ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ

ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ»

«Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems”

‹‹Σχεδιασμός και Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων του κάτω Βραχίονα Ανεξάρτητης Ανάρτησης με Διπλά Ψαλίδια από Σύνθετο Υλικό εποξειδικής ρητίνης, ενισχυμένης με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης››

Διπλωματική Εργασία
που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων
από τον

Γεώργιο Κωττά του Φωτίου.

Σεπτέμβριος 2020

ΕΝΤΥΠΟ ΣΤ: Εσώφυλλο & Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα Copyright

ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ

Γενικό Τμήμα

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ»

«Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems »

‹‹Σχεδιασμός και Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων του κάτω Βραχίονα Ανεξάρτητης Ανάρτησης με Διπλά Ψαλίδια από Σύνθετο Υλικό εποξειδικής ρητίνης, ενισχυμένης με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης››

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Γενικό Τμήμα του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών

ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

από τον

Γεώργιο Κωττά του Φωτίου.

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα Copyright

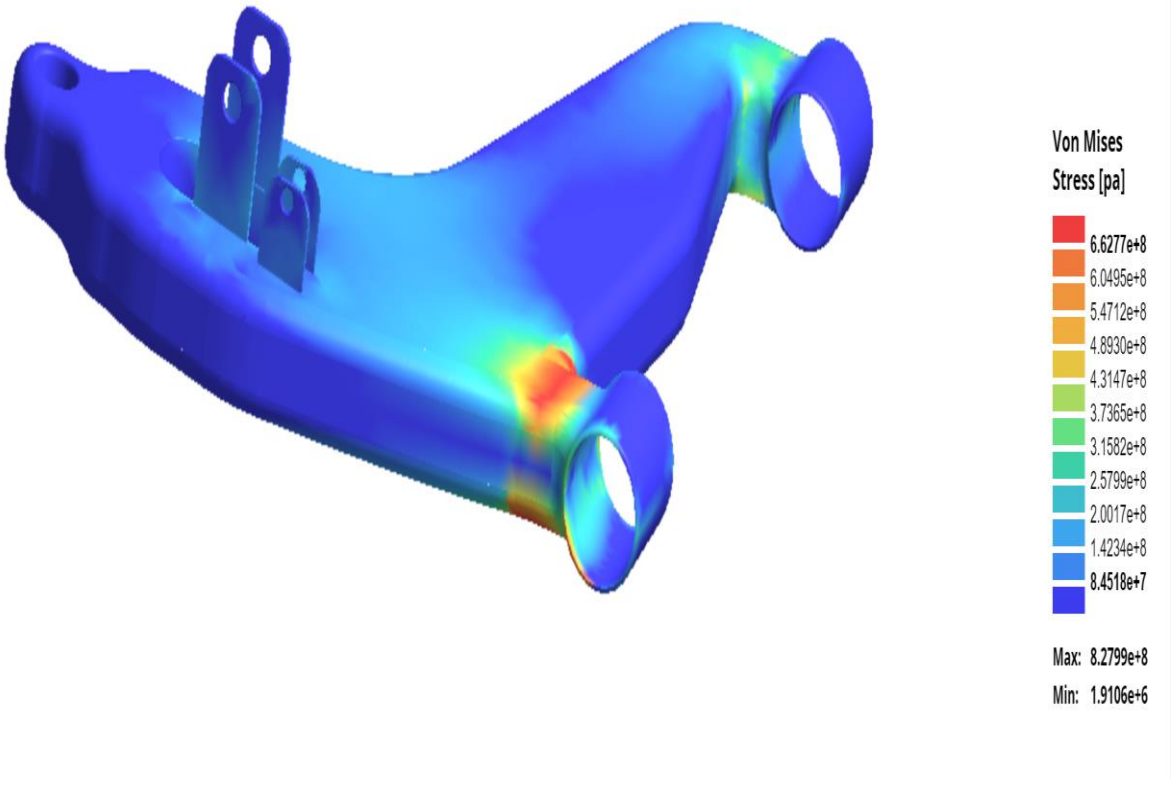
«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».
(θέση υπογραφής Μ.Φ)

Σεπτέμβριος 2020

ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ
Γενικό Τμήμα
ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‹‹Σχεδιασμός και Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων του κάτω Βραχίονα Ανεξάρτητης Ανάρτησης με Διπλά Ψαλίδια από Σύνθετο Υλικό εποξειδικής ρητίνης, ενισχυμένης με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης››



Σπουδαστής: Γεώργιος Κωττάς

Επιβλέπων:_Δρ. Μηχ. Στυλιανός Μαρκολέφας Επίκουρος Καθηγητής

Σεπτέμβριος 2020

Σελίδα Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

«Η παρούσα διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Γ.Σ.Ε.Σ. του Γενικού Τμήματος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σύμφωνα με τον νόμο και τον εγκεκριμένο οδηγό σπουδών του ΠΜΣ «Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων». Τα μέλη της επιτροπής ήταν:

1	*Δρ. Μηχ. Μαρκολέφας Στυλιανός Επίκουρος Καθηγητής*	*(Επιβλέπων)*
2	*Δρ. Μηχ. Φατσής Αντώνιος*	*(Μέλος)*
3	*Δρ. Μηχ. Κριμπένης Αγαθοκλής*	*(Μέλος)*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Γενικό Τμήμα. του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστήμιου Αθηνών, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Στυλιανό Μαρκολέφα που μου έδωσε την ευκαιρία να υλοποιήσουμε το θέμα της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς και για την ουσιώδη και σημαντική καθοδήγησή του. Με την ίδια θέρμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους καθηγητές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα, κ.κ. Αντώνιο Φατσή και Αγαθοκλή Κριμπένη για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Παναγιώτη Ασημακόπουλο, Κωνσταντίνο Τουρκοχωρίτη, Μάρκο Χρυσικό και Ηλία Διαμαντόπουλο για την συνεργασία που είχαμε καθ΄ όλη τη διάρκεια της φοίτησής μας, καθώς επίσης και για τη διευκόλυνση που μου παρείχαν σε σχέση με τη μεταφορά μου από την πόλη των Αθηνών προς τη Χαλκίδα, ώστε να καταφέρνω να είμαι πάντοτε συνεπής στην υποχρέωσή μου να προσέρχομαι εγκαίρως στις εγκαταστάσεις του Τεχνολογικού Ιδρύματος προκειμένου να παρακολουθήσω τις παραδόσεις των μαθημάτων του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου, κ. Ιωάννα Γκαράγκου, για τη στήριξη που μου παρείχε καθ’ όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος και ιδιαίτερα κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ευχόμενος να είναι πάντα δίπλα μου για να μου δίνει δύναμη σε κάθε εγχείρημα της ζωής μου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό να διερευνήσει αν η κατασκευή κάτω βραχίονα ανάρτησης από χυτό ανθρακόνημα (carbon fiber forged composite material), μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη αντοχή σε καταπονήσεις σε σχέση με άλλα υλικά, καθώς και μειωμένο βάρος, με στόχο την ευρεία χρήση του σε οχήματα μαζικής παραγωγής.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τα εξής στάδια.

1. Αρχικά, σχεδιάστηκε ο κάτω βραχίονας ανεξάρτητης ανάρτησης αυτοκινήτου της εταιρίας Mazda, μοντέλο MX5, με τη βοήθεια του λογισμικού Onshape και SolidWorks.

2. Για την κατασκευή της βραχίονα ανάρτησης επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά υλικά με κριτήρια την αυξημένη αντοχή και το μικρό βάρος:

   i. αλουμίνιο 6063-T83,

   ii. κραματούχος χάλυβας 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο), γνωστός ως χρωμόλη,

   iii. σφυρήλατο σύνθετο υλικό (εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με κοντές δέσμες ινών άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης ή χυτό σφυρήλατο ανθρακόνημα - forged composite material).

3. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές του κάτω βραχίονα ανάρτησης για κάθε υλικό κατασκευής, σε καταπονήσεις φρεναρίσματος και σε καταπονήσεις εγκάρσιων δυνάμεων.

4. Κατά το τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Λέξεις κλειδιά: ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, τάσεις, παραμορφώσεις, σύνθετα υλικά, χυτό σφυρήλατο ανθρακόνημα.

Abstract

The scope of the study is to investigate whether the manufacturing of a forged composite material Lower Control Arm of a Double Wishbone Independent Suspension can induce a higher strength in stress/strain resistance than in other materials. The final goal is to use the forged composite material technology in mass production vehicles.

The following steps were followed to achieve the goals of the study.

1. Initially, the Lower Control Arm of a Double Wishbone Independent Suspension of a Mazda, model MX5 automobile was designed in Onshape and SolidWorks software.

2. Three different materials meeting the criteria of high strength and low weight were selected for the manufacturing of the component.

    i. aluminum 6063-T83,

    ii. alloy steel 4130 (chromium – molybdenum), often referred to as chromoly steel,

    iii. forged composite material (carbon fiber reinforced epoxy resin matrix composite or carbon fiber forged composite material).

3. The lower control arm component was tested for each material, in braking and in transverse (lateral) loading conditions.

4. During the last stage, comparisons and analysis of the results were made that led to conclusions.

Keywords: Finite element analysis, stresses, strains, composite materials, carbon fiber forged composite material

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες 2

Περίληψη 3

Abstract 4

Πίνακας Περιεχομένων 5

Κατάλογος Εικόνων 7

Κατάλογος Διαγραμμάτων 9

Κατάλογος Πινάκων 10

Κατάλογος Συμβόλων 11

1 Πρόλογος 13

1.1 Εισαγωγή 13

1.2 Η εταιρεία Lamborghini 14

1.3 Ιστορική αναδρομή του Θέματος της Διπλωματικής 16

1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του χυτού ανθρακονήματος 20

1.5 Περιγραφή ψαλιδιού 25

1.6 Στόχος Διπλωματικής 28

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο 30

2.1 Θεωρία 30

2.2 Επιλογή Υλικού 46

2.3 Ιδιότητες 48

2.4 Κατασκευή 50

2.5 Τροποποίηση Γεωμετρίας 50

3 Κατασκευή Βραχίονα Ανεξάρτητης Ανάρτησης 53

3.1 Συστήματα ανεξάρτητης ανάρτησης 53

3.2 Μεθοδολογία Σχεδιασμού 54

3.2.1 Υλικά και Γεωμετρία 54

3.2.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων 56

4 Ανάλυση 57

4.1 Σχεδιασμός και κατασκευή κάτω βραχίονα ανάρτησης. 57

4.2 Καταπονήσεις κάτω βραχίονα ανάρτησης σε φρενάρισμα και αναλύσεις 63

4.3 Καταπονήσεις κάτω βραχίονα ανάρτησης σε εγκάρσια δύναμη και αναλύσεις 71

5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης 76

5.1 Αποτελέσματα καταπόνησης σε φρενάρισμα και των τριών υλικών. 76

5.2 Αποτελέσματα καταπόνησης σε εγκάρσια δύναμη και των τριών υλικών. 77

6 Συμπεράσματα 79

Βιβλιογραφία 81

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: LAMBORGHINI SESTO ELEMENTO 18

Εικόνα 2:Μονόκλωνο μονοκόκο σασί LAMBORGHINI SESTO ELEMENTO 22

Εικόνα 3: Βραχίονες ανάρτησης κατασκευασμένοι με τεχνολογία σφυρηλατημένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης 23

Εικόνα 4: Διάγραμμα καταπόνησης (τάσεων – παραμορφώσεων) 23

Εικόνα 5: Σύγκριση διατάξεων νημάτων άνθρακα με συνεχείς δέσμες ινών μιας διεύθυνσης με κοντές δέσμες ινών (CFSMC) 24

Εικόνα 6: Διάταξη νημάτων CFSMC (κοντές δέσμες ινών άνθρακα) 25

Εικόνα 7: Εφαρμογές της μεθόδου CFSMC σε DODGE VIPER 26

Εικόνα 8: Εφαρμογές της μεθόδου CFSMC σε LAMBORGHINI και DODGE 27

Εικόνα 9: Διάταξη κάτω βραχιόνων με τεχνολογία σφυρηλατημένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης 29

Εικόνα 10: Αλουμινένιοι βραχίονες ανάρτησης 30

Εικόνα 11: Βραχίονες ανάρτησης από CFSMC 30

Εικόνα 12: Ράβδοι ανθρακονημάτων μήκους 25,4 mm 49

Εικόνα 13: Σφυρηλάτηση με ενώσεις χύτευσης φύλλων ινών άνθρακα (CFSMC) 50

Εικόνα 14: Λεπτομέρειες δεσμών συνεχών ινών 51

Εικόνα 15: Λεπτομέρειες δεσμών κοντών ινών 52

Εικόνα 16: Συμπίεση σφυρηλάτησης 54

Εικόνα 17: Μπροστινό σύστημα ανάρτησης MAZDA MX5 62

Εικόνα 18: Σχέδιο κάτω όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5 63

Εικόνα 19: . Σχέδιο αριστερής πλάγια όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5. 64

Εικόνα 20: Σχέδιο δεξιάς πλάγιας όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5. 65

Εικόνα 21: Σχέδιο πάνω όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5 ..... *66*

Εικόνα 22: *Δυνάμεις καταπόνησης κατά το φρενάρισμα* *68*

Εικόνα 23: *Σημεία στήριξης του κάτω βραχίονα*……..……69

Εικόνα 24: *Δυνάμεις εγκάρσιας καταπόνησης*……..……75

Εικόνα 25: . *Σημεία στήριξης του κάτω βραχίονα*……76

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Στοιχειώδες (ορθογωνικό) τμήμα μιας στρωματοποιημένης πλάκας (ή κελύφους), προσανατολισμένο στο (γενικό σύστημα του υλικού – material coordinate system), (x,y) 33

Διάγραμμα 2: Στοιχειώδες (ορθογωνικό) τμήμα μιας στρωματοποιημένης πλάκας (ή κελύφους), προσανατολισμένο στο (γενικό σύστημα του υλικού – material coordinate system), (x,y) 34

Διάγραμμα 3: Παραμόρφωση της κεντρικής επιφάνειας της πλάκας ή του κελύφους από συνθετικό υλικό 37

Διάγραμμα 4: Γωνία των ινών σε σχέση με το γενικό σύστημα του υλικού 41

Διάγραμμα 5: Επίπεδη Εντατική κατάσταση σε κάθε στρώμα του σύνθετου υλικού 42

Διάγραμμα 6: Καταπονήσεις σε φρενάρισμα CHROMOLY AISI 4130 67

Διάγραμμα 7: Καταπονήσεις σε φρενάρισμα CHROMOLY AISI 4130 69

Διάγραμμα 8: Καταπονήσεις σε φρενάρισμα ALUMINIUM ALLOY 6063-T83 71

Διάγραμμα 9: Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CFSMC 73

Διάγραμμα 10: Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CHROMOLY AISI 4130 74

Διάγραμμα 11: Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CHROMOLY AISI 4130 76

Διάγραμμα 12: Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση ALUMINIUM ALLOY 6063-T83….. 77

Διάγραμμα 13: Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CFSMC..……..... 78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες κραματούχου χάλυβα 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο) γνωστός και ως χρωμόλη……55

Πίνακας 2: *Στοιχεία υλικού CHROMOLY AISI 4130* 66

Πίνακας 3: *Στοιχεία καταπόνησης φρεναρίσματος* 68

Πίνακας 4: *Στοιχεία υλικού ALUMINIUM ALLOY 6063-T83* 70

Πίνακας 5: Στοιχεία υλικού CFSMC……..……72

Πίνακας 6: Στοιχεία εγκάρσιας καταπόνησης……...……75

Πίνακας 7: Καταπόνηση σε φρενάρισμα 79

Πίνακας 8: Εγκάρσια Καταπόνηση 80

Πίνακας 9: Αποτελέσματα CHROMOLY AISI 4130 81

Πίνακας 10: Αποτελέσματα ALUMINIUM ALLOY 6063-T83……81

Πίνακας 11: Αποτελέσματα CFSMC ……81

Κατάλογος Συμβόλων

(A) : Υπομητρώο επίπεδης στιβαρότητας N/mm (MPa)

(B) : Υπομητρώο σύζευξης (N)

(D) : Υπομητρώο καμπτικής στιβαρότητας (Nmm)

E, E_m : Μέτρο ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας N/mm^2 (MPa)

E_x, E_y : Φαινόμενο Μέτρο Ελαστικότητας του σύνθετου στις δύο διευθύνσεις N/mm^2 (MPa)

f_v : Ποσοστό μικροκενών του σύνθετου

G_f, G_m : Μέτρο διάτμησης της ίνας και της μήτρας N/mm^2 (MPa)

G_{xy} : Φαινόμενο Μέτρο διάτμησης του σύνθετου N/mm^2 (MPa)

S : Όριο αντοχής σε διάτμηση εντός επιπέδου N/mm^2 (MPa)

S_e : Μέγιστη διατμητική παραμόρφωση εντός επιπέδου N/mm^2 (MPa)

T_g : Θερμοκρασία υάλωσης της μήτρας (^oC)

u : Μετατόπιση στη διεύθυνση x (mm)

v : Μετατόπιση στη διεύθυνση y (mm)

V_{comp}, V_f, V_m : Περιεχόμενος όγκος του σύνθετου, της ίνας και της μήτρας

v_{xy}, v_{yx} : Ενεργός λόγος poisson του σύνθετου

w : Μετατόπιση στη διεύθυνση z (mm)

X_t, X_c : Όριο θραύσης της στρώσης σε εφελκυσμό και θλίψη στην πρώτη κύρια διεύθυνση N/mm^2 (MPa)

$X_{\varepsilon t}$, $X_{\varepsilon c}$: Όριο μέγιστης παραμόρφωσης της στρώσης σε εφελκυσμό και θλίψη στην πρώτη κύρια διεύθυνση mm/mm

Y_t, Y_c : Όριο θραύσης της στρώσης σε εφελκυσμό και θλίψη στη δεύτερη κύρια διεύθυνση N/mm^2 (MPa)

$Y_{\varepsilon t}$, $Y_{\varepsilon c}$: Όριο μέγιστης παραμόρφωσης της στρώσης σε εφελκυσμό και θλίψη στη δεύτερη κύρια διεύθυνση mm/mm

Z_k : Απόσταση της στρώσης k από τη μέση επιφάνεια του σύνθετου mm

α : Μέγεθος κελιού honeycomb mm

α_1 , α_2 : Συντελεστές θερμικής διαστολής στις δύο κύριες διευθύνσεις $1/^oC$

κ_x , κ_y , κ_z : Καμπυλότητες της δοκού 1/mm

ρ_c : Πυκνότητα kg/m^3

ρ_f , ρ_m , ρ_{comp} : Πυκνότητα της ίνας, της μήτρας και του σύνθετου kg/m^3

ρ_s : Πυκνότητα του υλικού κατασκευής kg/m^3

1 Πρόλογος

1.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να τηρηθούν οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί, οι οποίοι σταθερά αυξάνονται στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι φυσιολογικό να μειωθούν οι εκπομπές CO_2 και να αυξηθεί η αποδοτικότητα των καυσίμων στα αυτοκίνητα. Τα εμπόδια συχνά ξεπερνιούνται με τη μείωση του βάρους των εξαρτημάτων του αυτοκινήτου, διατηρώντας ταυτόχρονα την απαιτούμενη αντοχή τους. Ειδικά στα ηλεκτρικά οχήματα, η απαίτηση χαμηλού βάρους καθίσταται αυστηρότερη, επειδή οι μπαταρίες τους ζυγίζουν περισσότερο από το 10% του βάρους του αυτοκινήτου (CHEVROLET, 2016, BMW, 2016). Τον τελευταίο καιρό, τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα («carbon fiber reinforced plastic» - CFRP) άρχισαν να αντικαθιστούν τα συμβατικά μεταλλικά υλικά, όπως χάλυβα, κράματα αλουμινίου ή μαγνησίου, στα εξαρτήματα αυτοκινήτων, λόγω, όχι μόνο του χαμηλού βάρους αλλά και της μεγάλης μηχανικής αντοχής τους (Kim et al., 2012). Το CFRP παρουσιάζει επίσης καλή αντοχή στη φθορά και αντοχή σε κρούσεις (Elmarakbi, 2013). Λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων, το CFRP έχει προσελκύσει τις αυτοκινητοβιομηχανίες ως ένα ελπιδοφόρο υλικό για τη μείωση του βάρους του αυτοκινήτου και την ταυτόχρονη ικανοποίηση των προτύπων ασφαλείας (Jacob, 2014). Για παράδειγμα, η BMW κυκλοφόρησε στην αγορά ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, μοντέλο i3, του οποίου το σώμα είναι κατασκευασμένο από CFRP (Jacob, 2010). Η Murcielago της Lamborghini χρησιμοποίησε το CFRP για πλαίσια και υποπλαίσια με δυναμικές ιδιότητες (Masini et al., 2006). Εσωτερικά, οι ηλιοροφές στο Sorento της KIA παράγονται με βάση το CFRP το 2015 (Park, 2014)

Ο κάτω βραχίονας ελέγχου («Lower Control Arm» - LCA), που είναι μέρος των συστημάτων ανάρτησης, ελέγχει την κίνηση των τροχών. Δεδομένου ότι το LCA παρουσιάζει περίπλοκο

εξωτερικό σχήμα και περιέχει αρθρώσεις και άλλα μέρη, δεν είναι εύκολο να κατασκευαστεί σε CFRP, αν και υπήρξαν μερικές περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση της Lamborghini, η οποία εφάρμοσε τη μέθοδο σύνθεσης χύτευσης φύλλου (SMC) για την παραγωγή CFRP LCA (Feraboli et al., 2011). Το ελαστικό μέτρο του CFRP που παράγεται με τη μέθοδο SMC (πάνω από 40 GPa) είναι μικρότερο από το ελαστικό μέτρο των κλασικών στρωματοποιημένων σύνθετων υλικών (composite laminates) (περίπου 100 GPa), ωστόσο, η Lamborghini το επέλεξε, γιατί, ως υλικό, είναι πιο εύκολο στη μορφοποίησή του σε σχέση με τα κλασικά στρωματοποιημένα σύνθετα υλικά (composite laminates), ώστε να επιτύχει ένα όσο το δυνατό πιο τελειοποιημένο σχήμα του LCA.

