

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 »

“ Κινηματική και δυναμική ανάλυση ανεξάρτητης
ανάρτησης τύπου Double wishbone σε αγωνιστικό
όχημα ανώμαλου δρόμου”

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

Βαλάκο Γρηγόριο του Αλεξάνδρου

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».

Νοέμβριος, 2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
Γενικό Τμήμα

ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

Κινηματική και δυναμική ανάλυση ανεξάρτητης ανάρτησης τύπου
Double wishbone σε αγωνιστικό όχημα ανώμαλου δρόμου

(Kinematical and Dynamical analysis of an Independent Double-
Wishbone Suspension System for an Off-Road Vehicle)

Επιβλέπων καθηγητής:

Στυλιανός Μαρκολέφας

Τριμελής Επιτροπή:

Δρ. Μαρκολέφας Στυλιανός, Επίκουρος Καθηγητής

Δρ. Γεωργαντζίνος Στυλιανός, Αναπληρωτής Καθηγητής

Δρ. Κριμπένης Αγαθοκλής, Αναπληρωτής Καθηγητής

Περιεχόμενα

	Σελίδα
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος εικόνων	6
Κατάλογος συμβόλων	9
Abstract	11
1. Εισαγωγή	12
1.1 Περίληψη	12
1.2 Πρόλογος	12
1.3 Δομή και Διαδικασία Σχεδιασμού	13
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	15
2.1 Πλαίσιο οχήματος	15
2.2 Δυναμική τροχού	17
2.2.1 Τροχός	17
2.2.2 Ζάντα	19
2.3 Δυναμική Οχήματος	21
2.3.1 Σύστημα συντεταγμένων Τροχού	21
2.3.2 Δυνάμεις που επενεργούν	22
2.3.3 Διαμήκης Ολίσθηση (Longitudinal slip)	22
2.4 Τύποι Αναρτήσεων	23
2.4.1 Εξαρτημένες αναρτήσεις άκαμπτου άξονα	23
2.4.2 Ανεξάρτητη ανάρτηση	24
2.5 Κύρια εξαρτήματα Ανάρτησης	26
2.5.1 Βραχίονες Ελέγχου	26
2.5.2 Βραχίονας Σύνδεσης	27
2.5.3 Σπειροειδές Ελατήριο	28

2.6 Παραδοχές και υποθέσεις Οχήματος	30
2.6.1 Κατανομή μάζας	31
2.6.2 Υπολογισμός ελατηρίου	37
2.6.3 Υπολογισμός Δυνάμεων στην Ανάρτηση	39
3. Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση Ανάρτησης	41
3.1 Σασσί Αμαξώματος	41
3.2 Τροχός	45
3.3 Βραχίονες Ελέγχου	48
3.4 Βραχίονας Σύνδεσης	49
3.5 Ελικοειδές ελατήριο	50
4. Δυναμική Ανάλυση Ανάρτησης	
4.1 Εισαγωγή στην δυναμική ανάλυση	52
4.2 Οριακές συνθήκες	53
4.3 Επιλογή υλικού	54
4.4 Στατική ανάλυση κάτω και άνω βραχίονα	55
4.4.1 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 1018	56
4.4.2 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 1541	60
4.4.3 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 4130	61
4.4.4. Στατική ανάλυση άνω βραχίονα με AISI 4130	63
4.5 Στατική ανάλυση ελατηρίου	64
4.5.1 Στατική ανάλυση ελατηρίου με ASTM-227	65
4.5.2 Στατική ανάλυση ελατηρίου με το AISI 6150	67
4.5.3 Στατική ανάλυση ελατηρίου με το Inconel 713	69
5. Κινηματική και Δυναμική Ανάλυση Ανάρτησης	72
5.1 Μελέτη περίπτωσης: Εμπόδιο	72
5.2 ANSYS Transient Structural Analysis	73
6. Συμπεράσματα	77
Βιβλιογραφικές αναφορές	81

Κατάλογος εικόνων

	Σελίδα
Εικόνα 1. Τυπικά παραδείγματα πλαισίων τύπου χωροδικτυώματος	15
Εικόνα 2. Κάτοψη χωροδικτυώματος οχήματος	17
Εικόνα 3. Τυποποίηση ελαστικών κατά το πρότυπο ETRTO	18
Εικόνα 4. Διατομή ελαστικού	19
Εικόνα 5. Παράδειγμα τυποποίησης ζάντας	20
Εικόνα 6. Τα διαφορετικά προφίλ της ζάντας	20
Εικόνα 7. Οι περιπτώσεις αντιστάθμισης της ζάντας	20
Εικόνα 8. Σύστημα συντεταγμένων τροχού	21
Εικόνα 9. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι των συνδέσμων	24
Εικόνα 10. Μια τυπική διάταξη της ανάρτησης με διπλά ψαλίδια	25
Εικόνα 11. Παραδείγματα συνδέσμων 3 σημείων	26
Εικόνα 12. Διάταξη του συναρμολογήματος της πλήμνης του τροχού	27
Εικόνα 13. Παραδείγματα διάφορων βραχιόνων σύνδεσης	27
Εικόνα 14. Παραδείγματα αποσβεστήρων με ελικοειδές ελατήριο	28
Εικόνα 15. Οι βασικές διαστάσεις του οχήματος	30
Εικόνα 16. Οι ασκούμενες δυνάμεις σε ακίνητο όχημα	32
Εικόνα 17. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε επιταχυνόμενο όχημα	33
Εικόνα 18. Οι δυνάμεις οχήματος κατά την στροφή	35
Εικόνα 19. Η δύναμη που ενεργεί στο ελατήριο	37
Εικόνα 20. Οι δυνάμεις που ενεργούν στην ανάρτηση	39
Εικόνα 21. Διαγράμματα ελευθέρου σώματος στο ακραξόνιο της ανάρτησης	39
Εικόνα 22. Διαγράμματα ελευθέρου σώματος για τους βραχίονες της ανάρτησης	40
Εικόνα 23. Πρωταρχικό περίγραμμα του οχήματος	41
Εικόνα 24. Σχεδίαση των βασικών δοκών του χωροδικτυώματος	42
Εικόνα 25. Αντιγραφή του κατόπτρου για την ολοκλήρωση του σασσί	43
Εικόνα 26. Δημιουργία στηριγμάτων για το σύστημα της ανάρτησης	44

Εικόνα 27. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο του οχήματος	44
Εικόνα 28. (α) Σχεδίαση της βασικής διατομής της ζάντας του τροχού (β) Δημιουργία του στερεού μέσω περιστροφής της διατομής	45
Εικόνα 29. Εγκάρσια τομή της ζάντας	46
Εικόνα 30. Το μοτίβο για τα ανοίγματα της ζάντας (αριστερά) και ο κυκλικός πολλαπλασιασμός του γύρω από το κέντρο της ζάντας (δεξιά)	46
Εικόνα 31. Η βασική διατομή του ελαστικού και η δημιουργία του στερεού μέσω περιστροφής (αριστερά). Οι βασικές διαστάσεις του ελαστικού μετά την σχεδίαση (δεξιά)	47
Εικόνα 32. Η σχεδίαση του βραχίονα γίνεται πάνω στο υπάρχων χωροδικτύωμα	48
Εικόνα 33. Βασικές διαστάσεις του άνω και κάτω βραχίονα	48
Εικόνα 34. Ο ολοκληρωμένος κάτω βραχίονας μετά την προσθήκη του στηρίγματος για την υποστήριξη του ελατηρίου	49
Εικόνα 35. Ο βραχίονας σύνδεσης προσαρμοσμένος στους βραχίονες της ανάρτησης	49
Εικόνα 36. Ισομετρική όψη και εγκάρσια διατομή ελικοειδούς ελατηρίου	50
Εικόνα 37. Η ελικοειδής γραμμή για τη σχεδίαση του ελατηρίου και το παραγόμενο στερεό	51
Εικόνα 38. Το επάνω μέρος και η βάση για την συγκράτηση του ελατηρίου	52
Εικόνα 39. Το υπολογιστικό πλέγμα για τον κάτω βραχίονα	55
Εικόνα 40. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1018	56
Εικόνα 41. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1018	56
Εικόνα 42. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 σε mm	57
Εικόνα 43. Το σημείο όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων	57
Εικόνα 44. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου	58
Εικόνα 45. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου	58
Εικόνα 46. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 σε mm μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου	59
Εικόνα 47. Το ευάλωτο σημείο όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων μετά την ενίσχυση του	59
Εικόνα 48. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1541	60
Εικόνα 49. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1541	60

Εικόνα 50. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1541 σε mm	61
Εικόνα 51. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 4130	61
Εικόνα 52. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 4130	62
Εικόνα 53. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 4130 σε mm	62
Εικόνα 54. Ο συντελεστής ασφαλείας του άνω βραχίονα με το AISI 4130	63
Εικόνα 55. Η ισοδύναμη τάση von Mises του άνω βραχίονα με το AISI 4130	63
Εικόνα 56. Η παραμόρφωση του άνω βραχίονα με το AISI 4130 σε mm	64
Εικόνα 57. Το υπολογιστικό πλέγμα για το ελικοειδές ελατήριο	64
Εικόνα 58. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με ASTM-A227	65
Εικόνα 59. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το ASTM-A227 σε MPa	66
Εικόνα 60. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το ASTM-A227 σε mm	66
Εικόνα 61. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150	67
Εικόνα 62. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150 σε mm	68
Εικόνα 63. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150 σε MPa	68
Εικόνα 64. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713	69
Εικόνα 65. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713 σε mm	70
Εικόνα 66. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713 σε MPa	70
Εικόνα 67. Πρώτη Επαφή με το Εμπόδιο (αρχική θέση)	74
Εικόνα 68. Ανύψωση του τροχού	74
Εικόνα 69. Μέγιστη ανύψωση του τροχού	75
Εικόνα 70. Επαναφορά του τροχού	75
Εικόνα 71. Μέγιστη επαναφορά του τροχού	76
Εικόνα 72. Επιστροφή στην αρχική θέση	76

Κατάλογος συμβόλων

Σύμβολο	Ορισμός	Μονάδες
a_1	Απόσταση του κέντρου μάζας από τους μπροστινούς τροχούς	mm
a_2	Απόσταση του κέντρου μάζας από τους οπίσθιους τροχούς	mm
a_x	Επιτάχυνση ή επιβράδυνση οχήματος	$\frac{m}{s^2}$
C	Δείκτης ελατηρίου	Αδιάστατο
D	Μέση διάμετρος του ελατηρίου	mm
d_s	Παραμόρφωση ελατηρίου	mm
e	Δυναμικός συντελεστής από την στατική κατάσταση	Αδιάστατο
F_c	Φυγόκεντρη δύναμη κατά την στροφή	N
$F_{lateral}$	Δυναμική πλευρική μεταφορά φορτίου	N
F_{long}	Δυναμική οριζόντια μεταφορά φορτίου	N
F_x	Διαμήκης δύναμη	N
F_y	Πλευρική δύναμη	N
F_z	Κατακόρυφη δύναμη	N
F_{zf}	Κατακόρυφη δύναμη στον μπροστινό άξονα	N
F_{zsr}	Κατακόρυφη στατική δύναμη στον πίσω άξονα	N
F_{zsr1}	Κατακόρυφη στατική δύναμη στον πίσω τροχό	N
F_{szf}	Κατακόρυφη στατική δύναμη στον μπροστινό άξονα	N
F_{szf1}	Κατακόρυφη στατική δύναμη στον μπροστινό τροχό	N
F_{zr}	Κατακόρυφη δύναμη στον πίσω άξονα	N
F_{zracc}	Κατακόρυφη δύναμη στον πίσω άξονα κατά την επιτάχυνση	N
F_{zfac}	Κατακόρυφη δύναμη στον μπροστινό άξονα κατά την επιτάχυνση	N
F_{zrbr}	Κατακόρυφη δύναμη στον πίσω άξονα κατά την φρενάρισμα	N
F_{zfb}	Κατακόρυφη δύναμη στον μπροστινό άξονα κατά την φρενάρισμα	N
F_{dsf}	Δυναμικό φορτίο που ενεργεί στο ελατήριο	N

G	Μέτρο διάτμησης	GPa
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας	$\frac{m}{s^2}$
h	Απόσταση του κέντρου μάζας από το έδαφος	mm
K_s	Ακαμψία ελατηρίου	
L_{free}	Ελεύθερο μήκος του ελατηρίου	mm
M_y	Ροπή αντίστασης σε κύλιση	Nm
M_z	Ροπή ευθυγράμμισης	Nm
m_{sprung}	Αναρτημένη μάζα οχήματος	Kg
n	Αριθμός των ενεργών σπειρών στο ελατήριο	Αδιάστατο
S_u	Όριο μέγιστης εφελκυστικής αντοχής	MPa
S_y	Όριο διαρροής	MPa
t_1	Εμπρόσθιο μετατρόχιο	mm
t_2	Οπίσθιο μετατρόχιο	mm
W	Βάρος οχήματος	N
w_d	Ποσοστό κατανομής βάρους (εμπρός πίσω)	Αδιάστατο
x_1	Απόσταση του σημείου περιστροφής του ελατηρίου στον κάτω βραχίονα με το σημείο περιστροφής του άκρου του στο σασί	mm
x_2	Απόσταση του σημείου περιστροφής του ελατηρίου στον κάτω βραχίονα με το σημείο περιστροφής του άκρου του στο σασί	mm

Καταλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Βασικές διαστάσεις οχήματος	30
Πίνακας 2.. Βασικοί Παράμετροι Οχήματος	31
Πίνακας 3. Βασικές παράμετροι για τον υπολογισμό του ελατηρίου	37

Abstract

This document constitutes the Master's Thesis completed as part of the MSc program "Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems" at the National and Kapodistrian University of Athens. It focuses on the kinematical and dynamical analysis of an independent double-wishbone suspension system for an off-road vehicle. Off-road vehicles are designed in such a way that they can traverse rough terrains with relative ease, operating beyond the confines of paved roads. As a result, their various subsystems must meet a set of specific requirements, as the operating conditions for such vehicles are both unique and challenging. Among the most critical subsystems, which significantly influence the behavior, durability, and comfort of the vehicle, is the suspension system.

The purpose of this thesis is to conduct the kinematic and dynamic analysis of an independent double-wishbone suspension system for an off-road buggy-type vehicle. The kinematic aspect involves the development and design of the mechanism and the analysis of its behavior under dynamic loading across various operating conditions. To achieve this, it is necessary to geometrically determine the primary pivot points within the space frame. The design phase encompasses the three-dimensional modeling of the vehicle's chassis and the components of the independent suspension system using the parametric software TopSolid, version 7.14. Following this, static analyses are performed on the key components designed, aiming to identify the developed loads under specified conditions.

Dynamic analysis is a critical tool for studying the behavior of mechanical systems under time-varying loads. In this study, this method is applied to simulate and evaluate the suspension system's response of a buggy encountering obstacles such as irregular stones. Using ANSYS Transient Structural software, forces exerted, the wheel's dynamic movement, and stresses transmitted to the chassis are analyzed. The results enhance the understanding of factors affecting the vehicle's stability and performance, providing valuable insights for optimizing its design.

1. Εισαγωγή

1.1 Περίληψη

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο ΠΜΣ: 'Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων' του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και αναφέρεται στη κινηματική και δυναμική ανάλυση μιας ανεξάρτητης ανάρτησης με διπλά ψαλίδια για όχημα ανώμαλου δρόμου. Τα οχήματα ανώμαλου δρόμου, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να κινούνται με μία σχετική άνεση σε συνθήκες εκτός της κανονικής ασφαλτοστρωμένης οδού. Για αυτό τον λόγο πρέπει τα διάφορα υποσυστήματα τους να ικανοποιούν μια σειρά από συγκεκριμένες απαιτήσεις, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας ενός τέτοιου οχήματος είναι ιδιαίτερες και ξεχωριστές. Ένα από τα κυριότερα υποσυστήματα που πρέπει να δίνεται μεγάλη έμφαση κατά τη σχεδίαση και επηρεάζει την συμπεριφορά, την αντοχή και την άνεση του οχήματος είναι το σύστημα της ανάρτησης.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κινηματική και δυναμική ανάλυση μιας ανεξάρτητης ανάρτησης με διπλά ψαλίδια για ένα όχημα ανώμαλου δρόμου, τύπου buggy. Το κομμάτι της κινηματικής περιλαμβάνει την ανάπτυξη και σχεδίαση του μηχανισμού και την συμπεριφορά του κατά την δυναμική φόρτιση σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Για να γίνει αυτό, είναι απαραίτητος ο γεωμετρικός προσδιορισμός των βασικών σημείων περιστροφής στο χωροδικτύωμα. Το κομμάτι της σχεδίασης περιλαμβάνει την τρισδιάστατη μοντελοποίηση του σασί του οχήματος και των εξαρτημάτων που απαρτίζουν την ανεξάρτητη ανάρτηση στο παραμετρικό λογισμικό TopSolid έκδοσης 7.14. Έπειτα, γίνονται οι στατικές αναλύσεις για τα βασικά εξαρτήματα που σχεδιάστηκαν με σκοπό να προσδιοριστούν τα αναπτυσσόμενα φορτία.

1.2 Πρόλογος

Το σημείο εστίασης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ένα όχημα ανώμαλου δρόμου (off-road) τύπου buggy. Εξ ορισμού ένα τέτοιο όχημα πρέπει να είναι σε θέση να κινείται σε μη ασφαλτοστρωμένο οδόστρωμα προσφέροντας σχετική άνεση και ασφάλεια στον οδηγό καθώς επίσης σταθερότητα και ευκολία στον χειρισμό του. Θα πρέπει ακόμα να έχει επαρκή απόσταση από το έδαφος για να ξεπερνάει πιθανά εμπόδια όπου το μέγεθος τους ποικίλει. Ένα τέτοιο όχημα, επιτυγχάνει τα παραπάνω μέσω των διάφορων βασικών τμημάτων που το απαρτίζουν, το σασί, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και το υποσύστημα ανάρτησης του. Καθένα από αυτά τα υποσυστήματα επηρεάζει τα υπόλοιπα και για αυτό είναι απαραίτητος ο καθορισμός τους. Προαπαιτούμενο στάδιο για την ανάπτυξη της ανάρτησης είναι ο ορισμός του τύπου και των διαστάσεων του σασί που θα χρησιμοποιηθεί, πάνω στο οποίο θα εφαρμόζει και θα ενεργεί ο μηχανισμός της ανάρτησης. Το υποσύστημα της ανάρτησης συνδέει το σασί του οχήματος με τους τροχούς, επιτρέποντας την οδήγηση του, το φρενάρισμα και τον έλεγχο της διεύθυνσης του. Για τον λόγο αυτό η κατανόηση της συμπεριφοράς του τροχού είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς από αυτή την αλληλεπίδραση τροχού-οδοστρώματος θα προκύψουν όλες οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις.

1.3 Δομή και Διαδικασία Σχεδιασμού

Η σχεδίαση κάποιου υποσυστήματος του οχήματος, στην συγκεκριμένη περίπτωση μιας ανάρτησης, είναι συχνά ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Η διαδικασία της σχεδίασης είναι επαναληπτική γιατί πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί του υποσυστήματος και του γενικότερου συστήματος στο οποίο εργάζεται η ανάρτηση. Για να καταστεί σαφής η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα, θα περιγραφεί η δομή της εργασίας, η λογική της σχεδίασης και η σειρά με την οποία γίνονται οι παραδοχές και οι υπολογισμοί.

Αρχικά, θα δοθεί έμφαση στο θεωρητικό υπόβαθρο για τα κύρια μέρη της ανάρτησης και τις έννοιες για το πως αυτά αλληλοεπιδρούν. Στη συνέχεια, θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε κάθε εξάρτημα στο σχεδιαστικό λογισμικό Torsolid. Έπειτα, θα ακολουθήσουν οι παραδοχές και οι υπολογισμοί για τις διάφορες συνθήκες οδήγησης και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται. Στο τέλος, τα εξαρτήματα που απαρτίζουν το όχημα, θα εισαχθούν στο σχεδιαστικό περιβάλλον Fusion 360 της Autodesk, όπου θα γίνει η ανάλυση τους υπό την δράση διάφορων φορτίων.

Ο βασικός σχεδιασμός από τον οποίο θα ξεκινήσει το αρχικό κομμάτι της σχεδίασης είναι ο καθορισμός των ακραίων ορίων της γεωμετρίας. Η πορεία της σχεδίασης θα είναι από το εξωτερικό προς το εσωτερικό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατασκευής του πλαισίου του οχήματος. Έπειτα, προσδιορίζεται ο τροχός που είναι η μοναδική διεπαφή μεταξύ του οδοστρώματος και του οχήματος και συνεπώς φέρει όλα τα φορτία, παίζοντας καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά του οχήματος. Στη συνέχεια, σχεδιάζονται οι άνω και κάτω βραχίονες που μαζί με το ακραξόνιο ενώνουν τον τροχό με το υπόλοιπο όχημα. Έπειτα, δοσμένων των συγκεκριμένων διαστάσεων θα γίνει ο υπολογισμός και η σχεδίαση του ελατηρίου.

Η δυναμική και κινηματική ανάλυση αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο για τη μελέτη της συμπεριφοράς μηχανικών συστημάτων υπό χρονικά μεταβαλλόμενα φορτία. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόζεται η μέθοδος αυτή για την προσομοίωση και αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος ανάρτησης ενός buggy όταν συναντά εμπόδια όπως ακανόνιστες πέτρες. Μέσω του λογισμικού ANSYS Transient Structural, αναλύονται οι δυνάμεις που ασκούνται, η δυναμική κίνηση του τροχού και οι καταπονήσεις που μεταφέρονται στο πλαίσιο. Τα αποτελέσματα επιτρέπουν την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του οχήματος, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

1.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Για το θεωρητικό υπόβαθρο των εννοιών του παρουσιάζονται στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα βιβλία των Heiβing, Ersoy, “*Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics*” (2011), των Barton και Fieldhouse “*Automotive Chassis Engineering*”, (2018), των Reimpell, Stoll και Betzler “*The Automotive Chassis: Engineering Principles*” (2002), του Guiggiani, “*The Science of Vehicle Dynamics: Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*”, (2018) και του Balkwill, “*Performance Vehicle Dynamics: Engineering & Applications*”, (2018). Μέσα από αυτά τα βιβλία αντλήθηκαν οι πληροφορίες για τα διάφορα υποσυστήματα του οχήματος και τις αναρτήσεις, καθώς επίσης και για τις συνθήκες λειτουργίας.

Πέρα όμως από αυτά τα βιβλία, για την εκπόνηση της εργασίας μελετήθηκαν και ορισμένα επιστημονικά άρθρα που επικεντρώνονται πιο συγκεκριμένα στην μελέτη και ανάλυση της αναρτήσης με διπλά ψαλίδια. Ένα, από αυτά είναι η επιστημονική δημοσίευση με τίτλο «*Design and analysis of double wishbone suspension system*» των Upadhyay, Deep, Dwivedi, Agarwall και Bansal. Σε αυτό το άρθρο, προτάθηκε μία μέθοδος για την σχεδίαση ανάρτησης με διπλά ψαλίδια, όπου στο κάτω άκρο τοποθετήθηκε ένας αποσβεστήρας. Η ανάλυση που υλοποιήθηκε στο Solidworks περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας μέσω των τάσεων von Mises για διάφορα υλικά και διατομές για τους βραχίονες ελέγχου.

Επίσης, ένα ακόμα άρθρο που βασίστηκε η εργασία όσον αφορά την μέθοδο της ανάλυσης είναι το «*Design and analysis of suspension system for an All-Terrain vehicle*» των Vashist και Kumar. Σε αυτό το άρθρο, ο στόχος ήταν να σχεδιαστούν και να μελετηθούν τα διάφορα εξαρτήματα της ανάρτησης σε ένα όχημα πάντως εδάφους. Έπειτα, τα εξαρτήματα αναλύθηκαν στο Ansys σε μία σειρά από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για την εύρεση του συντελεστή ασφαλείας κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Για να καταστεί σαφής η διαδικασία σχεδιασμού των εξαρτημάτων είναι απαραίτητο να δοθεί το θεωρητικό τους υπόβαθρο. Αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή των εξαρτημάτων, τον τρόπο με τον οποίο εργάζονται και συμπεριφέρονται στο γενικότερο συναρμολόγημα της ανάρτησης, καθώς και άλλες λεπτομέρειες σχετικά με το είδος του εξαρτήματος.



Εικόνα 1. Τυπικά παραδείγματα πλαισίων τύπου χωροδικτύωματος

Τα βασικά εξαρτήματα που να μελετηθούν είναι:

- i. το πλαίσιο του οχήματος
- ii. ο τροχός
- iii. ο άνω και κάτω βραχίονας
- iv. ο βραχίονας σύνδεσης
- v. το σπειροειδές ελατήριο

2.1 Πλαίσιο οχήματος

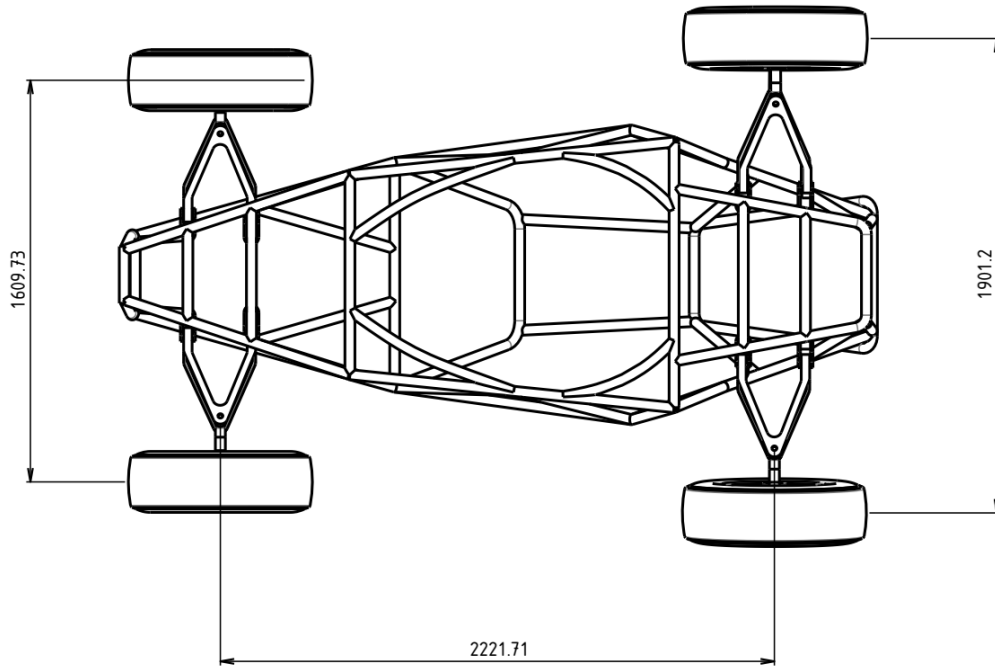
Βασικό προαπαιτούμενο για την ανάπτυξη της ανάρτησης, είναι η τοποθέτηση της στον χώρο και ο προσδιορισμός των σημείων περιστροφής/ πρόσδεσης (pivot/ mounting points). Για να γίνει αυτό πρέπει να επιλέξουμε τον τύπο και τις διαστάσεις του κυρίου σώματος (σασί) του οχήματος, που θα καθορίσει τις βασική γεωμετρία. Στην περίπτωση του οχήματος εκτός δρόμου το πλαίσιο που είναι πιο σύνηθες και θα χρησιμοποιηθεί εδώ, αποτελείται από ένα σύνολο συνδέσμων-μελών που ονομάζεται χωροδικτύωμα (spaceframe).

Οι χαρακτηριστικές γεωμετρικές παράμετροι που μας ενδιαφέρουν είναι οι παρακάτω:

1. Μεταξόνιο (Wheelbase), η απόσταση (στο επίπεδο XY) μεταξύ των δυο αξόνων, μπροστινού και οπίσθιου. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 612 / DIN 70000 η μέτρηση γίνεται από τα κέντρα των σημείων επαφής του τροχού με το οδόστρωμα. Τυπικές τιμές μεταξονίου είναι μεταξύ 2100 mm – 3400 mm, με τον μέσο όρο να κυμαίνεται στα 2500 mm. Μικρότερο μεταξόνιο προσφέρει καλύτερη ευελιξία κίνησης (maneuverability), καλύτερη συμπεριφορά κατά την στροφή και ελαχιστοποιεί το βάρος και το κόστος.
2. Μετατρόχιο (Trackwidth), η απόσταση (στο επίπεδο YZ) μεταξύ των δυο μπροστινών ή οπίσθιων τροχών. Η μέτρηση γίνεται ανάμεσα στα κέντρα των σημείων επαφής με το οδόστρωμα σε έναν άξονα. Έτσι, ενδέχεται να είναι διαφορετικό για κάθε άξονα. Τυπικές τιμές είναι μεταξύ 1210-1600 mm. Μεγαλύτερο μετατρόχιο προσφέρει καλύτερη οδηγική συμπεριφορά, μειωμένη κύλιση και βελτιωμένη σχεδιαστική αισθητική.[1]
3. Ανοχή εδάφους (Ground clearance), η απόσταση του χαμηλότερου σημείου του οχήματος από το έδαφος. Η επαρκής απόσταση από το έδαφος προσφέρει την ικανότητα στο όχημα να ξεπερνάει πιθανά εμπόδια και διακυμάνσεις του οδοστρώματος .

Το πλαίσιο του οχήματος αποτελεί τον ενδιάμεσο σύνδεσμο ανάμεσα στις αναρτημένες και στις μη αναρτημένες μάζες του οχήματος. Αναρτημένες μάζες (μηχανή, σύστημα μετάδοσης κίνησης, σασί) είναι εκείνες που οι φορτίσεις τους μεταφέρονται στο έδαφος μέσω των αναρτήσεων. Αντίθετα μη αναρτημένες μάζες είναι εκείνες που οι φορτίσεις τους μεταφέρονται απευθείας στο έδαφος, όπως οι τροχοί, το μοναγιέ, το αμορτισέρ κλπ. Όταν ένα όχημα κινείται πάνω από εξογκώματα ή κοιλότητες στον δρόμο, οι μη αναρτημένες μάζες επιταχύνονται ραγδαία και πρέπει να επιβραδυνθούν μέσω του υποσυστήματος ανάρτησης. [23]

Ο σκοπός του πλαισίου ενός οποιουδήποτε οχήματος είναι να παρέχει στήριξη στα καίρια εξαρτήματα και υπο-συναρμολογήματα (sub-assemblies) που αποτελούν το όχημα και να μεταφέρει με ασφάλεια τους επιβάτες και το επιθυμητό φορτίο. Επίσης, πρέπει να είναι σε θέση να δέχεται τις φορτίσεις από το σασί, το βάρος των επιβατών και τα διάφορα εξαρτήματα των επιμέρους μηχανισμών και να απορροφά τις δυνάμεις αντίδρασης από το οδόστρωμα.



Εικόνα 2 Κάτοψη χωροδικτυώματος οχήματος

2.2 Δυναμική τροχού

Με τον όρο τροχό εννοούμε το συναρμολόγημα ελαστικού-ζάντας, που αποτελεί το κύριο εξάρτημα που αλληλοεπιδρά άμεσα με το οδόστρωμα. Η ζάντα συχνά φέρει και άλλα εξαρτήματα που είτε υποστηρίζουν τον έλεγχο του τροχού είτε βοηθούν στην σύνδεσή της με το όχημα. Τα χαρακτηριστικά του παίζουν καθοριστικό ρόλο στην συμπεριφορά του οχήματος κατά την οδήγηση, καθώς επηρεάζουν τον χειρισμό, την πρόσφυση, την άνεση και την κατανάλωση καυσίμου. Οι ιδιότητες του ελαστικού πρέπει να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο σταθερές έτσι ώστε να υπάρχει προβλεψιμότητα από τον οδηγό. Για αυτό είναι σημαντικό να εξετάσουμε ορισμένα θέματα που αφορούν το τον τροχό και να ορίσουμε κάποιες παραμέτρους που θα επηρεάσουν την μετέπειτα σχεδίαση της ανάρτησης. [24]

Όλα τα ελαστικά και οι ζάντες είναι τυποποιημένα και κατηγοριοποιημένα με βάση κάποια συστήματα κωδικοποίησης, γεγονός το οποίο προφέρει ανταλλαξιμότητα μεταξύ διάφορων κατασκευαστών εξασφαλίζοντας ότι οι ιδιότητες και οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται θα παραμένουν ίδια.

