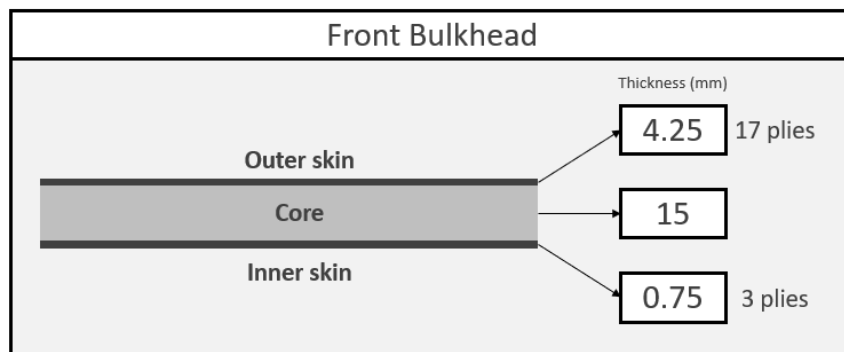
Στην Εικόνα 33 απεικονίζεται η συμμετοχή της διάταξης στο πραγματοποιούμενο πείραμα:



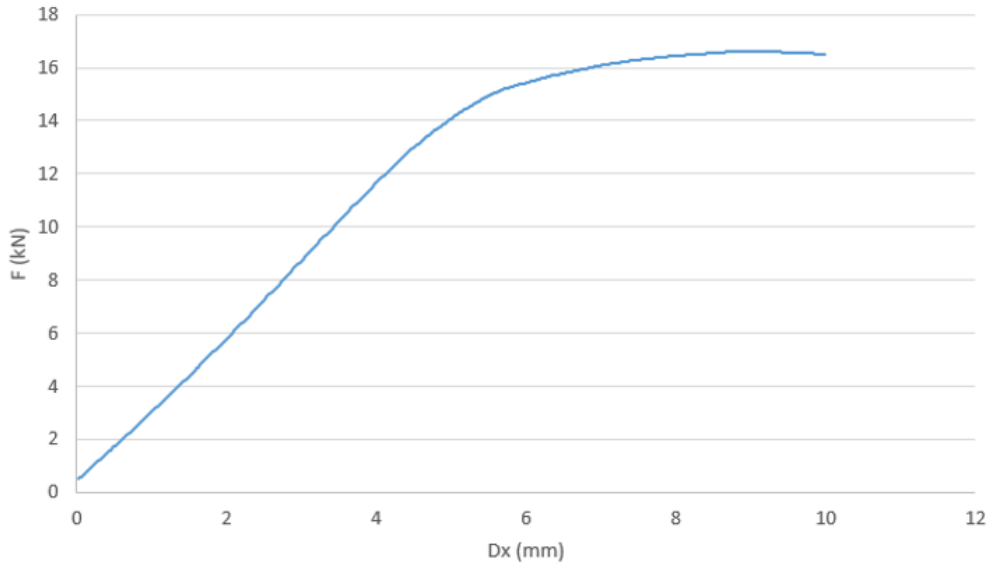
Εικόνα 33. Πείραμα δοκιμής για την εύρεση της ακαμψίας της διάταξης (πλάγια όψη)

4.2.2 Front Bulkhead

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα δεδομένα του τελικού πειράματος για το Front Bulkhead παρουσιάζονται παρακάτω:



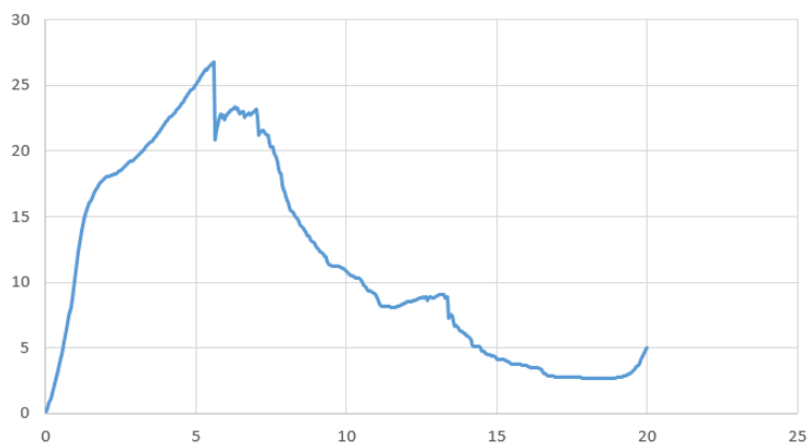
Εικόνα 34. Διαστρωμάτωση για το Front Bulkhead



Διάγραμμα 6. Πειραματικά δεδομένα για το Front Bulkhead (3 Point Bending)

x_1 (mm)	1	y_1 (N)	3026	Gradient (N/mm)	4094
x_2 (mm)	7	y_2 (N)	16076		
y_{max} (N)	16625				
l (mm)	400	Panel Support Span			
h (mm)	275	Panel Height			
b (mm)	15	Core Thickness			
t_1 (mm)	0,75	Inner Skin Thickness			
t_2 (mm)	4,25	Outer Skin Thickness			
I (mm ⁴)	105990	Second moment of area			
E (GPa)	51,5	Skin modulus of elasticity			
σ_{UTS} (MPa)	157	UTS of skins			

Εικόνα 35. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead (3 Point Bending)



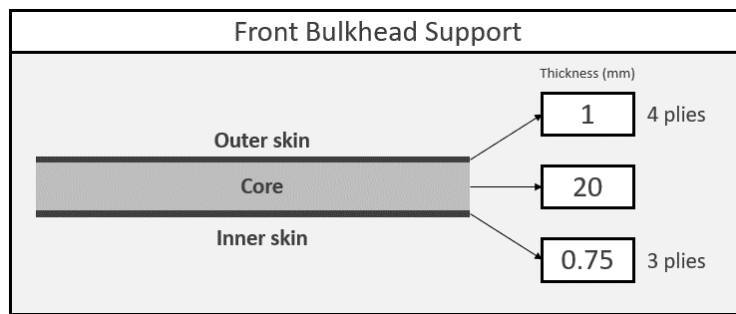
Διάγραμμα 7. Πειραματικά δεδομένα για το Front Bulkhead (Shear)

γ_{\max} (N)	26752
t (mm)	4,25
σ_{shear} (MPa)	80,1

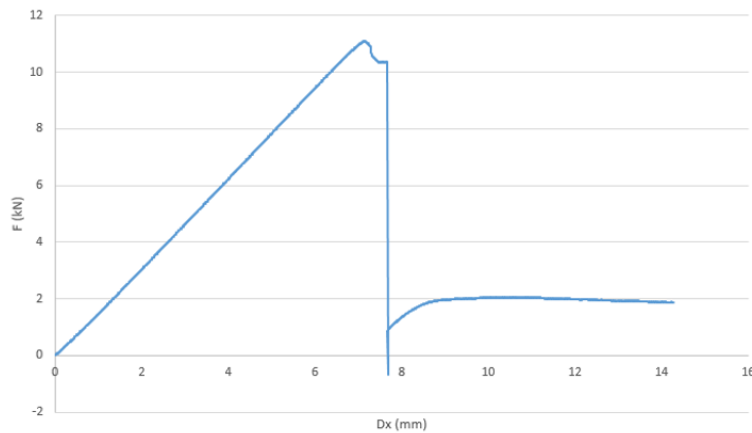
Εικόνα 36. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead (Shear)

4.2.3 Front Bulkhead Support

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα δεδομένα του τελικού πειράματος για το Front Bulkhead παρουσιάζονται παρακάτω:



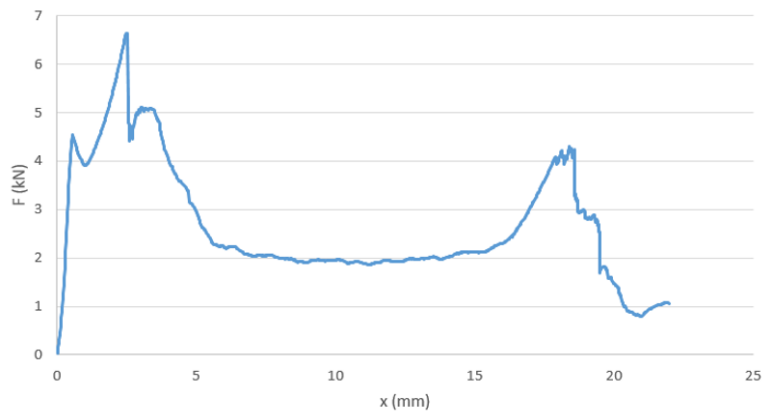
Εικόνα 37. Διαστρωμάτωση για το Front Bulkhead Support



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το Front Bulkhead Support (3 Point Bending)

x_1 (mm)	1,004	y_1 (N)	1482	Gradient (N/mm)	2421
x_2 (mm)	6,003	y_2 (N)	9434		
γ_{\max} (N)	11100				
I (mm ⁴)	400	Panel Support Span			
h (mm)	275	Panel Height			
b (mm)	20	Core Thickness			
t_1 (mm)	0,75	Inner Skin Thickness			
t_2 (mm)	1	Outer Skin Thickness			
I (mm ⁴)	52459	Second moment of area			
E (GPa)	61,5	Skin modulus of elasticity			
σ_{UTS} (MPa)	230	UTS of skins			

Εικόνα 38. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead Support (3 Point Bending)



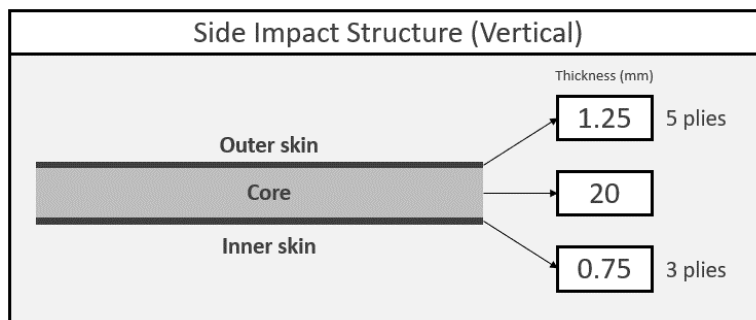
Διάγραμμα 9. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το Front Bulkhead Support (shear)

γ_{max} (N)	6628
t (mm)	1,00
σ_{shear} (Mpa)	84,4

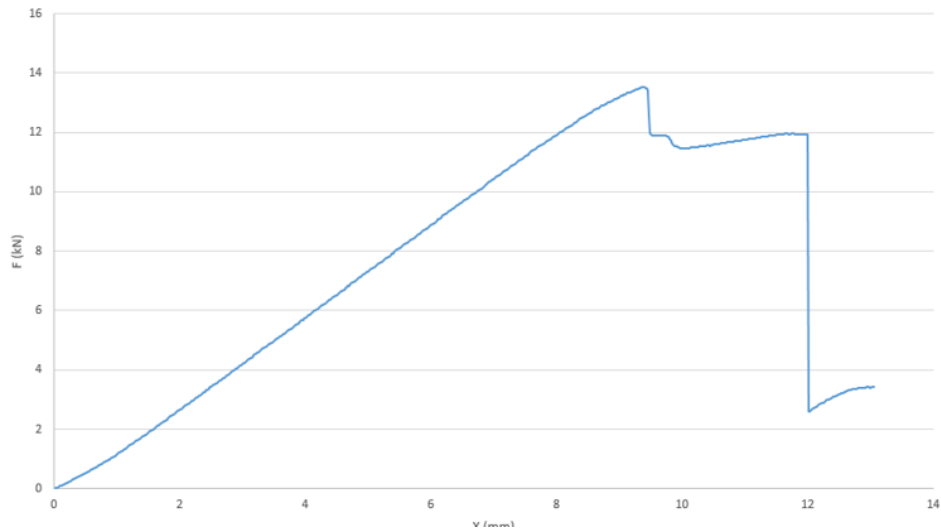
Εικόνα 39. Υπολογισμοί για το Front Bulkhead Support (Shear)

4.2.4 Side Impact Structure (Vertical)

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα δεδομένα του τελικού πειράματος για το κατακόρυφο Side Impact Structure παρουσιάζονται παρακάτω:



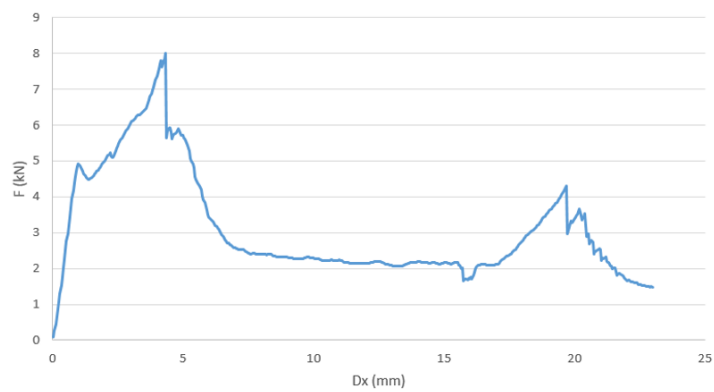
Εικόνα 40. Διαστρωμάτωση για το Vertical Side Impact Structure



Διάγραμμα 10. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το Vertical Side Impact Structure (3 Point Bending)

x_1 (mm)	2,013	y_1 (N)	2922	Gradient (N/mm)	2727
x_2 (mm)	6	y_2 (N)	9770		
y_{max} (N)	11100				
l (mm)	400	Panel Support Span			
h (mm)	275	Panel Height			
b (mm)	20	Core Thickness			
t_1 (mm)	0,75	Inner Skin Thickness			
t_2 (mm)	1	Outer Skin Thickness			
I (mm ⁴)	52459	Second moment of area			
E (GPa)	69,3	Skin modulus of elasticity			
σ_{UTS} (MPa)	230	UTS of skins			

Εικόνα 41. Υπολογισμοί για το Vertical Side Impact Structure (3 Point Bending)



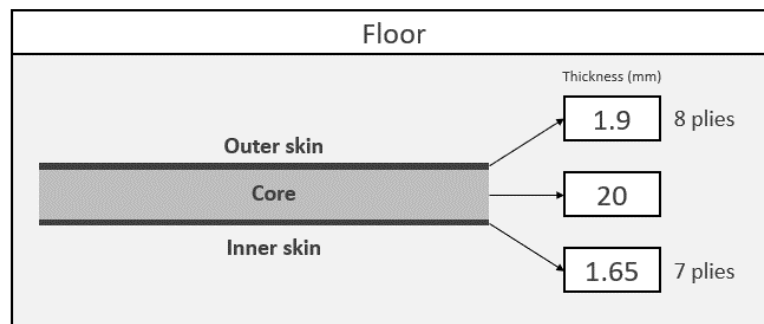
Διάγραμμα 11. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το Vertical Side Impact Structure (Shear)

γ_{\max} (N)	8003
t (mm)	1,25
σ_{shear} (Mpa)	81,5

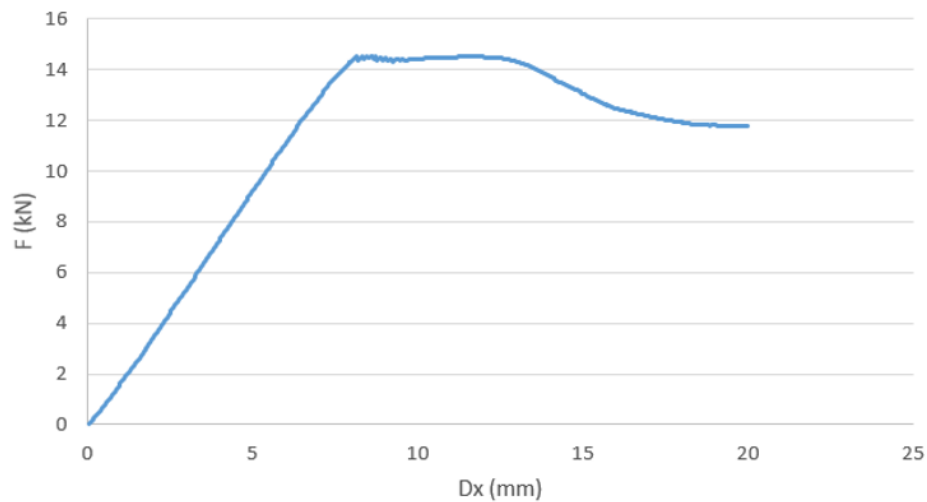
Εικόνα 42. Υπολογισμοί για το vertical Side Impact Structure (Shear)

4.2.5 Floor

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα δεδομένα του τελικού πειράματος για το πάτωμα (Floor) παρουσιάζονται παρακάτω:



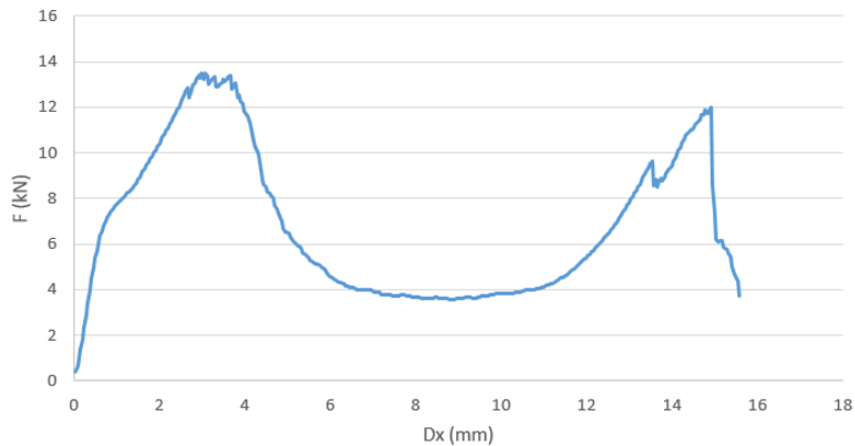
Εικόνα 43. Διαστρωμάτωση για το πάτωμα



Διάγραμμα 12. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το πάτωμα (3 Point Bending)

x_1 (mm)	0,998	y_1 (N)	1611	Gradient (N/mm)	3196
x_2 (mm)	5	y_2 (N)	9256		
γ_{max} (N)	11100				
l (mm)	400	Panel Support Span			
h (mm)	275	Panel Height			
b (mm)	20	Core Thickness			
t_1 (mm)	0,75	Inner Skin Thickness			
t_2 (mm)	1	Outer Skin Thickness			
I (mm ⁴)	52459	Second moment of area			
E (GPa)	81,2	Skin modulus of elasticity			
σ_{UTS} (MPa)	230	UTS of skins			

Εικόνα 44. Υπολογισμοί για το πάτωμα (3 Point Bending)



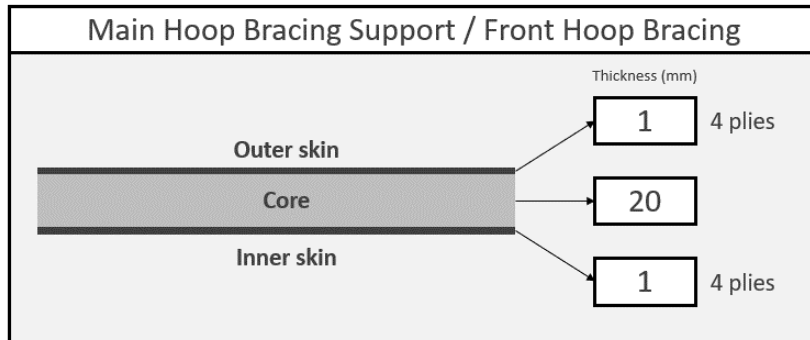
Διάγραμμα 13. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το πάτωμα (Shear)

γ_{max} (N)	13493
t (mm)	1,90
σ_{shear} (Mpa)	90,4

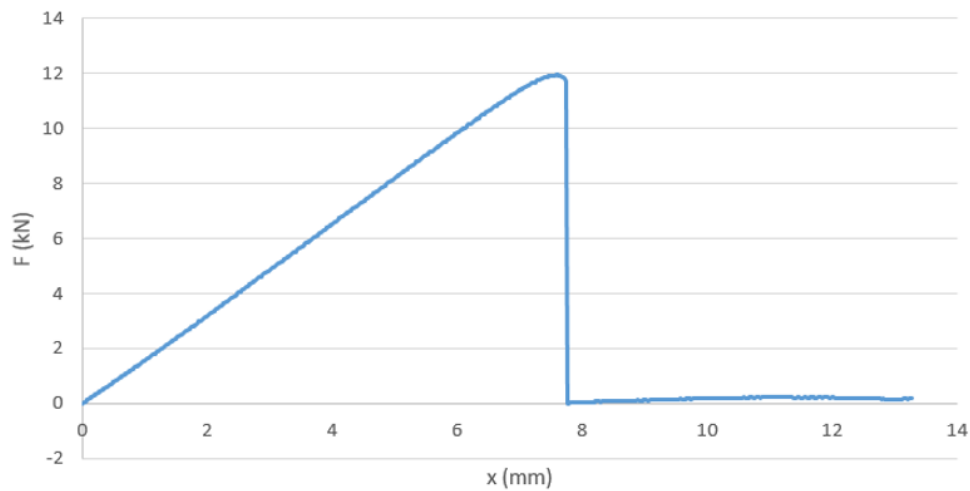
Εικόνα 45. Υπολογισμοί για το πάτωμα (Shear)

4.2.6 Main Hoop Bracing Support / Front Hoop Bracing

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και τα δεδομένα του τελικού πειράματος κάμψης για το πάτωμα (Floor) παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 46. Διαστρωμάτωση για το Main Hoop Bracing Support & Front Hoop Bracing



Διάγραμμα 14. Διάγραμμα δύναμης-παραμόρφωσης για το Main Hoop Bracing Support & Front Hoop Bracing (3 Point Bending)

x_1 (mm)	1,013	y_1 (N)	1583	Gradient (N/mm)	2575
x_2 (mm)	6	y_2 (N)	9842		
y_{max} (N)	11100				
l (mm)	400			Panel Support Span	
h (mm)	275			Panel Height	
b (mm)	20			Core Thickness	
t_1 (mm)	0,75			Inner Skin Thickness	
t_2 (mm)	1			Outer Skin Thickness	
I (mm ⁴)	52459			Second moment of area	
E (GPa)	65,5			Skin modulus of elasticity	
σ_{UTS} (MPa)	230			UTS of skins	

Εικόνα 47. Υπολογισμοί για το Main Hoop Bracing Support & Front Hoop Bracing (3 Point Bending)

5 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Είναι κοινά αποδεκτό πως στον τομέα της μηχανικής κατασκευών είναι συχνά απαραίτητη η επίλυση διαφορικών εξισώσεων προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός διάφορων παραμέτρων. Σε ορισμένες περιπτώσεις απλών κατασκευών τέτοιοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν με υπολογισμούς «στο χέρι» λύνοντας τις απαραίτητες εξισώσεις και λαμβάνοντας τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην περίπτωση όμως που το σύστημα που μελετάται παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα (παραδείγματος χάρη λόγω περίπλοκης γεωμετρίας) τότε ο αριθμός των απαιτούμενων υπολογισμών καθώς και ο βαθμός δυσκολίας της επίλυσης των απαιτούμενων εξισώσεων αυξάνονται σημαντικά. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού καθώς και οι απαραίτητοι πόροι που καλείται να διαθέσει ο μηχανικός παρουσιάζουν αύξηση και σε ορισμένες περιπτώσεις σύνθετων κατασκευών τείνουν ακόμα και στο άπειρο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως μια τέτοια διαδικασία ενδέχεται να έχει υψηλό κόστος ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να χαρακτηρίζεται και από αδυναμία επίλυσης. Το παραπάνω πρόβλημα αντιμετωπίστηκε και επιλύθηκε επιτυχώς με τη βοήθεια της τεχνολογίας και της ανάπτυξης μιας εξαιρετικά χρήσιμης αριθμητικής μεθόδου επίλυσης διαφορικών εξισώσεων μέσω υπολογιστών που ονομάζεται μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στον τομέα της Μηχανικής μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής λόγω της επίδρασης φορτίων, δονήσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας ή άλλων φυσικών φαινομένων. Ο τρόπος λειτουργίας της FEM βασίζεται στη διαίρεση ενός αντικειμένου σύνθετης συνήθως γεωμετρίας σε μικρότερα μέρη (πεπερασμένα στοιχεία), κάτι που αναφέρεται ως διακριτοποίηση. Η βασική λογική πίσω από αυτή τη μέθοδο είναι πως όσο μικρότερα και περισσότερα είναι αυτά τα στοιχεία, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ακρίβεια των υπολογισμών κάτι που φυσικά δεν αποτελεί πρόβλημα για τους σημερινούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές που μπορούν να παρέχουν μεγάλα ποσά υπολογιστικής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να δημιουργηθεί ένας βρόχος ανατροφοδότησης του σχεδιασμού του αντικειμένου όπου όλες οι νέες αλλαγές αξιολογούνται προκειμένου να επιτυγχάνεται η διαρκής βελτίωση του σχεδιασμού. Τέλος θα πρέπει φυσικά να αναφερθεί πως μια τέτοια πολύπλοκη υπολογιστική μέθοδος μπορεί πολύ συχνά να περιέχει αριθμητικά σφάλματα. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ο μηχανικός οφείλει να γνωρίζει μέχρι ποιο βαθμό είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα που λαμβάνει και πως θα πρέπει να αντιμετωπίσει πιθανά προβλήματα ή σφάλματα που θα εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της μεθόδου υπολογισμού πεπερασμένων στοιχείων.

5.1 Μέθοδος μοντελοποίησης και στοιχεία εισόδου

Το πρώτο βήμα που θα πρέπει να γίνει στην πορεία της ανάλυσης και βελτιστοποίησης του πλαισίου με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, είναι η σύγκλιση των δεδομένων μεταξύ φυσικών πειραμάτων και θεωρητικών τιμών. Θα πρέπει λοιπόν να δημιουργηθεί ένα μοντέλο, η επίλυση του οποίου να συγκλίνει με τα αποτελέσματα των φυσικών πειραμάτων.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό σχεδιασμού Solidworks (CAD) σε συνεργασία με το λογισμικό Ansys (CAE) και αποφασίστηκε η δημιουργία στατικού μοντέλου (static structural). Συνοπτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν τα εξής:

I. Σχεδιασμός γεωμετρίας

Σε αυτό το βήμα σχεδιάζεται η γεωμετρία του αντικειμένου που θα εξεταστεί με τη βοήθεια του λογισμικού Solidworks. Στην περίπτωση του σχεδιασμού των

πειραμάτων κάμψης ακολουθήθηκαν οι σχετικοί κανονισμοί που ορίζουν τις διαστάσεις των δοκιμίων προκειμένου να σχεδιαστούν τα αντίστοιχα πειραματικά δοκίμια κάμψης ενώ στην περίπτωση μελέτης του πλαισίου, η γεωμετρία λήφθηκε από την υποομάδα του Μηχανολογικού Σχεδιασμού.

II. Συμπλήρωση των ιδιοτήτων υλικού

Σε αυτό το βήμα εισάγονται στο μοντέλο τα δεδομένα που προέκυψαν από τα φυσικά πειράματα (μηχανικές ιδιότητες υλικού). Στην περίπτωση που δεν προέκυψαν δεδομένα που να επιτρέπουν τον καθορισμό όλων των μηχανικών ιδιοτήτων, οι εναπομείναντες ιδιότητες λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία ή τη βιβλιοθήκη του λογισμικού ANSYS.

III. Δημιουργία πλέγματος διακριτοποίησης (Mesh)

Η διακριτοποίηση της αρχικής γεωμετρίας γίνεται με τη βοήθεια στοιχείων (elements) τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόμβους (nodes) ενώ το σύνολο όλων αυτών των στοιχείων αποτελεί το συνολικό πλέγμα (mesh). Το τελικό πλέγμα αποτελεί σημαντικό παράγοντα προκειμένου να εξασφαλιστούν έγκυρα αποτελέσματα που αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες και μείωση των πιθανών σφαλμάτων. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί με την πύκνωση του πλέγματος σε όλη τη γεωμετρία ή τοπικά σε συγκεκριμένες περιοχές «υψηλού ρίσκου» όπως περιοχές που συνορεύουν με άλλο αντικείμενο, περιοχές ασυνέχειας, περιοχές πολύπλοκης γεωμετρίας και περιοχές κοντά στις συνοριακές συνθήκες.