1.2 Η εταιρεία Lamborghini

Η Lamborghini είναι μια εταιρεία με εμπειρία πάνω από πέντε δεκαετίες στην κατασκευή αυτοκινήτων και διαθέτει περίπου 30 χρόνια εμπειρίας με σύνθετα υλικά στις τεχνολογίες παραγωγής. Το 1983, οι μηχανικοί του Sant'Agata δημιούργησαν ένα πρωτότυπο, το διάσημο μοντέλο Countach, χρησιμοποιώντας ένα κλωβό επιβατών κατασκευασμένο εξ΄ ολοκλήρου από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP). Το αυτοκίνητο υποβλήθηκε σε εκτεταμένη δοκιμή οδήγησης, αλλά έφτασε στο τέλος του σε μια δοκιμή συγκρούσεων. Η γραμμή παραγωγής αυτού του οχήματος δεν ήταν εφικτή τότε. Το 1985, τα πρώτα εξαρτήματα που κατασκευάστηκαν από πλαστικά ενισχυμένα με υαλοβάμβακα (GRP) ήταν το μπροστινό καπό και το κάλυμμα του κινητήρα του Countach Quattrovalvole.

Το 1990, η κατασκευή της Diablo σήμανε την πρώτη σημαντική εφαρμογή της Lamborghini από ανθρακονήματα. Χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν σε όλες τις εξωτερικές επιφάνειες. Επίσης, επειδή το CFRP χρησιμοποιήθηκε σε εξάρτημα υποστρώματος / σήραγγας παρείχε σκληρότητα ίδια με τη σωληνοειδή δομή ενός χάλυβα. Η αναλογία σύνθετου υλικού από γυαλί και ίνες άνθρακα αυξήθηκε ουσιαστικά στο Roadster του Diablo το 1993 - με όλη την εξωτερική επιφάνεια, τη

σκληρή οροφή και το σπόιλερ κατασκευασμένα από ενισχυμένο πλαστικό. Το 2001, το Murciélago έφερε περαιτέρω εξελίξεις. Σε αυτό το μοντέλο η κεντρική σήραγγα, σημαντικά τμήματα του κάτω μέρους και οι θόλοι των τροχών κατασκευάστηκαν από CFRP και παρείχαν πρόσθετη ενίσχυση στη σωληνοειδή δομή χάλυβα. Με το Roadster Murciélago προστέθηκαν περαιτέρω σύνθετα υποσυστήματα, όπως το εξωτερικό περίβλημα γύρω από το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Στην περιορισμένη έκδοση Reventón και Reventón Roadster, από το 2008 και το 2009, όλα τα εξωτερικά πάνελ και σημαντικά τμήματα της δομής του αμαξώματος παρήχθησαν με CFRP.

Μετά από μια αναστατωμένη περίοδο χαρακτηριζόμενη από μια σειρά αλλαγών ιδιοκτησίας, η Lamborghini εξαγοράστηκε από την Audi (μέρος του ομίλου Volkswagen) το 1998. Στον τομέα των σύνθετων υλικών, η Audi και η Lamborghini ανταλλάσσουν τις γνώσεις τους. Η Lamborghini συνεργάζεται, επίσης, με διάφορους άλλους συνεργάτες στην ανάπτυξη τεχνολογίας ανθρακονημάτων, όπως η Boeing, το Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον και ο κατασκευαστής εξοπλισμού γκολφ Callaway, με τον οποίο ανέπτυξε την τεχνολογία Forged Composite® που χρησιμοποιείται στο Sesto Elemento, υλικό που μέχρι τότε χρησιμοποιείτο από την ως άνω εταιρία (Callaway) για την παραγωγή κεφαλών γκολφ.

Η συνεργασία με την Boeing και το Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον στο Σιάτλ υπογράφηκε το 2010. Η Lamborghini παρέχει στο Εργαστήριο Σύνθετων Δομικών Κατασκευών (ACSL) στο Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον σημαντική χρηματοδότηση, υποστηρίζοντας μακροπρόθεσμες ερευνητικές εργασίες. Τα θέματα περιλαμβάνουν τεχνολογίες επισκευής για δομές CFRP, καθώς επίσης ανάλυση και προσομοίωση υλικών.

Μετά την εξαγορά της από την Audi η Lamborghini έχει εισέλθει σε μια φάση σταθερότητας και ανάπτυξης. Από το 2000, η εταιρεία έχει διπλασιάσει το εργατικό της δυναμικό σε πάνω από 900 άτομα, τριπλασίασε τον αριθμό των αντιπροσώπων της παγκοσμίως σε 125 και αύξησε τις πωλήσεις αυτοκινήτων της. Η Lamborghini έχει επενδύσει σε μεγάλο βαθμό στα σύνθετα υλικά

άνθρακα και σκοπεύει να παραμείνει πρωτοπόρος σε αυτή την τεχνολογία. Ο Stephan Winkelmann, Πρόεδρος και Διευθύνων Σύμβουλος της Automobili Lamborghini, δήλωσε ότι κάθε νέα Lamborghini θα χρησιμοποιήσει τεχνολογία ανθρακονημάτων για καλύτερη μείωση βάρους. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί ο λόγος ισχύος προς το βάρος του αυτοκινήτου (για να βελτιωθεί η οδηγική συμπεριφορά από πλευράς χειρισμού και επιτάχυνσης) και να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO2) που είναι σημαντικές και για τα σούπερ σπορ αυτοκίνητα.

1.3 Ιστορική αναδρομή του Θέματος της Διπλωματικής

Μέχρι το 2001 όλες σχεδόν οι αυτοκινητοβιομηχανίες κατασκεύαζαν το κάτω βραχίονα των αναρτήσεων των οχημάτων τους από αλουμίνιο. Η Lamborghini, όπως αναλύθηκε ανωτέρω, είναι η πρώτη και μοναδική εταιρία που κατασκεύασε το κάτω βραχίονα από χυτό ανθρακόνημα.

Από το 2001 έως το 2010 προώθησε στην αγορά το μοντέλο της με όνομα Murcielago, όπου χρησιμοποίησε για την κατασκευή του περίπου το 31% του βάρος του με ίνες άνθρακα. Για την κατασκευή του αυτοκινήτου αυτού χρησιμοποιήθηκαν ίνες άνθρακα σε όλα τα εξωτερικά πλαίσια του αμαξώματος, καθώς και στα εσωτερικά δομικά τμήματα, τα οποία ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένα χαλύβδινο χωροδικτύωμα.

Εντούτοις, ο παράγοντας που περιόριζε μια πιο ευρεία χρήση των ινών άνθρακα ήταν το υψηλό κόστος λόγω των πολλών στρωμάτων που απαιτούνται για την κατασκευή των εξαρτημάτων, καθώς και λόγω του χρόνου σκλήρυνσης και αποθήκευσης των ινών άνθρακα. Έτσι, αυτή η διαδικασία, που δεν ενδείκνυται για την παραγωγή μεγάλου όγκου σύνθετων δομικών μερών, προορισμένων να χρησιμοποιηθούν σε κοινά αυτοκίνητα, χρησιμοποιήθηκε για το Murcielago, αλλά μόνο επειδή πρόκειται για υπερ-αυτοκίνητο και η παραγωγή του περιορίζονταν στις 400 περίπου μονάδες ετησίως.

Η Lamborghini στη συνέχεια, προσπάθησε να αυξήσει το ποσοστό παραγωγής των οχημάτων που κατασκεύαζε από ίνες άνθρακα, μειώνοντας αντίστοιχα το κόστος τους, προωθώντας το μοντέλο της Gallardo με ικανότητα πώλησης 2.000 μονάδων ετησίως. Η νέα τεχνολογία που χρησιμοποίησε για την παραγωγή του μοντέλου αυτού βασίστηκε στην έγχυση υγρών ρητινών (χυτός άνθρακας), τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά και την προηγμένη χύτευση με συμπίεση, τεχνολογία στην οποία βασίζεται ακόμα και σήμερα.

Ο αντικαταστάτης της Murcielago, ο αποκαλούμενος Aventador, παρουσιάστηκε τον Μάρτιο του 2011 στο Autoshow της Γενεύης και διαθέτει ένα σύνολο σύνθετου μονοκόμματου σχεδιασμού με το 50% του βάρος του να είναι από ίνες άνθρακα. Αυτός ο σχεδιασμός αύξησε περισσότερο την απόδοση (στρεπτική ακαμψία) και την ασφάλεια (συμπεριφορά σύγκρουσης) του νέου οχήματος σε σχέση με τη Murcielago.

Το σασί του Aventador, που τώρα παράγεται περίπου στις 800 μονάδες ετησίως, παράγεται κυρίως με τεχνολογίες υγρής ρητίνης όπως το VaRTM και το RTM. Ενώ οι τεχνολογίες αυτές είναι πολύ αποδοτικές για τις 800 μονάδες που παράγονται ετησίως, για την παραγωγή περισσότερων μονάδων είναι απαραίτητο από άποψη οικονομίας να εξεταστούν ακόμα πιο συμφέρουσες τεχνολογίες.

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τον Σεπτέμβριο του 2010, η Lamborghini παρουσίασε στο Autoshow του Παρισιού ένα όχημα τεχνολογικής επίδειξης, το Sesto Elemento, το οποίο σχεδιάστηκε για να δείξει τις δυνατότητες της προηγμένης χύτευσης με συμπίεση για την κατασκευή πρωτογενών δομικών μερών.

Εικόνα 1. LAMBORGHINI SESTO ELEMENTO (Yoo et al, 2017).

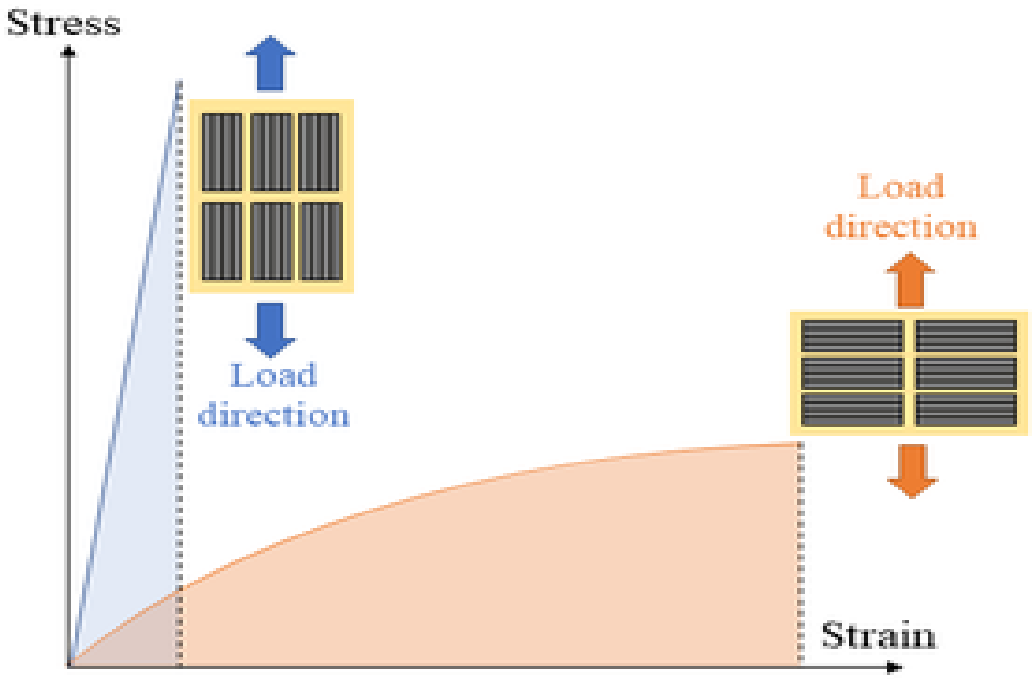
Η τεχνολογία της προηγμένης χύτευσης, όπως αυτή καταγράφηκε από τη Lamborghini και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του ως άνω αυτοκινήτου, σε συνδυασμό με το Callaway Golf, επιτρέπει δραματικές μειώσεις των κύκλων παραγωγής και πραγματοποίηση σύνθετων τρισδιάστατων γεωμετριών που δεν είναι συνήθως εφικτές με συνεχείς ελασματοποιημένες ίνες. Η τεχνολογία σφυρηλατημένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές δέσμες ινών άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης (Forged Composite Material) τεχνολογία Composite που εισήχθη στο Sesto Elemento χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μονόκλωνου σασί καθώς και των άλλων σύνθετων βραχιόνων ελέγχου ανάρτησης.

Εικόνα 2. Μονόκλωνο μονοκόκο σασί LAMBORGHINI SESTO ELEMENTO (Yoo et al, 2017).

Ο στόχος της νέας αυτής τεχνολογίας ήταν να αντικατασταθούν οι αλουμινένιοι βραχίονες ελέγχου των αναρτήσεων που χρησιμοποιούνται στο Lamborghini Gallardo LP570-4 Superleggera 2010 και να επιτευχθεί μείωση του βάρους κατά 30% διατηρώντας παράλληλα ίδιο ή καλύτερο κόστος απόκτησης του τελικού μέρους.

Εικόνα 3. Βραχίονες ανάρτησης κατασκευασμένοι με τεχνολογία σφυρηλατημένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές δέσμες ινών άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης (Yoo et al, 2017).

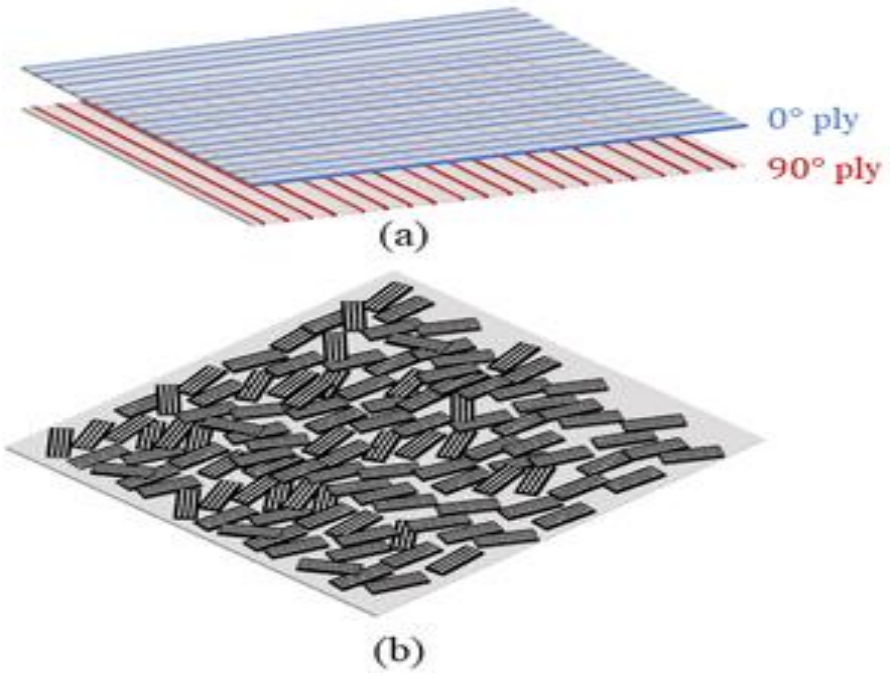
1.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του χυτού ανθρακονήματος



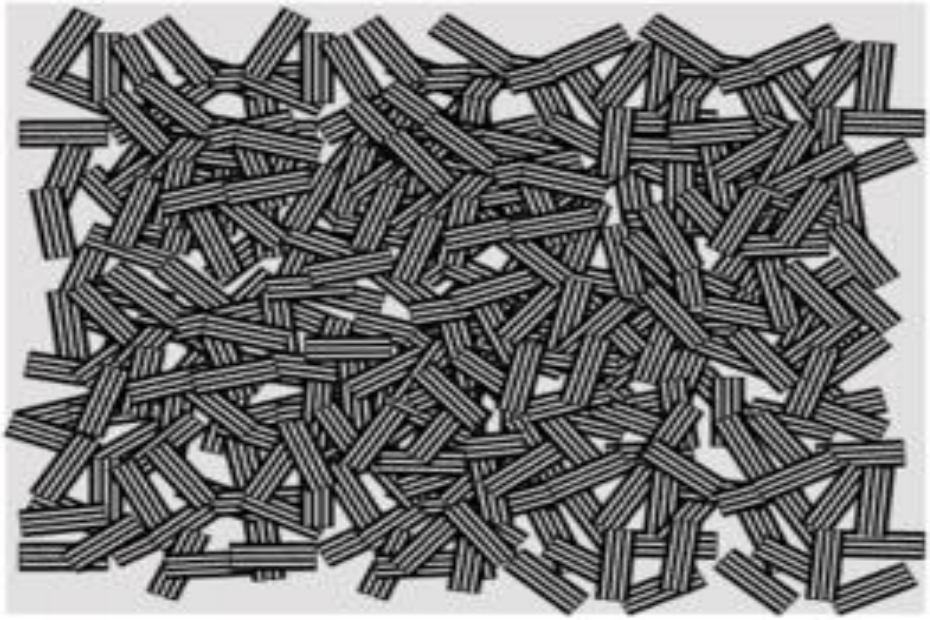
Εικόνα 4. Διάγραμμα καταπόνησης (τάσεων – παραμορφώσεων) (Yoo et al, 2017).

Βάσει της ανωτέρω εμπειρίας τους, οι κατασκευαστές ατράκτων της Lamborghini προτείνουν τη χρήση ασυνεχών ινών άνθρακα που είναι κατάλληλα για χύτευση με συμπίεση για τους εξής λόγους:

Πρώτον, διότι η χρήση των συστημάτων ασυνεχών ινών άνθρακα για προηγμένη χύτευση με συμπίεση έδειξε ιδιαίτερα επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, ιδιαίτερα όσον αφορά την ακαμψία, καθώς ο μέσος συντελεστής που αναφέρεται είναι πανομοιότυπος με εκείνον που παρουσιάζονται στις απλές ίνες άνθρακα. Εν προκειμένω, η ιδιότητα αυτή (στρεπτική ακαμψία) αποδείχθηκε ότι οφείλεται στην τυχαία κατανομή του οπλισμού, η οποία δίδει ισοτροπικές ελαστικές αντοχές σε επίπεδο.



Εικόνα 5. Σύγκριση διατάξεων νημάτων άνθρακα με συνεχείς δέσμες ινών μιας διεύθυνσης με κοντές δέσμες ινών (CFSMC) (Yoo et al, 2017).



Εικόνα 6. Διάταξη νημάτων CFSMC (κοντές δέσμες ινών άνθρακα) (Yoo et al, 2017).

Δεύτερον, διότι τα ανωτέρω συστήματα είναι κατάλληλα να διαμορφώνονται σε πολύπλοκες γεωμετρίες με χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας.

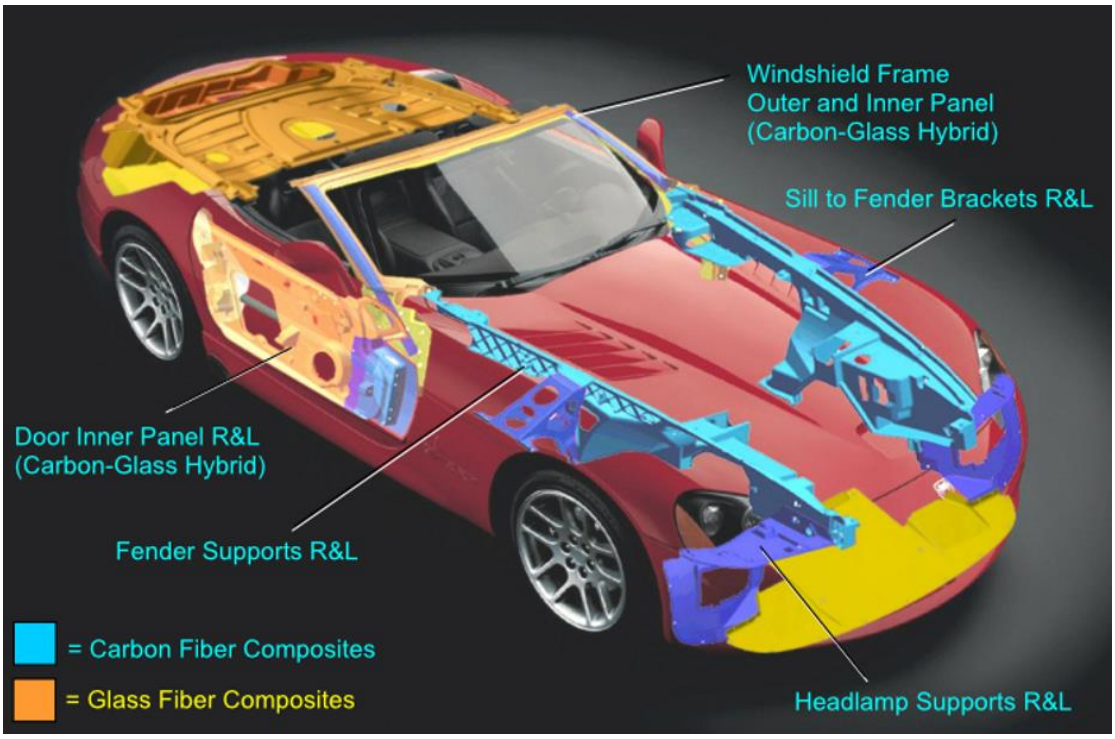
Τρίτον, διότι η παραγωγή τους που γίνεται με υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με την χειροποίητη κατασκευή εξαρτημάτων από ίνες άνθρακα μπορεί να δικαιολογήσει την υιοθέτησή τους για να μειώσει το συνολικό κόστος αγοράς.