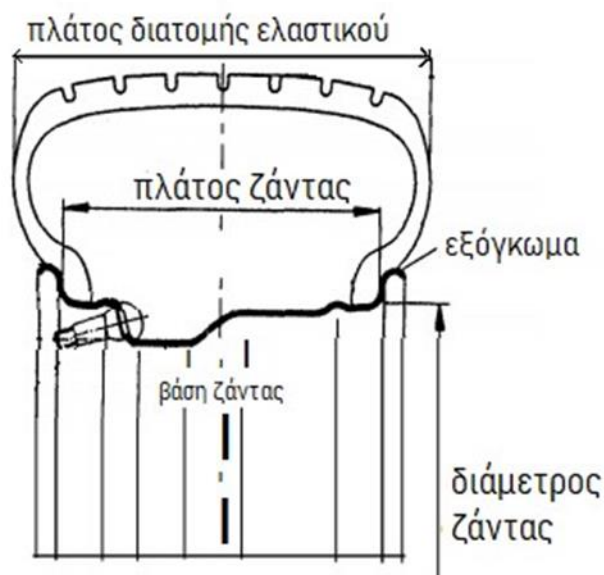
2.2.1 Ελαστικό

Υπάρχουν πολλά πρότυπα σύμφωνα με τα οποία γίνεται η κωδικοποίηση ενός ελαστικού και αυτή που χρησιμοποιείται ευρέως είναι του Ευρωπαϊκού Τεχνικού Οργανισμού ETRTO (*European Tyre and Rim Technical Organization*) [19]. Ένα παράδειγμα του προτύπου ETRTO ορίζει τα εξής:



Εικόνα 3. Τυποποίηση ελαστικών κατά το πρότυπο ETRTO

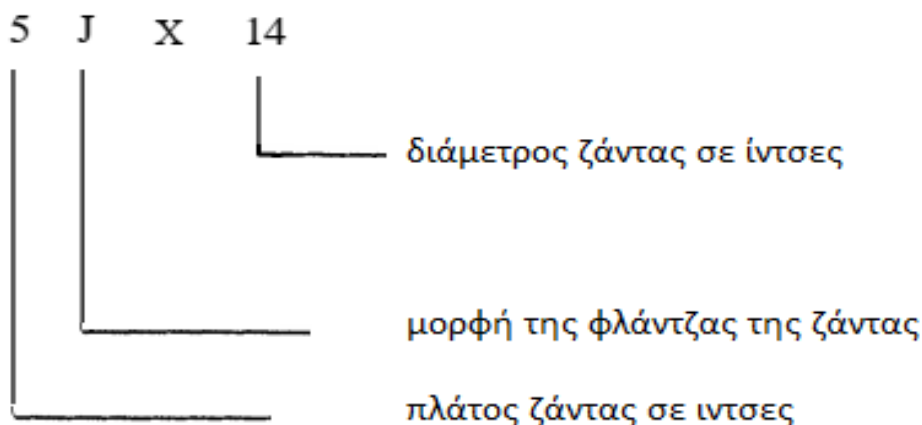
1. Τύπος ελαστικού. Το πρώτο γράμμα συμβολίζει τον ορθό τύπο του οχήματος για το οποίο το ελαστικό προορίζεται. Το P συμβολίζει επιβατικό όχημα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του οχήματος εκτός δρόμου, θα χρησιμοποιήσουμε τον κωδικό LT για ελαφριά φορτηγά. Αυτός ο τύπος ελαστικού σχεδιάζεται για είναι πιο ανθεκτικός σε μεγαλύτερα φορτία από αυτά των επιβατικών οχημάτων και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό επιτυγχάνεται με ενίσχυση των τοιχωμάτων με σύρμα ή σύνθετα υλικά και του πέλματος όπου η διαφοροποίηση του μοτίβου δίνει τα ανάλογα χαρακτηριστικά. Σχετικά με το πέλμα όσο βαθύτερο είναι το μοτίβο του πέλματος αυξάνεται η πρόσφυση και η καλύτερη αποβολή νερού ή άλλων στοιχείων.
2. Πλάτος του ελαστικού (mm), w_T , μετρούμενο από τοίχωμα σε τοίχωμα, εφαρμοζόμενο πάνω στην ζάντα και σε πίεση 1,8 bar.
3. Λόγος διατομής, AR, ο λόγος του ύψους του ελαστικού προς το πλάτος του σε ποσοστό επί τοις εκατό.
4. Τύπος κατασκευής του ελαστικού, όπου R (radial), B (bias ply) και D (diagonal)
5. Διάμετρος ζάντας σε ίντσες (in), d_{rim} .
6. Δείκτης φορτίου, συμβολίζει το μέγιστο φορτίο που κάθε ελαστικό μπορεί να φέρει.
7. Σύμβολο ταχύτητας, αντιπροσωπεύει την μέγιστη ταχύτητα που το ελαστικό μπορεί να υποστηρίξει για δέκα λεπτά χωρίς να αστοχήσει.



Εικόνα 4. Διατομή ελαστικού

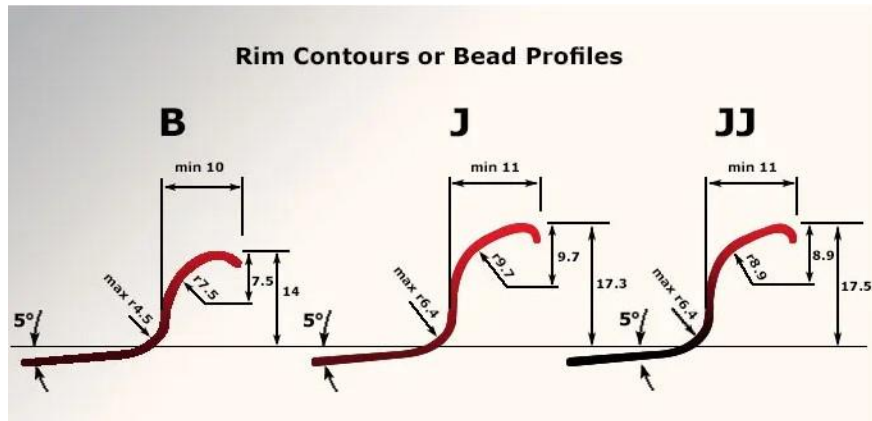
2.2.2 Ζάντα

Η επιλογή της ζάντας και του ελαστικού είναι αλληλεξαρτώμενα μέρη, καθώς το ένα εφαρμόζεται στο άλλο και συνεπώς πρέπει να μοιράζονται κάποιες κοινές διαστάσεις. Για την τυποποίηση της ζάντας χρησιμοποιείται μία αντίστοιχη κωδικοποίηση (DIN 7824) [3]. Ένα παράδειγμα ζάντας που θα ταίριαζε στο παραπάνω ελαστικό ορίζεται ως εξής:



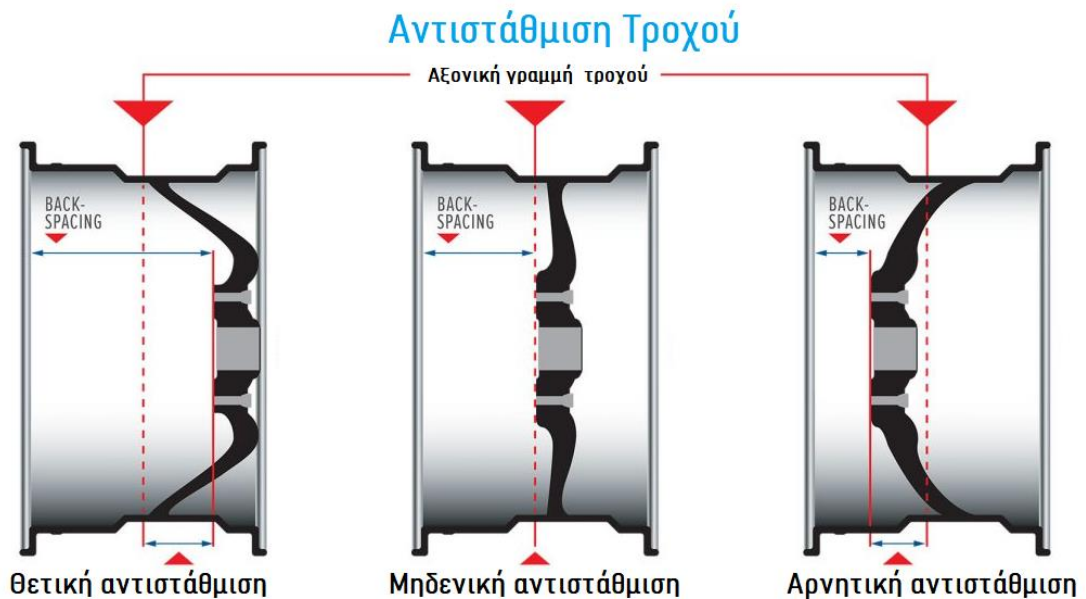
Εικόνα 5. Παράδειγμα τυποποίησης ζάντας

Σε αυτήν την κωδικοποίηση, ο πρώτος χαρακτήρας είναι αριθμός, καθορίζει το πλάτος της ζάντας (σε ίντσες) και είναι παρόμοιο με το πλάτος του ελαστικού που θα τοποθετηθεί. Ο δεύτερος χαρακτήρας συμβολίζει το σχήμα που θα έχει το προφίλ της ζάντας στις άκρες του. Το σχήμα του εξογκώματος (B, J, JJ) στις άκρες παίζει σημαντικό ρόλο, γιατί εξασφαλίζει την σωστή συγκράτηση του ελαστικού και κάθε τύπος ελαστικού εφαρμόζει σε συγκεκριμένες ζάντες.



Εικόνα 6. Τα διαφορετικά προφίλ της ζάντας

Ο τελευταίος χαρακτήρας υποδεικνύει την διάμετρο της ζάντας (σε ίντσες), που θα πρέπει να ταιριάζει με αυτόν του ελαστικού. Ένα ακόμα σημαντικό γνώρισμα της γεωμετρίας της ζάντας είναι αντιστάθμιση του τροχού, δηλαδή η απόσταση μεταξύ της αξονικής γραμμής του τροχού και της επιφάνειας πρόσδεσης της ανάρτησης. Μια θετική αντιστάθμιση τοποθετεί τον τροχό βαθύτερα στην ζάντα με αποτέλεσμα τον καλύτερο χειρισμό, ενώ μια αρνητική αντιστάθμιση απομακρύνει τον τροχό από την ζάντα, αυξάνοντας την απόσταση δίνοντας μεγαλύτερη σταθερότητα κατά τις στροφές.



Εικόνα 7. Οι περιπτώσεις αντιστάθμισης της ζάντας

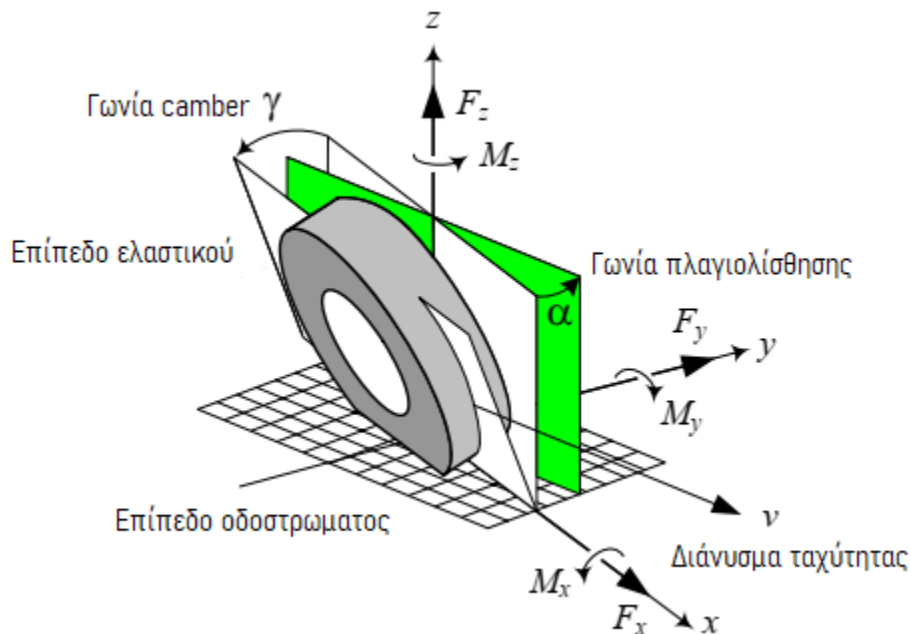
2.3 Δυναμική Οχήματος

Κατά την οδήγηση, το ελαστικό υποβάλλεται σε τέσσερις τύπους φορτίσεων. Συνήθως αυτοί οι τύποι δρουν ταυτόχρονα. Οι φορτίσεις αυτές είναι:

- 1) Ελεύθερη κύλιση
- 2) Κατακόρυφη μεταφορά δύναμης
- 3) Φρενάρισμα/επιτάχυνση
- 4) Δύναμη κατά την στροφή

2.3.1 Σύστημα συντεταγμένων Τροχού

Για να περιγράψουμε την αλληλεπίδραση ελαστικού-οδοστρώματος και του συστήματος δυνάμεων, τοποθετούμε ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στο κέντρο του αποτυπώματος (tireprint) του ελαστικού, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω.



Εικόνα 8. Σύστημα συντεταγμένων τροχού [4]

Ο άξονας $-x$ βρίσκεται κατά μήκος της τομής του επιπέδου του ελαστικού με το επίπεδο του οδοστρώματος. Το επίπεδο του ελαστικού δημιουργείται εάν συρρικνώσουμε το ελαστικό σε έναν επίπεδο δίσκο. Ο άξονας $-z$ είναι κάθετος στο οδόστρωμα αντίθετος στην επιτάχυνση της βαρύτητας και ο άξονας $-y$ συμπληρώνεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Ο προσανατολισμός του ελαστικού γίνεται με τον ορισμό δύο γωνιών: της γωνία camber γ και της γωνίας πλαγιολίσθησης α . Η γωνία camber γ είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του ελαστικού και του κάθετου επιπέδου μετρούμενη γύρω από τον x άξονα. Η γωνία ολίσθησης α είναι η γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και του άξονα x μετρούμενη γύρω από τον άξονα z .

2.3.2 Δυνάμεις που επενεργούν

Το σύστημα δυνάμεων που το ελαστικό δέχεται θεωρείται ότι βρίσκεται στο κέντρο του αποτυπώματος του ελαστικού και μπορούν να αναλυθούν στους τρεις άξονες. Το σύστημα δυνάμεων περιλαμβάνει τρεις δυνάμεις και τρεις ροπές [20].

1. Διαμήκης δύναμη F_x (Longitudinal force), μια δύναμη που δρα κατά μήκος του άξονα x . Καλείται επίσης και δύναμη οδήγησης. Σε περίπτωση επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερη του μηδενός και σε περίπτωση φρεναρίσματος μικρότερη του μηδενός. Η οριζόντια δύναμη είναι μια δύναμη τριβής και προκαλείται σε περίπτωση ολίσθησης που έχει αντίθετη φορά.

2. Κατακόρυφη/Κάθετη δύναμη F_z (Normal/Vertical force), είναι μία κατακόρυφη δύναμη κάθετη στο οδόστρωμα. Αναφέρεται επίσης και ως φορτίο του τροχού. Όταν η συνολική κάθετη δύναμη είναι μεγαλύτερη το μηδενός λέμε ότι έχει φορά προς τα επάνω.

3. Πλευρική δύναμη F_y (Lateral force), μία δύναμη εφαπτόμενη στο επίπεδο του οδοστρώματος και ορθογωνιακή ως προς τους άξονες x, z . Όταν η κατεύθυνση της είναι προς την y διεύθυνση η συνολική πλευρική δύναμη είναι θετική.

4. Ροπή ανατροπής M_x (Roll/Overturning moment), μια διαμήκης ροπή στον άξονα x . Είναι θετική όταν τείνει να στρέψει το ελαστικό γύρω από τον άξονα x .

5. Ροπή αντίστασης σε κύλιση M_y (Pitch/Rolling resistance moment), μια πλευρική ροπή κατά μήκος του άξονα y . Η συνολική ροπή είναι θετική όταν τείνει να γυρίσει το ελαστικό γύρω από τον άξονα y και να κινηθεί μπροστά.

6. Ροπή ευθυγράμμισης M_z (Yaw/Self-Aligning moment), μια ανοδική ροπή κατά μήκος του άξονα z . Είναι θετική όταν τείνει να στρέψει το ελαστικό γύρω από τον άξονα z .

Στην περίπτωση της ελεύθερης κύλισης, όπου δεν έχουμε φρενάρισμα, επιτάχυνση ή στροφή η μοναδική δύναμη που δρα είναι οι δυνάμεις αντίστασης κύλισης.

Τα ελαστικά από καουτσούκ θεωρούνται ελαστομερή εξαρτήματα. Έτσι, ένα κατακόρυφο φορτίο στην διεύθυνση z θα προκαλέσει μια ανάλογη παραμόρφωση s_T στην ίδια κατεύθυνση. Συνεπώς το ελαστικό μπορεί να θωρηθεί και ως πνευματικό ελατήριο (air spring). Μέσω της κατακόρυφης δύναμης F_z δημιουργείται η επιφάνεια επαφής στην περιοχή που εφάπτεται στο οδόστρωμα.

2.3.3 Διαμήκης Ολίσθηση (Longitudinal slip)

Η διαμήκης ολίσθηση είναι μια κινηματική ποσότητα που περιγράφει την κατάσταση της κίνησης ενός τροχού που κυλάει [14]. Κατά την κύλιση αναπτύσσεται μια σχετική κίνηση μεταξύ του οδοστρώματος και του ελαστικού. Συνήθως δίνεται σαν ποσοστό. Ο τροχός θεωρείται ως στερεό σώμα. Σε μια επίπεδη κίνηση ενός τροχού διακρίνονται δύο καταστάσεις κίνησης:

- 1) Καθαρή κινηματική κύλιση χωρίς ολίσθηση
- 2) Συνδυασμένη κύλιση και ολίσθηση

2.4 Τύποι Ανάρτησης

Οι βασικές λειτουργίες του συστήματος ανάρτησης ενός οχήματος είναι να απομονώνει το πλαίσιο και τους επιβάτες του από κραδασμούς και δονήσεις που παράγονται από την επιφάνεια του δρόμου.

Το σύστημα ανάρτησης τυπικά αποτελείται από όλα εκείνα τα εξαρτήματα που προσφέρουν σύνδεση μεταξύ των ελαστικών και του σώματος του οχήματος και σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακρίνονται στις εξής απαιτήσεις:

1. Άνεση οδήγησης
2. Επαρκής πρόσφυση
3. Ευκολία χειρισμού

Όσον αφορά την πρώτη απαίτηση που αναφέρεται παραπάνω ικανοποιείται μέσω ελαστικών αντιστάσεων που απορροφούν τους κραδασμούς από το οδόστρωμα. Αυτή η βασική λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω ελατηρίων. Συνήθως, τα διαφορετικά ελατήρια που χρησιμοποιούνται στα οχήματα είναι οι σούστες/ελάσματα, τα ελικοειδή ελατήρια, οι στρεπτικές δοκοί, τα ελατήρια αέρος και τα σινεμπλόκ.

Είναι προφανές ότι το σύστημα της ανάρτησης πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει όλα τα φορτία που ενεργούν πάνω σε αυτό. Αυτές οι δυνάμεις μπορεί να έχουν οριζόντια διεύθυνση όπως η επιτάχυνση και το φρενάρισμα, πλευρική διεύθυνση λόγω δυνάμεων κατά τη στροφή και κάθετη διεύθυνση

Συνήθως τα συστήματα αναρτήσεων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις εξαρτημένες αναρτήσεις άκαμπτου άξονα και στις ανεξάρτητες αναρτήσεις.

2.4.1 Εξαρτημένες αναρτήσεις άκαμπτου άξονα

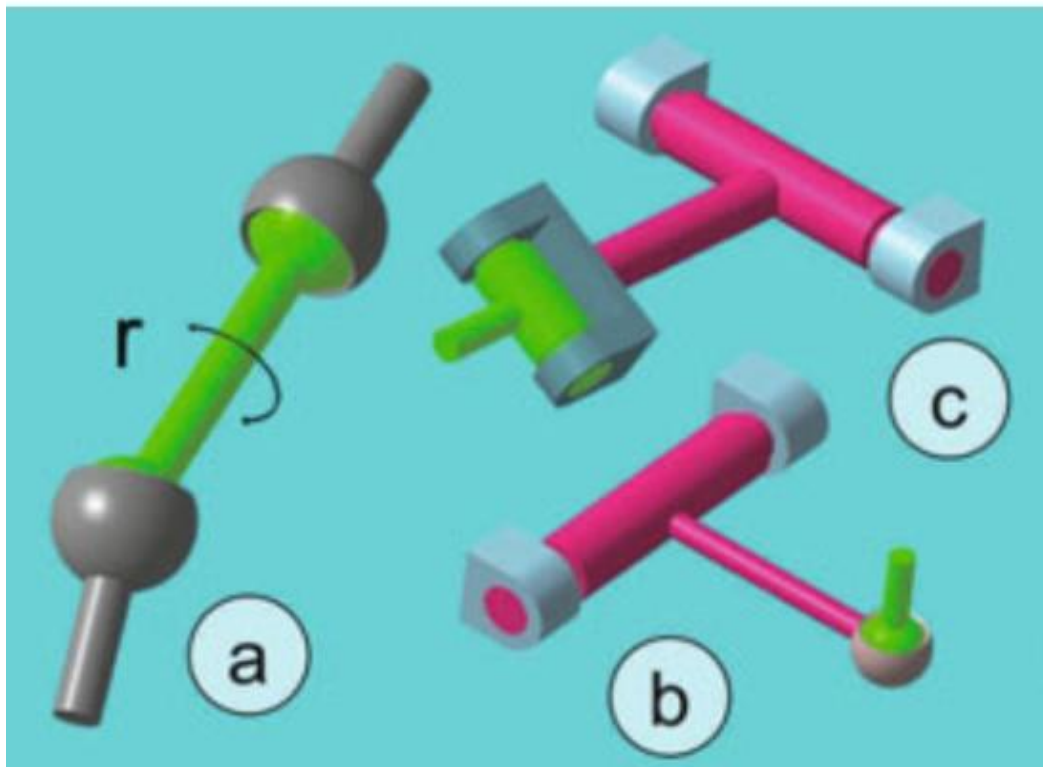
Σε αυτό τον τύπο ανάρτησης, οι τροχοί είναι τοποθετημένοι στα άκρα ενός άκαμπτου άξονα, έτσι ώστε η κίνηση του ενός τροχού μεταφέρεται στον απέναντι τροχό προκαλώντας ίδια στρέψη και κλίση ταυτόχρονα.

Αυτός ο τύπος ανάρτησης χρησιμοποιείται κυρίως στην οπίσθια ανάρτηση πολλών αυτοκινήτων και κυρίως φορτηγών και στο εμπρόσθιο μέρος πολλών φορτηγών με κίνηση στους τέσσερις τροχούς. Αυτοί οι άκαμπτοι άξονες χρησιμοποιούνται κυρίως στο μπροστινό μέρος βαρ έων φορτηγών όπου απαιτείται η αντοχή σε μεγάλα φορτία.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι η γωνία κάμπερ του τροχού δεν επηρεάζεται από την κύλιση του σώματος του οχήματος. Έτσι, κατά την στροφή υπάρχει μικρή μεταβολή στην γωνία κάμπερ. Επίσης, η ευθυγράμμιση των τροχών συντηρείται εύκολα, ελαχιστοποιώντας την φθορά του ελαστικού. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του άκαμπτου άξονα είναι σχετική ευαισθησία στις δονήσεις.

2.4.2 Ανεξάρτητη ανάρτηση

Με την εισαγωγή ανεξάρτητης ανάρτησης επιτρέπεται η κατακόρυφη κίνηση ενός τροχού σε σχέση με το αμάξωμα του οχήματος και χωρίς να επηρεάζεται ο απέναντι τροχού του ίδιου άξονα. Η κίνηση αυτή επιτρέπει τον τροχό να ακολουθεί το προφίλ του δρόμου απομονώνοντας το αμάξωμα από τυχόν δονήσεις και ταλαντώσεις που δημιουργούνται από τις ανωμαλίες του οδοστρώματος. Κάθε ανεξάρτητη ανάρτηση αποτελείται από συνδέσμους (links) που ενώνουν τον τροχό με το σασί μέσω αρθρώσεων. Σύνδεσμος ονομάζεται ένα άκαμπτο μέλος που έχει σχετική κίνηση σε σχέση με άλλα μέλη. Ο ρόλος των συνδέσμων είναι να ενώνουν διάφορες αρθρώσεις και να μεταφέρουν δυνάμεις και μετατοπίσεις από την μία άρθρωση στην επόμενη. Οι περισσότεροι σύνδεσμοι κατασκευάζονται από χάλυβα ή αλουμίνιο. Δύο σύνδεσμοι ενώνονται με μία άρθρωση όπου η σχετική τους κίνηση εκφράζεται από μια συντεταγμένη. Οι αρθρώσεις είναι συνήθως περιστροφικές ή πρισματικές. Οι αρθρώσεις αυτές συνήθως βρίσκονται στα άκρα των συνδέσμων και ο τύπος τους καθορίζει τον βαθμό ελευθερίας της σχετικής κίνησης των εξαρτημάτων που εφάπτονται σε αυτούς. Ένα εξάρτημα μπορεί να έχει από 1 έως 5 βαθμούς ελευθερίας. Επιπλέον, η κίνηση υποστηρίζεται από σπειροειδή ελατήρια και αποσβεστήρες κραδασμών, όπου δημιουργούν ένα ελαστικό στοιχείο με σκοπό να περιορίσουν την κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση. Ο τροχός συνδέεται με την πλήμνη (knuckle upright) με μια περιστροφική άρθρωση, μέσω ρουλεμάν. Αυτός ο βαθμός ελευθερίας υπάρχει σε κάθε ανάρτηση οπότε δεν θα εξεταστεί παρακάτω. Ο αριθμός των συνδέσμων που απαιτούνται για την κίνηση του τροχού εξαρτάται από τις κινηματικές ιδιότητες των διάφορων τύπων των συνδέσμων.



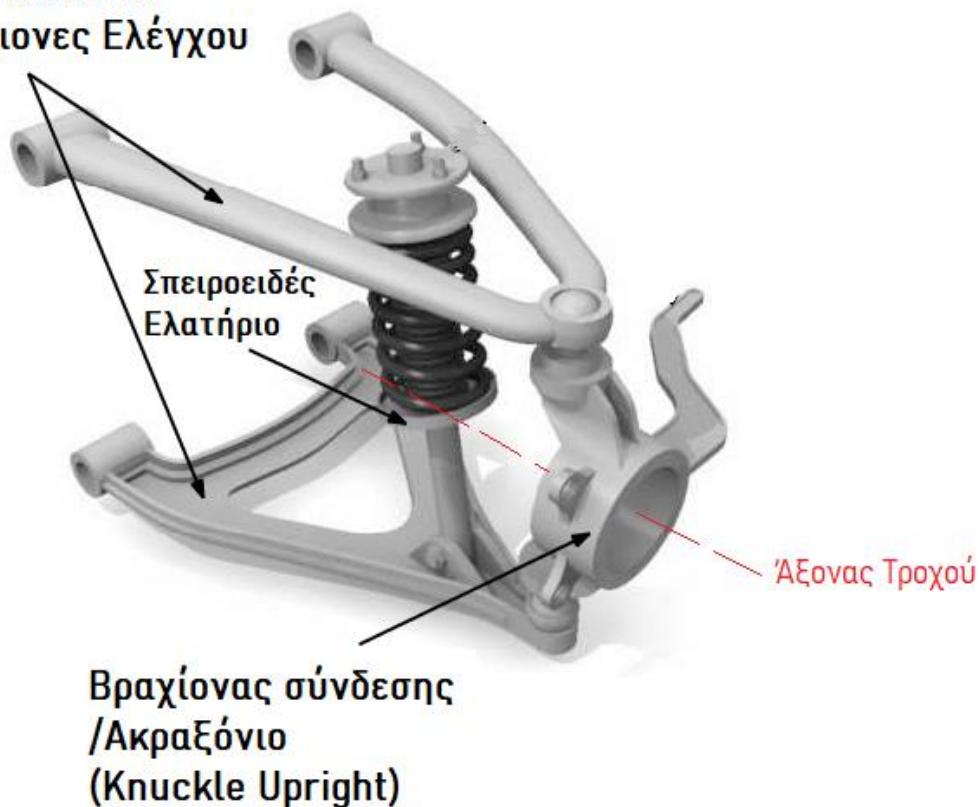
Εικόνα 9. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι των συνδέσμων

Οι σύνδεσμοι διακρίνονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τα σημεία και τον τρόπο άρθρωσης:

- a) Σύνδεσμος δύο σημείων (a), οι αρθρώσεις στα άκρα του μπορεί να είναι είτε ελαστικό έδρανο (σινεμπλόκ, rubber bushing) είτε σφαιρικός σύνδεσμος (ball Joint). Κάθε τέτοιος σύνδεσμος αφαιρεί έναν βαθμό ελευθερίας από τον μηχανισμό.
- b) Σύνδεσμος τριών σημείων (b), ή ψαλίδι (δίχαλο, wishbone), οι δυο αρθρώσεις που βρίσκονται στο ένα άκρο είναι περιστροφικές και στο άλλο άκρο η άρθρωση είναι σφαιρική, αφαιρεί δύο βαθμούς ελευθερίας. Δύο τέτοιοι σύνδεσμοι αποτελούν την ανάρτηση με διπλά ψαλίδια τοποθετημένοι πλευρικά στον x-άξονα.
- c) Σύνδεσμος τεσσάρων σημείων (c), ή τραπεζοειδής σύνδεσμος αφαιρεί 4 βαθμούς ελευθερίας

Οι πιο συνήθεις τύποι ανεξάρτητων αναρτήσεων είναι η ανάρτηση με διπλά ψαλίδια και η ανάρτηση με γόνατα McPherson. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τυπική διάταξη μιας ανάρτησης με διπλά ψαλίδια.

Άνω και Κάτω Βραχίονες Ελέγχου



Εικόνα 10. Μια τυπική διάταξη της ανάρτησης με διπλά ψαλίδια.

2.5 Κύρια εξαρτήματα Ανάρτησης

Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν αυτόν τον μηχανισμό είναι οι δύο βραχίονες ελέγχου (άνω και κάτω), ο βραχίονας σύνδεσης ή ακραζόνιο (kingpin knuckle upright) και το σπειροειδές ελατήριο με τον αποσβεστήρα.

2.5.1 Βραχίονες Ελέγχου

Ο άνω και κάτω βραχίονας (ή ψαλίδι, wishbone), είναι πλευρικοί βραχίονες ελέγχου και έχουν πλευρικό προσανατολισμό σε σχέση με το επίπεδο του τροχού. Ο κύριος ρόλος τους είναι να ελέγχουν την κίνηση του τροχού χωρίς να υποστηρίζουν το βάρος του οχήματος. Για τον λόγο αυτό οι δυνάμεις στις οποίες εκτίθενται είναι κυρίως οριζόντιες και πιο συγκεκριμένα, οι δυνάμεις ενεργούν μόνο στα κέντρα των αρθρώσεων. Όταν ένας τροχός στηρίζεται από δύο πλευρικούς βραχίονες, ο ένας πρέπει να βρίσκεται πάνω από το κέντρο του τροχού και ο άλλος πρέπει να τοποθετείται κάτω από αυτό, έτσι ώστε να αντιστέκεται στις δυνάμεις και στις ροπές που δρουν στον τροχό. Οι βραχίονες αυτοί είναι σύνδεσμοι 3 σημείων και μια τυπική γεωμετρία φαίνεται παρακάτω. Στα δύο άκρα του βραχίονα εφαρμόζονται ελαστικά έδρανα όπου εδράζονται στο σασί και στο απέναντι άκρο υπάρχει σφαιρική άρθρωση (spherical ball joint) όπου εφάπτεται στο ακραζόνιο και επιτρέπει την σφαιρική περιστροφή με τρεις βαθμούς ελευθερίας.

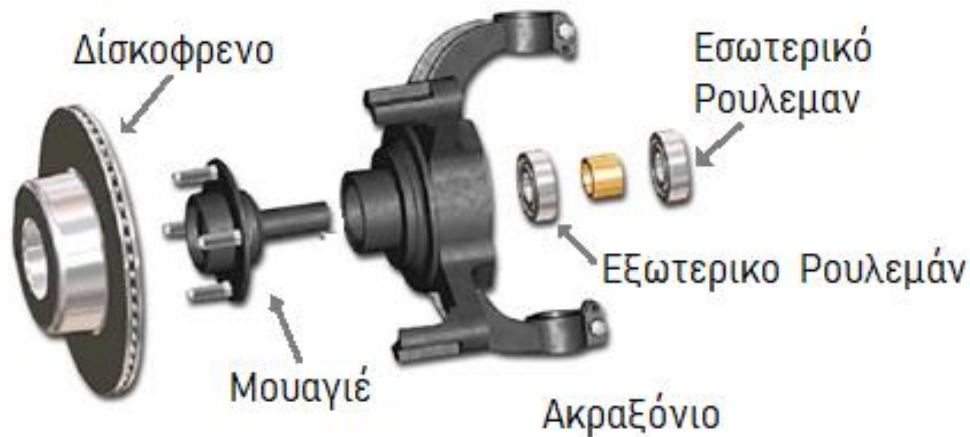


Εικόνα 11 Παραδείγματα συνδέσμων 3 σημείων

Στις πρώτες διατάξεις αναρτήσεων με διπλά ψαλίδια, οι βραχίονες είχαν ίδιο μήκος, ήταν παράλληλοι και επίπεδα τοποθετημένοι. Σύντομα αυτό άλλαξε, και στις επόμενες διατάξεις που υλοποιήθηκαν τα ψαλίδια είχαν διαφορετικό μήκος και τοποθετούνταν σε διάφορες γωνίες σε σχέση με την μπροστινή ή πλάγια όψη. Οι αλλαγές αυτές εισήχθησαν ώστε να αποκτηθούν συγκεκριμένες γεωμετρικές ιδιότητες με σκοπό να πάρουμε επιθυμητές δυναμικές ιδιότητες.