IV. Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions)

Οι συνοριακές συνθήκες σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στατικού μοντέλου είναι συνήθως στηρίξεις και περιορισμοί που αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες. Για παράδειγμα μπορεί να υπάρχει πάκτωση (μη μετακίνηση) σε συγκεκριμένους άξονες, επαφή μεταξύ επιφανειών χωρίς δυνατότητα διαχωρισμού, ολίσθηση και τα λοιπά. Η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών που αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα είναι κομβικής σημασίας για την εξασφάλιση έγκυρων αποτελεσμάτων τα οποία είναι άξια εμπιστοσύνης.

V. Εφαρμογή φορτίων ή παραμορφώσεων

Μετά τον καθορισμό των οριακών συνθηκών θα πρέπει να εφαρμοστούν τα αντιπροσωπευτικά φορτία ή παραμορφώσεις που αντιστοιχούν στα πραγματικά δεδομένα. Στην περίπτωση των φορτίων αυτό μπορεί να είναι μια σημειακή δύναμη, μια κατανεμημένη δύναμη, μια πίεση σε μια ορισμένη επιφάνεια και τα λοιπά. Στην περίπτωση εφαρμογής παραμόρφωσης αυτή θα πρέπει να είναι εντός του πραγματικού εύρους παραμόρφωσης που υφίσταται το υπό μελέτη αντικείμενο.

VI. Ανάγνωση αποτελεσμάτων

Μετά την επίλυση του μοντέλου λαμβάνονται τα αποτελέσματα που αναπαριστούν τις κατανομές των παραμορφώσεων και συνεπακόλουθα των τάσεων. Τα αποτελέσματα συνήθως παρουσιάζονται διαγραμματικά με χρωματική απεικόνιση και συγκεκριμένα με κλιμάκωση των καθορισμένων χρωμάτων.

5.2 Μοντέλο δοκιμίου κάμψης

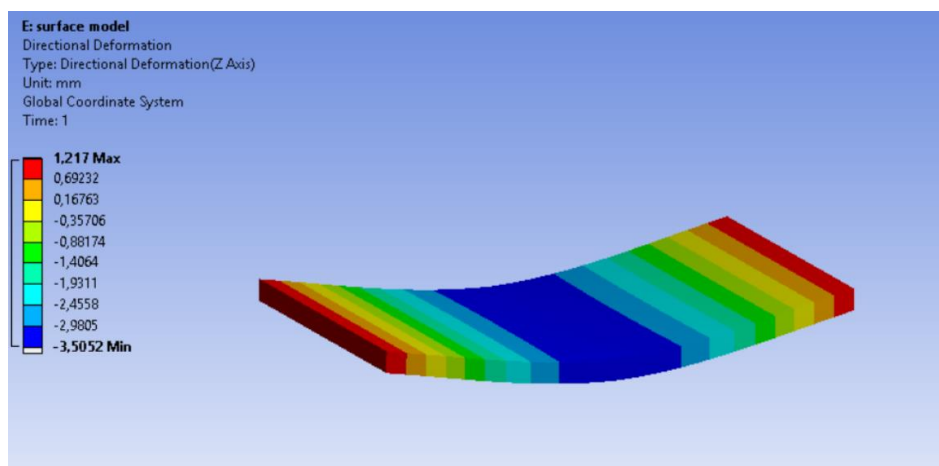
Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους διασφάλισης έγκυρων αποτελεσμάτων από την επίλυση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι η σύγκρισή του με τα αποτελέσματα ενός αντίστοιχου φυσικού πειράματος προκειμένου να βρεθεί η μεταξύ τους απόκλιση. Στην περίπτωση του μοντέλου κάμψης τριών σημείων τα δεδομένα του φυσικού πειράματος ορίστηκαν ως σημείο αναφοράς και πραγματοποιήθηκαν δυο διαφορετικές μελέτες πεπερασμένων στοιχείων: Μια μελέτη με τις ιδιότητες των υλικών που παρέχει ο κατασκευαστής και μια μελέτη με τις ιδιότητες που προέκυψαν από το φυσικό πείραμα. Με τον τρόπο αυτό βρέθηκε η απόκλιση που έχουν σε σχέση με το φυσικό πείραμα οι εφαρμοζόμενες μηχανικές ιδιότητες του υλικού προκειμένου να αποφασιστεί ποιες παράμετροι θα χρησιμοποιηθούν στις τελικές μελέτες με τη γεωμετρία του πλαισίου. Ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία πρακτικά γίνεται σύγκλιση με τις πραγματικές ιδιότητες της κατασκευής sandwich ενώ καθορίζεται και το εύρος του πιθανού σφάλματος ώστε να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του τελικού συντελεστή ασφαλείας του πλαισίου.

5.2.1 Δημιουργία αρχικού μοντέλου

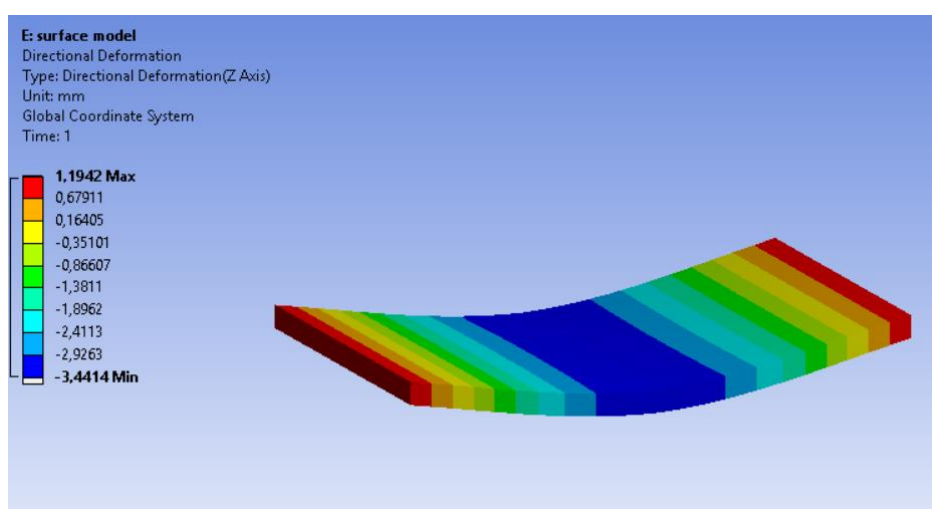
Η δημιουργία του αρχικού μοντέλου έγινε με τη χρήση του λογισμικού Ansys και πιο συγκεκριμένα με το ACP Module (Ansys Composite PrePost). Το ACP αποτελεί ένα ενσωματωμένο εργαλείο του λογισμικού ANSYS και εξειδικεύεται στη μοντελοποίηση σύνθετων υλικών ακολουθώντας τη μέθοδο της διαστρωμάτωσης.[14] Για κάθε επιμέρους στρώση μπορούν να οριστούν συγκεκριμένες παράμετροι (πάχος, μηχανικές ιδιότητες ανά άξονα, διεύθυνση τοποθέτησης, διαστρωματική διατμητική αντοχή) προκειμένου το μοντέλο που δημιουργείται να συγκλίνει προς τα πραγματικά δεδομένα. Στην περίπτωση του δοκιμίου κάμψης τριών σημείων δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα αντίστοιχα με τα φυσικά πειράματα των Main Hoop Bracing Support και Front Bulkhead Support που παρουσιάστηκαν ήδη. Η διαστρωμάτωση για το κάθε πείραμα παρουσιάζεται παρακάτω:

- **Δοκίμιο n1 (MHBS):** 4 (0,45,45,0) / 20 mm core / 4 (0,45,45,0)
- **Δοκίμιο n2 (FBS):** 4 (0,0,0,0) / 20 mm core / 3 (0,0,0)

Για κάθε ένα από τα δύο δοκίμια κάμψης πραγματοποιήθηκε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων με εφαρμογή κάθετης δύναμης 7000N ώστε να γίνει η σύγκριση με τα αποτελέσματα των φυσικών πειραμάτων για τα οποία η αντίδραση και παραμόρφωση είναι γνωστές. Τα αποτελέσματα της μελέτης των δύο δοκιμίων παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 48. Παραμόρφωση δοκιμίου n1 υπό την επίδραση δύναμης 7kN (θεωρητικές ιδιότητες)



Εικόνα 49. Παραμόρφωση δοκιμίου n1 υπό την επίδραση δύναμης 7kN (ιδιότητες όπως προέκυψαν από το φυσικό πείραμα)

5.2.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

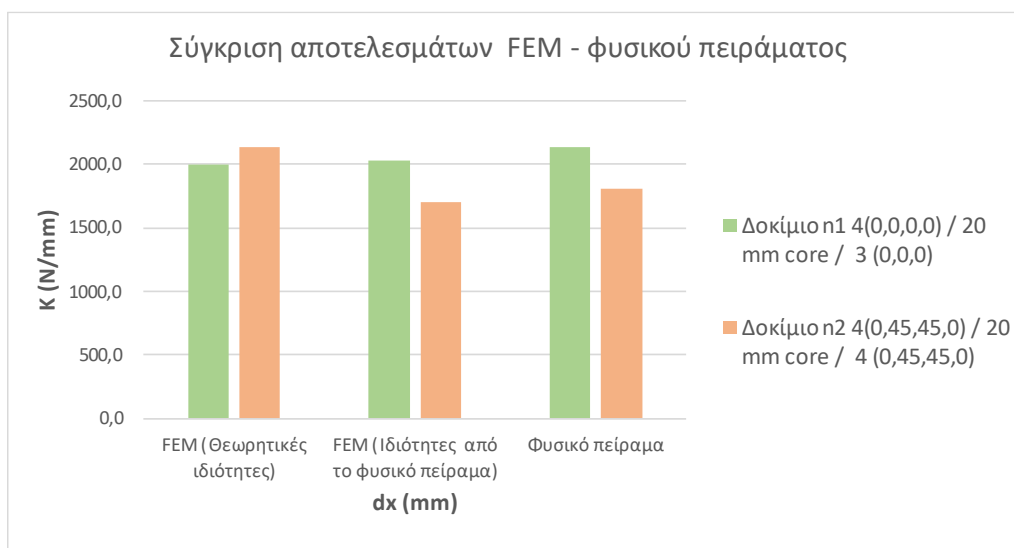
Τα αποτελέσματα της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων για το πείραμα κάμψης τριών σημείων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 και 7:

Πίνακας 5. Συγκριτικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης 3 σημείων για το Δοκίμιο n1

Δοκίμιο n1 4(0,0,0,0) / 20 mm core / 3 (0,0,0)				
	F (N)	dx (mm)	K (N/mm)	Απόκλιση
FEM (Θεωρητικές ιδιότητες)	7000	3,505	1997,1	-6,52%
FEM (Ιδιότητες από το φυσικό πείραμα)	7000	3,441	2034,3	-4,79%
Φυσικό πείραμα	7000	3,276	2136,8	0,00%

Πίνακας 6. Συγκριτικά αποτελέσματα πειράματος κάμψης 3 σημείων για το Δοκίμιο n2

Δοκίμιο n2 4(0,45,45,0) / 20 mm core / 4 (0,45,45,0)				
	F (N)	dx (mm)	K (N/mm)	Απόκλιση
FEM (Θεωρητικές ιδιότητες)	7000	3,275	2137,7	15,61%
FEM (Ιδιότητες από το φυσικό πείραμα)	7000	4,116	1700,7	-6,07%
Φυσικό πείραμα	7000	3,881	1803,9	0,00%



Διάγραμμα 15. Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων FEM-φυσικού πειράματος

Σύμφωνα με τα αριθμητικά δεδομένα που λήφθηκαν μέσω της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, προκύπτει πως η μελέτη πεπερασμένων στοιχείων στην οποία χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες των υλικών όπως προέκυψαν από τα φυσικά πειράματα (Πίνακας 7) παρουσιάζει βελτιωμένη ακρίβεια σε σχέση με τη μελέτη που χρησιμοποιήθηκαν οι θεωρητικές ιδιότητες και για τα δύο δοκίμια που μελετήθηκαν. Συνεπακόλουθα κρίνεται συνετό να χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες των υλικών που προέκυψαν από τα αντίστοιχα φυσικά πειράματα και όχι οι ιδιότητες που αναφέρει ο κατασκευαστής. Αυτό φυσικά δεν σημαίνει απαραίτητα πως ο κατασκευαστής έχει κάνει κάποιο λάθος καθώς οι παραπάνω αποκλίσεις ενδέχεται να δικαιολογούνται λόγω του συνδυασμού των υλικών που επιλέχθηκαν καθώς και της διαδικασίας κατασκευής που ακολουθήθηκε.

5.2.3 Έλεγχος μεγέθους στοιχείων2

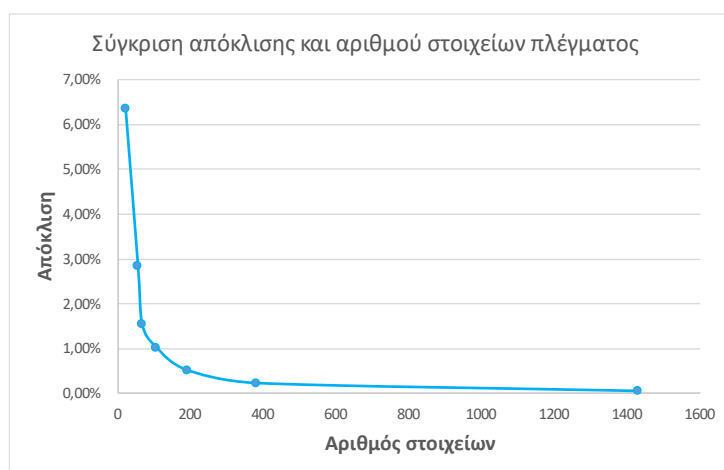
Ύστερα από την επαλήθευση των ιδιοτήτων των υλικών που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση των βέλτιστων παραμέτρων του πλέγματος διακριτοποίησης (mesh) που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του πλαισίου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η πυκνωση του πλέγματος διακριτοποίησης προσφέρει ακρίβεια στην επίλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων καθώς τα αριθμητικά δεδομένα που προκύπτουν από την επίλυση των αντιστοίχων διαφορικών εξισώσεων τείνουν να είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Ωστόσο η πυκνωση του πλέγματος, δηλαδή η αύξηση της ακρίβειας, δεν είναι ο αυτοσκοπός στην επίλυση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων καθώς κάτι τέτοιο επιφέρει αύξηση του αριθμού των απαραίτητων υπολογισμών. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το κόστος της αύξησης της ποιότητας του πλέγματος αντικατοπτρίζεται στην αύξηση του χρόνου επίλυσης καθώς και στην απαίτηση δαπάνης μεγαλύτερης υπολογιστικής ισχύος. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να υπολογιστεί το κρίσιμο σημείο της ποιότητας του πλέγματος κατά το

οποίο εξασφαλίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της επίλυσης του μοντέλου χωρίς όμως να υπάρχει άσκοπη δαπάνη πόρων. Η βασική παράμετρος που καθορίζει τον παραπάνω στόχο είναι το μέγεθος των στοιχείων (element size) το οποίο φυσικά καθορίζει και το συνολικό πλήθος στοιχείων του τελικού πλέγματος.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκε μια σειρά από μελέτες πεπερασμένων στοιχείων σε ένα δοκίμιο κάμψης, με τις ίδιες συνολικές παραμέτρους αλλά διαφορετικό μέγεθος στοιχείων. Έτσι προέκυψαν τα παρακάτω αριθμητικά δεδομένα του Πίνακα 8:

Πίνακας 7. Απόκλιση αποτελεσμάτων μελέτης πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων

Element Size (mm)	F (N)	dz (mm)	K (N/mm)	# of elements	Deviation %
100	7000	3,086	2268,2	21	6,35%
70	7000	3,191	2193,4	55	2,84%
50	7000	3,232	2166,0	66	1,55%
40	7000	3,249	2154,7	105	1,03%
30	7000	3,265	2143,8	190	0,51%
20	7000	3,275	2137,7	378	0,23%
10	7000	3,280	2133,9	1428	0,05%
5	7000	3,282	2132,8	5555	0,00%



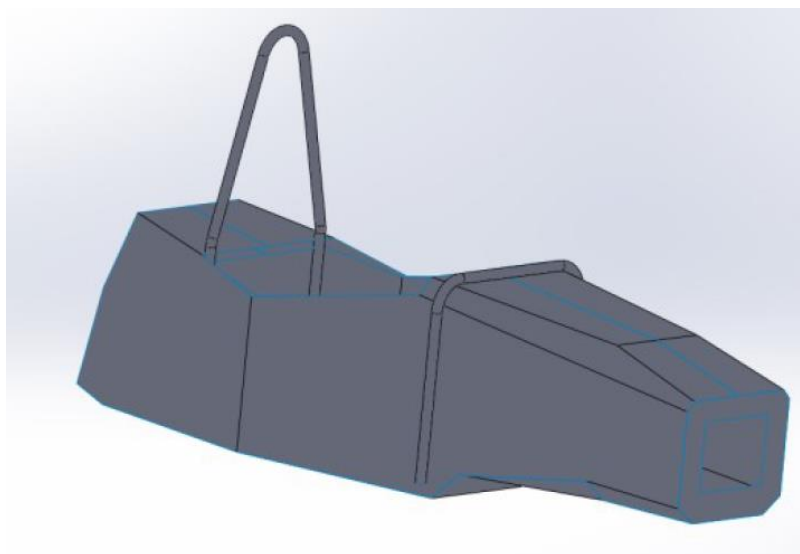
Διάγραμμα 16. Σύγκριση απόκλισης υπολογισμών και αριθμού στοιχείων πλέγματος

Όπως παρατηρείται και από τα παραπάνω δεδομένα, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για μεγέθη πλέγματος κάτω από τα 20 χιλιοστά έχουν απόκλιση κάτω του 0.5% και συνεπακόλουθα κρίνεται συνετό να χρησιμοποιηθούν μεγέθη πλέγματος κάτω από αυτή την τιμή.

5.3 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας

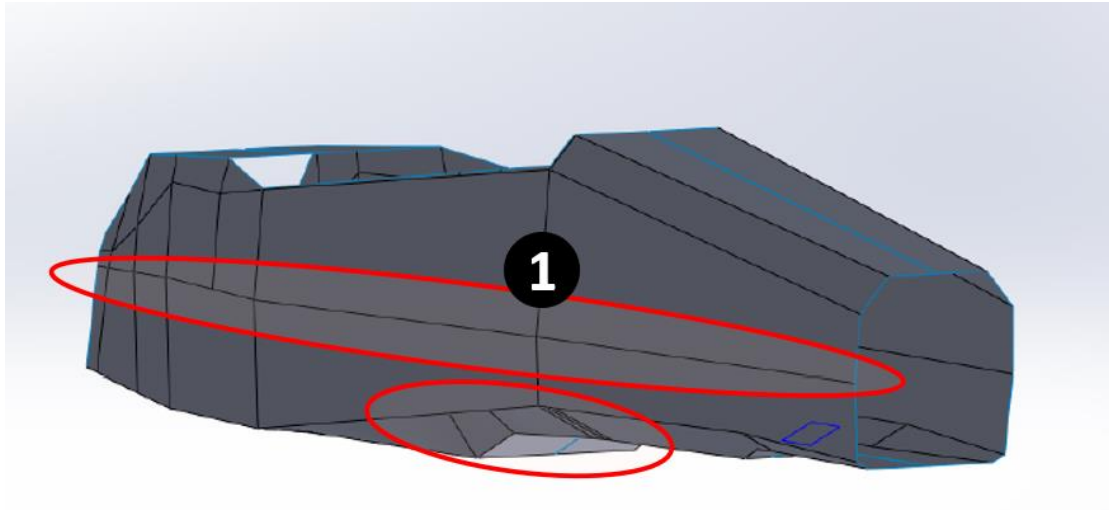
Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η στρεπτική δυσκαμψία ενός πλαισίου είναι ένας παράγοντας που χαρακτηρίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του οχήματος. Η αύξηση αυτής της παραμέτρου μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη ο παράγοντας του βάρους. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν αρκεί απλώς να χρησιμοποιήσουμε «παραπάνω υλικό» όπως για παράδειγμα περισσότερες στρώσεις ενίσχυσης από ανθρακόνημα αλλά θα πρέπει να βρεθούν έξυπνοι τρόποι αύξησης της δυσκαμψίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος αύξησης του βάρους. Ένας από αυτούς τους

τρόπους είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πλαισίου με τρόπο τέτοιο ώστε να μην χρειαστεί απαραίτητα να γίνει αύξηση του βάρους. Από τον τομέα της μηχανικής είναι γνωστό πως για μια δεδομένη επιφάνεια διατομής, η ιδανική γεωμετρία για την αντίσταση στη στρέψη είναι η κυλινδρική. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως εάν κάποιος μηχανικός είχε στη διάθεσή του συγκεκριμένη ποσότητα υλικού, τότε η επιλογή μιας κλειστής και κυλινδρικής διατομής θα επέφερε αδιαμφισβήτητα την υψηλότερη στρεπτική δυσκαμψία για την επιλεγμένη κατασκευή. Για την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πλαισίου λήφθηκε ως σημείο αναφοράς το προηγούμενο πλαίσιο που σχεδίασε και κατασκεύασε η ομάδα της Prom Racing καθώς διατηρήθηκε σε μεγάλο βαθμό η ίδια γεωμετρία ανάρτησης καθώς και η βασική γεωμετρία του πλαισίου. Η γεωμετρία του προηγούμενου πλαισίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 50:



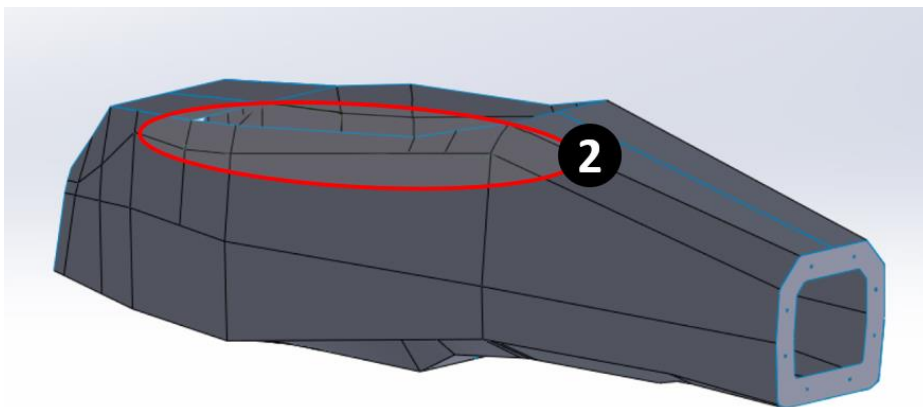
Εικόνα 50. Γεωμετρία προηγούμενου πλαισίου της ομάδας Prom Racing (P18)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η γεωμετρία αυτού του πλαισίου έφερε μεγάλες κάθετες επιφάνειες λόγω της κατασκευαστικής μεθόδου που ακολουθήθηκε (κατασκευή ενιαίων flat panel με εξωτερικό κέλυφος αλουμινίου και εσωτερικό κέλυφος από ανθρακονήματα που ενώθηκαν μεταξύ τους με φλάτζες αλουμινίου) έχοντας μια γεωμετρία τετραγωνικής διατομής. Σε αντίθεση με το προηγούμενο πλαίσιο που έφερε γεωμετρικούς περιορισμούς λόγω της κατασκευαστικής μεθόδου που ακολουθήθηκε, το υπό μελέτη πλαίσιο μπορεί να φέρει πιο σύνθετο σχήμα και να έχει περισσότερες σχεδιαστικές ελευθερίες καθώς η κατασκευή του γίνεται με καλούπι. Η πρώτη και βασική διαφορά που πραγματοποιήθηκε ήταν να μεταβληθεί η πλαϊνή γεωμετρία των Side Impact Structure και να δημιουργηθεί μια μικρή γωνία (Δείκτης 1) που δημιουργεί ένα συνολικά πιο κυλινδρικό σχήμα. Η δεύτερη διαφορά ήταν η αφαίρεση υλικού από τη γωνία του πατώματος στο ύψος του front hoop προκειμένου να εξοικονομηθεί βάρος και να γίνει η σύγκλιση προς ένα πιο κυλινδρικό σχήμα.



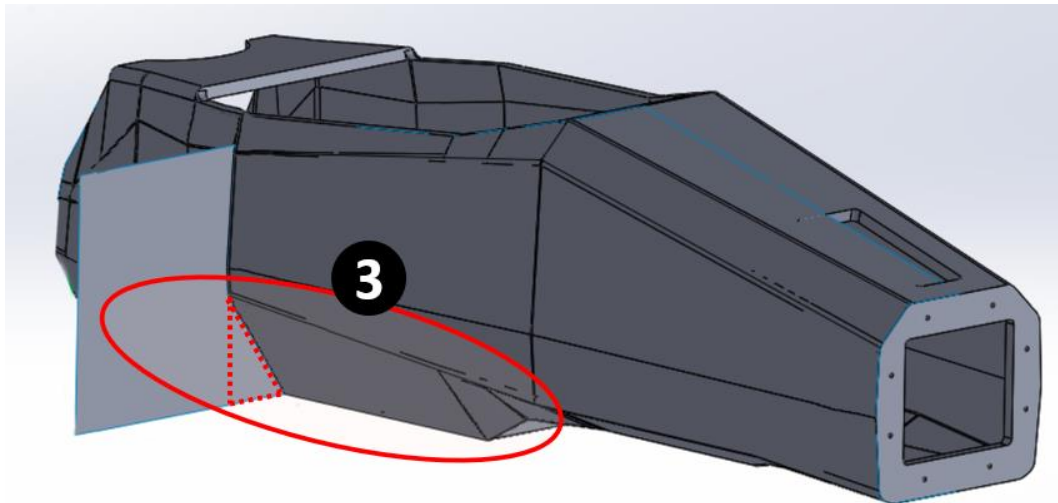
Εικόνα 51. Αρχικές γεωμετρικές βελτιστοποιήσεις στο πλαίσιο

Η επόμενη αναβάθμιση ήταν η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας περιμετρικά του ανοίγματος του θαλάμου του οδηγού. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε να γίνει μια σύγκλιση προς τα μέσα δημιουργώντας ένα πιο κυλινδρικό σχήμα όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 52.



Εικόνα 52. Γεωμετρική βελτιστοποίηση του σημείου περιμετρικά του ανοίγματος για το θάλαμο του οδηγού

Η τελευταία βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε στη γεωμετρία του πλαισίου εντοπίζεται στο Side Impact Structure και πιο συγκεκριμένα στο ύψος του main hoop (Εικόνα 55). Όπως φαίνεται και με τη βοήθεια του Δείκτη 4, αποφασίστηκε να αφαιρεθεί μια τριγωνική διατομή από την κάθετη επιφάνεια του Side Impact Structure.



