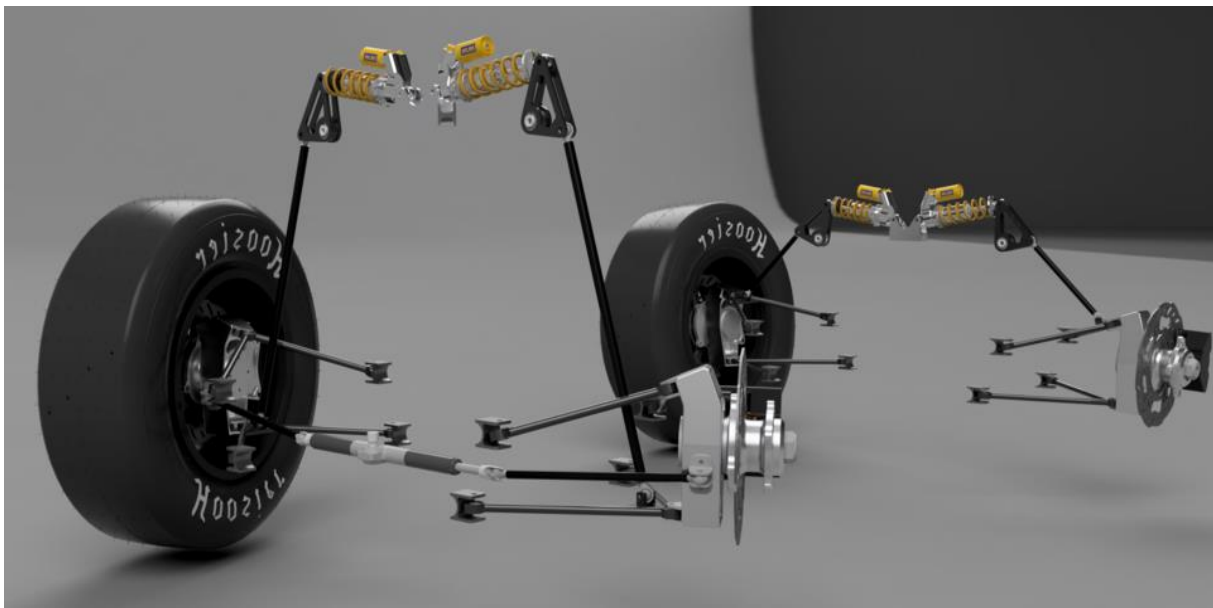




Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση Κινηματικής & Σχεδιασμού Συστήματος Ανάρτησης
Πρωτότυπου Αγωνιστικού Οχήματος



Μάριος Γεώργιος Μπαϊλός

Αριθμός Μητρώου: 1707509

Επιβλέπων: Θ. Γκορτσάς – Καθηγητής ΠΑΠΕΛ

ΠΑΤΡΑ 2022

Cover Photo:

©Fredrik Lie Larsen

“In automotive design a straight line is the most awkward path to follow between two points.”

Maurice Olley

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο να συνεισφέρει στον εμπλουτισμό της ελληνικής υπάρχουσας βιβλιογραφίας, ως προς την φιλοσοφία που πλαισιώνει τον σχεδιασμό και την μελέτη ενός πρωτότυπου αγωνιστικού οχήματος, η οποία παρόλο που συναντά εκλάμψεις ατομικών προσπαθειών σε ουδεμία περίπτωση δεν δύναται να αξιολογηθεί ως πλήρης.

Στην εργασία αυτή θα επιστήσουμε την προσοχή μας στην ανάλυση ενός συστήματος ανάρτησης, με βάση τους κανονισμούς που δημοσιεύθηκαν από τον οργανισμό Formula Student για την χρονολογία 2020-2021. Επιπλέον, θα ασχοληθούμε με την κινηματική και δυναμική φύση ενός αγωνιστικού τύπου οχήματος και πώς η σωστή μελέτη του συστήματος της ανάρτησης μπορεί να αποτελέσει νικητήριο παράγοντα σε κάθε αγώνισμα ενός διαγωνισμού Formula Student.

Η αρχή θα περιλαμβάνει έννοιες που εισάγουν στον αναγνώστη/μηχανολόγο βασικές παραμέτρους που συνδράμουν στην οδική συμπεριφορά ενός οχήματος, ενώ μετέπειτα θα εμβαθύνουμε στην κινηματική και δυναμική ανάλυση του εμπρός και πίσω συστήματος ανάρτησης κάτω από διαφορετικές συνθήκες, όπως αυτή της στροφής των τροχών.

Εν τέλει θα παρουσιαστούν όλα τα αριθμητικά δεδομένα από τις προσομοιώσεις υπο μορφή εικόνων με σκοπό να εμβαθύνουμε την κατανόηση του αναγνώστη ως προς την συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος απόσβεσης

Abstract

The aim of this dissertation is to contribute to the enrichment of the existing Greek literature, in terms of the philosophy that frames the design and study of an original racing vehicle, which although encounters flashes of individual effort can in no way be evaluated as complete.

In this paper we will draw our attention to the analysis of a suspension system, based on the regulations published by the organization Formula Student for the year 2020-2021. In addition, we will look at the kinematic and dynamic nature of a racing vehicle and how proper study of the suspension system can be a winning factor in any Formula Student race.

The beginning will include concepts that introduce to the reader / engineer basic parameters that contribute to the road behavior of a vehicle, while later we will delve into the kinematic and dynamic analysis of the front and rear suspension under different conditions, such as that of turning the wheels.

Finally, all the numerical data from the simulations in the form of images will be presented in order to deepen the reader's understanding of the behavior of such a damping system.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες

Περίληψη

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Πρόλογος.....	1
1.2	Οργάνωση & Σχεδιασμός.....	2
1.2.1	Στόχοι Σχεδιασμού & Περιορισμοί.....	3
1.2.2	Εννοιολογικός Σχεδιασμός & Σχοινοτενής Σχεδιασμός.....	4
2	Σύστημα Ανάρτησης Μονοθέσιου Οχήματος.....	6
2.1	Περί συστημάτων ανάρτησης.....	6
2.1.1	Υπολογισμός μεταξονίου (Wheelbase) & Πλάτος πίστας.....	7
2.1.2	Γωνία Βασιλικού πείρου & Ακτίνα τριβής.....	8
2.1.3	Γωνία Τροχίσκου (Caster) & Caster Offset.....	10
2.1.4	Στιγμαίο (Instant Centre) & Ολισθούμενο κέντρο (Roll Centre).....	11
2.1.5	Σημείο αναφοράς κατευθυντήριας ράβδου (Tie Rod Location).....	12
2.1.6	Τα τρία καθεστώτα της αντίδρασης του τιμονιού.....	14
2.1.6.1	Ουδέτερη στροφή του οχήματος (Δεύτερη περίπτωση).....	15
2.1.6.2	Υποστροφή του οχήματος – Understeering Car (Πρώτη περίπτωση).....	16
2.1.6.3	Υπερστροφή του οχήματος – Oversteering Car (Τρίτη περίπτωση).....	17
2.1.7	Κύρτωμα ρόδας (Camber Angle).....	17
2.1.8	Σύγκλιση & απόκλιση τροχών (Toe in & Toe out).....	19
2.2	Παρουσίαση σχεδιασμού συστήματος ανάρτησης.....	19
2.2.1	Διαστασιολόγηση σκαριφήματος (Conceptual Design).....	20
2.2.2	Δυσδιάστατη μορφή ανάρτησης σε τριαξονικό σύστημα.....	21
2.2.2.1	Εμπρός σύστημα ανάρτησης (Front Suspension).....	21

2.2.2.2	Πίσω σύστημα ανάρτησης (Rear Suspension).....	22
2.2.3	Τρισδιάστατη απεικόνιση σε περιβάλλον C.A.D.....	23
2.2.4	Μπροστινή διάταξη ανάρτησης (Front Suspension Assembly).....	24
2.2.4.1	Ανω & κάτω ψαλίδι στην εμπρός ανάρτηση (Upper & Lower A-arm).....	25
2.2.4.2	Ράβδος διεύθυνσης στην εμπρός ανάρτηση (Pushrod).....	28
2.2.4.3	Μικροσύστημα αποσβεστήρα στην εμπρός ανάρτηση (Damper)	30
2.2.5	Πίσω διάταξη ανάρτησης (Rear Suspension Assembly).....	32
2.2.5.1	Ανω & Κάτω ψαλίδι στην οπίσθια διάταξη ανάρτησης	33
2.2.5.2	Σύνδεσμος στήριξης ή μοχλικό (Rocker Bracket)	35
3	Κινηματική Ανάλυση του Συστήματος Ανάρτησης	36
3.1	Μοντελοποίηση Εμπρός & Όπισθεν συστήματος στο ADAMS/Car.....	36
3.2	Διαδρομή παράλληλου τροχού στην εμπρός ανάρτηση (Parallel Wheel Travel)	39
3.3	Αντίθετης φοράς διαδρομή των τροχών (Opposite Wheel Travel).....	44
3.4	Κίνηση στροφής τροχών (Steering).....	47
3.5	Ολίσθηση τροχών στην εμπρός ανάρτηση (Slip angle, α)	50
3.6	Παράλληλη διαδρομή τροχών στην οπίσθια ανάρτηση	52
3.7	Αντίθετη διαδρομή τροχών στην όπισθεν ανάρτηση	54
3.8	Πλάγια ολίσθηση τροχών στην πίσω ανάρτηση.....	56
4	Στατική ανάλυση τμημάτων του συστήματος ανάρτησης.....	59
4.1	Στατική ανάλυση με την βοήθεια του πακέτου SolidWorks της εταιρίας - Dassault Systèmes.....	60
4.1.1	Παρουσίαση διαδικασίας στατικής μελέτης πεπερασμένων στοιχείων σε τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης.	60
4.2	Δυναμική προσομοίωση των κομματιών που απαρτίζουν το εμπρός σύστημα ανάρτησης.	67
4.2.1	Στατική ανάλυση στο κάτω ψαλίδι - εμπρός ανάρτησης.....	68
4.2.2	Μοντέλο μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχών (Wheel Hub).....	69

4.3	Δυναμική προσομοίωση των κομματιών που απαρτίζουν το οπίσθιο σύστημα ανάρτησης.	71
4.3.1	Δυναμική ανάλυση στο άνω ψαλίδι της πίσω ανάρτησης	72
4.3.2	Αποτελέσματα δυναμικής προσομοίωσης μηχανικής πλήμνης	74
5	Συμπεράσματα & μελλοντικές προτάσεις	75
6	Βιβλιογραφία	76

Κατάλογος Εικόνων / List of Figures

Εικόνα 1.2 – Αναπαράσταση Yaw Moment

Εικόνα 2.1 – Πλάγια όψη τροχών υπό το καθεστώς κάθετων δυνάμεων

Εικόνα 2.2 – Γεωμετρία Βασιλικού Πείρου, πλάγια και μπροστινή όψη

Εικόνα 2.3 – Μπροστά όψη για σύστημα ανάρτησης/οχήματος

Εικόνα 2.4 – Οι συνθήκες που καθορίζουν την οδηγική συμπεριφορά.

Εικόνα 2.5 – Σημειακή ισορροπία, πάνω σε στροφή

Εικόνα 2.6 – Γωνίες ουδέτερης στροφής

Εικόνα 2.7 – Γωνία στροφής, στην περίπτωση της υποστροφής

Εικόνα 2.8 – γωνίες στροφής, στην περίπτωση της υπέρστροφής

Εικόνα 2.9 – Κύρτωμα ρόδας υπό το καθεστώς προσκείμενης δύναμη

Εικόνα 2.10 – Εφαρμοσμένο κύρτωμα ελαστικού

Εικόνα 2.11 – Σύγκλιση τροχών (Toe in)

Εικόνα 2.12 – Σκαρίφημα της γεωμετρίας του οχήματος.

Εικόνα 2.13 – Γεωμετρική προσέγγιση δυσδιάστατης ανάρτησης σε μορφή τριαξονικού συστήματος

Εικόνα 2.14 – Εμπρός σύστημα ανάρτησης με εμφανιζόμενα μέρη

Εικόνα 2.15 – Οπίσθιο σύστημα δυσδιάστατης ανάρτησης.

Εικόνα 2.16 – Αποτύπωση πλήρης συναρμολόγησης των μερών της ανάρτησης, Ισομετρική όψη

Εικόνα 2.17 – Ισομετρική όψη, μπροστινού συστήματος ανάρτησης

Εικόνα 2.18 – Ισομετρική όψη, άνω ψαλιδιού στην εμπρός ανάρτηση

Εικόνες 2.19, 2.20 – Βοηθητικό υλικό κατανόησης του πραγματικού μεγέθους των οπών και του άνω ψαλιδιού

Εικόνα 2.21 – Ισομετρική όψη, κάτω ψαλιδιού στην εμπρός ανάρτηση

Εικόνες 2.22, 2.23 – Ισομετρική & μπροστά όψη, Στήριγμα σύνδεσης ψαλιδιού και αποσβεστήρα

Εικόνα 2.24 – Ισομετρική όψη, ράβδου διεύθυνσης (pushrod) με βιδωτούς κοχλίες τύπου Aurora Bearings M6

Εικόνα 2.25 – Αποσβεστήρας τύπου Double Barrel από την Cane Creek

Εικόνα 2.26 – Οπτική στατικού ελατηρίου σταθεράς $K=400 \text{ lb./in}$

Εικόνες 2.27, 2.28 – Πίσω και Εμπρός ισομετρική όψη, Οπίσθιου συστήματος ανάρτησης

Εικόνα 2.29 – Ισομετρική όψη, πάνω ψαλιδιού πίσω ανάρτησης

Εικόνα 2.30 – Ισομετρική όψη, κάτω ψαλιδιού στην οπίσθια ανάρτηση

Εικόνες 2.31, 2.32 – Ισομετρική & μπροστά όψη, εξαρτήματος στήριξης μεταξύ ψαλίδι και shock rod

Εικόνες 2.33, 2.34 – Ισομετρική & πλάγια όψη, εξαρτήματος στήριξης και μόχλευσης (Rocker)

Εικόνα 3.1 - Σύστημα εμπρός ανάρτησης στο ADAMS/Car

Εικόνα 3.2 – Σύστημα πίσω ανάρτησης στο ADAMS/Car

Εικόνα 3.3 – Διάγραμμα δυνάμεων και ταχύτητας αποσβεστήρα (CC)

Εικόνα 3.4 – Διαδρομή παράλληλων τροχών στην εμπρός ανάρτηση

Εικόνα 3.5 – Γραφική αναπαράσταση των δεχόμενων ροπών στο αριστερό hub, της εμπρός ανάρτησης

Εικόνα 3.6 – Γράφημα ροπών που δέχεται το επάνω ψαλίδι και στους 3 άξονες

Εικόνα 3.7 – Γράφημα δυνάμεων που δέχεται το επάνω ψαλίδι, σε σύγκριση με τον χρόνο (sec)

Εικόνα 3.8 – Δυνάμεις που αναπτύσσονται στο επάνω μέρος του αποσβεστήρα

Εικόνα 3.9 – Δυνάμεις που εμφανίζονται στο κάτω ψαλίδι συγκριτικά με τον χρόνο (sec)

Εικόνα 3.10 – Η τιμή κυρτώματος της ρόδας και η σύγκλιση εσωτερικά αυτής σε μοίρες που χρειάζεται να φέρει το όχημα

Εικόνα 3.11 – Διαδρομή αντίθετης φοράς τροχών (Opposite Wheel Travel)

Εικόνα 3.11 – Δεχόμενες δυνάμεις στο δεξί ελαστικό του οχήματος μας.

Εικόνα 3.12 – Δυνάμεις στο κάτω ψαλίδι του εξωτερικού σημείου επαφής

Εικόνα 3.13 – Δυνάμεις στο άνω ψαλίδι του εξωτερικού σημείου επαφής

Εικόνα 3.14 – Δυνάμεις στο πάνω μέρος του αποσβεστήρα στην εμπρός ανάρτηση

Εικόνα 3.15 – Κίνηση στροφής των τροχών στο πρόγραμμα ADAMS/Car

Εικόνες 3.16, 3.17 – Δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ελαστικά του οχήματος κατά την εκτέλεση στροφής

Εικόνα 3.18 – Ασκούμενη δύναμη στο δεξί hub του συστήματος ανάρτησης

Εικόνα 3.19 – Δεχόμενη δύναμη στο άνω ψαλίδι, στον δεξί τροχό

Εικόνα 3.20 – Δεχόμενη δύναμη στο κάτω ψαλίδι, στον δεξί τροχό

Εικόνα 3.21 – Παρουσίαση του φαινομένου ολίσθησης τροχών

Εικόνες 3.21, 3.22 – Δύναμη που ασκείται στο σημείο επαφής του ελαστικού με το δάπεδο, στον δεξί και αριστερό τροχό

Εικόνες 3.23, 3.24 – Δυνάμεις στο κάτω και άνω ψαλίδι κατά την εκτέλεση ολίσθησης των τροχών

Εικόνα 3.25 – Απεικόνιση παράλληλης διαδρομής των τροχών

Εικόνα 3.26 – Δύναμη συγκριτικά με τον χρόνο προσομοίωσης στο κάτω ψαλίδι

Εικόνα 3.27 – Δύναμη συγκριτικά με τον χρόνο προσομοίωσης στο άνω ψαλίδι

Εικόνα 3.28 – Σύγκριση ολίσθησης των τροχών με το σημείο επαφής των τροχών στην συνθήκη που εξετάζουμε

Εικόνα 3.29 – Υπόδειξη προσομοίωσης αντίθετης διαδρομής τροχών στην οπίσθια ανάρτηση, σύμφωνα με το Adams/Car

Εικόνες 3.30, 3.31 - Δυνάμεις στο άνω και κάτω ψαλίδια στην οπισθέλκουσα ανάρτηση

Εικόνα 3.32 – Σύγκριση του σημείου επαφής της ρόδας με την πιθανή ολίσθηση

Εικόνα 3.33 – Αποτύπωση προσομοίωσης πλάγιας ολίσθησης τροχών στην πίσω ανάρτηση, σύμφωνα με το Adams/Car

Εικόνες 3.34, 3.35 – Δεχόμενες δυνάμεις στο άνω και κάτω ψαλίδι στην οπίσθια ανάρτηση κατά την εκτέλεση ολίσθησης τροχών

Εικόνα 3.36 – Παρουσίαση ασκούμενων δυνάμεων και ροπών στην αριστερή ρόδα, για το σημείο επαφής και την στιγμή εκτροχιασμού του τροχού από το δάπεδο.

Εικόνα 3.37 - Παρουσίαση ασκούμενων δυνάμεων και ροπών στην δεξιά ρόδα, για το σημείο επαφής και την στιγμή εκτροχιασμού του τροχού από το δάπεδο.

Εικόνα 4.1 – Περιβάλλον ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων του SW

Εικόνα 4.2 – Σημεία στο ψαλίδι που χρησιμοποιείται άρθρωση για την ευκολία της κίνησης

Εικόνα 4.3 – Σημείο πακτωμένης γεωμετρίας για την εξυπηρέτηση συναρμολόγησης με σύνδεσμο

Εικόνα 4.4 – Αποτύπωση διεύθυνσης δύναμης 650 Newton στο εμπρός κυκλικό άνοιγμα του ψαλιδιού

Εικόνα 4.5 – Αποτύπωση της γεωμετρίας Mesh, με την μορφή τριγώνων

Εικόνα 4.6 – Ανάδειξη μηχανικής καταπόνησης (Von Mises)

Εικόνα 4.7 – Καταπόνηση του σώματος με εστίαση στο σημείο άσκησης της δύναμης

Εικόνα 4.8 – Αποτύπωση μηχανικής μετατόπισης σε χιλιοστά – displacement URES

Εικόνα 4.9 – Μηχανική μετατόπιση σώματος με εστίαση στο σημείο επαφής με την δύναμη

Εικόνα 4.10 – Ανάδειξη μηχανικής καταπόνησης με την διαδικασία Von Mises (N/mm²)

Εικόνα 4.11 – Μετατόπιση δεσμών κάτω ψαλιδιού σε χιλιοστά, μέθοδος URES

Εικόνα 4.12 – Καταπόνηση μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχού – Μέθοδος Von Mises

Εικόνα 4.12 – Μετατόπιση δεσμών μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχού, μέθοδος URES

Εικόνα 4.13 – Απεικόνιση καταπόνησης στο άνω ψαλίδι της οπίσθιας ανάρτησης – Μέθοδος Von Mises

Εικόνα 4.14 – Εστίαση στο σημείο εφαρμογής της δύναμης κατά την καταπόνηση

Εικόνα 4.15 – Μηχανική μετατόπιση στο άνω ψαλίδι, σύμφωνα με την μέθοδο URES σε χιλιοστά (mm)

Εικόνα 4.16 – Εστίαση στο σημείο εφαρμογής της τάσης, όπου φανερώνονται και υψηλότερες τιμές παραμόρφωσης

Εικόνα 4.17 – Καταπόνηση στην πλήμνη του πίσω τροχού – Von Mises.

Εικόνα 4.18 – Μετατόπιση στην πλήμνη του πίσω τροχού, με την μέθοδο υπολογισμού URES

1 Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Φιλοδοξία της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η δημιουργία ενός έντυπου που θα συνδράμει πρώτιστα στην κατανόηση βασικών ορισμών της κινηματικής ενός αγωνιστικού οχήματος και σε επόμενο επίπεδο στην βαθύτερη αντίληψη των μηχανισμών που περικλείουν το μοντέλο ανάρτησης τύπου διπλών ψαλιδιών (double scissors).

Αρχικά, η μηχανολογική διαδικασία που καλείται να οπτικοποιήσει ένας μηχανικός στηρίζεται στην γνώση θεμελιωδών αρχών, αυτό βέβαια που ξεχωρίζει το ποιόν στον επιστημονικό τομέα μεταξύ ενός ικανοποιητικού μηχανικού και ενός αξιοθαύμαστου, κρίνεται ως προς με τον τρόπο που ο καθένας προσεγγίζει το θεωρητικό κομμάτι των εξισώσεων στον τρισδιάστατο πραγματικό χώρο, φυσικά με σκοπό η απόδοση του αγωνιστικού οχήματος να είναι η μέγιστη δυνατή.

Το σύστημα ανάρτησης χρησιμοποιείται κυρίως για να διευκολύνει την «δουλειά» των ελαστικών και την προβλεψιμότητα της οδικής συμπεριφοράς ενός οχήματος με σκοπό ο οδηγός να βρίσκεται σε θέση να έχει τον έλεγχο σε αυτό.