2.5.2 Βραχίονας Σύνδεσης

Ο βραχίονας σύνδεσης (knuckle upright) ή ακραζόνιο, είναι ένα από τα εξαρτήματα που μαζί με τη μονάδα των ρουλεμάν του τροχού (wheel bearing unit, μουαγιέ), το δισκόφρενο (ή τύμπανο), τα τακάκια των φρένων και τον τροχό απαρτίζουν το γενικότερο συναρμολόγημα της πλήμνης του τροχού.



Εικόνα 12 Διάταξη του συναρμολογήματος της πλήμνης του τροχού.

Ο ρόλος αυτού του συναρμολογήματος είναι να δέχεται και να μεταδίδει τις δυνάμεις και τις ροπές μεταξύ του σασί και του οδοστρώματος με ασφάλεια και σταθερότητα καθώς επίσης και να κρατάει, να ελέγχει, να οδηγεί, να διευθύνει, να φρενάρει και να ασφαλίζει τον τροχό. Παρακάτω στην εικόνα φαίνεται μια τυπική γεωμετρία διάφορων ακραζονίων, όπου διακρίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Ένα ακραζόνιο πρέπει να παρέχει επαρκής στήριξη στην πλήμη του τροχού μέσω κατάλληλων εγκοπών και εσοχών στις οποίες προσαρμόζεται [16]. Επίσης, τα δύο άκρα του συνδέονται με τον άνω και κάτω βραχίονα ενώνοντας τον τροχό με πλαίσιο του οχήματος.



Εικόνα 13. Παραδείγματα διάφορων βραχιόνων σύνδεσης

2.5.3 Σπειροειδές Ελατήριο

Το σπειροειδές ελατήριο είναι ένα κρίσιμο εξάρτημα της ανάρτησης και ουσιαστικά είναι μία συνεχής στρεπτική ράβδος που έχει μια ελικοειδής συστροφή γύρω από έναν άξονα, δημιουργώντας κυλινδρική μορφή. Απαιτεί ελάχιστη συντήρηση και παρέχει ομοαξονική στήριξη στον αποσβεστήρα. Η ελικοειδής δομή του ελατηρίου επιτρέπει την συμπίεση και την επιμήκυνση αξονικά, απορροφώντας και απελευθερώνοντας ενέργεια καθώς η ανάρτηση κινείται [18]. Η διατομή της ράβδου συνήθως είναι κυκλική. Η διατομή κάθε σπείρας υπόκειται ταυτόχρονα σε έναν συνδυασμό στρέψης, κάμψης και διατμητικών φορτίων. Τα κυλινδρικά ελατήρια που σε όλο το μήκος τους έχουν σταθερό βήμα εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά. Η ακαμψία του ελατηρίου, K_s , εξαρτάται από την διάμετρο της ράβδου, την διάμετρο του ελατηρίου, τον αριθμό των σπειρών και του μέτρου διάτμησης του υλικού του ελατηρίου.



Εικόνα 14. Παραδείγματα αποσβεστήρων με ελικοειδές ελατήριο

Τα ελατήρια πρέπει να κατασκευάζονται από υλικά που μπορούν να αποθηκεύσουν και να απελευθερώσουν μεγάλες ποσότητες ελαστικής ενέργειας. Αυτές οι ιδιότητες υπάρχουν σε υλικά που έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και/ή μεγάλο μέτρο διάτμησης. Γενικά τα ελατήρια υπόκεινται σε κυκλικές φορτίσεις, συνεπώς το υλικό πρέπει να έχει υψηλή αντίσταση στην κόπωση και αυξημένη ολκιμότητα. [25]

Κατά την λειτουργία του, η κινητική ενέργεια από την κίνηση του οχήματος μετατρέπεται σε θερμική. Η απόσβεση είναι αποτέλεσμα της αντίστασης του ρευστού να κινηθεί.

Η τροχιά που διαγράφει το σύστημα της ανάρτησης καθορίζεται από τα κέντρα των αρθρώσεων που αναφέρονται ως 'σημεία πρόσδεσης' (mounting points). Τα σημεία αυτά αναπαριστούν τις αρχές των συστημάτων συντεταγμένων των αρθρώσεων. Κινηματικά η ανάρτηση με διπλά ψαλίδια είναι ένας μηχανισμός 4 ράβδων (four-bar linkage) όπου το σασί παίζει τον ρόλο του εδάφους (ground link) και ο συζευκτήρας (coupler) είναι η ράβδος που φέρει τον τροχό, έτσι οι τροχοί και το έδαφος είναι συνδεδεμένες αρθρώσεις.

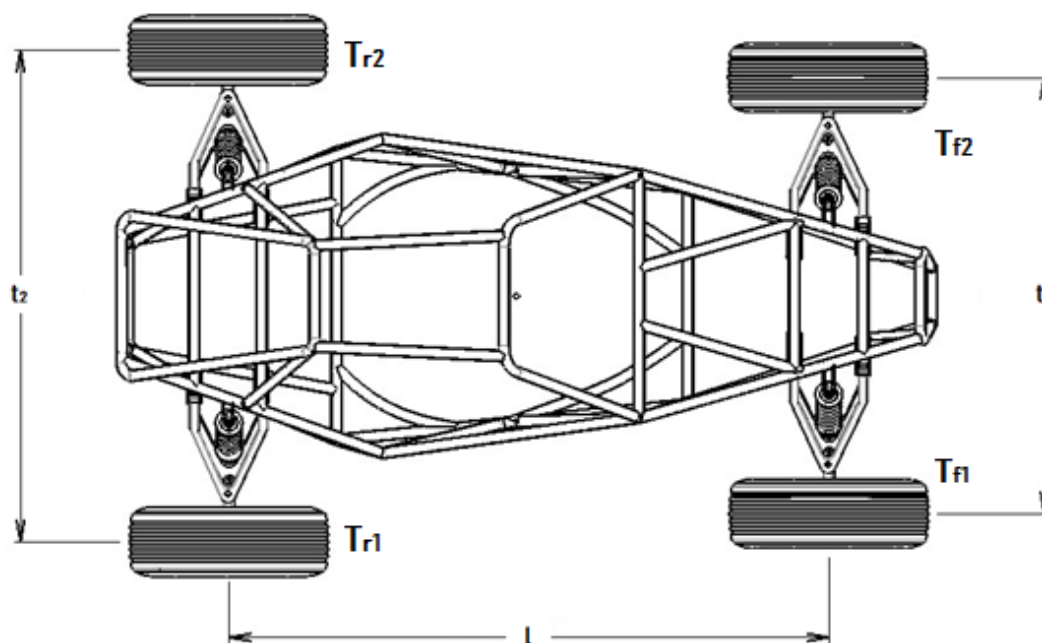
2.6 Παραδοχές και υποθέσεις Οχήματος

Για να σχεδιαστεί, όσο το δυνατόν, μια βέλτιστη ανάρτηση για το όχημα είναι απαραίτητο βήμα να καθοριστούν οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που θα διαμορφώσουν την σχεδιαστική διαδικασία και θα αποτελούν βάση για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν. Οι παράμετροι που έχουν τον πιο επιδραστικό ρόλο είναι οι γεωμετρικές διαστάσεις καθώς αυτές τοποθετούν και οριοθετούν το σύστημα του οχήματος στον χώρο και από αυτές θα εξαρτηθούν όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές. Οι βασικές διαστάσεις είναι οι εξής:

Πίνακας 1. Βασικές διαστάσεις οχήματος

Περιγραφή	Σύμβολο	mm
Μεταξόνιο	l	2220
Εμπρόσθιο μετατρόχιο	t_1	1600
Οπίσθιο μετατρόχιο	t_2	1750
Απόσταση του κέντρου μάζας από τους μπροστινούς τροχούς	a_1	1200
Απόσταση του κέντρου μάζας από τους οπίσθιους τροχούς	a_2	1020
Απόσταση του κέντρου μάζας από το έδαφος	h	700
Ποσοστό κατανομής βάρους (εμπρος πίσω)	w_d	45-55

Οι διαστάσεις αυτές ορίζονται από το τρόπο με τον οποίο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί το χωροδικτύωμα του πλαισίου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι βασικές διαστάσεις του οχήματος και η σήμανση T_{ij} ορίζει την θέση κάθε τροχού (r-rear, f-front, 1-δεξιά, 2-αριστερά).



Εικόνα 15. Οι βασικές διαστάσεις το οχήματος

2.6.1 Κατανομή μάζας

Ο προσδιορισμός της συνολικής αναρτήμενης μάζας, m_{sprung} , είναι το επόμενο βασικό βήμα που θα αποτελέσει βάση για τους μετέπειτα υπολογισμούς. Προκύπτει από τα επιμέρους υποσυστήματα και πως αυτά κατανέμονται. Για τον υπολογισμό, έμφαση δόθηκε στα υποσυστήματα που επηρεάζουν περισσότερο το βάρος και ανήκουν στις αναρτημένες μάζες [17]. Οι προσεγγίσεις έγιναν με βάση τα εύρη τιμών για το βάρος για τις διάφορες κατηγορίες οχήματος.

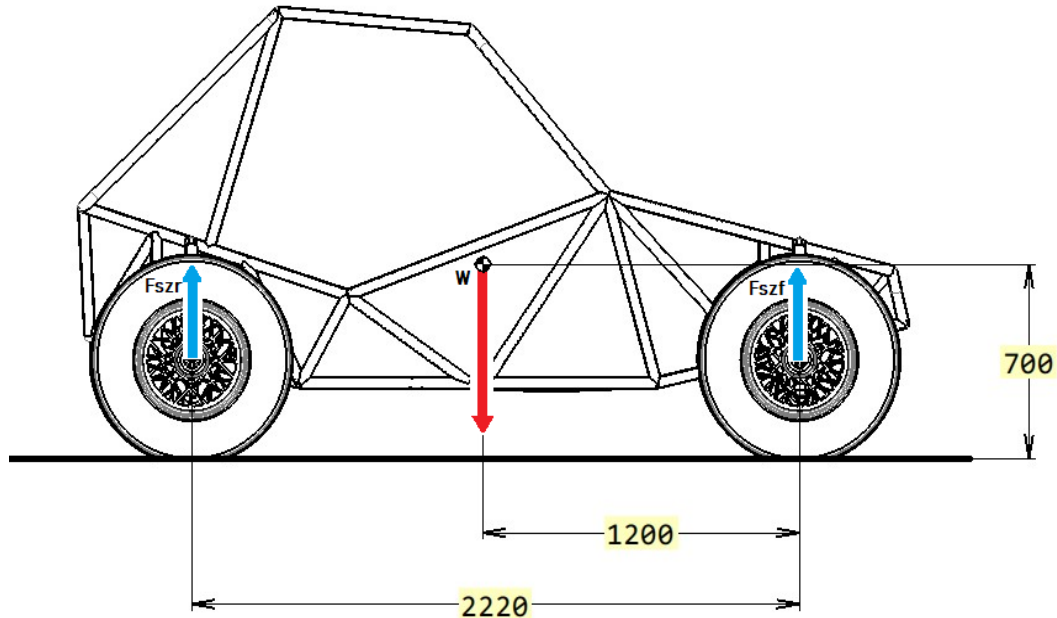
Πίνακας 2.. Βασικοί Παράμετροι Οχήματος

<u>Παράμετρος</u>	<u>Τιμή (kg)</u>
Χωροδικτύωμα	260
Κινητήρας	100
Σύστημα μετάδοσης κίνησης	60
Άξονες μετάδοσης κίνησης	120
Διαφορικά	50
Οδηγός	100
Σύνολο	700

Η τιμή για την μάζα του σασί προέκυψε από στατική ανάλυση στο Ansys Static Structural, με υλικό ένα τυπικό κράμα χάλυβα (Structural Steel). Από αυτή την ανάλυση προέκυψε και το κέντρο βάρους της κατασκευής. Η απόσταση του κέντρου βάρους στον οριζόντιο άξονα -x από τον μπροστινό τροχό ορίζει ουσιαστικά την ποσοστιαία κατανομή του βάρους και των αναπτυσσόμενων φορτίων. Η κατακόρυφη απόσταση στον άξονα -y του κέντρου βάρους από το οδόστρωμα ορίζει την απόσταση από το οδόστρωμα.

Περίπτωση Α' : Ακίνητο όχημα

Το όχημα είναι ακίνητο ή κινείται με σταθερή ταχύτητα σε επίπεδο παράλληλο στο οδόστρωμα. Σε ένα ακίνητο όχημα οι κάθετες δυνάμεις πρέπει να αντισταθμίσουν μόνο την δύναμη του βάρους.



Εικόνα 16. Οι ασκούμενες δυνάμεις σε ακίνητο όχημα

Από την ισορροπία των ροπών γύρω από τον μπροστινό άξονα παίρνουμε :

$$\begin{aligned}\Sigma M_0 = 0 &\Rightarrow F_{szr} * l - W * a_1 = 0 \Rightarrow \\ F_{szr} &= \frac{m_{sprung} * g * a_1}{l} = \frac{700 * 9.81 * 1.2}{2220} \Rightarrow \\ F_{szr} &= 3712 \text{ N}\end{aligned}\quad (1)$$

Η δύναμη αυτή αναφέρεται στον άξονα και είναι η στατική τιμή. Για κάθε τροχό θα είναι το ήμισυ από αυτή που δέχεται ο άξονας:

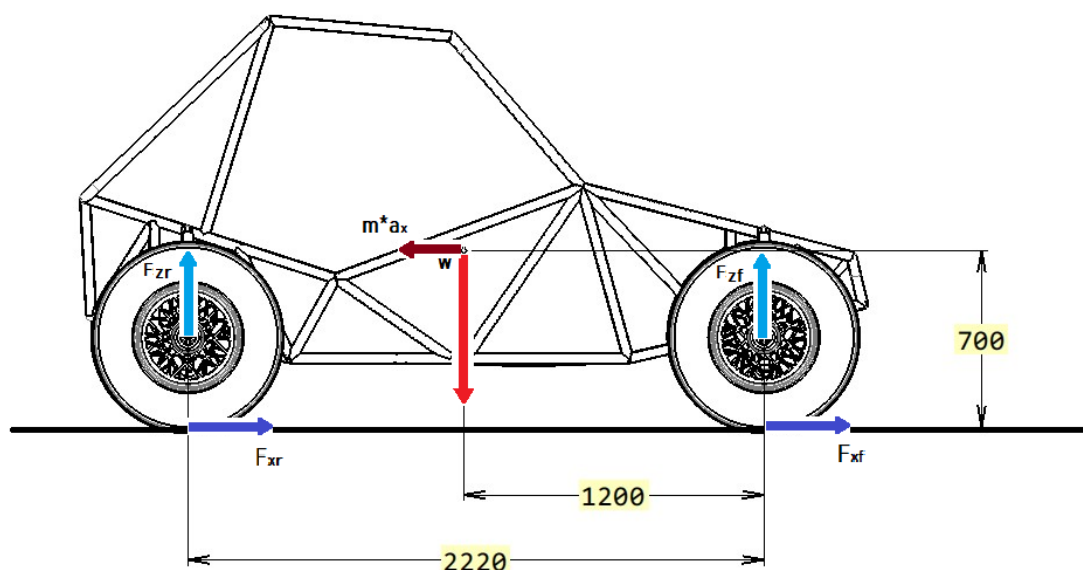
$$F_{szr1} = 1856 \text{ N}\quad (2)$$

Ομοίως από την ισορροπία των ροπών γύρω από τον πίσω άξονα παίρνουμε, την στατική δύναμη για τον οπίσθιο άξονα :

$$F_{szf} = \frac{m_{sprung} * g * a_2}{l} = 3155 \text{ N}\quad (3)$$

Περίπτωση Β': Επιταχυνόμενο όχημα

Κατά τη διάρκεια κάποιας κίνησης, τα κάθετα φορτία αλλάζουν όποτε υπάρχει επιτάχυνση ή επιβράδυνση. Στην περίπτωση όπου έχουμε σημαντικά κάθετα φορτία λόγω αεροδυναμικής, η ταχύτητα του οχήματος επηρεάζει εξίσου τα κάθετα φορτία [5]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως οι ταχύτητες του οχήματος παραμένουν σχετικά χαμηλές και έτσι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω αεροδυναμικής θεωρούνται αμελητέες και δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς. Το όχημα επιταχύνει και μία διαμήκης δύναμη αναπτύσσεται στους οδηγούμενους (driven) τροχούς και το όχημα κινείται εμπρός. Θεωρείται ότι αυτή η δύναμη ενεργεί στο κέντρο της βαρύτητας από την αδρανειακή δύναμη, $m \cdot a_x$, για να διατηρηθεί η ισορροπία.



Εικόνα 17. Οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις σε επιταχυνόμενο όχημα

Παίρνοντας την ισορροπία των ροπών γύρω από τον οπίσθιο άξονα:

$$\begin{aligned} F_{zf} * l + m_{sprung} * a_x * h &= m_{sprung} * g * a_2 \Rightarrow F_{zf} \\ &= m_{sprung} * g * \frac{a_2}{l} + \frac{h}{l} * m_{sprung} * a_x \end{aligned}$$

Αντιστοίχως, από την ισορροπία των ροπών γύρω από τον μπροστινό άξονα:

$$F_{zr} = m_{sprung} * g * \frac{a_1}{l} + \frac{h}{l} * m_{sprung} * a_x$$

Ο πρώτος όρος, $m_{sprung} * g * \frac{a_2}{l}$ και $m_{sprung} * g * \frac{a_1}{l}$, είναι το στατικό κομμάτι και καθορίζει την κατανομή του βάρους. Ο δεύτερος όρος, $\frac{h}{l} * m_{sprung} * a_x$, είναι το δυναμικό κομμάτι και είναι η οριζόντια μεταφορά του βάρους (longitudinal weight transfer) λόγω επιτάχυνσης, εξαρτάται από την θέση του κέντρου μάζας και συμβολίζεται ως F_{long} . [6]

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν κατά την επιτάχυνση. Στην περίπτωση της επιβράδυνσης, όπου έχουμε κατά το φρενάρισμα, οι διευθύνσεις των οριζόντιων

δυνάμεων αλλάζουν κατεύθυνση και συνεπώς το δυναμικό κομμάτι έχει ανάποδο πρόσημο. Πιο συγκεκριμένα:

Παίρνοντας την ισορροπία των ροπών γύρω από τον οπίσθιο άξονα:

$$\begin{aligned} F_{zf} * l + m_{sprung} * a_x * h &= m_{sprung} * g * a_2 \Rightarrow F_{zf} \\ &= m_{sprung} * g * \frac{a_2}{l} - \frac{h}{l} * m_{sprung} * a_x \end{aligned}$$

Αντιστοίχως, από την ισορροπία των ροπών γύρω από τον μπροστινό άξονα:

$$F_{zr} = m_{sprung} * g * \frac{a_1}{l} - \frac{h}{l} * m_{sprung} * a_x$$

Υποθέτουμε ότι η μεταφορά φορτίου κατά την επιτάχυνση και το φρενάρισμα είναι της τάξης των 2G. Αντικαθιστώντας τις τιμές στις παραπάνω εξισώσεις στην περίπτωση της επιτάχυνσης παίρνουμε:

$$F_{zfac} = 7500 \text{ N} \quad (4)$$

$$F_{zrac} = 8050 \text{ N} \quad (5)$$

Αντιστοίχως, εάν αντικαταστήσουμε τις τιμές στις παραπάνω εξισώσεις στην περίπτωση του φρεναρίσματος παίρνουμε:

$$F_{zfabr} = 1175 \text{ N} \quad (6)$$

$$F_{zrbr} = 620 \text{ N} \quad (7)$$

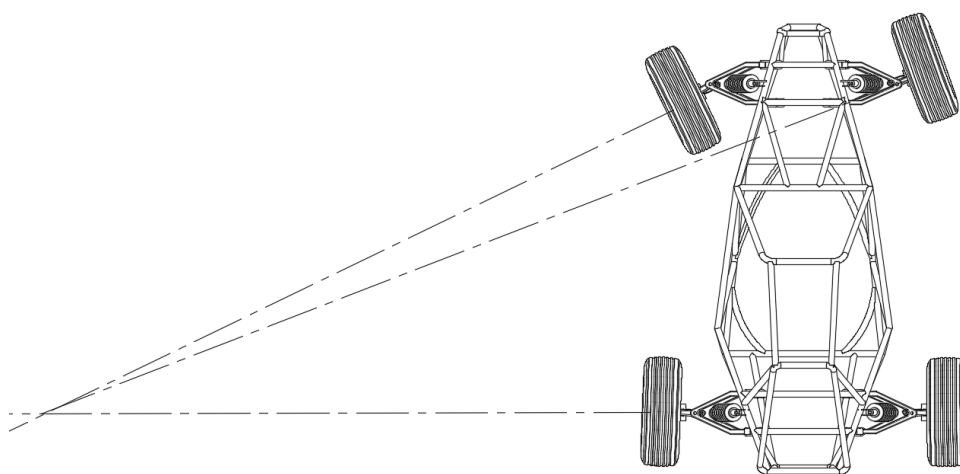
Όταν έχουμε μεταφορά της οριζόντιας δύναμης F_x ή F_y μέσω της επιφάνειας επαφής πάντα συνοδεύεται από μία συγκεκριμένη ολίσθηση μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Αυτό οφείλεται στην ελαστικότητα του προφίλ του ελαστικού και της δομής του.

Στην περίπτωση όπου έχουμε οδήγηση από τους μπροστινούς τροχούς, η οριζόντια δύναμη $F_{xr} = 0$. Ενώ όταν η κίνηση δίνεται από τους πίσω τροχούς, $F_{xf} = 0$.

Γ' Περίπτωση:

Οι περιπτώσεις, επιτάχυνσης και φρεναρίσματος κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής δεν έχουν τόσο δυναμική συμπεριφορά σε αντίθεση με την περίπτωση, που έχουμε στροφή. Η διαδικασία της στροφής είναι πιο δυναμική και άρα πιο περίπλοκη, διότι τα αποτελέσματά της προκύπτουν από μία μίξη της εμπρόσθιας ταχύτητας και της περιστροφής γύρω από τον κάθετο άξονα του οχήματος, που καλείται yaw. [22]

Μπορούμε να σκεφτούμε ένα όχημα ως ένα ελεύθερο σώμα όπου επιταχύνει εμπροσθίως και οπισθίως ως απόκριση ορισμένης εισόδου γκαζιού ή φρένου και επιταχύνει πλευρικά ως απόκριση κατευθυντήριων αλλαγών.



Εικόνα 18. Δυνάμεις οχήματος κατά την στροφή

Κατά την διάρκεια στροφής σε μία καμπυλόγραμμη τροχιά με δεδομένη ακτίνα, μια φυγόκεντρη (αδρανειακή) δύναμη ενεργεί οριζόντια στις αναρτημένες και μη-αναρτημένες μάζες. Οι δυνάμεις αυτές επενεργούν πάνω από το επίπεδο του εδάφους μέσω των κέντρων των μαζών προκαλώντας την εμφάνιση ροπών σε αυτές τις μάζες. Αυτό έχει σαν επακόλουθο να μεταβάλλονται τα κάθετα φορτία που κάθε ελαστικό φέρει. Γενικά, κατά την στροφή τα κάθετα φορτία αυξάνονται στους εξωτερικούς τροχούς.

Η φυγόκεντρη αυτή δύναμη επηρεάζεται από την ταχύτητα του οχήματος, την ακτίνα καμπυλότητας, την κατανομή βάρους και την μάζα του [11]. Δίνεται από τον τύπο:

$$F_c = \frac{m_{sprung} * w_d * V^2}{R}$$

Εάν υποθέσουμε, ότι το όχημα κινείται με μία ταχύτητα 10 m/s^2 , σε μία στροφή ακτίνας 5 μέτρων, η φυγόκεντρη δύναμη που αναπτύσσεται, χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο, μπορεί να υπολογιστεί.

$$F_c = \frac{700 \cdot 0,45 \cdot 10^2}{5} = 6300 \text{ N} \quad (8)$$

Η παραπάνω εξίσωση δίνει την φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται κατά την στροφή στους εσωτερικούς τροχούς του οχήματος. Ένα ποσοστό από αυτή την δύναμη μεταφέρεται στους εξωτερικούς τροχούς και καλείται δυναμική πλευρική μεταφορά φορτίου. Δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{lateral} = \frac{F_c \cdot h}{t_1} = \frac{6300 \cdot 0,7}{1,675} = 2630 \text{ N} \quad (9)$$

Η παραπάνω εξίσωση υπονοεί ότι σε μία σταθερή κατάσταση 2630 N του φορτίου μεταφέρεται πλευρικά στους εξωτερικούς τροχούς επιτυγχάνοντας δυναμικό πλευρικό συντελεστή μεταφοράς φορτίου 42%. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο συντελεστής που υπολογίστηκε χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η εγκυρότητα του συστήματος ανάρτησης κάτω από δυναμικές συνθήκες. Αντίθετα, η φυγόκεντρη δύναμη που υπολογίστηκε πρωτύτερα πρέπει να χρησιμοποιείται κατά την στατική δομική ανάλυση. Η διαδικασία κατά την οποία οι εμπρόσθιες (traverse) δυνάμεις προκαλούν αλλαγές στο κάθετο φορτίο λέγεται πλευρική μεταφορά φορτίου.

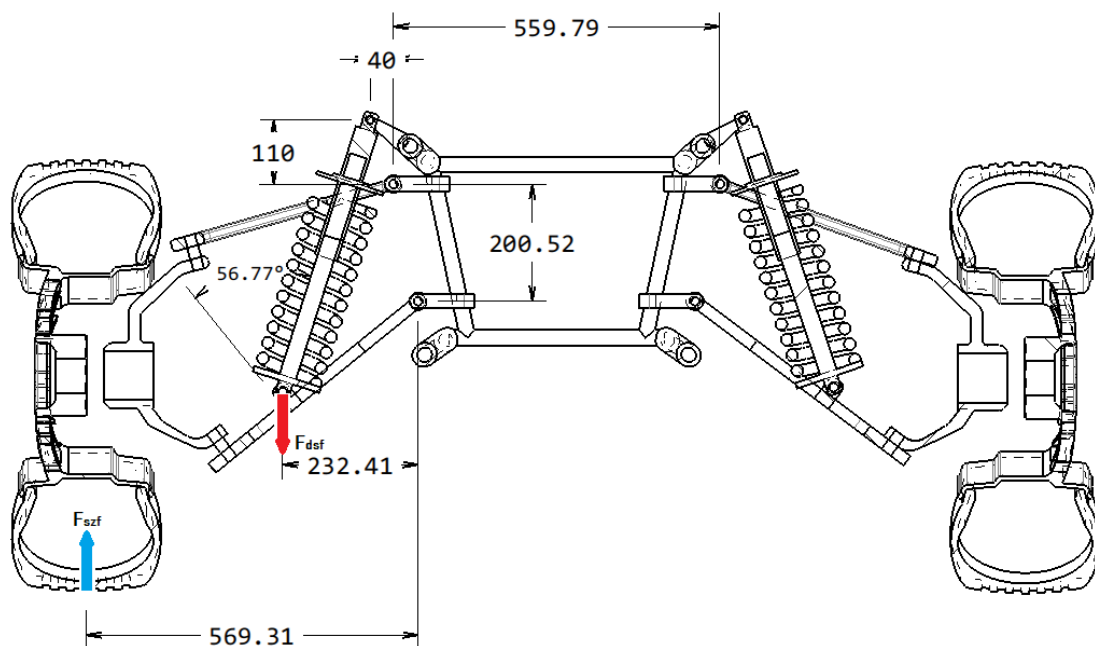
2.6.2 Υπολογισμός ελατηρίου

Με τον όρο ‘ελατήριο’ οχήματος ονομάζονται τα εξαρτήματα της ανάρτησης που παράγουν μια δύναμη αντίδρασης όταν υπάρχει ελαστική παραμόρφωση [1]. Γενικά, τα ελικοειδή ελατήρια έχουν γραμμική καμπύλη δύναμης/μετατόπισης. Κάποιες ειδικές μορφές ελικοειδών ελατηρίων αποτελούν τα ελατήρια όπου διαφοροποιείται η διάμετρος ή/και το βήμα κατά μήκος του ελατηρίου και έτσι σε τέτοιες περιπτώσεις έχουμε μη-γραμμική συμπεριφορά. [12]

Οι βασικές παράμετροι που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό του ελατηρίου δίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3. Βασικές παράμετροι για τον υπολογισμό του ελατηρίου

Μεταβλητή	Τιμή	Περιγραφή
m_{sprung}	700 kg	Αναρτημένη μάζα
d_s	70 mm	Παραμόρφωση ελατηρίου
F_{szf1}	1577.5 N	Δύναμη αντίδρασης λόγω εδάφους
e	1.7	Δυναμικός συντελεστής από την στατική κατάσταση
x_1	232 mm	Απόσταση του σημείου περιστροφής του ελατηρίου στον κάτω βραχίονα με το σημείο περιστροφής του άκρου του στο σασί
x_2	570 mm	Απόσταση του σημείου περιστροφής του ελατηρίου στον κάτω βραχίονα με το σημείο περιστροφής του άκρου του στο σασί
C	5	Δείκτης ελατηρίου
G	80 GPa	Μέτρο διάτμησης Ck45
S_u	770 MPa	Όριο μέγιστης εφελκυστικής αντοχής
S_y	640 MPa	Όριο διαρροής



Εικόνα 19. Η δύναμη που ενεργεί στο ελατήριο

Από την ισορροπία των ροπών γύρω από το σημείο περιστροφής του άκρου του κάτω βραχίονα, βρίσκουμε την στατική δύναμη που ασκείται στο ελατήριο [1]:

$$F_{szr1} * x_2 = F_{dsf} * x_1 \Rightarrow F_{dsf} = 4546 \text{ N} \quad (10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον δυναμικό συντελεστή, βρίσκουμε το δυναμικό φορτίο που ενεργεί στο ελατήριο:

$$F_{dsf} = 7736 \text{ N} \quad (11)$$

Με βάση την παραμόρφωση, βρίσκουμε την απαιτούμενη ακαμψία του ελατηρίου:

$$K_s = \frac{F_{dsf}}{d_s} \Rightarrow K_s = 110.5 \text{ N/mm} \quad (12)$$

Με βάση τον δείκτη του ελατηρίου, βρίσκουμε τον συντελεστή Wahl's του ελατηρίου:

$$W = \frac{4*C-1}{4*C-4} + \frac{0.615}{C} = 1.31 \quad (13)$$

Η επιτρεπόμενη διατμητική δύναμη λαμβάνει υπόψη και έναν συντελεστή ασφαλείας:

$$\tau = \frac{S_y}{2} = 320 \text{ MPa} \quad (14)$$

Η διάμετρος του σύρματος, d προκύπτει από τον τύπο της μέγιστης διατμητικής τάσης για την διατομή ενός ελατηρίου:

$$\tau = W \frac{8*C*F_{dsf}}{\pi*d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{8*W*C*F_{dsf}}{\pi*\tau}} \Rightarrow d \approx 20 \text{ mm} \quad (15)$$

Η μέση διάμετρος του ελατηρίου, D προκύπτει από τον δείκτη του ελατηρίου:

$$D = C * d \Rightarrow D \approx 100 \text{ mm} \quad (16)$$

Ο αριθμός των ενεργών σπειρών στο ελατήριο, n προκύπτει από την σχέση:

$$n = \frac{d_s * G * d}{8 * F_{dsf} * C^3} \Rightarrow n \approx 10 \quad (17)$$

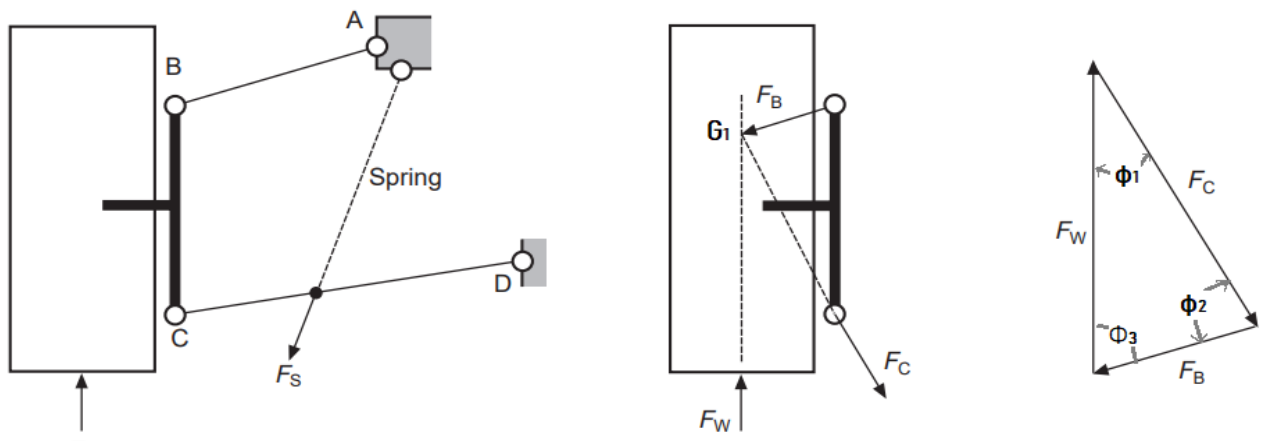
Το ελεύθερο μήκος του ελατηρίου, L_{free} είναι :

$$L_{free} = (n + 2) * d + d_s + 0.15 * d_s \Rightarrow L_{free} = 304 \text{ mm} \quad (18)$$

2.6.3 Υπολογισμός Δυνάμεων στην Ανάρτηση

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ανάρτηση με διπλά ψαλίδια όπου ένα ελατήριο ενεργεί στον κάτω βραχίονα. Γίνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

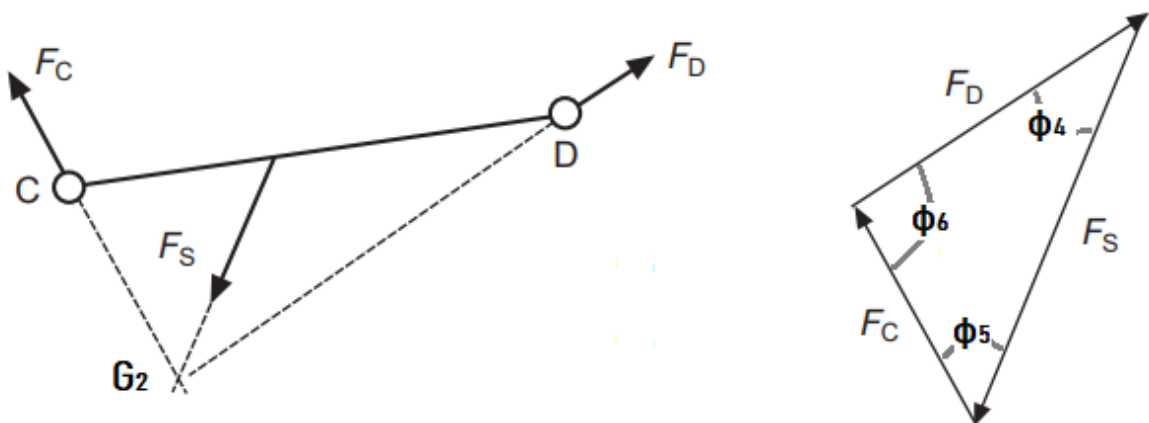
1. Τα φορτία λόγω των μαζών αγνοούνται διότι είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από το στατικό φορτίο του τροχού.
2. Όλες οι αρθρώσεις θεωρούνται σαν απλές ηλώσεις πείρου όπου αυτό συνεπάγεται ότι οι τριβές στα έδρανα είναι αμελητέες.
3. Το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο διαστάσεις.