Εικόνα 53. Γεωμετρική βελτιστοποίηση της κάθετης περιοχή του Side Impact Structure

Τα πλεονεκτήματα των παραπάνω βελτιστοποιήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 8. Σύγκριση μεταξύ των γεωμετρικών βελτιώσεων του πλαισίου

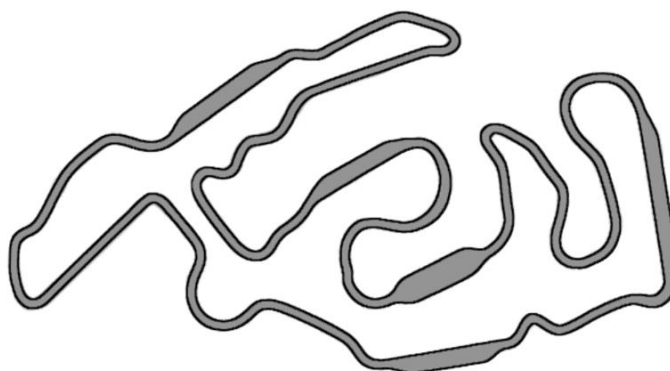
	Εκτιμώμενο βάρος (kg)	Διαθέσιμη αεροδυναμική επιφάνεια (mm ²)	Στρεπτική Δυσκαμψία (Nm/deg)
P18	22,8	170094	2500
P19.1	18,1	159882	4200
P19.2	18,4	159882	4750
P19.3	18	171285	4800
	Βαθμολόγηση συγκριτικά με το P18		
	100,0%	100,0%	100,0%
	79,6%	70,0%	168,0%
	81,0%	70,0%	190,0%
	79,1%	103,5%	192,0%

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, η εφαρμογή και των τριών βελτιώσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω επέφεραν σημαντικά πλεονεκτήματα στους τρεις βασικούς παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη για το υπό μελέτη πλαίσιο. Όσον αφορά το βάρος, επιτεύχθηκε περίπου 20% μείωση σε σχέση με τη γεωμετρία του προηγούμενου πλαισίου, η αεροδυναμική επιφάνεια αυξήθηκε κατά 3.5% ενώ η σημαντικότερη βελτίωση εντοπίζεται στη στρεπτική δυσκαμψία όπου παρουσιάζεται αύξηση 92% και από τα 2500 Nm ανά μοίρα (προηγούμενο πλαίσιο) τώρα επιτυγχάνεται στρεπτική δυσκαμψία 4800 Nm ανά μοίρα.

5.4 Στρεπτική δυσκαμψία

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια η υψηλή στρεπτική δυσκαμψία που μπορεί να φέρει ένα πλαίσιο αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός αποδοτικού αγωνιστικού οχήματος και μπορεί να γίνει πολύ εύκολα αντιληπτό από έναν έμπειρο οδηγό λόγω της συμπεριφοράς του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα όταν το όχημα εισέρχεται σε μια

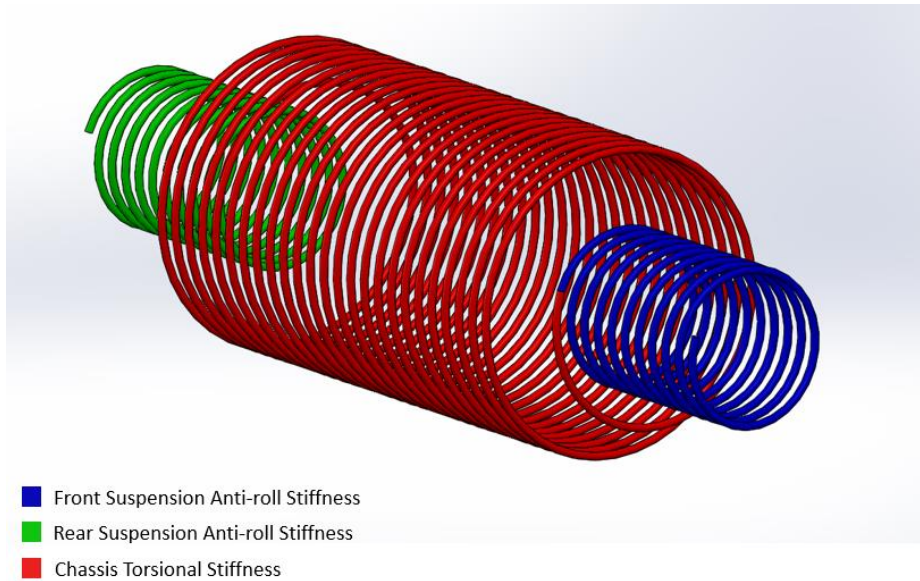
στροφή τότε λόγω της αλλαγής της γωνίας των εμπρός τροχών αναπτύσσονται πλευρικές δυνάμεις άρα και πλευρική επιτάχυνση του οχήματος. Αυτές οι δυνάμεις μεταφέρονται στη συνέχεια μέσω του πλαισίου στο πίσω μέρος του και συγκεκριμένα στην πίσω ανάρτηση. Στην περίπτωση ενός «μαλακού» πλαισίου, δηλαδή ενός πλαισίου με χαμηλή στρεπτική δυσκαμψία, κάτι τέτοιο θα αργήσει να συμβεί με αποτέλεσμα το όχημα να αργεί να στρίβει ικανοποιητικά σε στις στροφές. Κάτι τέτοιο επηρεάζει άμεσα τη δυναμική μεταφορά βάρους μεταξύ των τροχών τείνοντας να κάνει το όχημα υποστροφικό (άρα αργότερο σε συνθήκες αγώνα), κάτι που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αγωνιστική απόδοση ενός οχήματος του διαγωνισμού του Formula Student. Μια ενδεικτική εικόνα για την παραπάνω διαπίστωση αποτελεί η χάραξη της πίστας του αντίστοιχου διαγωνισμού της Γερμανίας (Εικόνα 54).



Εικόνα 54. Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής πίστας του διαγωνισμού Formula Student (Πίστα FSG)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, η γεωμετρία της χάραξης φέρει οξείες στροφές και συνθήκες απότομης μεταβολής της κατεύθυνσης του οχήματος ενώ το ελάχιστο πλάτος του δρόμου ορίζεται στα 3 μέτρα. Αυτό πρακτικά απαιτεί την ύπαρξη στιβαρών πλαισίων καθώς οχήματα που δεν πληρούν αυτό το κριτήριο και παρουσιάζουν υποστροφικές τάσεις και ανεπαρκή συμπεριφορά οχήματος, θα χαρακτηρίζονται από μειωμένη απόδοση σημειώνοντας χαμηλότερους χρόνους σε σχέση με τον ανταγωνισμό.

Φυσικά όταν μελετάται η συνολική δυναμική συμπεριφορά ενός οχήματος θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη και η στιβαρότητα της ανάρτησης (Anti-Roll) για κάθε έναν από τους δύο άξονες. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η προσέγγιση θα πρέπει να γίνεται ως ένα σύστημα τριών ελατηρίων σε σειρά όπου κάθε ελατήριο (εμπρός ανάρτηση, πίσω ανάρτηση, πλαίσιο) αποτελεί μια παράμετρο που επηρεάζει τη συνολική ακαμψία του συστήματος (Εικόνα 55).

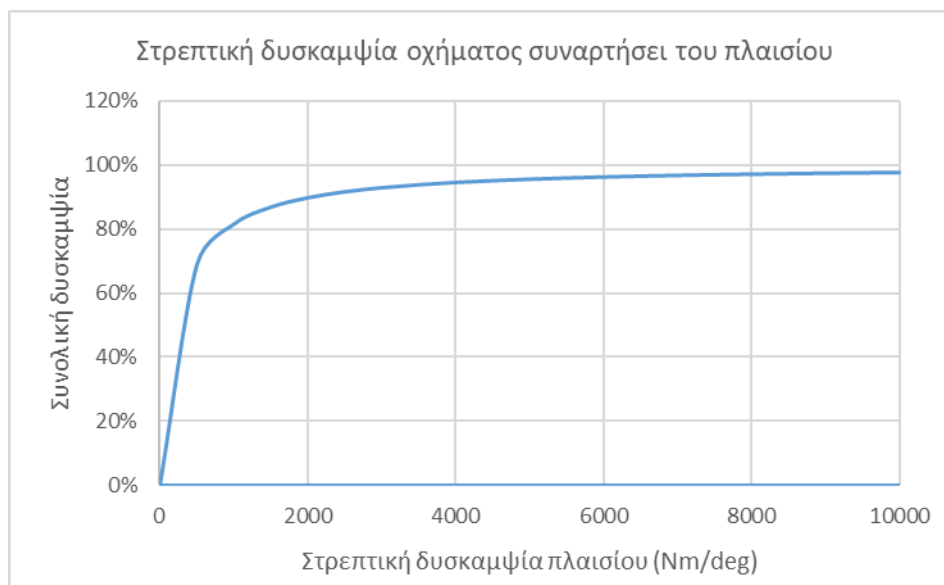


Εικόνα 55. Προσέγγιση οχήματος ως ένα σύστημα τριών ελατηρίων σε σειρά

Η συνολική στρεπτική δυσκαμψία του οχήματος προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{1}{K_{vehicle}} = \frac{1}{K_{front\ susp}} + \frac{1}{K_{chassis}} + \frac{1}{K_{rear\ susp}} \quad (5.6)$$

Με δεδομένη την τιμή δυσκαμψίας της ανάρτησης που επιλέχθηκε για το αγωνιστικό όχημα P19 της ομάδας PROM Racing (450 Nm/deg), η συνολική στρεπτική δυσκαμψία του οχήματος για διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας του πλαισίου παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 17. Συνολική στρεπτική δυσκαμψία του οχήματος συναρτήσει της δυσκαμψίας του πλαισίου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει πως η συνολική στρεπτική δυσκαμψία του οχήματος μπορεί να λάβει τιμές μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο που επηρεάζεται από τις τιμές της ανάρτησης και του πλαισίου. Κατά τη μελέτη που εκπονήθηκε για το πλαίσιο, η τιμή της δυσκαμψίας της ανάρτησης είχε οριστεί κατά τον πρωταρχικό σχεδιασμό του οχήματος με αποτέλεσμα η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει το υπό μελέτη σύστημα να είναι αυτή του

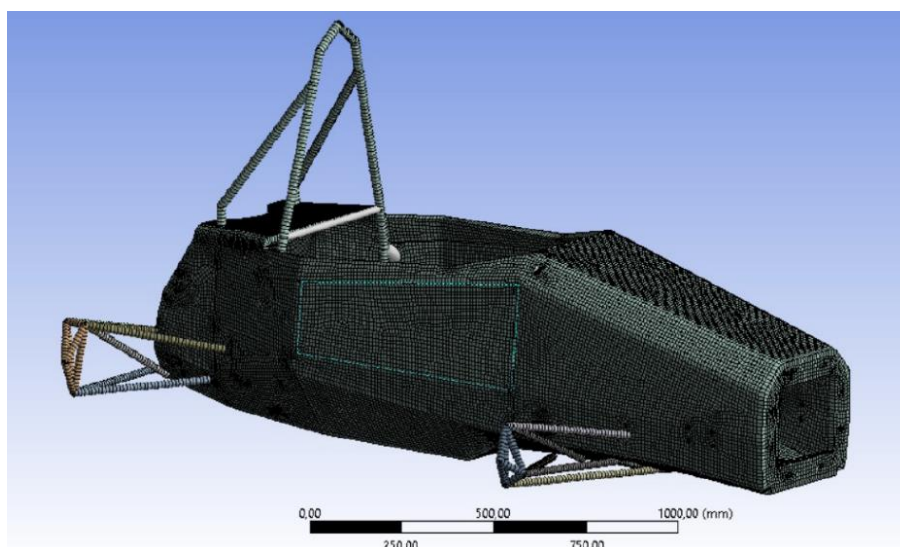
πλαίσιου. Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα, η συνολική στρεπτική δυσκαμψία του συστήματος φτάνει το 90%, 93% και 95% για τιμές πλαισίου στα 2000 Nm/deg, 3000 Nm/deg και 4000 Nm/deg αντίστοιχα, εάν θεωρήσουμε ως 100% την περίπτωση όπου η στρεπτική δυσκαμψία του πλαισίου απειρίζεται. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως η στρεπτική δυσκαμψία του πλαισίου θα πρέπει να επιλεχθεί με γνώμονα το παραπάνω διάγραμμα καθώς η δαπάνη πόρων συναρτήσει του κέρδους σε συνολική δυσκαμψία του οχήματος κρίνεται ασύμφορη για τιμές πάνω από το όριο των 5000 Nm/deg.

5.5 Μοντέλο ACP

Ένα από τα αρχικά στάδια της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων είναι η δημιουργία του πλέγματος διακριτοποίησης (mesh). Για την μελέτη του πλαισίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS και συγκεκριμένα το ACP Module όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα με την επιλογή μεγέθους στοιχείων έως την τιμή των 20 χιλιοστών που κρίθηκε ασφαλές για τη διεξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι η διερεύνηση της ακαμψίας του πλαισίου κατά της επιλογή διαφορετικών τύπων διαστρωμάτωσης (πλήθος και γωνία στρώσεων), σύμφωνα πάντα με τα ελάχιστα όρια που ορίζει το SES. Επιπλέον θα διερευνηθεί εάν η αντοχή του πλαισίου είναι επαρκής στις μέγιστες συνθήκες καταπόνησης σύμφωνα με τις μέγιστες δυνάμεις που παρείχε η ομάδα της δυναμικής της ανάρτησης.

Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος είναι τα εξής:

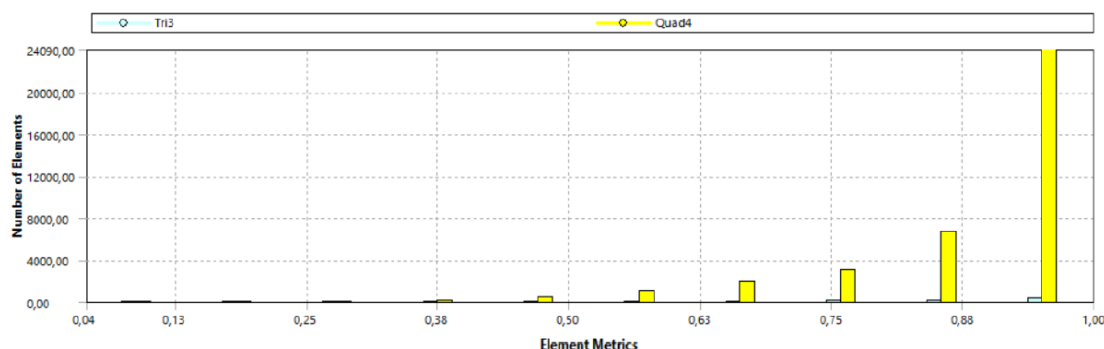
- Monocoque: Στοιχεία επιφάνειας δύο διαστάσεων (2d surface) (ACP Module)
- Hoops: Στοιχεία μιας διάστασης (1d beam)
- Μέλη ανάρτησης: Στοιχεία μιας διάστασης (1d beam)
- Συναρμογές:
 - Rod ends: Συνδέσεις σφαιρικών εδράνων (spherical connections)
 - Brackets: Ακαμπτες συνδέσεις (rigid connections)



Εικόνα 56. Πλέγμα διακριτοποίησης (mesh) πλαισίου και ανάρτησης

Το ελάχιστο μέγεθος στοιχείων ορίστηκε στα 5 χιλιοστά και το μέγιστο μέγεθος στοιχείων ορίστηκε στα 10 χιλιοστά. Η επιλογή της βελτιστοποίησης της ακρίβειας του πλέγματος ορίστηκε με ακρίβεια στην καμπυλότητα της γεωμετρίας (proximity on curvature). Οι

μοναδικές εκτιμώμενες αποκλίσεις θα παρατηρηθούν περιμετρικά των ενθέτων (inserts) ως συγκεντρώσεις τάσεων που ενδεχομένως να υπερβούν την αντοχή του υλικού. Ωστόσο σε αυτά τα σημεία οι υπολογισμοί θα γίνουν στο χέρι οπότε πιθανές περιπτώσεις υπέρβασης του ορίου αντοχής του υλικού θα παραβλεφτούν.



Εικόνα 57. Ποσοτικά χαρακτηριστικά πλέγματος

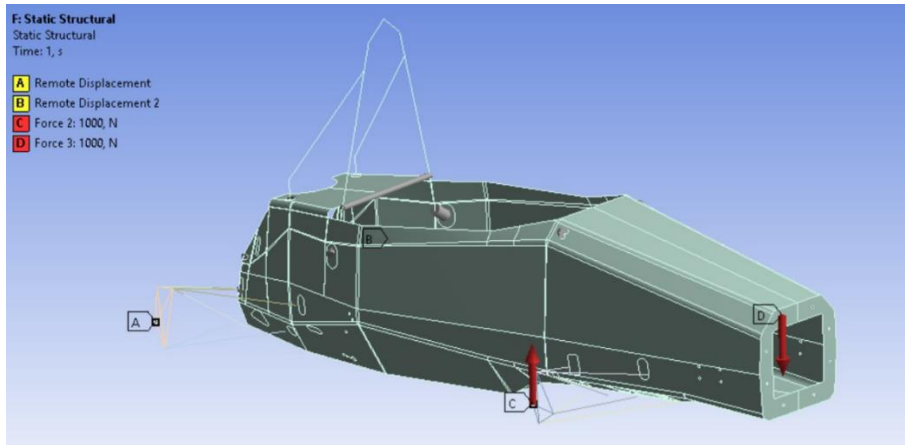
5.6 Αξιολόγηση ακαμψίας

Η αξιολόγηση της ακαμψίας ενός αγωνιστικού πλαισίου μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους ωστόσο θα πρέπει να εξετάζεται πάντα με γνώμονα τις μέγιστες καταπονήσεις που δέχεται το πλαίσιο στις εκάστοτε συνθήκες αγώνα. Στην κατηγορία του Formula Student η απόδοση ενός αγωνιστικού οχήματος εξετάζεται κατά τα δυναμικά αγωνίσματα και οι περισσότεροι πόντοι λαμβάνονται μέσω αγωνισμάτων που εξετάζουν τη συνολική δυναμική του οχήματος. Για το λόγο αυτό κρίνεται συνετό να μελετηθούν τρεις βασικές περιπτώσεις καταπόνησης που σχετίζονται με την διαμήκη και πλευρική επιτάχυνση του οχήματος.

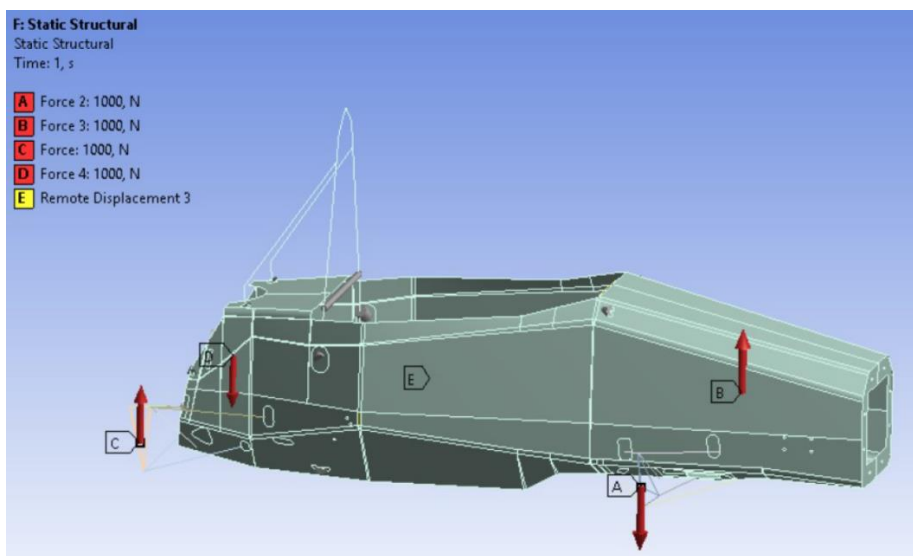
5.6.1 Στρέψη

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες η στρέψη αποτελεί τη σημαντικότερη περίπτωση καταπόνησης ενός αγωνιστικού οχήματος και θα πρέπει να μελετηθεί ως ένα σύστημα τριών παραμέτρων (πλαίσιο και αναρτήσεις). Στην εξέταση της περίπτωσης της στρέψης εφαρμόζεται μια ροπή στο διαμήκη άξονα x και μετράται η παραμόρφωση στον άξονα z και συγκεκριμένα στα κέντρα των τροχών ώστε να υπολογιστεί η στρέψη σε μοίρες. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η στρέψη εφαρμόζονται δύο αντίθετες δυνάμεις στα κέντρα των εμπρός τροχών ενώ τα κέντρα των δύο πίσω τροχών θεωρούνται σταθερά (οριακή συνθήκη) (Εικόνα 58). Επιπλέον εξετάζεται και η περίπτωση όπου ασκούνται όμοιες δυνάμεις στους αντιδιαμετρικούς τροχούς κατά τον άξονα z και ως οριακή συνθήκη ορίζεται το σταθερό σημείο του κέντρου βάρους της αναρτώμενης μάζας του οχήματος (Εικόνα 59).

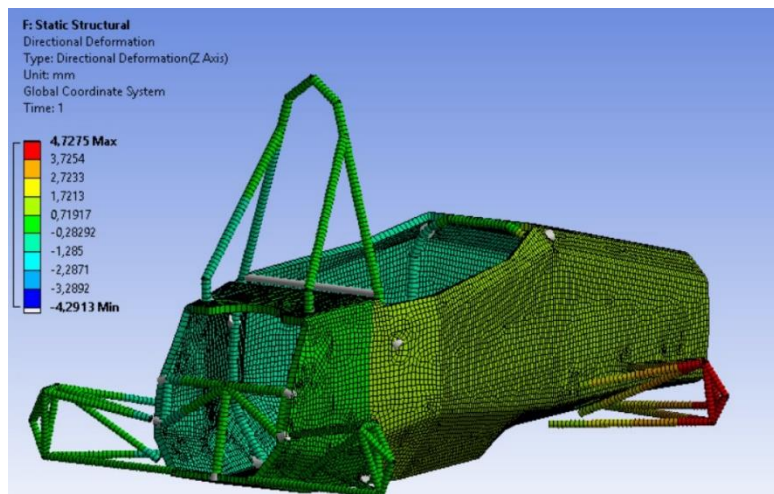
Οι περιπτώσεις δυνάμεων που θα πρέπει να μελετηθούν σχετίζονται με τις ακραίες συνθήκες που θα βρεθεί το όχημα κατά την αγωνιστική λειτουργία του και κατά τις οποίες θα εμφανιστούν τα μέγιστα πιθανά φορτία.



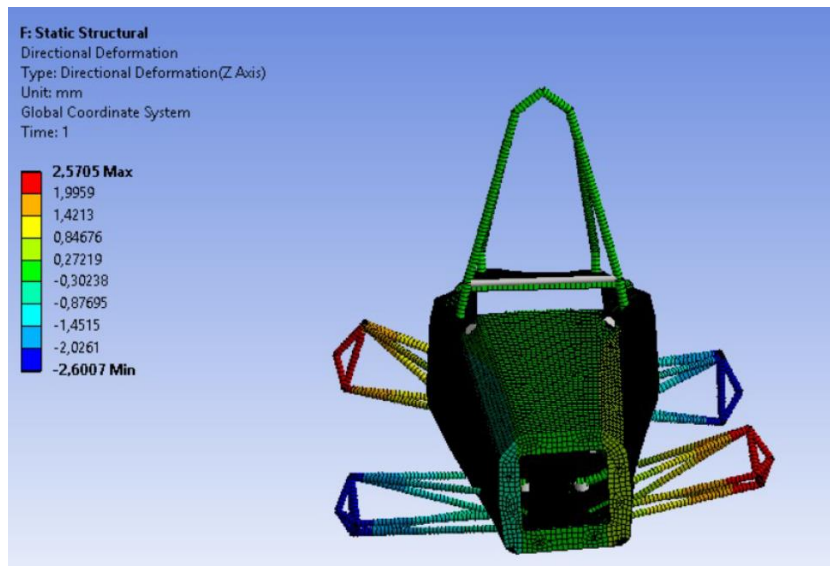
Εικόνα 58. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της στρέψης του εμπρός άξονα



Εικόνα 59. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της στρέψης και των δύο αξόνων



Εικόνα 60. Απεικόνιση αποτελέσματος στρέψης λόγω άσκησης ροπής στον μπροστά άξονα



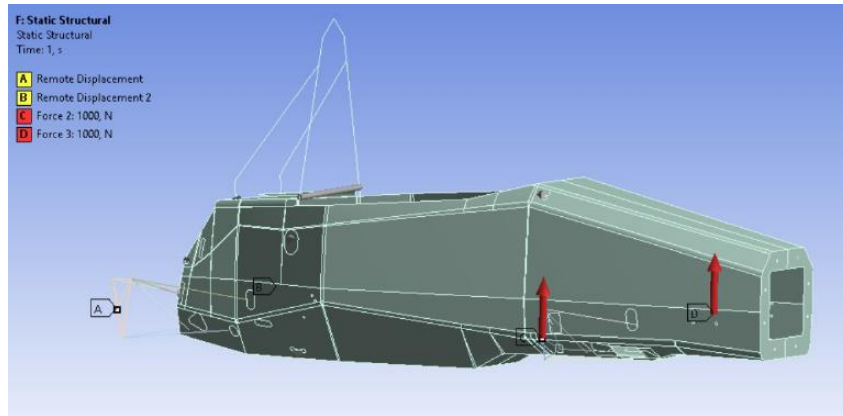
Εικόνα 61. Απεικόνιση αποτελέσματος στρέψης λόγω άσκησης αντίθετης ροπής στους δύο άξονες

Της φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, στην περίπτωση της στρέψης όπου οι πίσω τροχοί θεωρούνται πακτωμένοι παρατηρείται μέγιστη παραμόρφωση στα μέλη της ανάρτησης ενώ η μέγιστη παραμόρφωση στο πλαίσιο εμφανίζεται στο μπροστινό μέρος και συγκεκριμένα στην περιοχή του Bulkhead.

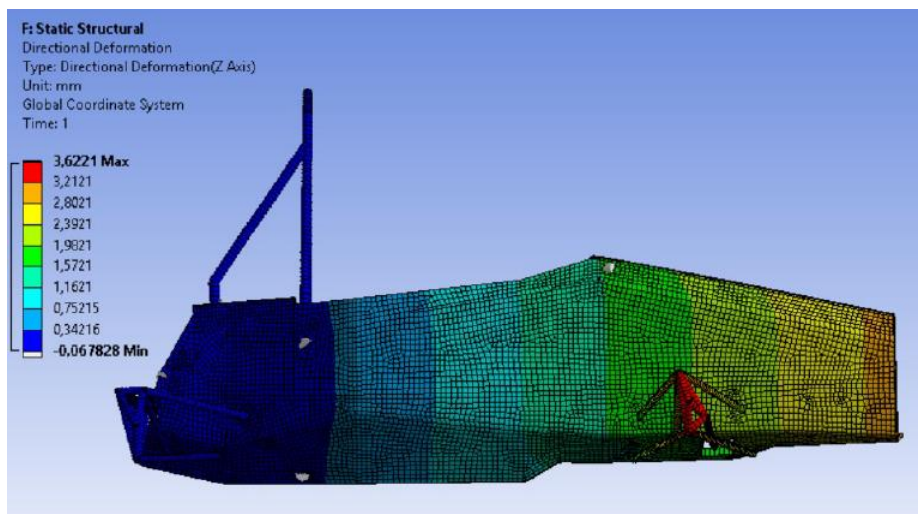
5.6.2 Κάμψη

Η περίπτωση της κάμψης είναι η δεύτερη σημαντικότερη παράμετρος που θα πρέπει να μελετηθεί. Σε ένα πλαίσιο οχήματος κάμψη παρατηρείται όταν σημειώνεται επιτάχυνση στο διαμήκη άξονα κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση το εξεταζόμενο σύστημα θα πρέπει να μελετηθεί ξανά ως ένα σύστημα τριών ελατηρίων όπου τα δύο ελατήρια των αξόνων είναι παράλληλα και το ελατήριο που αναπαριστά το πλαίσιο τοποθετείται σε σειρά. Στην περίπτωση της κάμψης εξετάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις:

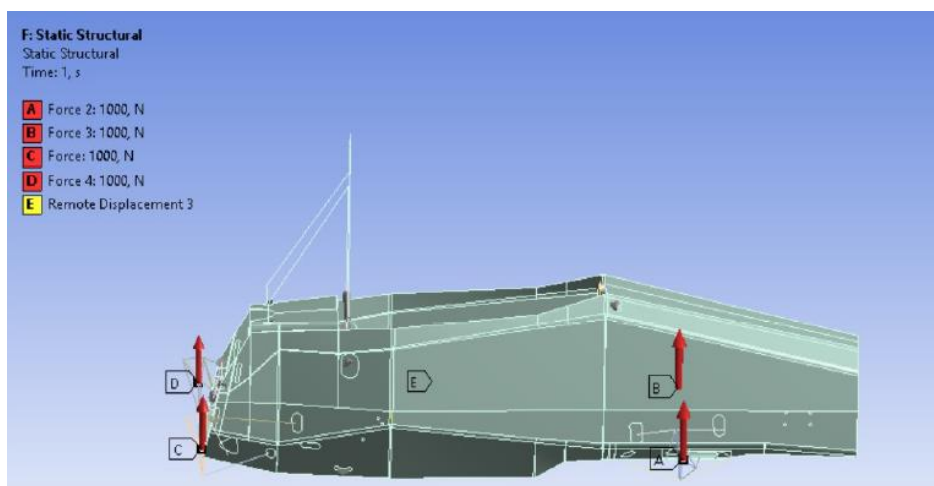
Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η περίπτωση κάμψης του εμπρός άξονα εφαρμόζοντας δυνάμεις κατά τον άξονα z στα κέντρα των τροχών και θεωρώντας τα κέντρα των δύο πίσω τροχών σταθερά (οριακή συνθήκη). Στη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η εφαρμογή δυνάμεων στα κέντρα όλων των τροχών κατά τον άξονα z ορίζοντας ως οριακή συνθήκη το σταθερό σημείο του κέντρου βάρους της αναρτώμενης μάζας του οχήματος.