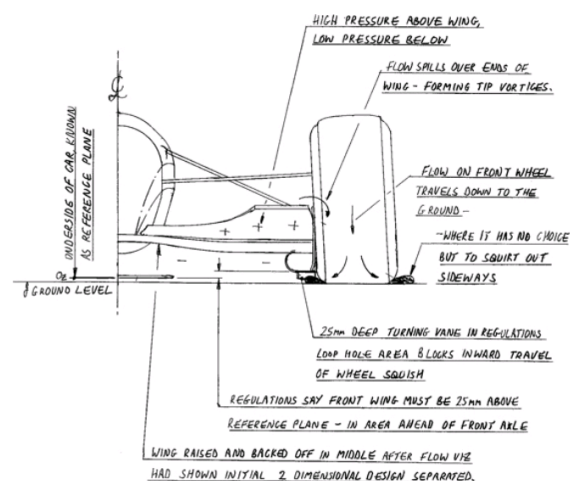
Επομένως, η αναλυτική διαδικασία που θα ακολουθήσουμε θα φέρει την μορφή θεωρητικής αναφοράς εννοιών, καθώς και πραγματοποίηση προσομοιώσεων που αφορούν τα κινηματικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανάρτησης διπλών ψαλιδιών και τον καθορισμό ελαστικότητας και απόσβεσης του ταλαντωμένου σώματος.

1.2 Οργάνωση & Σχεδιασμός

Η σχεδίαση και η προσομοίωση στα κινούμενα συστήματα έχει δεχθεί πληθώρα διερεύνηση και επιστημονική καταρτισμένη μελέτη στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Ειδικότερα, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες όπου τα βοηθήματα της τεχνολογίας έχουν μεριμνήσει ώστε οι μελέτες μας να προσομοιάζουν όλο και περισσότερο με τα πραγματικά δεδομένα που συναντούμε στους φυσικούς νόμους που εκλύονται στην φύση.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας βρεθήκαμε αντιμέτωποι οι άνθρωποι να συνδυάσουμε ποικίλους μεθόδους ώστε το αποτέλεσμα που επιθυμούμε να μπορεί να πραγματοποιηθεί με το δυνατόν λιγότερο αστοχίες. Έτσι, θα λέγαμε πως ο σχεδιασμός ενός εξαρτήματος ή ενός συνόλου συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την φυσικό-μηχανική μελέτη αλλά και από παράγοντες οικονομικούς.

Σε πολλές περιπτώσεις, παρατηρούμε πως η τεχνολογική εξέλιξη βρίσκει τροχοπέδη επειδή οι πόροι της εκάστοτε ομάδας δεν διαθέτουν την δυνατότητα να καλύψουν είτε την υπολογιστική ισχύ που χρειάζεται μια πολύπλοκη έρευνα είτε άλλοτε τα χρονικά όρια των σύγχρονων κοινωνικών δεσμών δεν δίνουν την δυνατότητα έκφρασης του ορθού σχεδιασμού.



Στην πραγματικότητα, ένας πυρήνας έμπειρου και επαγγελματικού προσωπικού με την κατάλληλη καθοδήγηση και οργάνωση κατέχει την δύναμη να υπερνικήσει κάποια περιορισμένη διαθεσιμότητα πόρου ακολουθώντας μια σειρά βημάτων, διαθέσιμα από πειραματικές μεθόδους πολλών ετών.

Ο σκελετός αυτών διακρίνεται στους στόχους, τους περιορισμούς, τον εννοιολογικό σχεδιασμό, τον σχοινοτενή σχεδιασμό, τις δοκιμές του σχεδιασμένου αντικειμένου και τέλος την εξέλιξη, στην οποία δεν θα δώσουμε τόσο έμφαση διότι θεωρείται περισσότερο κατασκευαστικό κομμάτι παρά σχεδιαστικό.

1.2.1 Στόχοι Σχεδιασμού & Περιορισμοί

Στο πρώτο βήμα, το ανθρώπινο σχεδιαστικό δυναμικό αφιερώνει πληθώρα ωρών στον ίδιο χώρο με σκοπό να «γεννήσει» το επόμενο σύστημα που θα βρεθεί μπροστά από τον σκληρό ανταγωνισμό του μηχανοκίνητου αθλητισμού.

Στο σημείο αυτό, εξετάζονται ενδελεχώς οι κανονισμοί της κατηγορίας του υπό εξέλιξη οχήματος, κυρίως για τυχόν γκρίζες ζώνες, μια απαιτητική και δύσκολη ενέργεια για να ανακαλυφθεί, όμως αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό της νικητήριας συνταγής.

- *Γενικοί Κανονισμοί Formula SAE (Germany) – Για το έτος 2022*

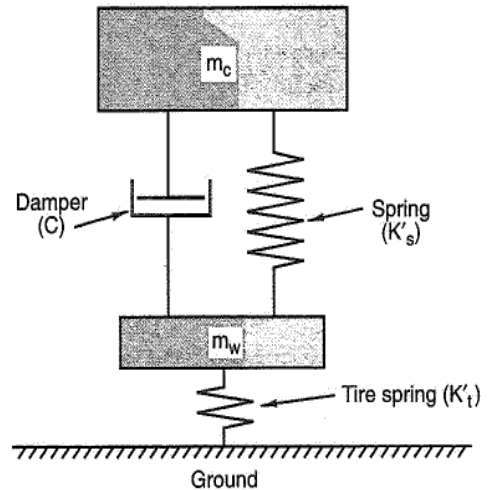
Αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι των διαγωνισμών, οι κανόνες να διαφοροποιούνται. Κάθε έτος προστίθενται μέτρα ασφάλειας που ίσως να είχαν παραληφθεί από τις προηγούμενες χρονιές. Συχνά, παρατηρείται σε διπλωματικές που συμπεριλαμβάνουν κανόνες, ένα λάθος στην διατύπωση και έχει ως εξής: υπαινίσσεται πως οι διεξαγόμενοι διαγωνισμοί πραγματοποιούνται κάτω από την αιγίδα ίδιων κανονισμών κάτι το οποίο δεν θα μπορούσε να είναι πιο μακριά από την αλήθεια, λόγω χάριν το Ηνωμένο Βασίλειο με την Ευρώπη διαφέρει ως προς τους κανονισμούς.

Σε αυτήν την διπλωματική θα αναλύσουμε σύνολο ανάρτησης που φέρει σαν περιορισμούς τα δεδομένα από την Γερμανική αρχή (<https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>).

Επιγραμματικά, για τις προϋποθέσεις που επιτάσσουν τα παραπάνω, στο κεφάλαιο T2 ‘General Design Requirements’ και παράγραφος T2.3 ‘Suspension’ διαβάζουμε πως το όχημα πρέπει να κατέχει σύστημα αναρτήσεων στους μπροστινούς και πισινούς τροχούς με ελατήρια και αποσβεστήρες που να διασφαλίζουν ελάχιστο εύρος κίνησης ρόδας 50mm, 25mm βύθισης και 25mm επαναφοράς, στην κατάσταση όπου στο μονοθέσιο βρίσκεται ο οδηγός. Παράλληλα, η στατική απόσταση από το έδαφος (ground clearance) οποιουδήποτε τμήματος του οχήματος πρέπει να είναι 30 mm.

Επιπροσθέτως, για τα τμήματα που αποτελούν την ανάρτηση χρειάζεται να είναι ορατά, σε διαφορετική περίπτωση, προσβάσιμα με αφαίρεση κάποιου καλύμματος.

Εν συνεχεία, η ομάδα καλείται να αποφασίσει, αναλογικά με τις υπόλοιπες ομάδες, σε ποια βαθμολογική θέση επιθυμεί να τερματίσει στο πέρας της αγωνιστικής περιόδου. Με την απόφαση αυτή, διάφορα υποσυστήματα του μηχανοκίνητου οχήματος, θα διερευνηθούν κατάλληλα για να επιτευχθεί ο στόχος. Για την ανάρτηση, θα μπορούσε να απαιτηθεί ειδική τιμή για την διαδρομή της και την απόσβεση του ελατηρίου ενώ για την γενικότερη κινηματική του αυτοκινήτου, το μέγεθος των τροχών.



Εικόνα 1.1 - Σύστημα 1/4 SMD

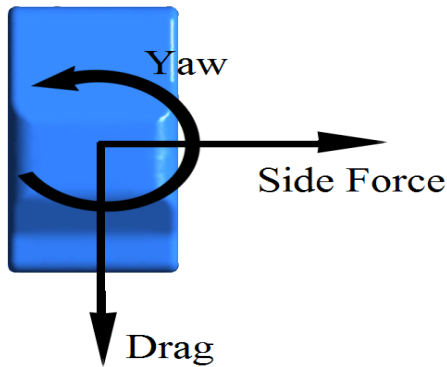
1.2.2 Εννοιολογικός Σχεδιασμός & Σχοινοτενής Σχεδιασμός

Μετάπειτα, οι μηχανικοί ξεκινούν να σχεδιάζουν τα πρώτα βασικά κομμάτια του οχήματος, δοκιμάζοντας διάφορες ιδέες. Δομικό τμήμα όπου από εκεί εξαρτώνται όλα τα υπόλοιπα μέρη θα λέγαμε πως είναι η δημιουργία του Σασί (Chassis) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος της ανάρτησης.

Στο πιο απαιτητικό επίπεδο του μηχανοκίνητου αθλητισμού, το παγκόσμιο πρωτάθλημα της *Formula 1 (F1 World Championship)*, οι εταιρίες που παίρνουν μέρος συχνά βασίζονται στον χρυσό κανόνα των είκοσι-τεσσάρων ωρών.

Ο κανόνας αυτός βασίζεται στην εκπόνηση κάποιας πιθανόν καινοτόμας ιδέας για κάποιο τμήμα του οχήματος (αεροδυναμική, δομή στο σασί, γεωμετρική κινηματικών στοιχείων), η οποία συζητείται και εάν την επόμενη εργάσιμη ημέρα δεν έχει καταφέρει η ομάδα να βρει τον τρόπο ώστε να την προσθέσει στο υπόλοιπο σύνολο σχεδίων τότε απορρίπτεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να εμφανιστεί η κατάλληλη.

Επίσης, ο πρωταρχικός σχεδιασμός φέρει ως σκοπιμότητα την διάταξη των υποσυστημάτων του μηχανοκίνητου μονοθέσιου. Αναφορικά, θεωρείται ο πιο σημαντικός τομέας πριν την κατασκευή διότι οι μηχανολόγοι/σχεδιαστές συνεργατικά δημιουργούν σε τρισδιάστατη μορφή τα πρόχειρα σχέδια του εννοιολογικού σχεδιασμού.



Εικόνα 1.2 – Αναπαράσταση Yaw Moment

Μερικά από αυτά τα σχέδια περιβάλλουν την θέση του μετατροχίου και του μεταξονίου, τα οποία με την σειρά τους ερμηνεύουν την Yaw απόκριση του οχήματος. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί πως ένα μεγαλύτερο σε μήκος μεταξόνιο θα προσέδιδε περισσότερη ευστάθεια γύρω από τον κατακόρυφο άξονα από την μείωση της αδράνειας του οχήματος.

Σημαντικός παράγοντας, ακόμα, είναι να τεθούν χείριστα σενάρια φορτίσεων και συνθηκών κάθε πίστας. Αυτό θα προσφέρει σαν απόρροια μια καλύτερη προσομοίωση στα δεδομένα των ελαστικών και το σχήμα του οχήματος θα μπορεί να σχεδιαστεί σε σχέση με τα σενάρια αυτά.

Η διαδικασία σχεδίασης συμβαίνει κατά πρώτο λόγο με γνώμονα των παραπάνω και σε δευτερεύοντα χρόνο με την βοήθεια σχεδιαστικών & υπολογιστικών εμπορικών πακέτων, όπως το SolidWorks, Siemens NX, Ansys, Simcenter Amesim.

Επιπλέον, για το σύστημα ανάρτησης, όπου υπάρχουν δύο ομάδες μαζών (μη αναρτημένες και αναρτημένες μάζες), θα χρειαστεί να γίνει μελέτη κινηματικής και στατικής του υλικού μέσω υπολογιστικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) διότι το σύστημα πρέπει να κινείται παλινδρομικά και να απορροφά τους κραδασμούς των κέρμπ ή τυχόν ανωμαλίες στους δρόμους, κάτι το οποίο δημιουργεί τάσεις στα τμήματα του οχήματος που εδράζονται στο σύστημα της ανάρτησης και συνδέονται με τους τροχούς.

2 Σύστημα Ανάρτησης Μονοθέσιου Οχήματος

2.1 Περί συστημάτων ανάρτησης

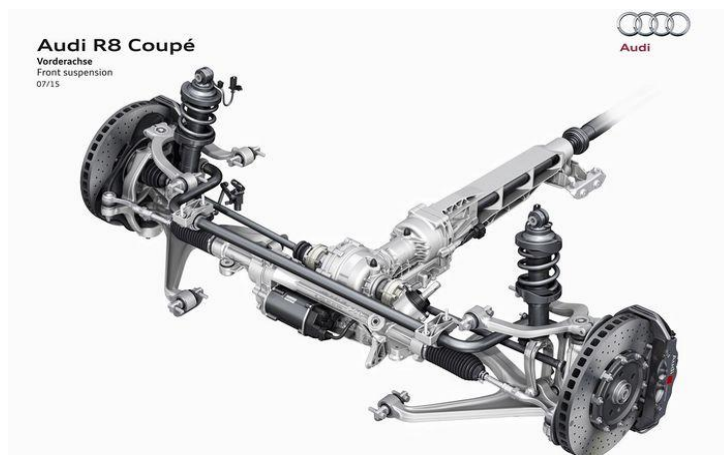
Το σύνολο της ανάρτησης που χρησιμοποιείται στα μηχανοκίνητα αγωνιστικά οχήματα διαφέρει στην πολυπλοκότητα σε σύγκριση με σύστημα που θα χρησιμοποιούσαμε σε κάποιο συμβατικό αυτοκίνητο. Εντούτοις, οι θεμελιώδεις αρχές παραμένουν οι ίδιες και η μια εξαιρετικά σημαντική από αυτές θα λέγαμε πως είναι να στηρίζει τους τροχούς του οχήματος πάνω στο κουβούκλιο (Σασί), ενώ ταυτόχρονα να υποστηρίζει και το βάρος του αμαξώματος.

Αναφορικά με τους βαθμούς ελευθερίας που διέπουν τον τροχό (Wheel's Degree of Freedom, DoF), θα προβούν από 6 σε 2 στον πίσω τροχό και σε 3 βαθμούς στον μπροστινό παρόλο που αυτός χρειάζεται να αντέξει τάσεις από την πρόωση, το σύστημα του τιμονιού και τα φρένα. Ακόμα, οι σχετικές κινήσεις των τροχών θα λέγαμε πως είναι η κατακόρυφη και η περιστροφική κίνηση γύρω από τους κατακόρυφους άξονες μέσω της γωνίας διεύθυνσης που ορίζει το τιμόνι.

Στην συνέχεια, όπως η πλειονότητα των μηχανικών γνωρίζει, το σύστημα της ανάρτησης παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην δυναμική συμπεριφορά του οχήματος.

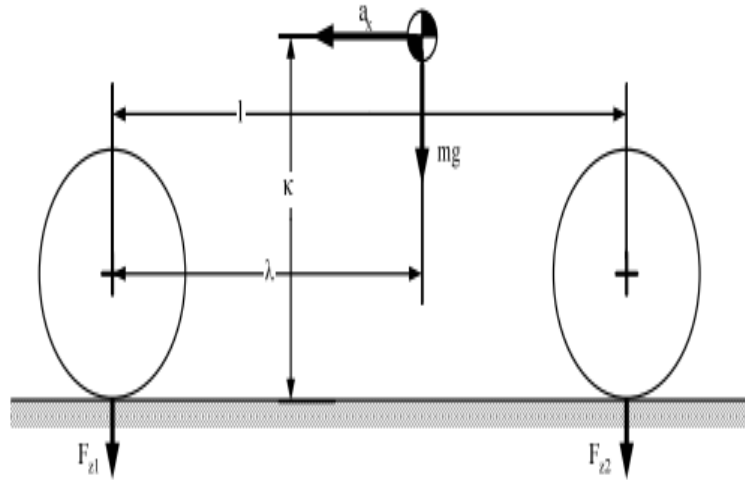
Να σημειωθεί πως η ανάρτηση που θα μελετήσουμε είναι τύπου Double Wishbone (διπλά ψαλίδια) και χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτοκίνητα με απαιτήσεις υψηλών επιδόσεων, λόγω πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα με χαμηλό κέντρο βάρους, συγκριτικά με ανάρτηση τύπου McPherson, η οποία λειτουργεί βέλτιστα με αισθητά πιο υψηλό κέντρο βάρους σε σχέση πάντοτε με το έδαφος.

Παρακάτω, αναλύουμε τις πτυχές που καθορίζουν τον πρωταρχικό σχεδιασμό ενός συστήματος ανάρτησης.



2.1.1 Υπολογισμός μεταξονίου (Wheelbase) & Πλάτος πίστας

Ως ορισμός, το μεταξόνιο, θεωρείται η απόσταση (l) από το κέντρο του μπροστινού άξονά τροχού έως το κέντρο του οπίσθιου άξονα τροχού. Αναφορικά, η απόσταση του μεταξονίου κατέχει εξαιρετική επίδραση σαν μεταβλητή ως προς την κατανομή του φορτιού, στον άξονα.



Εικόνα 2.1 – Πλάγια όψη τροχών υπό το καθεστώς κάθετων δυνάμεων

Για την καλύτερη κατανόηση του παραπάνω, ένα μεταξόνιο με μεγαλύτερο μήκος προσφέρει λιγότερες μεταφορές φορτιού μεταξύ του μπροστινού και του πίσω άξονα συγκριτικά με ένα μικρότερο μεταξόνιο, φυσικά κατά την διάρκεια της επιτάχυνσης ή το φρενάρισμα του οχήματος, σύμφωνα με την Εικόνα 2.1 και τις Σχέσεις 2.1.

$$F_{z1} = (1 - \lambda) \cdot mg + \kappa \cdot a_x \cdot m$$

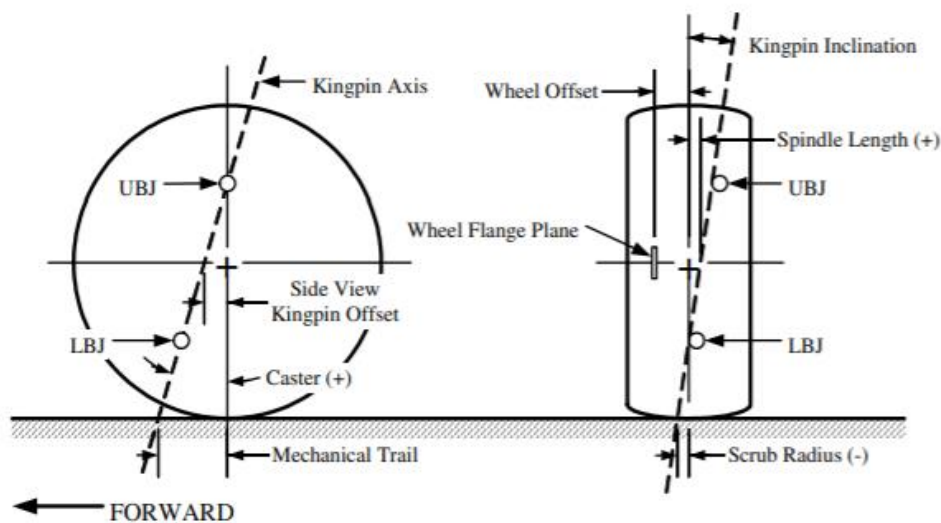
$$F_{z2} = \lambda \cdot mg + \kappa \cdot a_x \cdot m \quad (2.1,2)$$

Ένα μονοθέσιο, το οποίο, διαθέτει μικρό μεταξόνιο πιθανόν να δρα ανεξέλεγκτα κατά την έξοδο μιας στροφής και στην μετέπειτα ευθεία που ακολουθεί συνήθως. Σκεπτόμενοι την αγωνιστική φιλοσοφία θα χρειαστεί να αναλογιστούμε την λιγότερο εφικτή άνεση του οδηγού ενώ παράλληλα και την αυτοπεποίθηση που χρειάζεται η αίσθηση της οδήγησης να δίνει σε αυτόν, με τον σκοπό την επιτυχία της ομάδας.

Εν συνεχεία, το πλάτος πίστας (Track Width) αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες όταν καλούμαστε να σχεδιάσουμε ένα μονοθέσιο όχημα, ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό βρίσκεται πως το μεγαλύτερο πλάτος μιας πίστας δημιουργεί συνθήκες για χαμηλότερο μέτρο κάθετων δυνάμεων ως προς το κέντρο των αξόνων, σε συνθήκες όπου το όχημα βρίσκεται στην ακτίνα στροφής.

Εστιαζόμενοι στους κανονισμούς που συγκομίζουν τα αγωνίσματα του Autocross και του Endurance το μεγαλύτερο πλάτος πίστας χρειάζεται να είναι 3.5m ενώ για το αγώνισμα του Skid-Pad, το πλάτος πίστας δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 3m.

2.1.2 Γωνία Βασιλικού πείρου & Ακτίνα τριβής



Εικόνα 2.2 – Γεωμετρία Βασιλικού Πείρου, πλάγια και μπροστινή όψη

Ο άξονας του Βασιλικού πείρου (Kingpin Axis) ορίζεται από την άνω σφαιρική άρθρωση (UBJ – Upper Ball Joint) και την κάτω σφαιρική άρθρωση (LBJ – Lower Ball Joint) επαπτόμενα στα ορισμένα σημεία (hardpoints) των άνω και κάτω ψαλιδιών. Μετέπειτα, χρειάζεται να διευκρινιστεί, στην μπροστά όψη, η γωνία ονομάζεται κλίση του βασιλικού πείρου (Kingpin Inclination) και η απόσταση από το κέντρο της ρόδας ως προς τον κάθετο άξονα στο σημείο που ορίζουμε το κέντρο ονομάζεται ακτίνα τριβής (Scrub Radius).

Επίσης, μια εξαιρετικά σημαντική θεώρηση που παρατηρείται στην Εικόνα 2.2, είναι η παράλληλη στο επίπεδο απόσταση από τον άξονα του βασιλικού πείρου έως τον κάθετο άξονα προς το επίπεδο του κέντρου της ρόδας, η οποία και ονομάζεται μήκος ατράκτου (Spindle Length).