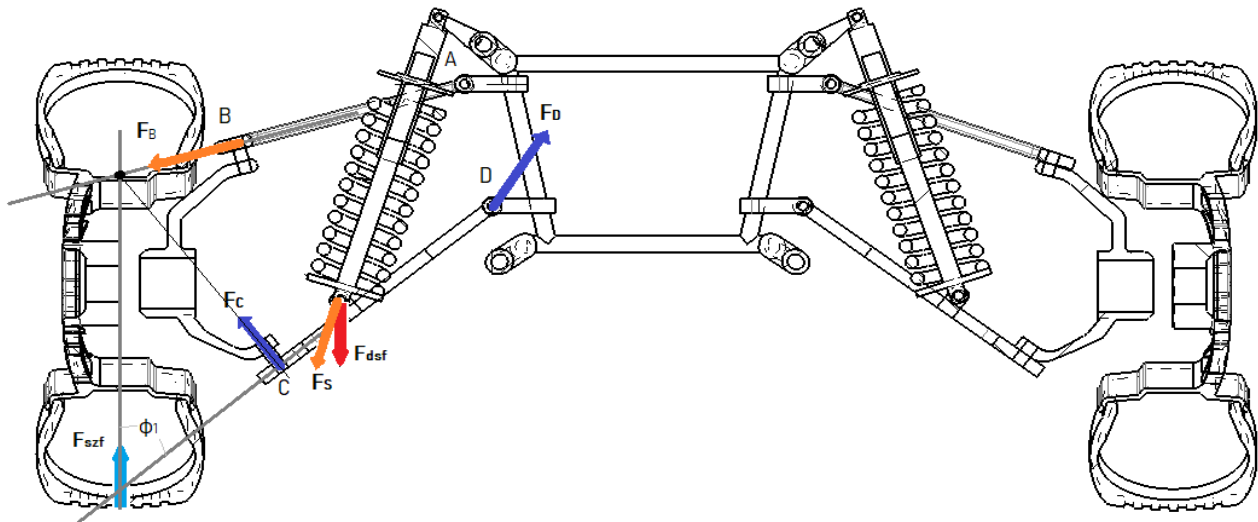
Εικόνα 20. Οι δυνάμεις που ενεργούν στην ανάρτηση

Το πρόβλημα του προσδιορισμού των δυνάμεων που μεταφέρονται στα σημεία πρόσδεσης είναι ένα στατικό πρόβλημα γιατί όλα τα μέλη-σύνδεσμοι είναι σε ισορροπία.[15]

Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι η δύναμη στον επάνω βραχίονα AB πρέπει να είναι κατά μήκος του συνδέσμου καθώς και στα δύο άκρα του οι αρθρώσεις είναι τύπου πείρου.



Εικόνα 21. Διαγράμματα ελευθέρου σώματος στο ακραξόνιο της ανάρτηση



Εικόνα 22. Διαγράμματα ελεύθερου σώματος για τους βραχίονες της ανάρτησης

Υποθέτουμε ότι η δύναμη F_{szf} είναι το φορτίο που φέρει ο τροχός και η δύναμη F_S αυτή που προέρχεται από το ελατήριο και δρα πάνω στον μηχανισμό της ανάρτησης. Τα μέλη AB και CD φέρουν 2 και 3 δυνάμεις αντίστοιχα. Από το διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το συναρμολόγημα τροχού-μουαγιέ, ορίζεται το σημείο τομής των διευθύνσεων των F_{szf} και F_B . Από αυτό το σημείο G_1 πρέπει να περνάει και η δύναμη του κάτω βραχίονα F_C . [10]

Στην περίπτωση που είναι γνωστό το μέγεθος της δύναμης F_{szf} και γωνία φ_1 , τα μεγέθη των F_B και F_C μπορούν να προσδιοριστούν από το τρίγωνο των δυνάμεων, εφαρμόζοντας τον νόμο των ημιτόνων.

$$\frac{F_{szf} \sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} = \frac{F_B}{\sin \varphi_3} = \frac{F_C}{\sin \varphi_4} \Rightarrow \frac{F_B}{\sin(39^\circ)} = \frac{1856}{\sin(66^\circ)} = \frac{F_C}{\sin(75^\circ)} \Rightarrow$$

$$F_B = 1278 \text{ N} \quad \text{και} \quad F_C = 1960 \text{ N} \quad (19)$$

Στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος, για τον σύνδεσμο CD, είναι γνωστό το μέγεθος και η διεύθυνση της δύναμης F_C και σε συνδυασμό με την διεύθυνση της δύναμης F_S , μπορούμε να ορίσουμε το σημείο τομής τους, G_2 . Από αυτό το σημείο θα πρέπει να περνάει και η διεύθυνση της δύναμης F_D . Οι δυνάμεις F_S και F_D μπορούν να βρεθούν από το τρίγωνο των δυνάμεων [7].

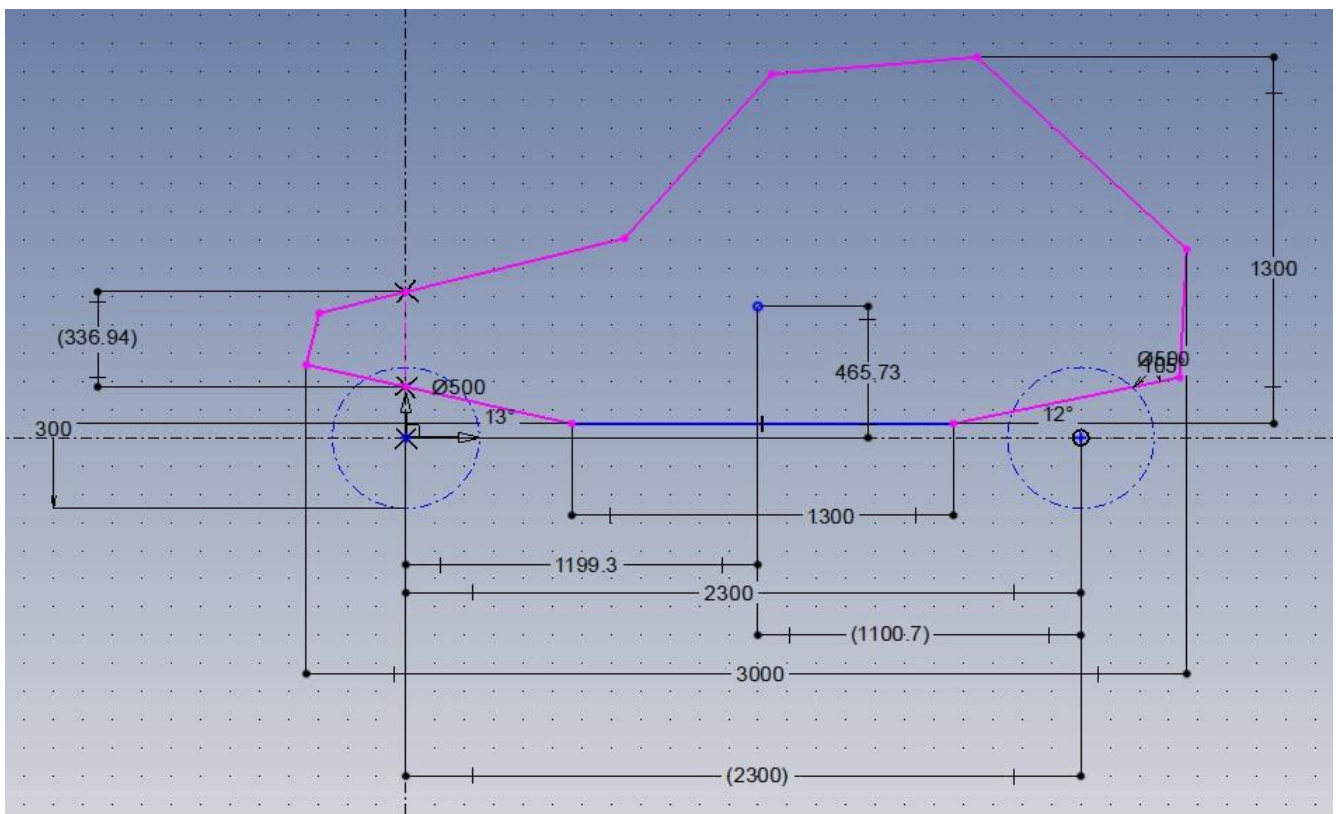
$$\frac{F_D}{\sin \varphi_5} = \frac{F_S}{\sin \varphi_6} = \frac{F_C}{\sin \varphi_4} \Rightarrow \frac{F_D}{\sin(56^\circ)} = \frac{1960}{\sin(24^\circ)} = \frac{F_S}{\sin(100^\circ)} \Rightarrow$$

$$F_D = 4065 \text{ N} \quad \text{και} \quad F_S = 4821 \text{ N} \quad (20) \ \& \ (21)$$

3. Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση Ανάρτησης

Η ανάπτυξη των τρισδιάστατων μοντέλων των εξαρτημάτων υλοποιήθηκε στο παραμετρικό λογισμικό TopSolid της Missler Software, της έκδοσης 7.14. Το ανεξάρτητο σύστημα της ανάρτησης με διπλά ψαλίδια που εξετάζεται και προτείνεται σε αυτή την εργασία, αποτελείται από 7 βασικά και διαφορετικά εξαρτήματα. Το σύστημα της ανάρτησης αποτελείται από αρκετά περισσότερα εξαρτήματα στην πραγματικότητα από αυτά που θα εξεταστούν, διότι δίνεται έμφαση σε αυτά που έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, εξαρτήματα όπως ελαστικά έδρανα, περικόχλια, μπουλόνια, πείροι, ασφάλειες, ρουλεμάν, καπάκια και άλλα υποσυστήματα που δεν συμμετέχουν ενεργά στην εξεταζόμενη αλληλεπίδραση μπορούν να εξαιρεθούν, απλουστεύοντας το σύστημα.

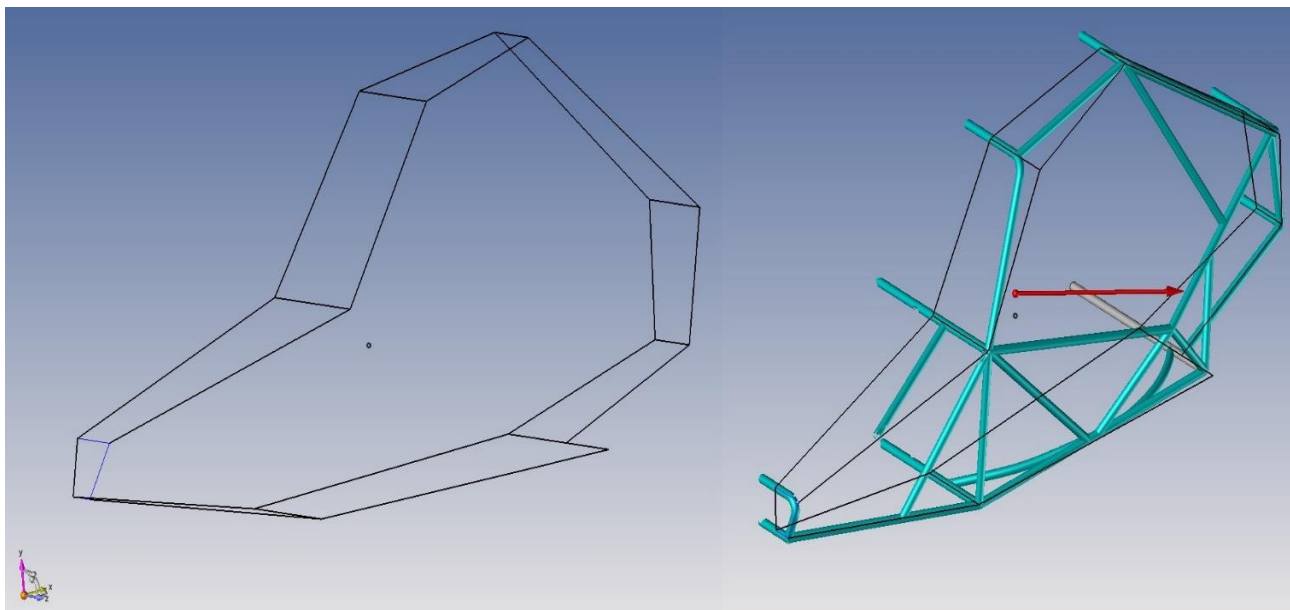
3.1 Σασσί Αμαξώματος



Εικόνα 23. Πρωταρχικό περίγραμμα του οχήματος

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το χωροδικτύωμα που θα χρησιμοποιηθεί θα αποτελείται από ένα σύνολο συνδέσμων-μελών κυκλικής και κοίλης διατομής. Η διατομή κάθε μέλους του σασί είναι κοίλη με διάμετρο 40 mm και με πάχος 8 mm.

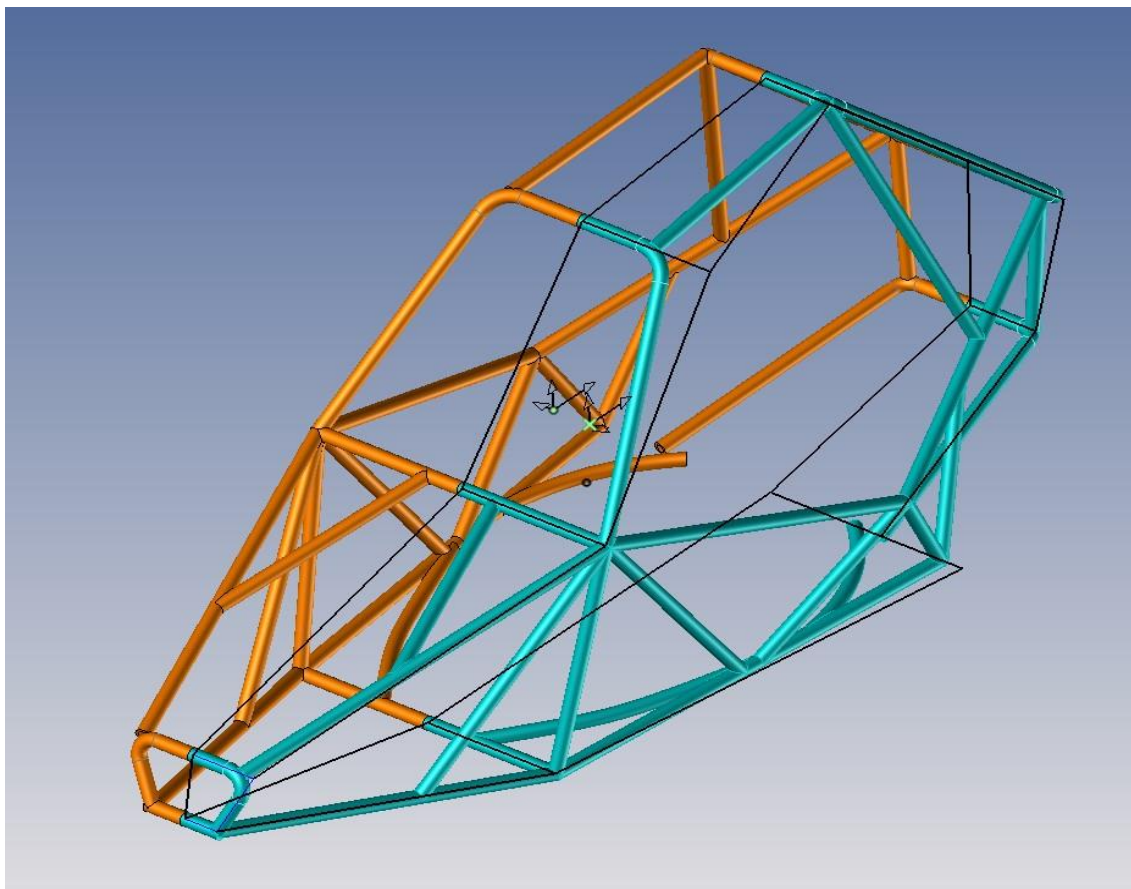
Η πρωτόλεια σχεδίαση ξεκινάει με τον προσδιορισμό των βασικών διαστάσεων και ορίων που θα καθορίσουν την τελική μορφή του πλαισίου. Αυτές οι αρχικές διαστάσεις, στο συγκεκριμένο στάδιο είναι ενδεικτικές, και μέχρι την ολοκλήρωση του σασί θα διαφέρουν. Παρ' όλ' αυτά, το σκαρίφημα αυτό είναι απαραίτητο καθώς σε αυτό εδώ το σημείο καθορίζεται το συνολικό μήκος και ύψος του οχήματος, η απόσταση από το έδαφος, το μεταξόνιο, το εμπρός και πίσω μετατρόχιο.



Εικόνα 24. Σχεδίαση των βασικών δοκών του χωροδικτυώματος

Η μοντελοποίηση στο σχεδιαστικό περιβάλλον γίνεται με την βοήθεια σχεδιαστικών γραμμών στο τρισδιάστατο χώρο. Κάθε γραμμή λειτουργεί ως «οδηγός» για την κυκλική διατομή που χρησιμοποιείται, δημιουργώντας ένα σύνδεσμο-μέλος. Επειδή, η γεωμετρία ενός πλαισίου συνήθως είναι συμμετρική ως προς το διάμηκες επίπεδο XY, αρκεί μόνο η σχεδίαση του προφίλ του αμαξώματος κατά το ήμισυ. Στην συνέχεια, γίνεται η δημιουργία του κάτοπτρου του και με πρόσθετους συνδέσμους-μέλη ενώνονται τα υπόλοιπα μέρη που χρειάζονται επιπρόσθετη ενίσχυση.

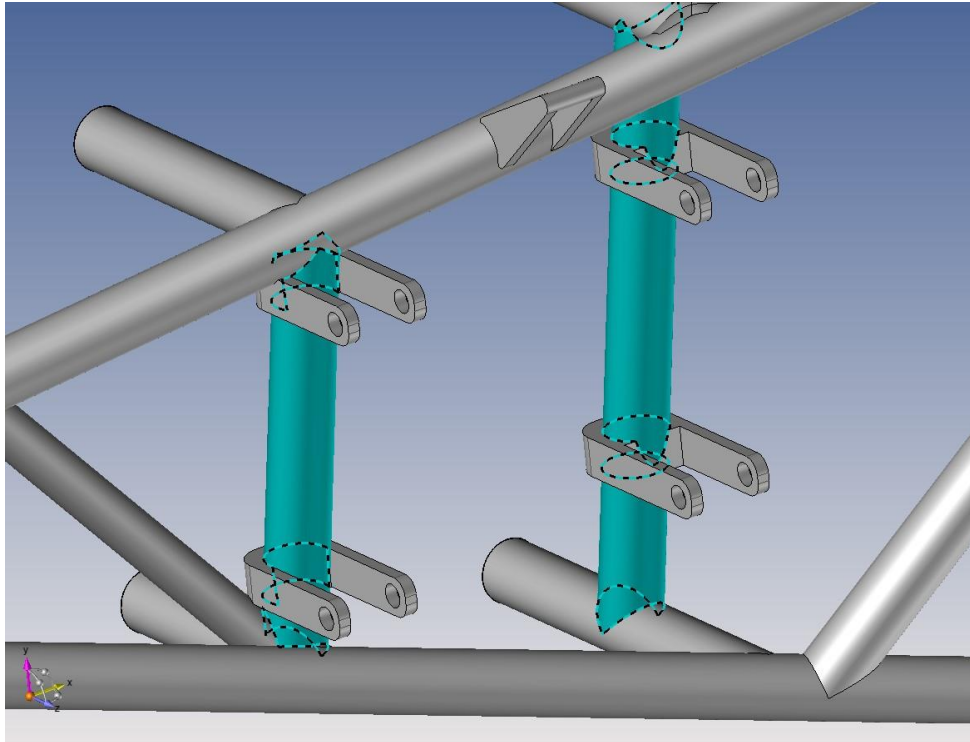
Τα μέλη συγκολλούνται μεταξύ τους σχηματίζουν ένα στιβαρό και άκαμπτο πλαίσιο όπου πάνω του θα μπορούν να τοποθετηθούν τα υπόλοιπα συναρμολογήματα του οχήματος. Επίσης, η διάταξη των μελών τρίγωνοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπόκεινται μόνο σε θλίψη ή εφελκυσμό και όχι σε στρεπτικές ή καμπτικές τάσεις. [2]. Ως υλικό για τα μέλη του χωροδικτυώματος επιλέγεται το Chromoly 4130, που είναι χάλυβας με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Το υλικό αυτό προσφέρει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, αντοχή σε εφελκυσμό και σκληρότητα.



Εικόνα 25. Αντιγραφή του κατόπτρου για την ολοκλήρωση του σασσί

Ένα εξίσου σημαντικό κομμάτι και χαρακτηριστικό γνώρισμα του πλαισίου που πρέπει να σημειωθεί είναι ο ορισμός των σημείων στα οποία θα γίνει η πρόσδεση (mounting points) των εξαρτημάτων της ανάρτησης. Η ακριβής θέση αυτών των σημείων είναι που δίνει σε κάθε ανάρτηση τα συγκεκριμένα λειτουργικά γνωρίσματα όσον αφορά την συμπεριφορά ή την απόκριση. Πιο συγκεκριμένα, όπως διακρίνεται και στην εικόνα για το μπροστινό μέρος, χρησιμοποιούνται 5 μικροί βραχίονες-στηρίγματα (brackets), όπου σε αυτά θα τοποθετηθούν τα 3 εξαρτήματα της ανάρτησης, οι άνω και κάτω βραχίονες ελέγχου και το σπειροειδές ελατήριο. Κάθε βραχίονας ελέγχου χρησιμοποιεί 2 στηρίγματα στα άκρα του και το ελατήριο ένα.

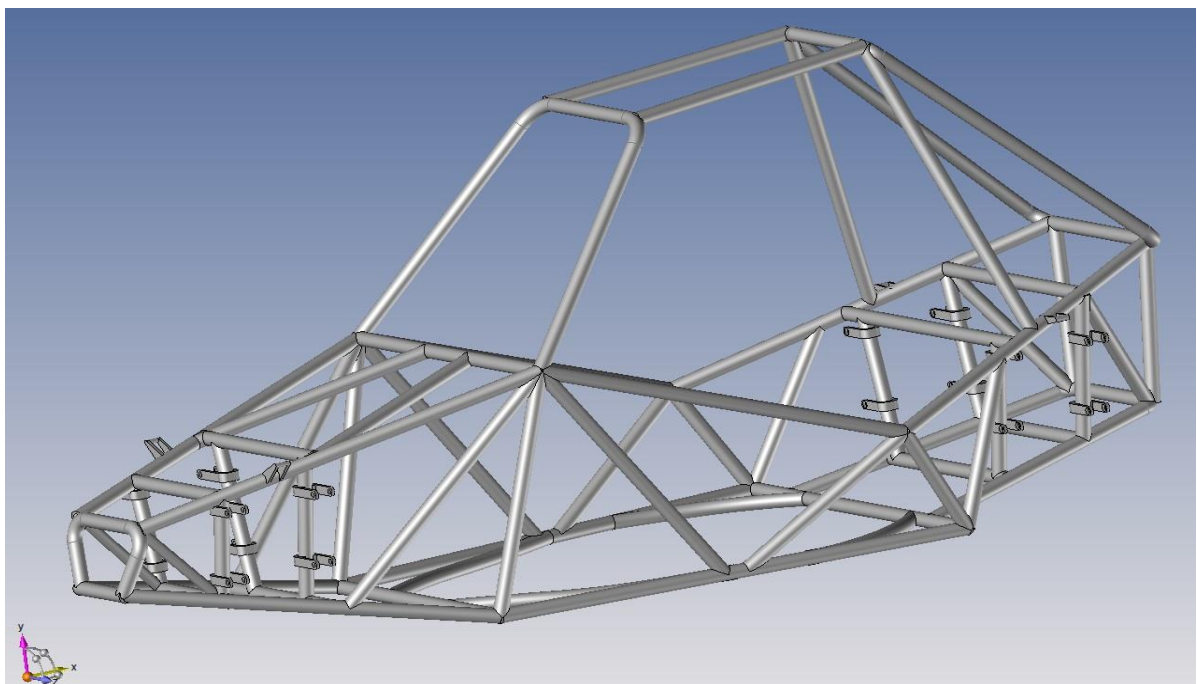
Η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός των βραχιόνων είναι κρίσιμα στοιχεία για την μελέτη του συστήματος, γι' αυτό οι δοκοί που υποστηρίζουν τους βραχίονες πρέπει να είναι παράλληλοι και να έχουν την ίδια κλίση ως προς το κατακόρυφο επίπεδο και να είναι συνευθειακοί στο διάμηκες επίπεδο. Η απόσταση αυτών των δοκών είναι όση και η απόσταση του δίχαλου του κάθε βραχίονα. Επίσης, η στήριξη για το ελατήριο τοποθετείται στο κέντρο των δυο δοκών και στο άνω μέλος του πλαισίου.



Εικόνα 26. Δημιουργία στηριγμάτων για το σύστημα της ανάρτησης

Παρόμοια σχεδιαστική συλλογιστική πορεία ακολουθείται και για την τοποθέτηση των στηριγμάτων στην πίσω ανάρτηση, με την διαφορά ότι επειδή το μετατρόχιο είναι μεγαλύτερο, η απόσταση των δύο πλευρών αυξάνεται ανάλογα.

Έπειτα από τους σχεδιαστικούς περιορισμούς και την ικανοποίηση των απαιτήσεων, η τελική όψη του αμαξώματος του οχήματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



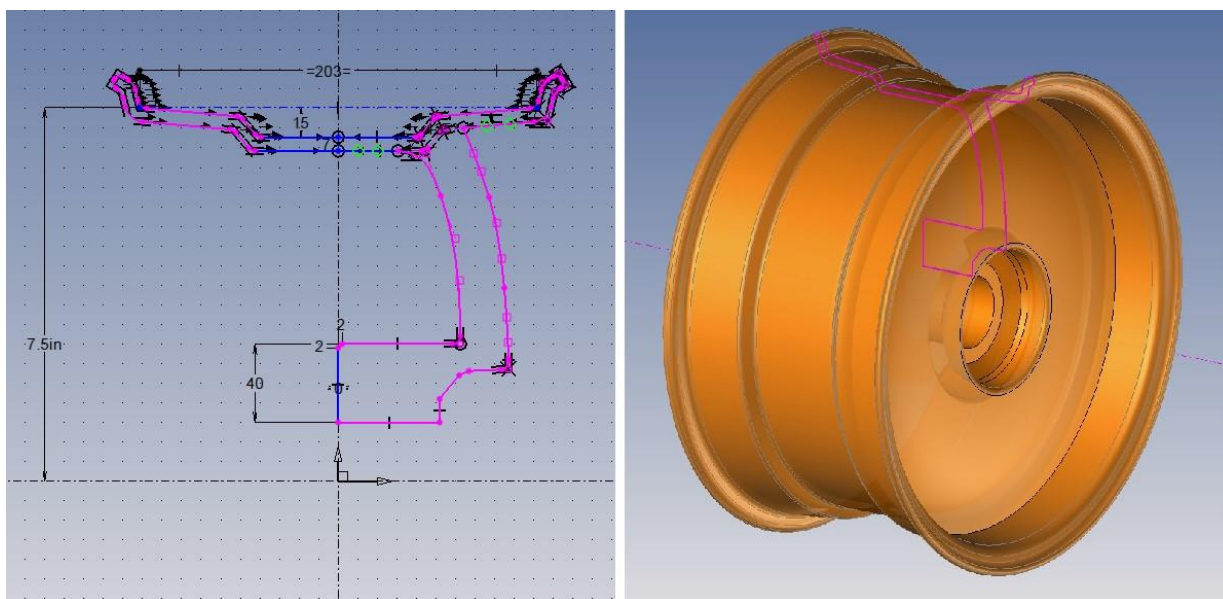
Εικόνα 27. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο του οχήματος

3.2 Τροχός

Για χάρην απλούστευσης σε αυτή την ανάλυση θα δοθεί έμφαση στα δύο κύρια μέρη του τροχού και όχι στα βοηθητικά του εξαρτήματα. Για αυτόν το λόγο θα σχεδιαστούν μόνο το ελαστικό και η ζάντα, που είναι τα πιο σημαντικά. Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του τροχού ξεκινάει πρώτα από την σχεδίαση της ζάντας, αφού πάνω σε αυτή θα εφαρμοστεί το ελαστικό και άρα η σχεδίαση του θα στηριχτεί σε αυτήν της ζάντας.

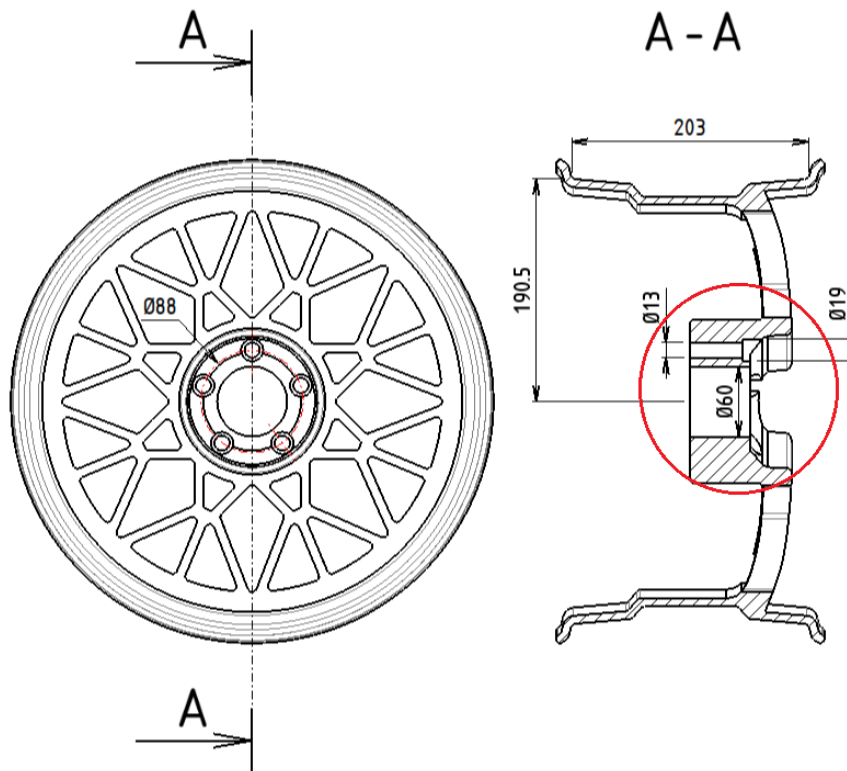
Όπως προαναφέρθηκε, το ελαστικό και η ζάντα ακολουθούν κάποια κωδικοποίηση όσον αφορά την γεωμετρία και το σχήμα τους. Για την περίπτωση του ελαστικού θα επιλεγεί το LT255/70R15 και η ζάντα που θα ταιριάζει σε έναν τέτοιο τροχό θα πρέπει να έχει τον κωδικό 8 J X 15.