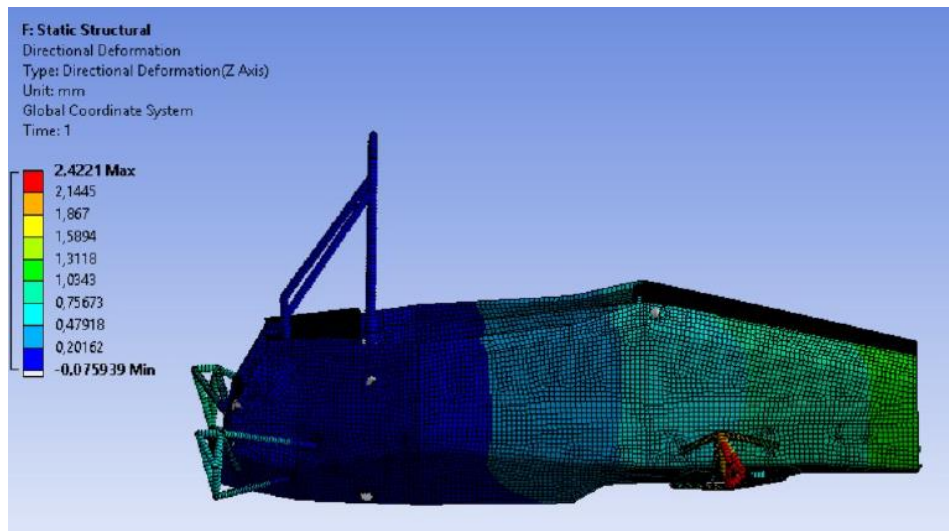
Εικόνα 62. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της κάμψης του εμπρός άξονα



Εικόνα 63. Απεικόνιση αποτελέσματος κάμψης του εμπρός άξονα



Εικόνα 64. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση της κάμψης και των δύο αξόνων

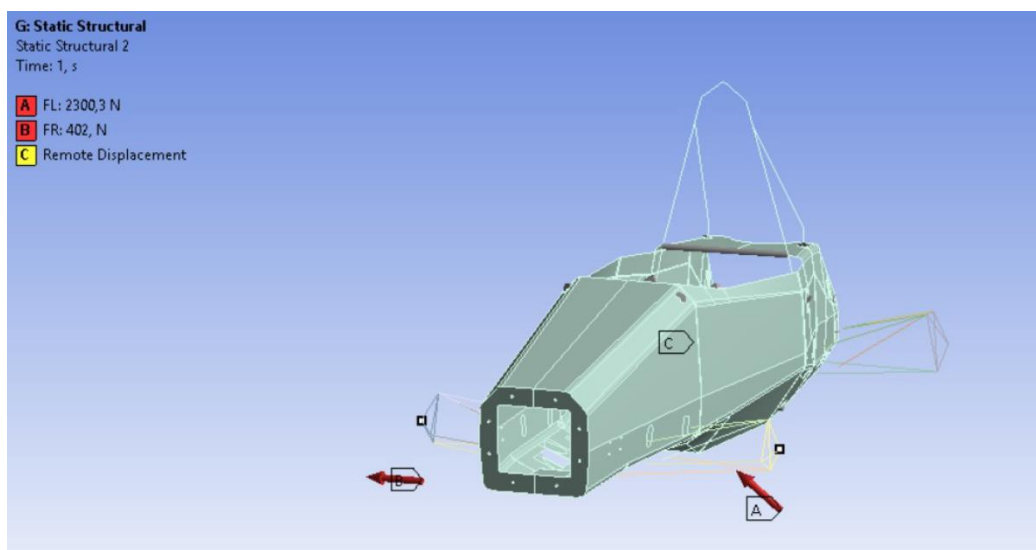


Εικόνα 65. Απεικόνιση αποτελέσματος κάμψης και των δύο αξόνων

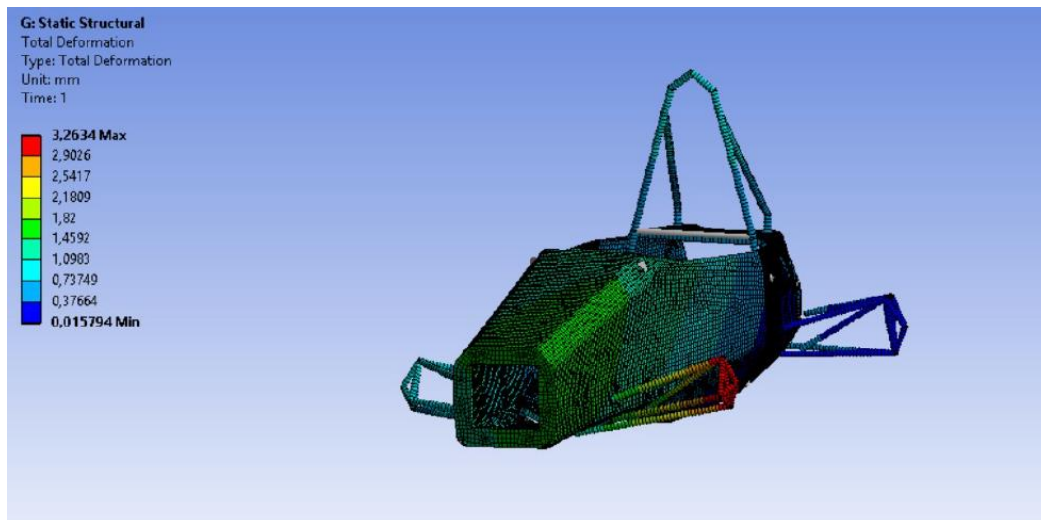
5.6.3 Camber

Η τρίτη περίπτωση που εξετάζεται είναι αυτή της παραμόρφωσης του πλαισίου κατά την πλευρική επιτάχυνση η οποία προκαλεί μεταβολή της γωνίας camber. Πιο συγκεκριμένα όταν το όχημα βρίσκεται στο ενδιάμεσο σημείο μιας στροφής και παρουσιάζεται μόνο πλευρική επιτάχυνση τότε η παραμόρφωση του πλαισίου λόγω των εμφανιζόμενων φορτίων προκαλεί μεταβολή της γωνίας του εξωτερικού τροχού του εμπρός άξονα. Αυτή η παραμόρφωση μπορεί να επιφέρει σημαντική μεταβολή στην απόδοση του οχήματος κατά τις στροφές σταθερής πλευρικής επιτάχυνσης και για αυτό θα πρέπει να μελετάται ξεχωριστά από τις άλλες περιπτώσεις. Οι δυνάμεις που ασκούνται παρουσιάζονται στην Εικόνα 66 και τα σημεία εφαρμογής τους ορίζονται στην επιφάνεια επαφής ελαστικού και οδοστρώματος. Ως οριακή συνθήκη επιλέγεται το σταθερό σημείο κέντρου βάρους της αναρτώμενης μάζας του οχήματος.[15]

(Σημαντική σημείωση: Οι κατευθύνσεις και ο λόγος των δυνάμεων λήφθηκαν από τους υπολογισμούς της ομάδας δυναμικής του οχήματος)



Εικόνα 66. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση παραμόρφωσης camber



Εικόνα 67. Απεικόνιση αποτελέσματος παραμόρφωσης camber

5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα προτάσεων διαστρωμάτωσης

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο ε, η επιλογή του υλικού κατασκευής θα πρέπει να λαμβάνει πάντα υπόψη τις ελάχιστες απαιτήσεις που ορίζει το SES ώστε κάθε επιμέρους σημείο του πλαισίου να είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς των διαγωνισμών Formula Student. Επιπλέον λαμβάνονται υπόψη και τα αποτελέσματα των φυσικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν καθώς θα πρέπει να εξεταστεί η απόκλιση που παρουσιάζουν από τα ελάχιστα όρια που ορίζει το SES. Στην περίπτωση πειραμάτων όπου η απόκλιση από τα ελάχιστα όρια του SES φαίνεται επαρκής, θεωρείται συνετό να εξεταστεί συνδυασμός διαστρωμάτωσης λιγότερων στρώσεων ώστε να διερευνηθεί μέσω των πεπερασμένων στοιχείων εάν υπάρχει αποδοτικότερη στρατηγική διαστρωμάτωσης. Στην περίπτωση εύρεσης ενός αποδοτικότερου συνδυασμού (ακαμψία προς βάρος) για κάποιο μέρος του πλαισίου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί φυσικό πείραμα και να εξεταστεί εάν αυτός ο συνδυασμός πληροί τα ελάχιστα όρια του SES.

Οι συνδυασμοί διαστρωμάτωσης που μελετήθηκαν είναι οι παρακάτω:

SIS (Side impact structure):

- 5 στρώσεις (0/0/0/0/0) – Πυρήνας 20 mm – 2 στρώσεις (0/0)
- 5 στρώσεις (0/45/0/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 3 στρώσεις (0/45/0)
- 5 στρώσεις (0/45/0/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 4 στρώσεις (0/45/45/0)

FBHS (Front Bulkhead Support):

- 4 στρώσεις (0/0/0/0/0) – Πυρήνας 20 mm – 2 στρώσεις (0/0)
- 4 στρώσεις (0/45/0/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 3 στρώσεις (0/45/0)
- 4 στρώσεις (0/45/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 4 στρώσεις (0/45/45/0)
- 5 στρώσεις (0/45/0/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 4 στρώσεις (0/45/45/0)

MHBS (Main Hoop Bracing Support):

- 4 στρώσεις (0/0/0/0/0) – Πυρήνας 20 mm – 2 στρώσεις (0/0)
- 4 στρώσεις (0/45/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 3 στρώσεις (0/45/0)
- 4 στρώσεις (0/45/45/0) – Πυρήνας 20 mm – 4 στρώσεις (0/45/45/0)

Floor

- 7 στρώσεις (0/0/0/0/0/0/0) – Πυρήνας 15 mm – 7 στρώσεις (0/0/0/0/0/0/0)
- 8 στρώσεις (0/45/0/0/0/0/45/0) – Πυρήνας 15 mm – 7 στρώσεις (0/45/0/0/0/45/0)

Οι παραπάνω συνδυασμοί μελετήθηκαν για κάθε μια από τρεις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν ήδη (στρέψη, κάμψη, camber). Για τη στρατηγική διαστρωμάτωσης λήφθηκε υπόψη η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζει κάθε επιμέρους σημείο για τις παραπάνω τρεις περιπτώσεις ενώ η επιλογή της γωνίας των υπό μελέτη στρώσεων έγινε με γνώμονα το μέγιστο εκτιμώμενο κέρδος σε δυσκαμψία. Στις περιπτώσεις των SIS, FBHS και MHBS επιλέχθηκε η ισορροπία μεταξύ των 0 και 45 μοιρών ενώ στην περίπτωση του πατώματος θεωρήθηκε πιο συνετό να επιλεγθούν περισσότερες στρώσεις στις 0 μοίρες ώστε να αυξηθεί η συνολική καμπτική δυσκαμψία του πλαισίου. Στα τελικά αποτελέσματα λήφθηκε υπόψη ο λόγος δυσκαμψίας προς βάρος για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις και η επιλογή της βέλτιστης τεχνικής διαστρωμάτωσης προέκυψε από το μέσο όρο των παραπάνω αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης των παραπάνω συνδυασμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 9. Συγκριτικά αποτελέσματα διαφορετικών τύπων διαστρωμάτωσης

	Lamination	Weight	Torsional Stiffness (Nm/deg)	Stiffness/Weight	%	Bending Stiffness (N/mm)	Stiffness/Weight	%	Camber Stiffness (deg/g)	Stiffness/Weight	%	Total Score (%)
SIS	5(0/0/0/0/0)-2(0/0)	18,06	3546	196,40	100,00%	641	35,5005	100,00%	0,056	0,984	100,00%	100,00%
	5(0/45/0/45/0)-3(0/45/0)	18,30	3732	203,93	103,84%	643	35,1306	98,96%	0,056	0,98	99,59%	100,80%
	5(0/45/0/45/0)-4(0/45/45/0)	18,55	3752	202,32	103,01%	646	34,8398	98,14%	0,056	0,959	97,46%	99,54%
FBHS	4(0/0/0/0)-2(0/0)	18,30	3732	203,93	103,84%	643	35,4424	99,84%	0,056	0,989	100,51%	101,39%
	4(0/45/45/0)-3(0/45/0)	18,46	3767	204,06	103,90%	656	35,8475	100,98%	0,055	1	101,63%	102,17%
	5(0/45/45/45/0)-3(0/45/45/0)	18,62	3772	202,56	103,13%	659	35,4038	99,73%	0,054	0,993	100,91%	101,26%
MHBS	4(0/0/0/0)-2(0/0)	18,16	3767	207,46	105,63%	656	36,1279	101,77%	0,055	1,008	102,44%	103,28%
	4(0/45/45/0)-3(0/45/0)	18,23	3804	208,68	106,25%	654	35,8613	101,02%	0,053	1,034	105,08%	104,12%
	4(0/45/45/0)-4(0/45/45/0)	18,30	3829	209,23	106,54%	657	35,9016	101,13%	0,053	1,031	104,78%	104,15%
FLOOR	7(0/0/0/0/0/0/0)-7(0/0/0/0/0/0/0)	18,26	3804	208,31	106,07%	664	36,3381	102,36%	0,054	1,023	103,96%	104,13%
	8(0/45/0/0/0/0/45/0)-7(45/0/0/0/0/0/45)	18,30	3829	209,23	106,54%	657	36,9016	103,95%	0,053	1,031	104,78%	105,09%

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες, παρουσιάζεται βέλτιστος λόγος ακαμψίας προς βάρος σε διαφορετική τεχνική διαστρωμάτωσης ωστόσο η τελική επιλογή γίνεται με βάση το μέσο όρο των τριών λόγων (στρέψη, κάμψη, camber) για κάθε διαφορετική τεχνική. Από τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψε πως οι βέλτιστες τεχνικές διαστρωμάτωσης (ακαμψία προς βάρος) ταυτίζονται με αυτές των πραγματοποιούμενων πειραμάτων για το SES για κάθε επιμέρους σημείο του πλαισίου. Για το λόγο αυτό δεν απαιτήθηκε η πραγματοποίηση περαιτέρω φυσικών πειραμάτων. Οι τελικές επιλογές διαστρωμάτωσης για κάθε σημείο του πλαισίου ορίστηκαν ως εξής:

Side Impact Structure (SIS)

Εξωτερικό κέλυφος (outer skin): 5 στρώσεις [0,45,0,45,0]

Πυρήνας (core): Πάχος 20 χιλιοστά

Εσωτερικό κέλυφος (inner skin): 3 στρώσεις [0,45,0]

Front Bulkhead Support (FBHS)

Εξωτερικό κέλυφος (outer skin): 4 στρώσεις [0,45,45,0]

Πυρήνας (core): Πάχος 20 χιλιοστά

Εσωτερικό κέλυφος (inner skin): 3 στρώσεις [0,45,0]

Main Hoop Bracing Support (MHBS) (+ Front Hoop Bracing)

Εξωτερικό κέλυφος (outer skin): 4 στρώσεις [0,45,45,0]

Πυρήνας (core): Πάχος 20 χιλιοστά

Εσωτερικό κέλυφος (inner skin): 4 στρώσεις [0,45,45,0]

Floor

Εξωτερικό κέλυφος (outer skin): 8 στρώσεις [0,45,0,0,0,0,45,0]

Πυρήνας (core): Πάχος 15 χιλιοστά

Εσωτερικό κέλυφος (inner skin): 7 στρώσεις [45,0,0,0,0,0,45]

5.8 Περιπτώσεις μεγίστων φορτίσεων

Υστερα από την τελική απόφαση για τη διαστρωμάτωση κάθε περιοχής με βάση την παραπάνω μελέτη θα πρέπει να γίνει έλεγχος του πλαισίου κατά τις μέγιστες συνθήκες φόρτισης που ενδέχεται να παρατηρηθούν κατά την αγωνιστική χρήση του οχήματος. Οι ακραίες συνθήκες φόρτισης παρατηρούνται κατά τις μέγιστες επιταχύνσεις που μπορεί να αναπτύξει το όχημα ενώ οι δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι ένας συνδυασμός φορτίσεων που προκύπτουν από τη δυναμική του οχήματος, την αεροδυναμική καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις τις παραγόμενες δονήσεις από τον κινητήρα.

5.8.1 Σημεία εφαρμογής δυνάμεων και οριακές συνθήκες

Τα φορτία που δημιουργούνται κατά την αγωνιστική χρήση του οχήματος μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- **Φορτία παραγόμενα από τα ελαστικά**

Κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση του οχήματος αναπτύσσονται κάποιες δυνάμεις οι οποίες έχουν διάνυσμα ανάλογο της συνολικής επιτάχυνσης του οχήματος. Στην περίπτωση ενός φρεναρίσματος ή επιτάχυνσης προς τα εμπρός, οι παραγόμενες δυνάμεις είναι παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι άξονες x και z ενώ στην περίπτωση της πλευρικής επιτάχυνσης εμφανίζεται συνδυασμός δυνάμεων λόγω της κεντρομόλου δύναμης καθώς και ανάλογες της φοράς κίνησης του οχήματος. Τέλος στην περίπτωση ανωμαλίας του οδοστρώματος εμφανίζονται επιπλέον δυνάμεις κάθετες σε αυτό και ανάλογες της ταχύτητας κίνησης του οχήματος. Ο υπολογισμός αυτών των δυνάμεων πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων από την ομάδα της Δυναμικής του Οχήματος έχοντας σαν είσοδο ένα πλήθος δεδομένων όπως το κέντρο μάζας του οχήματος, τα χαρακτηριστικά του συστήματος ανάρτησης, την κινηματική της ανάρτησης και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών που χρησιμοποιήθηκαν και μπορούν να αναπτύξουν τη μέγιστη τριβή (Hoosier 16x7.5-10 LC0).

- **Φορτία λόγω της αεροδυναμικής**

Είναι γνωστό πως κατά την κίνηση ενός οχήματος παράγονται δυνάμεις λόγω του ρευστού της ατμόσφαιρας (αέρας) οι οποίες μπορούν να είναι αντίθετες στη φορά κίνησης του οχήματος (δύναμη οπισθέλκουσας, drag) αλλά και είναι κάθετες στο οδόστρωμα λόγω της χρήσης πτερυγών (airfoils). Στην πραγματικότητα βέβαια τα διανύσματα των δυνάμεων δεν είναι ποτέ παράλληλα στους κύριους άξονες x,y,z καθώς δημιουργούνται τόσο κάθετες δυνάμεις όσο και δυνάμεις οπισθέλκουσας ωστόσο στην περίπτωση μελέτης των παραγόμενων φορτίων πραγματοποιείται διακριτοποίηση σε συνολική δύναμη οπισθέλκουσας του οχήματος και σε επιμέρους

κάθετες δυνάμεις των πτερυγών. Ο υπολογισμός αυτών των δυνάμεων πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοιώσεων από την ομάδα της Αεροδυναμικής λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική αεροδυναμική του οχήματος για τις επιμέρους ταχύτητες κίνησης που λήφθηκαν υπόψη κατά τις μέγιστες περιπτώσεις φόρτισης του οχήματος. Ως σημείο εφαρμογής της οπισθέλκουσας θεωρήθηκε το κέντρο βάρους του οχήματος ενώ ως σημείο εφαρμογής των κάθετων δυνάμεων θεωρήθηκαν τα σημεία στήριξης των πτερυγών.

- **Φορτία παραγόμενα από τον κινητήρα**

Το σύστημα παραγωγής της ισχύος ενός θερμικού οχήματος είναι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης. Μέσω της διαδικασίας της καύσης ο κινητήρας παράγει ισχύ η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω του συστήματος μετάδοσης στους κινητήριους τροχούς. Στο αγωνιστικό όχημα της Prom Racing επιλέχθηκε η χρήση ενός βενζινοκίνητου μονοκύλινδρου κινητήρα KTM 510 κυβικών χιλιοστών για τον οποίο πραγματοποιήθηκε μελέτη δονήσεων από την ομάδα του κινητήρα. Κατά τη σύνθετη αυτή μελέτη υπολογίστηκαν τα παραγόμενα φορτία που μεταφέρονται στα σημεία έδρασης του κινητήρα καθώς και μέσω του συστήματος μετάδοσης στους τροχούς. Τα φορτία αυτά παρουσιάζουν διακύμανση και η μέγιστη τιμή τους εμφανίζεται κατά τη μέγιστη -επιτρεπόμενη από ελαστικά- επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει τον όχημα. Ο υπολογισμός αυτών των δυνάμεων πραγματοποιήθηκε από την ομάδα του Κινητήρα για την περίπτωση της μέγιστης επιτάχυνσης του οχήματος.

- **Οριακές συνθήκες**

Ως οριακή συνθήκη για τις μελετούμενες περιπτώσεις αυτής της στατικής μελέτης ορίστηκε το κέντρο μάζας του οχήματος με τη χρήση της παραμέτρου remote displacement.

5.8.2 Μοντέλα αστοχίας

Όπως αναφέρθηκε ήδη η μοντελοποίηση του πλαισίου έγινε χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα διακριτοποίησης όπου το κέλυφος (skin) θεωρείται δισδιάστατο και ο πυρήνας θεωρείται πως έχει τρεις διαστάσεις ενώ, σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε, γίνεται η παραδοχή πως στα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά το όριο διαρροής ταυτίζεται με το όριο θραύσης. Επιπλέον η κατασκευή sandwich που επιλέχθηκε παρουσιάζει συμμετρία σε όλες τις στρώσεις του κελύφους του και έτσι το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ορθότροπο (ίδιες μηχανικές ιδιότητες στους άξονες x και y). Με βάση αυτές τις παραδοχές επιλέχθηκαν να εξεταστούν τα παρακάτω κριτήρια:

- Von Mises: Το κριτήριο αστοχίας Von Mises εξετάζει εάν η γενικευμένη τάση του υλικού που προκύπτει από τις ορθές τάσεις σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες ξεπερνάει το όριο διαρροής του υλικού. Αν και το υπό μελέτη υλικό δεν είναι ισότροπο (όπως για παράδειγμα ένα μέταλλο), σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές μπορεί να βγει ένα σχετικά ασφαλές συμπέρασμα για τις εμφανιζόμενες ορθές τάσεις στο τελικό υλικό.
- Tsai-Wu: Το κριτήριο Tsai-Wu είναι μια θεωρία αστοχίας των ανισότροπων υλικών που χρησιμοποιείται συχνά στα σύνθετα υλικά λόγω των διαφορετικών τους χαρακτηριστικών σε κάθε κύριο άξονα. Αυτό το κριτήριο εξετάζει την αστοχία του υλικού όταν το μέτρο του υπερβαίνει τη μονάδα και έχει τη γενική μορφή:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq 1$$

όπου F είναι οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε κάθε άξονα και σ οι εμφανιζόμενες τάσεις.