Οι έννοιες αυτές δεν ορίζονται, όπως και ο μέσος αναγνώστης θα καταλάβαινε ως λιτά εννοιολογικοί όροι, αντιθέτως επηρεάζουν κινηματικά το σύστημα ανάρτησης και σε συνέχεια το όχημα που μελετάμε με πληθώρα τρόπων.

Μερικοί από αυτούς, παρουσιάζονται, ως εξής:

1. Στην περίπτωση όπου το μήκος ατράκτου είναι θετικό το μονοθέσιο θα πάρει αυξητική φορά με διεύθυνση προς τα επάνω, λόγω του ότι οι τροχοί βρίσκονται υπό το καθεστώς κλίση, με απότοκο την αλλαγή της αίσθησης, για τον οδηγό, μέσω του τιμονιού. Η αίσθηση αυτή, περιγράφεται ως περισσότερο «σκληρή» και πιο δυσμενής για τον έλεγχο, από προηγουμένως.

Με μεγαλύτερη σε μέτρο η κλίση του βασιλικού πείρου τόσο και περισσότερο θα είναι το ύψος που θα δημιουργείται στο σύστημα ανάρτηση – μονοθέσιο, ανεξαρτήτως την οποιαδήποτε στροφή των τροχών.

2. Η κλίση του βασιλικού πείρου (Kingpin Inclination) επηρεάζει το *κύρτωμα διεύθυνσης τροχού* (*Steer Camber*). Επεξηγηματικά, η παραπάνω έκφραση δηλώνει την κίνηση του τροχού κατά την εξέλιξη μιας στροφής, που παρατηρείται θετικό κύρτωμα διεύθυνσης όταν η κλίση του βασιλικού πείρου είναι θετική.

Παρόλο που το «πλάγιασμα» αυτό κατέχει μικρό μέτρο μοιρών, συνήθως μεταξύ -5° έως $+5^{\circ}$, χρειάζεται εξαιρετικά μεγάλη προσοχή όταν η πίστα είναι διαμορφωμένη με απότομες στροφές.

3. Εάν, οι δυνάμεις κατά το φρενάρισμα κατανέμονται με διαφορετικό τρόπο στην αριστερή & δεξιά μεριά, θα δημιουργήσει το φαινόμενο κατά το οποίο η στρεπτική τάση του τιμονιού, μεταφερόμενη από την κρεμαγιέρα, θα δημιουργήσει μια αίσθηση στον οδηγό. Ουσιαστικά, ομοιάζει με μια αρνητική δύναμη στην φορά όπου θέλει ο οδηγός να κατευθυνθεί.

2.1.3 Γωνία Τροχίσκου (Caster) & Caster Offset

Στην πλάγια όψη η κλίση του βασιλικού πείρου ονομάζεται γωνία τροχίσκου. Παρόλο που εξετάζουμε παρόμοια έννοια που εξηγήσαμε παραπάνω η αλλαγή στην όψη δημιουργεί ένα διαφορετικό κεφάλαιο εξέτασης για την κινηματική συμπεριφορά που δύναται να παρουσιαστεί σε ένα σύστημα ανάρτησης.

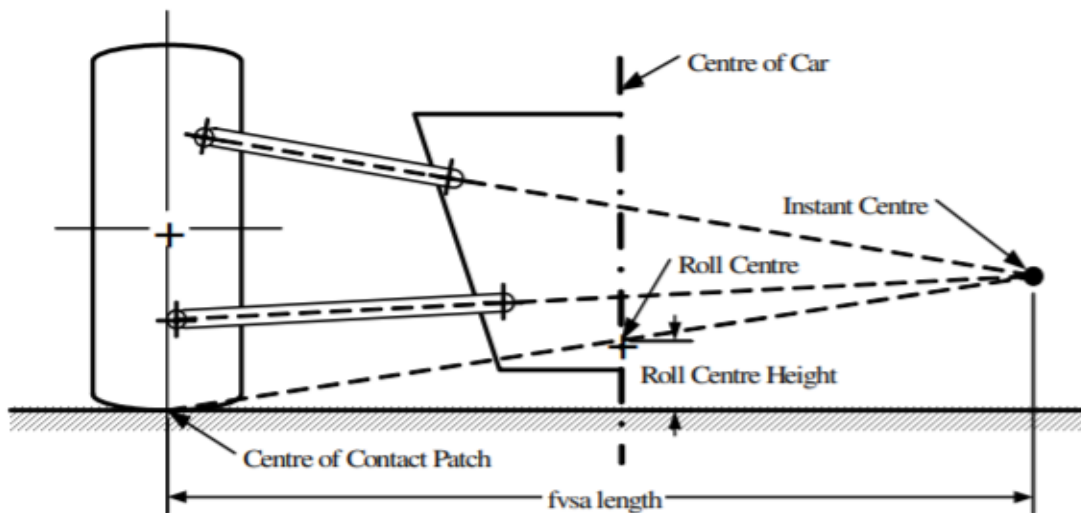
Επιπλέον, το λεγόμενο Caster Offset, ορίζεται σαν την απόσταση από τον άξονα του βασιλικού πείρου μέχρι το κέντρο της ρόδας.

Οι δύο αυτές έννοιες αποτελούν σημείο αναφοράς των μηχανικών/σχεδιαστών, για τους παρακάτω λόγους :

1. Με μεγαλύτερη η απόσταση του Caster Offset, τόσο και μεγαλύτερη η ροπή του τιμονιού
2. Η αύξηση στην τιμή της γωνίας τροχίσκου θα πραγματώσει τον τροχό σε πορεία ανεβάσματος/κατεβάσματος με την αλλαγή διεύθυνσης στο τιμόνι.

Σαν φαινόμενο, προσπαθούν οι μηχανικοί να το απωθήσουν από την ύπαρξη του, διότι κατευθύνει το μηχανοκίνητο σε πορεία ολίσθησης και μεταφορά βάρους

2.1.4 Στιγμαίο (Instant Centre) & Ολισθούμενο κέντρο (Roll Centre)



Εικόνα 2.3 – Μπροστά όψη για σύστημα ανάρτησης/οχήματος

Το στιγμιαίο κέντρο (Instant Centre), όπως και ακριβώς αναγράφεται στην ονομασία του, δηλώνει την χρονική στιγμή όπου το κέντρο βρίσκεται όπως ακριβώς οπτικοποιείται στην Εικόνα 2.3.

Καθώς, η ανάρτηση εναλλάσσει θέσεις στους άξονες κατεύθυνσης, στην μπροστά όψη, σχεδιάζοντας ένα ευθύγραμμο τμήμα από το στιγμιαίο κέντρο έως το κέντρο του ελαστικού, δημιουργούμε αυτεπάγγελτα το κέντρο ολίσθησης (Roll Centre). Όπως εύκολα συνάγεται, η σχέση μεταξύ των κέντρων είναι αναλογική, το οποίο θα μας φανεί εξαιρετικά χρήσιμο στην συνέχεια του σχεδιασμού.

Παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση όπου το μονοθέσιο εκτελεί κίνηση κάθετα στην ακτίνα μια στροφής, οι τάσεις που εμφανίζονται εξαρτώνται από το κέντρο βαρύτητας, όπου στο σύστημα της ανάρτησης, οι μετρήσεις δείχνουν διαφοροποίηση στις τιμές του κέντρου ολίσθησης.

Εν συνεχεία, αξιοσημείωτος παράγοντας που προκαλεί διαφοροποιήσεις στην κίνηση του μονοθέσιου, θεωρείται το λεγόμενο φαινόμενο σύζευξης (Coupling Effect), στους κάθετους και παράλληλους άξονες από το έδαφος.

Σε τέτοια περίπτωση, όπου το κέντρο ολίσθησης βρίσκεται αξονικά πάνω από την επιφάνεια του εδάφους οι κάθετες δυνάμεις που θα δημιουργηθούν στην επιφάνεια των ελαστικών, πιέζουν τον τροχό προς το έδαφος με απότοκο η μάζα του ελατηρίου, στο σύστημα της ανάρτησης, να υψωθεί. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *Jacking* και οι επιρροές του στην αγωνιστική οδήγηση συναντώνται σχεδόν σε κάθε διαγωνισμό Formula Student, αλλά και σε επαγγελματικές διοργανώσεις της *Federation Internationale de l'Automobile* (FIA).

Σε αυτό το σημείο εξαιρετική σημασία ως προς την οπτικοποίηση του είναι να παρουσιάσουμε τον ρυθμό αλλαγής camber (Camber Change Rate). Οι μονάδες μέτρησης που τον διέπουν χαρακτηρίζονται ως μοίρες προς χιλιοστά (degrees/mm), με σχέση υπολογισμού :

$$\frac{\text{degrees}}{\text{mm}} = \arctan\left(\frac{1}{fvsa_{length}}\right)$$

Η μεταβλητή *fvsa_length* που εμφανίζεται, βρίσκεται στην Εικόνα 2.3 και αιτιολογεί, το μήκος του ταλαντευμένου βραχίονα (front view swing arm length, *fvsa_length*).

Σημειωτέα παρατήρηση είναι πώς ο ρυθμός αλλαγής camber, λόγω του συνεχώς μεταβαλλόμενου κέντρου ολίσθησης αλλά και της τριγωνομετρικής φύσης της εξίσωσης, ο ρυθμός αυτός δεν υφίσταται η ύπαρξη του σαν γραμμική συνάρτηση

2.1.5 Σημείο αναφοράς κατευθυντήριας ράβδου (Tie Rod Location)

Στον σχεδιασμό ενός συνόλου ανάρτησης, η τοποθεσία της κατευθυντήριας ράβδου χρειάζεται να θεωρηθεί μείζονος σημασίας, κυρίως για τον λόγο του ότι το φαινόμενο αναπήδησης του πηδαλίου (Bump steer effect) πρέπει να περιοριστεί στο λιγότερο δυνατόν από την εμφάνιση του και μετέπειτα.

Εννοιολογικά, το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται ως την αλλαγή της γωνίας σύγκλισης των τροχών (Toe in Angle) για την αιτία του ταξιδιού της ρόδας (Wheel Travel).

Με πρωταρχικό σκοπό την μείωση της ανώμαλης αναπήδησης του πηδαλίου, συναρτήσκει πάντοτε με την αναπήδηση του οχήματος, στην υπόθεση πως οι μπροστά τροχοί του οχήματος συναντούν κάποιο τροχοπέδη που αναγκάζει το ίδιο σε αλλαγή από την αρχική ή επιθυμητή πορεία.

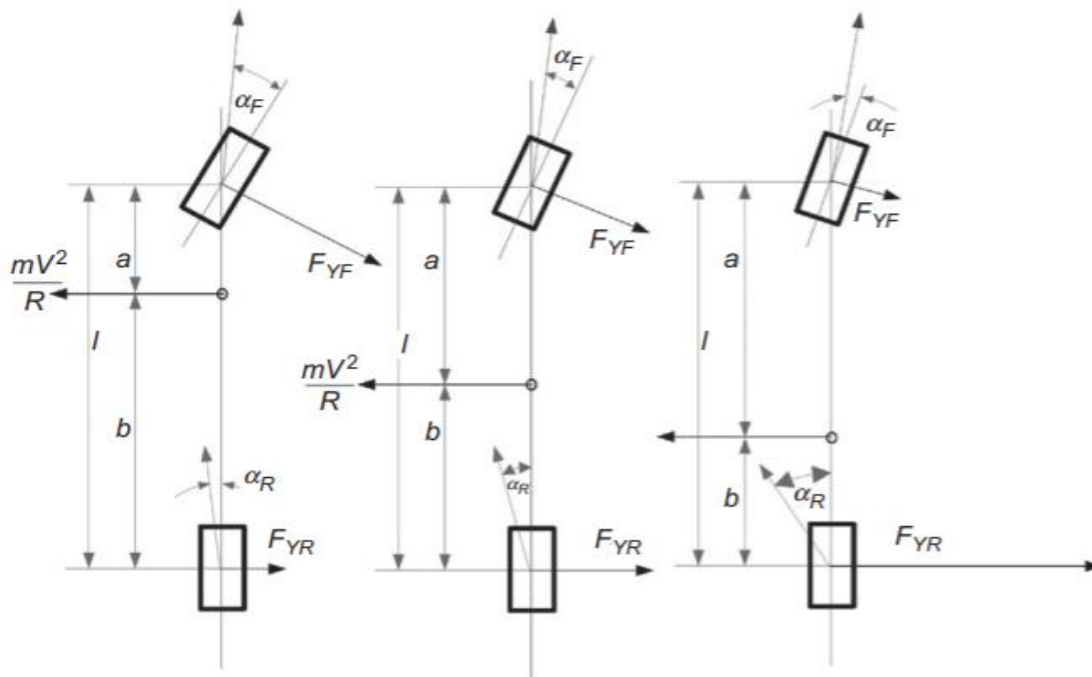
Ο απλούστερος τρόπος να αποφευχθεί στον μεγαλύτερο βαθμό αυτή η απότομη αλλαγή πορείας είναι η σχεδιαστική ομάδα να αναλογιστεί στον εννοιολογικό σχεδιασμό (Conceptual Design) πως το σημείο αναφοράς της κατευθυντήριας ράβδου είναι να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο (plane) στο τριαξονικό σύστημα με το πάνω η το κάτω ψαλίδι (A – arm).

Επιπλέον, η τοποθέτηση της κατευθυντήριας ράβδου αποτελεί πολλές φορές άσκηση όξυνσης των εγκεφαλικών νευρώνων των μηχανικών, κυρίως διότι η απόφαση αυτή θα επηρεάζει την οδική συμπεριφορά του οχήματος κατά την διάρκεια όλης της αγωνιστικής περιόδου.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου η ράβδος βρίσκεται επάνω και πίσω ή κάτω και μπροστά από το κέντρο της ρόδας τότε παρουσιάζεται οδική συμπεριφορά με υποστροφή, φυσικά, με την προϋπόθεση πως ο οδηγός δεσμεύεται υπό το καθεστώς στροφής κατά την αγωνιστική του οδήγηση.

Στον αντίποδα, η υπέρστροφή εμφανίζεται, όταν τα ψαλίδια είναι πακτωμένα με τους συνδέσμους με τέτοιο τρόπο που δημιουργείται υψηλότερη τιμή σε δυσκαμψία.

2.1.6 Τα τρία καθεστώτα της αντίδρασης του τιμονιού



Εικόνα 2.4 – Οι συνθήκες που καθορίζουν την οδηγική συμπεριφορά.

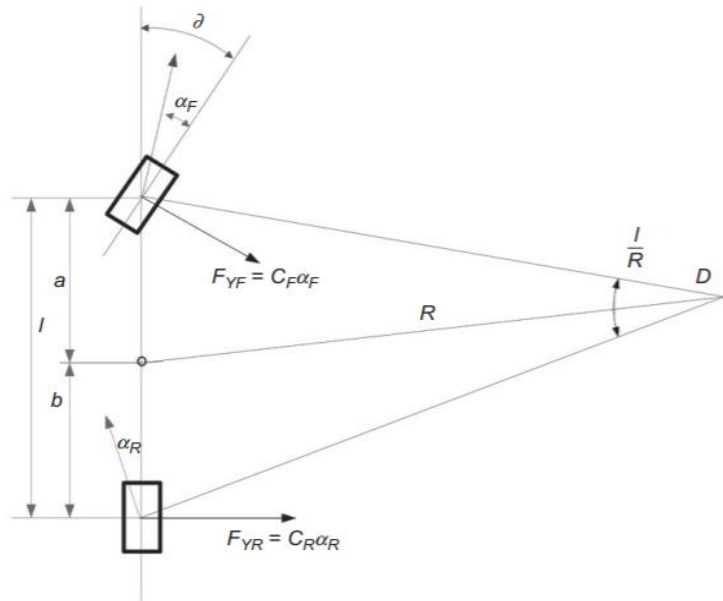
Στο αποτυπωμένο σκαρίφημα καταγράφεται, εκτός των υπολοίπων, η μεταβολή στην επιτάχυνση των μπροστά τροχών (α_F) και των πίσω (α_R). Στην συνέχεια, όμοια σκεπτόμενοι με τα παραπάνω, το κέντρο της βαρύτητας του οχήματος χρειάζεται να είναι στο γεωμετρικό κέντρο του σασί.

Στην αριστερή και πρώτη περίπτωση, το κέντρο της βαρύτητας (Centre of Gravity, CoG) μπροστά από το γεωμετρικό κέντρο του αμαξώματος, στιγματίζει πως η α_F θα είναι η μεγαλύτερη από την τιμή της α_R .

Στην μεσαία και δεύτερη περίπτωση, το κέντρο της βαρύτητας εφαιτόμενο με το γεωμετρικό κέντρο του σασί, παρουσιάζει την ισότητα μεταξύ της α_F και της α_R .

Στην δεξιά και τρίτη περίπτωση, το κέντρο της βαρύτητας βρίσκεται, όπως ακριβώς και φαίνεται στην εικόνα, πίσω από το γεωμετρικό κέντρο του αμαξώματος, το οποίο σημαίνει πως η α_F θα είναι μικρότερη από την α_R .

Στην Εικόνα 2.5, διαπιστώνεται επίσης η μετακίνηση του κέντρου βαρύτητας δημιουργεί διαφοροποιήσεις τέτοιες που επηρεάζουν τις γωνίες ολίσθησης. Εάν επιστήσουμε την προσοχή μας στην θεμελιώδη εξίσωση που εξηγεί την επιθυμητή γωνία του μηχανοκίνητου σε μια στροφή, παρατηρούμε πως εάν η αφαίρεση της μπροστά και πίσω επιτάχυνσης είναι με θετική φυσική



Εικόνα 2.5 – Σημειακή ισορροπία, πάνω σε στροφή

τιμή, θα χρειαστεί μεγαλύτερη γωνία στρέψης από τον οδηγό ώστε να πραγματοποιηθεί η ιδανική στροφή, και αντιθέτως. Η εξίσωση, δίνεται ως έχει :

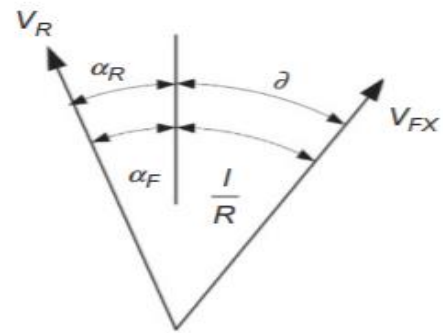
$$\delta = \frac{1}{R} + \alpha_F - \alpha_R$$

Οι τρεις ξεχωριστές εκδοχές που μπορεί να βρεθεί ένα κινούμενο όχημα κατά την εκτέλεση μιας στροφής, όπως είναι εύκολα διακριτό, επηρεάζουν στατικά τα μέρη που απαρτίζουν την ανάρτηση και για το γεγονός αυτό, θα εξεταστούν με περισσότερη λεπτομέρεια παρακάτω.

2.1.6.1 Ουδέτερη στροφή του οχήματος (Δεύτερη περίπτωση).

Σκοπούμενοι, την μη διάσπαση της προσοχής του αναγνώστη, ξεκινούμε την ανάλυση με το απλούστερο σενάριο, όπου το κινούμενο μέσο έχει σαν κέντρο βαρύτητας το γεωμετρικό κέντρο του σασί. Στην περίπτωση αυτή, εάν το διάνυσμα της ταχύτητας αυξηθεί το ίδιο θα συμβεί και στο διάνυσμα των δυνάμεων. Ακόμα, οι γωνίες ολίσθησης όσο και η ακτίνα των δύο διανυσμάτων δεν θα μεταβληθεί από σταθερή στροφή του τιμονιού.

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται η γωνία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ταχύτητας στους μπροστά και τους πίσω άξονες ($V_{Rear}, V_{Front,x}$). Αφού καλύπτουμε το σενάριο όπου ισχύει η ισότητα στο μέτρο αύξησης των επιταχύνσεων, έτσι το δ και το $1/R$ θα παραμείνουν και αυτά με την σειρά τους όμοια.



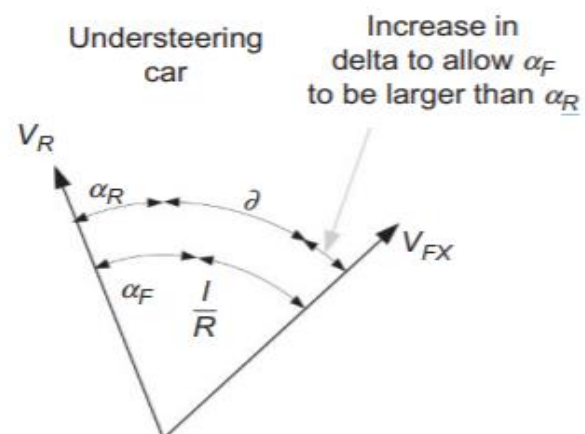
Εικόνα 2.6 – Γωνίες ουδέτερης στροφής

2.1.6.2 Υποστροφή του οχήματος – Understeering Car (Πρώτη περίπτωση)

Όταν τα προαναφερόμενα της πρώτης περίπτωσης από την Εικόνα 2.4, εφαρμοστούν το όχημα θα καλεστεί να διαγράψει ίδια γωνία (δ) με την ουδέτερη περίπτωση, όμως θα χρειαστεί πολύ μεγαλύτερη κλίση στο τιμόνι από τον οδηγό.

Από τις παραπάνω εξισώσεις περιμένουμε το φαινόμενο αυτό να εξαρτάται από την ταχύτητα που αναπτύσσεται στο όχημα κατά την διάρκεια όπου εκτελεί κίνηση προς την στροφή, διότι όσο μεγαλύτερο το μέτρο από το διάνυσμα της ταχύτητας τόσο και αυξάνονται οι κάθετες δυνάμεις στην ρόδα.

Επειδή λοιπόν η γωνία $1/R$ δρα σαν σταθερά, θα χρειαστεί τον ρόλο της μεταβαλλόμενης τιμής να την πάρει η γωνία στροφής (δ). Επομένως, μετακινώντας το κέντρο της βαρύτητας μπροστά δημιουργεί το φαινόμενο της υποστροφής. Όπως ακριβώς φαίνεται και στην Εικόνα 2.7

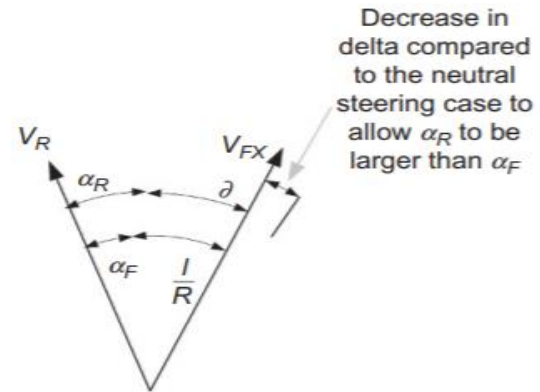


Εικόνα 2.7 – Γωνία στροφής, στην περίπτωση της υποστροφής

2.1.6.3 Υπερστροφή του οχήματος – Oversteering Car (Τρίτη περίπτωση)

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται πως η δύναμη στους πίσω τροχούς του αμαξώματος θα είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στους μπροστά τροχούς.