Τέταρτον, διότι αυτή η μορφή υλικού επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την ύπαρξη ελαττωμάτων, οπών, εγκοπών και βλάβης από πρόσκρουση, ιδιότητα που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση του κάτω βραχίονα που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

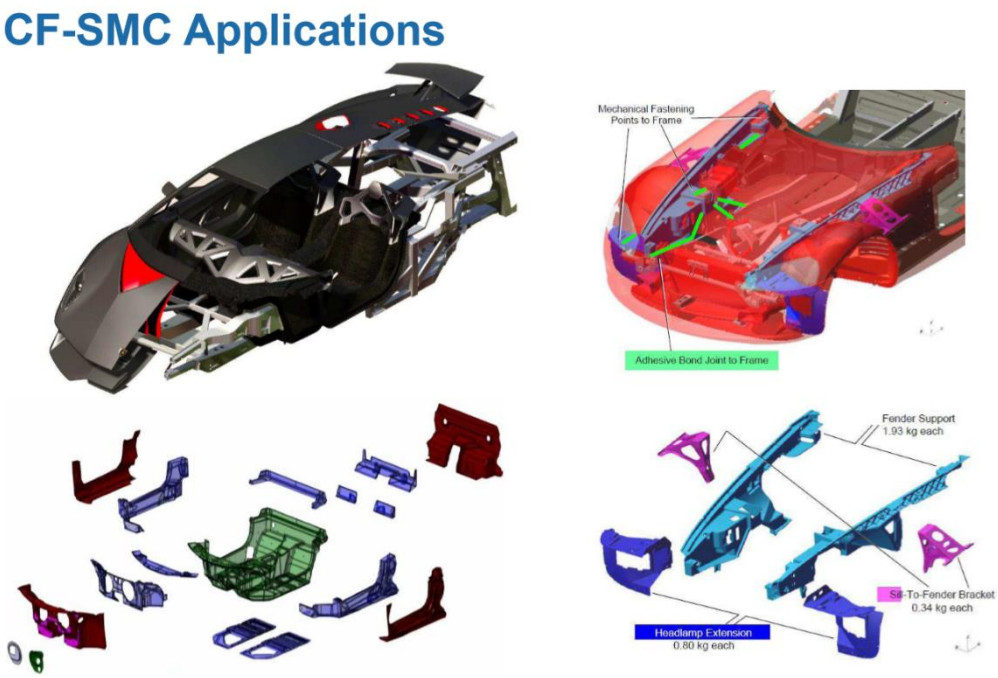
Πέμπτων, το υλικό αυτό είναι πιο αδιαπέραστο από την απορρόφηση υγρασίας και συνεπώς οι υγρές ιδιότητές του σε υψηλή θερμοκρασία επηρεάζονται λιγότερο.

Έκτων, έχουν εντοπίσει τρία μοναδικά χαρακτηριστικά, τα οποία τα ξεχώρισαν δραματικά από τις παραδοσιακές ελασματοποιημένες ταινίες και υφάσματα. Αυτές είναι η μη ευαίσθητη συμπεριφορά, η εμφανής μεταβλητότητα του μέσου όρου και η χαμηλή ευαισθησία στα ελαττώματα.

Τέλος, η χρήση αυτών των νέων ασυνεχών υλικών δημιουργεί νέες προκλήσεις για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη δοκιμή των πρωτογενών δομικών στοιχείων που κατασκευάζονται με τέτοια υλικά.



Εικόνα 7. Εφαρμογές της μεθόδου CFSMC σε DODGE VIPER (Yoo et al, 2017).



Εικόνα 8. Εφαρμογές της μεθόδου CFSMC σε LAMBORGHINI και DODGE (Yoo et al, 2017).

Υπάρχουν ωστόσο και κάποια μειονεκτήματα σε αυτές τις μορφές υλικών, ιδιαίτερα στον εφελκυσμό και σε μικρότερο βαθμό, στη συμπίεση, τη διάτμηση και την κάμψη. Έτσι, πρώτον, η αντοχή των υλικών αυτών στον εφελκυσμό είναι χαμηλότερη σε σχέση με την αντοχή που παρουσιάζεται στα συνεχή σύνθετα ινών άνθρακα και δεύτερον, το κόστος πρώτης ύλης που συνδέεται με αυτά τα ασυνεχόμενα συστήματα είναι συνήθως τόσο υψηλό όσο το prepeg (προκατασκευασμένο), μπορεί και περισσότερο.

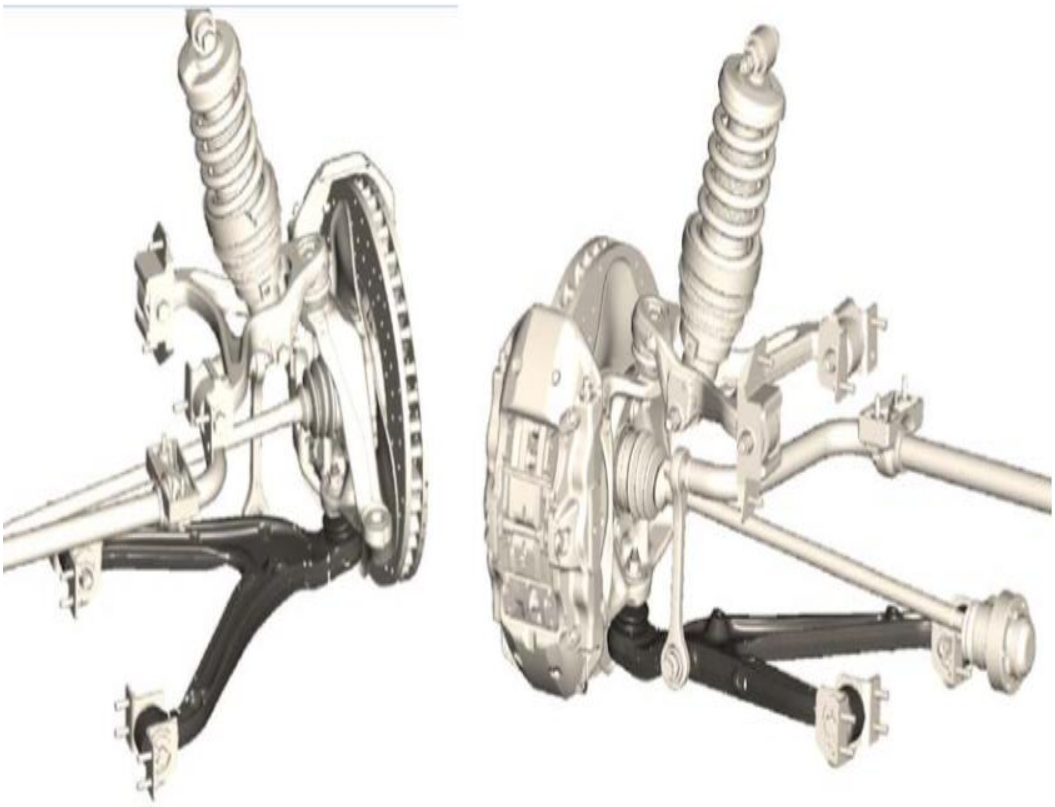
Από τη μελέτη των ως άνω πλεονεκτημάτων και των αντίστοιχων μειονεκτημάτων του χυτού ανθρακονήματος, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι τα πρώτα υπερέχουν έναντι των τελευταίων. Συγκεκριμένα, το βασικότερο πλεονέκτημα του, δηλαδή η διαμόρφωσή του σε πολύπλοκες γεωμετρίες έχει τεράστια πρακτική σημασία στην κατασκευή του οχήματος και ιδίως συγκεκριμένων εξαρτημάτων που καταπονούνται και συγκρατούν μέρη του αμαξώματος, μεταξύ των οποίων και ο κάτω βραχίονας ανάρτησης, το οποίο αφενός καταπονείται από την τελευταία,

αφετέρου συγκρατεί τον τροχό. Εξ ου και το ενδιαφέρον της παρούσας μελέτης, που σκοπό έχει να αποδείξει την εφαρμογή του συγκεκριμένου υλικού και σε κοινά αυτοκίνητα εκτός από τα υπεραυτοκίνητα τύπου Lamborghini.

1.5 Περιγραφή ψαλιδιού

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε ένα χαρακτηριστικό κάτω βραχίονα ανάρτησης της αυτοκινητοβιομηχανίας Lamborghini, μοντέλου Murcielago, κατασκευασμένο από αλουμίνιο. Ειδικότερα:

Στη Murcielago, οι βραχίονες της αριστερής πλευράς είναι ακριβώς ίδιοι με αυτούς που βρίσκονται στη δεξιά, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του σχεδίου από τέσσερις διαφορετικούς βραχίονες σε δύο όμοιους. Από τους τέσσερις βραχίονες, υπάρχουν δύο εμπρός (άνω και κάτω) και δύο πίσω βραχίονες (πάνω και κάτω). Κάθε βραχίονας έχει μοναδικό σχεδιασμό, λόγω γεωμετρικής κατασκευής, καθώς και διαφορετικών απαιτήσεων φορτίου. Το μπροστινό άνω μέρος, για παράδειγμα, πρέπει να συνδεθεί με το πλαίσιο αλουμινίου, τον τροχό και να στηρίξει το αμορτισέρ. Ωστόσο, το εμπρόσθιο κάτω μέρος, είναι αυτό που είναι πιο κρίσιμο από πλευράς απαιτήσεων. Τα δύο σχήματα του συγκροτήματος τροχού που ακολουθούν, δείχνουν τους εμπρός και κάτω βραχίονες ελέγχου. Ο κάτω βραχίονας είναι σφυρηλατημένος με κράμα αλουμινίου σειράς 6063 με μαγνήσιο και πυρίτιο, με μέγιστο Όριο Διαρροής 260MPa και Όριο Θραύσης 310MPa.



Εικόνα 9. Διάταξη κάτω βραχιόνων με τεχνολογία σφυρηλατημένου σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης (Yoo et al, 2017).

Ο σχεδιασμός του μπροστινού κάτω βραχίονα χαρακτηρίζεται από 9 διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου λειτουργίας οι οποίες περιλαμβάνουν στασιμότητα, φρενάρισμα και στροφή. Το τμήμα αλουμινίου ζυγίζει 2,2kg, εξαιρουμένου του χαλύβδινου σφαιρικού συνδέσμου και των δύο δακτυλίων και 2,9kg με τον σφαιρικό σύνδεσμο και τους δακτυλίους. Το τμήμα έχει σχεδιαστεί για μια ζωή 200.000 κύκλων. Τόσο τα κριτήρια ακαμψίας όσο και η αντοχή είναι κρίσιμα για αυτό το κάτω βραχίονα.

Εικόνα 10. Αλουμινένιοι βραχίονες ανάρτησης (Yoo et al, 2017).

Εικόνα 11. Βραχίονες ανάρτησης από CFSMC (Yoo et al, 2017).

Ο κάτω βραχίονας της ανάρτησης έχει κατασκευαστεί με συγκεκριμένες αντοχές σε όλα τα σημεία όπου συνδυάζεται με άλλα μηχανικά εξαρτήματα, καθώς και με αυστηρές γεωμετρικές απαιτήσεις λόγω παρεμβολών και σωστής λειτουργίας. Μετά τη σφυρηλάτηση, ο κάτω βραχίονας υφίσταται δευτερεύουσα μηχανική κατεργασία για να φιλοξενήσει δύο δακτυλίους, οι οποίοι αποτελούν τη θέση στερέωσης στο μπροστινό πλαίσιο χώρου αλουμινίου. Από την πλευρά του τροχού, ο κάτω βραχίονας πρέπει να δέχεται έναν σφαιρικό σύνδεσμο, ο οποίος κινείται μαζί με τον τροχό και τον ρότορα του.

1.6 Στόχος Διπλωματικής

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να σχεδιάσει και να αναλύσει τα πεπερασμένα στοιχεία του κάτω βραχίονα ανεξάρτητης ανάρτησης με διπλούς βραχίονες από σύνθετο υλικό εποξειδικής ρητίνης, ενισχυμένης με κοντές δέσμες ινών άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης.

Επίσης η παρούσα εργασία έχει σκοπό να διερευνήσει αν η κατασκευή κάτω βραχίονα ανάρτησης από χυτό ανθρακόνημα (carbon fiber forged composite material), μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη αντοχή σε καταπονήσεις σε σχέση με άλλα υλικά, καθώς και μειωμένο βάρος, με στόχο την ευρεία χρήση του σε οχήματα μαζικής παραγωγής.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, πραγματοποιήθηκαν τα εξής στάδια.

1. Αρχικά, σχεδιάστηκε ο κάτω βραχίονας ανεξάρτητης ανάρτησης αυτοκινήτου μάρκας Mazda, μοντέλο MX5, με τη βοήθεια του λογισμικού Onshape και SolidWorks.
2. Επιλέχθηκαν για την κατασκευή της ως άνω βραχίονα ανάρτησης τρία διαφορετικά υλικά με κριτήρια την αυξημένη αντοχή και το μικρό βάρος:

iv. αλουμίνιο 6063-T83,

v. κραματούχος χάλυβας 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο), γνωστός ως χρωμόλη,

vi. σφυρήλατο σύνθετο υλικό (εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με κοντές δέσμες ινών άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης ή χυτό σφυρήλατο ανθρακόνημα - forged composite material).

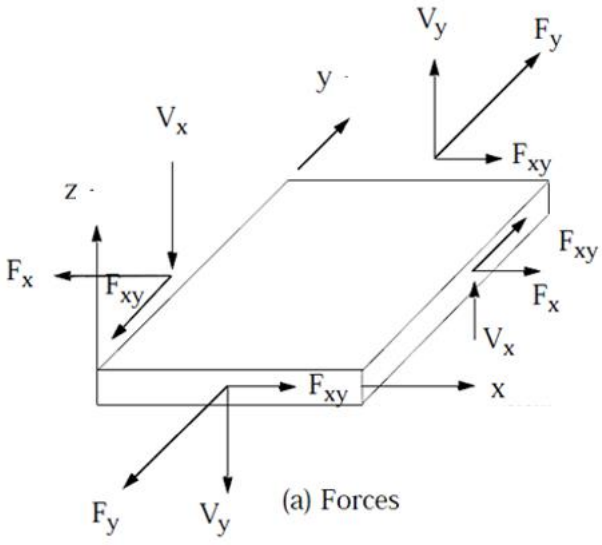
3. Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές του κάτω βραχίονα ανάρτησης για κάθε υλικό κατασκευής, σε καταπονήσεις φρεναρίσματος και σε καταπονήσεις εγκάρσιων δυνάμεων.
4. Κατά το τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

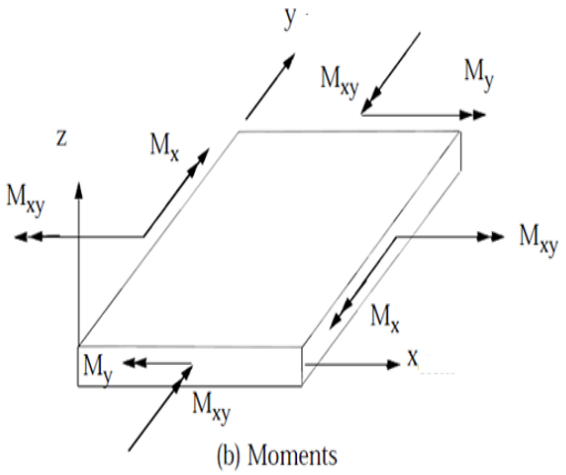
2.1 Θεωρία

Στα σχήματα 2.1 και 2.2 φαίνεται ένα στοιχειώδες (ορθογωνικό) τμήμα μιας στρωματοποιημένης πλάκας (ή κελύφους), προσανατολισμένο στο (γενικό σύστημα του υλικού – material coordinate system), (x,y). Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι ίδιο ή διαφορετικό από το σύστημα (x,y) που χρησιμοποιείται τοπικά από το πρόγραμμα της ανάλυσης (π.χ., μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Αυτό εξαρτάται από το δεδομένο πρόγραμμα ανάλυσης.

Το στοιχειώδες τμήμα έχει διαστάσεις t.dx,dy , όπου dx dy, είναι το στοιχειώδες εμβαδό (επί του επιπέδου x,y) και t το πάχος της πλάκας κατά z. Το στοιχειώδες τμήμα βρίσκεται στις συντεταγμένες (x,y) επί της πλάκας (ή σε μια ορισμένη θέση επί του κελύφους).



Διάγραμμα 1: Στοιχειώδες (ορθογωνικό) τμήμα μιας στρωματοποιημένης πλάκας (ή κελύφους), προσανατολισμένο στο (γενικό σύστημα του υλικού – material coordinate system), (x,y).



Διάγραμμα 2: Στοιχειώδες (ορθογωνικό) τμήμα μιας στρωματοποιημένης πλάκας (ή κελύφους), προσανατολισμένο στο (γενικό σύστημα του υλικού – material coordinate system), (x,y).

Το πάχος της πλάκας μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα μόνο στρώμα υλικού (π.χ., λαμαρίνες ή φύλλα από κράματα μετάλλων) ή σε στρωματοποιημένη πλάκα με N (γενικά) στρώματα. Τα στρώματα μπορεί να έχουν ισοτροπική συμπεριφορά (π.χ. στρώματα από κράματα μετάλλων, όπως Αλουμίνιο (GLARE) ή τιτάνιο), ορθοτροπική συμπεριφορά ως προς το σύστημα x,y, (π.χ. στρώματα εποξειδικών ρητινών ενισχυμένων με ίνες παράλληλα προς τον άξονα x ή παράλληλα προς τον άξονα y), ή ανισοτροπική συμπεριφορά ως προς το σύστημα x,y, (π.χ. στρώματα εποξειδικών ρητινών ενισχυμένων με ίνες σε γενικές γωνίες θ ως προς το σύστημα x,y , ή πιο γενικά ανισοτροπικά σύνθετα υλικά).

Τα Μακροσκοπικά εντατικά μεγέθη που δρουν στο στοιχείο αυτό της πλάκας είναι τα ακόλουθα, βλ. σχήματα 2.1 και 2.2.

- Αξονική δύναμη ανά μονάδα πλάτους $N_x = F_x$ (N/mm). Δρα κάθετα στο επίπεδο yz (δηλ. στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα x). Εκφράζει τον εφελκυσμό ή την θλίψη κατά

τον άξονα x (ουσιαστικά, ό,τι εξετάστηκε στα δύο πρώτα παραδείγματα). Προκαλείται από τις ορθές τάσεις σ_x κατά το πάχος της πλάκας.

- Αξονική δύναμη ανά μονάδα πλάτους $N_y = F_y$ (N/mm). Δρα κάθετα στο επίπεδο xz (δηλ. στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα y). Εκφράζει το εφελκυσμό ή την θλίψη κατά τον άξονα y. Προκαλείται από τις ορθές τάσεις σ_y κατά το πάχος της πλάκας.
- Διατμητική δύναμη ανά μονάδα πλάτους $N_{xy} = F_{xy}$ (που είναι ίση με την $N_{yx} = F_{yx}$), (N/mm). Δρουν παράλληλα στα επίπεδα yz και xz αντίστοιχα. Εκφράζουν την συνολική διάτμηση εντός του επιπέδου της πλάκας, στο δεδομένο σημείο. Προκαλούνται από τις διατμητικές τάσεις $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ κατά το πάχος της πλάκας.
- Καμπτική ροπή ανά μονάδα πλάτους M_x (N.mm/mm). Δρα σε επίπεδο κάθετο στον άξονα x (επίπεδο yz) και (διανυσματικά) έχει κατεύθυνση παράλληλη στον άξονα y (προκαλεί κάμψη – καμπτικές στροφές ως προς τον άξονα y). Προκαλείται από τις ροπές των ορθών τάσεων σ_x κατά το πάχος της πλάκας, ως προς το κεντρικό επίπεδο της πλάκας (δηλ., τις ροπές ως προς τη θέση z = 0, σε απόσταση t / 2 από τις επιφάνειες της πλάκας).
- Καμπτική ροπή ανά μονάδα πλάτους M_y (N.mm/mm). Δρα σε επίπεδο κάθετο στον άξονα y (επίπεδο xz) και (διανυσματικά έχει κατεύθυνση παράλληλη στον άξονα x (προκαλεί κάμψη - καμπτικές στροφές ως προς τον άξονα x). Προκαλείται από τις ροπές των ορθών τάσεων σ_y κατά το πάχος της πλάκας, ως προς το κεντρικό επίπεδο της πλάκας z = 0.
- Καμπτικές ροπές (συστροφής) ανά μονάδα πλάτους $M_{xy} = M_{yx}$ (N.mm/mm). Δρουν σε επίπεδα κάθετα στους άξονες x και y (αντίστοιχα) (προκαλούν εγκάρσια στρέβλωση ή συστροφή (twisting) της πλάκας). Προκαλούνται από τις ροπές των διατμητικών τάσεων $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ κατά το πάχος της πλάκας, ως προς το κεντρικό επίπεδο της πλάκας z = 0.