Για τα ορθότροπα υλικά με τρεις άξονες συμμετρίας και τάσεις σε ένα επίπεδο ισχύει $\sigma_1 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$ και έτσι το κριτήριο Tsai Wu τελικά απλοποιείται και ισχύει:

$$F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + F_{44} \sigma_4^2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 \leq 1$$

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το πλαίσιο, το παραπάνω κριτήριο χρησιμοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ANSYS για να εξεταστεί εάν υπάρχει αστοχία στο εξωτερικό κέλυφος του οχήματος ενώ ακόμα επιλέχθηκε ο υπολογισμός των μεγίστων ορθών τάσεων (s_1 και s_2) καθώς και των διατμητικών τάσεων s_{12} . [16]

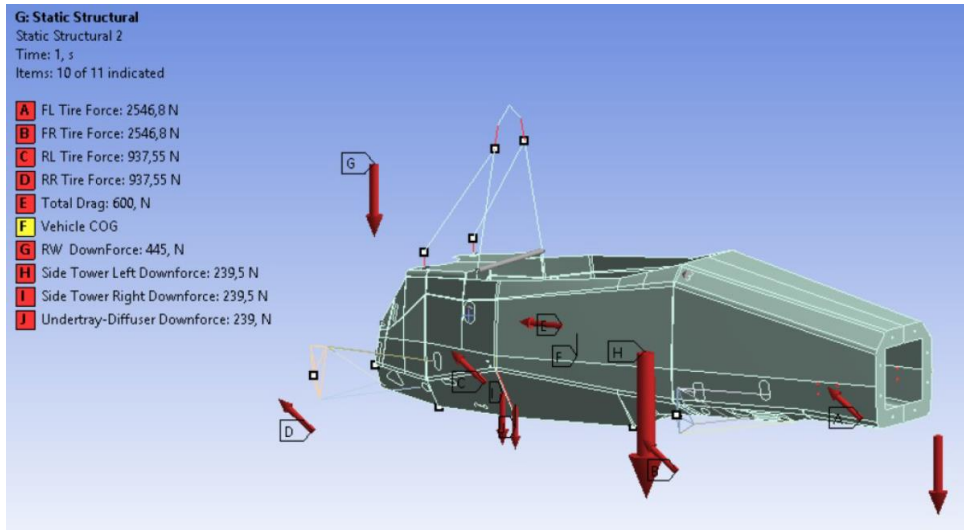
5.8.3 Επιβράδυνση 2.3g

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα της Δυναμικής του Οχήματος, η μέγιστη επιβράδυνση που μπορεί να αναπτύξει το όχημα ισούται με 2.3 φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν πως παραλαμβάνει το πλαίσιο για τη μέγιστη επιβράδυνση παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

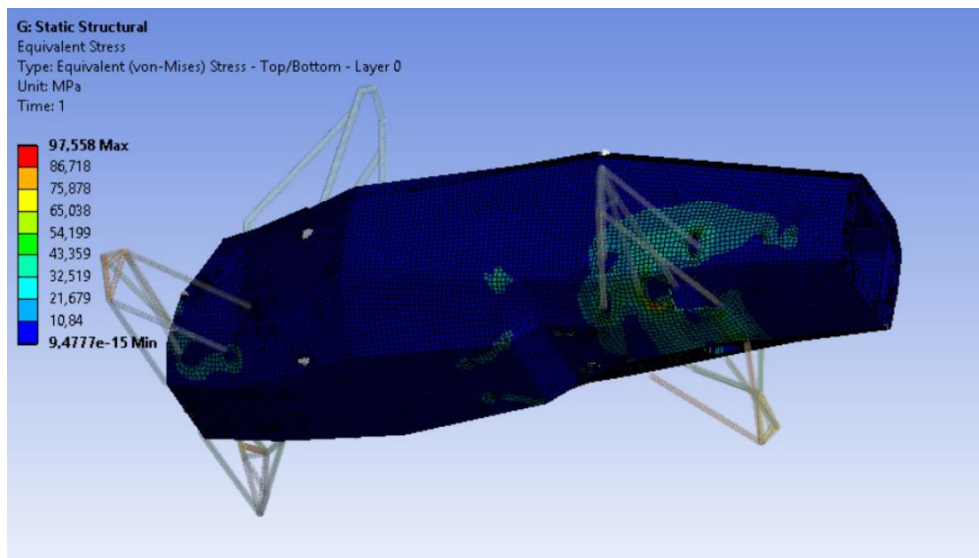
Πίνακας 10. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση επιβράδυνσης 2.3g

Source	Axis	Force (N)
Front Right Tire	x	-2064
	y	0
	z	1492
Front Left Tire	x	-2064
	y	0
	z	1492
Rear Right Tire	x	-760
	y	0
	z	549
Rear Left Tire	x	-760
	y	0
	z	549
Total Drag	x	599
Rear Wing Downforce	z	-445
Front Wing Downforce	z	-599
Side Downforce	z	-479
Undertray Downforce	z	-240

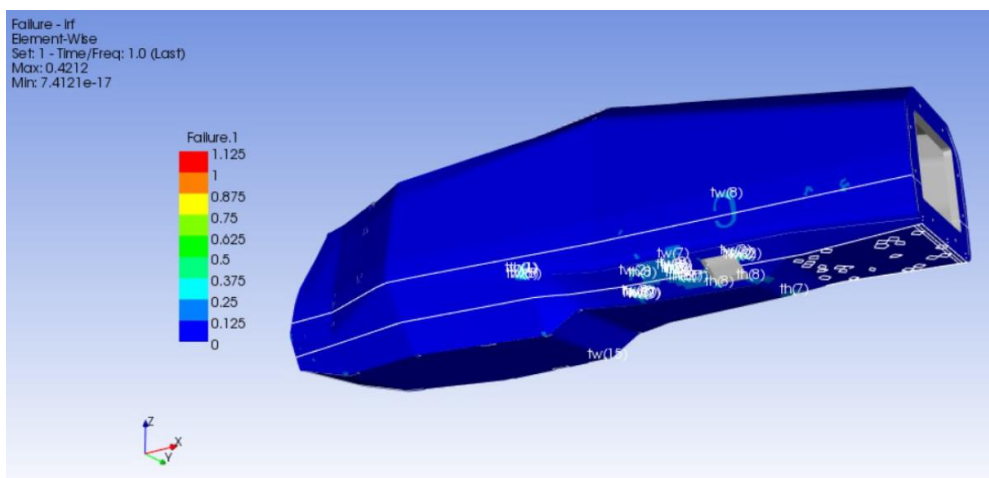
Το στατικό μοντέλο που εφαρμόστηκαν οι παραπάνω δυνάμεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 68:



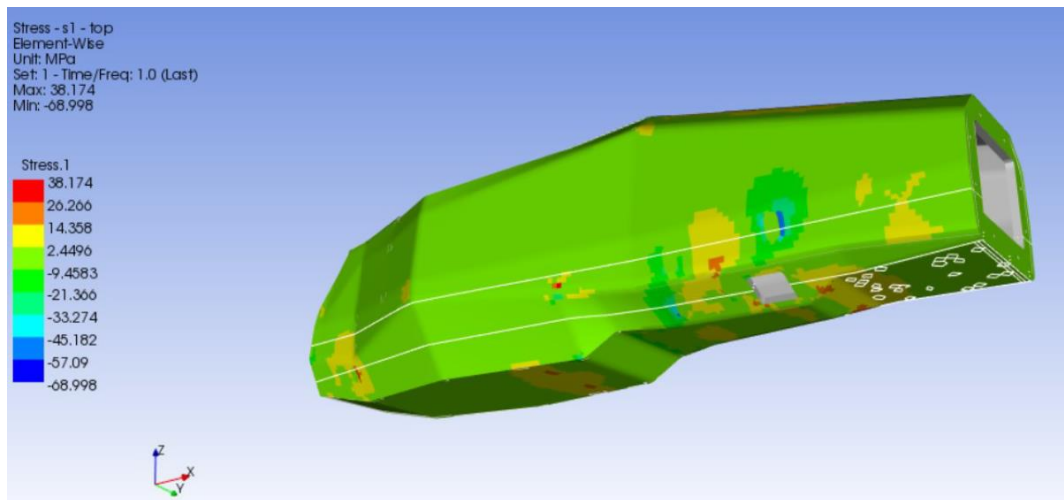
Εικόνα 68. Μοντελοποίηση επιβράδυνσης 2.3g



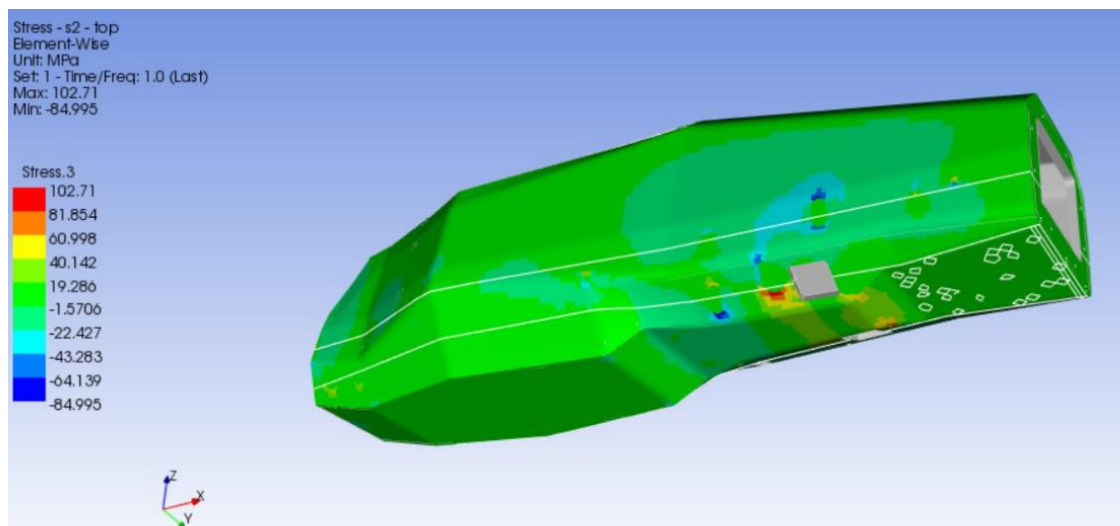
Εικόνα 69. Επιβράδυνση 2.3g (Von Mises)



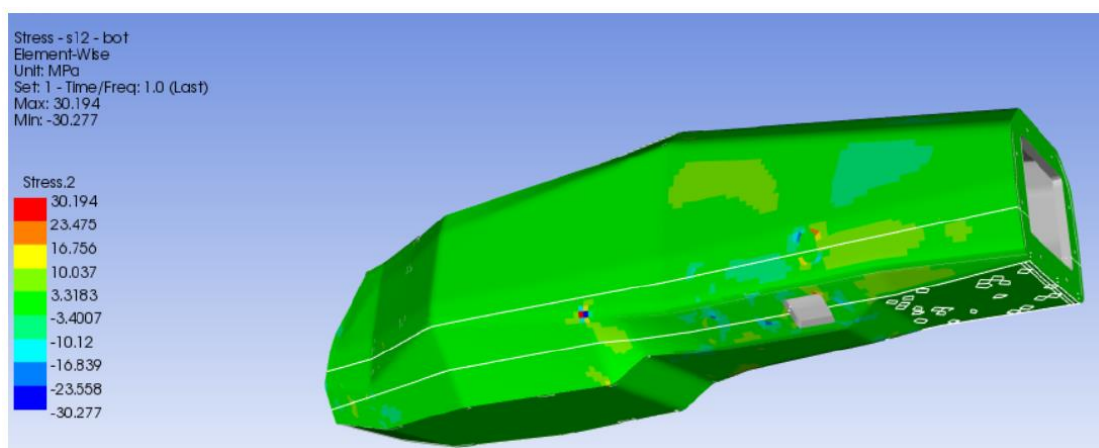
Εικόνα 70. Επιβράδυνση 2.3g (Inverse Reversal Factor -Tsai Wu)



Εικόνα 71. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 72. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 73. Επιβράδυνση 2.3g (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους)

Πίνακας 11. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση επιβράδυνσης 2.3 g

Επιβράδυνση 2.3 g		
Αποτελέσματα	Minimum	Maximum
Von Mises (MPa)	0,0	97,6
Κριτήριο Tsai Wu (<i>Failure=1</i>)	0,0	0,4
s1 (MPa)	-68,0	38,1
s2 (MPa)	-85,0	102,7
s12 (MPa)	-30,3	30,2

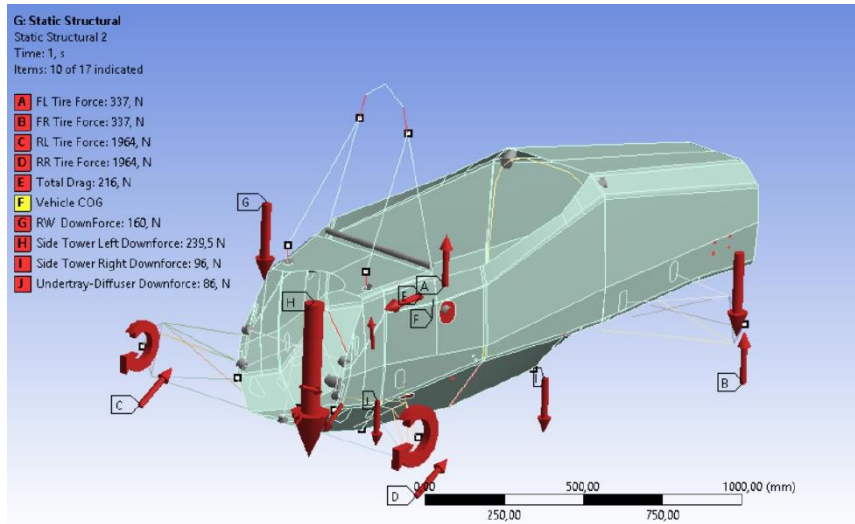
5.8.4 Επιτάχυνση 1.4g

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα της Δυναμικής του Οχήματος, η μέγιστη θετική επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει το όχημα ισούται με 1.4 φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας. Στην περίπτωση της μέγιστης επιτάχυνσης λήφθηκαν υπόψη οι δυνάμεις που παράγονται τόσο από τα ελαστικά και την αεροδυναμική καθώς και από τις αντιδράσεις του κινητήρα. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν πως παραλαμβάνει το πλαίσιο για τη μέγιστη θετική επιτάχυνση παρουσιάζονται στον Πίνακα 13:

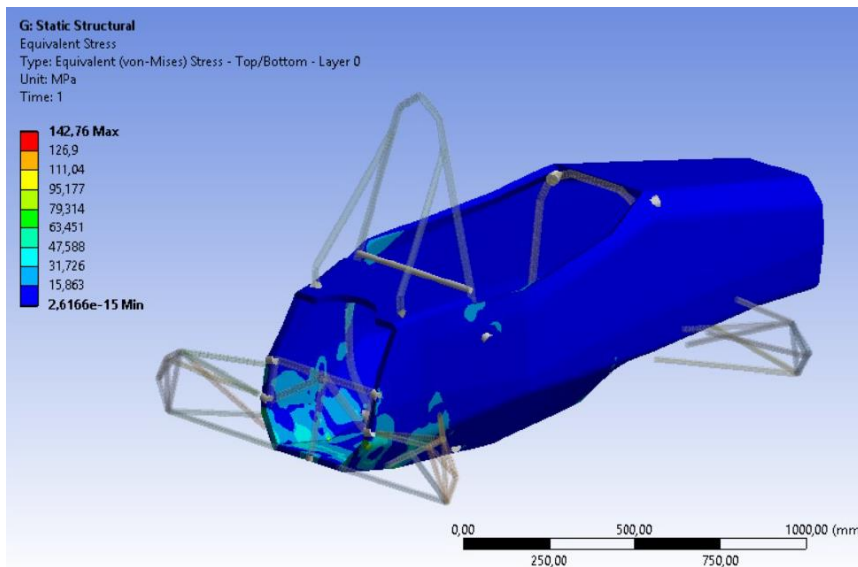
Πίνακας 12. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση επιτάχυνσης 1.4g

Source	Axis	Force (N)
Front Right Tire	x	0
	y	0
	z	337
Front Left Tire	x	0
	y	0
	z	337
Rear Right Tire	x	1682
	y	0
	z	1014
Rear Left Tire	x	1682
	y	0
	z	1014
Total Drag	x	216
Rear Wing Downforce	z	-161
Front Wing Downforce	z	-216
Side Downforce	z	-173
Undertray Downforce	z	-86
Engine Rear Mount	x	13900
	y	0
	z	-6050
Engine Bottom Mount	x	-5460
	y	0
	z	-4616
Engine Front Mount	x	-1440
	y	0
	z	9740

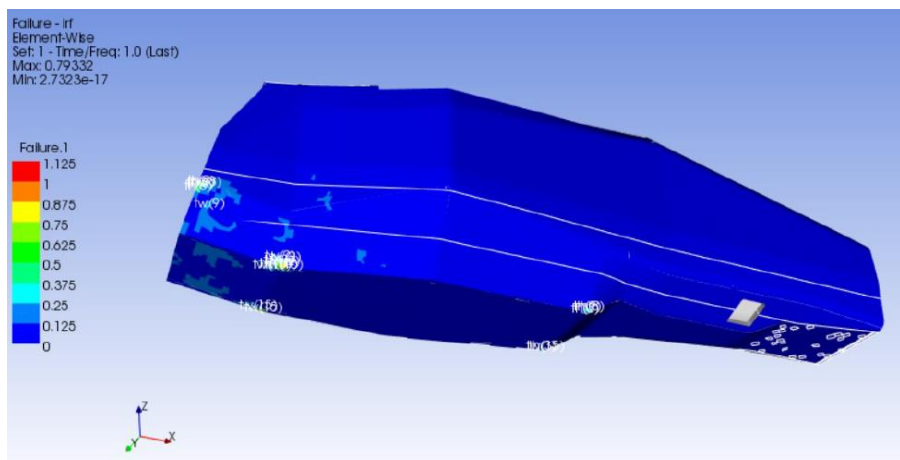
Το στατικό μοντέλο που εφαρμόστηκαν οι παραπάνω δυνάμεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 74:



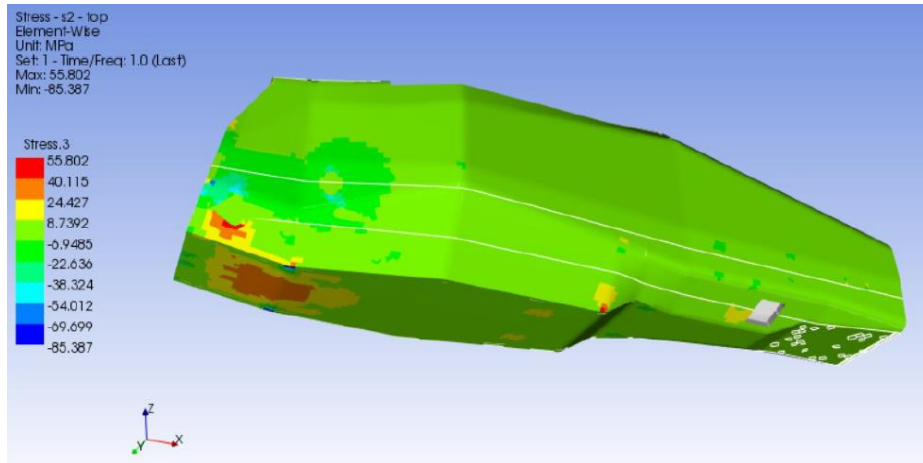
Εικόνα 74. Μοντελοποίηση επιτάχυνσης 1.4 g



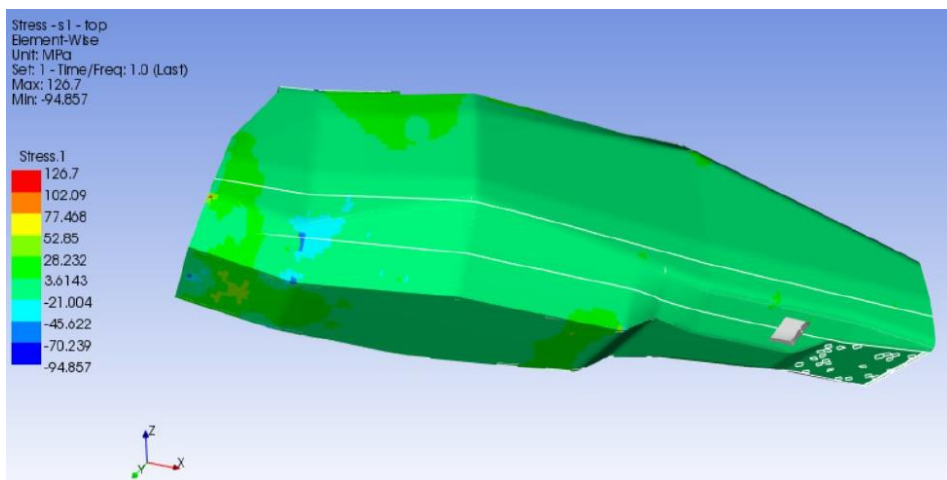
Εικόνα 75. Επιτάχυνση 1.4g (Von Mises)



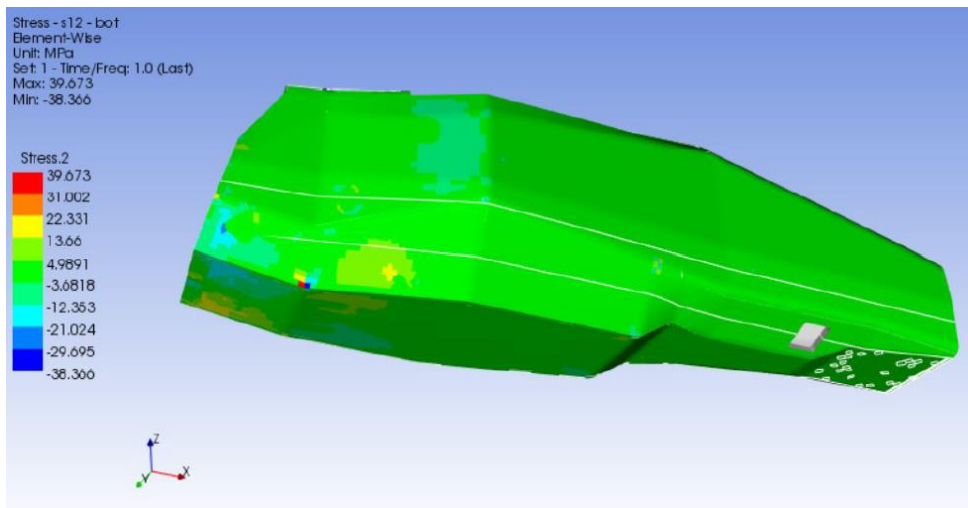
Εικόνα 76. Επιτάχυνση 1.4g (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu)



Εικόνα 77. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 78. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 79. Επιτάχυνση 1.4g (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους)

Πίνακας 13. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση επιτάχυνσης 1.4 g

Επιτάχυνση 1.4 g		
Αποτελέσματα	Minimum	Maximum
Von Mises (MPa)	0,0	142,7
Κριτήριο Tsai Wu (<i>Failure=1</i>)	0,0	0,8
s1 (MPa)	-85,4	55,8
s2 (MPa)	-94,9	126,7
s12 (MPa)	-38,4	39,7

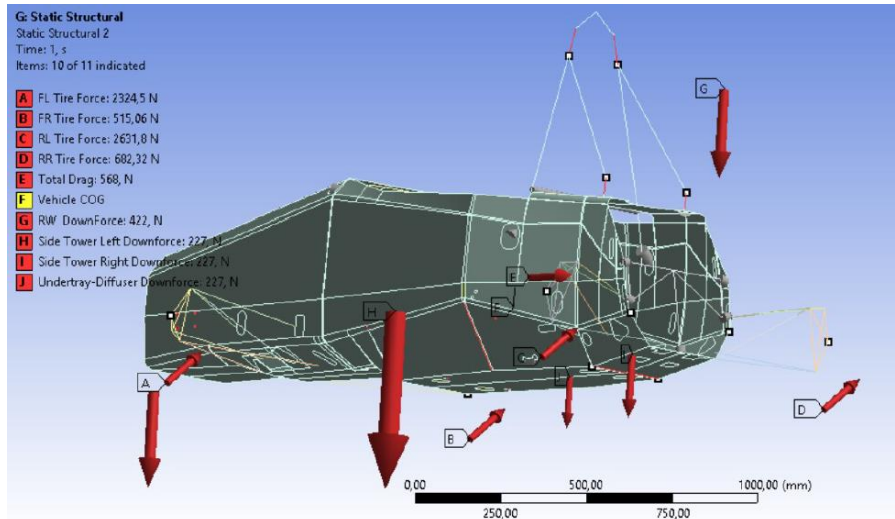
5.8.5 Πλευρική επιτάχυνση 2g

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα της Δυναμικής του Οχήματος, η μέγιστη πλευρική επιτάχυνση που μπορεί να αναπτύξει το όχημα σε μια στροφή ισούται με 2 φορές την επιτάχυνση της βαρύτητας. Στην περίπτωση της μέγιστης επιτάχυνσης λήφθηκαν υπόψη οι δυνάμεις που παράγονται από τα ελαστικά καθώς και από την αεροδυναμική του οχήματος. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν πως παραλαμβάνει το πλαίσιο για τη μέγιστη πλευρική επιτάχυνση παρουσιάζονται στον Πίνακα 15:

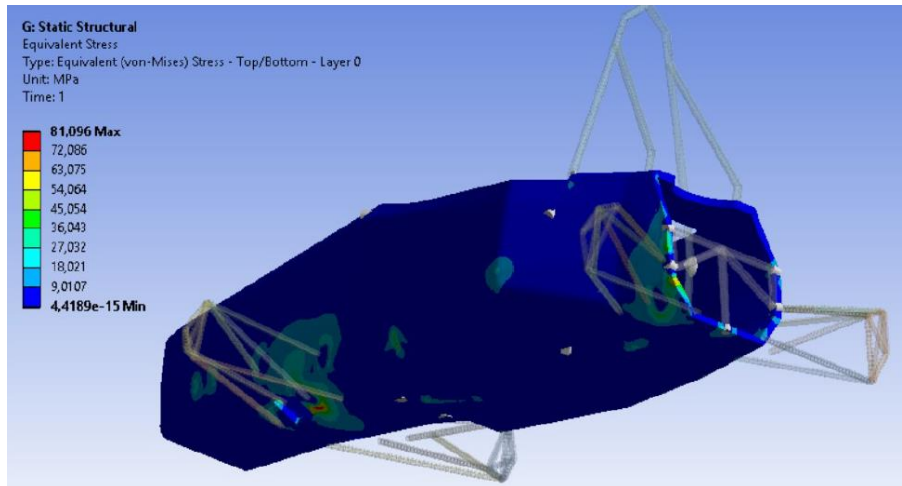
Πίνακας 14. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση πλευρικής επιτάχυνσης 2g

Source	Axis	Force (N)
Front Right Tire	x	0
	y	-402
	z	322
Front Left Tire	x	0
	y	1451
	z	1682
Rear Right Tire	x	0
	y	-533
	z	426
Rear Left Tire	x	0
	y	-2056
	z	1643
Total Drag	x	216
Rear Wing Downforce	z	-161
Front Wing Downforce	z	-216
Side Downforce	z	-173
Undertray Downforce	z	-86

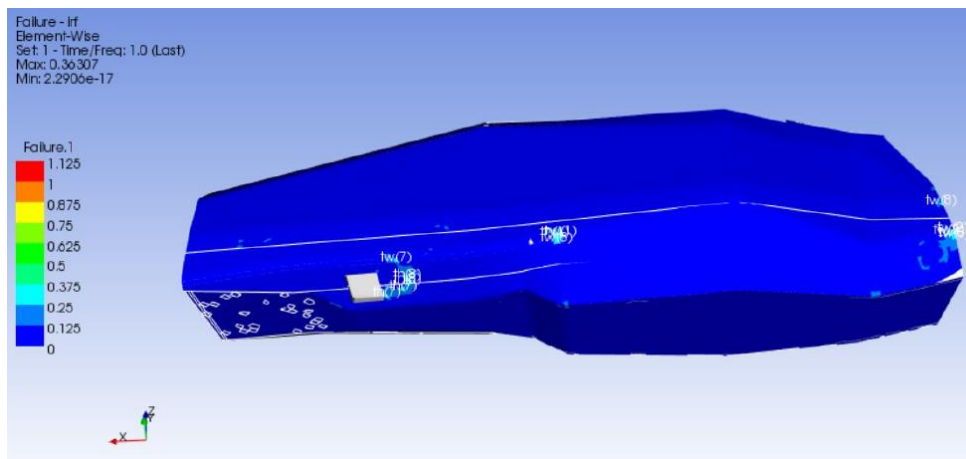
Το στατικό μοντέλο που εφαρμόστηκαν οι παραπάνω δυνάμεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 80:



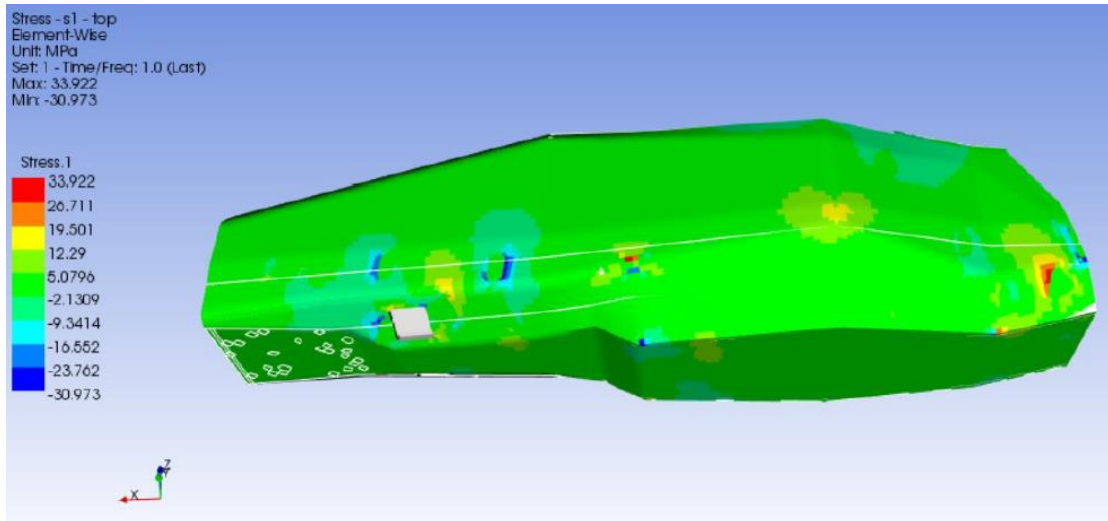
Εικόνα 80. Μοντελοποίηση πλευρικής επιτάχυνσης 2g