Παρόλο αυτό, το συνολικό άθροισμα των δυνάμεων (force equilibrium) παραμένει ως έχει, κάτι το οποίο οδηγεί το αυτοκίνητο να δημιουργήσει μια πορεία στροφής περισσότερο από όση χρειάζεται. Παρόμοια με την πρώτη περίπτωση, το φαινόμενο εξαρτάται από το διάνυσμα της ταχύτητας.



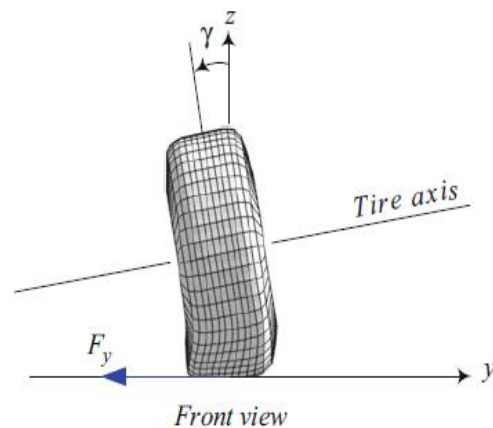
Εικόνα 2.8 – γωνίες στροφής, στην περίπτωση της υπέρστροφής

2.1.7 Κύρτωμα ρόδας (Camber Angle)

Η γωνία του κυρτώματος της ρόδας (camber), γ , είναι η μεταβαλλόμενη αυτή από το επίπεδο της ρόδας (tire-plane) στον κατακόρυφο άξονα z , που ορίζεται στην εικόνα 2.9. Η γωνία (γ) χρειάζεται εξαιρετική προσοχή, όταν αναφερόμαστε στην αγωνιστική οδήγηση όπου οι επιδόσεις εάν δεν βρίσκονται στο ανώτατο όριο δεν είναι αρκετές.

Επίσης, η σημασία της έγκειται από την δημιουργία της προσκείμενης στην επιφάνεια της ρόδας και το έδαφος δύναμη F_y (Camber thrust).

Εικονογραφείται η μπροστά όψη ενός σκαριφήματος ελαστικού, μιας θετικής γωνίας ορισμένη από το διάνυσμα της δύναμης F_y και τον άξονα Z .



Εικόνα 2.9 – Κύρτωμα ρόδας υπό το καθεστώς προσκείμενης δύναμη

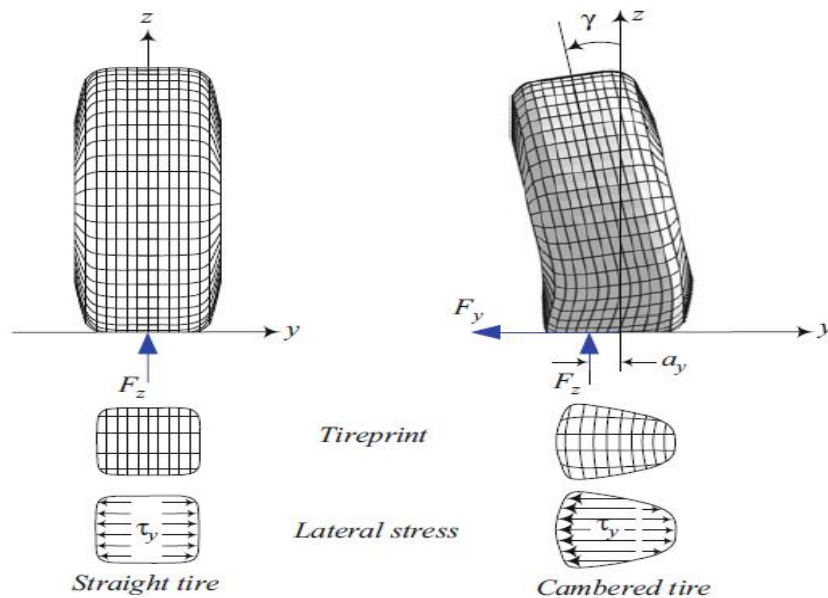
$$F_y = F_y \cdot \hat{j} , \frac{F_y}{F_z} = -C_\gamma \cdot S \cdot (\gamma - \gamma_s) \quad (2.5,6)$$

Όπου η μεταβλητή C_γ , χαρακτηρίζεται στο φάσμα των αλγοριθμικών συναρτήσεων, και ονομάζεται η δυσκαμψία της παραμόρφωσης του ελαστικού ως προς την γεωμετρικότητα του. Δίνεται από την εξίσωση :

$$C_\gamma = \frac{1}{F_z} \cdot \lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\partial(-F_y)}{\partial \gamma} \quad (2.7)$$

Όταν το ελαστικό ολισθαίνει, το αποτέλεσμα του κυρτώματος, μεταφέρεται μπροστά με απόσταση a_{xy} .

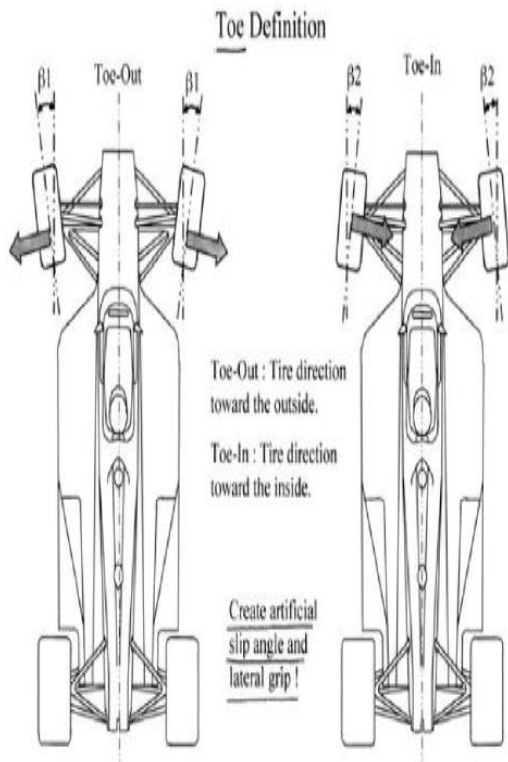
Η απόρροια της εικόνας 2.10 στον άξονα Z, ονομάζεται ροπή κυρτώματος (*camber torque*) και η απόσταση a_{xy} φέρει ονομασία μονοπάτι κυρτώματος (*camber trail*).



Εικόνα 2.10 – Εφαρμοσμένο κύρτωμα ελαστικού

2.1.8 Σύγκλιση & απόκλιση τροχών (Toe in & Toe out)

Στην μπροστά όψη, η σύγκλιση των τροχών προς το γεωμετρικό κέντρο του σασί χρησιμοποιείται για να μειωθούν οι οδηγικές ασυμμετρίες, που μπορεί να προκύψουν στα πλαίσια μιας απαιτητικής οδήγησης.



Στους πίσω τροχούς, που συναντάται συνήθως το φαινόμενο της απόκλισης (Toe out), αφορά την φορά αυτών προς τα εκτός από το γεωμετρικό κέντρο του αμαξώματος. Φυσικά, αναφερόμαστε για γωνίες της τάξης των 0 με 0.5 μοιρών. Σαν απότοκο, τείνει το όχημα σε μια πορεία υπερστροφής κάτω από το καθεστώς στροφής για τον λόγο πως οι εξωτερική πίσω ρόδα δέχεται υψηλότερα φορτία δυνάμεων και τάσεων.

Η ελάχιστη γωνία σύγκλισης δεν ενισχύει το φαινόμενο της υπερθέρμανσης των ελαστικών και μετέπειτα στην δυσχέρεια της ποιότητας αυτών.

Εικόνα 2.11 – Σύγκλιση τροχών (Toe in)

2.2 Παρουσίαση σχεδιασμού συστήματος ανάρτησης

Με στόχο την αποτύπωση της ανάρτησης σε τρισδιάστατο περιβάλλον (Computer Aided Design), εργαστήκαμε πάνω στο σχεδιαστικό πακέτο που μας δίνεται από το SolidWorks.

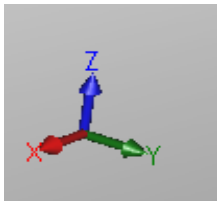
Εν αρχή, χρειάστηκε να ορίσουμε το σκαρίφημα μας στον τρισδιάστατο χώρο μέσω δυσδιάστατων σχεδίων.

Η ενέργεια αυτή φάνηκε εξαιρετικά χρήσιμη στην μετέπειτα πορεία της διασαφήνισης του χώρου και στην διαμόρφωση των σταθερών σημείων (hardpoints), καθώς όμως και για την

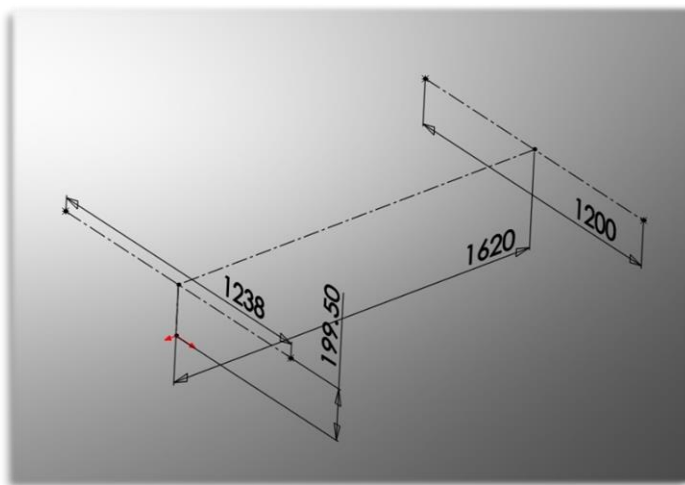
ευκολία μας στην ολοκλήρωση της συνύπαρξης των μερών σαν ένα καθολικό σχέδιο (assembly).

Στην συνέχεια, θα προβούμε στον διαχωρισμό της παρουσίασης των μερών που απαρτίζουν το σύνολο της εμπρός και πίσω ανάρτησης, επεξηγώντας την φορά την σημασία, τις ιδιότητες και τον γεωμετρικό σκεπτικισμό που χρησιμοποιήθηκε έως ότου να φτάσουμε στο επιθυμητό απότοκο.

2.2.1 Διαστασιολόγηση σκαριφήματος (Conceptual Design)



Οποιαδήποτε σχεδιαστική παρέμβαση έχει συμβεί πρώτα με το σκεπτικό να βρίσκεται σε συμφωνία με τους κανονισμούς που παρέχονται από τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς του Formula Student. Το πρωταρχικό μέλημα οποιασδήποτε σχεδιαστικής ομάδας είναι να δημιουργήσει σχέδια που να βρίσκονται μέσα στα όρια των κανονισμών με σκοπό το όχημα να βρίσκεται σε θέση να διαγωνιστεί, ανταγωνιστικά. Στην πάνω εικόνα ορίζεται ο ακολουθούμενος προσανατολισμός



Εικόνα 2.12 – Σκαρίφημα της γεωμετρίας του οχήματος.

όπως διακρίνεται στην εικόνα 2.12 η απόσταση του μεταξονίου (Wheelbase) φέρει μήκος ίσο με 1620 mm και η κάθετη απόσταση του αμαξώματος με το έδαφος είναι 199.5 mm. Οι γεωμετρικές τιμές αυτές επιλέχθηκαν με το σκεπτικό του θεωρητικού υπόβαθρου, όπως

προαναφέρθηκε. Δηλαδή, αφού η τιμή του είναι μεγαλύτερη από

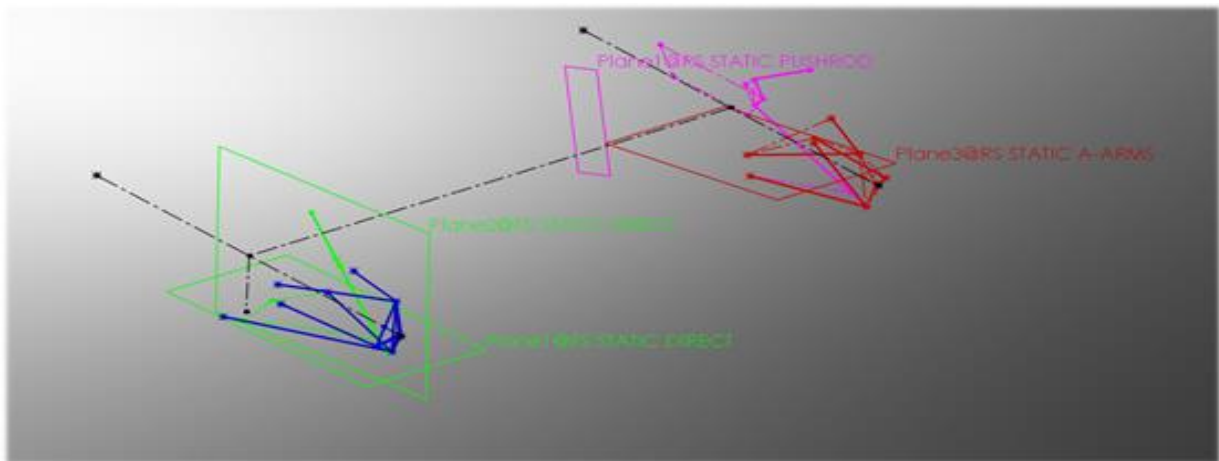
αυτή του ορίου που δίνεται από την επίσημη σελίδα του διαγωνισμού FSAE Germany

(T 2.7.1 The vehicle must have a wheelbase of at least 1525 mm.) τότε οι δυνάμεις στους μπροστά και πίσω άξονες θα μεταφέρονται με μικρότερη τιμή από αυτή του ελάχιστου ορίου.

2.2.2 Δυσδιάστατη μορφή ανάρτησης σε τριαξονικό σύστημα

Σε συνέχεια δημιουργίας της βάσης του αμαξώματος όπως ήδη παρουσιάσαμε, θα χρειαστεί να επισυνάψουμε τα μέλη που απαρτίζουν το εμπρός και πίσω σύστημα της ανάρτησης. Αυτό θα συμβεί με την βοήθεια του τρισδιάστατου περιβάλλοντος.

Η διεργασία αυτή θα πραγματοποιηθεί σε πολυδιάστατα σκέλη με σκοπό να υπάρχει πληθώρα αναφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε μέρους της ανάρτησης.



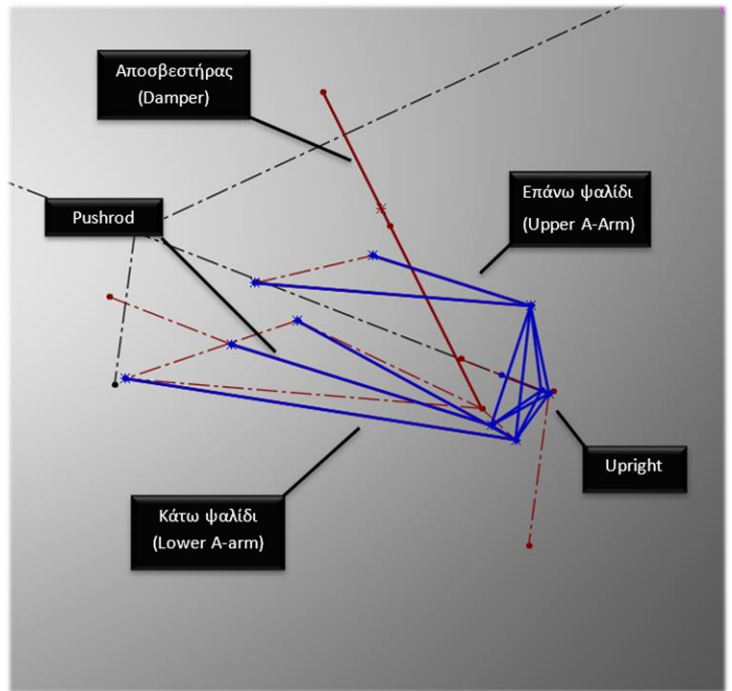
Εικόνα 2.13 – Γεωμετρική προσέγγιση δυσδιάστατης ανάρτησης σε μορφή τριαξονικού συστήματος

2.2.2.1 Εμπρός σύστημα ανάρτησης (Front Suspension)

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ποικίλα μέρη και η αποσαφήνιση αυτών θα συμβεί με την βοήθεια της οπτικοποίησης από την εικόνα 2.13.

Όπως και προηγουμένως έχει οριστικοποιηθεί, η ανάρτηση που θα σχεδιαστεί είναι της μορφής διπλών ψαλιδιών (Double Wishbone) και επιλέχθηκε αυτός ο τύπος για να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε με ασφάλεια το χαμηλότερο κέντρο βαρύτητας στο αμάξωμα.

Κρίνεται μέγιστης σημασίας η πραγματοποίηση δυσδιάστατης γεωμετρίας σε τριαξονικό σύστημα επιπέδων, για τον λόγο του ότι υπάρχει η δυνατότητα μετέπειτα την πραγματοποίηση όλων των σχεδίων, να χρειαστεί κάποια αλλαγή στην θέση των σημείων (hardpoints) που θα βοηθήσει ίσως σε περισσότερο αξιόπιστη κινηματική ανάλυση. Επίσης, στην εικόνα 2.13 ξεχωρίζει σε χρώμα κόκκινο σκούρο η γεωμετρία του αποσβεστήρα και του άξονα που συνδέεται αυτός με το κάτω ψαλίδι.

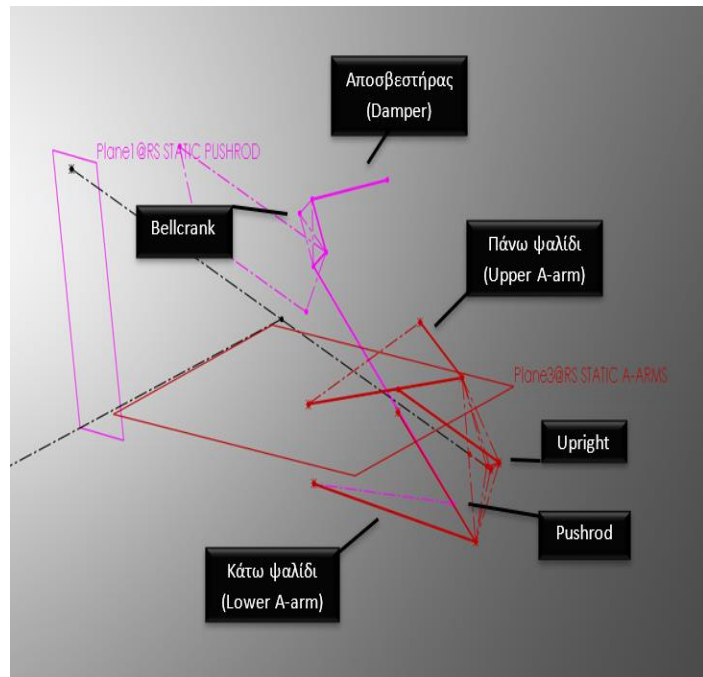


Εικόνα 2.14 – Εμπρός σύστημα ανάρτησης με εμφανιζόμενα μέρη

2.2.2.2 Πίσω σύστημα ανάρτησης (Rear Suspension)

Όμοια με το εμπρός σύστημα ανάρτησης, τα σημεία που ενώνουν τα ψαλίδια βρίσκονται για να εξυπηρετούν την μορφή των διπλών ψαλιδιών. Αντιθετικά με την παραπάνω δυσδιάστατη μορφοποίηση, το ελατήριο συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα παράλληλα με το έδαφος και όχι υπό το καθεστώς γωνίας.

Η γεωμετρική ιδιαιτερότητα αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια ενός ιδιαίτερου στηρίγματος, ονομαζόμενο μογλοβραχίονας ζυγοστάθμισης (Bellcrank), το οποίο συνεισφέρει πρώτιστα στην στήριξη του αποσβεστήρα με τον άξονα και δευτερεύοντα με την σύνδεση των αναρτήσεων μεταξύ αριστερής και δεξιάς ρόδας. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στην εικόνα 2.14.



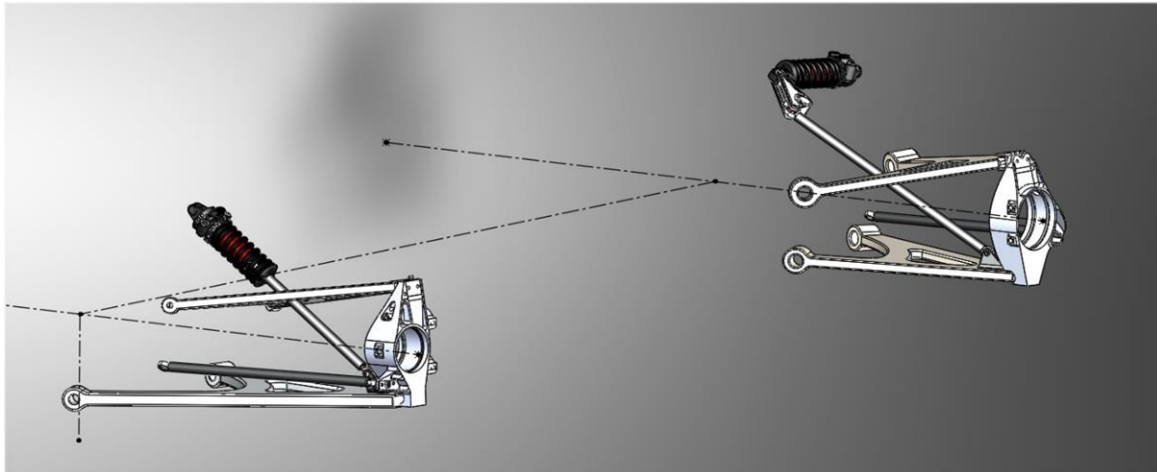
Εικόνα 2.15 – Οπίσθιο σύστημα δυσδιάστατης ανάρτησης.

Προφανέστατα, το σχήμα του upright χρειάζεται να διαφέρει συγκριτικά με αυτό της εμπρός ανάρτησης, για τον λόγο του ότι ο πίσω άξονας δεν κατέχει έργο απλώς έργο στήριξης, αλλά δέχεται και στρεπτικές δυνάμεις από την ροπή της κινητήριας δύναμης (moter), όπως ακριβώς και θα αναλυθεί και στο κεφάλαιο 3.