Επίσης, υπάρχουν οι εγκάρσιες τέμνουσες (διατμητικές) δυνάμεις που θεωρητικά (για τη δεδομένη θεωρία πλακών Kirchhoff – Love) προκύπτουν με παραγώγιση των κατανομών των καμπτικών ροπών. Αυτές δρουν στα επίπεδα xz και yz και έχουν διεύθυνση παράλληλη στον

άξονα z. Στο δεδομένο παράδειγμα δεν θα μας απασχολήσουν οι εγκάρσιες τέμνουσες. Οι τέμνουσες φαίνονται στο σχήμα 2.1 (V_x και V_y). Στην ονοματολογία των δοκών καλούνται συνήθως Q (Q_x και Q_y). Οι τέμνουσες παίζουν ρόλο στην ανάλυση της απόστρωματοποίησης (delamination), δηλ. όταν γίνεται έλεγχος αποκόλλησης των στρωμάτων.

Εξετάζουμε ένα δεδομένο σημείο κατά τον άξονα z, εντός ενός τυχαίου στρώματος.

Αν u (x, y, z) είναι η μετατόπιση του σημείου κατά τον άξονα x , v (x, y, z) είναι η μετατόπιση κατά τον άξονα y και w (x, y) είναι το βέλος κάμψης (μετατόπιση κατά τον άξονα z - υποθέτουμε ότι το βέλος δεν εξαρτάται από το z), τότε ισχύουν οι ακόλουθες γεωμετρικές (κινηματικές) σχέσεις (υπόθεση Kirchhoff – Love)

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z\frac{dw}{dx} \tag{1}$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z\frac{dw}{dx}$$

όπου μ_0 (x, y) και ν_0 (x, y) είναι οι οριζόντιες μετατοπίσεις της κεντρικής επιφάνειας της πλάκας (όπου η συντεταγμένη z είναι μηδέν), βλέπε σχήμα 2.3 (εκεί φαίνεται μόνο το βέλος, όχι οι οριζόντιες μετατοπίσεις). Οι μερικές παράγωγοι,

$$\theta_1 = \frac{dw}{dx} \text{ και } \theta_2 = \frac{dw}{dy} \tag{2}$$

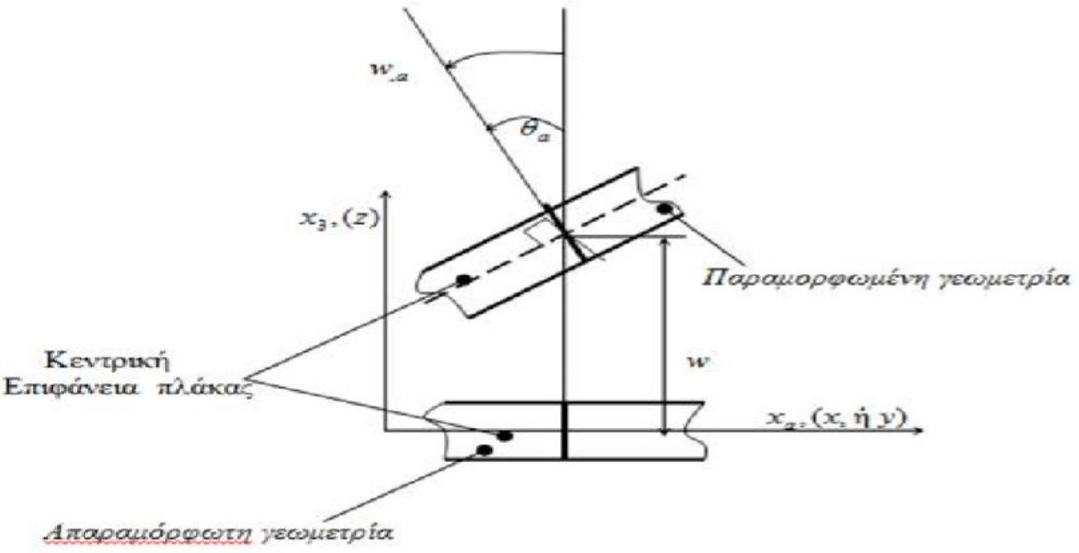
εκφράζουν τις στροφές των διατομών της πλάκας ως προς τους άξονες y και x, αντίστοιχα (για μικρές στροφές - μικρές παραμορφώσεις και λεπτές πλάκες).

Οι επίπεδες παραμορφώσεις σε κάθε σημείο, κάθε στρώματος, δίνονται από τις γνωστές σχέσεις (Θεωρία Ελαστικότητας – Μηχανική Συνεχούς Μέσου),

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx}, \varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \text{ και } \gamma_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \tag{3}$$

Υπενθυμίζεται ότι, οι βασικές παραδοχές της θεωρίας στρωματοποίησης περιλαμβάνουν την υπόθεση ότι οι μοναδικές παραμορφώσεις στα στρώματα, που συνεισφέρουν στην ολική παραμόρφωση της πλάκας, είναι οι παραπάνω. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις ε_z , γ_{xz} , γ_{yz} θεωρούνται αμελητέες (ή αν υπάρχουν, είναι προκύπτοντα μεγέθη και δεν επηρεάζουν τις προηγούμενες κατανομές).

Η αντικατάσταση της (1) στην (2) δίνει,



Διάγραμμα 3: Παραμόρφωση της κεντρικής επιφάνειας της πλάκας ή του κελύφους από συνθετικό υλικό.

$$\varepsilon_x = \frac{du_0}{dx} - z\frac{d^2w}{dx^2} \tag{3α}$$

$$\varepsilon_y = \frac{dv_0}{dy} - z\frac{d^2w}{dy^2} \tag{3β}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{du_0}{dy} + \frac{dv_0}{dx} - 2z\frac{d^2w}{dxdy} \tag{3γ}$$

Οι παραπάνω σχέσεις γράφονται σε μητρωϊκή μορφή (μορφή πινάκων),

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon\}_0 - z\{\kappa\} \tag{4}$$

όπου,

$$\{\varepsilon\} := \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{5α}$$

Διάνυσμα επίπεδων παραμορφώσεων (σε τυχαίο σημείο – τυχαίο στρώμα, κατά το πάχος),

$$\{\varepsilon\}_0 := \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{du_0}{dx} \\ \dfrac{dv_0}{dy} \\ \dfrac{du_0}{dy} + \dfrac{dv_0}{dx} \end{Bmatrix} \tag{5β}$$

Διάνυσμα επίπεδων παραμορφώσεων κεντρικής επιφάνειας (z = 0),

$$\{\kappa\} = \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{d^2w}{dx^2} \\ \dfrac{d^2w}{dy^2} \\ 2\dfrac{d^2w}{dxdy} \end{Bmatrix} \qquad (5\gamma)$$

Διάνυσμα καμπυλοτήτων τις πλάκας

(οι καμπυλότητες εκφράζουν τις καμπτικές παραμορφώσεις τις πλάκας στη δεδομένη θέση και συσχετίζονται με τις αντίστροφες τιμές των ακτίνων καμπυλότητας που δημιουργούνται λόγω του βέλους κάμψης),

Μέσα σε κάθε στρώμα, οι επίπεδες τάσεις στο κύριο σύστημα ορθοτροπίας του υλικού, συνδέονται με τις αντίστοιχες παραμορφώσεις, μέσω των σχέσεων (που δίνονται σε μητρωϊκή μορφή),

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q66 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \alpha_1 \Delta T \\ \varepsilon_2 - \alpha_2 \Delta T \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \qquad (6)$$

(στο εξής αναφερόμαστε μόνο σε στρώματα που έχουν επίπεδα ορθοτροπίας)

Το 1 αντιπροσωπεύει την διεύθυνση παράλληλα τις ίνες και το 2 κάθετα τις ίνες. Για υφασμένες ίνες (υπολογιστικά, συνήθως) δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ 1 και 2. Στη πράξη, ανάλογα με την δομή του fabric υπάρχει (μικρή ή μεγάλη) διαφοροποίηση τις γεωμετρίας μεταξύ των αξόνων 1 και 2.

Οι συντελεστές μέσα στο ορθογωνικό μητρώο στην (6) γράφονται με βάση τις γνωστές ελαστικές ιδιότητες του κάθε στρώματος (οι οποίες δίνονται σε πίνακες από τον κατασκευαστή του υλικού και βρίσκονται θεωρητικά ή πειραματικά).

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \ , \ Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \tag{7α}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \ , \ Q_{66} = G_{12} \tag{7β}$$

- E_1: Μέτρο Ελαστικότητας στην κύρια διεύθυνση ορθοτροπίας 1 ***(longitudinal direction)***
- E_2: Μέτρο Ελαστικότητας στην κύρια διεύθυνση ορθοτροπίας 2 ***(transverse direction)***
- G_{12}: Μέτρο Διάτμηση στο κύριο σύστημα ορθοτροπίας 1,2
- ν_{12}: Λόγος Poisson 1,2, ($\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$, αξονική φόρτιση **μόνο** κατά τον άξονα 1, δηλ. βάζοντας μόνο σ_1)
- ν_{21}: Λόγος Poisson 2,1 ($\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$, αξονική φόρτιση **μόνο** κατά τον άξονα 2, δηλ. βάζοντας μόνο σ_2)

α_1 ,α_2 : Συντελεστές θερμικής διαστολής κατά μήκος των κύριων αξόνων της ορθοτροπίας (οι διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις στο σύστημα 1,2 δεν επηρεάζονται από την μεταβολή της θερμοκρασίας)

$\Delta T = T_{oper} - T_{cure}$, T_{oper} : Θερμοκρασία λειτουργίας της πλάκας στην κατασκευή, T_{cure} : Θερμοκρασία σκλήρυνσης της πλάκας.

Συνήθως, δίνεται ο λόγος Poisson ν_{12}, ενώ ο ν_{21} υπολογίζεται από την θεωρητική σχέση (που επαληθεύεται και πειραματικά, για καθαρά ορθοτροπικά υλικά).

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \tag{8}$$

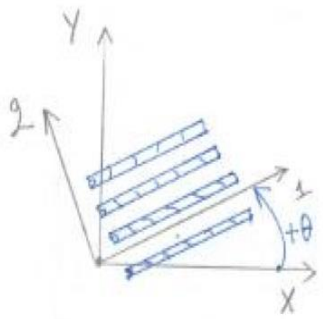
Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει με ενεργειακές θεωρήσεις.

Για ισοτροπικά υλικά (π.χ., στρώματα από κράματα μετάλλων), ισχύουν οι κλασσικές σχέσεις από την Αντοχή των Υλικών,

$$Q_{11} = \frac{E}{1-\nu^2},\ Q_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2}\ ,\ Q_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \tag{9}$$

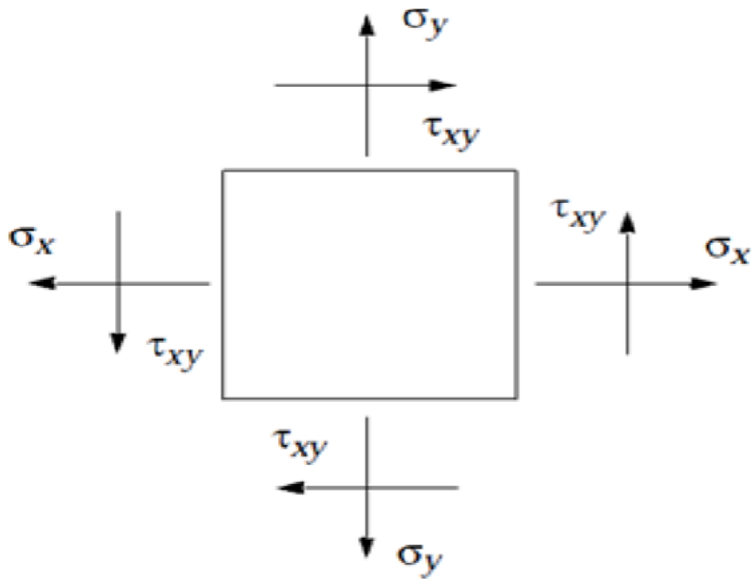
όπου Ε: Μέτρο Ελαστικότητας, : G Μέτρο Διάτμησης και ν : Λόγος Poisson

Αν το σύστημα της πλάκας (ή του υλικού) x, y είναι διαφορετικό από το σύστημα 1, 2 (βλέπε σχήμα 2.4), τότε ισχύει η σχέση.



Διάγραμμα 4: Γωνία των ινών σε σχέση με το γενικό σύστημα του υλικού.

Στρώμα της πλάκας όπου οι ίνες (γενικότερα, οι διευθύνσεις του κύριου συστήματος ορθοτροπίας) δημιουργούν γωνία θ με το σύστημα φόρτισης χ, y (το οποίο θεωρείται ίδιο με το σύστημα του υλικού – Material Coordinate).



Διάγραμμα 5: Επίπεδη Εντατική κατάσταση σε κάθε στρώμα του σύνθετου υλικού.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \varepsilon_y - a_y \Delta T \\ \gamma_{xy} - a_{xy} \Delta T \end{Bmatrix} \tag{10}$$

Όπου οι επίπεδες τάσεις στο σύστημα x, y φαίνονται στο σχήμα 5.

Σε μητρωϊκη μορφή, με την ένδειξη του αντίστοιχου στρώματος k, η (10) γράφεται

$$\{\sigma\}_k = \left[\bar{Q}\right]_k \{\varepsilon - \alpha \Delta T\}_k \ , \ k = 1, 2, ..., n \tag{11}$$

Οι σταθερές στην (10) γράφονται σε σχέση με τις αντίστοιχες σταθερές στο σύστημα ορθοτροπίας και με βάση την γωνία στροφής (θετική από το σύστημα του υλικού x, y προς το σύστημα 1, 2, ανθωρολογιακά, βλέπε σχήμα 5),

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2\left(Q_{12} + 2Q_{66}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta$$

$$\bar{Q}_{12} = \left(Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} \left(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta\right)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \sin^4 \theta + 2\left(Q_{12} + 2Q_{66}\right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \tag{12}$$

$$\bar{Q}_{16} = \left(Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}\right)\sin\theta\cos^3\theta + \left(Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}\right)\sin^3\theta\cos\theta$$

$$\bar{Q}_{26} = \left(Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}\right)\sin^3\theta\cos\theta + \left(Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}\right)\sin\theta\cos^3\theta$$

$$\bar{Q}_{66} = \left(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + Q_{66}\left(\sin^4\theta + \cos^4\theta\right)$$

Οι φαινόμενοι συντελεστές θερμικής διαστολής

$$\left[a_x, a_y, a_{xy}\right]_k = \{a\}_k^T \qquad (12^{\alpha})$$

υπολογίζονται από την θεωρία της Μηχανικής του Συνεχούς Μέσου ως ακολούθως,

$$\{a\}_k = T_k^T \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \end{Bmatrix}_k \qquad (12\beta)$$

όπου το μητρώο στροφής δίνεται από την

$$T_k = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & s^2 & -2cs \\ -cs & cs & (c^2 - s^2) \end{bmatrix}, c = \cos(\theta)\kappa\alpha\iota s = \sin(\theta) \qquad (12\gamma)$$

Τα μακροσκοπικά Εντατικά Μεγέθη στο σύστημα x, y προκύπτουν με ολοκλήρωση της (11) κατά το πάχος της πλάκας (σε κάθε σημείο x, y) Για παράδειγμα, ισχύει [12],

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz, M_x = \int_{-t/2}^{t/2} -\sigma_x z dz \tag{13}$$

Σε μητρωϊκή μορφή οι εσωτερικές δυνάμεις συνδέονται με τις τάσεις ως ακολούθως

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} - \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^{N} - \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \tag{14}$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} - \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^{N} - \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \tag{15}$$

Αντικαθιστώντας τις (5) και (11) προκύπτει για παράδειγμα

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{N} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz - \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} dz \right] \tag{16}$$

όπου z_{k-1} και z_k είναι οι z-συντεταγμένες της κάτω και της άνω ίνας του στρώματος k , αντίστοιχα. Το (–) στις ροπές εισάγεται διότι χρησιμοποιούμε το Αμερικάνικο σύστημα προσήμανσης (στην [12], ο άξονας z «κοιτά» προς τα κάτω και δεν υπάρχει (–)).

Κάνοντας τις πράξεις της (15) και (16), για όλα τα εντατικά μεγέθη, κατασκευάζουμε τις μακροσκοπικές σχέσεις μεταξύ (μακροσκοπικών ή συνιστάμενων – Resultant) εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων (δηλ., των επίπεδων παραμορφώσεων της κεντρικής επιφάνειας και των καμπυλοτήτων).

Τελικά, η βασική σχέση που συνδέει τα μακροσκοπικά εντατικά μεγέθη με της μακροσκοπικές παραμορφώσεις της πλάκας (σε ένα δεδομένο στοιχείο της πλάκας, dV = t. dx. dy) είναι (σε μητρωική μορφή),

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{A}_{11} & \mathrm{A}_{12} & \mathrm{A}_{16} \\ \mathrm{A}_{12} & \mathrm{A}_{22} & \mathrm{A}_{26} \\ \mathrm{A}_{16} & \mathrm{A}_{26} & \mathrm{A}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (17^{\alpha})$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (17\beta)$$

όπου

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} \left(\bar{Q}_{ij}\right)_k \left(z_k - z_{k-1}\right) \qquad (18^{\alpha})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N} -\left(\bar{Q}_{ij}\right)_k \left(z_k^2 - z_{k-1}^2\right) \qquad (18\beta)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^{N} \left(\bar{Q}_{ij}\right)_k \left(z_k^3 - z_{k-1}^3\right) \qquad (18\gamma)$$

Οι συντελεστές Aij καλούνται Αξονικές – Διατμητικές Ακαμψίες (Extensional Stiffnesses).

Οι συντελεστές Dij καλούνται Καμπτικές Ακαμψίες (Bending Stiffnesses).

Οι συντελεστές Bij καλούνται Ακαμψίες Σύζευξης (Coupling Stiffnesses ή Coupling terms ή Bending-Extension Coupling).

Οι όροι A_{16}, A_{26} εκφράζουν σύζευξη μεταξύ αξονικών δυνάμεων και διατμητικών δυνάμεων, εντός του επιπέδου προς πλάκας (Shear – Extension coupling).

Οι όροι D_{16} , D_{26} εκφράζουν σύζευξη μεταξύ ορθής κάμψης και κάμψης συστροφής (Bend – Twist coupling).

Σημειώνεται ότι για συμμετρικές στρωματοποιήσεις ως προς την κεντρική επιφάνεια, το μητρώο σύζευξης] [B είναι ταυτοτικά μηδέν, [12],

$$B_{ij} = 0\left(i = 1,2,6 \kappa\alpha\iota\, j = 1,2,6\right) \tag{19}$$

για συμμετρική πλάκα.

Πρακτικά, η (19) σημαίνει ότι προς συμμετρικές στρωματοποιημένες πλάκες, τα επίπεδα εντατικά μεγέθη N_x, N_y, N_{xy}, προκαλούν μόνο επίπεδες παραμορφώσεις παντού (οι καμπυλότητες είναι μηδέν) και τα καμπτικά εντατικά μεγέθη M_x, M_y, M_{xy}, προκαλούν μόνο κάμψη (ή στρέβλωση-συστροφή) ως προς την κεντρική επιφάνεια (z = 0) της πλάκας.

Στην πλειοψηφία των εφαρμογών οι στρωματοποιήσεις είναι επιθυμητό να είναι συμμετρικές ή σχεδόν (quasi) συμμετρικές (δεν είναι πάντα εφικτή η απόλυτη συμμετρία).

Οι φαινόμενες ελαστικές ιδιότητες προκύπτουν από τις γενικές σχέσεις (17), υποθέτοντας συγκεκριμένες φορτίσεις (εντατικά μεγέθη) και λύνοντας ως προς τις παραμορφώσεις.

Για παράδειγμα, υποθέτοντας όλα τα εντατικά μεγέθη μηδέν και $N_x \neq 0$, λύνοντας ως προς $\varepsilon^0{}_\chi$, προκύπτει,

$$\varepsilon_x^0 = \frac{1}{E_x}\left(\frac{N_x}{t}\right) \tag{20}$$

όπου t είναι το συνολικό πάχος της πλάκας,

$$\left(\frac{N_x}{t}\right)$$

είναι η μέση αξονική τάση κατά τον άξονα x της φόρτισης και E_x είναι το Φαινόμενο μέτρο Ελαστικότητας της πλάκας, κατά τον άξονα x.

Αντίστοιχα προκύπτει το Φαινόμενο μέτρο Ελαστικότητας της πλάκας, κατά τον άξονα y,

$$\varepsilon_y^0 = \frac{1}{E_y}\left(\frac{N_y}{t}\right) \tag{21}$$

υποθέτοντας όλα τα εντατικά μεγέθη μηδέν, $N_y \neq 0$ και λύνοντας ως προς ε^0_y.

Το φαινόμενο μέτρο διάτμησης G_{xy} προκύπτει υποθέτοντας όλα τα εντατικά μεγέθη μηδέν, $N_{xy} \neq 0$ και λύνοντας ως προς γ^0_{xy},

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{1}{G_{xy}}\left(\frac{N_{xy}}{t}\right) \tag{22}$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται φαινόμενοι λόγοι Poisson και Φαινόμενες καμπτικές Ακαμψίες.