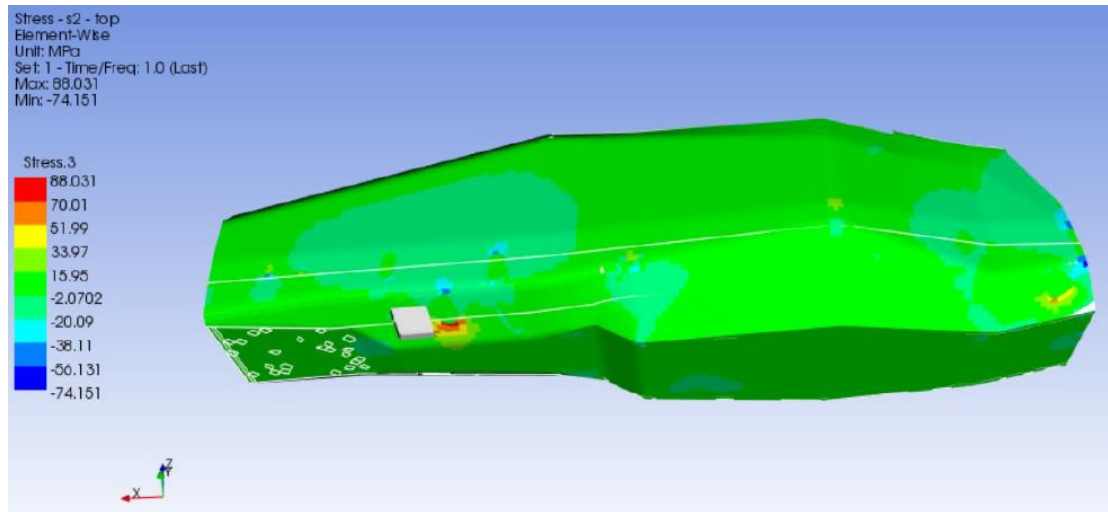
Εικόνα 81. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Von Mises)



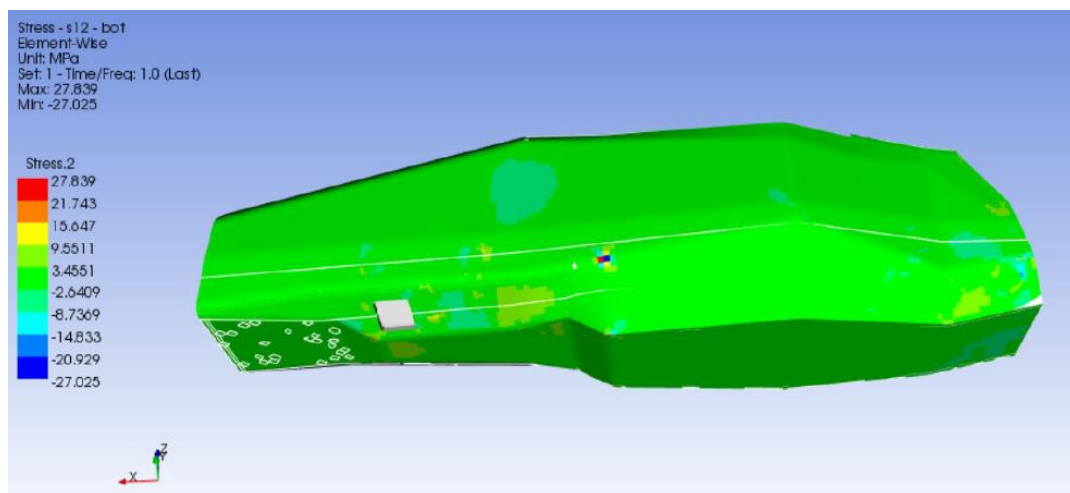
Εικόνα 82. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu)



Εικόνα 83. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 84. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 85. Πλευρική επιτάχυνση 2g (Μέγιστες διαμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους)

Πίνακας 15. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση πλευρικής επιτάχυνσης 2g

Πλευρική Επιτάχυνση 2 g		
Αποτελέσματα	Minimum	Maximum
Von Mises (MPa)	0,0	81,1
Κριτήριο Tsai Wu (<i>Failure=1</i>)	0,0	0,36
s1 (MPa)	-30,9	33,9
s2 (MPa)	-74,2	88,0
s12 (MPa)	-27,0	27,8

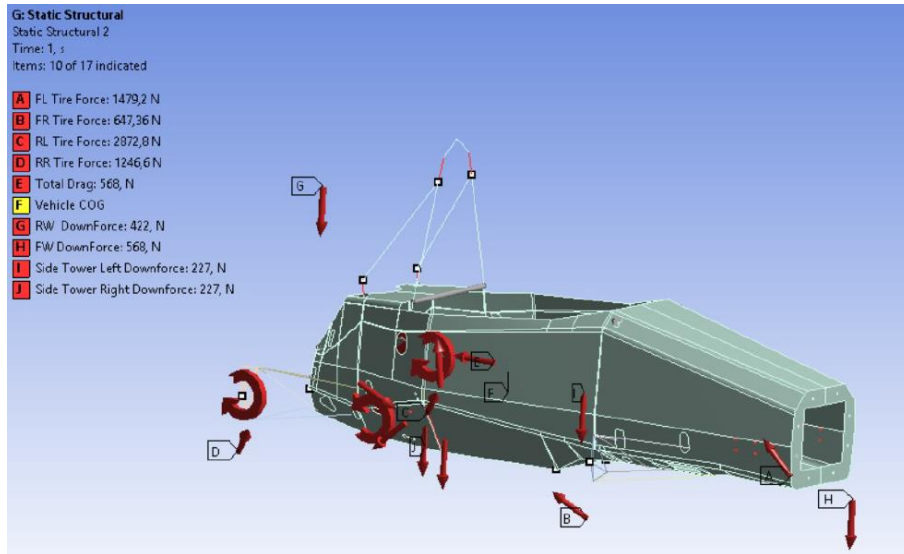
5.8.6 Συνδυασμός Πλευρικής και Διαμήκης Επιτάχυνσης (1g +1.4g)

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα της Δυναμικής του Οχήματος, ο συνδυασμός μέγιστων επιταχύνσεων που μπορεί να αναπτύξει το όχημα είναι μέγιστη πλευρική επιτάχυνση 1g και μέγιστη διαμήκη επιτάχυνση 1.4g. Σε αυτή την περίπτωση επιτάχυνσης λήφθηκαν υπόψη οι δυνάμεις που παράγονται από τα ελαστικά και την αεροδυναμική του οχήματος καθώς και οι αντιδράσεις από τις δονήσεις του κινητήρα. Οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν πως παραλαμβάνει το πλαίσιο για αυτό το συνδυασμό επιταχύνσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 17:

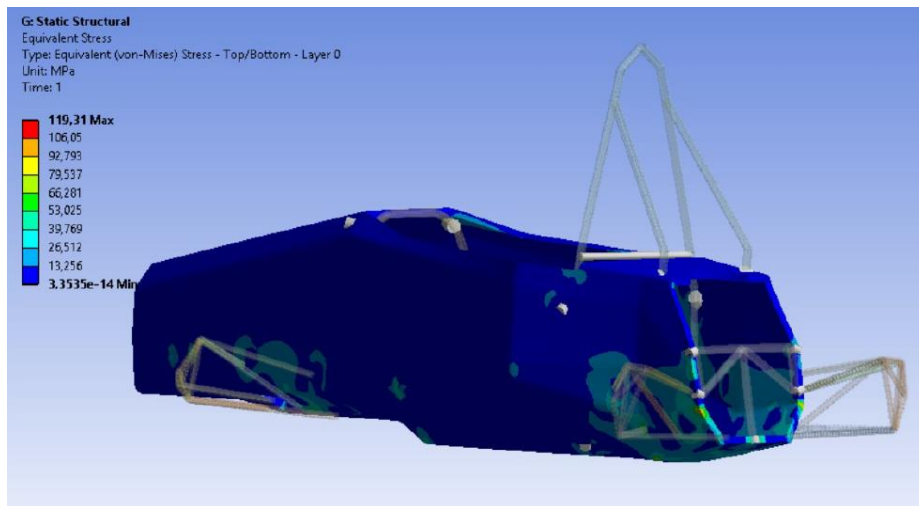
Πίνακας 16. Εμφανιζόμενες δυνάμεις στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)

Source	Axis	Force (N)
Front Right Tire	x	-17
	y	-994
	z	1078
Front Left Tire	x	-61
	y	-344
	z	373
Rear Right Tire	x	1676
	y	-1581
	z	1714
Rear Left Tire	x	728
	y	-686
	z	744
Total Drag	x	568
Rear Wing Downforce	z	-422
Front Wing Downforce	z	-568
Side Downforce	z	-227
Undertray Downforce	z	-227
Engine Rear Mount	x	13900
	y	0
	z	-6050
Engine Bottom Mount	x	-5460
	y	0
	z	-4616
Engine Front Mount	x	-1440
	y	0
	z	9740

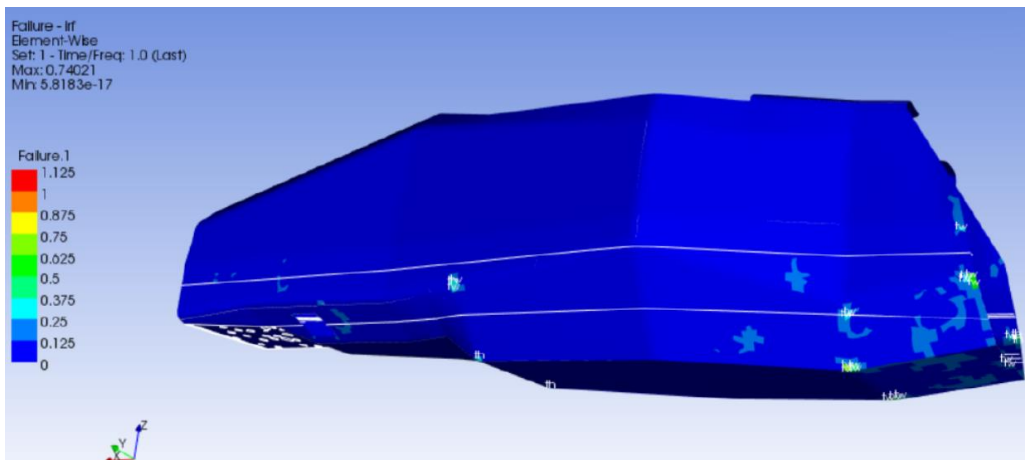
Το στατικό μοντέλο που εφαρμόστηκαν οι παραπάνω δυνάμεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 86:



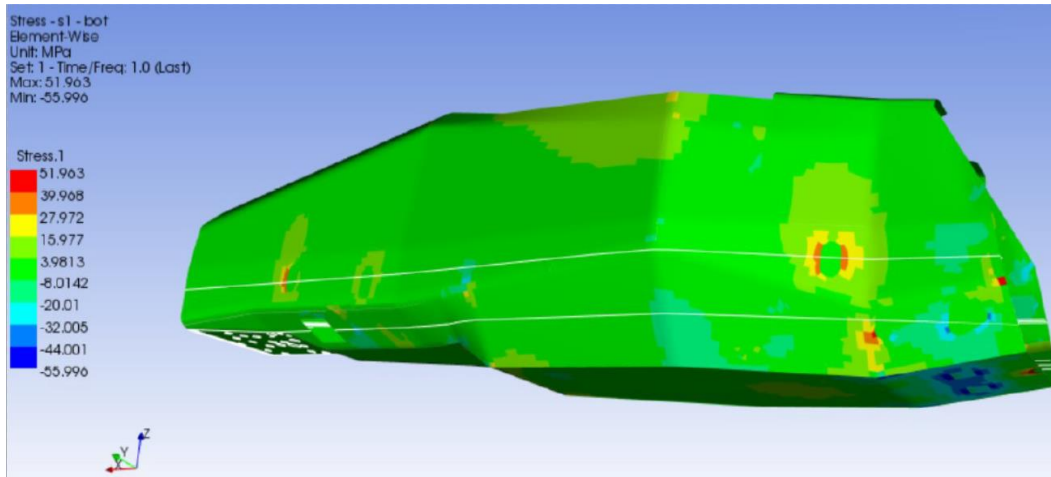
Εικόνα 86. Μοντελοποίηση στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)



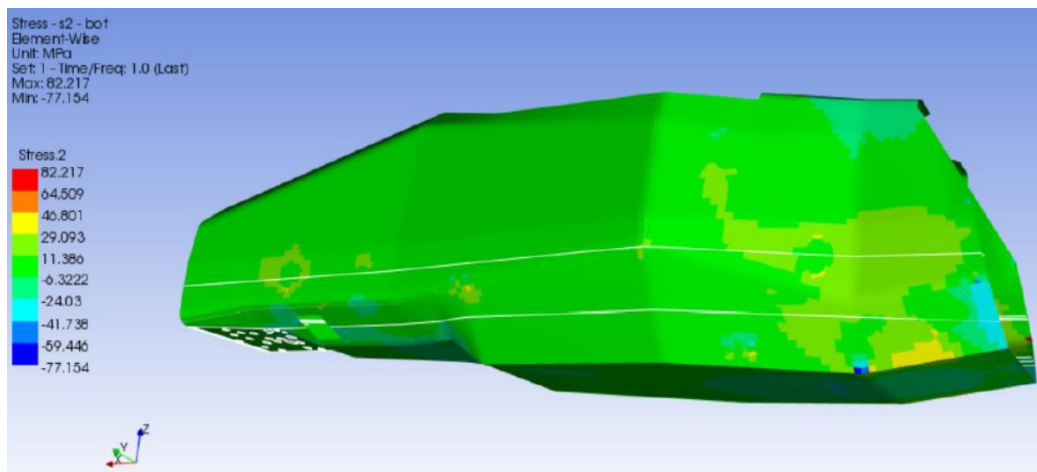
Εικόνα 87. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Von Mises)



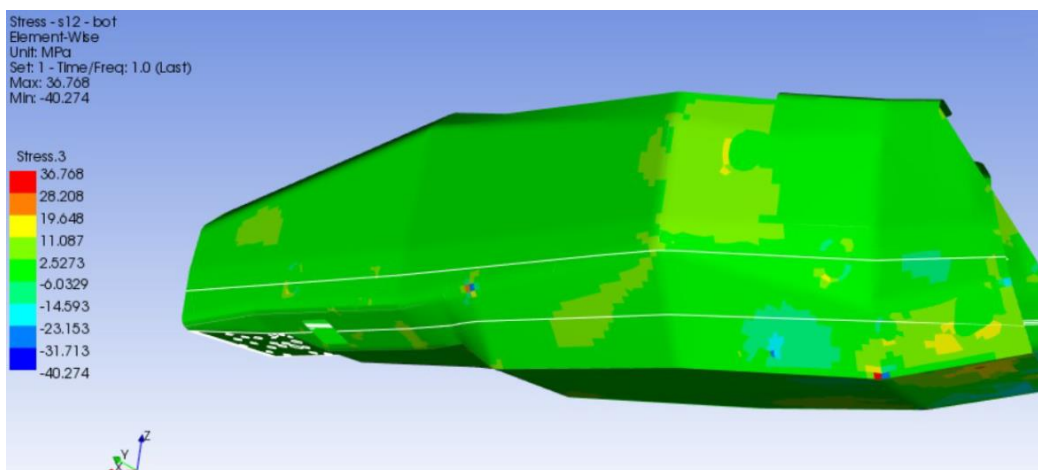
Εικόνα 88. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Inverse Reverses Factor -Tsai Wu)



Εικόνα 89. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες ορθές τάσεις (s1) εξωτερικού κελύφους)



Εικόνα 90. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες ορθές τάσεις (s2) εξωτερικού κελύφους)



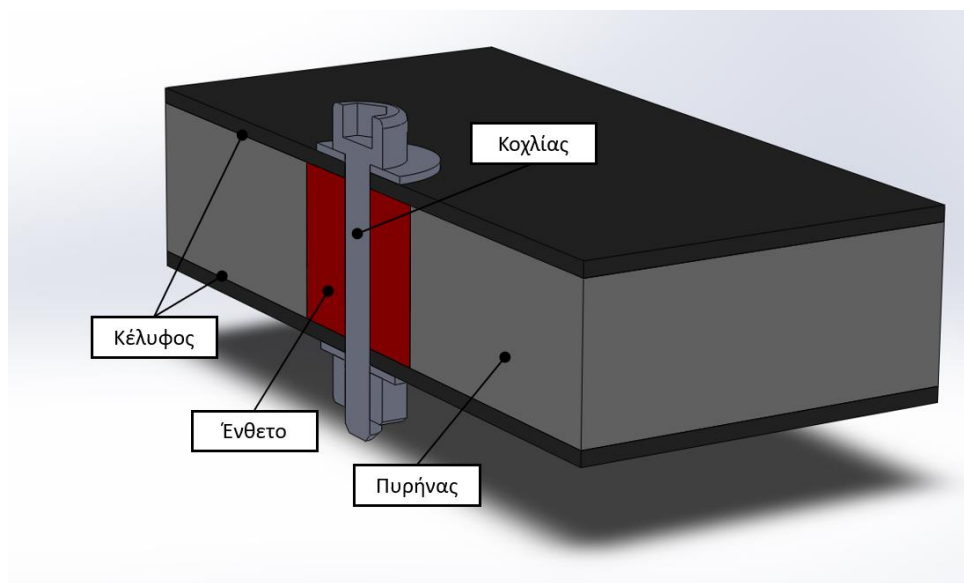
Εικόνα 91. Συνδυασμός πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g) (Μέγιστες διατμητικές τάσεις (s12) εξωτερικού κελύφους)

Πίνακας 17. Αποτελέσματα μέγιστων τάσεων στην περίπτωση συνδυασμού πλευρικής και διαμήκης επιτάχυνσης (1g+1.4g)

Συνδυασμός Πλευρικής και Διαμήκης Επιτάχυνσης (1g+1.4g)		
Αποτελέσματα	Minimum	Maximum
Von Mises (MPa)	0,0	119,0
Κριτήριο Tsai Wu (<i>Failure=1</i>)	0,0	0,74
s1 (MPa)	-56,0	52,0
s2 (MPa)	-77,0	82,0
s12 (MPa)	-40,0	37,0

5.9 Ένθετα σύσφιξης

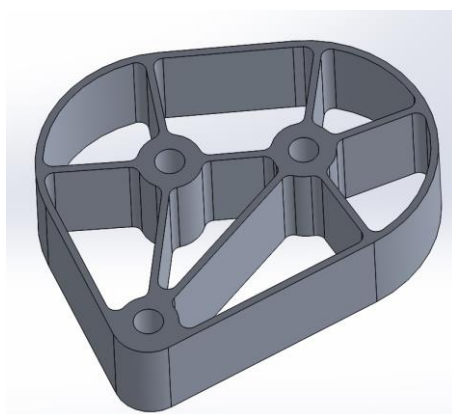
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες το πλαίσιο αποτελεί το βασικό κομμάτι του οχήματος πάνω στο οποίο εδράζονται όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα καθώς και πλήθος άλλων εξαρτημάτων. Η σύνδεση του πλαισίου με υποσυστήματα που παραλαμβάνουν υψηλά φορτία όπως η ανάρτηση αποτελεί ένα από τα κρίσιμότερα σημεία στα οποία θα πρέπει να δοθεί επαρκής προσοχή προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική μεταφορά φορτίων χωρίς όμως να προκληθεί αστοχία στο υλικό κατασκευής του πλαισίου. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σύνδεσης υποσυστημάτων και εξαρτημάτων με το πλαίσιο αυτό γίνεται μέσω κοχλιοσύνδεσης κατά την οποία τα αξονικά φορτία μεταφέρονται μέσω διατμητικών τάσεων στο κέλυφος του πλαισίου. Προκειμένου να γίνει η σύσφιξη των κοχλίων με τη μέγιστη προένταση που επιτρέπει το υλικό κατασκευής τους, θα πρέπει να γίνει η χρήση ενός ενθέτου (insert) το οποίο φέρει την ανάλογη απαιτούμενη αντοχή ανά τον τύπο του κοχλία που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί. Η ανάγκη χρήσης ενθέτων καθίσταται απαραίτητη καθώς η θλιπτική αντοχή του πυρήνα των κατασκευών sandwich σε καμία περίπτωση δεν καθίσταται συγκρίσιμη με την απαιτούμενη προένταση κοχλίας. Ενδεικτικά, η θλιπτική αντοχή του πυρήνα κυψέλης αλουμινίου που επιλέχθηκε είναι 4.52 N/mm^2 .



Εικόνα 92. Σχηματική απεικόνιση διατομής ενθέτου (insert) σύσφιξης

Προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε αστοχία, το μήκος των ενθέτων θα πρέπει να είναι ίδιο με το πάχος του πυρήνα με τις επιτρεπόμενες ανοχές να είναι μείον 0.05-0.1 χιλιοστά. Στην περίπτωση που το μήκος του ενθέτου είναι μεγαλύτερο από το πάχος του πυρήνα (εκτός ανοχών) τότε περιμετρικά του ενθέτου δεν θα υπάρχει επαρκής επαφή των δύο επιφανειών (κέλυφος με πυρήνα) επομένως θα δημιουργηθεί ασυνέχεια στη διάδοση των διατμητικών τάσεων, άρα και αυξημένη πιθανότητα αστοχίας.

Το μέγεθος και το σχήμα των ενθέτων υπολογίστηκε από την ομάδα του Μηχανολογικού Σχεδιασμού για κάθε επιμέρους περίπτωση σύνδεσης και πραγματοποιήθηκε μελέτη βελτιστοποίησης για τη μείωση του βάρους τους. Ως υλικό επιλέχθηκε το αλουμίνιο 7075 T6 και η κατασκευή τους έγινε με εργαλειομηχανή CNC καθώς και με χρήση CNC waterjet μέσω διαμορφωμένης πλάκας με εργαλειομηχανή CNC προκειμένου να εξασφαλιστεί το επιθυμητό πάχος,



Εικόνα 93. Ενθετο βάσης στήριξης αμορτισέρ

Για τον υπολογισμό των τάσεων στα σημεία εφαρμογής των ενθέτων πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω υπολογισμοί:

- Ορθές τάσεις: $\tau_{skin} = \frac{F}{A}$, όπου A = περίμετρος ενθέτου \times πάχος κελύφους
- Διατμητικές τάσεις: $\tau_{adhesive} = \frac{F}{A}$, όπου A = επιφάνεια ενθέτου $\times 2$

6 Κατασκευή

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας ανάπτυξης του πλαισίου αποτέλεσε η διαδικασία της κατασκευής κατά την οποία το υπό μελέτη πλαίσιο μετέβη από τα σχέδια σε ένα πραγματικό κατασκευάσμα. Η διαδικασία της κατασκευής αποτέλεσε αδιαμφισβήτητα μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις της συνολικής διαδικασίας καθώς ήταν η πρώτη προσπάθεια κατασκευής carbon monocoque στην ιστορία της ομάδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ολόκληρη η διαδικασία κατασκευής για ένα τόσο σύνθετο κομμάτι έπρεπε να σχεδιαστεί από το μηδέν, να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητά της και στη συνέχεια να υλοποιηθεί με επιτυχία εντός του χρονικού πλαισίου που είχε καθοριστεί.

Ως τεχνική κατασκευής επιλέχθηκε η μέθοδος του θηλυκού καλουπιού η οποία επιτρέπει την κατασκευή ενός ενιαίου κομματιού (monocoque), μια μέθοδος που εμπεριέχει πολλές

δυσκολίες και προκλήσεις αλλά επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες κατασκευαστικές μεθόδους (για παράδειγμα κατασκευή δύο ξεχωριστών κομματιών που ενώνονται ύστερα με μια ενιαία περιμετρική φλάτζα). Οι παράγοντες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην αποτυχία αυτής της διαδικασίας ήταν πολυάριθμοι με κυριότερο αυτό της μιας και μοναδικής προσπάθειας κατεργασίας θερμοσκλήρυνσης του τελικού κομματιού, κάτι που συνεπάγεται με την καταστροφή όλων των χρησιμοποιούμενων υλικών στην περίπτωση σημαντικής αστοχίας. Ωστόσο τα πλεονεκτήματα που έχει μια τέτοια μέθοδος συγκριτικά με άλλες τεχνικές την καθιστούν ως βέλτιστη επιλογή για την επίτευξη της μέγιστης συνολικής δυσκαμψίας καθώς και του ελάχιστου δυνατού βάρους.[17]

6.1 Σχεδιασμός Διαδικασίας

Αρχικό στάδιο της διαδικασίας της κατασκευής αποτέλεσε η μελέτη της βιβλιογραφίας καθώς και η διερεύνηση των απαιτούμενων γνώσεων και ικανοτήτων για μια τέτοια σύνθετη κατασκευή. Αυτό πρακτικά περιλάμβανε τη μελέτη κατασκευαστικών μεθόδων, τη συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με την κατασκευή μονοκοque από σύνθετα υλικά καθώς και τη διερεύνηση μεθόδων που ακολουθούνται από ομάδες του ίδιου διαγωνισμού. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση των ευρημάτων, ανάλυση δεδομένων και ορίστηκαν οι πρωταρχικοί στόχοι.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, για την κατασκευή του μονοκοque αποφασίστηκε η χρήση ανθρακονήματος τύπου prepreg, κατηγορία υλικού το οποίο απαιτεί θερμοσκλήρυνση σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης ενώ αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η μέθοδος του θηλυκού καλουπιού για τη δημιουργία ενός ενιαίου κομματιού. Η παραπάνω διαδικασία απαιτεί το σχεδιασμό μιας στρατηγικής προκειμένου να εξασφαλιστεί η γεωμετρική ακρίβεια του τελικού κομματιού, η αποτελεσματικότητα όλων των βημάτων καθώς και η εξοικονόμηση πόρων. Οποιαδήποτε απόκλιση από την αρχική στρατηγική μπορεί να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις οι οποίες να οδηγήσουν ακόμα και στην ολική αποτυχία.

Μερικά από τα βασικότερα στοιχεία μιας τέτοιας κατασκευαστικής μεθόδου παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Διαδικασία θερμοσκλήρυνσης**

Η κατηγορία των προεμποτισμένων υφασμάτων (prepreg) απαιτεί την πραγματοποίηση διεργασίας θερμοσκλήρυνσης προκειμένου η εποξειδική ρητίνη να αποκτήσει τις τελικές της ιδιότητες. Στην περίπτωση ενός πλαισίου αυτό πρακτικά σημαίνει πως το συνολικό κατασκεύασμα θα πρέπει να ακολουθήσει ένα συγκεκριμένο κύκλο θερμοσκλήρυνσης σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει ο κατασκευαστής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αυτοί οι κύκλοι πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες 100-150 βαθμών Κελσίου και στο τελικό κομμάτι ασκείται θετική πίεση κάθετη στις επιφάνειες του της τάξεως των 1-5 bar.

- **Διαδικασία κενού αέρος**

Η δημιουργία ενός εξαρτήματος με τόσο σύνθετη γεωμετρία δεν μπορεί να γίνει με τη μέθοδο της εφαρμογής πίεσης εξωτερικά (press molding). Αυτό σημαίνει πως το τελικό κομμάτι θα πρέπει να εισέλθει σε μια ειδική σακούλα η οποία θα περιβάλλει το υλικό και από τις δύο πλευρές και από την οποία θα αφαιρεθεί ο αέρας. Με τον τρόπο αυτό στο εσωτερικό της σακούλας θα δημιουργηθούν συνθήκες κενού αέρος και λόγω της διαφοράς πίεσης σε σχέση με αυτή της ατμόσφαιρας, θα ασκηθεί ομοιόμορφα σε όλες τις επιφάνειες πίεση περίπου 1 bar. Φυσικά για την επίτευξη αυτής της τιμής

απαιτείται η χρήση αντλίας κενού αέρος ενώ η μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτύχει θα αποτελέσει και την τελική πίεση στο εσωτερικό της σακούλας, άρα και την εφαρμοζόμενη πίεση στο τελικό κομμάτι.