Από αυτούς τους κωδικούς προκύπτουν οι διαστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την σχεδίαση των προφίλ του ελαστικού και της ζάντας. Το πλάτος του πέλματος του ελαστικού είναι 255 mm, ο λόγος διατομής συσχετίζει το πλάτος με ύψος που θα έχει η διατομή, $255 \cdot 0,7 = 178,5$ mm και η διάμετρος της ζάντας καθορίζει σε ποιο σημείο θα ξεκινάει το προφίλ της διατομής, 15 ίντσες = 381 mm.



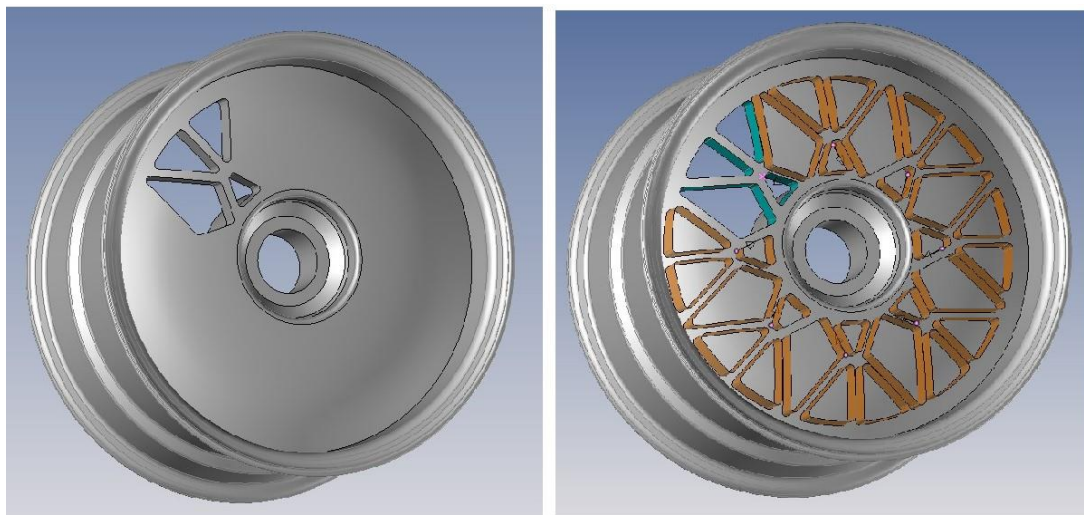
Εικόνα 28. Σχεδίαση της βασικής διατομής της ζάντας του τροχού (αριστερά) και η δημιουργία του στερεού μέσω περιστροφής της διατομής (δεξιά)

Για την σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου της ζάντας, με την βοήθεια γραμμών διαγράφεται η βασική διατομή με τις διαστάσεις που υποδεικνύει ο κωδικός, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Στην συνέχεια, με την βοήθεια της εντολής “revolve”, περιστρέφεται η διατομή γύρω από το κέντρο της ζάντας για να παραχθεί ο όγκος του στερεού.



Εικόνα 29. Εγκάρσια τομή της ζάντας

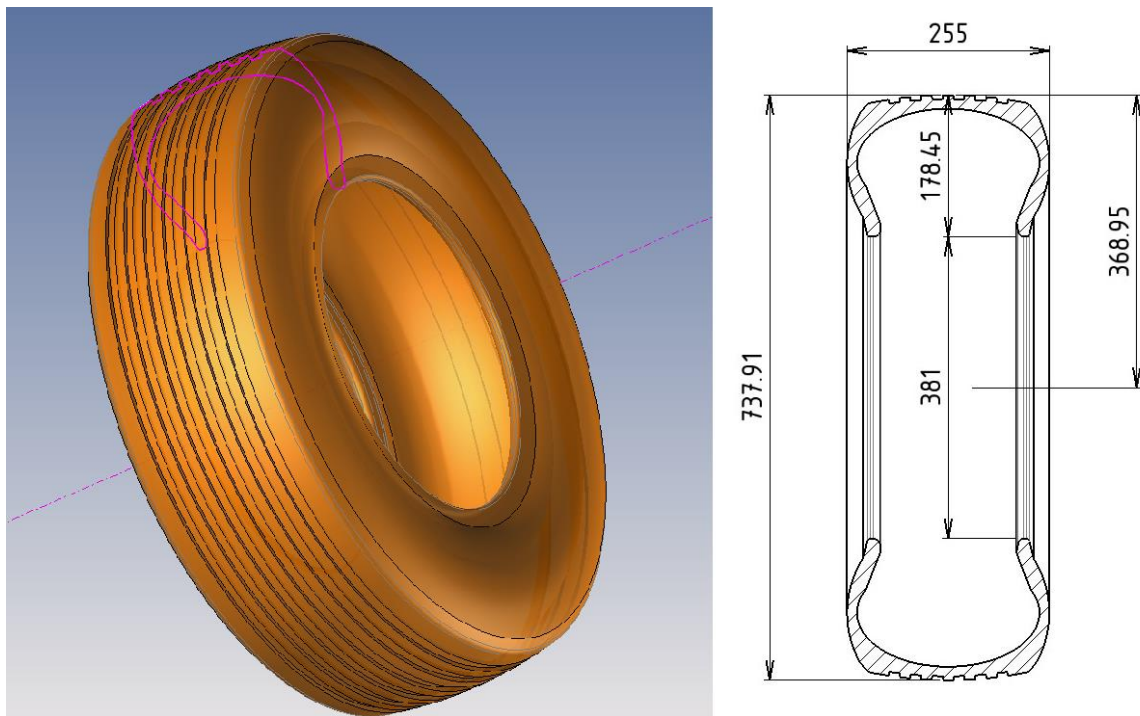
Ιδιαίτερη προσοχή, δίνεται στα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας στο κέντρο της ζάντας. Σε εκείνο το σημείο, προσαρμόζεται η μονάδα ρουλεμάν του τροχού, που επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή του τροχού και περνάει ο άξονας που μεταδίδει την κίνηση. Ως εκ τούτου, πρέπει να παρέχεται ο απαραίτητος χώρος που θα συγκρατούνται αυτά τα εξαρτήματα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω 5 οπών διαμέτρου 13 mm. Θεωρείται ότι η κοχλίες που συγκρατούν την μονάδα των ρουλεμάν είναι M12.



Εικόνα 30. Το μοτίβο για τα ανοίγματα της ζάντας (αριστερά) και ο κυκλικός πολλαπλασιασμός του γύρω από το κέντρο της ζάντας (δεξιά)

Τέλος, για να μειωθεί το βάρος αλλά και για λόγους αισθητικής δημιουργούνται κάποια ανοίγματα με ένα συγκεκριμένο μοτίβο και στη συνέχεια μέσω της εντολής circular pattern αναπαράγεται γύρω από το κέντρο ακόμα 7 φορές.

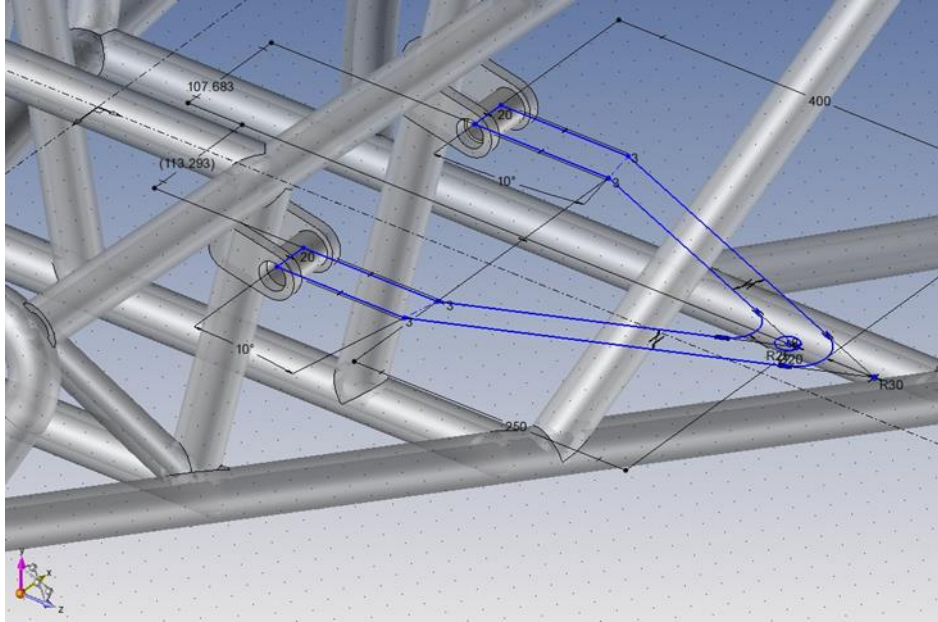
Για την σχεδίαση του ελαστικού, χρησιμοποιείται ως βοηθητική βάση το περίγραμμα της διατομής της ζάντας, για να εξασφαλιστεί η σωστή συναρμογή του. Η λογική της σχεδίασης είναι παρόμοια με αυτήν που αναφέρθηκε παραπάνω για την ζάντα. Με την βοήθεια γραμμών δημιουργείται το περίγραμμα και αφού ολοκληρωθεί το προφίλ που θα έχει η διατομή του πέλατος, με την εντολή revolve του TopSolid, δίνεται όγκος σε αυτό το σχήμα περιστρέφοντας το προφίλ γύρω από μια αξονική γραμμή που περνά από το κέντρο του τροχού.



Εικόνα 31. Η βασική διατομή του ελαστικού και η δημιουργία του στερεού μέσω περιστροφής (αριστερά). Οι βασικές διαστάσεις του ελαστικού μετά την σχεδίαση (δεξιά)

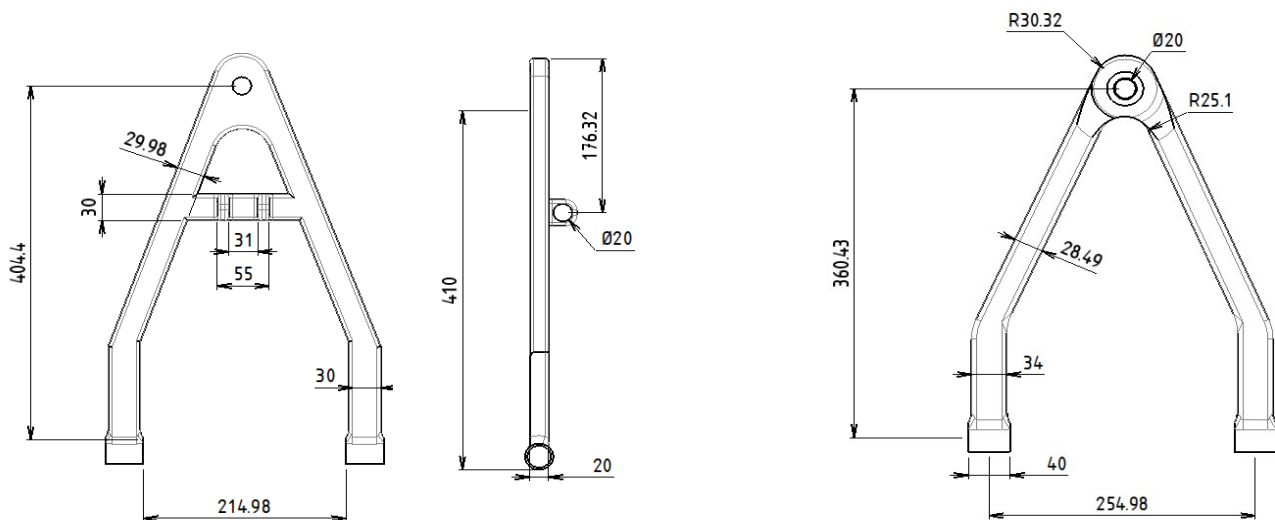
3.3 Βραχίονες Ελέγχου

Η ανάπτυξη των βραχιόνων ελέγχου, πρέπει να γίνει μετά την σχεδίαση του πλαισίου, καθώς τα σημεία πρόσδεσης είναι το σημείο εκκίνησης για την σχεδίαση και πρέπει να είναι ορισμένα. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι τα δύο άκρα του δίχαλου κάθε βραχίονα θα απέχουν την ίδια απόσταση και θα ταιριάζουν ακριβώς.



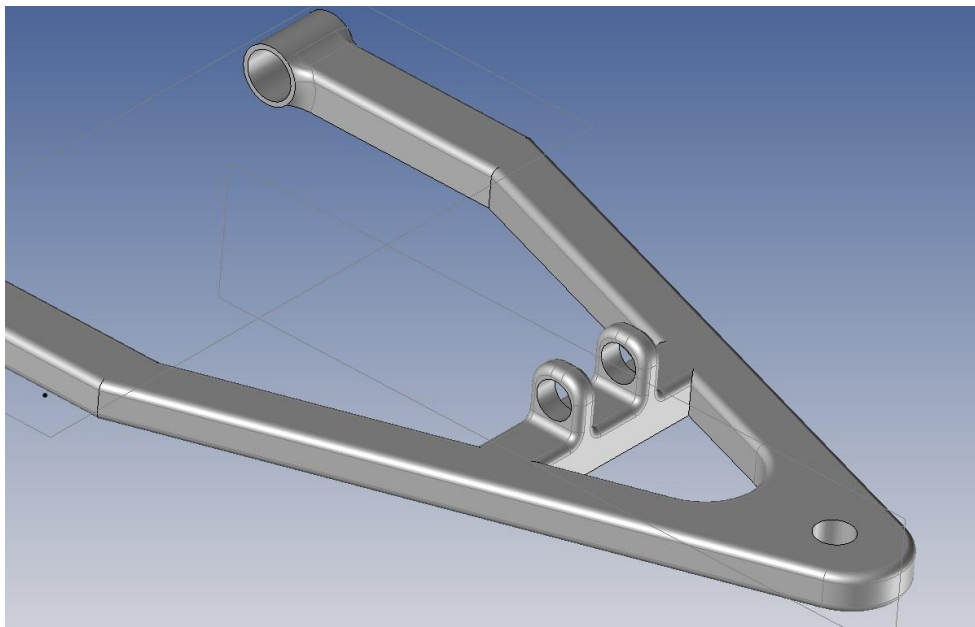
Εικόνα 32. Η σχεδίαση του βραχίονα γίνεται πάνω στο υπάρχων χωροδικτύωμα

Έτσι, το πρώτο βήμα είναι να σχεδιαστούν τα άκρα που αποτελούνται από δύο κοίλους κυλίνδρους, που φιλοξενούν τα ελαστικά έδρανα, επιτρέποντας την περιστροφή γύρω από αυτά τα σημεία πρόσδεσης. Έπειτα, σχεδιάζεται το περίγραμμα του δίχαλου και δίνοντας του όγκο δημιουργείται ο κύριος κορμός του βραχίονα.



Εικόνα 33. Βασικές διαστάσεις του άνω και κάτω βραχίονα

Σε αυτό το σημείο, στο απέναντι άκρο, τοποθετείται και η οπή για τον σφαιρικό σύνδεσμο, που θα είναι το σημείο σύνδεσης του βραχίονα με το ακραζόνιο. Η ίδια σχεδιαστική διαδικασία ακολουθείται και για τους δύο βραχίονες με την διαφορά ότι ο κάτω βραχίονας πρέπει να έχει μεγαλύτερο μήκος. Το συνολικό μήκος του άνω βραχίονα είναι 400 mm, ενώ του κάτω βραχίονα είναι 470 mm.



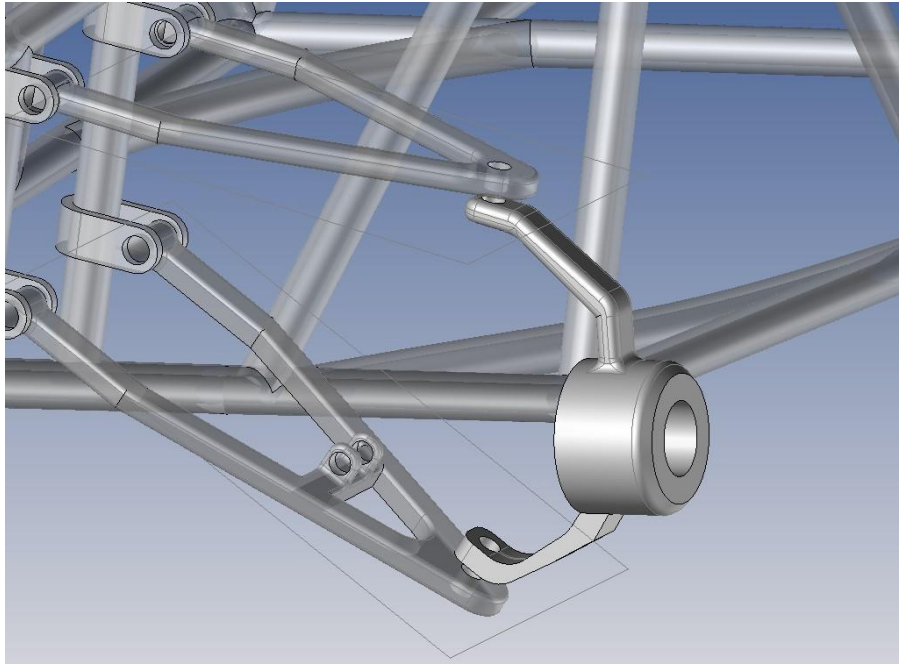
Εικόνα 34. Ο ολοκληρωμένος κάτω βραχίονας μετά την προσθήκη του στηρίγματος για την υποστήριξη του ελατηρίου

Μια ακόμη διαφορά όσον αφορά την γεωμετρία του κάτω βραχίονα είναι ότι σε αυτόν στηρίζεται το ελατήριο. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός μέλους που θα συγκρατεί το ένα άκρο του ελατηρίου μέσω ελαστικού εδράνου και θα επιτρέπει την περιστροφική κίνηση γύρω από αυτό το σημείο.

3.4 Βραχίονας Σύνδεσης

Η σχεδίαση του βραχίονα σύνδεσης γίνεται έχοντας σαν δεδομένα και γνωστά τις ακριβείς θέσεις των δύο βραχιόνων. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί τα άκρα του ακραζονίου θα πρέπει να εφαρμόζουν ακριβώς στα σημεία όπου βρίσκονται οι περιστροφικοί σύνδεσμοι. Έτσι, το εξάρτημα σχεδιάζεται μέσα στο υπάρχον συναρμολόγημα έχοντας σαν αναφορά τις σωστές θέσεις των βραχιόνων που καθορίζουν το σχήμα και την γεωμετρία των άκρων του. Τα δύο επίπεδα που χρησιμοποιούνται σαν αναφορά είναι τα επίπεδα των δύο βραχιόνων

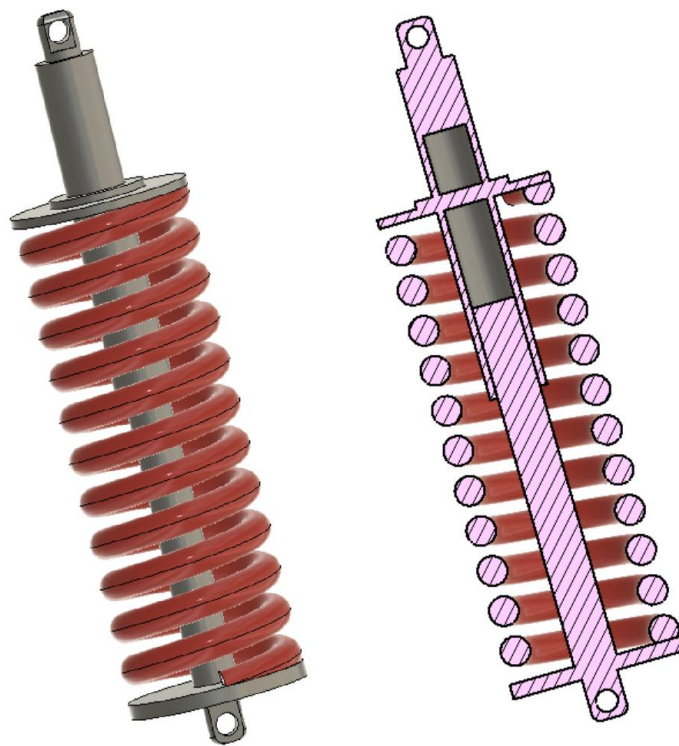
Βασική λειτουργία του ακραζονίου είναι η παροχή στήριξης στον τροχό. Αυτό γίνεται μέσω του κοίλου κυλίνδρου που βρίσκεται στο κέντρο του και η εσωτερική διάμετρος πρέπει να ταιριάζει με την διάμετρο του του άξονα μετάδοσης κίνησης του περνάει από μέσα του. Επίσης, η ακριβής θέση αυτού του κυλίνδρου καθορίζει τελικώς το μετατόχιο και την απόσταση του οχήματος από το έδαφος.



Εικόνα 35. Ο Βραχίονας σύνδεσης προσαρμοσμένος στους βραχίονες της ανάρτησης

3.5 Ελικοειδές ελατήριο

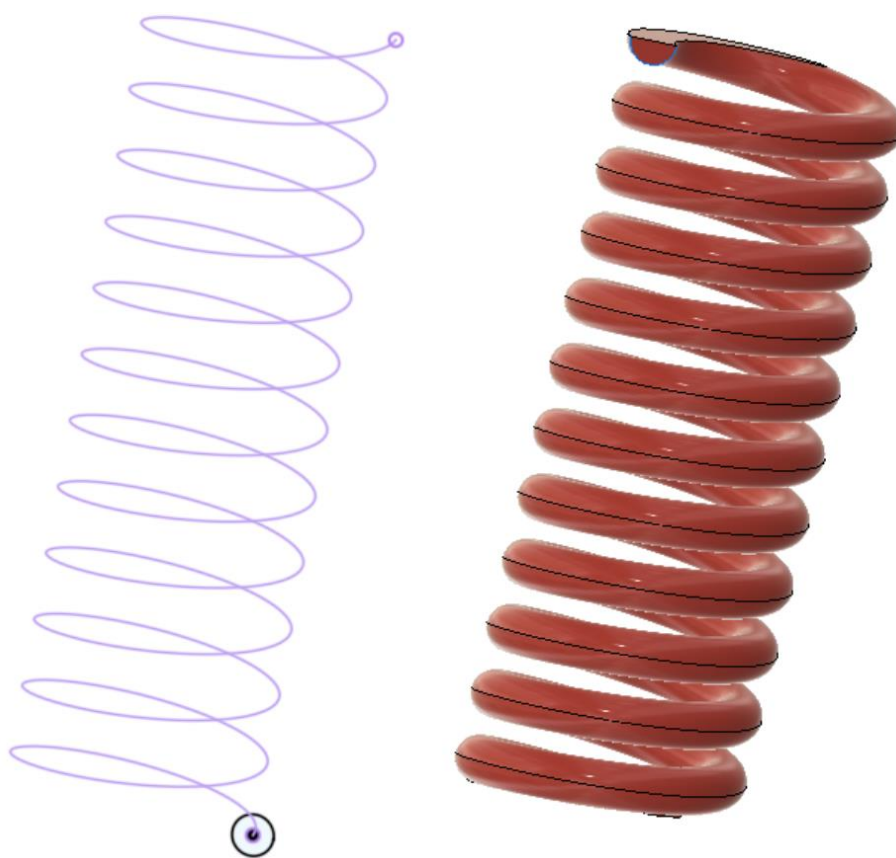
Για την μοντελοποίηση του ελικοειδούς ελατηρίου απαιτείται η επιμέρους σχεδίαση των εξαρτημάτων που το αποτελούν. Αυτά είναι το σπειροειδές ελατήριο και των δύο ράβδων που το συγκρατούν.



Εικόνα 36. Ισομετρική όψη (αριστερά) και εγκάρσια διατομή (δεξιά) ελικοειδούς ελατηρίου

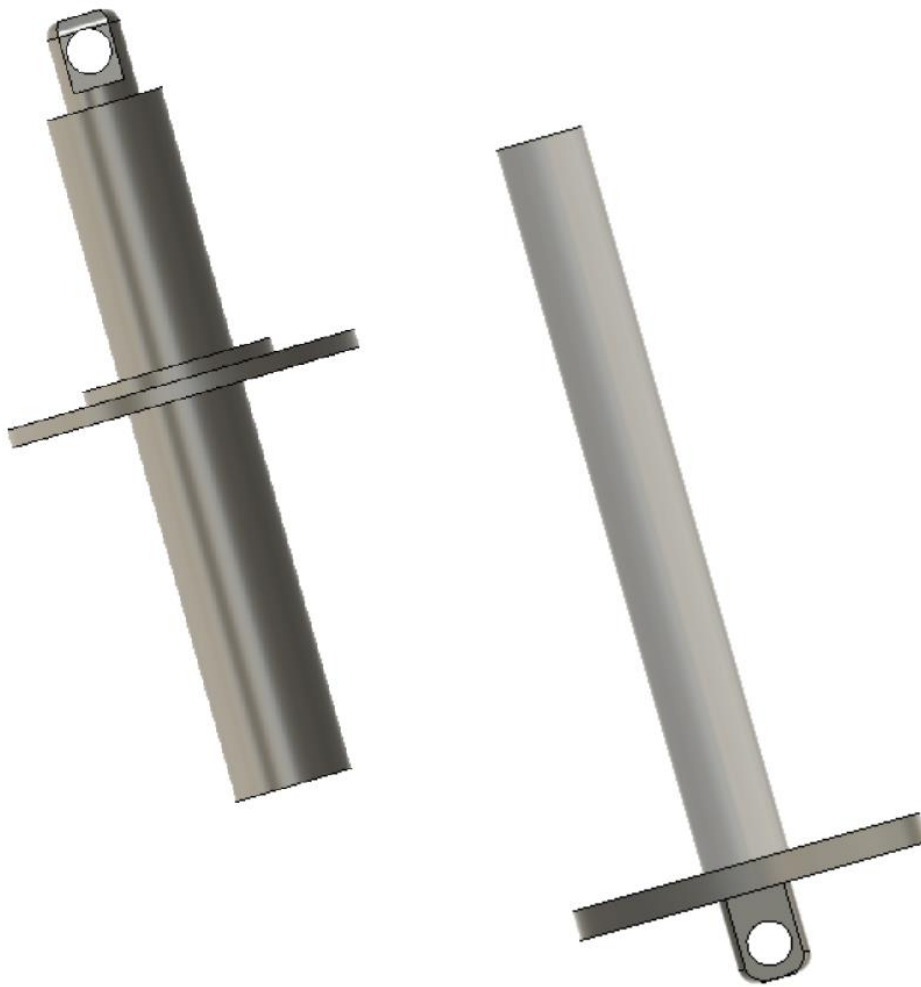
Το ένα άκρο κάθε μιας ράβδου τοποθετείται στον κάτω και επάνω βραχίονα και η μία συνεργάζεται με την άλλη εκτελώντας μια παλινδρομική κίνηση. Το ελατήριο τοποθετείται ενδιάμεσα και κάθε ράβδος διαθέτει κατάλληλη γεωμετρία που επιτρέπει την συγκράτηση του ελατηρίου.

Η σχεδίαση του ελατηρίου ξεκινάει με τον καθορισμό της διαμέτρου του σύρματος, που είναι στα 20 mm. Έπειτα, κατασκευάζεται η περιστροφική σπειροειδής έλικα καθορίζοντας τον αριθμό των σπειρών (12), το συνολικό μήκος (320 mm) και την εξωτερική διάμετρο (100 mm) του ελατηρίου. Τέλος, γίνεται η εξαγωγή του στερεού χρησιμοποιώντας την διατομή των 20 mm για την σάρωση της γραμμής-οδηγού της έλικας.



Εικόνα 37. Η ελικοειδής γραμμή (αριστερά) για τη σχεδίαση του ελατηρίου και το παραγόμενο στερεό (δεξιά)

Η μοντελοποίηση των δύο άκρων του αποσβεστήρα, γίνεται με την σχεδίαση δύο απλών ράβδων όπου βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι το κάτω μέρος του πρέπει να συνεργάζεται με το άνω μέρος και έτσι οι διάμετροι τους πρέπει να συμπίπτουν. Επίσης, κάθε ράβδος πρέπει να διαθέτει μια κατάλληλη βάση για την συγκράτηση του ελατηρίου. Το άνω μέρος του αποσβεστήρα προσδένεται στο χωροδικτύωμα του οχήματος μέσω περιστροφικού συνδέσμου, ενώ το κάτω μέρος του αποσβεστήρα προσαρμόζεται στον κάτω βραχίονα.



Εικόνα 38. Το πάνω μέρος (αριστερά) και η βάση (δεξιά) για την συγκράτηση του ελατηρίου

4. Στατική Ανάλυση Ανάρτησης

4.1 Εισαγωγή στην στατική ανάλυση

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα εργαλείο που προσδιορίζει πως ένα εξάρτημα ή ένα συναρμολόγημα θα αποκριθεί σε ορισμένα φορτία και διάφορες οριακές συνθήκες. Εφαρμόζοντας συγκεκριμένα φορτία και συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, μπορούμε να αναλύσουμε τα αποτελέσματα και έτσι να προσδιορίσουμε την βέλτιστη σχεδίαση που θα μεγιστοποιεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που επιλέγονται ως σημαντικότερα.

Το λογισμικό που επιλέγεται για να γίνουν όλες οι αναλύσεις των τρισδιάστατων μοντέλων CAD, είναι το περιβάλλον προσομοίωσης που προσφέρει το Fusion 360 Simulation της Autodesk. Σε αυτό το περιβάλλον, τα εξαρτήματα θα υποστούν διάφορα φορτία και θα βρεθούν κάτω από διάφορες οριακές συνθήκες, με σκοπό την

κατανόηση των αναπτυσσόμενων τάσεων, την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς και την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των εξαρτημάτων. Το λογισμικό έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει και να εκτελέσει στατικές αναλύσεις, θερμικές αναλύσεις σταθερής κατάστασης, αναλύσεις κόπωσης και αναλύσεις δονήσεων.

Η ανάλυση που χρησιμοποιηθεί για τα εξαρτήματα θα είναι η στατική ανάλυση, στην οποία οι οριακές συνθήκες θα καθοριστούν και θα παρθούν τα αποτελέσματα για την ισοδύναμη τάση, την παραμόρφωση και τον συντελεστή ασφαλείας. Η στατική ανάλυση θα γίνει υπολογίζοντας την χειρότερη δυνατή περίπτωση, έτσι ώστε το εξάρτημα να είναι σε θέση να αντέξει με ασφάλεια τα φορτία σε κάθε περίπτωση χωρίς να αστοχήσουν. [8]

Η συνολική μάζα, αναρτημένη και μη-αναρτημένη, μαζί με την μεταφορά φορτίων παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του υλικού και στις απαιτήσεις σχεδίασης.

4.2 Οριακές συνθήκες

Η ανάλυση γίνεται για την εύρεση την συνολική παραμόρφωσης, της ισοδύναμης τάσης von Mises και τον συντελεστή ασφαλείας. Η βασική οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται όταν εξετάζεται ο άνω και ο κάτω βραχίονας είναι η στήριξη που εφαρμόζεται στα δύο άκρα τους, στα σημεία όπου συνδέεται με το σασί του οχήματος. Ο τύπος της στήριξης που χρησιμοποιούμε είναι σταθερός, αυτός ο τύπος στήριξης δεν επιτρέπει καμία κίνηση του βραχίονα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ο βραχίονας είναι πλήρως συγκρατημένος στη θέση του και δεν μπορεί να περιστραφεί ή να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Επιλέγεται αυτός ο τύπος στήριξης, γιατί ο βραχίονας θεωρούμε ότι παραμένει ακίνητος σε σχέση με το σασί όπου είναι συνδεδεμένος.

Μια ακόμη σημαντική οριακή συνθήκη που πρέπει να ορίσουμε, για να ξεκινήσει οποιαδήποτε ανάλυση είναι η δύναμη. Για να είναι πλήρης ο προσδιορισμός της εφαρμοζόμενης δύναμης, πρέπει να ορίσουμε το μέγεθος, τον προσανατολισμό και της θέσης της.

Πρωταρχικό και απαραίτητο βήμα για την ανάλυση είναι η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος (mesh). Ένα πλέγμα με μικρότερα κελιά, κάνει την ανάλυση πιο ακριβή και έμπιστη όσον αφορά τα αποτελέσματα του απορρέουν από αυτήν. Για αυτό τον λόγο, επιλέγεται ως μέσο μήκος των κελιών τα 2 mm.

Ο κύριος στόχος της ανάλυσης είναι να αποκτήσουμε δεδομένα σχετικά:

- i. Με τον συντελεστή ασφαλείας
- ii. Τις ισοδύναμες τάσεις von Mises
- iii. Την παραμόρφωση
- iv. Την επιλογή υλικού

Ο συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety, FOS), είναι ο λόγος της μέγιστης επιτρεπόμενης αντοχής προς την πραγματική τάση που αναπτύσσεται στο υπό μελέτη εξάρτημα ή συναρμολόγημα. Γενικά, όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος του ενός, μπορούμε να υποθέσουμε με σχετική βεβαιότητα ότι τα αποτελέσματα που εξάγουμε είναι ορθά και το εξάρτημα είναι ασφαλή από δομικές αστοχίες.