Επίσης οι προσεγγίσεις της Καμπτικής Ακαμψίας (ανά μονάδα πλάτους) είναι οι ακόλουθες:

$$J_y = \frac{E_x t^3}{12} \tag{23}$$

Εκφράζει την Αντίσταση στην κάμψη ως τις τον άξονα y (δηλ., κάμψη που προκαλείται από τις καμπτικές ροπές M_x),

$$J_x = \frac{E_y t^3}{12} \tag{24}$$

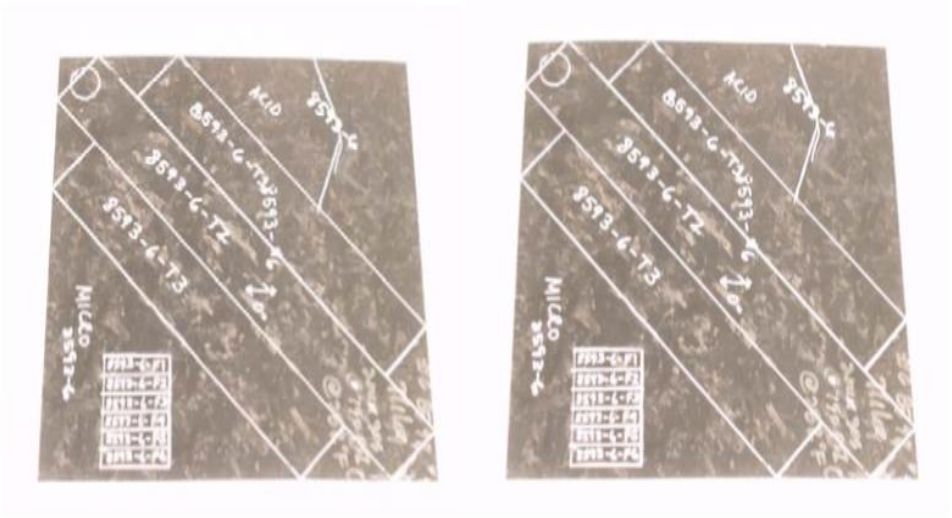
Εκφράζει την Αντίσταση στην κάμψη ως προς τον άξονα x (δηλ., κάμψη προκαλείται από τις καμπτικές ροπές M_y).

Αντίστοιχα προσεγγίζονται οι καμπτικές ακαμψίες για την καμπτική καταπόνηση M_{xy} που προκαλεί στρέβλωση (συστροφή).

2.2 Επιλογή Υλικού

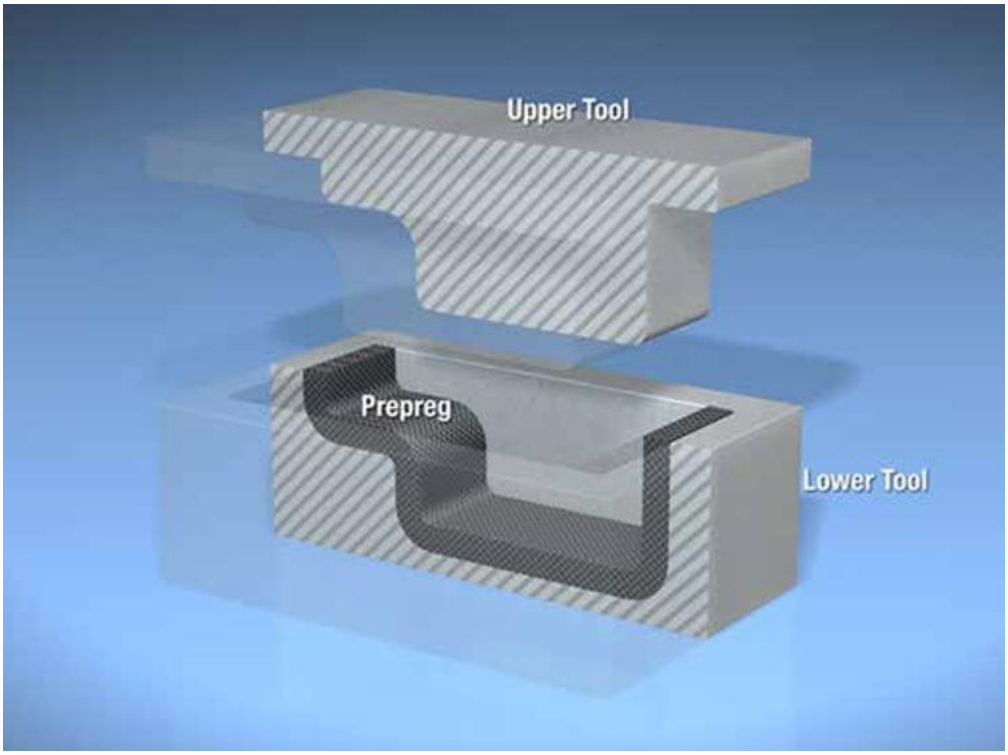
Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται ο κάτω βραχίονας της ανεξάρτητης ανάρτησης (χυτό σφυρήλατο ανθρακόνημα), θα αναλυθούν οι ιδιότητες του υλικού και θα γίνει εμβάθυνση του τρόπου κατασκευής του κάτω βραχίονα.

Το υλικό της Ένωσης Χύτευσης Φύλλων Ινών Άνθρακα (CFSMC) αποτελείται από δέσμες ανθρακονημάτων μήκους 25,4mm, που κατανέμονται τυχαία σε ένα στρώμα, τοποθετημένο ανάμεσα σε δύο στρώματα ρητίνης βινυλεστερίνης. Η στοίβα συμπιέζεται μεταξύ των κυλίνδρων σε μορφή φύλλου και μετατρέπεται σε κυλίνδρους παρόμοια με τα τυποποιημένα ρολά ινών άνθρακα. Η περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα είναι στο 53% του βάρους. Το υλικό είναι σχεδιασμένο για χύτευση με συμπίεση σε ένα προσαρμοσμένο μεταλλικό εργαλείο με θερμαινόμενη πρέσα.



Εικόνα 12. Δέσμες ανθρακονημάτων μήκους 25,4mm.

Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης (πρέσα) για την παραγωγή του υλικού, η θερμοκρασία σκλήρυνσης κυμαίνεται μεταξύ 270 - 320 ° F (132 - 160 ° C), η εφαρμοζόμενη πίεση κυμαίνεται από 1000 - 1500psi (69 - 103bars) και οι χρόνοι πίεσης κυμαίνονται από 3 έως 5 λεπτά. Το φορτίο έχει τυπική κάλυψη μήτρας 60 - 70%. Το Όριο Θερμοκρασίας του υλικού είναι 245 ºF (120 ºC). Το ελάχιστο πάχος που μπορεί να επιτευχθεί με αυτό το υλικό είναι συνήθως 0,1 ίντσες (2,5mm).

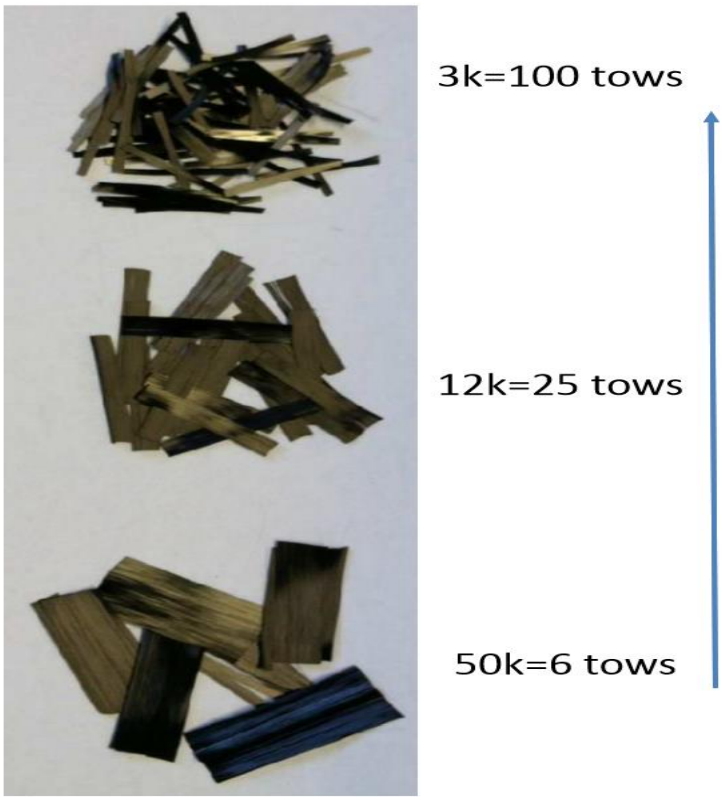


Εικόνα 13. Σφυρηλάτηση με χυτό ανθρακόνημα (forged composite material).

2.3 Ιδιότητες

Θα πρέπει να γίνει υπενθύμιση ότι όταν χρησιμοποιείται το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) για την κατασκευή του κάτω βραχίονα της ανάρτησης, η αντοχή σε εφελκυσμό δεν είναι μεγάλη. Αντίθετα η θλιπτική και καμπτική αντοχή είναι υψηλές. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει σημαντικά από τις συνεχείς μορφές σύνθετου υλικού (συνεχείς ίνες άνθρακα), όπου οι κάμπτικες και οι θλιπτικές αντοχές είναι πολύ χαμηλότερες από τις αντοχές εφελκυσμού.

Εικόνα 14. Λεπτομέρειες δεσμών συνεχών ινών.



Εικόνα 15. Λεπτομέρειες δεσμών κοντών ινών.

2.4 Κατασκευή

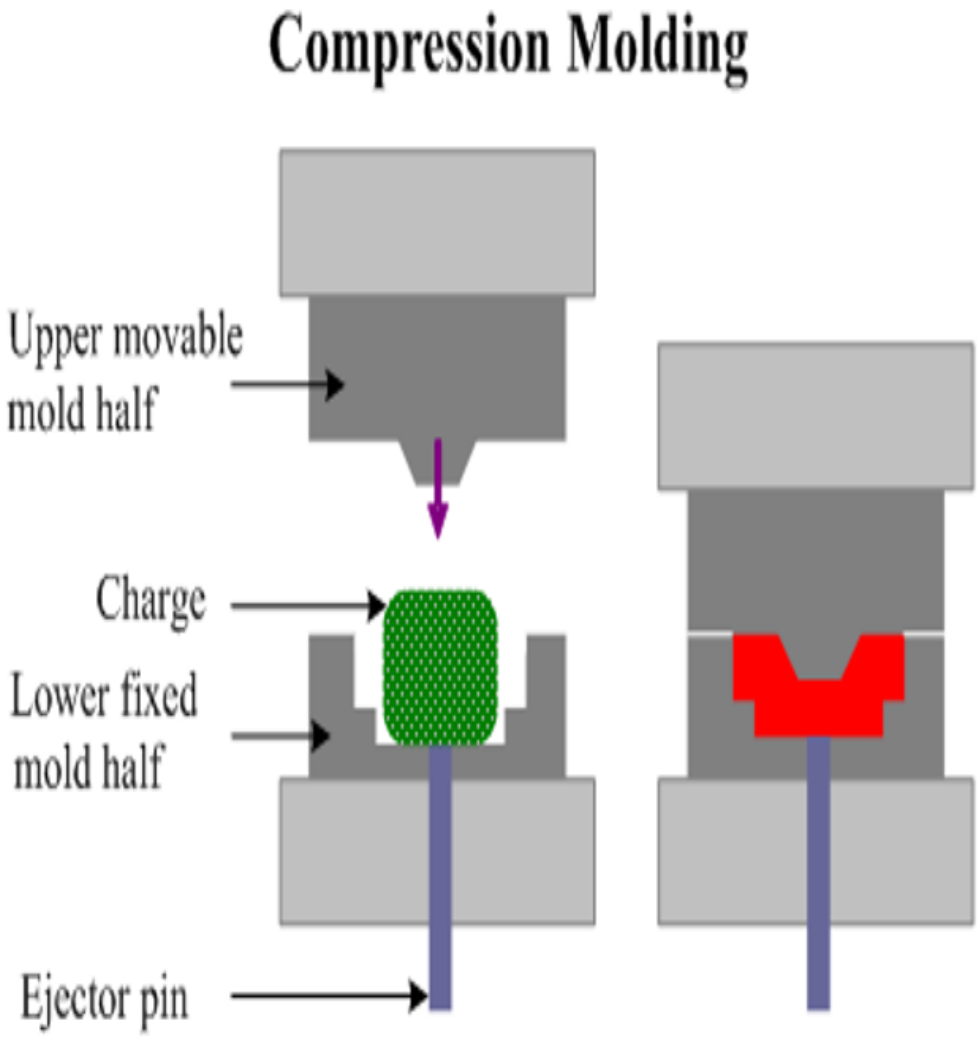
Μέσω της εκτεταμένης έρευνας και ανάπτυξης, έχει βελτιωθεί το υλικό καθώς και η διαδικασία, ώστε να είναι σε θέση να κατασκευάζονται εξαρτήματα με χαμηλότερο ελάχιστο πάχος (τόσο χαμηλά όσο 0,035in ή 1mm), καθώς και μειωμένες διακυμάνσεις της αντοχής, εξασφαλίζοντας έτσι τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών. Αυτή η βελτίωση επιτεύχθηκε με επιλεκτική και τοπική υβριδίωση με μονής κατεύθυνσης ίνες και χρήση χαμηλής ροής χύτευσης σε καλούπι. Αυτός ο τύπος χύτευσης χρησιμοποιεί μια περιοχή κάλυψης καλουπιού πάνω από 90% και έτσι ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ευθυγράμμισης των ινών κατά τη διάρκεια της ροής.

2.5 Τροποποίηση Γεωμετρίας

Φαίνεται ότι ο σχεδιασμός της ανάρτησης γίνεται ιδιαίτερα κρίσιμος ως προς την ακαμψία, αφού η δύναμη είναι σχεδόν ίδια με τη βασική γραμμή αλουμινίου. Η άμεση αντικατάσταση του υλικού Forged Composite® με την υπάρχουσα γεωμετρία δημιουργεί μια παραμόρφωση 60mm στην πλάγια κατεύθυνση, σχεδόν 2,5 φορές υψηλότερη από την αλουμινένια. Το υλικό κόβεται σε ορθογώνια σχήματα για να σχηματίσει το φορτίο, το οποίο έχει μέγεθος ανάλογα με το ονομαστικό βάρος του τελικού τμήματος. Οι επιλεκτικές εντοπισμένες μονοκατευθυντικές ενισχύσεις χρησιμοποιούνται εντός της κατασκευής.

Η κοπή φορτίου με ένα αυτοματοποιημένο τραπέζι κοπής διαρκεί μόνο δευτερόλεπτα, ενώ η τοποθέτηση φορτίου διαρκεί 2-3 λεπτά. Μόλις ολοκληρωθεί η φόρτιση, το προθερμασμένο καλούπι αλουμινίου είναι κλειστό και εφαρμόζεται πίεση. Ο κύκλος σκλήρυνσης είναι κάτω από τέσσερα λεπτά. Το τμήμα στη συνέχεια εξάγεται από το καλούπι με σχεδόν καθαρό σχήμα, ενώ απαιτείται ελάχιστη κοπή. Τα καθίσματα (τρύπες) για τους δακτυλίους επιτυγχάνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης με τη χρήση δύο ολισθητήρων. Οι αρθρώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιες με εκείνες της ανάρτησης αλουμινίου. Οι δύο χαλύβδινοι

δακτύλιοι εισάγονται με συμπίεση. Το ένθετο είναι επικαλυμμένο με επιφάνειες για αντιδιαβρωτική προστασία και συνδέεται με κόλλα φιλμ.



Εικόνα 16. Συμπίεση σφυρηλάτησης.

Ο εμπρός κάτω βραχίονας ελέγχου ζυγίζει 1,25kg μόνο για τις ίνες άνθρακα και 1,4kg με το συγκολλημένο ένθετο αλουμινίου. Με την προσθήκη των δύο δακτυλίων και του σφαιρικού συνδέσμου, το τελικό βάρος αυξάνεται στα 2,1kg, σε σύγκριση με τα 2,9kg της κατασκευής αλουμινίου. Συνολικά κατασκευάστηκαν 8 βραχίονες και 8 διαφορετικά σύνολα καλουπιών. Η τελική εξοικονόμηση βάρους για το σύνολο των 8 βραχιόνων ελέγχου, πλήρης των δακτυλίων και

των σφαιρικών αρθρώσεων, είναι 4,92kg (ή 27% σε σχέση με το αλουμινένιο), το οποίο είναι ελαφρώς χαμηλότερο από το επιθυμητό 30%. Η εξοικονόμηση βάρους ποικίλλει μεταξύ των διαφόρων βραχιόνων ελέγχου, από ύψος 32% για τον εμπρόσθιο βραχίονα, έως το χαμηλό 22% για το πίσω άνω μέρος. Το κόστος του τελευταίου μέρους είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικό με την κατασκευή σφυρηλατημένου αλουμινίου, καθώς ο συνολικός χρόνος κύκλου είναι λίγο πιο κάτω από μία ώρα, από την πρώτη ύλη έως το πλήρες μέρος με τους δακτυλίους και τη σφαιρική άρθρωση.

3 Κατασκευή Βραχίονα Ανεξάρτητης Ανάρτησης

3.1 Συστήματα ανεξάρτητης ανάρτησης

Το σύστημα ανάρτησης ενός αυτοκινήτου είναι το σύνολο των στοιχείων που συνδέουν τα αναρτημένα στοιχεία ενός οχήματος με τα μη αναρτημένα. Υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα ανάλογα με τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται. Τα συστήματα ανάρτησης χωρίζονται γενικά σε δύο ομάδες: εξαρτώμενα και ανεξάρτητα (Santamaria et al., 2018). Το επιλεγμένο όχημα έχει διπλό σύστημα Α-βραχίονα, το οποίο είναι ανεξάρτητο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε τροχός είναι απομονωμένος από την κίνηση των άλλων. Ένα αμορτισέρ ελατηρίου ελέγχει την κίνηση του συγκροτήματος. Αυτός ο τύπος ανάρτησης χαρακτηρίζεται από το ότι έχει δύο βραχίονες ελέγχου, τον άνω και τον κάτω. Συνήθως και οι δύο βραχίονες έχουν το ίδιο μήκος, αλλά υπάρχει μία διάταξη που είναι συχνά γνωστή ως βραδεία βραχίονα, για την οποία ο βραχίονας είναι συνήθως μικρότερος. Οι βραχίονες ελέγχου είναι τα στοιχεία που συνδέουν το σασί με τις αρθρώσεις των σφαιρών. Αυτοί οι βραχίονες στηρίζουν το αμορτισέρ και αποτελούν μέρος του συνδέσμου τεσσάρων ράβδων που καθορίζει τη σωστή κίνηση του συστήματος. Κάθε στοιχείο ανάρτησης εξασφαλίζει την επαφή των τροχών με το έδαφος, επιτρέποντας τη σχετική κίνηση μεταξύ των τροχών και του πλαισίου (Santamaria et al., 2018).

Επομένως, ένα σύστημα ανάρτησης σε κακές συνθήκες, με υπερβολική φθορά ή με κακό σχεδιασμό, δεν μπορεί να διατηρήσει τη σταθερότητα του οχήματος. Με αυτή την έννοια, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) επιτρέπει τον σχεδιασμό μηχανικών τμημάτων με την εκτίμηση της μηχανικής τους απόκρισης στις συνθήκες φόρτωσης (Santamaria et al., 2018). Σε αυτή την εργασία, η κατανομή τάσεων του κατώτερου βραχίονα ελέγχου ενός μικρού οχήματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό Onshape και SolidWorks. Πρώτον, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, η οποία περιλάμβανε λεπτομερώς τη διατύπωση του προβλήματος, τις διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό και την επεξεργασία.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιζόμενων φορτίων, οι καταστάσεις stress του von Mises και οι συνολικές κατανομές παραμόρφωσης. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

3.2 Μεθοδολογία Σχεδιασμού

Για την εκτέλεση μιας ανάλυσης τάσεων, ακολουθήθηκε η συνήθης διαδικασία για την επίλυση προβλημάτων που χρησιμοποιούν το FEM, η οποία χωρίζεται σε τρία στάδια: προεπεξεργασία, υπολογισμό και μετεπεξεργασία. Αρχικά συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα βιβλιογραφικά δεδομένα από τους Salmon et al (2018) όπου αναζητήθηκαν τα πρότυπα βάσει των οποίων στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ο σχεδιασμός και οι αναλύσεις.

3.2.1 Υλικά και Γεωμετρία

Το υλικό του κατώτερου βραχίονα ελέγχου, το στοιχείο που εξετάζεται για τη μελέτη, είναι κραματούχος χάλυβας 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο) γνωστός και ως χρωμόλη, με τις ιδιότητες να παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Αυτό το υλικό είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα για την κατασκευή αυτού του μηχανικού μέρους σε εμπορικά αυτοκίνητα, ενώ ακολουθούν τα κράματα αλουμινίου.

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες κραματούχου χάλυβα 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο) γνωστός και ως χρωμόλη.

Ιδιότητα	**Τιμή**
Tensile Ultimate strength Όριο Θραύσης	460 MPa
Tensile yield strength Όριο Διαρροής	250 MPa
Young's modulus Μέτρο Ελαστικότητας	200 GPa
Poisson's ratio Λόγος Poisson	0.3
Shear modulus Όριο Διάτμησης	7.69 GPa

Η γεωμετρία του τμήματος φαίνεται στην Εικόνα 17. Για τον ακριβή υπολογισμό της κατανομής τάσεων, η γεωμετρία πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη προς την πραγματική. Στην περίπτωση αυτής της ανάρτησης, το ελατήριο αμορτισέρ δεν συνδέεται με τον κάτω βραχίονα ως συνήθως, αλλά με το επάνω μέρος.

3.2.2 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Οι οριακές συνθήκες είναι τα φορτία που εφαρμόζονται στον βραχίονα ελέγχου και τα υποστηρίγματά του. Για να ληφθούν οι αντιδράσεις στο συστατικό που αναλύθηκε, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κίνησης χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Onshape και SolidWorks. Σε αυτή τη διαδικασία, τα ακόλουθα τμήματα του συστήματος διαμορφώθηκαν: 1) Άνω βραχίονας ελέγχου. 2) Κατώ βραχίονα ελέγχου. 3) Αμορτισέρ ελατηρίου. 4) Αρθρώσεις μπάλας.