- **Αρχικό καλούπι (αρσενικό)**

Λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας που έχει το τελικό θηλυκό καλούπι κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία δύο ή περισσότερων αρσενικών καλουπιών τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια. Η κατασκευή του αρχικού καλουπιού πραγματοποιείται με τη χρήση εργαλειομηχανής CNC το οποίο κατεργάζεται το επιλεγμένο υλικό προκειμένου να δημιουργήσει τη γεωμετρία του πλαισίου. Επιπλέον δημιουργούνται τα σημεία αναφοράς σύμφωνα με τα οποία θα ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους τα θηλυκά καλούπια στο επόμενο στάδιο. Κατά το στάδιο της κατασκευής του αρσενικού καλουπιού μπορεί να γίνει η επιλογή συμπληρωματικής κατεργασίας προκειμένου να δημιουργηθούν τα σημεία συναρμογής με τα υπόλοιπα υποσυστήματα εφόσον η εργαλειομηχανή διαθέτει επαρκείς άξονες κίνησης και μπορεί να παρέχει αυτή τη δυνατότητα.

Ως υλικό αρσενικού καλουπιού συνήθως επιλέγεται κάποιος εγκεκριμένος τύπος ξύλου ή κάποιο αντίστοιχο πολυμερές υλικό για τέτοιου είδους κατασκευές.

- **Τελικό καλούπι (θηλυκό)**

Ύστερα από τη δημιουργία των αρσενικών καλουπιών ακολουθεί η κατασκευή των αντιστοίχων θηλυκών καλουπιών. Τα θηλυκά καλούπια κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά με την επιλογή της χρήσης υφασμάτων ενίσχυσης από γυαλί (glass fiber) ή ανθρακόνημα (carbon fiber) να είναι οι συνηθέστερες επιλογές. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως τα θηλυκά καλούπια θα πρέπει να ακολουθήσουν κάποιο κύκλο θερμοσκλήρυνσης προκειμένου να επέλθουν στην τελική μορφή τους. Στην περίπτωση που η δημιουργία των σημείων συναρμογής καθίσταται αδύνατη κατά την κατασκευή των αρσενικών καλουπιών, τότε αυτό θα πρέπει να γίνει στα θηλυκά καλούπια ώστε τα σημεία αυτά να χρησιμοποιηθούν ύστερα για την ευθυγράμμιση όλων των σημείων συναρμογής (ανάρτηση, κινητήρας, βάσεις εξαρτημάτων). Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί πως η κατασκευή των θηλυκών καλουπιών από σύνθετα υλικά ενέχει ορισμένους κινδύνους όπως η πιθανότητα παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης, η πιθανότητα μετάβασης στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Tg) κατά τη θερμοσκλήρυνση του monocoque και η πιθανότητα αδυναμίας αποκόλλησης του τελικού κομματιού.

- **Διαστρωμάτωση**

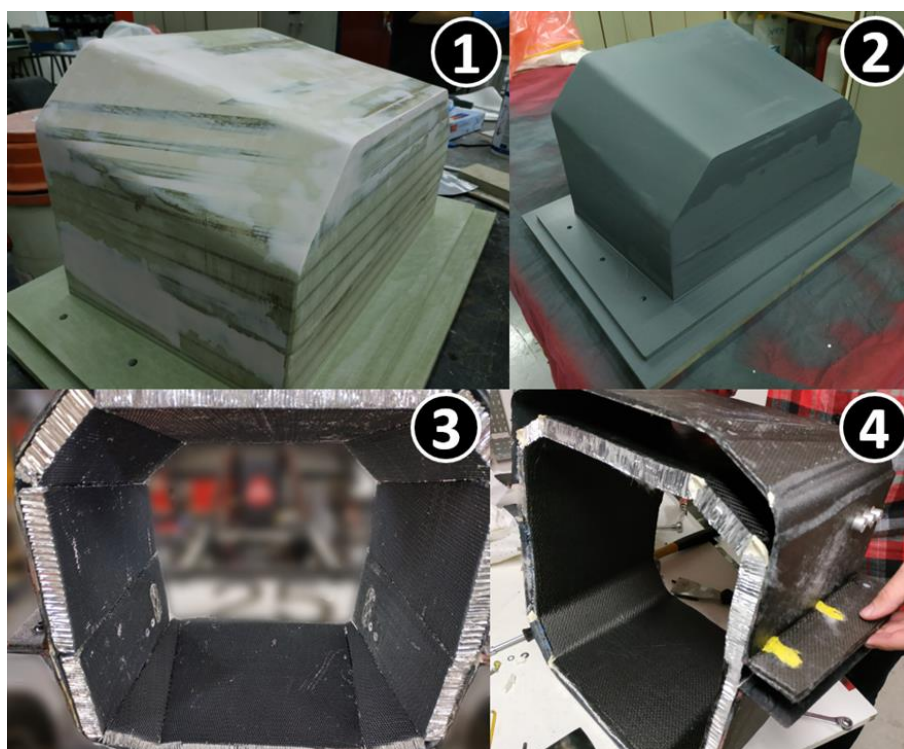
Η διαδικασία της διαστρωμάτωσης ενός ενιαίου κομματιού (πλαίσιο monocoque) στο εσωτερικό του θηλυκού καλουπιού αποτελεί μια κατασκευαστική πρόκληση λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας εφαρμόζονται όλες οι στρώσεις υφασμάτων, ο πυρήνας καθώς και τα ένθετα σύμφωνα με το προκαθορισμένο φασεολόγιο. Επιπλέον εφαρμόζονται όλα τα απαραίτητα βοηθητικά υλικά (αναλώσιμα) τα οποία απαιτούνται για τη διαδικασία της θερμικής κατεργασίας υπό την επίδραση κενού αέρος,

- **Αποκόλληση**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αρχική γεωμετρία του πλαισίου επιτυγχάνεται μέσω κατεργασίας με τη βοήθεια εργαλειομηχανής CNC. Η αρχική γεωμετρία στη συνέχεια «μεταφέρεται» στο θηλυκό καλούπι και ύστερα «μεταφέρεται» ξανά στο τελικό κομμάτι (monocoque). Κατά τη διαδικασία διαχωρισμού των θηλυκών καλουπιών από τα αντίστοιχα αρσενικά αλλά και τη διαδικασία διαχωρισμού το τελικού κομματιού

από το συναρμολογημένο θηλυκό καλούπι ενδέχεται να παρουσιαστούν δυσκολίες ή και ολική αδυναμία διαχωρισμού. Η περίπτωση τοπικής αδυναμίας διαχωρισμού μπορεί να αντιμετωπιστεί με ορισμένες μεθόδους ωστόσο η εκτεταμένη συγκόλληση καλουπιού και τελικού κομματιού μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην ολική καταστροφή και των δύο μερών.

Ύστερα από το σχεδιασμό της διαδικασίας κατασκευής αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί ένα φυσικό πείραμα μικρότερης κλίμακας ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας που σχεδιάστηκε και να εντοπιστούν τυχόν λάθη. Το φυσικό πείραμα πραγματοποιήθηκε για ένα μικρό κομμάτι του μπροστινού μέρους του πλαισίου και ακολουθήθηκαν όλα τα βήματα της διαδικασίας που σχεδιάστηκε. Κατά την πραγματοποίηση αυτού του πειράματος εντοπίστηκαν ορισμένα κατασκευαστικά λάθη το οποία διορθώθηκαν ενώ ακόμα έγιναν ορισμένες παραμετροποιήσεις σύμφωνα με τα δεδομένα που λήφθηκαν από τα βήματα αυτής της διαδικασίας.

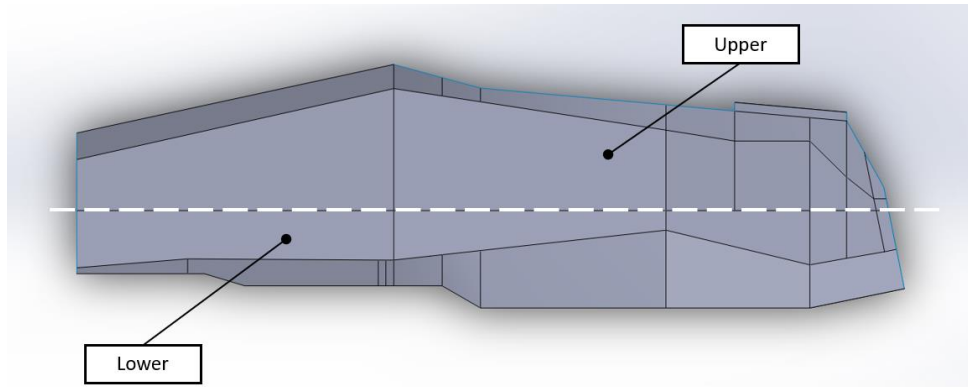


Εικόνα 94. Πραγματοποίηση φυσικού πειράματος μικρότερης κλίμακας

6.2 Σχεδιασμός και κατασκευή αρσενικού καλουπιού

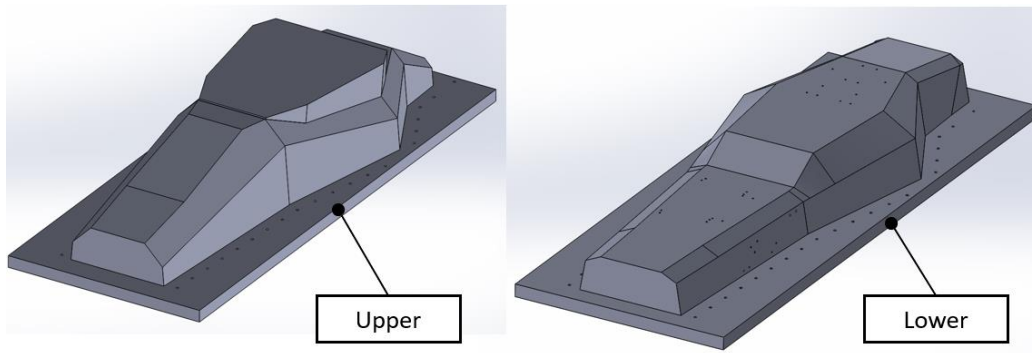
Για την ανάπτυξη των πρωταρχικών αρσενικών καλουπιών επιλέχθηκε ο διαχωρισμός της γεωμετρίας του πλαισίου κατά το διαμήκη άξονα και συγκεκριμένα κατά το επίπεδο που ορίζουν οι άξονες x και z (Εικόνα 94).

Επιπλέον κατά το σχεδιασμό της γεωμετρίας του πλαισίου, λήφθηκε υπόψη ο παράγοντας της κατασκευής και έγινε έλεγχος σε όλες τις επιφάνειες προκειμένου να διασφαλιστεί πως δεν υπάρχει κάποια αρνητική γεωμετρία που θα απέτρεπε το διαχωρισμό του τελικού κομματιού από το αντίστοιχο καλούπι.

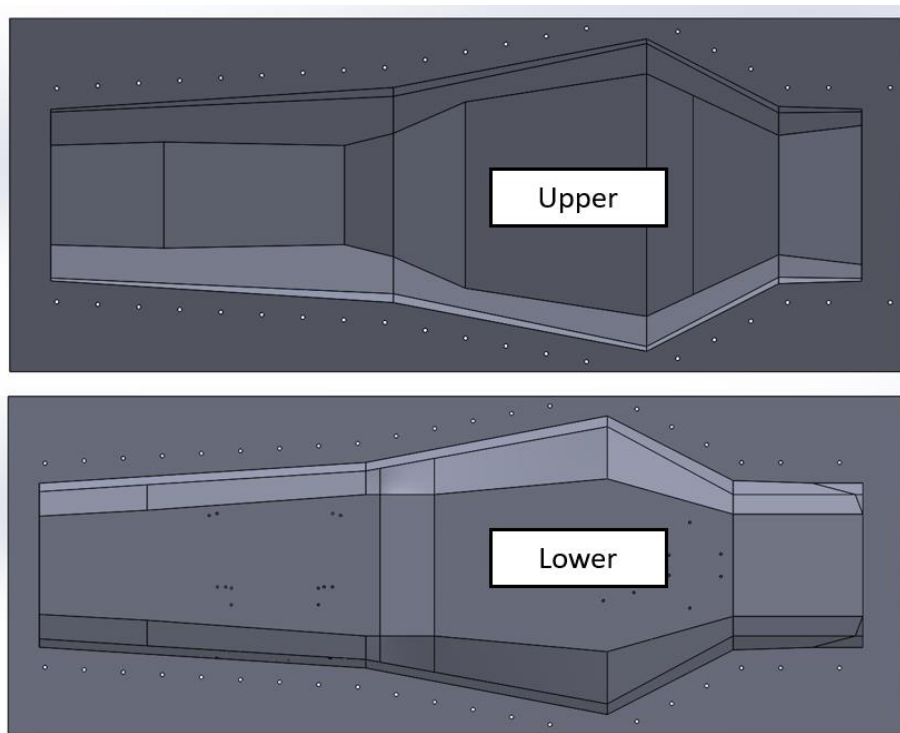


Εικόνα 95. Διαχωρισμός γεωμετρίας πλαισίου για τη δημιουργία αρσενικών καλουπιών

Στη συνέχεια κάθε επιμέρους γεωμετρία τοποθετήθηκε σε μια επίπεδη επιφάνεια, περιμετρικά της οποίας δημιουργήθηκε πλήθος οπών προκειμένου να γίνει η ευθυγράμμιση των επιμέρους θηλυκών καλουπιών στο επόμενο στάδιο της κατασκευής.



Εικόνα 96. Αρσενικά καλούπια



Εικόνα 97. Κάτοψη αρσενικών καλουπιών

Όσον αφορά το υλικό των καλουπιών, έγινε η επιλογή ξύλου MDF λόγω του χαμηλού του κόστους, της συμβατότητας με τον κύκλο θερμοσκλήρυνσης των υφασμάτων prepreg του θηλυκού καλουπιού καθώς και της ταχύτητας κατεργασίας για τη μείωση του τελικού κόστους. Η ένωση των επιμέρους ξύλων πάχους 30 χιλιοστών έγινε σε ειδική πρέσα ξυλουργείου με την οποία ασκήθηκε δύναμη περίπου 200kN. Σχετικά με την κατεργασία, η διαμόρφωση των καλουπιών έγινε σε τριαξονική φρέζα ξύλου η οποία είχε μέγιστο ύψος κατεργασίας (άξονας z) 100 χιλιοστά και για το λόγο αυτό η κατεργασία των επιμέρους καλουπιών έγινε σε ξεχωριστά κομμάτια (Εικόνα 98).



Εικόνα 98. Κατασκευή αρσενικών καλουπιών

Στη συνέχεια τα επιμέρους κομμάτια κολλήθηκαν μεταξύ τους και η ευθυγράμμιση έγινε με τη βοήθεια οπών που έγιναν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας τους, μέσα στις οποίες τοποθετήθηκαν ξύλινα τεμάχια κυλινδρικής διατομής κατά μήκος των επιμέρους κομματιών κάθε καλουπιού (Καλούπι κάτω μέρος: 3 κομμάτια, καλούπι πάνω μέρος: 4 κομμάτια). Για την αποτελεσματική κόλληση των επιμέρους κομματιών κάθε καλουπιού, κάθε ένα από τα δύο καλούπια τοποθετήθηκε σε σακούλα κενού προκειμένου να ασκηθεί η απαιτούμενη κάθετη πίεση κατά τη διάρκεια της κόλλησής τους.

Ύστερα αφού διορθώθηκαν κατασκευαστικές ατέλειες τα δύο καλούπια καλύφθηκαν με εποξειδικό χρώμα υψηλής θερμικής αντοχής και πραγματοποιήθηκε στίλβωση μέχρι τη βαθμίδα τραχύτητας 6000 grit.



Εικόνα 99. Επιδιόρθωση και βαφή αρσενικών καλουπιών



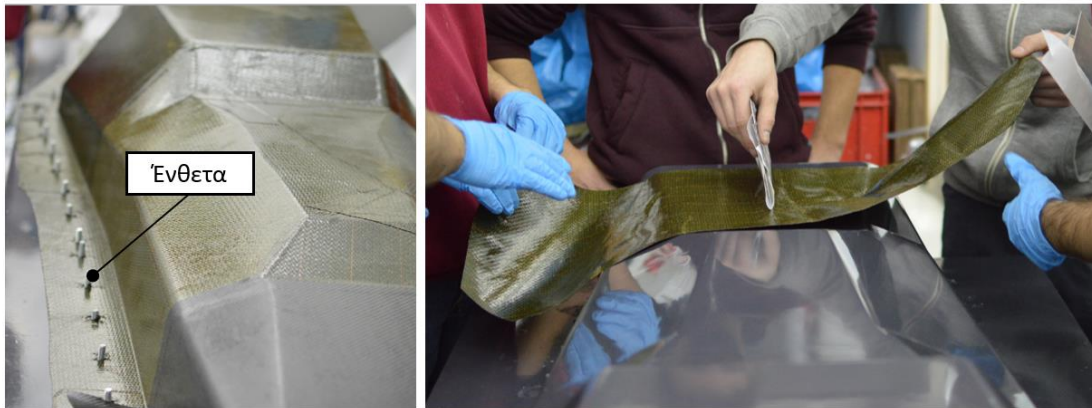
Εικόνα 100. Φινίρισμα αρσενικών καλουπιών

6.3 Κατασκευή θηλυκού καλουπιού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το θηλυκό καλούπι αποτελεί το δεύτερο στάδιο της κατασκευής μετά την κατασκευή του αρσενικού καλουπιού. Για την κατασκευή του θηλυκού καλουπιού έγινε η χρήση υφασμάτων τύπου prepreg ενώ ακόμα χρησιμοποιήθηκε PVC πυρήνας κατασκευών sandwich μεταξύ των υφασμάτων προκειμένου να αυξηθεί η ακαμψία του καλουπιού. Με την κατασκευή ενός καλουπιού τύπου sandwich, επιτεύχθηκε πρακτικά η αύξηση της στιβαρότητας του καλουπιού χωρίς ωστόσο να απαιτηθούν περισσότερες στρώσεις υφασμάτων, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους υλικών του καλουπιού κατά περίπου 85%.

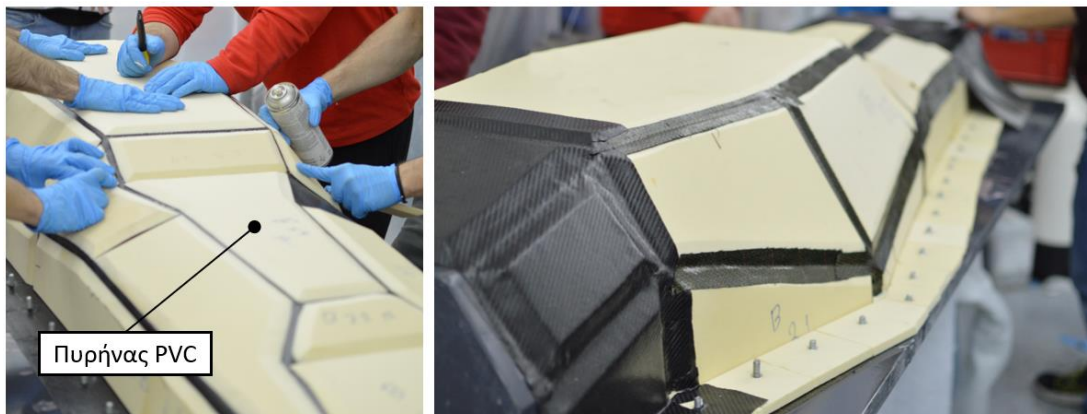
Προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της κατασκευής του θηλυκού καλουπιού, το αρσενικό καλούπι θα πρέπει να καλυφθεί με αποκολλητικό παράγοντα προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική αποκόλληση. Για την επίτευξη αυτού του στόχου επιλέχθηκε συνδυασμός αποκολλητικού κεριού (Spacewax 300) και υλικού PVA (Scott Bader Release Agent), το οποίο κατά την εφαρμογή του δημιουργεί ένα λεπτό φιλμ το οποίο αποτελεί ένα φυσικό διαχωριστικό εμπόδιο μεταξύ του αρσενικού και του υπό κατασκευή θηλυκού καλουπιού. Με τη χρήση του υλικού PVA στην επιφάνεια διαστρωμάτωσης, έγινε ο συμβιβασμός μεταξύ μιας ήπιας υποβάθμισης της επιφάνειας του θηλυκού καλουπιού αλλά και της εξασφάλισης μιας αποτελεσματικής αποκόλλησης.

Το επόμενο στάδιο της κατασκευής του θηλυκού καλουπιού είναι η τοποθέτηση των ενθέτων στις οπές ευθυγράμμισης και της τοποθέτησης των αρχικών υφασμάτων. Για τις αρχικές στρώσεις πραγματοποιήθηκαν αρκετά φυσικά πειράματα και αποδείχθηκε πως υφάσματα τύπου prepreg με υψηλή περιεκτικότητα σε ρητίνη προσφέρουν μια καλύτερη επιφάνεια με χαμηλότερο πορώδες. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να “θυσιαστούν” μερικά τετραγωνικά μέτρα από το υλικό της κατασκευής του monocoque προκειμένου να εξασφαλιστεί μια ικανοποιητική επιφάνεια στο θηλυκό καλούπι. Για τις επόμενες στρώσεις επιλέχθηκε ένα ήδη υπάρχον ύφασμα prepeg (Hexcel Hexply M49) με ανάλογο κύκλο θερμοσκλήρυνσης και παραπλήσια θερμική διαστολή προκειμένου να εξασφαλιστεί η συμβατότητα μεταξύ τους.

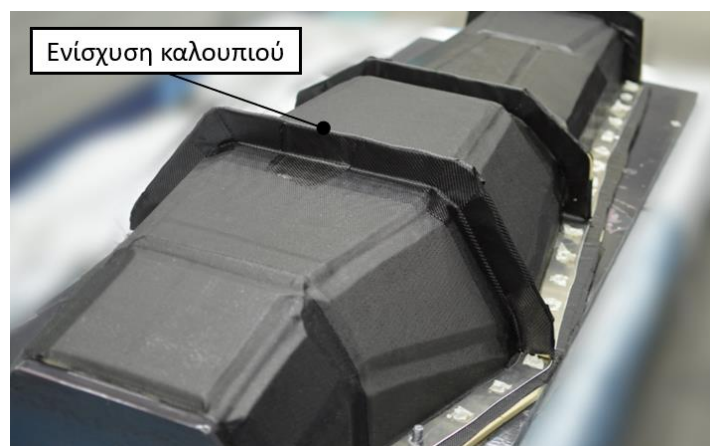


Εικόνα 101. Διαστρωμάτωση θηλυκού καλουπιού

Τέλος για την περαιτέρω αύξηση της στιβαρότητας του θηλυκού καλουπιού τοποθετήθηκαν ενισχυτικά κομμάτια sandwich από το ίδιο υλικό περιμετρικά της γεωμετρίας του.



Εικόνα 102. Διαστρωμάτωση και εφαρμογή πυρήνα στο θηλυκό καλούπι



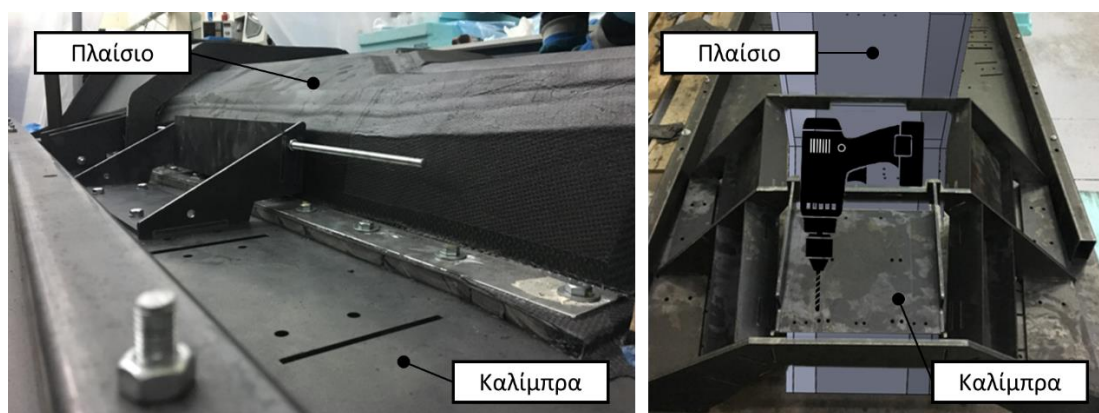
Εικόνα 103. Ενισχυτικά μέρη θηλυκού καλουπιού

Για τη διαστρωμάτωση του θηλυκού καλουπιού δεν ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία προσανατολισμού των στρώσεων καθώς δεν το συγκεκριμένο κομμάτι δεν θα παραλάβει υψηλά φορτία από την πίεση που δέχεται λόγω της σακούλας κενού κατά τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης.