4.3 Επιλογή υλικού

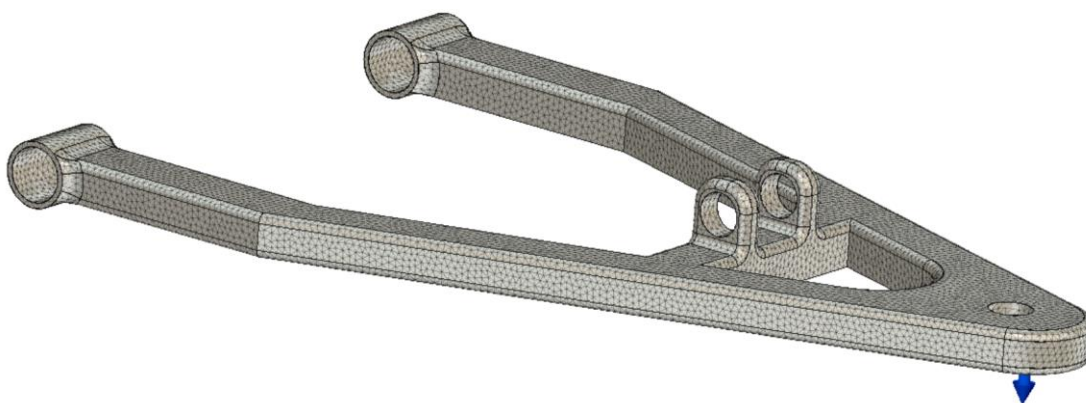
Η επιλογή υλικού παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην σχεδίαση όσο και στην ανάλυση ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος ή συστήματος. Επίσης, η μέγιστη και η ελάχιστη αναπτυσσόμενη τάση κατά την δυναμική φόρτιση πρέπει να είναι μέσα στα όρια ασφαλείας. Τα υλικά που επιλέγονται συνήθως για το ακραζόνιο είναι είτε αλουμίνιο είτε χυτοσίδηρος είτε κάποιο κράμα χάλυβα. Ο συντελεστής ασφαλείας για εξαρτήματα ανάρτησης πρέπει να είναι μεταξύ 1 και 2.5 για να θεωρηθεί αξιόπιστο. Ακόμα, το κόστος, η διαθεσιμότητα, το βάρος και η κατεργαστικότητα μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή του υλικού για ένα εξάρτημα.

Όπως προαναφέρθηκε, οι βραχίονες που ενώνουν τον τροχό με το υπόλοιπο σασσί του οχήματος πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρουν με ασφάλεια, χωρίς να αστοχήσουν, διάφορα δυναμικά και απρόβλεπτα φορτία, κατά τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας (στροφή, φρενάρισμα, επιτάχυνση). Τα πιο συνήθως υλικά που επιλέγονται από την βιβλιογραφία για τους βραχίονες είναι οι χάλυβες AISI 1018, AISI 4130 καθώς και το κράμα αλουμινίου της σειράς 6000, A6061. [9]

Για την ανάλυση του ελατηρίου τα υλικά που επιλέγονται για να εξεταστούν είναι ο ανθρακούχος χάλυβας ASTM-A227, το κράμα χάλυβα με χρώμιο και βανάδιο AISI 6150 και το κράμα χάλυβα με χρώμιο και νικέλιο Inconel 713.

4.4 Στατική ανάλυση κάτω και άνω βραχίονα

Για να μελετηθεί το συγκεκριμένο εξάρτημα, αρχικά εισάγεται στο περιβάλλον στατικής ανάλυσης του Fusion 360 Simulation. Έπειτα, δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα καθορίζοντας το μέγιστο μήκος του κάθε στοιχείου, για αυτή την περίπτωση επιλέγεται ως μέγιστο μήκος του στοιχείου τα 3 mm. Όσο μικρότερο το μήκος του στοιχείου, τόσο ακριβέστερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης κάνοντας όμως την ανάλυση πιο απαιτητική σε υπολογιστική ισχύ και περισσότερο χρονοβόρα. Με αυτή την ρύθμιση το πλέγμα αποτελείται από 150000 τετράεδρα στοιχεία. [21]

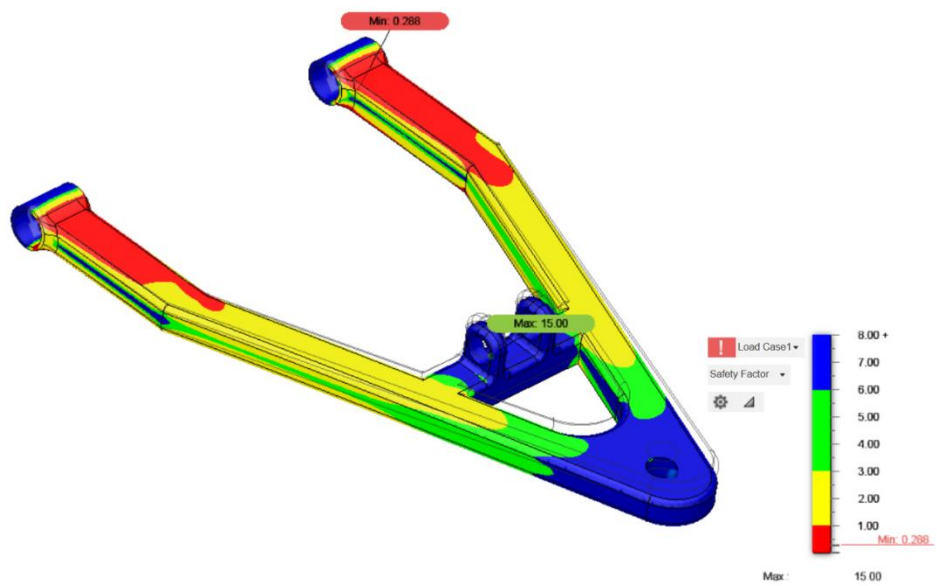


Εικόνα 39. Το υπολογιστικό πλέγμα για τον κάτω βραχίονα

Στην συνέχεια, ορίζονται οι διάφορες επαφές του συστήματος που εξετάζουμε ώστε αυτό να ανταποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως με αυτόν στην πραγματικότητα. Δηλαδή, «κλειδώνοντας» τους σωστούς βαθμούς ελευθερίας το εξάρτημα πρέπει να κινείται όπως θα κινούνταν και στην αντίστοιχη περίπτωση στην πραγματικότητα. Για να το επιτύχουμε αυτό, τα δύο άκρα του βραχίονα όπου προσαρμόζονται στο σασί κλειδώνονται με μια σταθερή σύνδεση, καθώς η μοναδική κίνηση που κάνει ο βραχίονας είναι η περιστροφική με κέντρο αυτά τα σημεία περιστροφής.

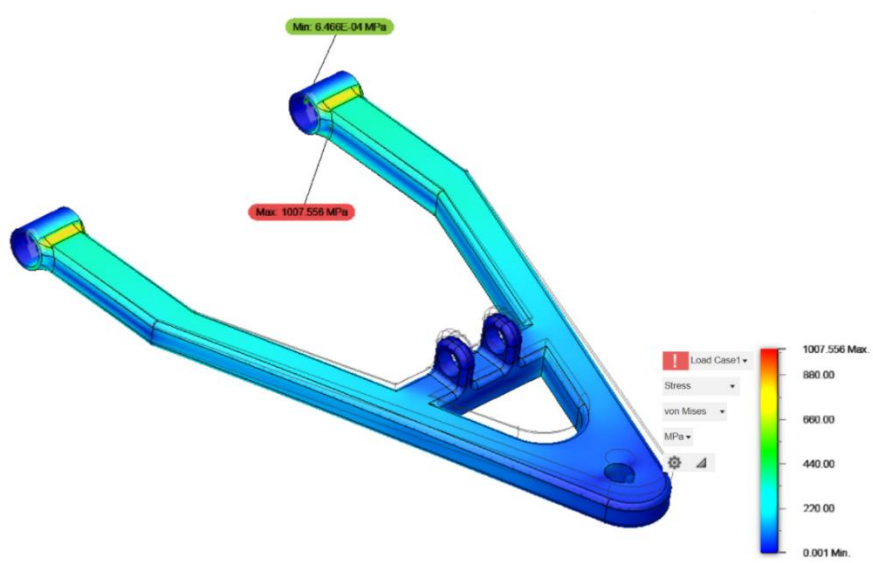
Στην συνέχεια, πρέπει να οριστεί το μέγεθος του φορτίου που θα φέρει το εξάρτημα καθώς και η θέση και ο προσανατολισμός του. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, το μέτρο της δύναμης για τις αναλύσεις και των δύο βραχιόνων ορίζεται στα 4000 N. Ο βραχίονας δέχεται την δύναμη στο κέντρο του άλλου άκρου του, στον σφαιρικό σύνδεσμο, εκεί που ενώνεται με το ακραζόνιο και έχει φορά προς τα κάτω.

4.4.1 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 1018

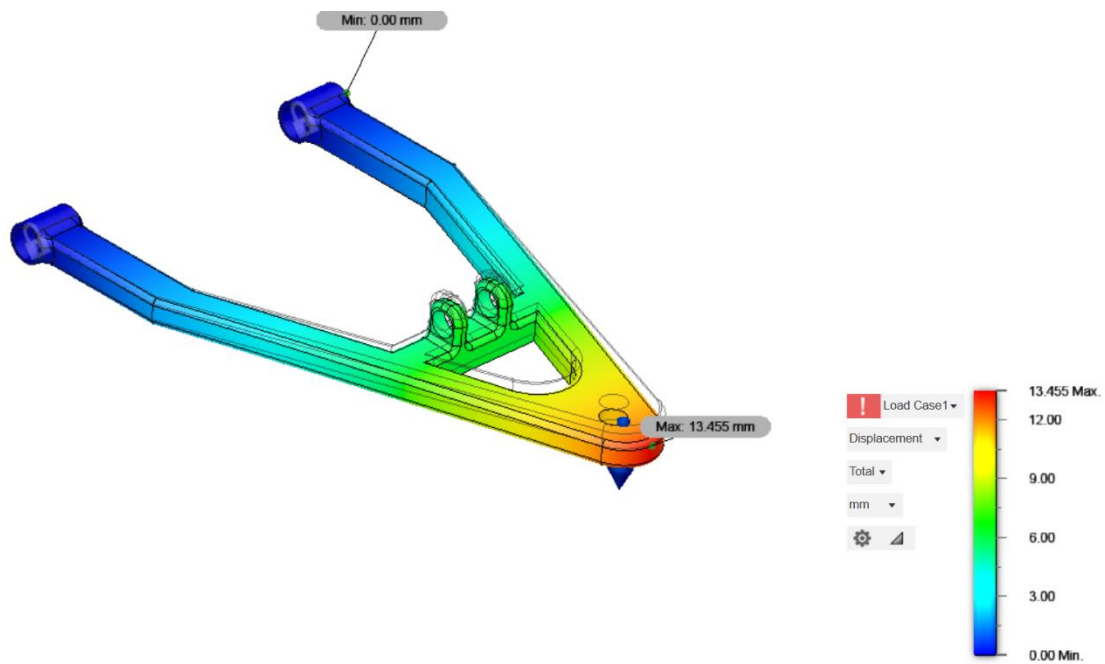


Εικόνα 40. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1018

Η αρχική ανάλυση γίνεται με το πιο απλό και λιγότερο δυνατό υλικό από τα τρία που επιλέξαμε, το AISI 1018. Μετά την ολοκλήρωση της επίλυσης της ανάλυσης, ο συντελεστής ασφαλείας βρέθηκε ότι είναι 0,28, η ισοδύναμη αναπτυσσόμενη τάση 1007,5 MPa και η μέγιστη μετατόπιση είναι στα 13,5 mm. Μέσω του συντελεστή ασφαλείας και της ισοδύναμης τάσης μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία με το συγκεκριμένο υλικό δεν πρόκειται να αντέξει το φορτίο.

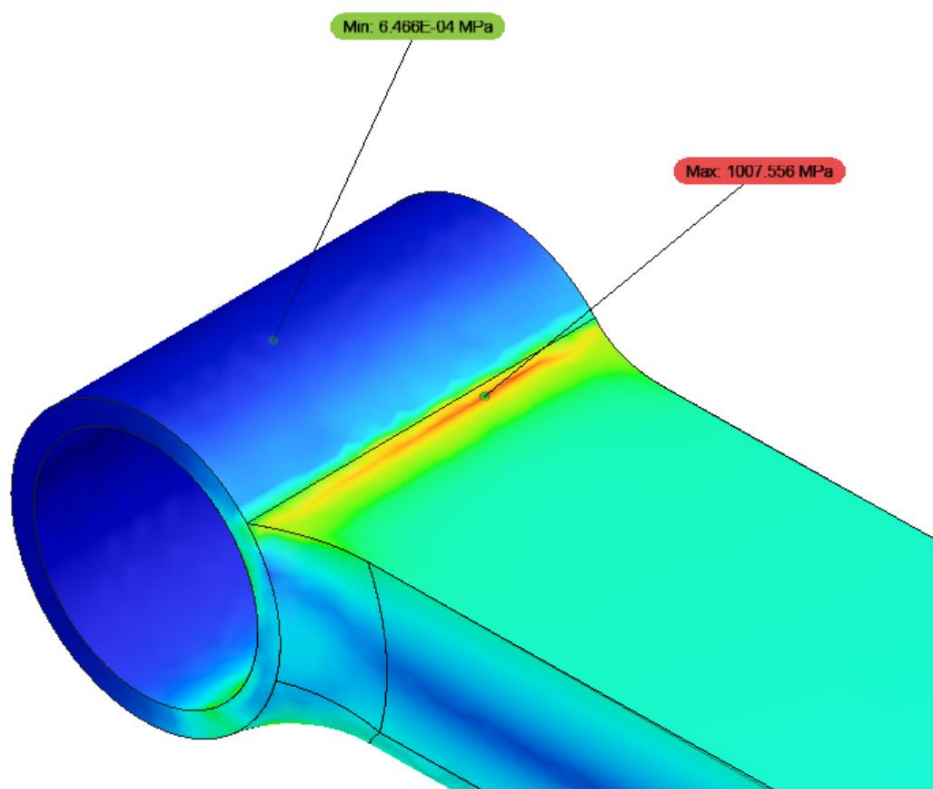


Εικόνα 41. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 σε MPa



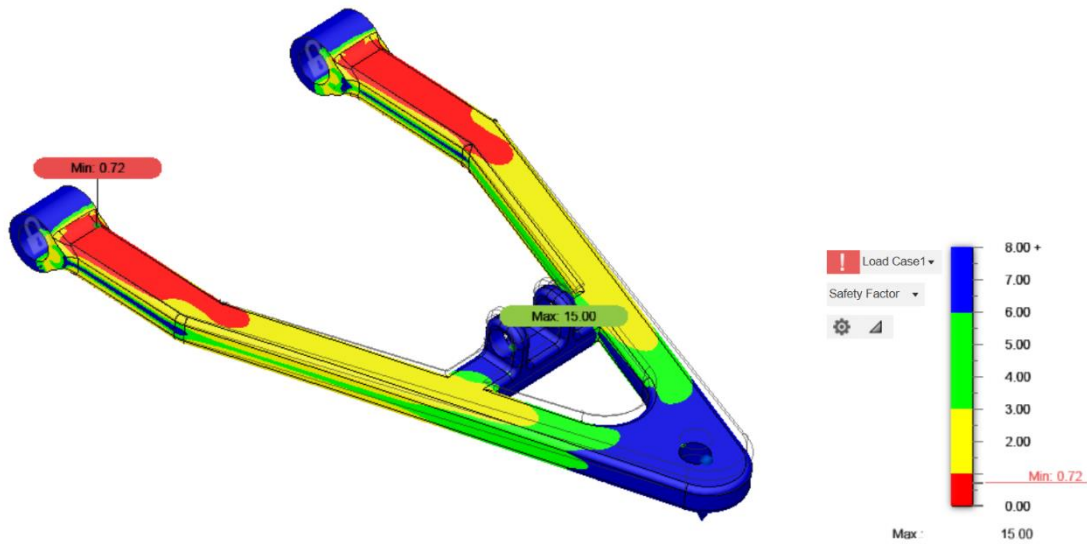
Εικόνα 42. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 σε mm

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, μπορούμε να εστιάσουμε στα σημεία που εμφανίζεται η μεγαλύτερη τάση και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας. Για να βελτιωθεί η συμπεριφορά του βραχίονα υπό την επίδραση αυτού του φορτίου μπορούμε να ενισχύσουμε αυτά τα σημεία με περισσότερο υλικό, αυξάνοντας την διάμετρο του άκρου.

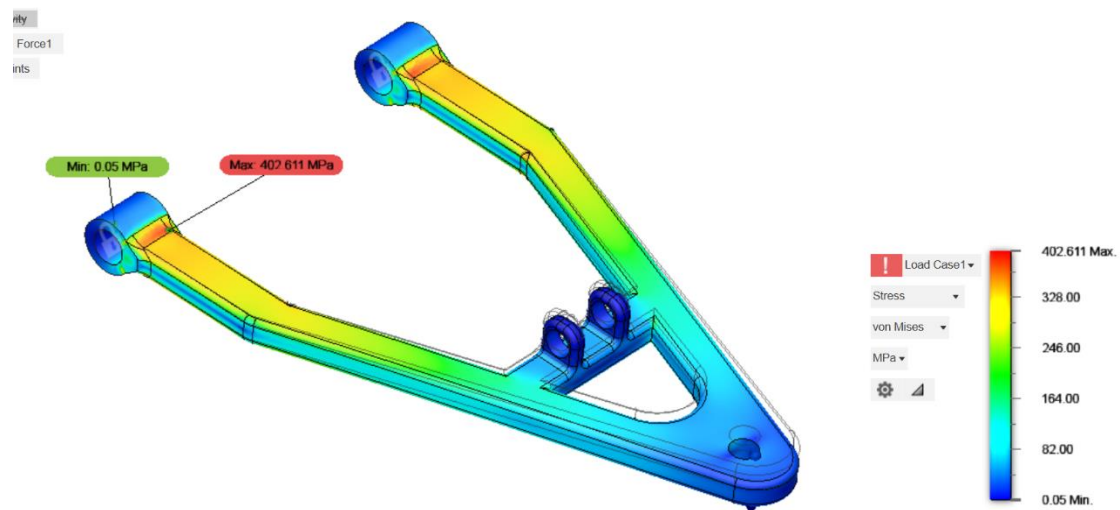


Εικόνα 43. Το ευάλωτο σημείο όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων

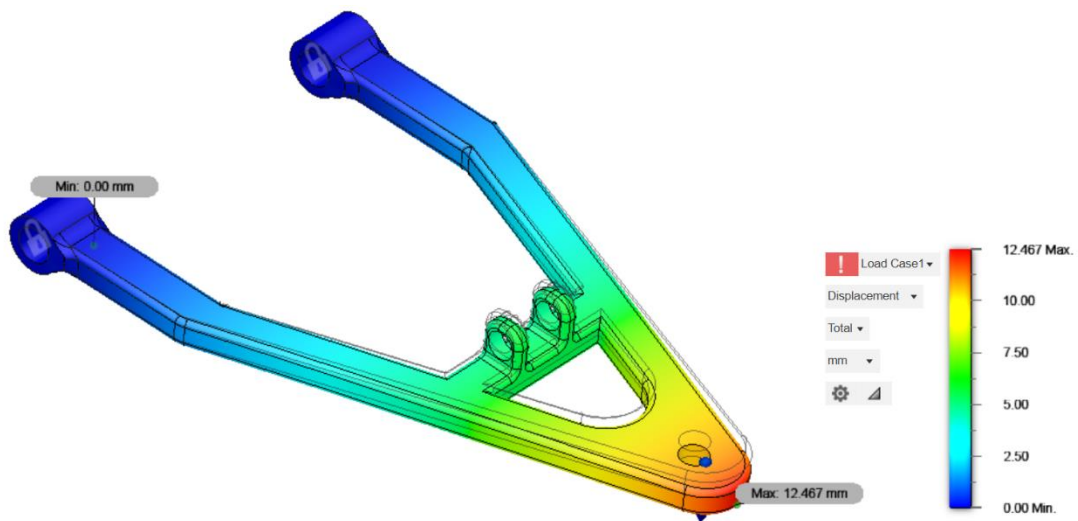
Έπειτα από την ενίσχυση του άκρου του βραχίονα, επιλύεται ξανά η ανάλυση με τις ίδιες οριακές συνθήκες. Η συμπεριφορά του βραχίονα βελτιώθηκε εμφανώς, ο συντελεστής ασφαλείας ανέβηκε στο 0,72, η ισοδύναμη τάση 402 MPa και η μέγιστη μετατόπιση στα 12,5 mm.



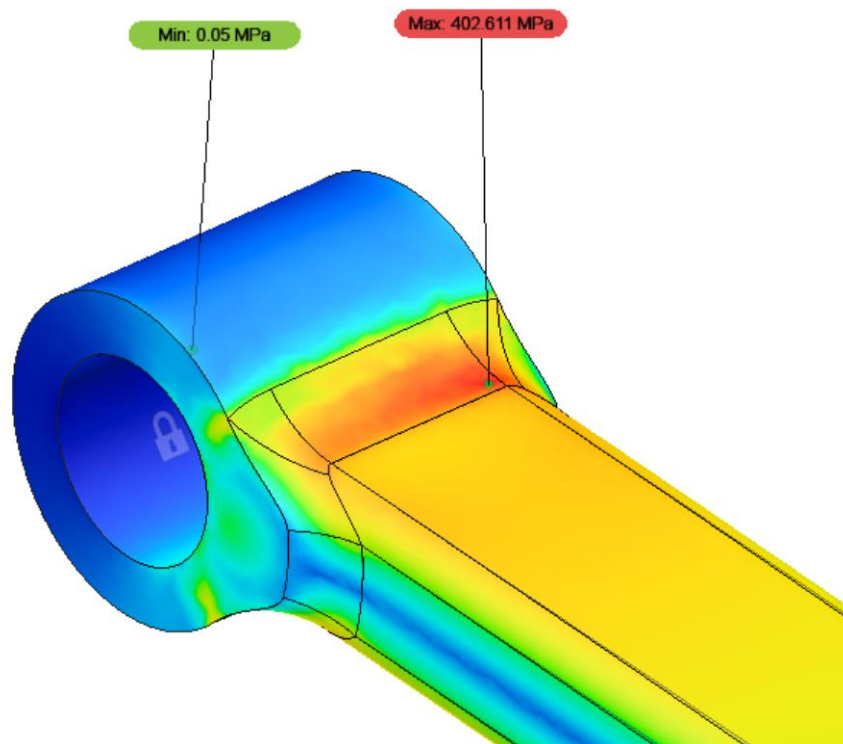
Εικόνα 44. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου



Εικόνα 45. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου



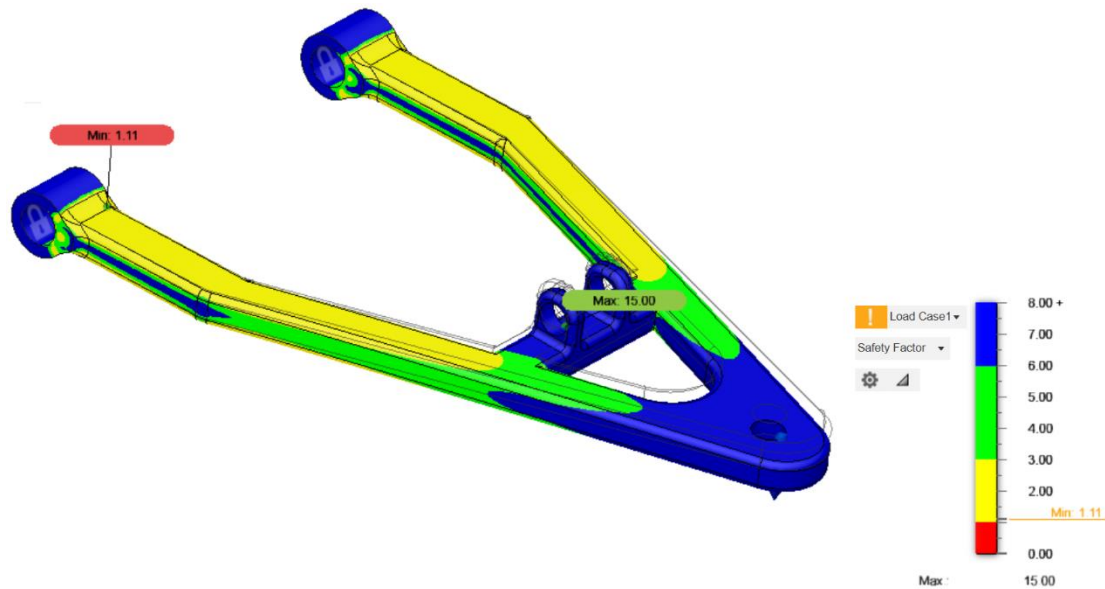
Εικόνα 46. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1018 σε mm μετά την ενίσχυση του ευάλωτου σημείου



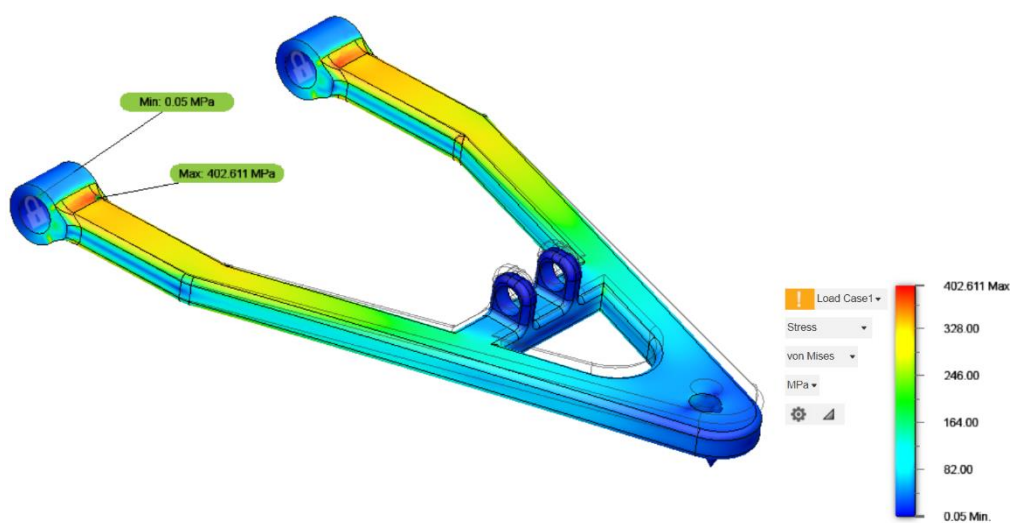
Εικόνα 47. Το ευάλωτο σημείο όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων μετά την ενίσχυση του

4.4.2 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 1541

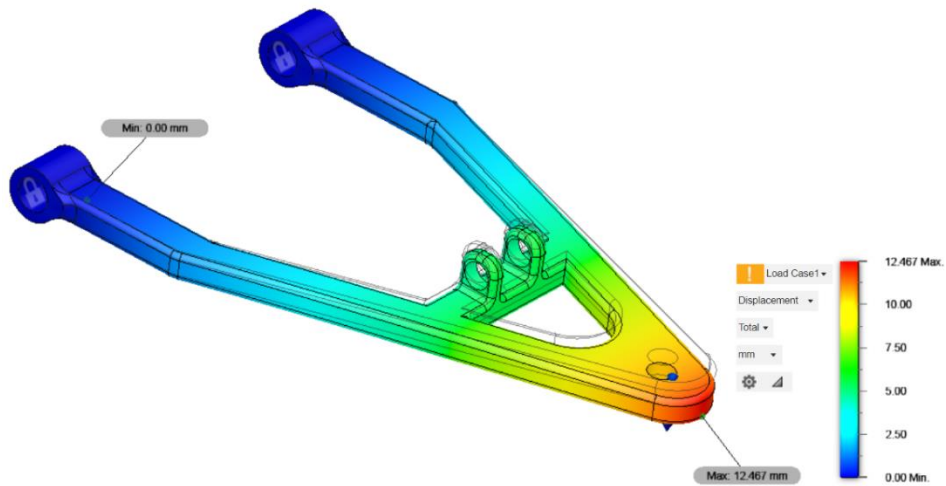
Ακόμα όμως και με αυτήν την βελτίωση στα άκρα του βραχίονα, το υλικό AISI 1018 δεν είναι επαρκές για να προσφέρει κατάλληλη ασφάλεια στο εξάρτημα. Έτσι, σειρά έχει η ανάλυση χρησιμοποιώντας σαν υλικό το κράμα χάλυβα AISI 1541, που είναι ένα κράμα δυνατότερο από το AISI 1018.



Εικόνα 48. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 1541



Εικόνα 49. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 1541 σε MPa



Εικόνα 50. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 1541 σε mm

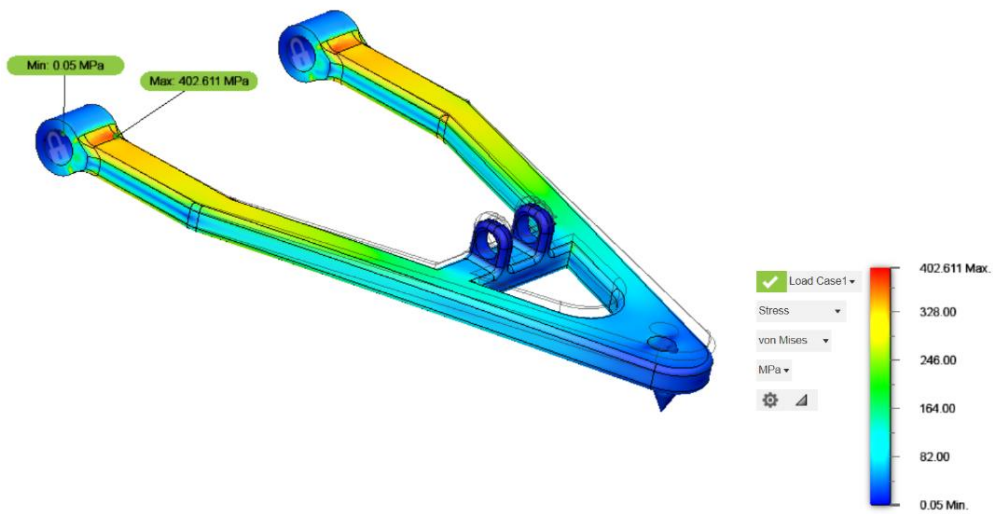
Η συμπεριφορά του εξαρτήματος με αυτό το υλικό είναι σαφώς πιο βελτιωμένη, με το συντελεστή ασφαλείας να είναι οριακά πάνω από την μονάδα. Η ισοδύναμη τάση είναι 402 MPa και η μέγιστη μετατόπιση βρέθηκε στα 12,5 mm.

4.4.3 Στατική ανάλυση κάτω βραχίονα με AISI 4130

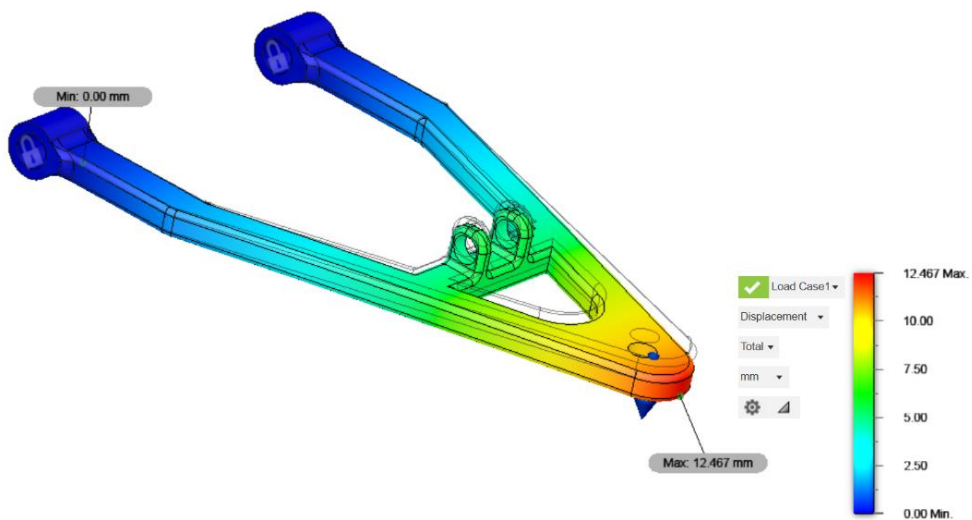
Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να είναι μεγαλύτερος της μονάδας όμως επειδή το εξάρτημα είναι κρίσιμο, είναι προτιμότερο να ξεπερνάει επαρκώς αυτό το όριο. Για αυτό το λόγο σειρά έχει η ανάλυση χρησιμοποιώντας σαν υλικό το κράμα χάλυβα AISI 4130 ή χρώμολη, ένας χαμηλής κραμάτωσης χάλυβας με υψηλή αντοχή.