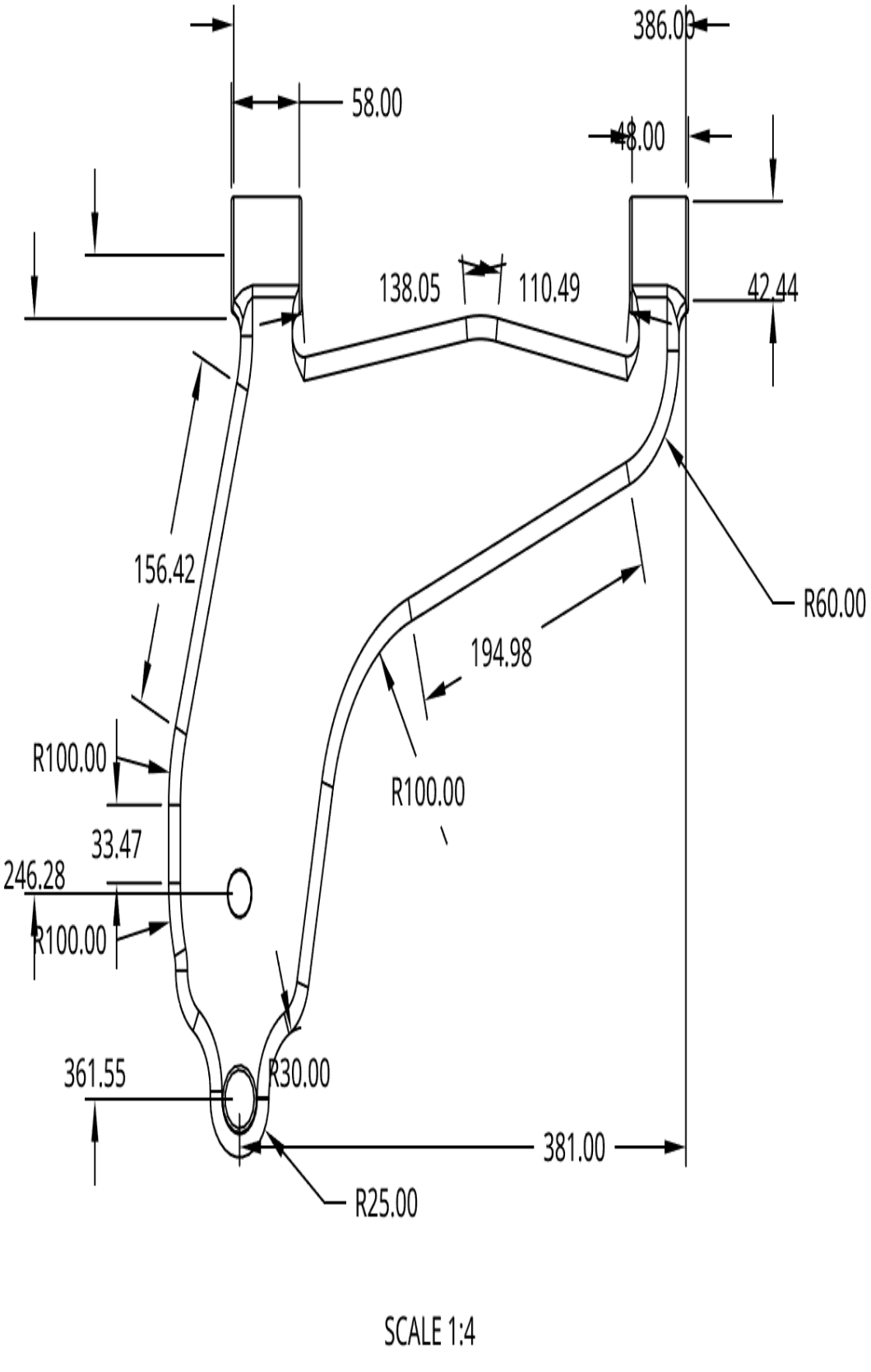
4 Ανάλυση

4.1 Σχεδιασμός και κατασκευή κάτω βραχίονα ανάρτησης.

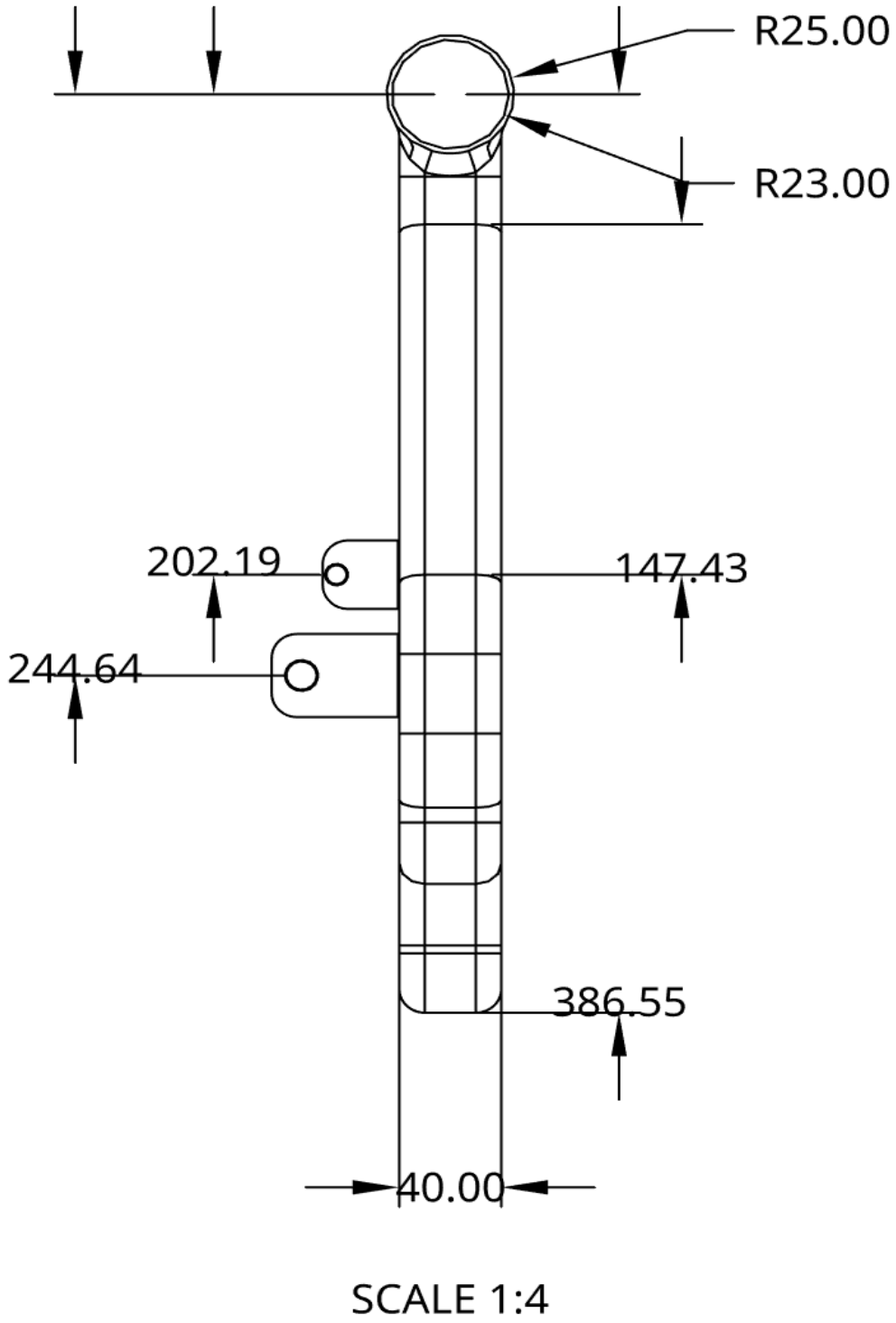
Η εκπόνηση της εργασίας βασίστηκε στο σχέδιο κατασκευής του κάτω βραχίονα ανάρτησης του μπροστινού συστήματος της εταιρίας MAZDA και ειδικότερα του μοντέλου MX5. Στο εξάρτημα έγιναν αντίστοιχες προσαρμογές, στο υλικό και στον τρόπο κατασκευής, με σκοπό την επίτευξη των στόχων της εργασίας. Ειδικότερα:

Το συγκεκριμένο εξάρτημα κατασκευάζεται από την εταιρία MAZDA από δύο φύλλα χυτοσιδήρου πάχους 5mm και συγκολλείται σε ειδική πρέσα. Εν προκειμένω, επιλέχθηκε η κατασκευή του από τρία διαφορετικά συμπαγή υλικά, το κραματούχο χάλυβα 4130 (χρώμιο – μολυβδαίνιο) γνωστός και ως χρωμόλη, το αλουμίνιο αεροπορικού τύπου 6063 – T83 και το σφυρήλατο σύνθετο υλικό (εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με κοντές δέσμες ινών Άνθρακα τυχαίας διεύθυνσης). Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν καταπονήσεις από δυνάμεις φρεναρίσματος και εγκάρσιου χτυπήματος, ώστε τελικώς συγκρίνοντας τις τιμές να προκύψει το επικρατέστερο από άποψη υψηλής αντοχής υλικό.

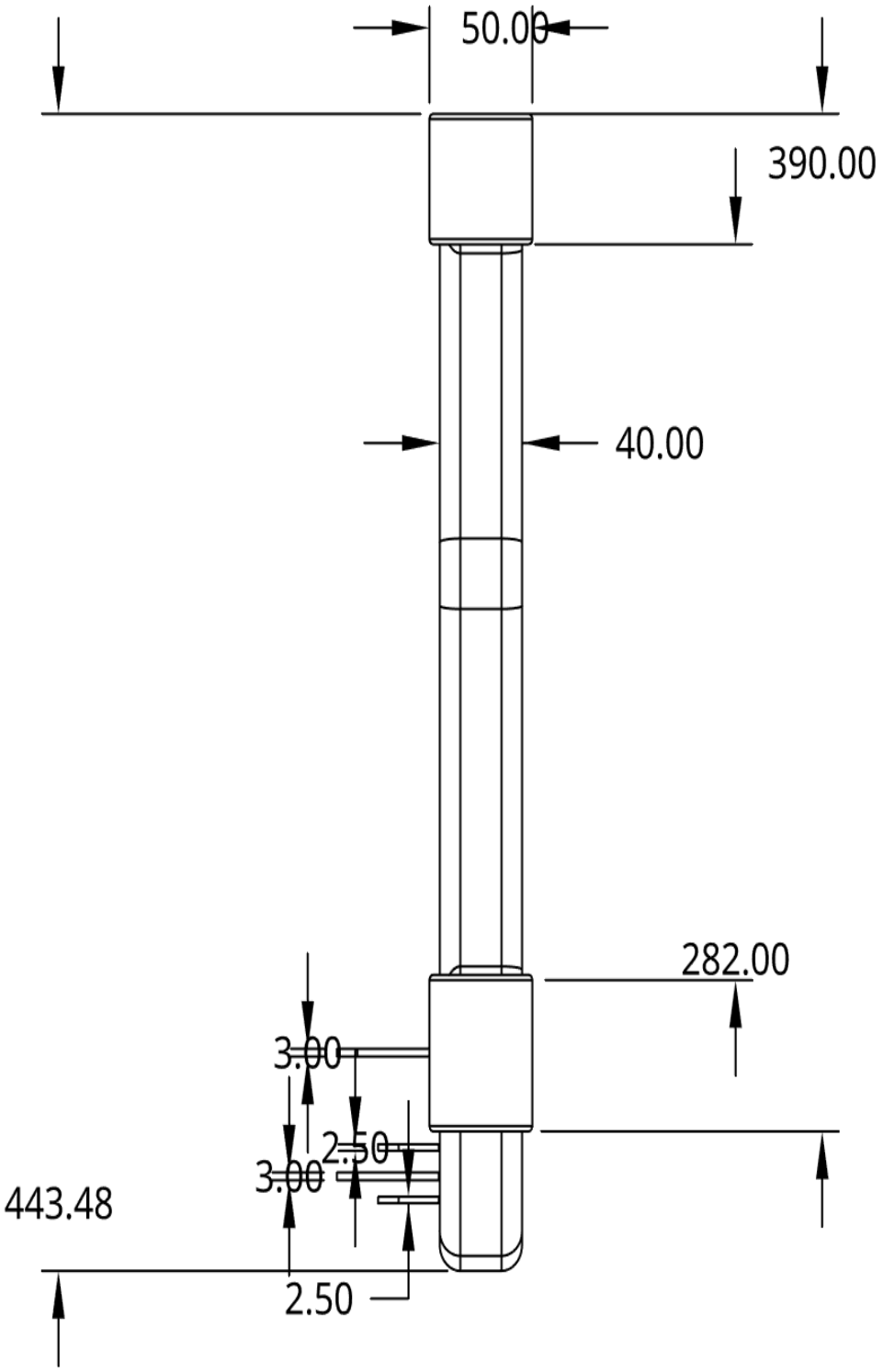
Εικόνα 17. Μπροστινό σύστημα ανάρτησης MAZDA MX5.



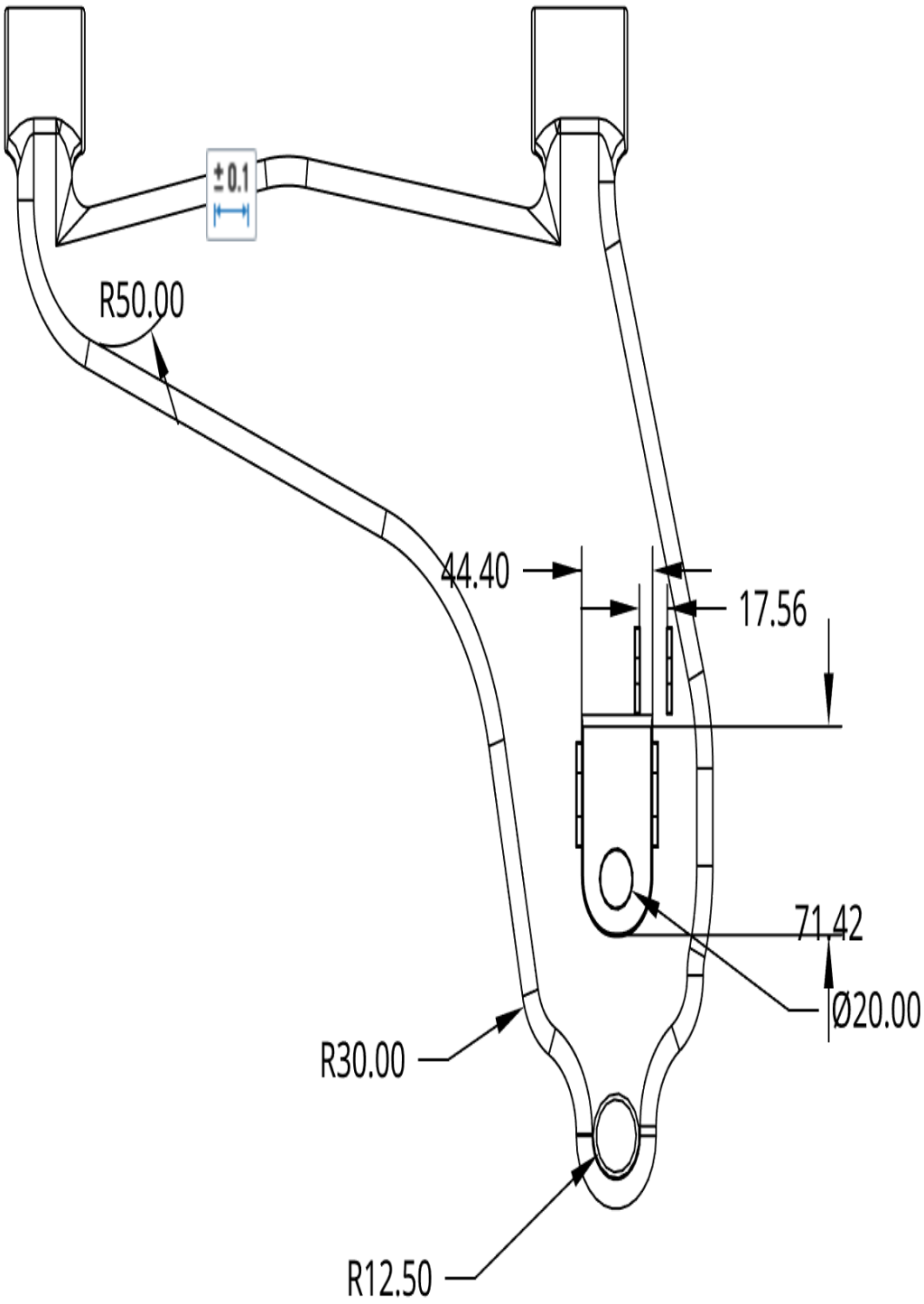
Εικόνα 18. Σχέδιο κάτω όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5.



Εικόνα 19. Σχέδιο αριστερής πλάγια όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5.



Εικόνα 20. Σχέδιο δεξιάς πλάγιας όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5.



Εικόνα 21. Σχέδιο πάνω όψης κάτω μέρος βραχίονα MAZDA MX5.

Ο κάτω βραχίονας ανεξάρτητης ανάρτησης κατασκευάστηκε και καταπονήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Onshape και SolidWorks.

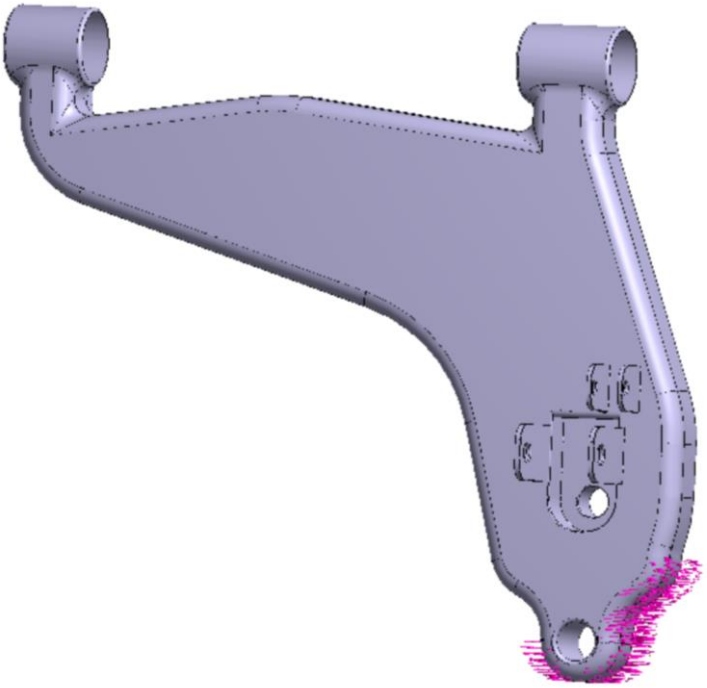
4.2 Καταπονήσεις κάτω βραχίονα ανεξάρτητης ανάρτησης σε φρενάρισμα και αναλύσεις

Η πρώτη καταπόνηση που δοκιμάστηκε και στα τρία υλικά είναι η καταπόνηση που δέχεται ο κάτω βραχίονας ανεξάρτητης ανάρτησης κατά το φρενάρισμα του αυτοκίνητου όπου διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

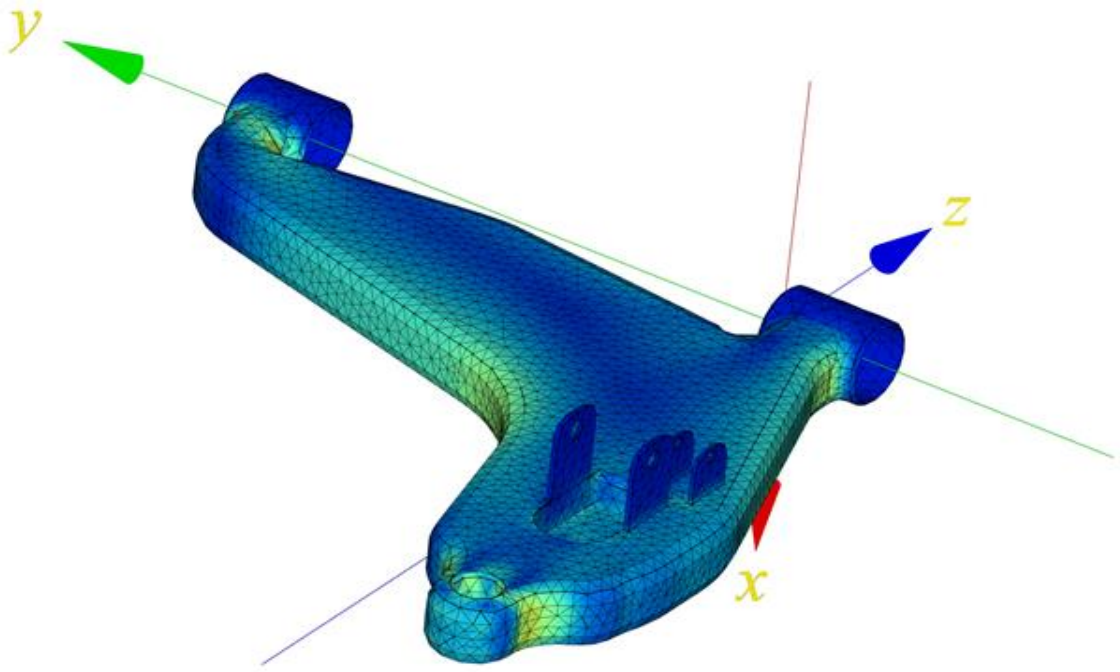
Α) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα έγινε από CHROMOLY AISI 4130 με τις εξής ιδιότητες:

Elastic Modulus	205000	N/mm^2
Poisson’s Ratio	0.285	-
Shear Modulus	80000	N/mm^2
Mass Density	7850	kg/m^3
Tensile Strength	731	N/mm^2
Yield Strength	460	N/mm^2

Πίνακας 2. Στοιχεία υλικού CHROMOLY AISI 4130.