2.2.3 Τρισδιάστατη απεικόνιση σε περιβάλλον C.A.D

Η μορφοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου σε υπολογιστικό πακέτο σχεδίασης C.A.D (Computer Aided Design) χρησιμοποιείται τις τελευταίες δεκαετίες σε κάθε παραγωγική μονάδα πρωτοτύπων με στόχο να οπτικοποιηθεί μια ιδέα, στα πλαίσια της μηχανολογικής επιστήμης, με χαμηλό κόστος και δυνατότητα εμφάνισης πιθανού λάθους χωρίς αυτό να προκαλεί ζημία στην εταιρία ή τον ιδιώτη κατασκευαστή.

Με την πρόοδο των υπολογιστικών μερών (μητρικών, γραφικών καρτών και λοιπών), δεν θα ήταν δυνατόν να μην αναπτυχθεί και η δυνατότητα των υπολογιστικών προγραμμάτων σχεδίασης. Στις μέρες μας, πακέτα τύπου SolidWorks, Catia, Siemens NX κατέχουν δυνατότητες όπου μπορεί σε υποσυστήματα αυτών να προβούμε σε πλήρη προσομοίωση, τόσο στατική αλλά και κινηματική με ελάχιστη ακρίβεια από τις πραγματικές μετρήσεις.



Εικόνα 2.16 – Αποτύπωση πλήρους συναρμολόγησης των μερών της ανάρτησης, Ισομετρική όψη

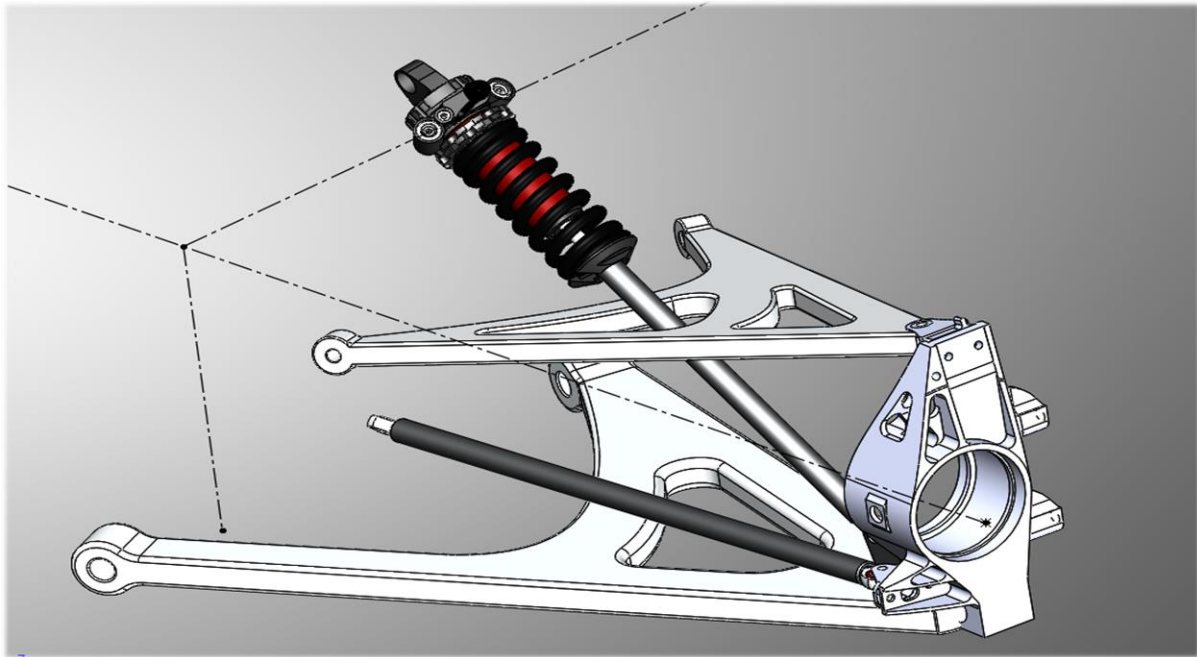
Η ύπαρξη της εικόνας 2.16 αποτελεί την ολοκληρωμένη αποτύπωση της ανάρτησης, ώστε να γίνει αντιληπτό οπτικά για το πως κρίνεται επιθυμητό να κατασκευαστούν τα μέρη που συναρμολογούν αυτήν. Για την κατανόηση του σχεδίου (Assembly), αρχικά θα παρουσιάσουμε το κάθε κομμάτι αυτού του συνόλου ξεχωριστά εξηγώντας την φορά, τις ιδιότητες και τον ρόλο που καλούνται να καλύψουν, στα πλαίσια της δημιουργίας μιας πλήρους λειτουργικής ανάρτησης.

2.2.4 Μπροστινή διάταξη ανάρτησης (Front Suspension Assembly)

Η σχεδιαστική φιλοσοφία που διέπει την κατασκευή ενός αγωνιστικού οχήματος θέλει την ανάρτηση να αποτελεί παράγοντα στην οδηγική συμπεριφορά του οχήματος.

Η παραπάνω έκφραση δηλώνει έναν πολυσύνθετο τρόπο σκέψης που χρειάζεται να έχουν οι μηχανικοί, αφού η οδηγική συμπεριφορά επηρεάζεται εκτός από την κινηματική γεωμετρία και από την αεροδυναμική.

Για τον λόγο αυτό, συνέβη προσπάθεια ώστε ο σχεδιασμός της διάταξης ανάρτησης να δημιουργεί ουδέτερη πίεση (οι κάθετες δυνάμεις, άνωση και άνωση να αλληλα εξουδετερώνονται).

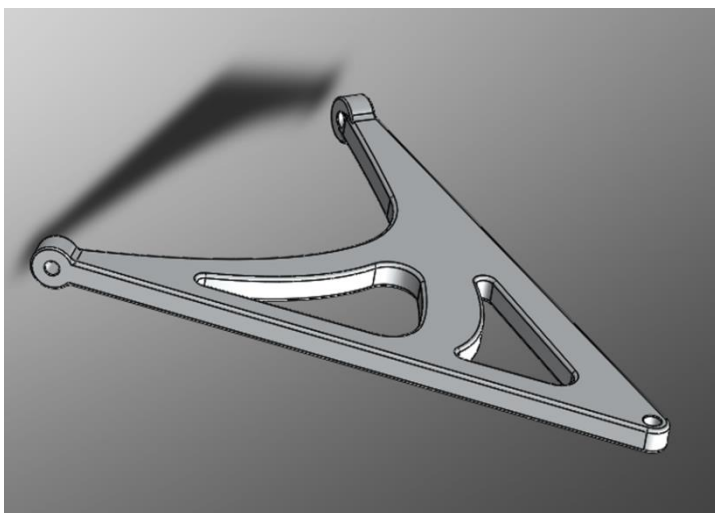


Εικόνα 2.17 – Ισομετρική όψη, μπροστινού συστήματος ανάρτησης

Στην συνέχεια, διασαφηνίζονται τα επιμελούς τμήματα της εικόνας 2.17, με τέτοιον τρόπο ώστε οι αρθρώσεις και οι συναρμογές που συνεργάζονται με τα ελατήρια και τα αμορτισέρ να πληρούν τις θεωρητικές προϋποθέσεις για τον έλεγχο της κατακόρυφης ταλάντωσης των τροχών και την συνεπαγόμενη αυξομείωση της απόστασης τους από το αναρτημένο κυρίως σώμα του οχήματος χωρίς να δημιουργούνται απορίες στον αναγνώστη για το ποιο μέρος της διάταξης εργάζεται για το κάθε επιθυμητό απότοκο.

2.2.4.1 Άνω & κάτω ψαλίδι στην εμπρός ανάρτηση (Upper & Lower A-arm)

Οδηγούμενοι από τον απαραίτητο σχεδιαστικό συμβιβασμό μεταξύ χωροταξίας και επιθυμητού στόχου δυσκαμψιών οι επιλογές που έγιναν στο άνω ψαλίδι οδήγησαν στην διαμόρφωση του, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18 – Ισομετρική όψη, άνω ψαλιδιού στην εμπρός ανάρτηση

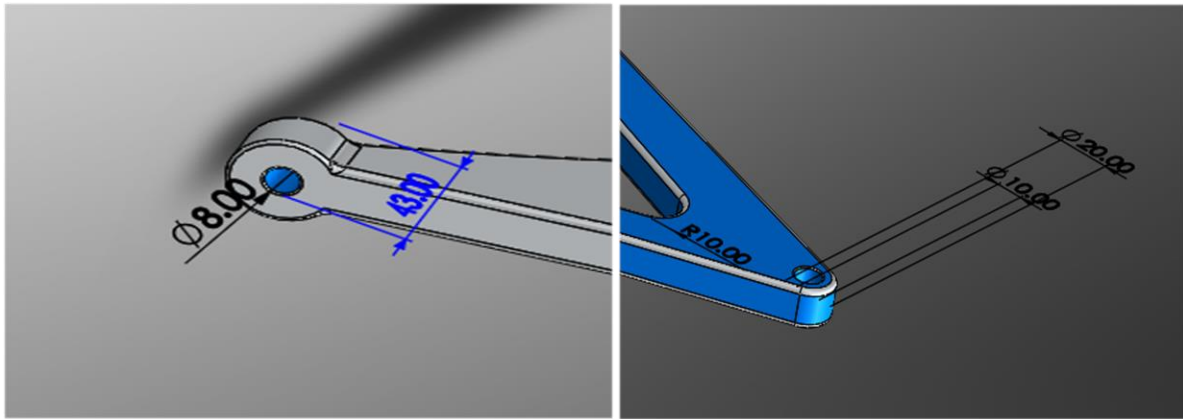
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση της πρακτικότητας που φέρεται να προσδίδεται στο άνω ψαλίδι, η οποία κατέχει σαν κυρίαρχο σκοπό την στήριξη του αμαξώματος με το εκτελεστικό μέσο που είναι ο τροχός. Μετέπειτα, αποφεύχθηκε η χρησιμοποίηση ράβδων στο τρίγωνο των τριών οπών επαφής.

Η σκεπτική πίσω από την απόφαση της μορφής αυτής ήταν, πρώτιστα, η ασφάλεια για την μη ευκολία σε αστοχία, κυρίως λόγω του φαινομένου λύγισης, από την άσκηση θλιπτικών φορτίων, που παρατηρείται σε πληθώρα κατασκευών με εμφάνιση ράβδων.

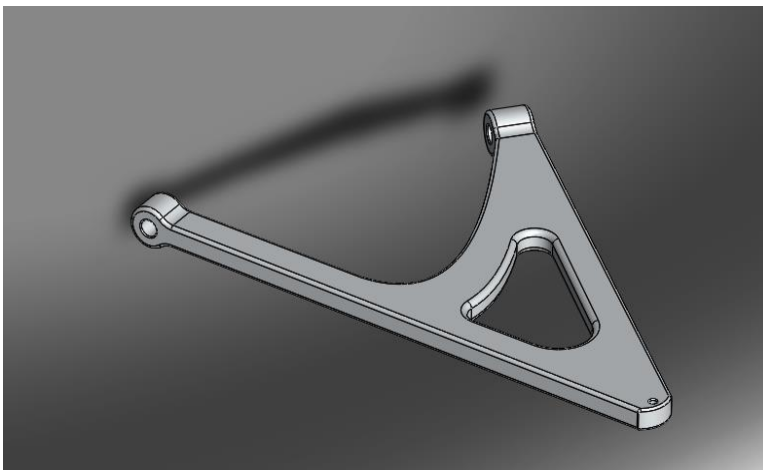
Επιπλέον, το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε δεν είναι σύνθετο, όπως συμβαίνει και συνήθως, σε τέτοιες κατασκευές τα τελευταία 40 έτη, διότι η θεματική της εργασίας αυτής δεν έχει σαν κύριο σκοπό την ανάλυση της μηχανικής των σύνθετων υλικών αλλά την ανάλυση της κινηματικής και της στατικής ισοτροπικού υλικού, εν παραδείγματι το αλουμίνιο T9-7075 (SN).

Στην εικόνα 2.18, τα τριγωνοειδής σχήματα, που φαίνεται να λείπει υλικό χρησιμοποιήθηκαν με το μέλημα της ελάφρυνσης του βάρους, έναν από τους θεμελιώδης παράγοντες που σχετίζονται με την γενικότερη βελτίωση της απόδοσης του οχήματος.

Συνεχίζοντας, στις εικόνες 2.19, 2.20 φαίνονται οι διαστάσεις των οπών αντίστοιχα για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης στο πραγματικό μέγεθος. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως στο παράρτημα της διπλωματικής θα δοθούν πλήρες σχέδια με την κατάλληλη διαστασιολόγηση και τις ανοχές, όπου και αυτές χρειάζονται.



Εικόνες 2.19, 2.20 – Βοηθητικό υλικό κατανόησης του πραγματικού μεγέθους των οπών και του άνω ψαλιδίου



Εικόνα 2.21 – Ισομετρική όψη, κάτω ψαλιδίου στην εμπρός ανάρτηση

Γίνεται σε αυτό το σημείο αντιληπτό πως η μορφή του κάτω ψαλιδιού θα είναι παρόμοια με αυτή του άνω. Φυσικά, με διαφορές τέτοιες που να εξυπηρετούν τους σκοπούς ύπαρξής του.

Όπως φανερώνει η εικόνα 2.20, υφίσταται μεγαλύτερο κενό μεταξύ του τμήματος που

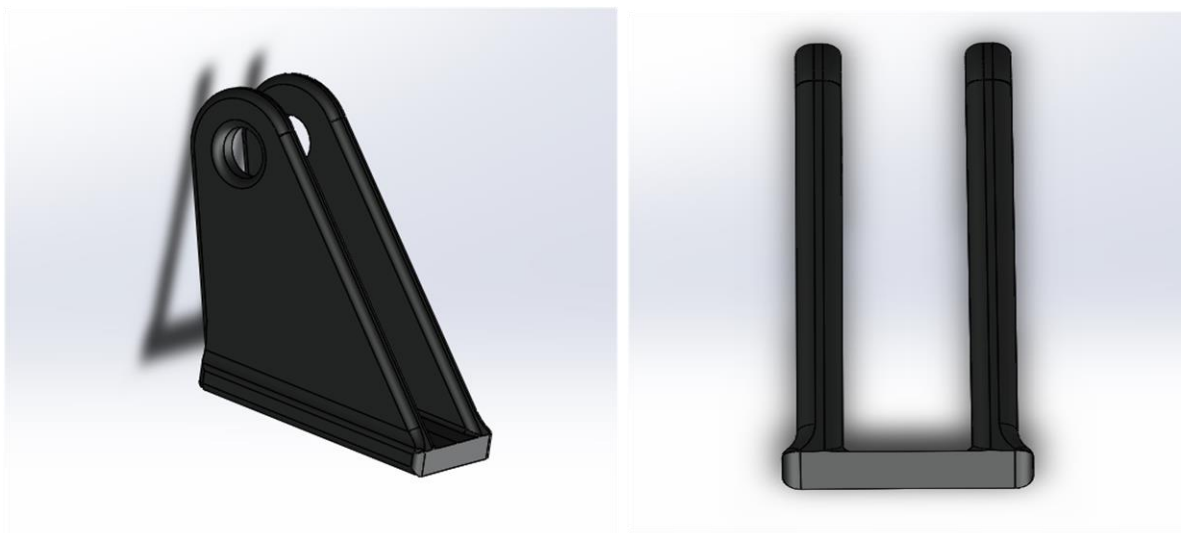
συνδέεται με το upright και του τριγωνοειδούς κενού για να υπάρχει η δυνατότητα να προσθέσουμε με την διαδικασία της συγκόλλησης TIG – AC στηρίγματα για να συνδέει το ψαλίδι με τον άξονα Pushrod.

Προστίθενται, στις εικόνες (2.21, 2.22) το πρότυπο στήριγμα (bracket), όπου θα το χρησιμοποιήσουμε, εφόσον συγκολληθεί κατάλληλα στο επάνω μέρος του κάτω ψαλιδιού.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση του, η οποία θα είναι να συνδέει τον πακτωμένο άξονα του αποσβεστήρα με το ψαλίδι.

Ακόμα, η οπή και το φινίρισμα στην άκρη του ψαλιδιού εφαρμόστηκε με τον σκοπό να συμβαδίζει με τις σχεδιαστικές ανάγκες του upright, όπως και θα εξηγήσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια στην συνέχεια.

Όπως προαναφέραμε το στήριγμα υφίσταται ως ξεχωριστό κομμάτι ως προς την παραγωγή του μέσω εργαλειομηχανών CNC (Computerized Numerical Control), όμως στην προκείμενη περίπτωση θα το ορίσουμε σαν προέκταση του κάτω ψαλιδιού.



Εικόνες 2.22, 2.23 –Ισομετρική & μπροστά όψη, Στήριγμα σύνδεσης ψαλιδιού και αποσβεστήρα

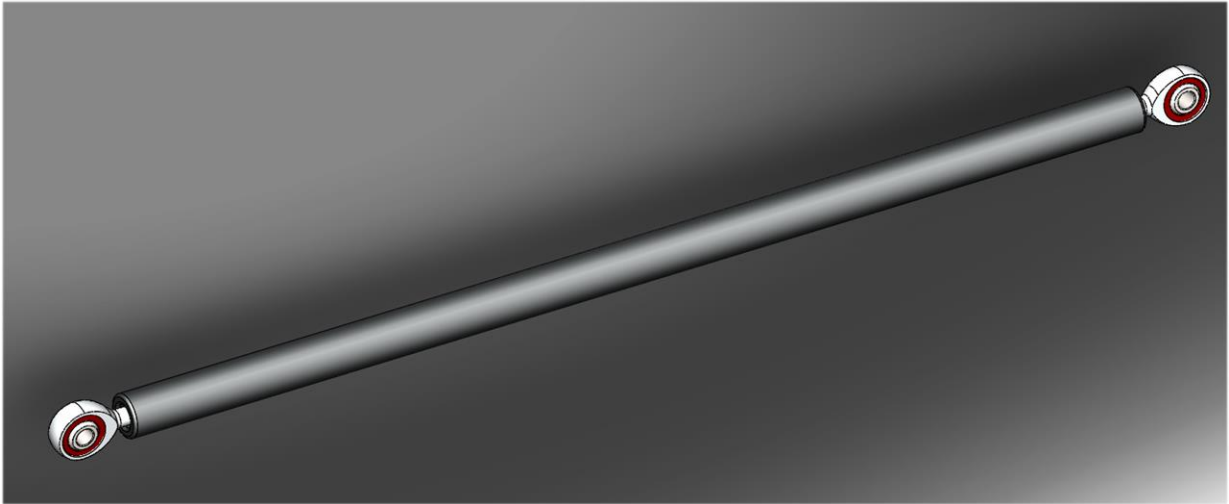
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το αλουμίνιο τύπου T9 – 7075 (SN), ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί ομαλή συγκόλληση αυτού και του ψαλιδιού. Η γεωμετρία αυτού είναι κατάλληλη ώστε να εφάπτεται ανάμεσα από τις οπές ο κοχλίας που θα ενώνει τον άξονα του αποσβεστήρα.

Γενικώς, επιλέχθηκε το στήριγμα να φέρει σχήμα τέτοιο ώστε να είναι ικανό να δεχθεί θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις υπό γωνία σε σχέση με την βάση του.

2.2.4.2 Ράβδος διεύθυνσης στην εμπρός ανάρτηση (Pushrod)

Η ράβδος που θα αναφερθούμε κατέχει εξαιρετική σημασία για το σύστημα της ανάρτησης για τον απλούστατο λόγο πως συνδέει τον τροχό με την κρεμαγιέρα και σε συνέχεια με τα συγκροτημένα μέρη που απαρτίζουν το τιμόνι.

Γίνεται λοιπόν εμφανές, με βάση τα συνήθη κριτήρια σχεδιασμού ενός πρωτότυπου αγωνιστικού οχήματος πως η μορφή της ράβδου θα συμβεί με βασικά πρότυπα, παραδείγματος χάριν όπως φανερώνεται στην εικόνα 2.23



Εικόνα 2.24 – Ισομετρική όψη, ράβδου διεύθυνσης (pushrod) με βιδωτούς κοχλίες τύπου Aurora Bearings M6

Η ράβδος που χρησιμοποιείται προσομοιώθηκε με υλικό αλουμινίου και εφαρμόστηκε σπειρώμα M6 ώστε να συνδέσουμε σε αυτόν κοχλίες τύπου Aurora. Πιο συγκεκριμένα, όταν το όχημα μας διέρχεται πάνω από ανωμαλίες της ασφάλτου η δυσκαμψία επάνω στον τροχό μεταδίδεται στα υπόλοιπα μέρη της ανάρτησης, ένα από αυτά είναι η ράβδος διεύθυνσης.

Η δυσκαμψία στην ράβδο δημιουργεί θλιπτικές τάσεις τέτοιες όπου είναι δυνατόν, εάν το υλικό μας είναι όλκιμο και κατέχει μεγάλο μήκος, να παρουσιαστεί και το φαινόμενο του λυγισμού (Buckling effect).

Προτιμώνται τα ίδια μέρη και για την σύνδεση του αποσβεστήρα με το Upright ακόμα και εάν ένα από τα μειονεκτήματα της μορφής αυτής είναι η δυσκολότερη πρόσβαση στα ελαστικά στοιχεία και στους αποσβεστήρες, σε περίπτωση ανάγκης ρυθμίσεων.

2.2.4.3 Μικροσύστημα αποσβεστήρα στην εμπρός ανάρτηση (Damper)

Η επίδραση των αποσβεστήρων κατανοείται από τις μετατοπίσεις κλίσης και πρόνευσης της αναρτώμενης μάζας που δημιουργούνται, φυσικά, από τις φορτίσεις της κινηματικής. Οι διατάξεις αυτές παράγουν δυνάμεις μόνο υπό ταχύτητα κάτι το οποίο επηρεάζει την δυναμική του οχήματος μόνο σε μεταβατική κατάσταση.

Συνήθως, ονομάζονται μεταξύ των μηχανικών και δυναμικά ελατήρια μεταβατικής κατάστασης, τα οποία επηρεάζουν τον ρυθμό και τον χρόνο που θα ολοκληρωθεί η ελαστική μεταφορά βάρους και η τελική μετατόπιση της αναρτώμενης μάζας.