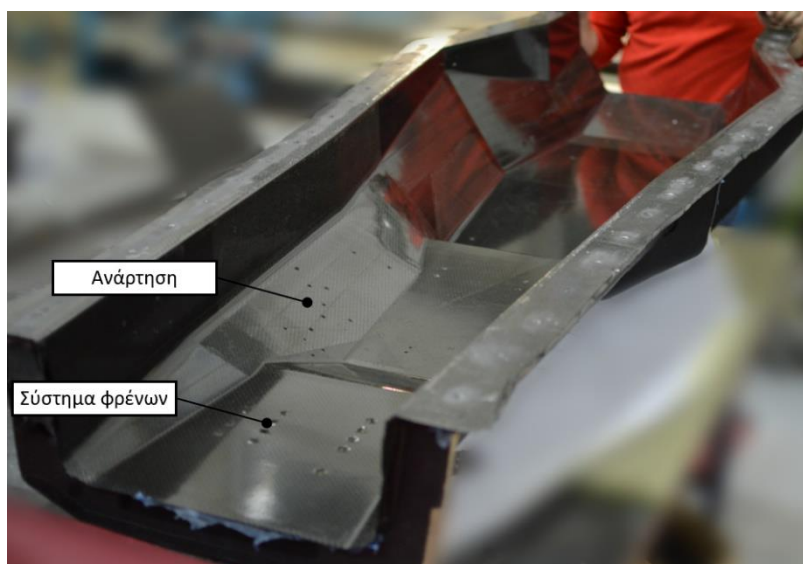
Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε εμπειρικά η ακόλουθη διαστρωμάτωση:

Εξωτερικό κέλυφος 3 στρώσεις – Πυρήνας 10 χιλιοστών – Εσωτερικό κέλυφος 3 στρώσεις

Ύστερα από την τοποθέτηση όλων των στρώσεων, τα κομμάτια τοποθετήθηκαν σε σακούλα κενού και ακολούθησε η διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης. Τελικά για την προσθήκη των σημείων συναρμογής με την ανάρτηση και τα υπόλοιπα υποσυστήματα, τα θηλυκά καλούπια τοποθετήθηκαν σε μια χαλύβδινη κατασκευή (καλίμπρα) που σχεδιάστηκε από την ομάδα του Μηχανολογικού Σχεδιασμού και κατασκευάστηκε με κοπές laser υψηλής ακρίβειας δημιουργώντας ένα παζλ τριών διαστάσεων. Τα επιμέρους κομμάτια αυτής της κατασκευής περιείχαν οπές που αντιπροσώπευαν τις θέσεις των σημείων των υπολοίπων συστημάτων (ανάρτηση, κινητήρας, αεροδυναμική) και έτσι τελικά πραγματοποιήθηκε η διάτρηση του θηλικού καλουπιού στα επιμέρους σημεία αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε η ακριβής θέση των επιμέρους σημείων στο χώρο, ασχέτως της



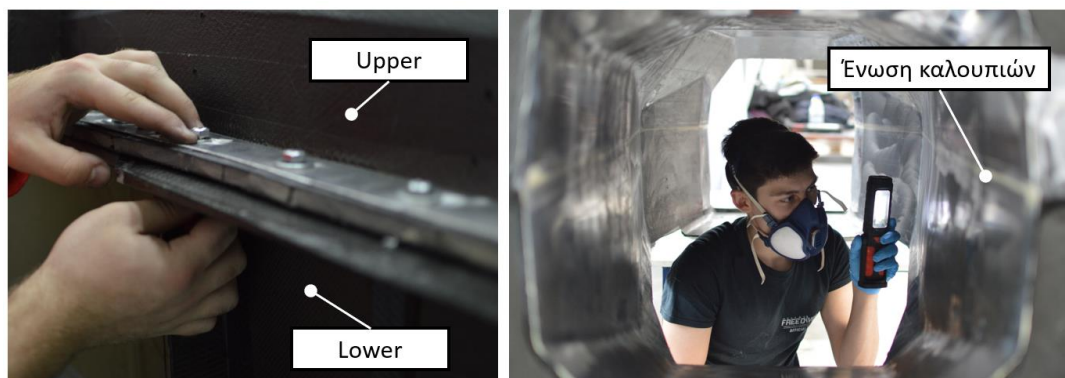
Εικόνα 104. Μεθοδολογία διάτρησης θηλικών καλουπιών



Εικόνα 105. Θηλυκό καλούπι με οπές για τη μεταφορά των σημείων συναρμογής στο τοποσοφίε

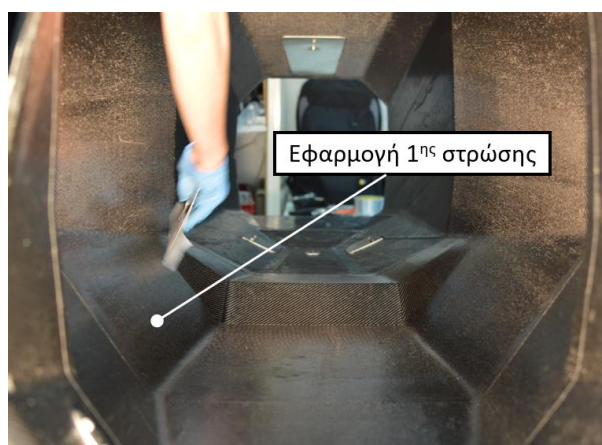
6.4 Διαστρωμάτωση μονocoque

Μετά τη την ολοκλήρωση της διάτρησης των θηλυκών καλουπιών έγινε η ένωση των δύο κομματιών με τη βοήθεια των οπών ευθυγράμμισης περιμετρικά της γεωμετρίας του πλαισίου. Για την ένωση των δύο κομματιών χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M8 ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τοπική επιδιόρθωση του σημείου ένωσης εσωτερικά των δύο καλουπιών με χρήση πολυεστερικού στόκου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στίλβωση ολόκληρης της εσωτερικής επιφάνειας του ενιαίου πλέον καλουπιού και εφαρμόστηκαν 5 στρώσεις ημιμόνιμου σφραγιστικού καλουπιού (Jost Chemicals Mold Sealer S31) και 5 στρώσεις αποκολλητικού κεριού (Spacewax 300).



Εικόνα 106. Ένωση θηλυκών καλουπιών

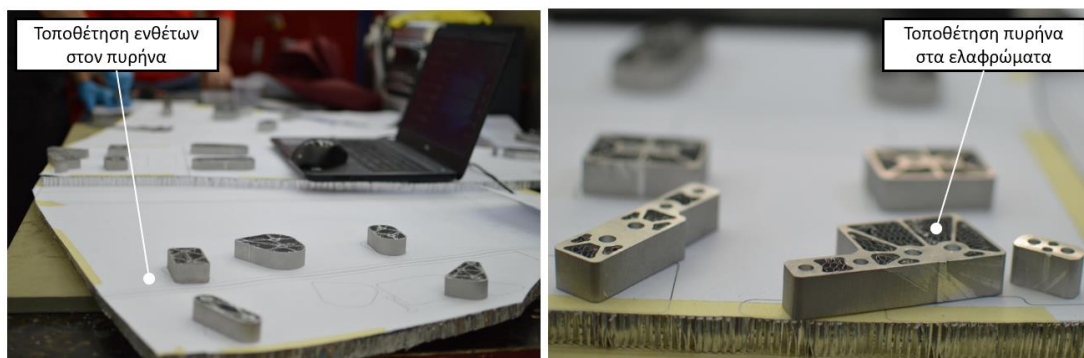
Μετά την εφαρμογή των αποκολλητικών υλικών ξεκίνησε η διαδικασία της τοποθέτησης των υφασμάτων του εξωτερικού κελύφους. Όλα τα υφάσματα για κάθε επιμέρους περιοχή κόπηκαν σε CNC μηχάνημα κοπής λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία των ινών. Μετά την εφαρμογή της πρώτης στρώσης ολόκληρο το καλούπι μπήκε σε σακούλα κενού προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή και τοποθέτηση της εξωτερικής στρώσης την επιφάνεια του καλουπιού. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για τις στρώσεις 2 & 3 και ύστερα για τις στρώσεις 4 & 5.



Εικόνα 107. Εφαρμογή 1ης στρώσης εξωτερικού κελύφους

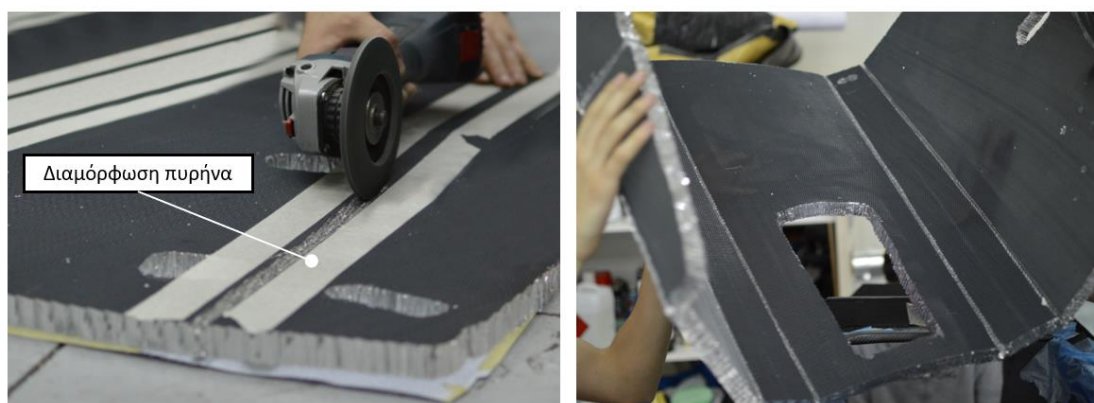
Στη συνέχεια ακολούθησε η τοποθέτηση του πυρήνα και των ενθέτων. Αρχικά τοποθετήθηκαν όλα τα ένθετα στα αντίστοιχα κομμάτια του πυρήνα με τη χρήση εκτυπωμένων σχεδίων

πραγματικών διαστάσεων. Για την τοποθέτηση των ενθέτων έγινε αποκοπή μέρους του πυρήνα προκειμένου να εισχωρήσουν σε αυτόν και να παραμείνουν στην τελική τους θέση.



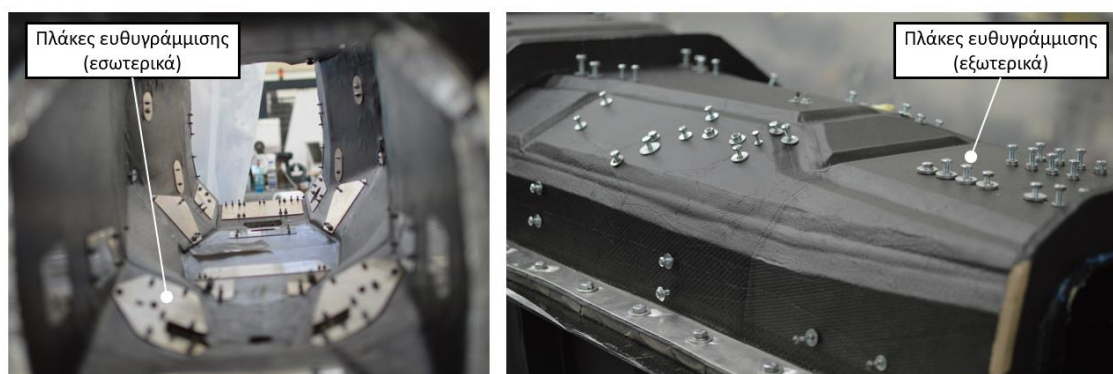
Εικόνα 108. Τοποθέτηση ενθέτων στον πυρήνα

Για την τοποθέτηση του πυρήνα πραγματοποιήθηκε μορφοποίηση προκειμένου να λυγίσει και να ακολουθήσει τις σύνθετες γεωμετρίες του πλαισίου χωρίς να χρειαστεί να διαχωριστεί σε μικρότερα μέρη μιας και κάτι τέτοιο θα δυσκόλευε την τοποθέτηση και ευθυγράμμισή του.



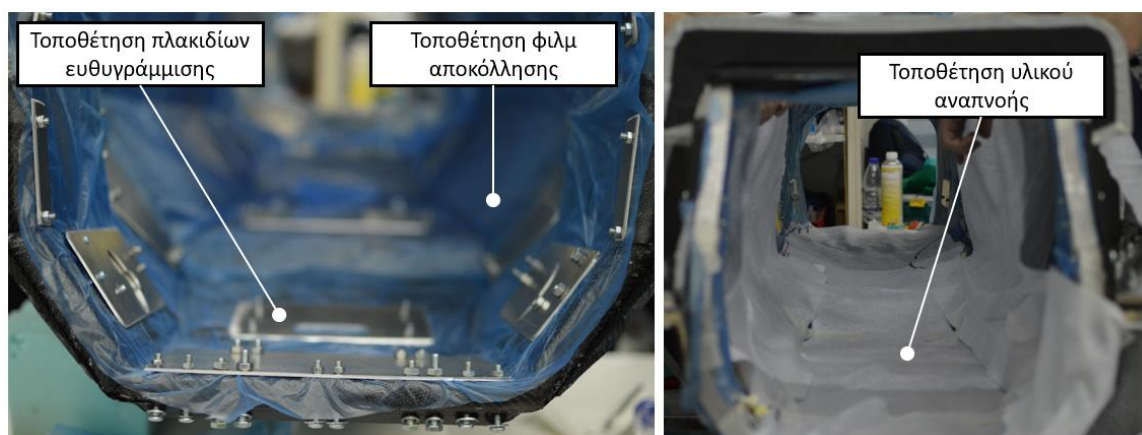
Εικόνα 109. Διαμόρφωση πυρήνα αλουμινίου

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε η πρώτη εσωτερική στρώση και επαναλήφθηκε η διαδικασία τοποθέτησης όλου του καλουπιού σε κενό (στρώσεις 3 & 4 και 4 & 5) προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική τοποθέτηση και εφαρμογή των στρώσεων. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν ειδικά πλακίδια αλουμινίου διαμορφωμένα με CNC waterjet προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακριβής τοποθέτηση όλων των ενθέτων και να επιτραπεί η αποτελεσματική άσκηση πίεσης περιμετρικά των κοχλιών.



Εικόνα 110. Πλακίδια ευθυγράμμισης ενθέτων

Μετά την τοποθέτηση όλων των υφασμάτων πραγματοποιήθηκε λεπτομερείς έλεγχος για τυχόν ατέλειες και ύστερα έγινε η τοποθέτηση του ειδικού φιλμ αποκόλλησης καθώς και των πλακιδίων ευθυγράμμισης των ενθέτων. Τέλος τοποθετήθηκε το υλικό αναπνοής το οποίο έχει διπλή λειτουργία σε μια κατασκευή σύνθετου υλικού. Αρχικώς επιτρέπει την απομάκρυνση του εναπομείναντα αέρα στην περίπτωση που παγιδευτεί αέρας μεταξύ της σακούλας και άλλων επιφανειών στο εσωτερικό της ενώ ακόμα προστατεύει την ευαίσθητη σακούλα από τυχόν φθορές λόγω αιχμηρών ακμών στο εσωτερικό της.



Εικόνα 111. Τοποθέτηση πλακιδίων ευθυγράμμισης ενθέτων

Τέλος το ενιαίο καλούπι εισήλθε στη σακούλα τύπου «σωλήνα», σφραγίστηκε και αφαιρέθηκε όλος ο αέρας με τη βοήθεια αντλίας κενού φτάνοντας στην τιμή πίεσης των 0.05 bar. Αφού έγινε ενδελεχής έλεγχος για τυχόν σχισμές, η σακούλα με το καλούπι μπήκε στον ειδικό φούρνο και πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης στους 85 βαθμούς κελσίου, με βήμα αύξησης 1 βαθμό το λεπτό και συνολική διάρκεια διεργασίας 16 ωρών.

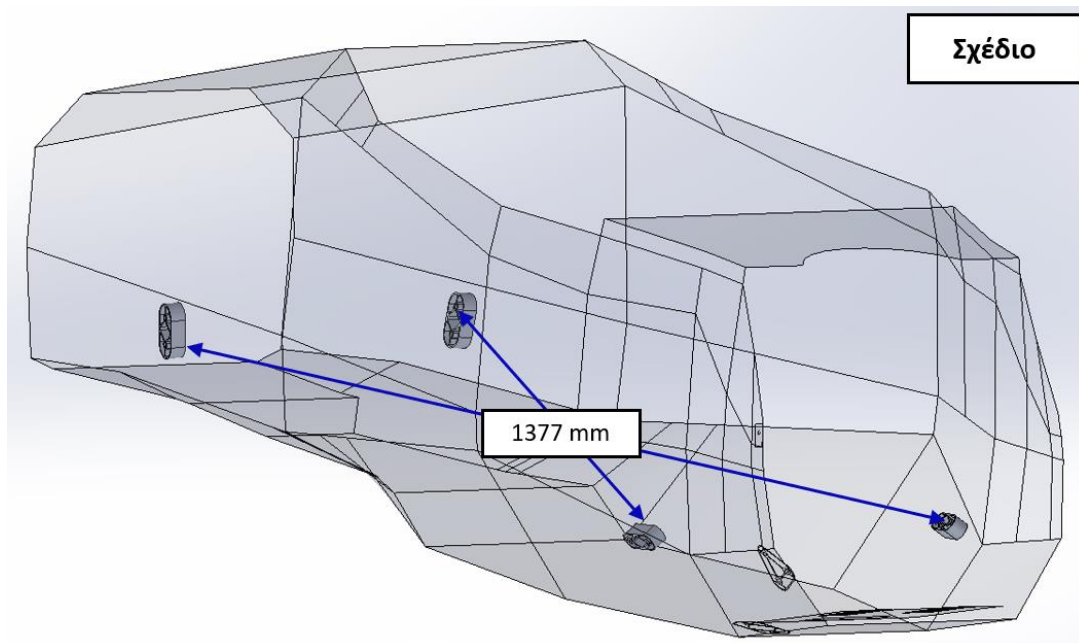


Εικόνα 112. Κατασκευή σακούλας και εφαρμογή κενού αέρος στο εσωτερικό της (Πίεση 0.05 bar)

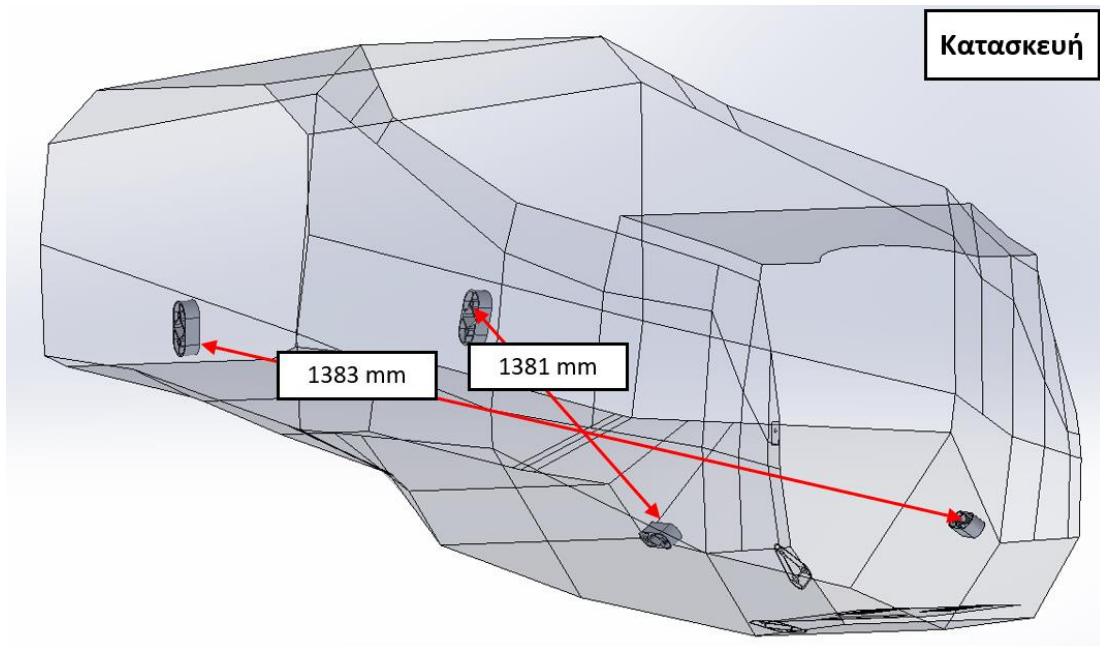


Εικόνα 113. Τοποθέτηση του θηλικού καλούπιού στον ειδικό φούρνο για τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης

Ύστερα από τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης, αποσυναρμολογήθηκε το θηλικό καλούπι και πραγματοποιήθηκε με επιτυχία η αποκόλληση του μονοκορμ από αυτό. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ενδελεχής έλεγχος για τυχόν ατέλειες ή αστοχίες τόσο με οπτικό έλεγχο όσο και με πλήθος πειραματικών μετρήσεων μεταξύ των σημείων συναρμογής (ανάρτηση, κινητήρας, αεροδυναμικό πακέτο) προκειμένου να εντοπιστούν αποκλίσεις από τα σχέδια. Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, δεν εντοπίστηκε αξιοσημείωτη απόκλιση μεταξύ των σημείων της ανάρτησης. Η μέγιστη απόκλιση που μετρήθηκε μεταξύ αντιδιαμετρικών ενθέτων της ήταν 4 και 6 χιλιοστά αντίστοιχα.

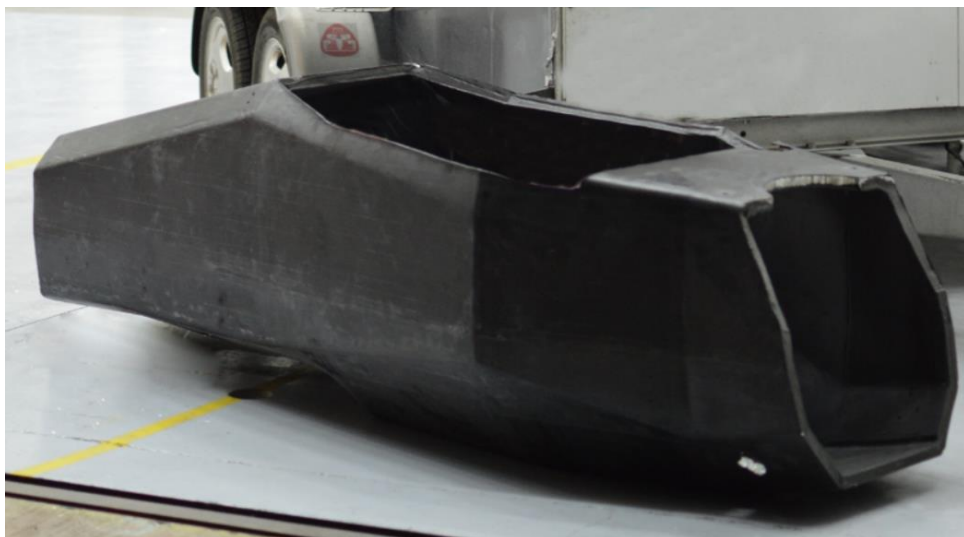


Εικόνα 114. Απόσταση μεταξύ σημείων της ανάρτησης (Σχέδιο)



Εικόνα 115. Μετρούμενη απόσταση μεταξύ σημείων της ανάρτησης (Κατασκευή)

Το βάρος του τελικού κομματιού ανήλθε στα 18.8 κιλά, παρουσιάζοντας μια μικρή αύξηση κατά 4% σε σχέση με το βάρος που υπολογίστηκε κατά την αρχική μελέτη ωστόσο η μικρή αυτή διαφορά δικαιολογείται λόγω μικρών αποκλίσεων που υπήρξαν κατά τη διαδικασία της κατασκευής.



Εικόνα 116. Μοποσοque μετά το διαχωρισμό από το καλούπι

7 Συμπεράσματα και μελλοντική μελέτη

7.1 Συμπεράσματα

Στην ανωτέρω εργασία παρουσιάστηκε η αναλυτική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετηθεί και να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο τύπου monopocoque για μια δεδομένη γεωμετρία πλαισίου. Η συνολική διαδικασία της ανάπτυξης του πλαισίου ολοκληρώθηκε με επιτυχία και η ομάδα της Prom Racing απέκτησε το πρώτο όχημα με πλαίσιο τύπου carbon monopocoque στην ιστορία της. Συγκριτικά με τις αρχικές εκτιμήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία του πρωταρχικού σχεδιασμού, υπήρξε σύγκλιση με τα βασικά χαρακτηριστικά τόσο της διαδικασίας μελέτης και κατασκευής όσο και του πλαισίου. Ο συνολικός χρόνος μελέτης και κατασκευής ανήλθε περί τους τρεις μήνες, το καθαρό κόστος κατασκευής έφτασε περίπου τις €3500 (χωρίς να περιλαμβάνεται το κόστος των φυσικών πειραμάτων, το κόστος των υφασμάτων prepreg και το κόστος της κατεργασίας των αρσενικών καλουπιών) ενώ τα κυριότερα χαρακτηριστικά του πλαισίου όπως το βάρος (18.8 κιλά) και η γεωμετρική ακρίβεια δεν παρουσίασαν αξιοσημείωτη απόκλιση σε σχέση με τις τιμές που υπολογίστηκαν αρχικώς. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτέλεσαν εξαιρετική αναβάθμιση σε σχέση με το πλαίσιο που σχεδίασε και κατασκεύασε η ομάδα την προηγούμενη σεζόν καθώς επιτεύχθηκε αύξηση στο λόγο ακαμψίας προς βάρος του πλαισίου κατά περίπου 135%. Η παραπάνω αύξηση αντικατοπτρίζεται από την αγωνιστική απόδοση που έφεραν τα δύο οχήματα ενώ η βελτίωση αυτού του λόγου επιβεβαιώθηκε και από τους έμπειρους οδηγούς της ομάδας οι οποίοι αξιολόγησαν την αγωνιστική συμπεριφορά των δύο οχημάτων. Επιπλέον μέσα από μια τέτοια διαδικασία μελέτης και κατασκευής, αποκτήθηκε σημαντική γνώση για τον τομέα των σύνθετων υλικών τόσο σε ατομικό αλλά όσο και σε συλλογικό επίπεδο ενώ η καταγραφή της γνώσης που προέκυψε σε όλη αυτή την πορεία αποτέλεσε κρίσιμο «σκαλοπάτι» για την εξέλιξη της ομάδας της Prom Racing. Το αγωνιστικό όχημα P19 για το οποίο εκπονήθηκε η συγκεκριμένη μελέτη συμμετείχε σε 3 ευρωπαϊκούς διαγωνισμούς και πραγματοποίησε περισσότερες από 50 ώρες δοκιμών και αγώνων χωρίς να επέλθει κάποια αστοχία στο πλαίσιο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως όλοι οι θεωρητικοί υπολογισμοί καθώς και η διαδικασία της κατασκευής χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα.

7.2 Μελλοντική μελέτη

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του πλαισίου εντοπίστηκαν προβλήματα και έγιναν λάθη τα οποία όμως συνέβαλαν στη βελτίωση και την απόκτηση γνώσης και εμπειρίας. Ξεκινώντας από τη διαδικασία του σχεδιασμού, σε μελλοντικές μελέτες κρίνεται σκόπιμο να συμπεριληφθούν παράμετροι που δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα μελέτη. Τέτοιες παράμετροι είναι η επίδραση της γωνίας του πυρήνα αλουμινίου στην αντοχή του τελικού υλικού, η επίδραση της γωνίας των υφασμάτων (διαστρωμάτωση κελύφους) στην περίπτωση σύγκρουσης, η επίδραση της θερμοκρασίας στην μεταβολή της δυσκαμψίας του πλαισίου λόγω των θερμικών ιδιοτήτων της μήτρας και η περαιτέρω μελέτη της διαστρωματικής αντοχής μεταξύ πυρήνα και κελύφους. Επιπλέον κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί το όφελος από την προσθήκη υφασμάτων μονής διεύθυνσης (UD) προκειμένου να αυξηθεί η δυσκαμψία τοπικά στα σημεία που καθίσταται αναγκαίο. Όσον αφορά την κατασκευή, προτείνεται η μελέτη διαφορετικών στρατηγικών διαστρωμάτωσης και θερμοσκλήρυνσης όπως για παράδειγμα η ξεχωριστή θερμοσκλήρυνση του εξωτερικού κελύφους ώστε να διαπιστωθούν τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες μεταξύ κελύφους και πυρήνα. Τέλος καθίσταται απαραίτητη η δημιουργία διάταξης φυσικού πειράματος στρεπτικής δυσκαμψίας προκειμένου να βρεθεί το ποσοστό σφάλματος σε σχέση με την τιμή που υπολογίστηκε μέσω των προσομοιώσεων.

Βιβλιογραφία

- [1] “FS-Rules_2019_V1.1”.
- [2] “www.formula1-dictionary.net/monocoque”.
- [3] M. Hagan, J. Rappolt, J. Waldrop, J. D. Mello, J. Fabijanic, and S. Rowe, “Formula SAE Hybrid Carbon Fiber Monocoque/ Steel Tube Frame Chassis for the Cal Poly Formula SAE Team Formula Chassis Works Senior Project,” 2014.
- [4] D. Gay, S. V. (Suong V.) Hoa, and S. W. Tsai, *Composite materials : design and applications*. CRC Press, 2003.
- [5] K. J. Ahn, J. C. Seferis, T. Pelton, and M. Wilhelm, “Analysis and Characterization of Prepreg Tack.”
- [6] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*. Taylor & Francis, 2006.
- [7] K. K. Chawla, *Composite materials: Science and engineering, third edition*. Springer New York, 2012.
- [8] B. CASTANIE, C. BOUVET, and M. Ginot, “Review of composite sandwich structure in aeronautic applications,” *Composites Part C: Open Access*, vol. 1. Elsevier B.V., Aug.
- [9] C. L. Tsai and I. M. Daniel, “Determination of in-plane and out-of-plane shear moduli of composite materials,” *Exp Mech*, vol. 30, no. 3, pp. 295–299, Sep. 1990, doi: 10.1007/BF02322825.
- [10] A. Petras, “Design of Sandwich Structures,” 1998.
- [11] “Competition Car Composites Kopie”.
- [12] J. D. G. van Kerkhoven, “Design of a Formula Student race car chassis,” 2008.
- [13] “MTM ® 28 SERIES PREPREG MTM ® 28 SERIES PREPREG MTM ® 28 SERIES.”
- [14] E. Madenci and I. Guven, *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*, second edition. Springer US, 2015.
- [15] “Finite Element Analysis Of Composite Laminates Kopie”.
- [16] “ADVANCED MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS.”
- [17] G. Akovali, *Handbook of composite fabrication*. Rapra Technology Ltd, 2001.