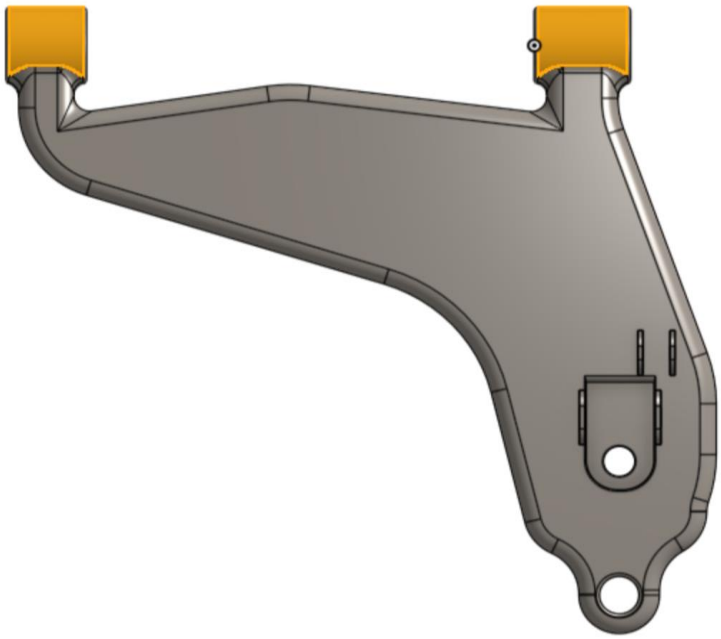
Εικόνα 22. Δυνάμεις καταπόνησης κατά το φρενάρισμα.



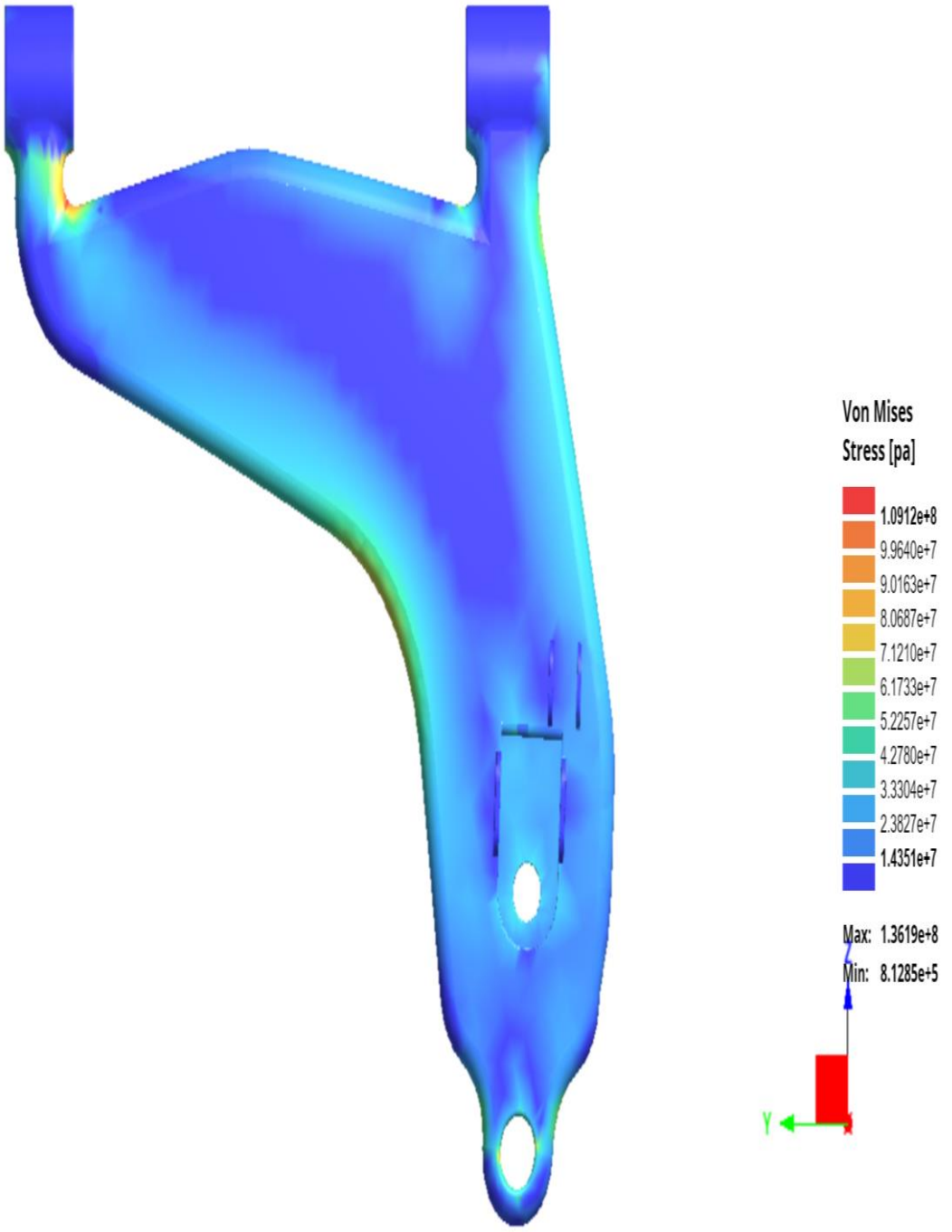
Διάγραμμα 6. Καταπονήσεις σε φρενάρισμα CHROMOLY AISI 4130.

ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	ΚΑΜΨΗ
ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	20000 N (Peilong Li, Hongmei Xu, Article ID 6713231, 2019)
ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ
ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΤΑ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΒΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Πίνακας 3. Στοιχεία καταπόνησης φρεναρίσματος.



Εικόνα 23. Σημεία στήριξης του κάτω βραχίονα.

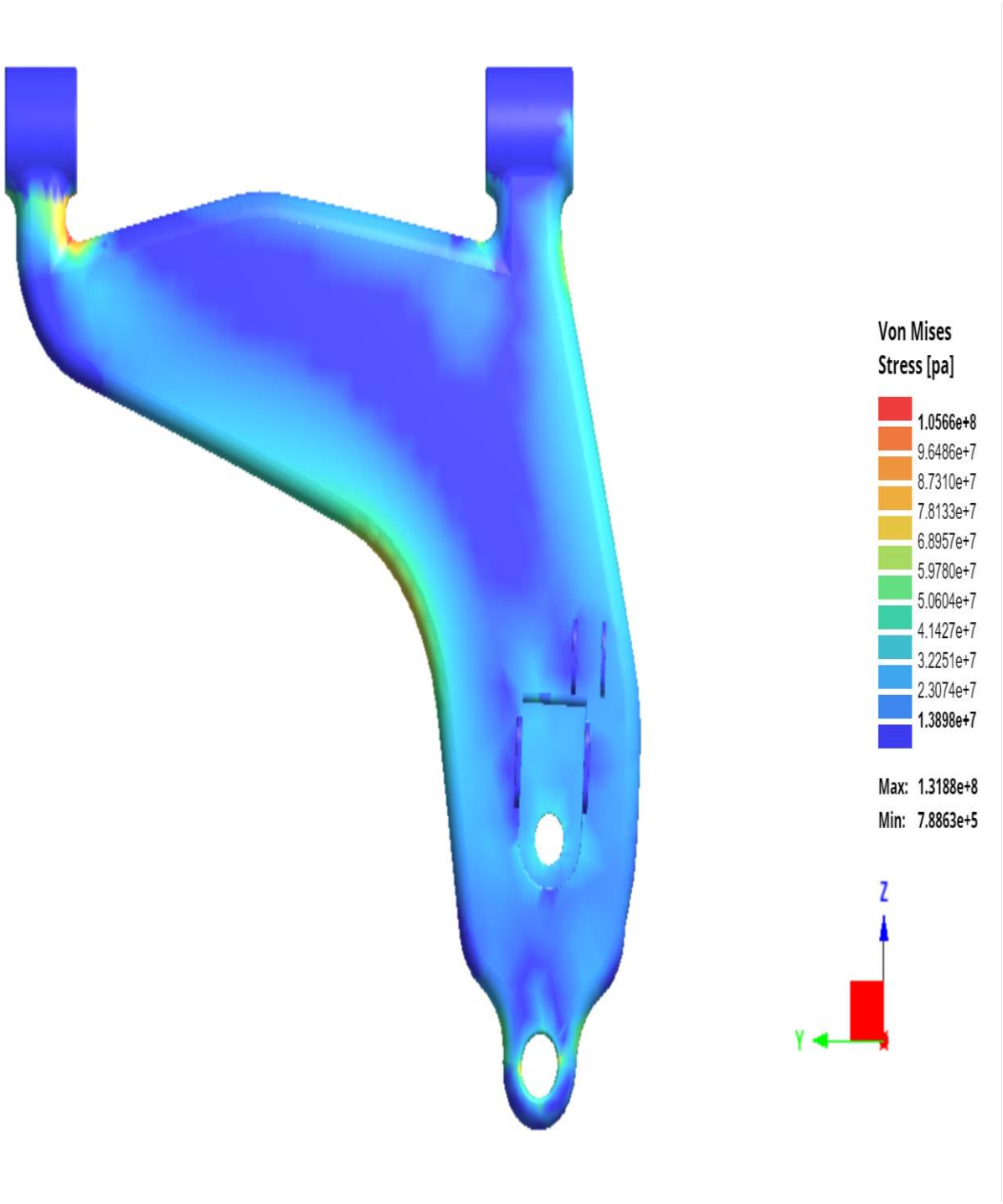


Διάγραμμα 12. Καταπονήσεις σε φρενάρισμα CHROMOLY AISI 4130.

Β) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα είναι από ALUMINIUM ALLOY 6063-T83 με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Elastic Modulus	69000	N/mm^2
Poisson’s Ratio	0.33	-
Shear Modulus	25800	N/mm^2
Mass Density	2700	kg/m^3
Tensile Strength	255	N/mm^2
Yield Strength	240	N/mm^2

Πίνακας 4. Στοιχεία υλικού ALUMINIUM ALLOY 6063-T83.

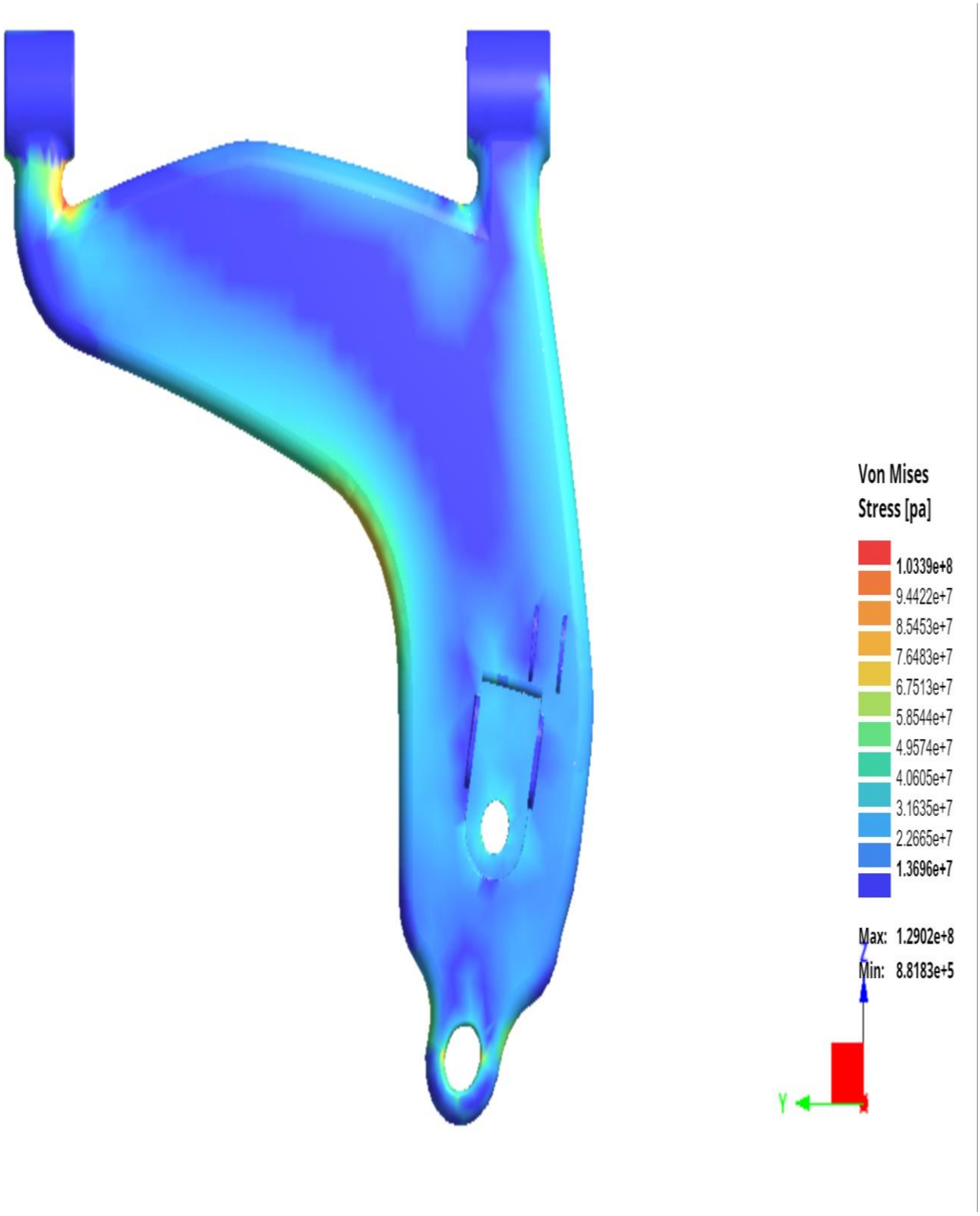


Διάγραμμα 13. Καταπονήσεις σε φρενάρισμα ALUMINIUM ALLOY 6063-T83.

Γ) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα έγινε από χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Elastic Modulus	33800	N/mm^2
Poisson’s Ratio	0.305	-
Mass Density	1450	kg/m^3
Tensile Strength	246	N/mm^2

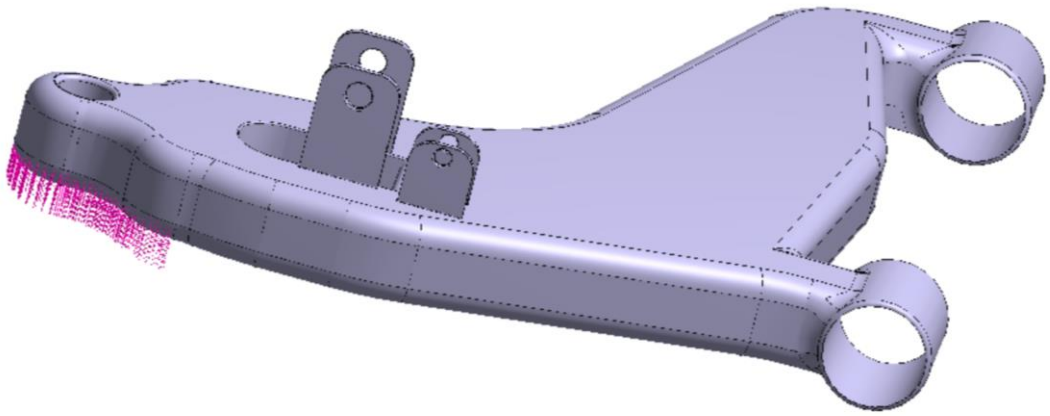
Πίνακας 5. Στοιχεία υλικού *CFSMC*.



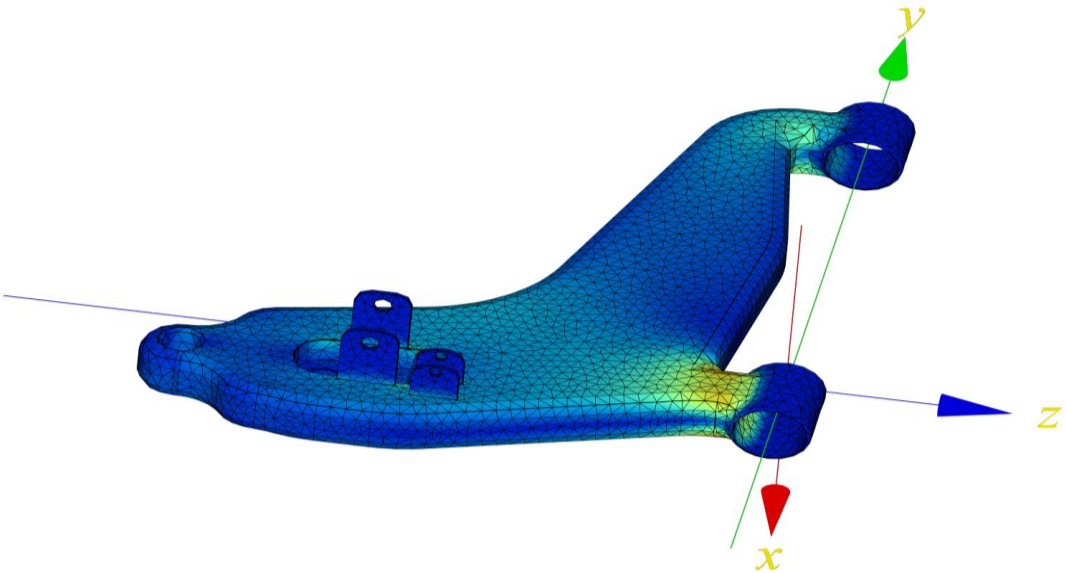
Διάγραμμα 14. Καταπονήσεις σε φρενάρισμα CFSMC.

4.3 Καταπονήσεις κάτω βραχίονα ανάρτησης σε εγκάρσια δύναμη και αναλύσεις

Στη συνέχεια τα τρία υλικά καταπονήθηκαν σε εγκάρσια δύναμη προερχόμενη από λακκούβα ή χτύπημα. Αντίστοιχα,



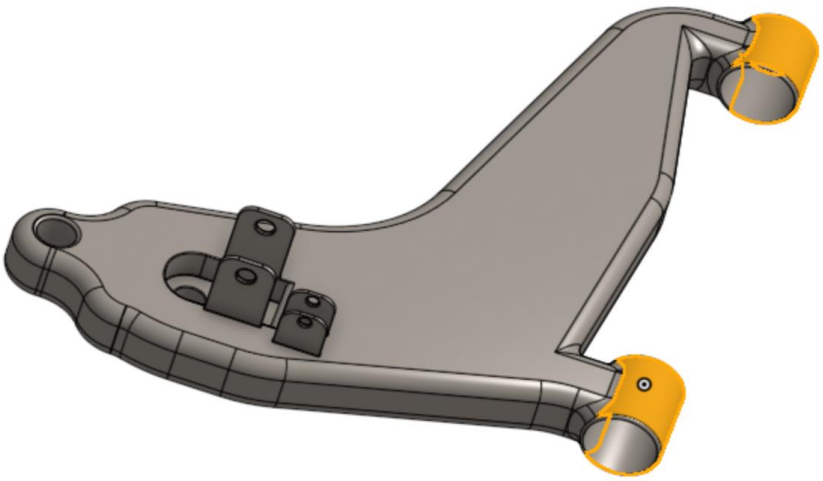
Εικόνα 24. Δυνάμεις εγκάρσιας καταπόνησης.



Διάγραμμα 15. Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση.

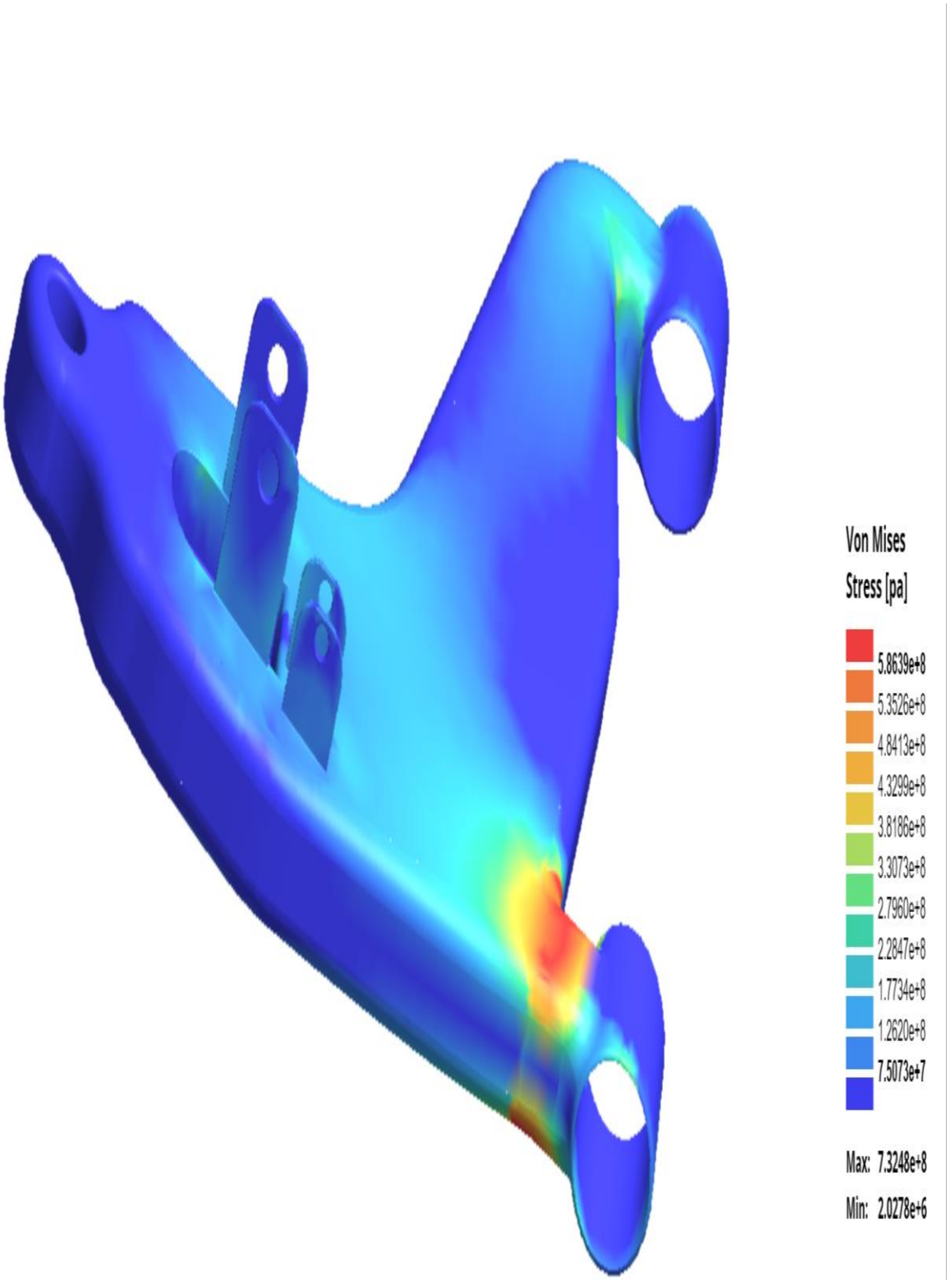
ΕΙΔΟΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	ΚΑΜΨΗ
ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	40000 N (Ren Rui, Bian Gong, Zhigang Fang, 2019)
ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΛΗΜΝΗΣ
ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΤΑ ΔΥΟ ΣΗΜΕΙΑ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΒΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Πίνακας 6. Στοιχεία εγκάρσιας καταπόνησης.