Φυσικά, επηρεάζουν και τον χρόνο που θα χρειαστεί το σασί να φτάσει στο πλάτος κλίσης και πρόνευσης υπό φορτίο επιταχύνσεων ή απότομου φρεναρίσματος. Να σημειωθεί μεταξύ των άλλων πως σε οχήματα υψηλού επιπέδου και κόστους σε κάθε άξονα επιλέγονται ανεξάρτητοι αποσβεστήρες, συνδεδεμένοι κατάλληλοι στα μοχλικά, με στόχο να προσδίδουν ανεξάρτητα αποσβέσεις για κάθε ξεχωριστή μετακίνηση αναρτώμενης μάζας και αξόνων.



Στην περίπτωση που μας απασχολεί επιλέχθηκε αποσβεστήρας τύπου *Double Barrel* εμπνευσμένος από την εταιρία Cane Creek η οποία και εξειδικεύεται στους αποσβεστήρες ποδηλάτων κατάβασης ορεινών περιοχών. Βασικό στοιχείο της απόφασης επιλογής του τύπου αυτού είναι πως είναι σχεδιασμένος ώστε να αντέχει επαναλαμβανόμενες αλλά και υψηλές δυνάμεις κάτι το οποίο αποτελεί βασική ανάγκη για ένα αγωνιστικό μονοθέσιο στην κατηγορία των διαγωνισμών Formula Student.

Εικόνα 2.25 – Αποσβεστήρας τύπου *Double Barrel* από την Cane Creek

Επίσης, χρειάζεται να επισημάνουμε πως το σύστημα δεν απαρτίζεται μόνο από τον αποσβεστήρα όπως προαναφέραμε, αλλά και από το ελατήριο.

Το σώμα του ελατηρίου, όταν συμπιέζεται αλλάζει σχήμα, κάτι το οποίο το «βοηθάει» να αποθηκεύσει στην μικροδομή του ένα ποσό μηχανικής ενέργειας, το οποίο και απελευθερώνεται κατά την επιστροφή του στην αρχική του θέση.

Καθένα ελατήριο διαθέτει έναν συγκεκριμένο συντελεστή σκληρότητας, ο οποίος περιγράφει το λόγο της δύναμης που παραμορφώνει το ελατήριο προς το μέγεθος της παραμόρφωσης που προκαλείται.

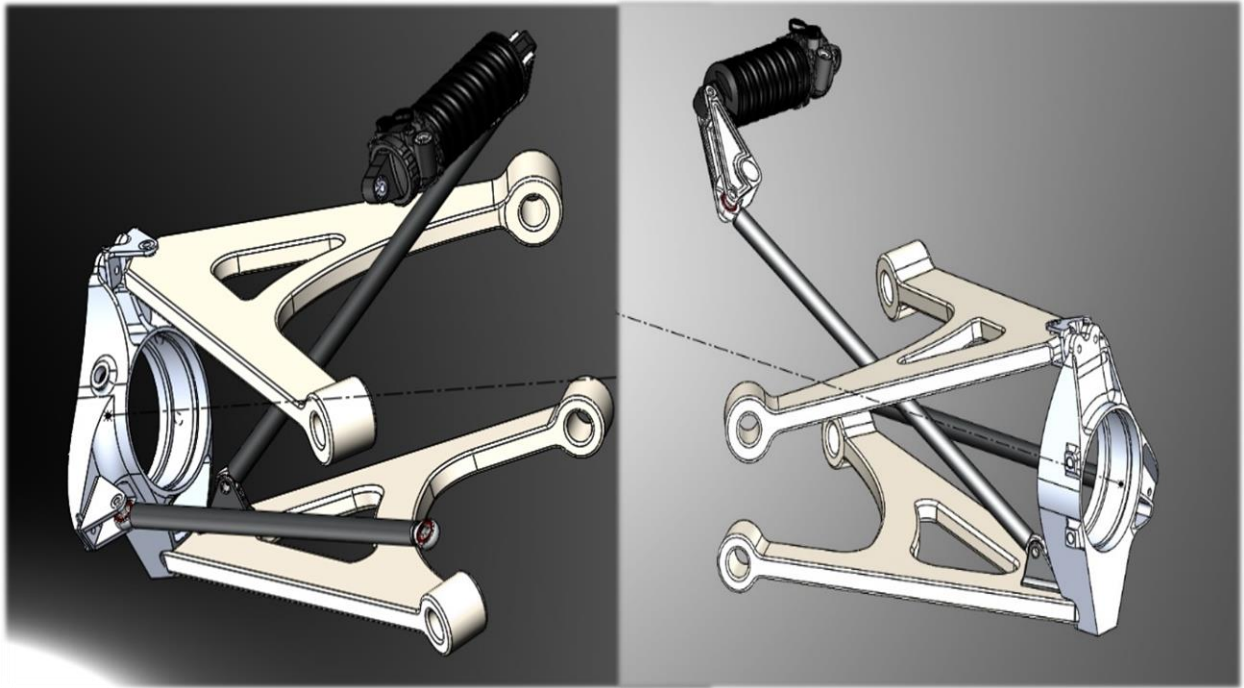


Φυσικά, η σταθερά απόσβεσης, K , όπως συχνά διατυπώνεται στην ξένη και ελληνική βιβλιογραφία, δίνεται από την εταιρία Cane Creek και φέρει τιμή ίση με $K = 400 \text{ lb./in}$. Η επιφάνεια με το χρώμα μπλε αποτυπώνει αυτή όπου θα συμβεί η ένωση με την υπόλοιπη κατασκευή του αποσβεστήρα. Να σημειωθεί, για τυχόν παρερμηνείες, το ελατήριο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι στατικό και όχι προοδευτικό. Δηλαδή, φέρει μόνο μια τιμή K , συγκριτικά με το προοδευτικό ελατήριο όπου έως μια παραμόρφωση φέρει K_1 και προς το τέλος της εμφανίζεται K_2 διαφορετική από την πρώτη.

Εικόνα 2.26 – Οπτική στατικού ελατηρίου σταθεράς $K=400 \text{ lb./in}$

2.2.5 Πίσω διάταξη ανάρτησης (Rear Suspension Assembly)

Το σύστημα της πίσω ανάρτησης συμβαδίζει στην χρησιμότητα με αυτό του εμπρός και διαφοροποιείται στους βαθμούς ελευθερίας. Η κίνηση που θα εκτελεί είναι μόνο κάθετη με το επίπεδο, αφού επιλέξαμε η στροφή του οχήματος να εξαρτάται μόνο από τους εμπρός τροχούς.



Εικόνες 2.27, 2.28 – Πίσω και Εμπρός ισομετρική όψη, Οπίσθιου συστήματος ανάρτησης

Όπως φαίνεται ευκρινέστατα στην εικόνα 2.28 το μικροσύστημα απόσβεσης πραγματώνεται με διαφορετική γεωμετρία από την εμπρός ανάρτηση.

Ο λόγος είναι απλός και φέρει την ερμηνεία πως χρειάζεται να ενώσουμε τις πίσω αναρτήσεις (στο αριστερό και δεξί τροχό) με έναν σύνδεσμο αντιστρεπτικής, ο οποίος δεν παρουσιάζεται στις παραπάνω εικόνες όμως θα συμβεί ξεχωριστή ανάλυση στις παρακάτω.

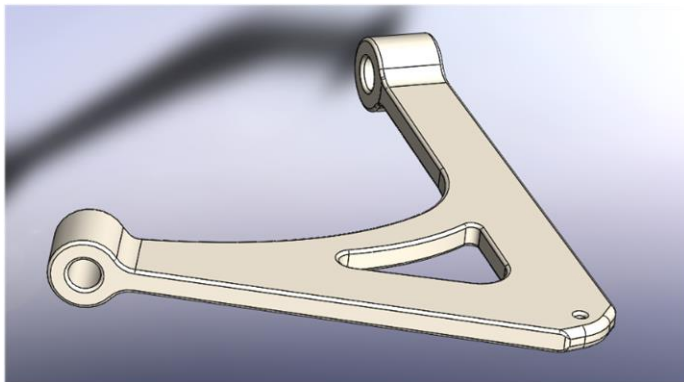
Να σημειωθεί πως το σύστημα αποσβεστήρα που χρησιμοποιήθηκε είναι όμοιο εξάρτημα με σύστημα της εμπρός ανάρτησης, όπως και οι ράβδοι ένωσης. Έτσι, δεν θα σχολιαστούν περαιτέρω στις παρακάτω παραγράφους.

2.2.5.1 Άνω & Κάτω ψαλίδι στην οπίσθια διάταξη ανάρτησης

Για την περίπτωση των ψαλιδιών, οι γεωμετρικές τους απαιτήσεις, δείχνουν να καλούνται να σχηματίσουν τα δύο σκέλη μιας μορφής «κεφαλαίου λάμδα».

Πολλές φορές, εμφανίζεται ένωση του εξωτερικού κοινού σημείου έδρασης στον φορέα του τροχού, με τα δύο εσωτερικά σημεία έδρασης, στο σασί.

Η φιλοσοφία που ακολουθήσαμε και στους πίσω τροχούς είναι η εμφάνιση ενός ενιαίου ψαλιδιού, με σκοπό οι δυνάμεις να διαρρέονται στο υλικό σε όλο το μήκος τους και όχι μόνο μεταξύ συνδέσμων.



Εικόνα 2.29 – Ισομετρική όψη, πάνω ψαλιδίου πίσω ανάρτησης.

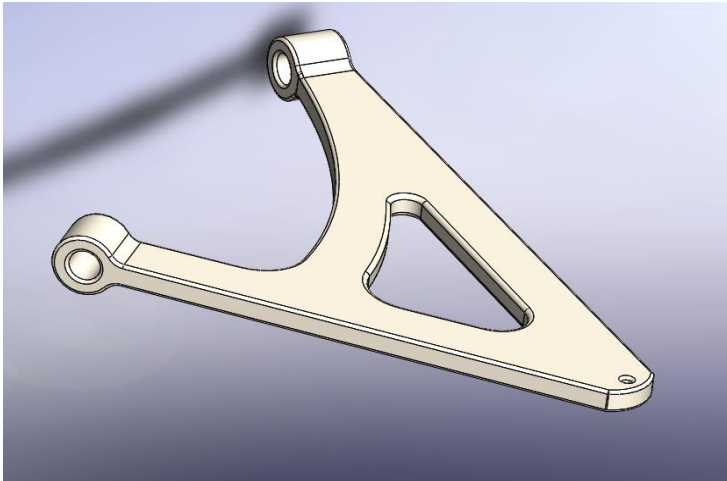
Για να αιτιολογήσουμε την γεωμετρία στις οπές που συνδέονται με το σασί, είναι σε διάμετρο μεγαλύτερες από αυτές της μπροστά διάταξης και ο λόγος είναι πως το ψαλίδι θα δέχεται σύνολο καμπτικών και θλιπτικών τάσεων, αφού δεν υπάρχει δυνατότητα για βαθμό ελευθερίας παράλληλα με

το έδαφος, όπως συνέβη με την μπροστά ανάρτηση.

Επιπλέον, το υλικό που χρησιμοποιούμε είναι αλουμίνιο τύπου 7075 – T6. Για να κατανοηθεί, καλύτερα, η εικόνα 2.29 στην εμπρός οπή που συνδέεται με το upright, επιλέχθηκε η οπή για την καλύτερη σύνδεση των δύο αυτών σημείων.

Τα σχεδιαστικά μέρη σε διδιάστατη μορφή (Engineering Design) θα παρουσιαστούν στο παράρτημα της πτυχιακής εργασίας για να αποσαφηνιστεί οποιαδήποτε απορία ως προς την γεωμετρική απεικόνιση κάθε επιμέρους τμήματος.

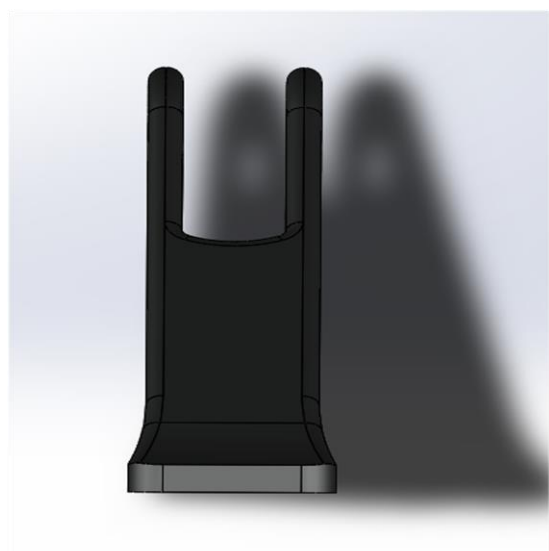
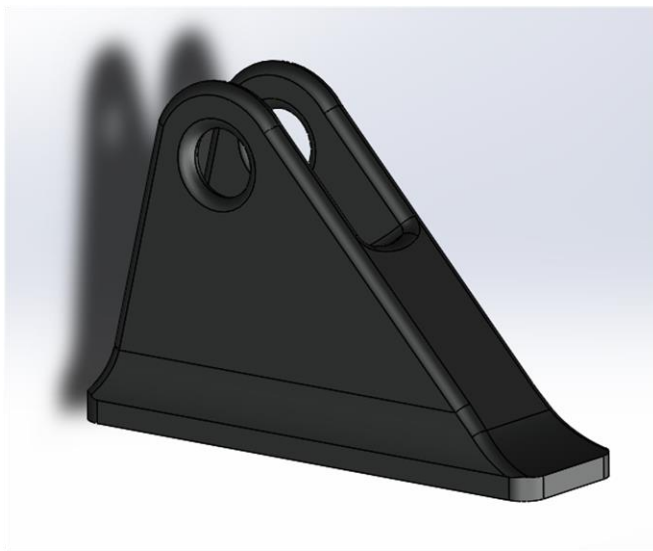
Μετάπειτα, θα προβούμε στην διαδικασία επεξήγησης του κάτω ψαλιδιού της ανάρτησης, το οποίο σε μορφοποίηση, φυσικά, θα μοιάζει με το πάνω, όμως διαφέρει στο σημείο της ένωσης του με το upright ώστε να εξυπηρετεί με φυσικό τρόπο την μόχλευση του.



Εικόνα 2.30 – Ισομετρική όψη, κάτω ψαλιδίου στην οπίσθια ανάρτηση

Σε αυτό το σημείο, γίνεται εμφανές πως το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε και στο μέρος του κάτωθεν ψαλιδιού θα είναι το αλουμίνιο τύπου 7075 – T6. Χρειάζεται, σε αργότερο χρόνο, να πραγματοποιήσουμε μελέτη για τυχόν εμφάνιση φαινομένου λυγισμού.

Επιπρόσθετα, το κομμάτι που χρησιμοποιούμε για την ένωση της ράβδου του αποσβεστήρα με το κάτω ψαλίδι (Bracket) και σε αυτήν την περίπτωση θα εμφανιστεί ως αναπόσπαστο κομμάτι αυτού με την ένωση του μέσω της διαδικασίας της ηλεκτροκολλητής.

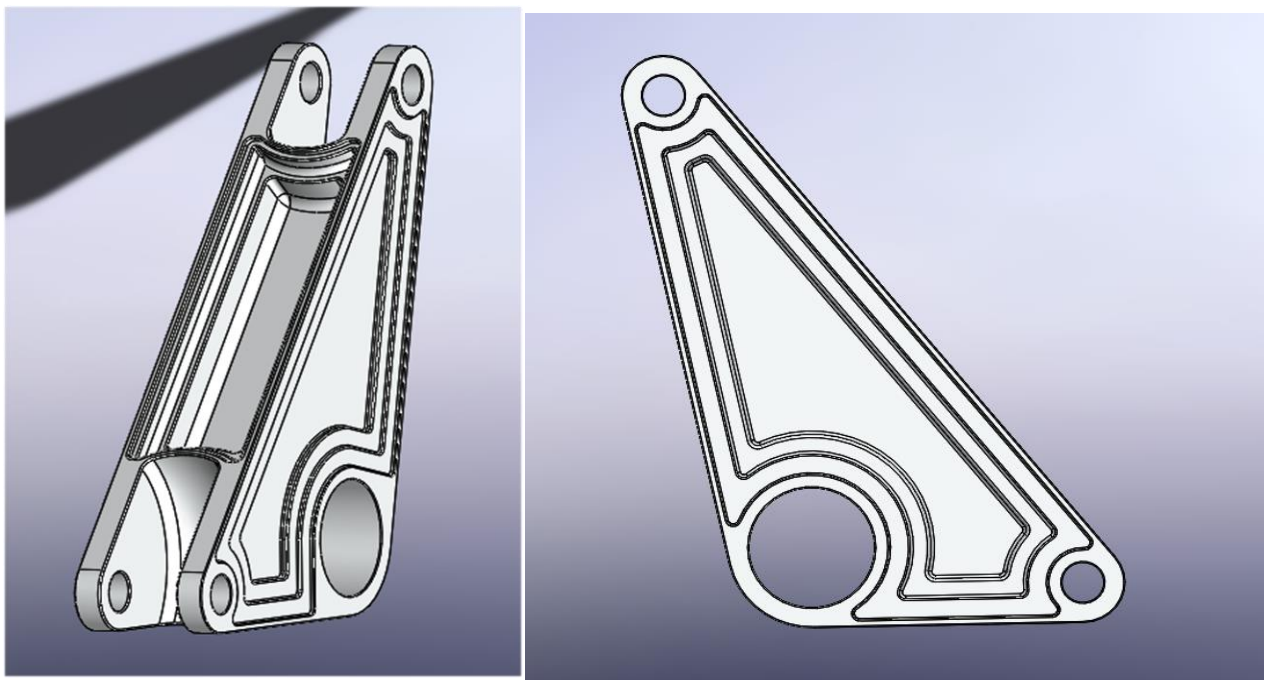


Εικόνες 2.31, 2.32 – Ισομετρική & μπροστά όψη, εξαρτήματος στήριξης μεταξύ ψαλίδι και shock rod

2.2.5.2 Σύνδεσμος στήριξης ή μοχλικό (Rocker Bracket)

Από τις πρωταρχικές παραμέτρους που υπολογίζονται, αφότου επιλεγούν τα σημεία έδρασης των ψαλιδιών είναι η γεωμετρική θέση του μοχλικού στον τρισδιάστατο χώρο. Η θέση του, βεβαίως, εξαρτάται από το πού θα τοποθετήσουμε τον αποσβεστήρα.

Στην περίπτωση του σχεδίου μας, οι αποσβεστήρες στηρίζονται παράλληλα με το σασί κάτι το οποίο δημιουργεί ανεπάγγελτα την δημιουργία ενός συνδέσμου που θα αποκτά τον ρόλο της στατικής σύνδεσης μεταξύ της ράβδου και τους αποσβεστήρα.



Εικόνες 2.33, 2.34 – Ισομετρική & πλάγια όψη, εξαρτήματος στήριξης και μόχλευσης (Rocker)

Το υλικό κατασκευής είναι όπως κι παραπάνω το αλουμίνιο 7075 – T6. Αξιοσημείωτο, να αναφερθεί είναι πως η κοπή στην μπροστά και πλάγια του όψη των μοτίβων, δημιουργήθηκαν με την πρόνοια της ελάφρυνσης βάρους, δίχως όμως αυτή η διαφοροποίηση να επηρεάζει σε δυσμενή βαθμό την στατική αντοχή του εξαρτήματος.

Η μεγάλη οπή στο κάτω μέρος, θα χρησιμοποιηθεί ώστε να συνδέσουμε το μοχλικό με την αντιστρεπτική ράβδο.

3 Κινηματική Ανάλυση του Συστήματος Ανάρτησης

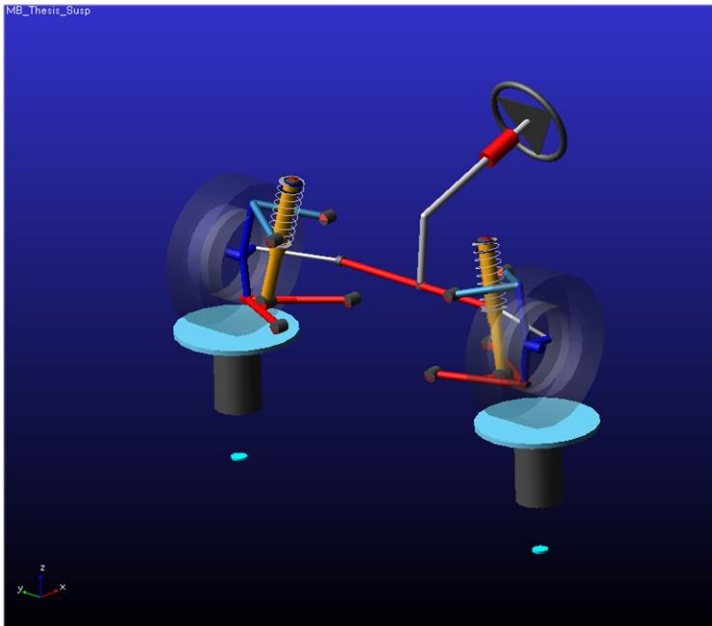
Με κύριο στόχο, την πραγματοποίηση μιας προσομοίωσης που θα ανταπεξέρχεται στα ακαδημαϊκά πλαίσια ανάλυσης ενός συστήματος σαν και αυτό που εργαζόμαστε, χρησιμοποιούμε για μέσο το υπολογιστικό πρόγραμμα ADAMS 2020, προϊόν της εταιρίας MSC Software. Το προγραμματιστικό περιβάλλον αυτού είναι κατασκευασμένο με σκοπό να ευνοεί τις δυναμικές αναλύσεις σε μηχανικά συστήματα και συγκεκριμένα σε αυτά που απαρτίζουν τα αυτοκίνητα. Στο ADAMS, όλα τα υποσυστήματα του οχήματος μπορούν να μοντελοποιηθούν με την βοήθεια ορισμένων “hardpoints”, τα οποία μπορούν να αλλάξουν τιμές με την παρέμβαση του χρήστη και να πάρουν την επιθυμητή γεωμετρία στην εκάστοτε περίπτωση.

Βεβαίως, η δικιά μας προσέγγιση, αφορά το εμπρός και οπίσθιο σύστημα ανάρτησης και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε ένα υποπρόγραμμα εν ονόματι ADAMS/Car που εφιστά τη προσοχή του στα συστήματα της ανάρτησης και το τιμονιού, όπου θα εξετασθούν στο μετέπειτα της εργασίας αυτής.