Εικόνα 51. Ο συντελεστής ασφαλείας του κάτω βραχίονα με το AISI 4130



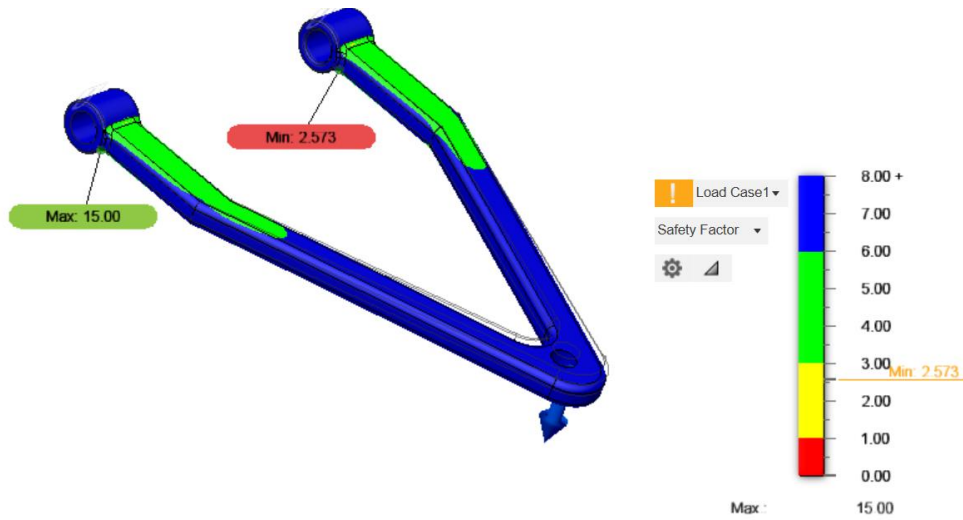
Εικόνα 52. Η ισοδύναμη τάση von Mises του κάτω βραχίονα με το AISI 4130



Εικόνα 53. Η παραμόρφωση του κάτω βραχίονα με το AISI 4130 σε mm

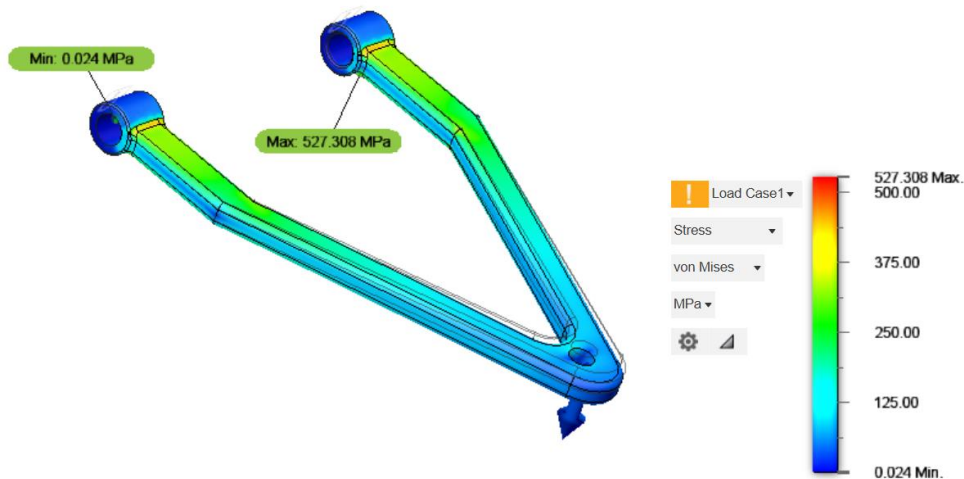
Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν και παρατηρώντας τον συντελεστή ασφαλείας συμπεραίνουμε ότι το συγκεκριμένο υλικό είναι σε θέση να προσφέρει την απαραίτητη στήριξη στο εξάρτημα. Για τον λόγο αυτό το ίδιο υλικό θα χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση του άνω βραχίονα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται παρακάτω.

4.4.4. Στατική ανάλυση άνω βραχίονα με AISI 4130

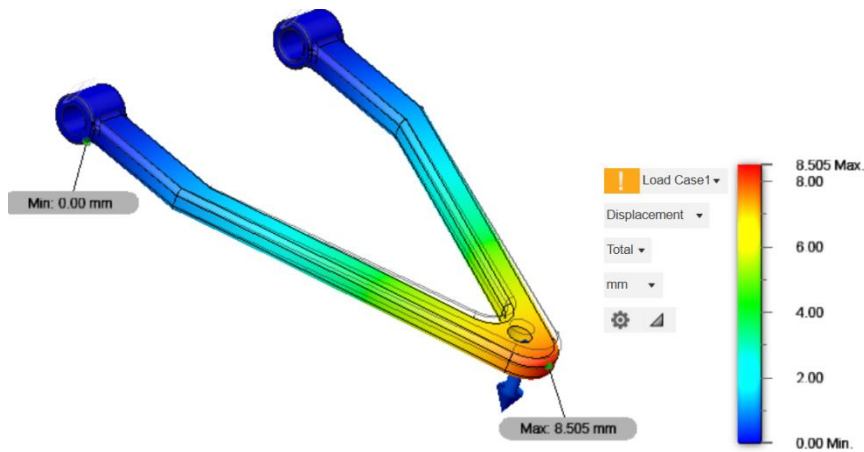


Εικόνα 54. Ο συντελεστής ασφαλείας του άνω βραχίονα με το AISI 4130

Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι από 2, που σημαίνει ότι καλύπτει επαρκώς την λειτουργία του εξαρτήματος.



Εικόνα 55. Η ισοδύναμη τάση von Mises του άνω βραχίονα με το AISI 4130 σε MPa



Εικόνα 56. Η παραμόρφωση του άνω βραχίονα με το AISI 4130 σε mm

4.5 Στατική ανάλυση ελατηρίου

Σε αυτή τη μελέτη, η προσομοίωση και η ανάλυση του σπειροειδούς ελατηρίου έγινε με διαφορετικά υλικά για να εξεταστεί η συμπεριφορά του ελατηρίου. Για την ανάλυση του ελατηρίου τα υλικά που επιλέγονται για να εξεταστούν είναι ο ανθρακούχος χάλυβας ASTM-A227, το κράμα χάλυβα με χρώμιο και βανάδιο AISI 6150 και το κράμα χάλυβα με χρώμιο και νικέλιο Inconel 713.



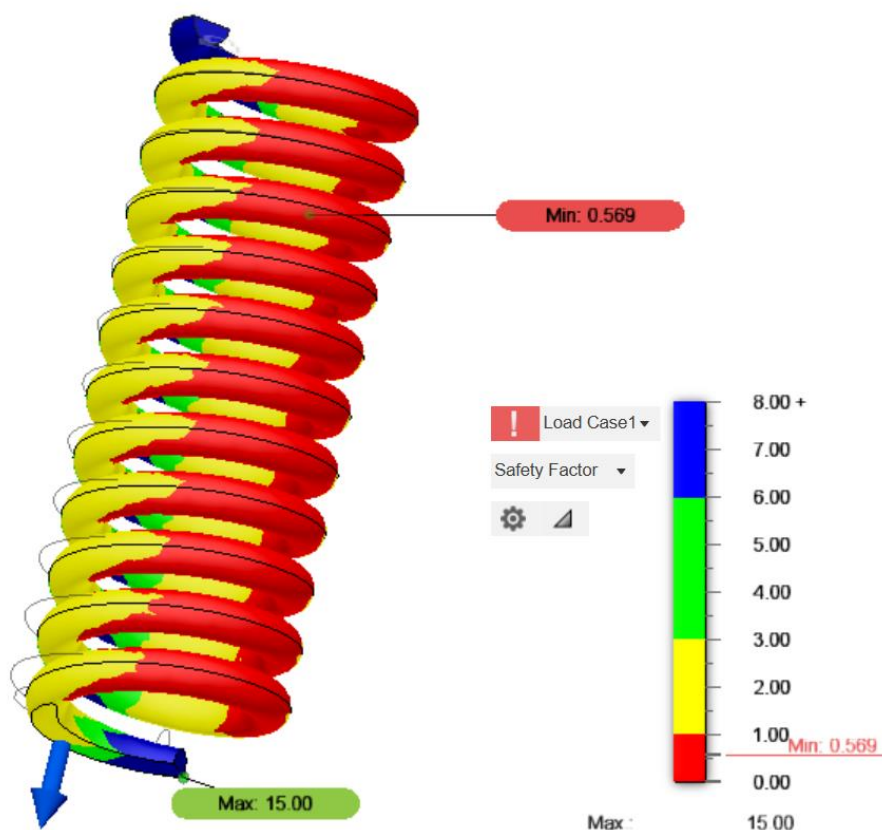
Εικόνα 57. Το υπολογιστικό πλέγμα για το ελικοειδές ελατήριο

Το ελατήριο στερεώθηκε στο κάτω άκρο και το φορτίο υποβλήθηκε στο πάνω άκρο με τιμή 4000 N . Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του ελατηρίου λαμβάνεται υπόψη η συνολική παραμόρφωση, τάση von Mises, και ο συντελεστής ασφαλείας. Η στατική ανάλυση έγινε στο περιβάλλον του Fusion 360 Static. Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από 70000 τετράεδρα κελιά.

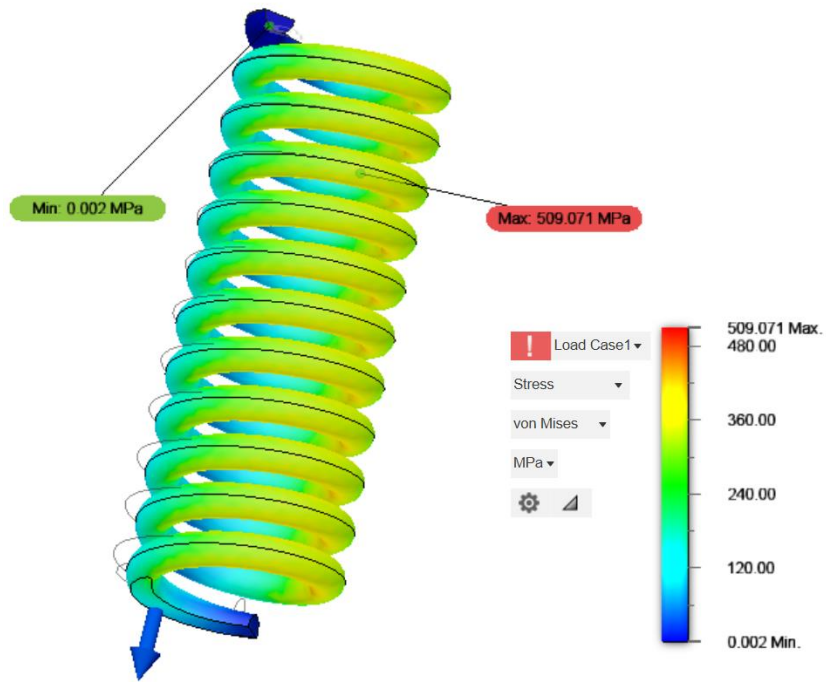
Η συνολική παραμόρφωση, η τάση σύμφωνα με τη θεωρία von – Mises, και ο συντελεστής ασφαλείας λήφθηκαν αριθμητικά για τα τρία υλικά με διάφορες τιμές φορτίου ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ τους και να επιλεγεί το καλύτερο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το ελατήριο.

4.5.1 Στατική ανάλυση ελατηρίου με ASTM-227

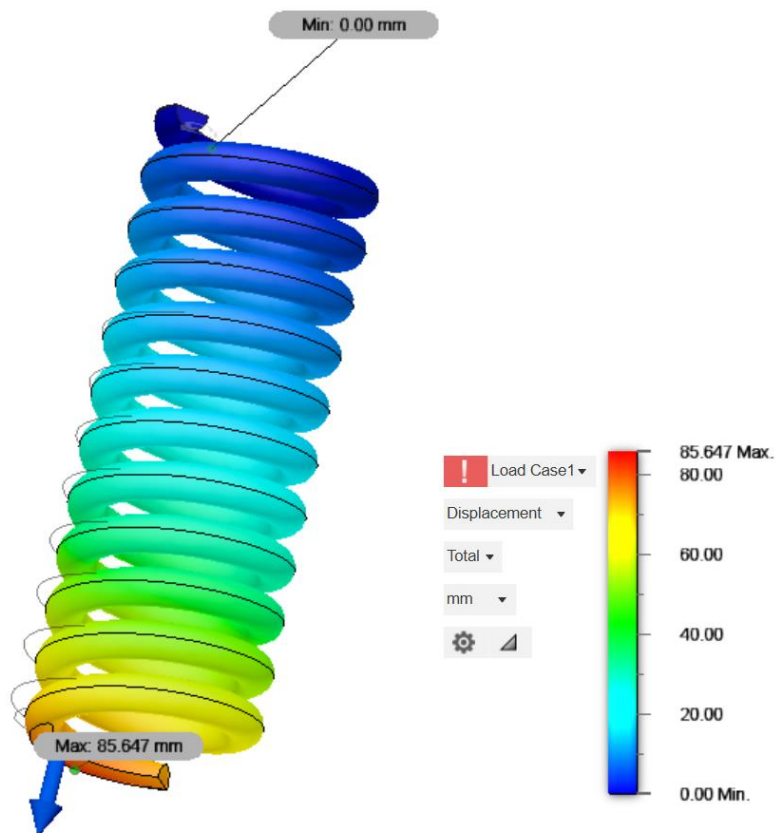
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έγινε με βάση τον ανθρακούχο χάλυβα ASTM-A227 [13].



Εικόνα 58. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με το ASTM-A227

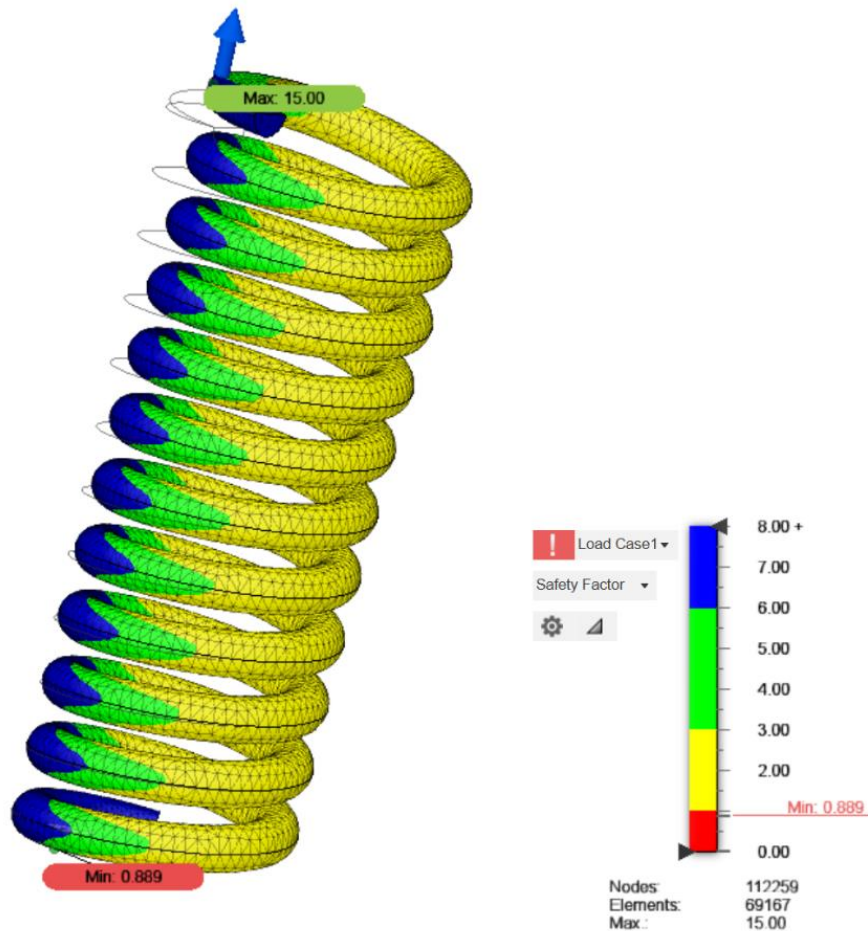


Εικόνα 5910. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το ASTM-A227 σε MPa



Εικόνα 60. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το ASTM-A227 σε mm

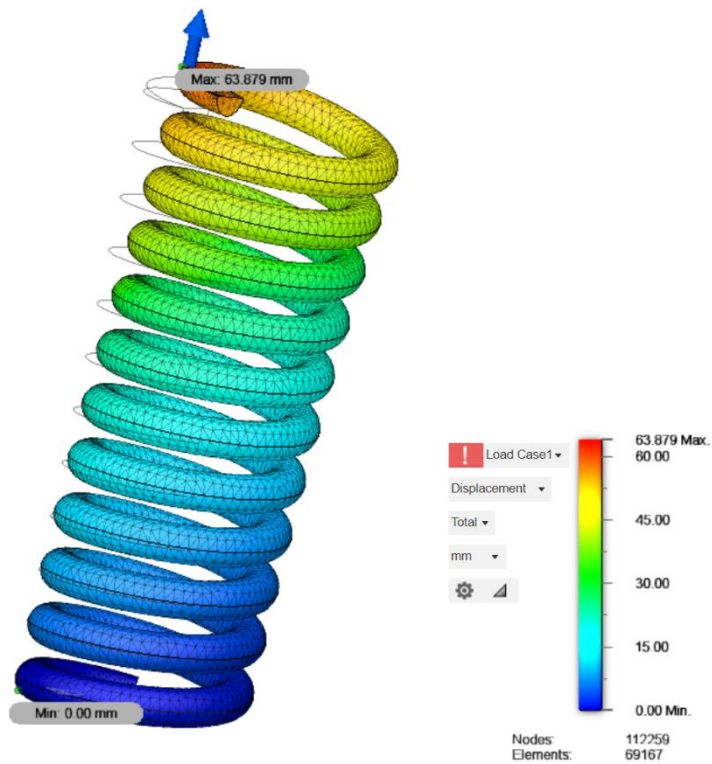
Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από την ανάλυση δείχνουν ότι η αναπτυσσόμενη τάση von Mises είναι 510 MPa, η παραμόρφωση στα 85 mm και ο συντελεστής ασφαλείας 0,55. Λόγο της χαμηλής τιμής του συντελεστή ασφαλείας, το συγκεκριμένο υλικό είναι ακατάλληλο για αυτή την περίπτωση.



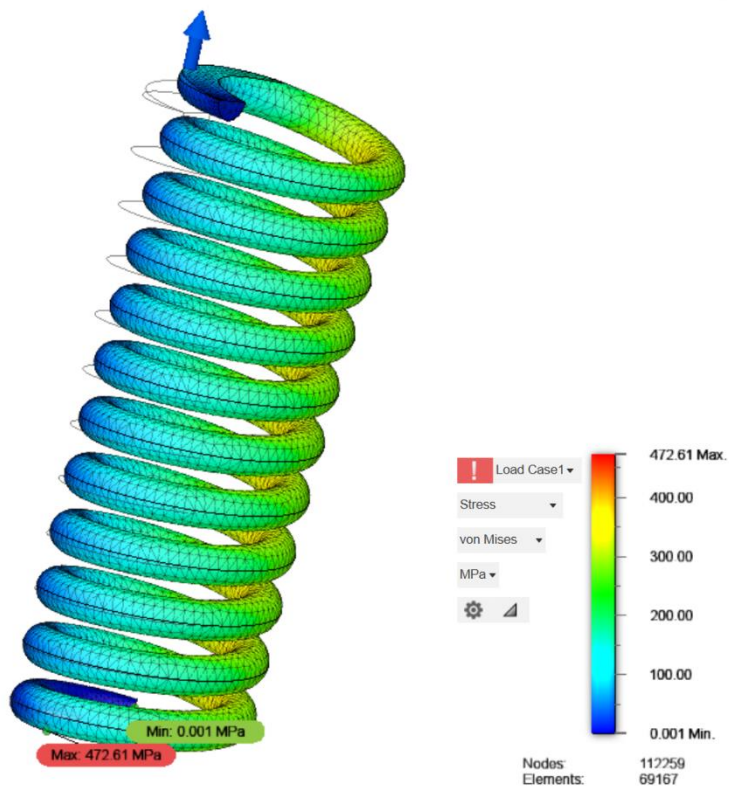
Εικόνα 61. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150

4.5.2 Στατική ανάλυση ελατηρίου με το AISI 6150

Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση δοκιμάζοντας το κράμα χάλυβα με χρώμιο και βανάδιο AISI 6150, που ενισχύει την ανθεκτικότητά του και την αντοχή στη φθορά, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές υψηλής καταπόνησης όπως τα ελατήρια ανάρτησης.

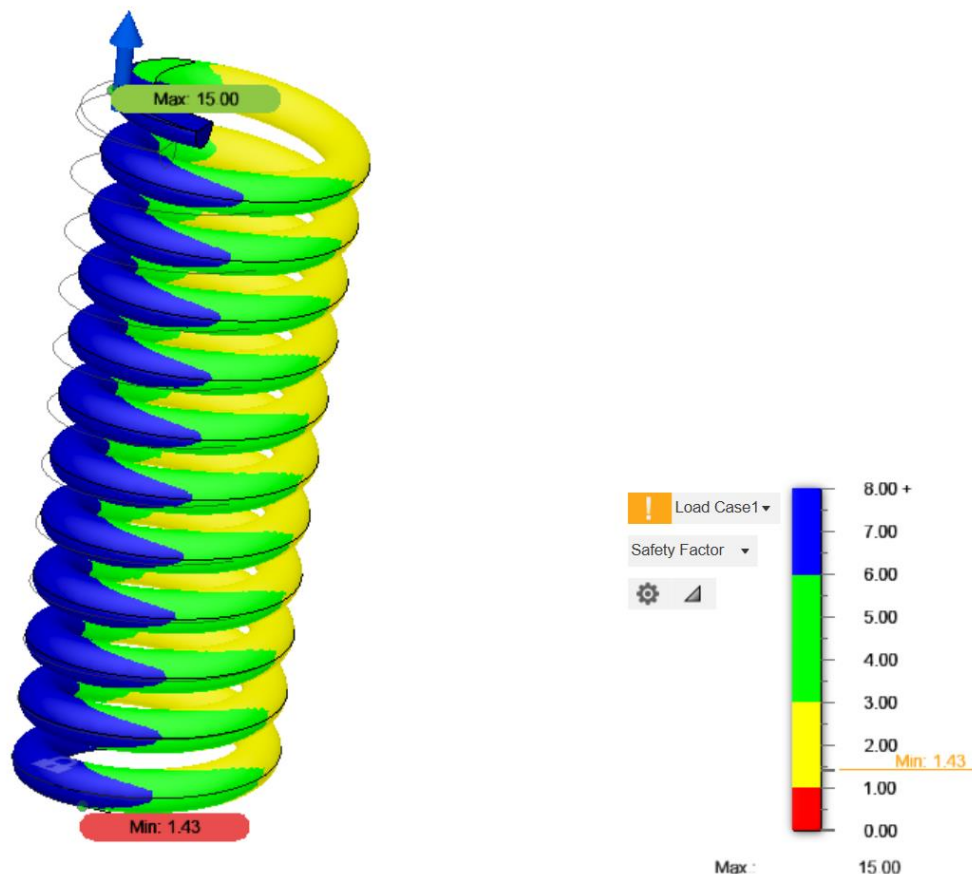


Εικόνα 62. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150 σε mm



Εικόνα 63. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το AISI 6150 σε MPa

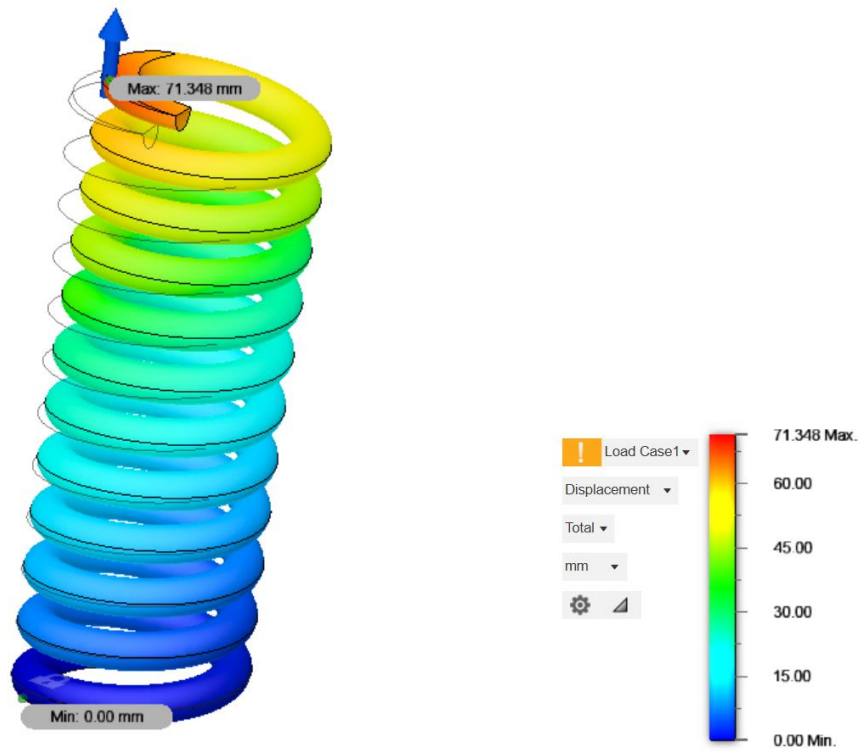
Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από την ανάλυση δείχνουν ότι η αναπτυσσόμενη τάση von Mises είναι 472 MPa, η παραμόρφωση στα 63 mm και ο συντελεστής ασφαλείας 0,9. Λόγω της χαμηλής τιμής του συντελεστή ασφαλείας, το συγκεκριμένο υλικό είναι ακατάλληλο για αυτή την περίπτωση.



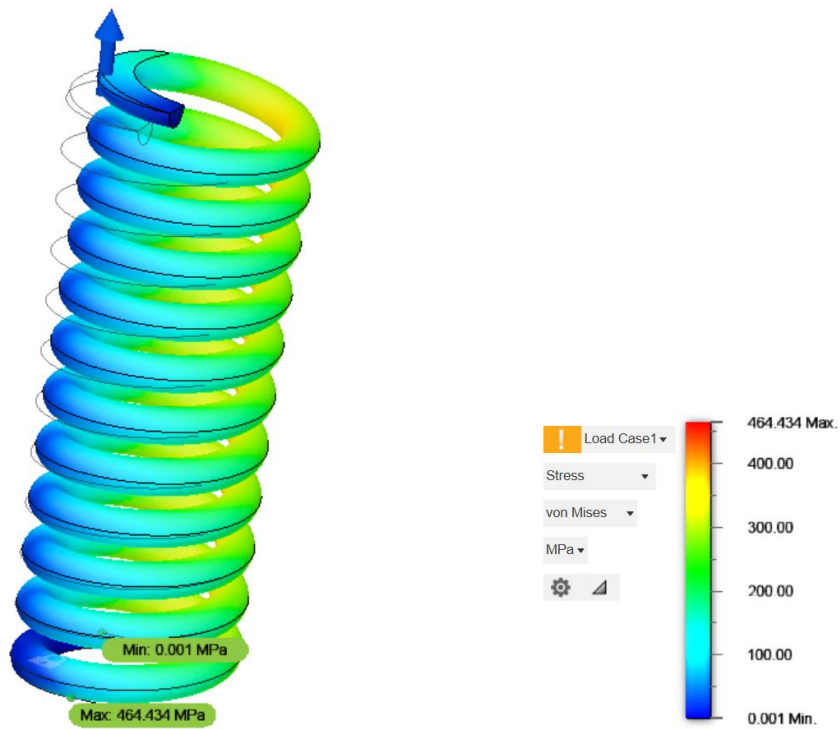
Εικόνα 64. Ο συντελεστής ασφαλείας του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713

4.5.3 Στατική ανάλυση ελατηρίου με το Inconel 713

Έπειτα, σειρά έχει η ανάλυση δοκιμάζοντας το κράμα χάλυβα με χρώμιο και νικέλιο Inconel 713, που λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και χρώμιο έχει υψηλή σκληρότητα. Επίσης έχει αντοχή στη φθορά καθώς και καλή αντοχή στη διάβρωση σε μη σοβαρές συνθήκες.



Εικόνα 65. Η παραμόρφωση του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713 σε mm



Εικόνα 66. Η ισοδύναμη τάση von Mises του ελικοειδούς ελατηρίου με το Inconel 713 σε MPa

Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από την ανάλυση δείχνουν ότι η αναπτυσσόμενη τάση von Mises είναι 464 MPa, η παραμόρφωση στα 72 mm και ο συντελεστής ασφαλείας 1,5. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι από την μονάδα, που σημαίνει ότι καλύπτει επαρκώς την λειτουργία του εξαρτήματος και έτσι σαν υλικο για το σπειροειδές ελατήριο της ανάρτησης επιλέγεται το κράμα χάλυβα με χρώμιο και νικέλιο Inconel 713.

5. Κινηματική και Δυναμική Ανάλυση Ανάρτησης

5.1 Δυναμική Ανάλυση

Η **Δυναμική Ανάλυση** αφορά την μελέτη της συμπεριφοράς μηχανικών συστημάτων που βρίσκονται υπό την επίδραση φορτίων που μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση καταστάσεων όπου η στατική ανάλυση δεν επαρκεί λόγω χρονικά εξαρτώμενων φαινομένων.

Η δυναμική ανάλυση είναι ουσιαστική για την κατανόηση και τον σχεδιασμό συστημάτων που υπόκεινται σε ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως στην περίπτωση του οχήματος τύπου buggy. Ενώ η στατική ανάλυση επικεντρώνεται σε συστήματα υπό σταθερές δυνάμεις, η δυναμική ανάλυση εισάγει μια πρόσθετη διάσταση μελετώντας την χρονική εξέλιξη των δυνάμεων και την αντίδραση του συστήματος σε αυτές.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, το **σύστημα ανάρτησης του buggy** αξιολογείται για να κατανοηθεί η απόκρισή του σε δυναμικά φορτία που προκύπτουν όταν το όχημα περνάει πάνω από ένα εμπόδιο. Το buggy κινείται συχνά σε ανώμαλα εδάφη όπου τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς. Η δυναμική ανάλυση βοηθά στη μελέτη της απόκρισης του συστήματος ανάρτησης σε τέτοιες μεταβαλλόμενες συνθήκες. Στόχος είναι να εξεταστούν οι παραμορφώσεις, οι τάσεις και η σταθερότητα των τροχών και των αμορτισέρ κατά την κίνηση.

5.1 Μελέτη περίπτωσης: Εμπόδιο

Η προσομοίωση επικεντρώνεται στη συμπεριφορά του συστήματος ανάρτησης όταν το buggy συναντήσει ένα εμπόδιο, αναλύοντας πώς οι δυνάμεις που ασκούνται επηρεάζουν την απόδοση του οχήματος, την αντοχή των δομικών του στοιχείων και την κινηματική των τροχών. Οι περιπτώσεις που μπορούμε να διακρίνουμε είναι οι εξής:

- Ακανόνιστο Εμπόδιο: Σκληρό, ακίνητο αντικείμενο που μεταφέρει απότομο και εστιασμένο φορτίο στον τροχό, όπως π.χ. μια πέτρα ή ένας βράχος
- Κυματισμός στο Έδαφος: Ομαλές ή ξαφνικές αυξομειώσεις στο ύψος του εδάφους που επηρεάζουν την απόσβεση και τη σταθερότητα.
- Άλμα από Ράμπα: Δύναμη πρόσκρουσης κατά την προσγείωση που θέτει σε κίνδυνο την ακεραιότητα των εξαρτημάτων της ανάρτησης.

Σε αυτήν την ανάλυση θα υποθέσουμε ότι το buggy περνάει από ένα εμπόδιο. Τα εμπόδια, όπως μια ακανόνιστη πέτρα, επιβαρύνουν το σύστημα ανάρτησης με απότομα φορτία, δημιουργώντας πολύπλοκες καταστάσεις δυναμικής απόκρισης που απαιτούν λεπτομερή ανάλυση για την αποφυγή αστοχιών. Η προσομοίωση εξετάζει πως θα κινηθεί ο τροχός και πώς το φορτίο μεταφέρεται μέσω του τροχού στο σύστημα ανάρτησης, προκαλώντας παραμορφώσεις και συγκεντρωμένες τάσεις σε κρίσιμα σημεία, όπως το ελατήριο, το αμορτισέρ και το βραχίονα ανάρτησης.

Η ανάλυση βοηθά να εντοπιστούν περιοχές με υψηλό ρίσκο αστοχίας και να σχεδιαστούν λύσεις, όπως ενισχυμένα υλικά ή αποσβεστικοί μηχανισμοί.

Χαρακτηριστικά Δύναμης από το Εμπόδιο:

- Η δύναμη **3000 N** που εφαρμόζεται αντιπροσωπεύει το φορτίο κατά την επαφή του εμπόδιου με τον τροχό. Αυτή η τιμή είναι προσαρμοσμένη για να προσομοιώσει ένα σενάριο μέτριας έντασης σε ένα περιβάλλον εκτός δρόμου.
- **Χρονική Εξέλιξη:** Η πρόσκρουση διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα (μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου), αλλά η ενέργεια που μεταφέρεται είναι σημαντική.