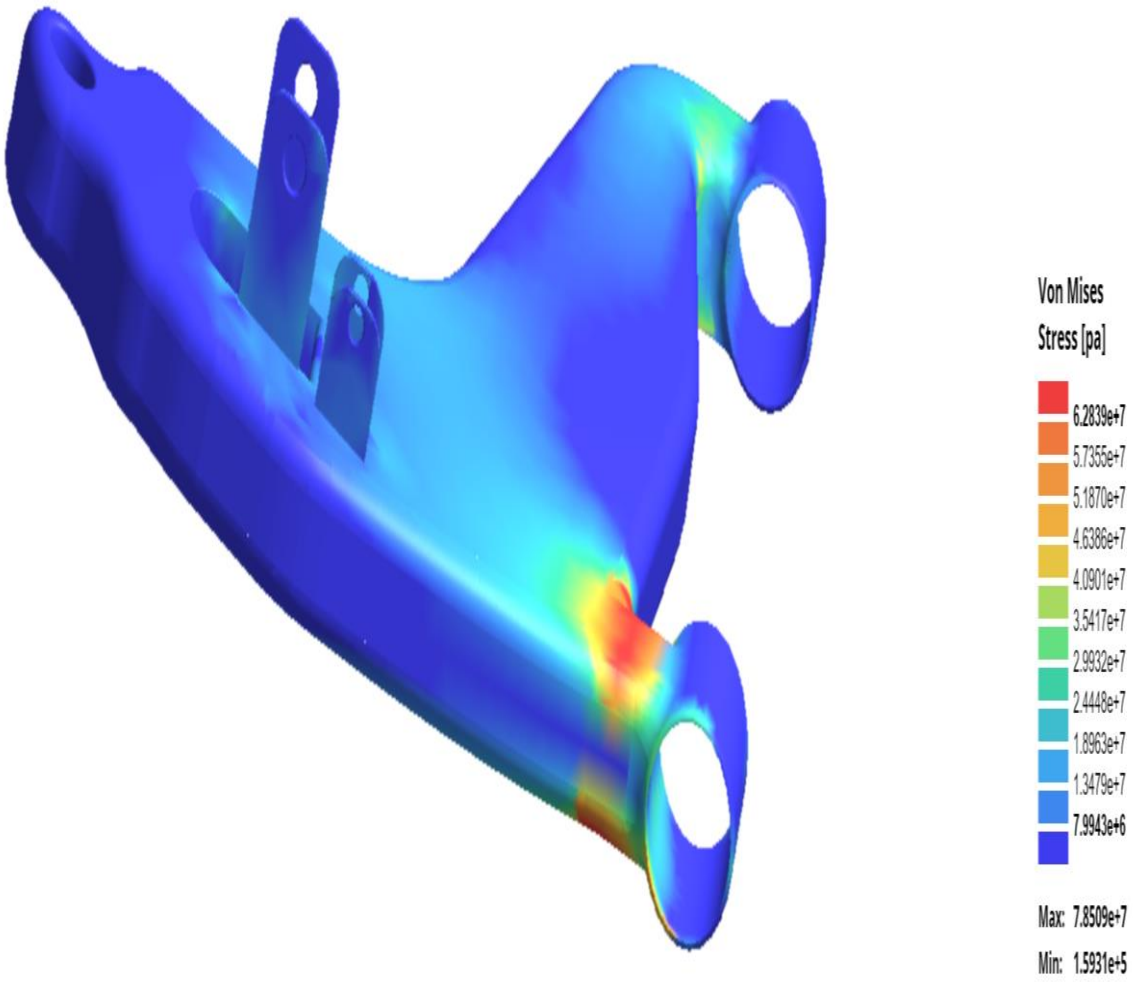
Εικόνα 25. Σημεία στήριξης του κάτω βραχίονα.

Α) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα έγινε από CHROMOLY AISI 4130:



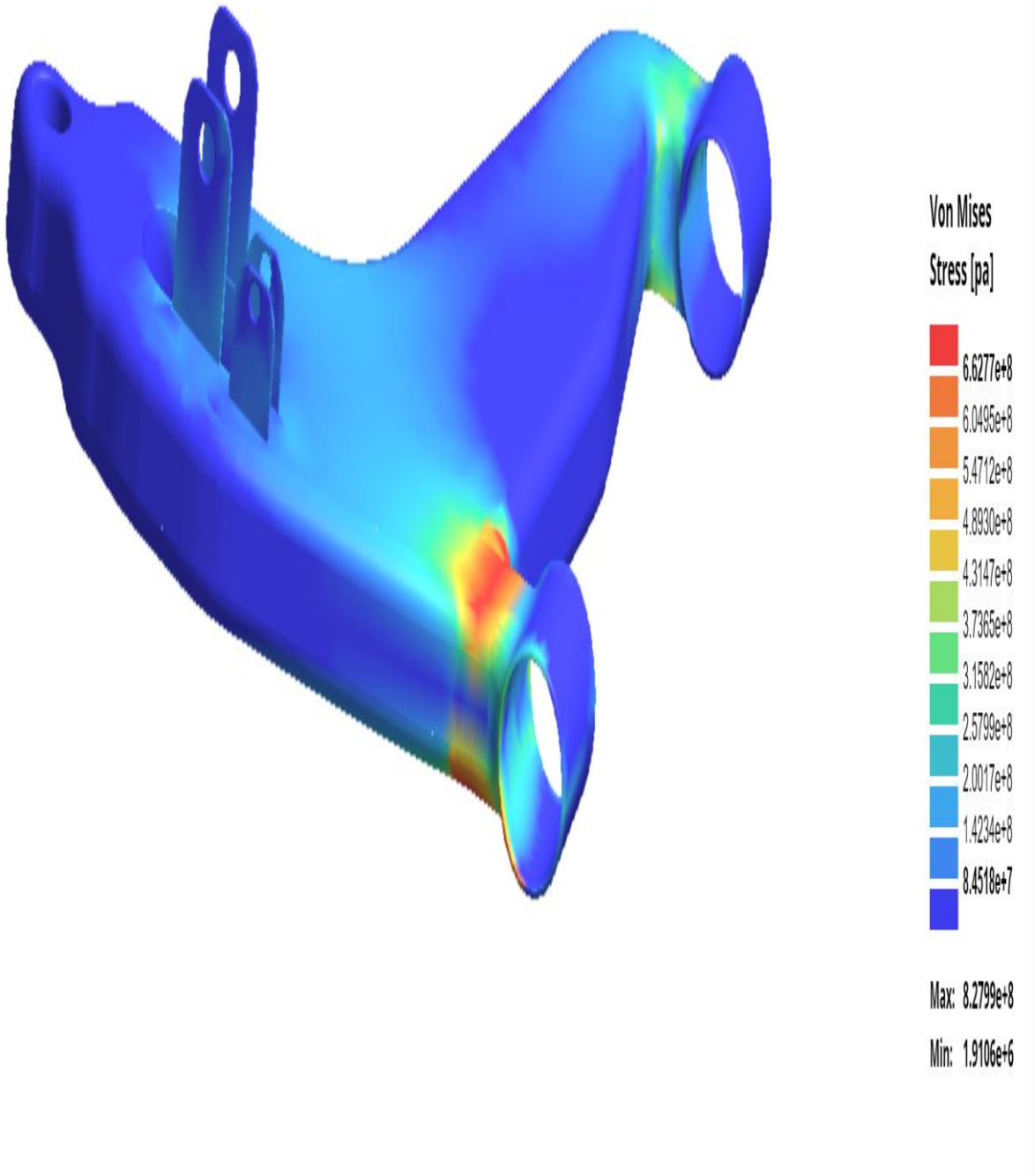
Διάγραμμα 16. Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CHROMOLY AISI 4130.

Β) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα έγινε από ALUMINIUM ALLOY 6063-T83:



Διάγραμμα 17. Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση ALUMINIUM ALLOY 6063-T83.

Γ) Όταν η κατασκευή του κάτω βραχίονα έγινε από χυτό ανθρακόνημα (CFSMC)



Διάγραμμα 18. Καταπονήσεις σε εγκάρσια καταπόνηση CFSMC.

5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης

Από τη διαδικασία καταπονήσεων που υπέστη το πειραματικό αντικείμενο σε φρενάρισμα και σε εγκάρσια δύναμη προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία παρατίθενται κατωτέρω συνολικά προκειμένου να γίνει σύγκρισή τους για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

5.1 Αποτελέσματα καταπόνησης σε φρενάρισμα και των τριών υλικών.

Πίνακας 7. Καταπόνηση σε φρενάρισμα.

ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΣΕ ΦΡΕΝΑΡΙΣΜΑ					
	Yield Strength	Μέγιστη Ταση	Συντελεστής Ασφαλείας	Mass Density	Συντελεστής Αντοχής
Chromoly	460MPα	136	3,382352941	7,8ton/m^3	0,433634992
Aluminium Alloy 6063-T83	240MPα	131	1,832061069	2,7ton/m^3	0,678541137
CFSMC	246MPα	129	1,906976744	1,4ton/m^3	1,362126246

Όπως παρατηρείται παραπάνω, ο κραματούχος χάλυβας (γνωστός ως χρωμόλη) ενώ έχει το μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας 3,382352941 και τη μεγαλύτερη μάζα 7,8t/m^3 έχει το μικρότερο Συντελεστή Αντοχής 0,433634992.

Το κράμα αλουμινίου 6063-T83 έχει Συντελεστή Ασφαλείας 1,832061069 και μάζα 2,7t/m^3 και δίνει Συντελεστή Αντοχής 0,678541137.

Το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) έχει Συντελεστή Ασφαλείας 1,906976744 και μάζα 1,4t/m^3 και δίνει τον υψηλότερο Συντελεστή Αντοχής 1,362126246 από τα τρία υλικά στην καταπόνηση του φρεναρίσματος.

5.2 Αποτελέσματα καταπόνησης σε εγκάρσια δύναμη και των τριών υλικών.

Πίνακας 8. Εγκάρσια Καταπόνηση.

ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ					
	Yield Strength	Μέγιστη Ταση	Συντελεστής Ασφαλείας	Mass Density	Συντελεστής Αντοχής
Chromoly	460	732	0,628415301	7,8ton/m^3	0,080566064
Aluminium Alloy 6063-T83	240	785	0,305732484	2,7ton/m^3	0,113234253
CFSMC	246	827	0,297460701	1,4ton/m^3	0,21247193

Όπως παρατηρείται παραπάνω, ο κραματούχος χάλυβας (γνωστός ως χρωμόλη) ενώ έχει το μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας 0,628415301 και τη μεγαλύτερη μάζα 7,8ton/m^3 έχει το μικρότερο Συντελεστή Αντοχής 0,080566064.

Το κράμα αλουμινίου 6063-T83 έχει Συντελεστή Ασφαλείας 0,305732484 και μάζα 2,7ton/m^3 και δίνει Συντελεστή Ασφαλείας 0,113234253.

Το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) έχει Συντελεστή Ασφαλείας 0,297460701 και μάζα 1,4ton/m^3 και δίνει τον υψηλότερο Συντελεστή Ασφαλείας 0,21247193 από τα τρία υλικά στην εγκάρσια καταπόνηση.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα CHROMOLY AISI 4130

Mass properties of CHROMOLY
Density = 0.01 grams per cubic millimeter
Mass = 20218.53grams
Volume = 2575609.34m^3
Surface area = 222983.09m^2

Πίνακας 10. Αποτελέσματα ALUMINIUM ALLOY 6063-T83

Mass properties of 6063-T83
Density = 0.00 grams per cubic millimeter
Mass = 6954.15grams
Volume = 2575609.34m^3
Surface area = 222983.09m^2

Πίνακας 11. Αποτελέσματα CFSMC

Mass properties of HEXCEL AS4C
Density = 0.00 grams per cubic millimeter
Mass = 3734.63grams
Volume = 2575609.34m^3
Surface area = 222983.09m^2

Όπως παρατηρείται στους παραπάνω πίνακες, η Chromoly παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα από το Aluminium Alloy 6063-T83 και το CFSMC, αλλά και μικρότερη μάζα.

6 Συμπεράσματα

Στην διπλωματική εργασία έγινε αναφορά για το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC), τον τρόπο κατασκευής του, τις μηχανικές του ιδιότητες, τις εφαρμογές του, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε στο λογισμικό Onshape και SolidWorks κάτω μέρος βραχίονα από Mazda MX5 με τρία διαφορετικά υλικά. Κατασκευάστηκε από chromoly, aluminium alloy 6063-T83 και χυτό ανθρακόνημα (CFSMC). Έγινε έλεγχος δυνάμεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων και καταπονήθηκε σε φρενάρισμα και σε εγκάρσια δύναμη.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση και των τριών υλικών και στις δύο καταπονήσεις όπου διαπιστώθηκε ότι το χυτό ανθρακόνημα έχει μεγαλύτερη αντοχή στις δυνάμεις που ασκήθηκαν στον κάτω βραχίονα της ανεξάρτητης ανάρτησης αλλά και χαμηλότερο βάρος από τα άλλα δύο κατά 30%.

Όπως παρατηρείται, ο κραματούχος χάλυβας (γνωστός ως χρωμόλη) ενώ έχει το μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας 3,382352941 και τη μεγαλύτερη μάζα 7,8t/m^3 έχει το μικρότερο Συντελεστή Αντοχής 0,433634992.

Το κράμα αλουμινίου 6063-T83 έχει Συντελεστή Ασφαλείας 1,832061069 και μάζα 2,7t/m^3 και δίνει Συντελεστή Ασφαλείας 0,678541137.

Το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) έχει Συντελεστή Ασφαλείας 1,906976744 και μάζα 1,4t/m^3 και δίνει τον υψηλότερο Συντελεστή Ασφαλείας 1,362126246 από τα τρία υλικά στην καταπόνηση του φρεναρίσματος.

. Αυτό οφείλεται βάσει αυτών που προαναφέρθηκαν στην παρούσα διατριβή, στο ότι η καταπόνηση του φρεναρίσματος δημιουργεί δυνάμεις ως προς τον άξονα y και εφελκυσμό στην εμπρός βάση συγκράτησης του κάτω βραχίονα. Το μειονέκτημα του χυτού ανθρακονήματος

(CFSMC) είναι η μικρή αντοχή στον εφελκυσμό για αυτό και έρχεται συγκριτικά τελευταίο κατά τις αναλύσεις.

Κατά την διάρκεια της εγκάρσιας καταπόνησης το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά που οφείλεται στο ότι το υλικό έχει πολύ μεγάλες αντοχές σε λύγιση, διάτμηση και θλίψη. Ακολουθεί η chromoly και τελευταίο το aluminium alloy 6063-T83.

Όπως παρατηρείται, ο κραματούχος χάλυβας (γνωστός ως χρωμόλη) ενώ έχει το μεγαλύτερο Συντελεστή Ασφαλείας 0,628415301 και τη μεγαλύτερη μάζα 7,8ton/m^3 έχει το μικρότερο Συντελεστή Αντοχής 0,080566064.

Το κράμα αλουμινίου 6063-T83 έχει Συντελεστή Ασφαλείας 0,305732484και μάζα 2,7ton/m^3 και δίνει Συντελεστή Αντοχής 0,113234253.

Το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) έχει Συντελεστή Ασφαλείας 0,297460701 και μάζα 1,4ton/m^3 και δίνει τον υψηλότερο Συντελεστή Αντοχής 0,21247193 από τα τρία υλικά στην εγκάρσια καταπόνηση.

Αυτό όμως που δίνει πολύ μεγάλο πλεονέκτημα στο χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) είναι το πολύ χαμηλό του βάρος σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά. Το χυτό ανθρακόνημα (CFSMC) έχει βάρος 3734.63grams ενώ η chromoly 20218.53grams και το aluminium alloy 6063-T83 6954.15grams αντίστοιχα. Το χαμηλό βάρος των εξαρτημάτων ελαχιστοποιεί το συνολικό βάρος του οχήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της οδηγικής συμπεριφοράς και τη χαμηλή κατανάλωση, το οποίο εκρέει από τις χαμηλές τιμές βάρους των μετακινούμενων μερών του οχήματος.

Ως εκ τούτου, αποδεικνύεται ότι το χυτό ανθρακόνημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως και σε οχήματα μαζικής παραγωγής, αποδίδοντας τις ίδιες ιδιότητες με αυτές ενός υπεραυτοκινήτου μάρκας Lamborghini.

Βιβλιογραφία

[1] “An Introduction to Modern Vehicle Design”, Edited by Julian Happian-Smith, Butterworth Heinemann, 2002

[2] Applications of carbon fiber SMC for the Dodge Viper by Mark Bruderick, Douglas Denton, Michael Shinedling, Daimler Chrysler Corporation, Michael Kiesel and Quantum Composites Inc.

[3] BMW (2016). The BMW i3 [Online]. http://www.bmw.co.kr/ ko/all-models/bmw-i/i3/2013/at-a-glance.html

[4] CHEVROLET (2016). The New Chevrolet Volt [Online]. http://www.chevrolet.com/volt-electric-car.html

[5] Dixon, J.C. The Shock Absorber Handbook, 2nd Edition, John Wiley and Sons, England, 2007.

[6] Elmarakbi, A. (2013). Automotive Series: Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness (1). Wiley. Somerset, UK.

[7] Feraboli, P., Gasco, F., Wade, B., Maier, S., Kwan, R. and Masini, A. (2011). Lamborghini “Forged Composite®” technology for the suspension arms of the Sesto Elemento. 2nd Joint US-Canada Conf. Composites – American Society for Composites. 26th Annual Technical Conf. Canadian Association for Composite Structures and Materials.

[8] https://www.quantumcomposites.com

[9] Jacob, A. (2010). BMW counts on carbon fibre for its Megacity Vehicle. Reinforced Plastics 54, 5, 38−41.

[10] Kim, K. S., Bae, K. M., Oh, S. Y., Seo, M. K., Kang, C. G. and Park, S. J. (2012). Trend of carbon fiber-reinforced composites for lightweight vehicles. Elastomers and Composites 47, 1, 65−74.

[11] Ling, L., Zhang, Q., Xiao, X., Wen, Z., & Jin, X. (2018). Integration of car-body flexibility into train–track coupling system dynamics analysis. Vehicle System Dynamics, 56(4), 485-505.

[12] Masini, A., Bonfatti, A. and Feraboli, P. (2006). Carbon fiber composites for improved performance of the Murcielago Roadster. 6th Annual SPE Automotive Composites Conf. & Exposition, Troy, USA.

[13] Paolo Feraboli, Federico Gasco, Bonnie Wade, "*Lamborghini "Forged Composite" Technology for the suspension arms of the Sesto Elemento*".

[14] Park, J.-H. (2014). Kia Unveils New, Upgraded Sorento [Online]. The Korea Times. http://www.koreatimes.co.kr/ www/news/biz/2016/02/388_163193.html

[15] R. Olsen, A. Bookholt, E. Melchiori, "Composite Suspension for Formula SAE Vehicle", M.Sc Thesis, Mech. Eng. Dept, California Polyt. State University, June 2010.

[16] Robert M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", Taylor & Francis, 1999

[17] Santamaría, P. A. C., Sierra, A., & Estrada, O. A. G. (2018). Stress analysis of a suspension control arm.

[18] Yoo, S., Doh, J., Lim, J., Kang, O., Lee, J., & Kang, K. (2017). Topologically optimized shape of CFRP front lower control ARM. International Journal of Automotive Technology, 18(4), 625-630.

[19] Μαρκολέφας Σ, ‘‘Παράδειγμα 3 ΜΣΚ11 Βασικά και Προηγμένα Υλικά Οχημάτων’’, Ψαχνά Ευβοίας, 2015.

[20] Peilong Li, Hongmei Xu, Article ID 6713231, 2019. Braking Efficiency and Stability of Chassis Braking System of Combine Harvester: The Theoretical Dervation and Virtual Prototype Simulation.

[21] Ren Rui, Bian Gong, Zhigang Fang, 2019. Force and strength analysis of FSAE racing suspension based on spatial analytic geometry.