3.1 Μοντελοποίηση Εμπρός & Όπισθεν συστήματος στο ADAMS/Car

Για την εμπρός ανάρτηση χρησιμοποιούμε την πλατφόρμα που δίνεται από το προγραμματιστικό περιβάλλον και δημιουργούμε ένα «assembly» τύπου διπλών ψαλιδιών μαζί με το υποσύστημα του τιμονιού με σκοπό μετά την κατάλληλη ρύθμιση τους να δημιουργήσουμε σενάρια προσομοιώσεων που θα αποσαφηνίσουν την εικόνα για το πως η γεωμετρία της ανάρτησης συμπεριφέρεται κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Να σημειωθεί πως λόγω των hardpoints δεν κρίνεται αναγκαστική η αποτύπωση του αμαξώματος (Σασί) στην διαδικασία της δυναμικής ανάλυσης, αφού άλλωστε τα σημεία που θα ενωνόντουσαν με το αμάξωμα παραμένουν σταθερά και με αυτό τον τρόπο απλοποιούμε την επίδραση των δυνάμεων του αμαξώματος στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης.



Εικόνα 3.1 - Σύστημα εμπρός ανάρτησης στο ADAMS/Car

Για την βέλτιστη κατανόηση των μετέπειτα προσομοιώσεων θα χρειαστεί να επιδείξουμε την ονοματολογία που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα στον χαρακτηρισμό των επιμερών τμημάτων. Στην συνέχεια, θα χρησιμοποιήσουμε σενάρια προσομοιώσεων όπως παράλληλη μεταφορά των τροχών στον άξονα Z, παράλληλη μεταφορά των τροχών με διαφορετική φορά ο καθένας, στροφή των τροχών και κύλιση αυτών στο επίπεδο. Φυσικά, θα αναλυθούν με περισσότερη σαφήνεια μετέπειτα.

Με γαλάζιο χρωματισμό το επάνω ψαλίδι ονομάζεται «uca» και φέρει σημεία με την εξής ονομασία:

- hpl_uca_front: Εξωτερικό σημείο σασί στο επάνω ψαλίδι
- hpl_uca_outer: Σημείο ρόδας του επάνω ψαλιδιού
- hpl_uca_rear: Εσωτερικό σημείο σασί στον επάνω ψαλίδι

Με κόκκινο χρωματισμό το κάτω ψαλίδι ονομάζεται «lca» και η ονομασία των σημείων του έχει ως:

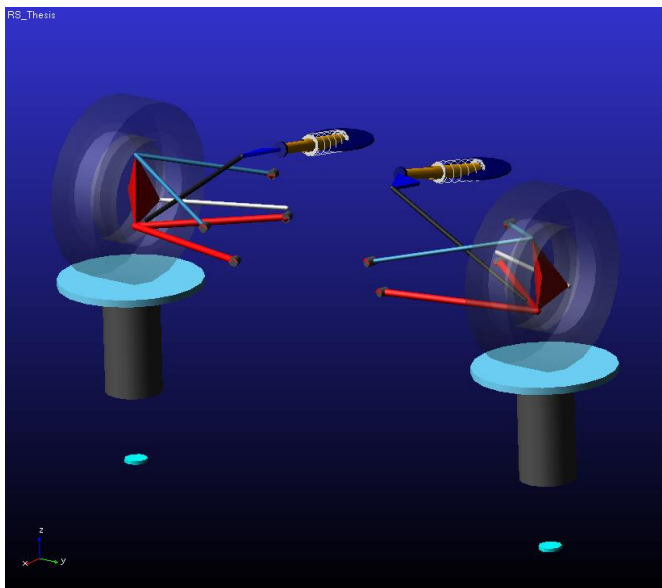
- hpl_lca_front: Εξωτερικό σημείο σασί στο κάτω ψαλίδι
- hpl_lca_outer: Σημείο ρόδας κάτω ψαλιδιού
- hpl_lca_rear: Εσωτερικό σημείο σασί στο κάτω ψαλίδι

Με κίτρινο χρωματισμό το μικροσύστημα αποσβεστήρα, με την ονομασία:

- hpl_lwr_strut_mount: Σημείο ένωσης αποσβεστήρα και bracket
- hpl_top_mount: Πάνω μέρος αποσβεστήρα

Επιπλέον, εφαρμόζουμε διαδικασίες για να δημιουργήσουμε και την γεωμετρία της πίσω ανάρτησης η οποία κατέχει τιμές στα σημεία της, ίδιες με το αρχικό σχέδιο που πραγματοποιήθηκε στο SolidWorks 2019.

Φυσικά, μερικές τιμές δεν είναι δυνατόν να είναι αυτούσιες λόγω διαφορετικής χωροδιάταξης που εφαρμόζεται για το κάθε υπολογιστικό πρόγραμμα, όμως έχουν γίνει οι κατάλληλες διαδικασίες ώστε να αναφερόμαστε για το ίδιο σύστημα με τις ίδιες γεωμετρικές ιδιότητες.



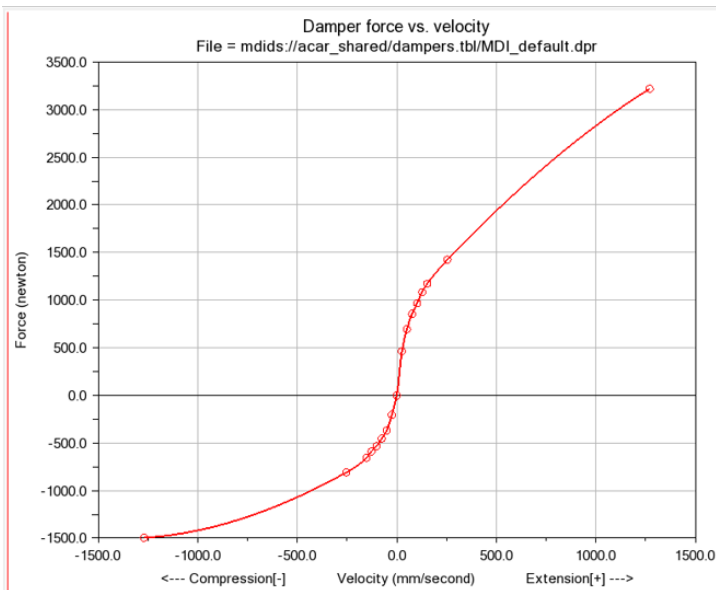
Εικόνα 3.2 – Σύστημα πίσω ανάρτησης στο ADAMS/Car

Η ονομασία που καταγράφηκε παραπάνω παραμένει όμοια για λόγους ευκολίας. Για την αποφυγή, λοιπόν κάποιας παρανόησης θα γίνουν οι προσομοιώσεις ξεχωριστά για το εμπρός σύστημα ανάρτησης και το οπίσθιο. Στην συνέχεια, αναγκαίο να αναφέρουμε είναι πως οι πίνακες που αναφέρουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης θα

εισαχθούν στο παράρτημα της εργασίας.

Τελευταίο βήμα πριν την αρχή των προσομοιώσεων χρειάζεται να ρυθμίσουμε την καμπύλη του ελατηρίου στο σύστημα του αποσβεστήρα με σκοπό να ανταποκρίνεται στις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος που έχουμε επιλέξει.

Η γραφική παράσταση θα προδιαγράψει την δύναμη που μπορεί να δεχθεί ο αποσβεστήρας (*Damper force*) σε σύγκριση με την ταχύτητα (*Velocity*) με τιμές που ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικά σενάρια τιμών, όπως δίνονται άλλωστε δημόσια από τις ίδιες τις εταιρίες.



Εικόνα 3.3 – Διάγραμμα δυνάμεων και ταχύτητας αποσβεστήρα (CC)

Το επιθυμητό ανώτατο όριο επιλέχθηκε να έχει τιμή μεγαλύτερη αυτής των 3000 N για λόγους ασφαλείας στην περίπτωση όπου μια παράμετρος βρεθεί κάτω από αντίξοες συνθήκες μη προβλέψιμες από τους μηχανικούς διαμόρφωσης του συστήματος αποσβεστήρα.

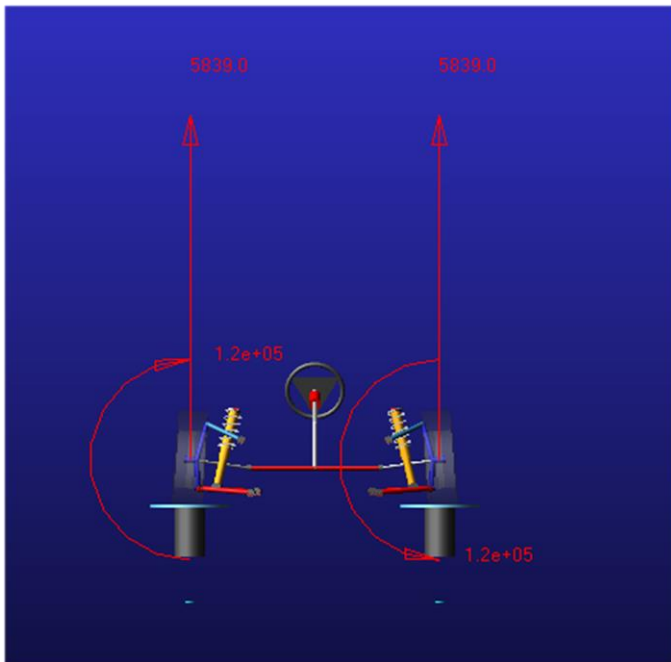
Ακόμα, Στο διάγραμμα αποτυπώνεται η συμπεριφορά του αποσβεστήρα ανάλογα με την συμπίεση (compression) ή την αποσυμπίεση (extension) στο ελατήριο.

3.2 Διαδρομή παράλληλου τροχού στην εμπρός ανάρτηση (Parallel Wheel Travel)

Στην προσομοίωση αυτή, πρώτιστα, θα χρειαστεί να ορίσουμε των αριθμών των βημάτων που θα καλεστεί το πρόγραμμα να υπολογίσει δυνάμεις και ροπές. Επιλέγουμε, λοιπόν, τον αριθμό των επαναλήψεων αυτών να φέρει τιμή ίση με 10,000 επαναλήψεις ή 10,000 sec.

Ο λόγος του υψηλού αριθμού των επαναλήψεων επιλέχθηκε με προσοχή για να φανερώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την φυσική συμπεριφορά και αντίδραση του συστήματος σε τυχών δυσμενής συνθήκες που έχουμε δημιουργήσει μόνο με ηλεκτρονική μορφή, κάτι που μας κωλύει στο να προβούμε σε μετρήσεις που θα μας κατευθύνουν, με στόχο να σιγουρευτούμε ως προς την ορθή λειτουργία όλων των επιμελών τμημάτων.

Ύστερα, την συμμόρφωση με τους κανονισμούς του παγκόσμιου οργανισμού *Formula Student* επιλέγουμε για το εύρος τιμών της ρόδας την ελάχιστη απόσταση των 50 mm και προκύπτουν οι πρώτες τιμές της προσομοιώσεως με εμφανής την διαφορά της μετατόπισης των τμημάτων του συστήματος της εμπρός ανάρτησης, όπως ακριβώς φαίνεται και στην εικόνα 3.4

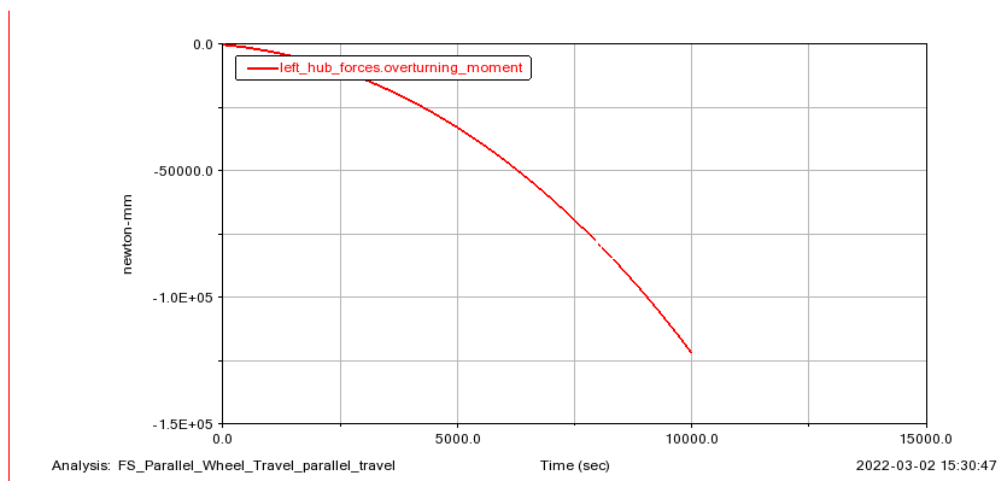


Εικόνα 3.4 – Διαδρομή παράλληλων τροχών στην εμπρός ανάρτηση

Η κίνηση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί από κάποιον πιθανών τροχοπέδη στην ασφαλτο ή από κάποια απότομη μεταβολή στην κίνηση του οχήματος (απότομο φρενάρισμα, μεγάλη τιμή επιτάχυνσης).

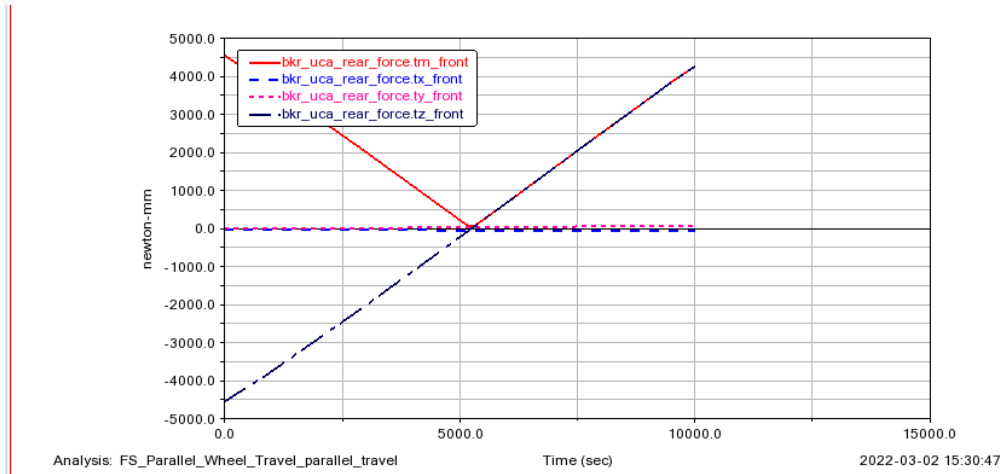
Εν συνεχεία θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα που υπολόγισε το προγραμματιστικό αυτό περιβάλλον συγκριτικά με τις δυνάμεις, τάσεις και ροπές που δέχεται κάθε τμήμα αυτού του συνόλου ανάρτησης αλλά ταυτοχρόνως και την διακριτοποίηση κινηματικών στοιχείων.

Συγκεκριμένα, στην εικόνα 3.5 αναγράφεται η απαιτούμενη ροπή για να πραγματοποιηθεί η στιγμή ανατροπής στο αριστερό hub συγκριτικά με το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης.

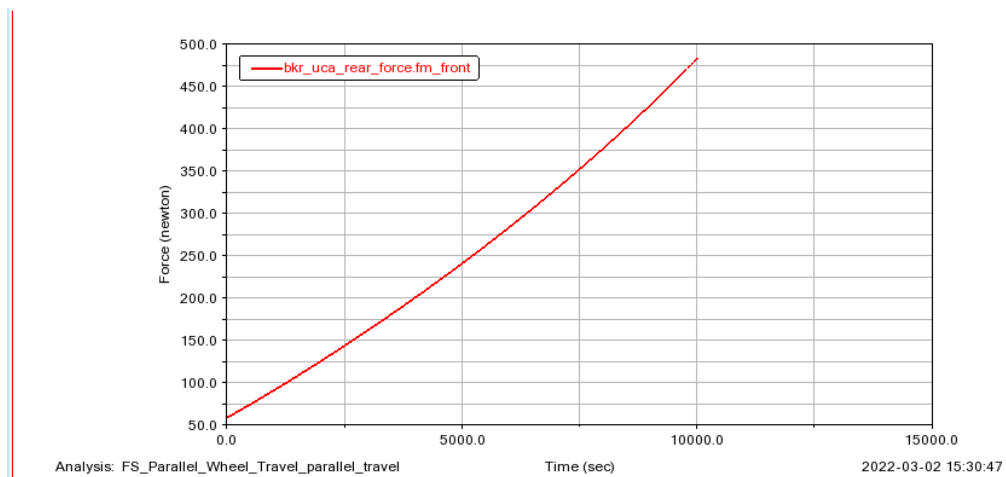


Εικόνα 3.5 – Γραφική αναπαράσταση των δεχόμενων ροπών στο αριστερό hub, της εμπρός ανάρτησης

Εύκολα, με την χρήση του Adams Postprocessor βρίσκουμε τις δυνάμεις που δέχεται το επάνω ψαλίδι, σημειώνοντας πως οι δυνάμεις και στα συστήματα των δύο ροδών είναι ισότιμες και δεν διαφοροποιούνται με κανέναν τρόπο. Έχουμε λοιπόν γραφήματα ως εξής:



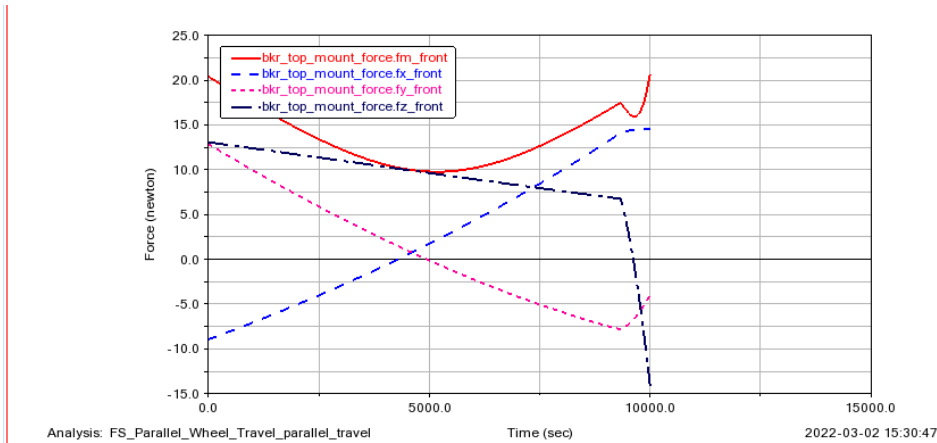
Εικόνα 3.6 – Γράφημα ροπών που δέχεται το επάνω ψαλίδι και στους 3 άξονες



Εικόνα 3.7 – Γράφημα δυνάμεων που δέχεται το επάνω ψαλίδι, σε σύγκριση με τον χρόνο (sec)

Μια ακόμα σημαντική παράγωγος για την ορθή λειτουργία του μονοθέσιου είναι να ελέγξουμε τις δυνάμεις στο πάνω τμήμα του αποσβεστήρα, οι οποίες θα μας βοηθήσουν και στην κατανόηση του στατικού προβλήματος που θα χρειαστεί να λύσουμε, αργότερα στην πτυχιακή εργασία.

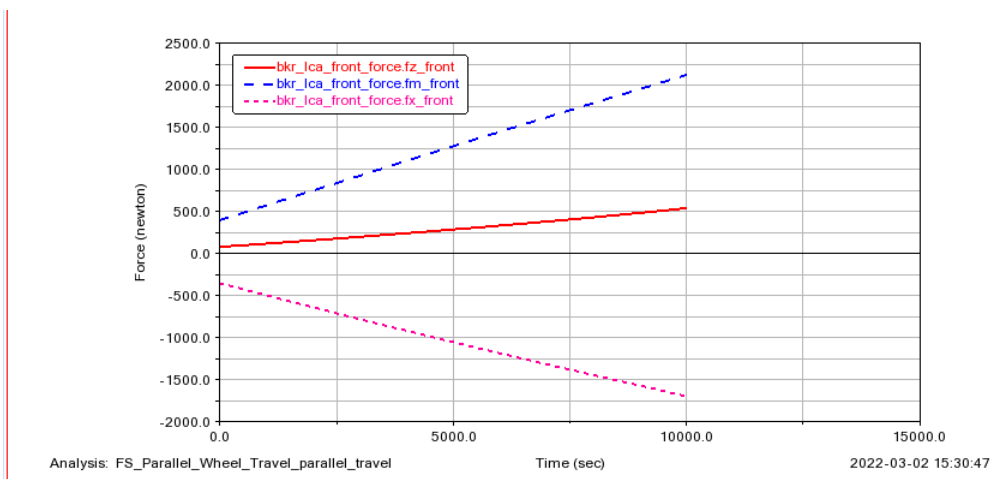
Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8 αναφέρονται οι δυνάμεις που δέχεται το πάνω μέρος του αποσβεστήρα (top_mount_force) στους άξονες (x,y,z), πάντοτε συγκριτικά με το χρονικό διάστημα της ανάλυσης.



Εικόνα 3.8 – Δυνάμεις που αναπτύσσονται στο επάνω μέρος του αποσβεστήρα

Οι τιμές κρίνονται στα προβλεπόμενα λόγω του ότι το σύστημα απόσβεσης απορροφά ένα επαρκές ποσό δυνάμεων και δημιουργεί κατά αυτό τον τρόπο το επάνω τμήμα του συστήματος να δέχεται πολύ λιγότερες τιμές σε σχέση με άλλα τμήματα της ανάρτησης.