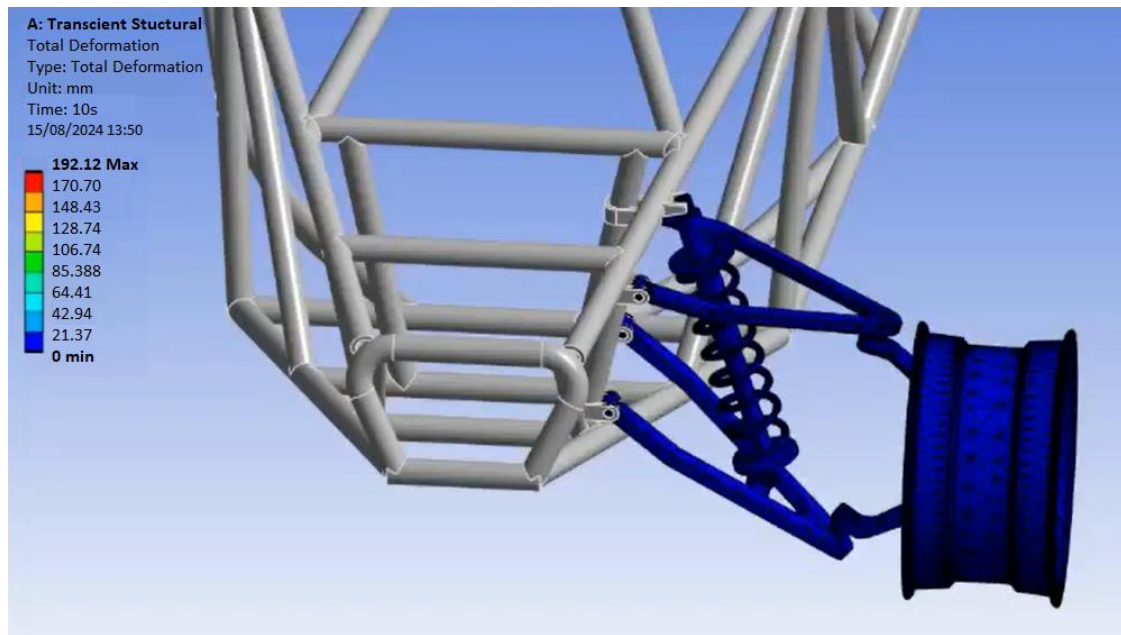
5.2 ANSYS Transient Structural Analysis

Για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγεται το λογισμικό ANSYS που παρέχει το κατάλληλο περιβάλλον για την εκτέλεση της δυναμικής και κινηματικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, το **ANSYS Transient Structural Analysis** είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο ανάλυσης που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της χρονικά εξαρτώμενης συμπεριφοράς μηχανικών συστημάτων. Παρέχει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε και να αξιολογήσουμε φαινόμενα όπως:

- **Εφαρμογή Δυνάμεων ή Ροπών:** Προσομοίωση της επίδρασης δυναμικών φορτίων, όπως κρούσεων ή επαναλαμβανόμενων φορτίσεων.
- **Παραμόρφωση και Τάσεις σε Στοιχεία:** Κατανομή της τάσης και της παραμόρφωσης σε κρίσιμες γεωμετρικές περιοχές.
- **Επαναλαμβανόμενες Κυκλικές Φορτίσεις:** Ανάλυση της ανθεκτικότητας υλικών υπό κόπωση.
- **Ενσωμάτωση με Πραγματικά Δεδομένα:** Δυνατότητα χρήσης δεδομένων από αισθητήρες ή φυσικές δοκιμές για τη δημιουργία πιο ρεαλιστικών προσομοιώσεων.

Πλεονεκτήματα του ANSYS Transient Structural:

- **Ακρίβεια Προσομοιώσεων:** Υπολογίζει ακριβώς τις χρονικές εξαρτήσεις και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ στοιχείων.
- **Εξοικονόμηση Κόστους:** Επιτρέπει την ανάλυση χωρίς την ανάγκη φυσικών δοκιμών.
- **Επικύρωση Σχεδιασμού:** Εντοπίζει πιθανά σημεία αστοχίας πριν από την κατασκευή.

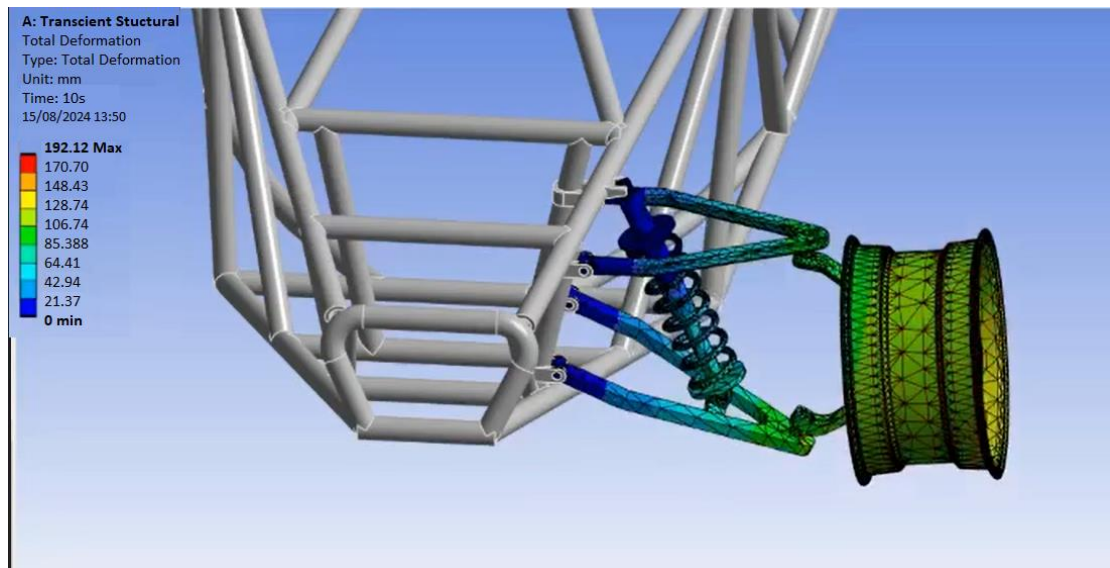


Εικόνα 67. Πρώτη Επαφή με το Εμπόδιο (αρχική θέση)

Ο τροχός αρχίζει να έρχεται σε επαφή με την κορυφή της πέτρας. Το κάτω μέρος του ελαστικού συμπιέζεται λόγω της πίεσης από το εμπόδιο.

Η πίεση μεταφέρεται μέσω του άξονα του τροχού προς την ανάρτηση. Η αρχική δύναμη είναι συγκεντρωμένη και απότομη.

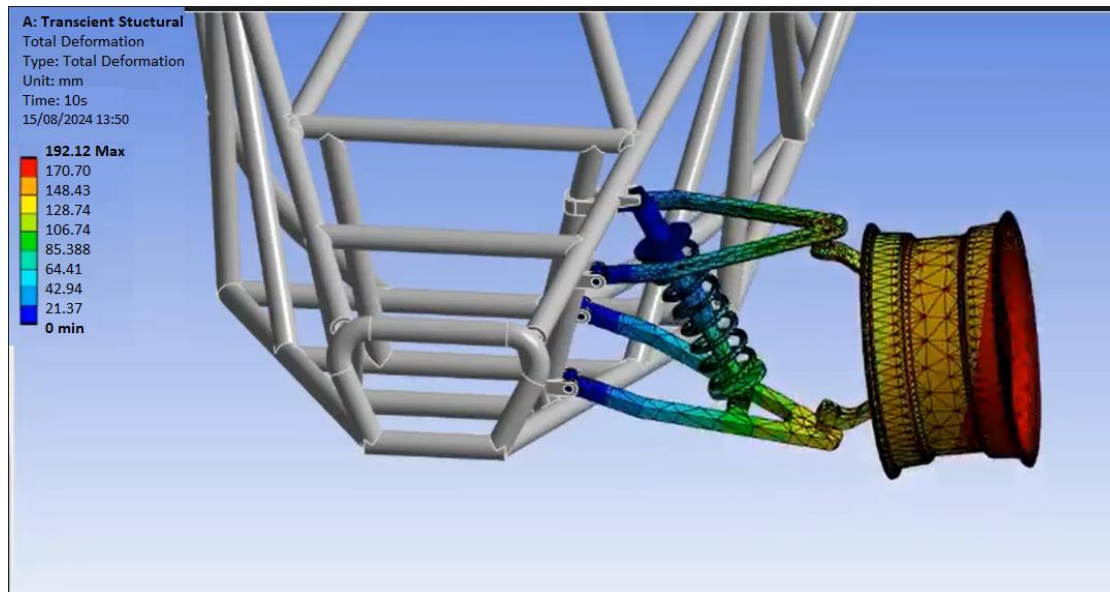
Το ελαστικό απορροφά ένα μικρό μέρος της ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο περνάει στη δομή του τροχού και στον άξονα. Ξεκινά η ενεργοποίηση της ανάρτησης.



Εικόνα 68. Ανύψωση του τροχού

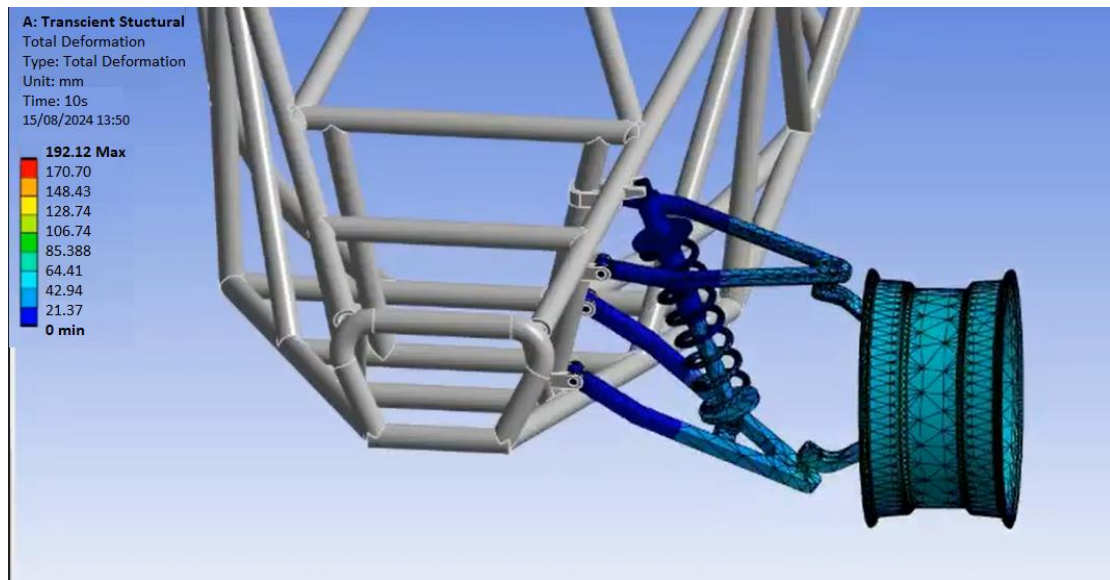
Ο τροχός ανυψώνεται καθώς κινείται πάνω από την επιφάνεια της πέτρας. Το ελατήριο της ανάρτησης αρχίζει να συμπιέζεται λόγω της αυξανόμενης δύναμης που μεταφέρεται.

Η ανάρτηση βρίσκεται σε φάση απορρόφησης ενέργειας, με το αμορτισέρ να αντιστέκεται στην ταχεία κίνηση. Η επαφή του τροχού με το έδαφος μειώνεται.



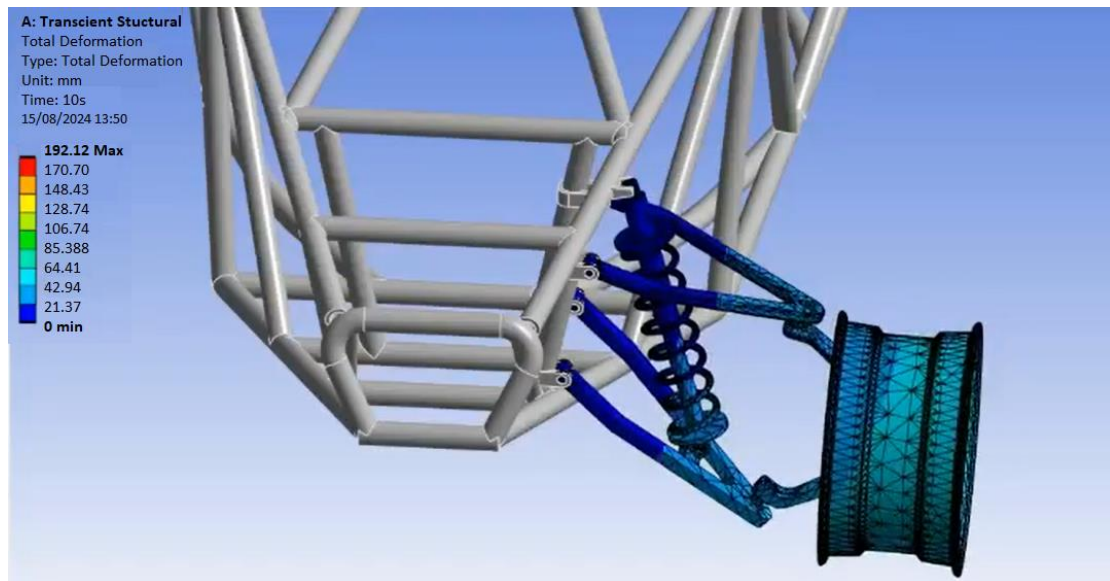
Εικόνα 69. Μέγιστη ανύψωση του τροχού

Ο τροχός φτάνει στην κορυφή της πέτρας, όπου η δύναμη συμπίεσης του ελατηρίου και το φορτίο του συστήματος ανάρτησης είναι στο μέγιστο. Ο συνδυασμός των δυνάμεων συμπίεσης (ελατήριο) και αντίστασης (αμορτισέρ) διαχειρίζεται την αιχμή του φορτίου. Η ενέργεια απορροφάται από την ανάρτηση και το αμορτισέρ.

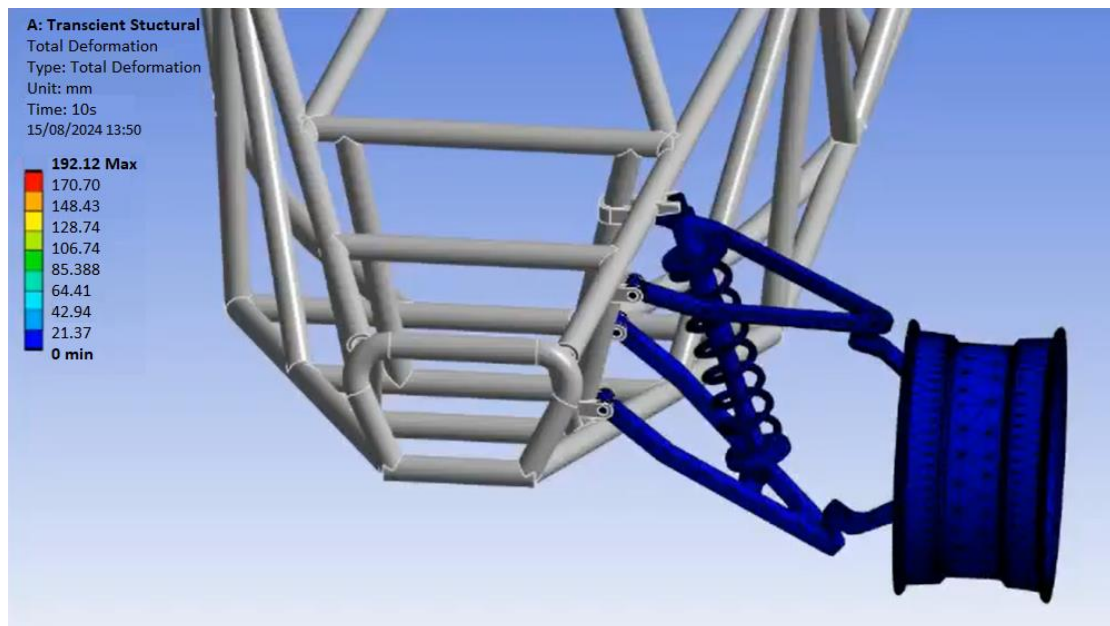


Εικόνα 70. Επαναφορά του τροχού

Ο τροχός αρχίζει να κατεβαίνει από την άλλη πλευρά της πέτρας. Το ελατήριο επεκτείνεται καθώς το φορτίο μειώνεται, ενώ το αμορτισέρ περιορίζει την ταχύτητα επαναφοράς.



Εικόνα 71. Μέγιστη επαναφορά του τροχού



Εικόνα 72. Επιστροφή στην αρχική θέση

Ο τροχός έχει επανέλθει πλήρως στην αρχική του θέση, ενώ το σύστημα ανάρτησης έχει απορροφήσει τυχόν υπολειμματική ενέργεια από το εμπόδιο.

Το αμορτισέρ αποσβένει τις τελικές ταλαντώσεις, αποτρέποντας την επιστροφή της ενέργειας στο πλαίσιο. Το όχημα βρίσκεται ξανά σε ισορροπία. Η απόκριση της ανάρτησης ολοκληρώνεται επιτυχώς, εξασφαλίζοντας την άνεση του οδηγού και την ασφάλεια του οχήματος.

Στην παρούσα μελέτη, διασφαλίζεται ότι η ανάρτηση του buggy μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια της κρούσης από το εμπόδιο και να επανέλθει στην αρχική της θέση.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην κινηματική και δυναμική ανάλυση καθώς και στη σχεδίαση ενός **buggy** με στόχο την επίτευξη υψηλών επιδόσεων, ανθεκτικότητας και αξιοπιστίας σε απαιτητικές εκτός δρόμου συνθήκες. Βασικό μέρος της μελέτης αποτέλεσε η ακριβής σχεδίαση του συστήματος ανάρτησης, του πλαισίου, των ελαστικών καθώς και η επιλογή των κατάλληλων υλικών για τα διάφορα μηχανικά μέρη της ανάρτησης του buggy.

Ένα όχημα Buggy πρέπει να έχει μια ανάρτηση που να εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- **Βελτίωση Σταθερότητας και Πρόσφυσης:**

Διατηρεί τους τροχούς κάθετα στο έδαφος κατά την κίνηση, αυξάνοντας την πρόσφυση και εξασφαλίζοντας σταθερή επαφή με το οδόστρωμα.

- **Ακριβής Έλεγχος Γωνιών Τροχού:**

Επιτρέπει τη ρύθμιση των γωνιών κάμπερ και σύγκλισης, βελτιώνοντας την απόδοση των ελαστικών και μειώνοντας τη φθορά τους.

- **Απορρόφηση Κραδασμών και Αντοχή σε Κρούσεις:**

Απορροφά τις ανωμαλίες του εδάφους και διανέμει τις καταπονήσεις, εξασφαλίζοντας ομαλή οδήγηση και προστασία του πλαισίου.

- **Αντοχή σε Υψηλές Ταχύτητες και Off-Road Συνθήκες:**

Παρέχει μεγαλύτερη σταθερότητα και έλεγχο σε ανώμαλα εδάφη και υψηλές ταχύτητες, κάνοντας την ιδανική για οχήματα υψηλών επιδόσεων και off-road.

- **Ελαχιστοποίηση Πλευρικών Κινήσεων:**

Μειώνει τις ανεπιθύμητες πλευρικές κινήσεις του τροχού, βοηθώντας στη διατήρηση της κατευθυντικής σταθερότητας και της ευελιξίας του οχήματος.

Η διαδικασία ξεκίνησε με τον καθορισμό των απαιτήσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας (off-road), τις μηχανικές καταπονήσεις και την ανάγκη για ελαφρύ αλλά ανθεκτικό πλαίσιο. Το πλαίσιο του οχήματος είναι ένα χωροδικτύωμα κοίλων δοκών και σχεδιάστηκε με γνώμονα τη **μείωση βάρους**, χωρίς να θυσιάζεται η ανθεκτικότητα και η ακαμψία. Η σχεδίαση του οριοθέτησε την βασική γεωμετρία του οχήματος στον χώρο και άρα επηρεάζει δραματικά την θέση και την συμπεριφορά της ανάρτησης.

Για τον ίδιο λόγο επιλέχθηκαν και σχεδιάστηκαν οι τροχοί του οχήματος (το ελαστικό σε συνδυασμό με την ζάντα), για να καθοριστούν: το μεταξόνιο, το μετατρόχιο και βασικές γεωμετρικές διαστάσεις. Ο ορισμός του τροχού είναι σημαντικός γιατί προσφέρει επίσης χρήσιμες πληροφορίες για τις συνθήκες κύλισης του οχήματος.

Ακόμα, σχεδιάστηκαν τα βασικά εξαρτήματα που απαρτίζουν το υποσύστημα της ανάρτησης, δηλαδή τον άνω και βραχίονα ελέγχου, τον βραχίονα σύνδεσης ή ακραζόνιο και το σπειροειδές ελατήριο.

Σχεδίαση και Ενσωμάτωση Συστήματος Ανάρτησης:

- Το σύστημα ανάρτησης σχεδιάστηκε με βάση τη γεωμετρία **διπλών ψαλιδιών**, που προσφέρει καλύτερο έλεγχο στις γωνίες κάμπερ και διατηρεί σταθερή την πρόσφυση.
- Τα αμορτισέρ και τα ελατήρια επιλέχθηκαν για να παρέχουν απορρόφηση κραδασμών και ευελιξία στις αναπηδήσεις.

Τα βασικά μέρη μιας **ανάρτησης με διπλά ψαλίδια** περιλαμβάνουν:

❖ Άνω και Κάτω Βραχίονες (Ψαλίδια):

- Δύο βραχίονες που συνδέονται με τον άξονα του τροχού και το πλαίσιο του οχήματος.
- Σκοπός τους είναι η σταθερή κίνηση του τροχού, διατηρώντας τον κάθετο στο έδαφος και παρέχοντας έλεγχο στις γωνίες κάμπερ.

❖ Σπειροειδές Ελατήριο:

- Τοποθετημένα μεταξύ πλαισίου και βραχιόνων για απορρόφηση κραδασμών.
- Βοηθούν στη διαχείριση των καταπονήσεων από ανώμαλες επιφάνειες και βελτιώνουν την άνεση και τη σταθερότητα.

❖ Ακραζόνιο:

- Συνδέει τους βραχίονες και τον τροχό, επιτρέποντας την κίνηση του τροχού.
- Μεταφέρει τις δυνάμεις του δρόμου στους βραχίονες και την ανάρτηση

Το σύστημα ανάρτησης σχεδιάστηκε με γνώμονα την απόσβεση κραδασμών και τη βελτίωση της σταθερότητας του οχήματος σε ανώμαλες επιφάνειες. Για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας, υπολογιστήκαν τα αναπτυσσόμενα φορτία. Με βάση αυτά έγιναν προσομοιώσεις στο κατάλληλο υπολογιστικό περιβάλλον της Fusion 360 που αφορούσαν τις φορτίσεις των εξαρτημάτων.

Υπολογιστική Στατική Ανάλυση:

- Πραγματοποιήθηκε **FEA (Finite Element Analysis)** για την ανάλυση των δυνάμεων που ασκούνται στο πλαίσιο και την αξιολόγηση της κατανομής φορτίων.

- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης βοήθησαν στον εντοπισμό περιοχών που χρειάζονταν ενίσχυση, ενώ επιβεβαίωσαν ότι το πλαίσιο πληροί τις απαιτήσεις για αντοχή και ακαμψία.

Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι το σύστημα ανάρτησης αντέχει τα φορτία που υπολογίστηκαν για διάφορες συνθήκες οδήγησης και απορροφά ικανοποιητικά τους κραδασμούς, προστατεύοντας τόσο το πλαίσιο όσο και τους επιβάτες.

Το κέντρο βάρους του οχήματος διατηρήθηκε χαμηλά για να βελτιώσει την ευστάθεια στις στροφές, ενώ η χρήση ειδικών αμορτισέρ εξασφαλίζει ότι το buggy παραμένει σε επαφή με το έδαφος ακόμα και σε ακραίες συνθήκες.

6.1 Σύγκριση και Αποτελέσματα

Για να εξεταστεί η αντοχή και η συμπεριφορά του συστήματος ανάρτησης που σχεδιάστηκε ήταν απαραίτητο να γίνουν ορισμένες στατικές αναλύσεις με βάση τα υπολογισμένα φορτία. Οι αναλύσεις αυτές περιλαμβάνουν τα βασικά εξαρτήματα που δέχονται τα σημαντικότερα και πιο κρίσιμα φορτία, όπως τους άνω και κάτω βραχίονες ελέγχου και το σπειροειδές ελατήριο. Οι στατικές αναλύσεις έγιναν στο κατάλληλο υπολογιστικό περιβάλλον του Fusion 360 της Autodesk.

Στη διαδικασία επιλογής των υλικών, λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως η αντοχή σε καταπονήσεις, η αντίσταση σε φθορά, η ευκολία κατασκευής και το κόστος. Τα υλικά που επιλέχθηκαν για να τους βραχίονες ελέγχου είναι το AISI 1018, AISI 1541 και το AISI 4130. Για καθένα από αυτά τα υλικά, έγινε η προσομοίωση με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, όπου βρέθηκε ότι το AISI 4130 έχει την καλύτερη συμπεριφορά και άρα επιλέγεται. Τα υλικά AISI 1018 και AISI 1541 δεν προσέφεραν την επαρκή αντοχή και τον απαραίτητο συντελεστή ασφαλείας για την συγκεκριμένη περίπτωση και απορρίφθηκαν.

Η χρήση του χρωμομολυβδαινιούχου χάλυβα επέτρεψε την κατασκευή ανθεκτικών αλλά εύκαμπτων βραχιόνων ανάρτησης, που αντέχουν σε ισχυρές καταπονήσεις χωρίς να αστοχήσουν. Χρησιμοποιήθηκε για τα τμήματα της ανάρτησης και τα σημεία που δέχονται μεγάλες φορτίσεις. Ο συγκεκριμένος χάλυβας προσφέρει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και κρούση, ενώ παράλληλα διατηρεί τη δυνατότητα συγκόλλησης και μηχανουργικής επεξεργασίας. Τα υλικά που επιλέχθηκαν να εξεταστούν για το ελατήριο είναι το ASTM-A227, AISI 6150 και το Inconel 713.

Η ανάλυση των τριών υλικών, ASTM-A227, AISI 6150, και Inconel 713, μας προσφέρει ουσιώδη συμπεράσματα για την καταλληλότητά τους σε εφαρμογές ανάρτησης υπό συνθήκες υψηλού φορτίου και καταπόνησης. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της τάσης von Mises, της παραμόρφωσης και του συντελεστή ασφάλειας αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στη μηχανική συμπεριφορά κάθε υλικού, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την επιλογή του κατάλληλου υλικού για την εν λόγω εφαρμογή. Η προσομοίωση που έγινε για καθένα από αυτά τα υλικά, με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες, βρέθηκε ότι το Inconel 713 έχει την καλύτερη συμπεριφορά και άρα επιλέγεται.

Όσον αφορά την κινηματική και δυναμική ανάλυση, η προσομοίωση έδειξε ότι το σύστημα ανάρτησης του buggy είναι ικανό να απορροφήσει ένα σημαντικό μέρος των δυνάμεων που μεταφέρονται από τα εμπόδια, μειώνοντας τις καταπονήσεις στο πλαίσιο.

Κατά τη διάρκεια της επαφής με το εμπόδιο, ο τροχός ακολουθεί μια συγκεκριμένη τροχιά που περιλαμβάνει στιγμιαία ανύψωση, συμπίεση της ανάρτησης, και αποκατάσταση στην αρχική θέση.

Η δυναμική ανάλυση έδειξε ότι οι δυνάμεις κατανέμονται άνισα μεταξύ των εξαρτημάτων της ανάρτησης, με τις μεγαλύτερες καταπονήσεις να εμφανίζονται στο σημείο σύνδεσης του τροχού με το σύστημα ανάρτησης.

Επιδράσεις στο Σύστημα Ανάρτησης:

- **Τάση στα Ψαλίδια:** Εντοπισμός των περιοχών όπου οι τάσεις είναι μεγαλύτερες από τα όρια αντοχής.
- **Απόκριση Αποσβεστήρα (Damper):** Μέτρηση της ικανότητας απορρόφησης της ενέργειας της κρούσης.
- **Ενίσχυση Δομής Σασί:** Η δύναμη που μεταφέρεται μέσω του συστήματος ανάρτησης μπορεί να προκαλέσει υπερβολικές καταπονήσεις στο σασί, καθιστώντας την ενίσχυση αναγκαία.

Μέσω της ανάλυσης η συνολική εικόνα της ανάλυσης γίνεται πιο κατανοητή, αναδεικνύοντας τη σημασία της για τον σχεδιασμό ενός ανθεκτικού και αποδοτικού συστήματος ανάρτησης για εκτός δρόμου οχήματα.

Συμπέρασμα για το Buggy

Συνολικά, η ανάλυση έδειξε ότι η επιλογή των υλικών και η σχεδίαση του συστήματος προσέφεραν ένα buggy το οποίο είναι ικανό να αντέξει σε απαιτητικές εκτός δρόμου συνθήκες, διατηρώντας παράλληλα την απόδοση και την αντοχή του. Ο συνδυασμός των υλικών όπως ο χρωμομολυβδαινιούχος χάλυβας 4130, και το Inconel 718, εξασφαλίζουν ότι το buggy είναι ελαφρύ, ανθεκτικό, και ικανό να αντεπεξέλθει στα μηχανικά φορτία.

Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της τάσης von Mises, της παραμόρφωσης και του συντελεστή ασφάλειας αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στη μηχανική συμπεριφορά κάθε υλικού, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την επιλογή του κατάλληλου υλικού για την εν λόγω εφαρμογή.

Οι προσομοιώσεις απέδειξαν ότι το όχημα μπορεί να αντιμετωπίσει δύσκολες συνθήκες, ενώ η χρήση ειδικών υλικών στις περιοχές υψηλών φορτίων και θερμοκρασιών βελτίωσε τη συνολική του απόδοση. Η μελέτη αυτή μπορεί να αποτελέσει βάση για περαιτέρω ανάπτυξη και βελτιώσεις σε μελλοντικά projects.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] B. Heiing, M.Ersoy, “*Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics*”, *Perspectives*, (2011), Deutsche Nationalbibliothek.
- [2] D. C. Barton, J. D. Fieldhouse, “*Automotive Chassis Engineering*”, (2018), Springer International Publishing.
- [3] J. Reimpell, H. Stoll, J.W. Betzler, “*The Automotive Chassis: Engineering Principles*”, (2002), Society of Automotive Engineers, Inc.
- [4] R. N. Jazar, “*Vehicle Dynamics: Theory and Application*“, (2008), Springer.
- [5] M. Guiggiani, “*The Science of Vehicle Dynamics: Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*”, (2018), Springer
- [6] J. Balkwill, “*Performance Vehicle Dynamics: Engineering & Applications*”, (2018), Department of Mechanical Engineering and Mathematical Sciences, Oxford Brookes University, Elsevier.
- [7] J. Happian-Smith, “*An Introduction to Modern Vehicle Design*”, (2002), Reed Educational and Professional Publishing.
- [8] A. Vashist, R. Kumar, “*Design and analysis of suspension system for an All-Terrain Vehicle*“, (2021), Indira Gandhi Delhi Technical University for Women, Department of Mechanical and Automation Engineering, Elsevier
- [9] P. Upadhyay et al, “*Design and analysis of double wishbone suspension system*“, (2021), Department of Mechanical Engineering, ABES Engineering College, Ghaziabad, India, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- [10] I. Hiremath¹, A. Nalawade, J. Patil “*Design and Development of Front Suspension System for an Off-Road Vehicle*” Student, (2020), Department of Automobile Engineering, Rajarambapu Institute of Technology, Sangli, India, International Journal of Research in Engineering, Science and Management Volume-3, Issue-7
- [11] R. Kumbhar et al, “*Design, Simulation and Analyzis of Double Wishbone Suspension System for an ATV*”, (2020), RMD Sinhgad School of Engineering, Maharashtra, India, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056
- [12] S. Shendge, “*Design and FEA Analysis of a Double Wishbone Suspension System*”, (2021), Department of Automobile Engineering at University of Wolverhampton, India, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) e-ISSN: 2395-0056
- [13] ASTM International. (2016). *Standard Specification for Steel Wire*, Music Spring Quality. ASTM A227/A227M.

- [14] R. Rajamani, “*Vehicle Dynamics and Control*”, (2006), University of Minnesota, USA, Springer.
- [15] J. C. Dixon, “*Suspension Geometry and Computation*”, (2009), Engineering Mechanics the Open University, Great Britain, Wiley.
- [16] G. Genta, L. Morello, “*The Automotive Chassis Vol. 1: Components Design*”, (2009), Politecnico di Torino, Springer Science Business Media B.V.
- [17] G. Genta, L. Morello, “*The Automotive Chassis Vol. 2: System Design*”, (2009), Politecnico di Torino, Springer Science Business Media B. V. n.
- [18] D. Schramm, M. Hiller, R. Bardini, “*Vehicle Dynamics Modeling and Simulation Second Edition*”, (2014), University Duisburg-Essen, Springer
- [19] H.B. Pacejka, “*Tyre and Vehicle Dynamics*”, (2002), Delft University of Technology, SAE International
- [20] D. Cebon, “*Handbook of vehicle-road interaction: vehicle dynamics, suspension design, and road damage*”, (1999), Swets & Zeitlinger B.V
- [21] V. Gaurav, “*Autodesk Fusion 360 (2nd Edition)*”, (2018), CAD/CAM/CAE WORKS, USA.
- [22] B. P. Wiegand, “*Mass Properties and Automotive: Lateral Acceleration*”, (2011), Presentation at the 70th Annual International Conference of the Society of Allied Weight Engineers, Inc., Houston, TX
- [23] B. P. Wiegand, “*Mass Properties and Automotive: Directional Stability*”, (2011), Presentation at the 80th SAWE International Conference on Mass Properties Engineering, Cocoa Beach, Florida, USA
- [24] Bengt Jacobson et al, “*Vehicle Dynamics Group, Division Vehicle and Autonomous Systems*”, (2019), Department Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers University of Technology, www.chalmers.se
- [25] D. Bestle and M. Beffinger. “*Design of progressive automotive shock absorbers*”, (2005), In Proc. of Multibody Dynamics, Madrid