Μετέπειτα, στο κάτω ψαλίδι εμφανίζονται δυνάμεις σε παρόμοιο μέτρο με αυτό του επάνω ψαλιδιού κάτι που δηλώνει την εγκυρότητα των υπολογισμών, με τα εξής γραφήματα:

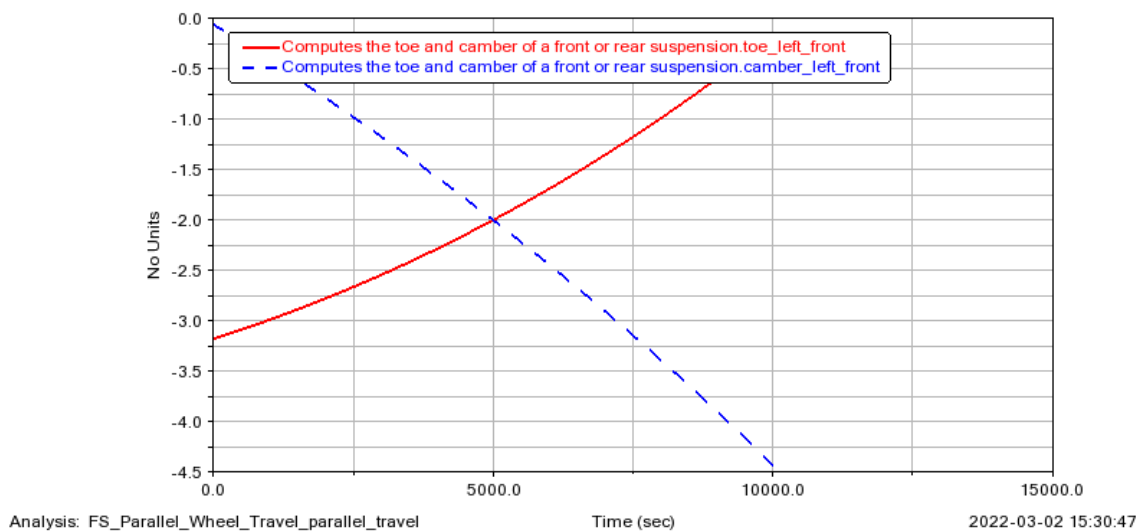


Εικόνα 3.9 – Δυνάμεις που εμφανίζονται στο κάτω ψαλίδι συγκριτικά με τον χρόνο (sec)

Εν συνεχεία, η ιδεατή έννοια της επίδοσης εκκολάπτεται μέσα στα πλαίσια της αγωνιστικής διαδικασίας με τέτοιον τρόπο ώστε η ομάδα που επιμελήθηκε του έργου να υπερισχύει έναντι των άλλων σε ένα οργανωμένο πρωτάθλημα κατασκευαστών, έτσι θα ήταν μέγιστο σφάλμα να μην συμπεριλάβουμε έναν παράγοντα που αναφέρεται διαρκώς από την τεχνική δημοσιογραφία και δεν είναι άλλο από το κύρτωμα ρόδας (*camber*) και την σύγκλιση των τροχών, προς τα μέσα (*toe in*).

Η σωστή ρύθμιση αυτών, όπως ήδη έχουμε προαναφέρει, «βοηθάει» το όχημα να εκτελέσει χαμηλότερο χρόνο στην διάρκεια ενός γύρου σε μια πιστοποιημένη πίστα αγώνων, κυρίως του λόγου της μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής που παρατηρείται στις στροφές.

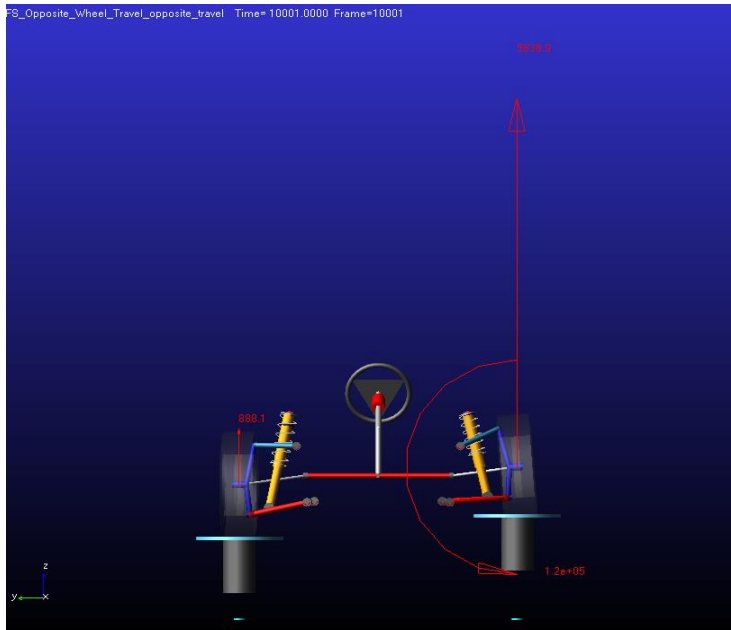
Για την γεωμετρία που επιλέχθηκε τα κατάλληλα νούμερα των μοιρών παρουσιάζονται στην εικόνα 3.10, πάντοτε για την ταυτόχρονα παράλληλη κίνηση των τροχών με τις παρακάτω τιμές:



Εικόνα 3.10 – Η τιμή κυρτώματος της ρόδας και η σύγκλιση εσωτερικά αυτής σε μοίρες που χρειάζεται να φέρει το όχημα

3.3 Αντίθετης φοράς διαδρομή των τροχών (Opposite Wheel Travel)

Στο κεφάλαιο αυτό η προσομοίωση που θα εκτελέσουμε δεν διαφέρει στην διαδικασία εκτέλεσης με αυτή της παράλληλης διαδρομής τροχών, όμως επιφέρει εξαιρετικά χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά της ανάρτησης που κρινόμαστε να σχεδιάσουμε.



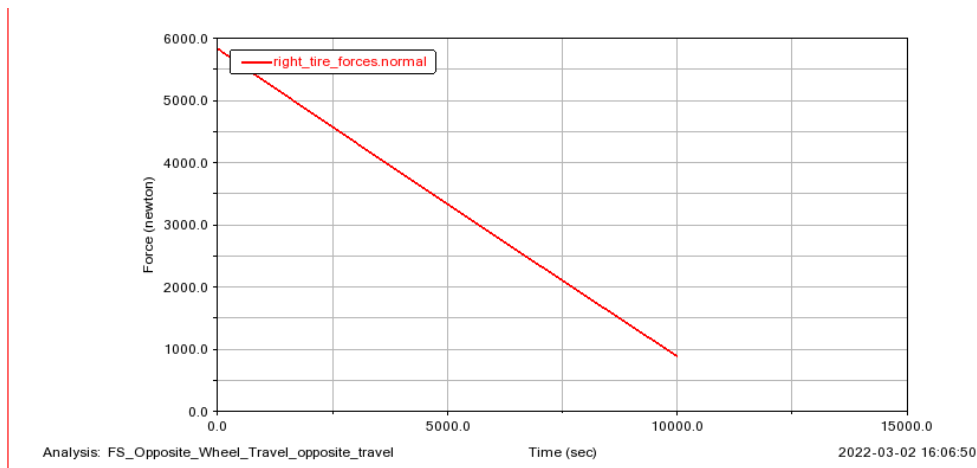
Η προσέγγιση τιμών στο σύστημα ανάρτησης για την κίνηση της αντίθετης φοράς των τροχών, εμφανίζεται συνήθως μετά το πέρας της στροφής με τους τροχούς να έχουν ευθεία διεύθυνση, όπου στην έξοδο συνήθως τα οχήματα εφάπτουν τα “*cerb*” με απότοκο την φθορά των ελαστικών και την επιβάρυνση στους συνδέσμους των μερών της ανάρτησης.

Εικόνα 3.11 – Διαδρομή αντίθετης φοράς τροχών (Opposite Wheel Travel)

Η κλίση της εικόνας 3.12 παρουσιάζει τις δυνάμεις που δέχεται το δεξιά λάστιχο (υπερυψωμένο) κατά την εκτέλεση της πλήρους κίνησης, δηλαδή έως την θέση του αριστερού ελαστικού στον άξονα Z.

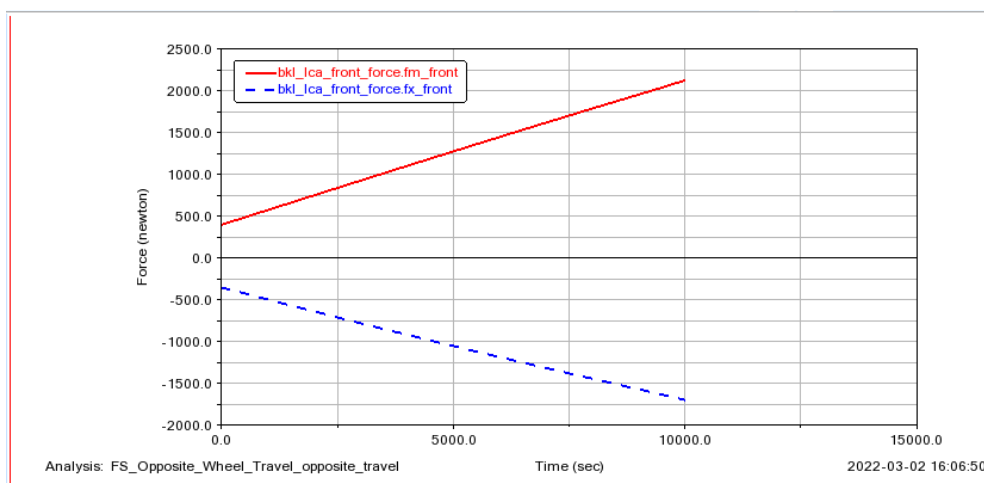
Αιτιολογείται κατά αυτό τον τρόπο η ενημέρωση των μηχανικών, στους οδηγούς οχημάτων σε οργανωμένα πρωταθλήματα όπως αυτό της Formula 1, να αποφεύγουν μετά τις στροφές τα “*cerb*” που έχουν μεγάλο ύψος.

Για τον παραπάνω λόγο χρειάζεται η επικοινωνία των μηχανικών με τους αθλητές να είναι συνεχής και να υπάρχουν πολλαπλά μετρητικά συστήματα στο όχημα που διαγωνίζεται.

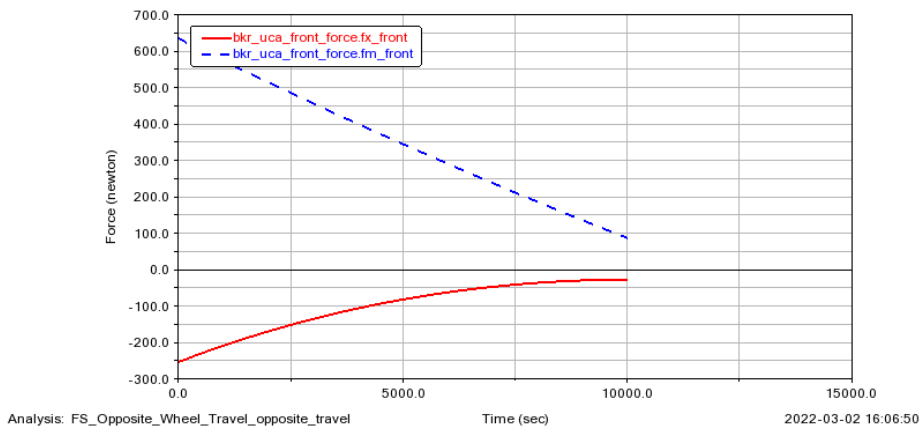


Εικόνα 3.11 – Δεχόμενες δυνάμεις στο δεξί ελαστικό του οχήματος μας.

Μια ακόμα παράμετρος επιρροής στην κίνηση του μηχανοκίνητου μονοθέσιου είναι οι δυνάμεις που δέχεται το πάνω και κάτω ψαλίδι (*Double Wishbone*), διότι απότομες ή εξαιρετικά υψηλές τιμές δυνάμεων δημιουργούν τέτοιες τάσεις στο υλικό που πιθανόν σε επαναλαμβανόμενη χρήση να σημειωθούν φθορές ή και στην χειρότερη περίπτωση αστοχία υλικού.

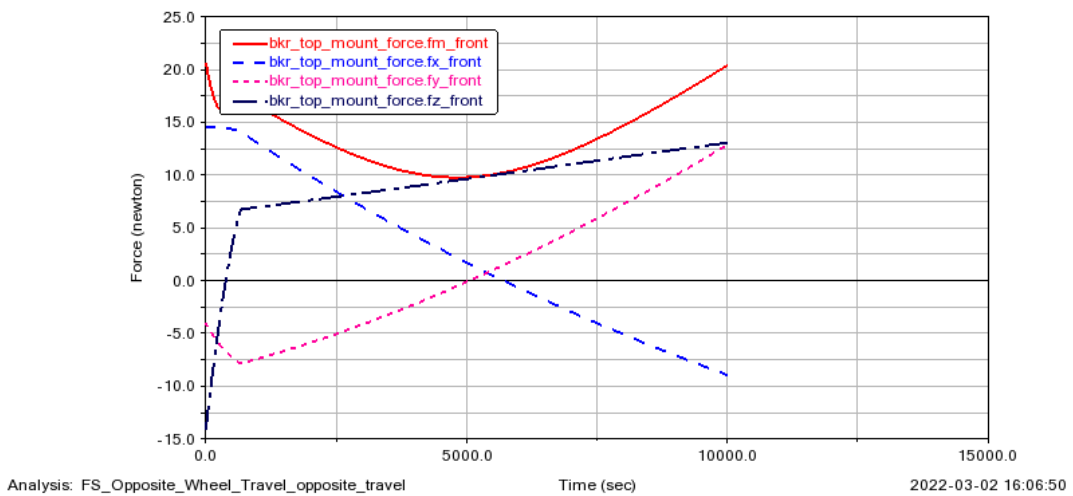


Εικόνα 3.12 – Δυνάμεις στο κάτω ψαλίδι του εξωτερικού σημείου επαφής



Εικόνα 3.13 – Δυνάμεις στο άνω ψαλίδι του εξωτερικού σημείου επαφής

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται δόκιμο να εξετάσουμε και την επιρροή της παραμέτρου των δεχόμενων δυνάμεων στο επάνω μέρος του αποσβεστήρα, με στόχο να προσδιορίσουμε, όπως και παραπάνω, εάν οι τιμές της προσομοίωσης ανταποκρίνονται σε «ρεαλιστικές» τιμές. Έτσι, θα έχουμε:



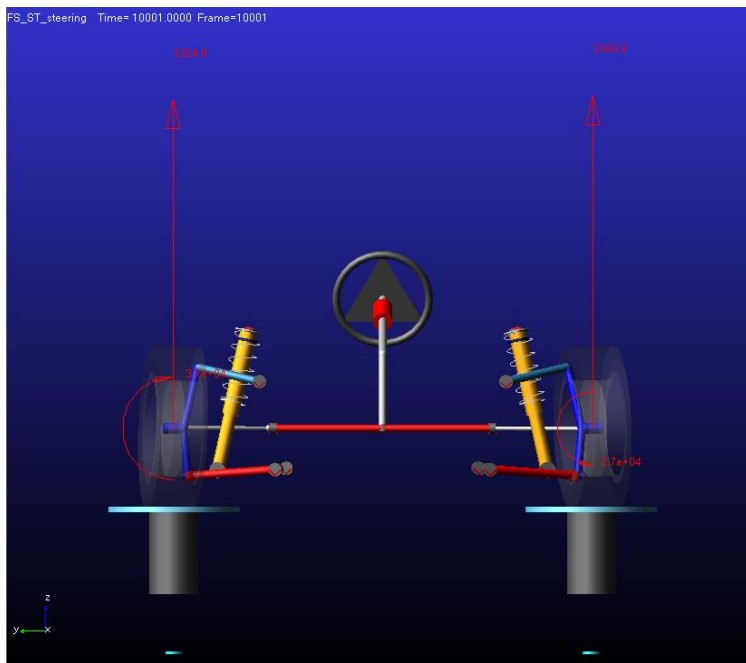
Εικόνα 3.14 – Δυνάμεις στο πάνω μέρος του αποσβεστήρα στην εμπρός ανάρτηση

Μάλιστα, και σε αυτή την εκτέλεση κίνησης τα αποτελέσματα ομοιάζουν με αυτά της κίνησης των παράλληλων τροχών και με αυτήν την προσέγγιση είμαστε στην ευχάριστη θέση να συνεχίσουμε την μελέτη μας χωρίς να χρειαστεί να προβούμε σε διορθώσεις, μιας και τα αποτελέσματα που έχουμε έως τώρα ανταποκρίνονται στο δεκτό εύρος τιμών, των πραγματικών δεδομένων.

3.4 Κίνηση στροφής τροχών (Steering)

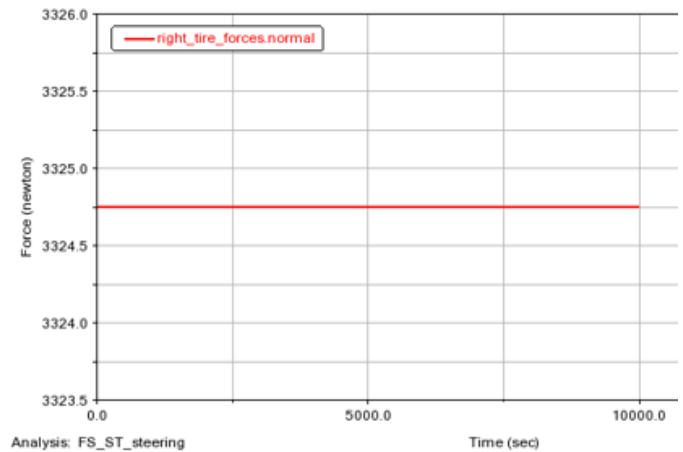
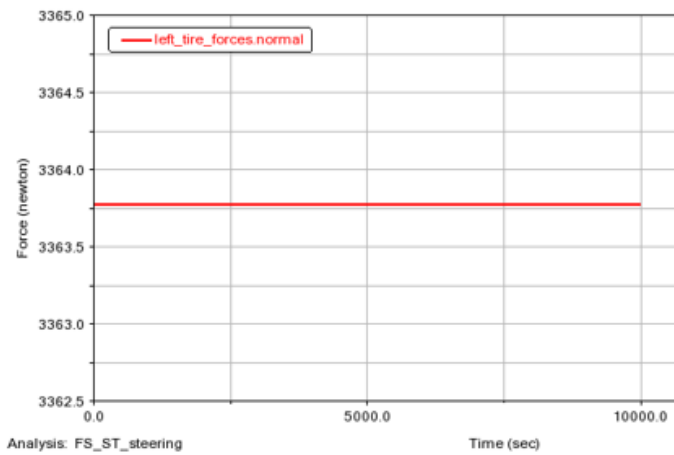
Για τους μηχανικούς στον τομέα του *motorsport* η φράση στροφή του οχήματος παίρνει πολύπλοκη χροιά και πολλαπλών χρόνων ανάλυση για την βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Άλλωστε, τα αγωνίσματα στον διαγωνισμό *Formula Student* επικεντρώνονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στην ικανότητα του οχήματος να στρίβει γρήγορα και χωρίς, όσο το δυνατόν, απώλεια επαφής του ελαστικού από την πίσσα του οδοστρώματος.



Προφανώς, τα δεδομένα που θα εμφανίσουμε συμβαίνουν κάτω από ιδανικές συνθήκες, όπου το οδόστρωμα επιλέγεται από τα εσωτερικά δεδομένα βάσεων που περιέχονται στο υπολογιστικό περιβάλλον. Έτσι, σε συνέχεια της εργασίας θα επισυνάψουμε τα διαγράμματα που η προσομοίωση υπολόγισε, με παράμετρο το “*camber*” να είναι στις 1.5° .

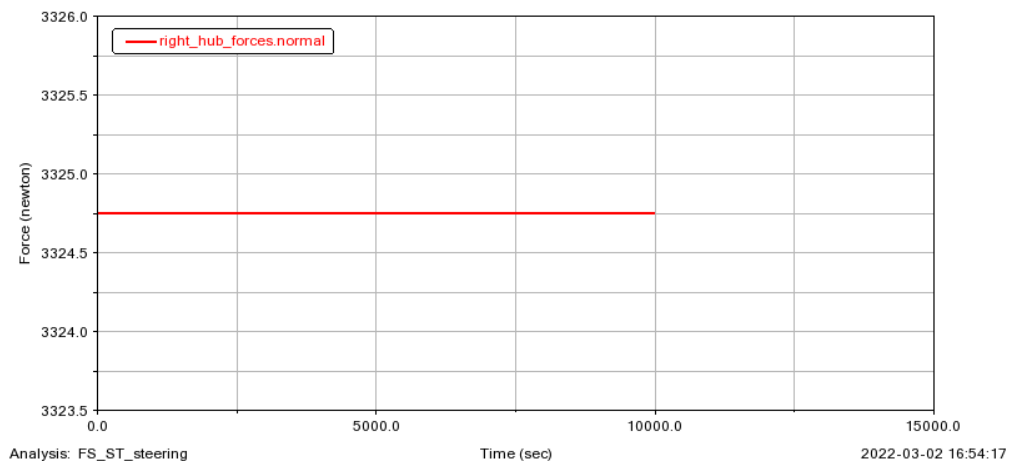
Εικόνα 3.15 – Κίνηση στροφής των τροχών στο πρόγραμμα ADAMS/Car



Εικόνες 3.16, 3.17 – Δυνάμεις που αναπτύσσονται στα ελαστικά του οχήματος κατά την εκτέλεση στροφής

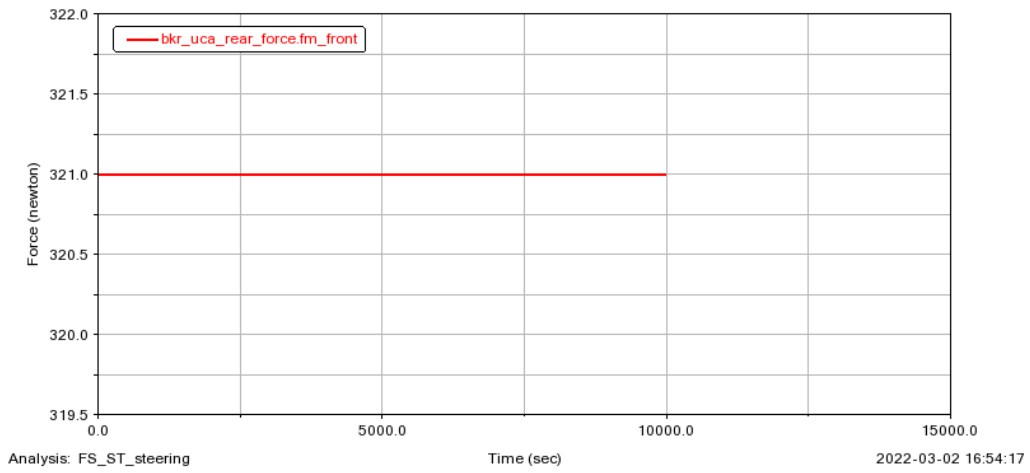
Φαίνονται παραπάνω οι δυνάμεις που ασκούνται στην επιφάνεια επαφής των ελαστικών με το πρότυπο δάπεδο που διαθέτουμε από την προσομοίωση του προγράμματος *Adams/Car*.

Μετάπειτα, παρόμοια σημαντική μέτρηση που παρατηρείται πως δίνεται είναι αυτή των δεχόμενων δυνάμεων στο «*hub*» της δεξιάς ρόδας, όπου εκεί οι δυνάμεις θα έχουν μεγαλύτερη τιμή μέτρου συγκριτικά με αυτό της αριστερής ρόδας, εφόσον η μεταφορά του βάρους και του σημείου κάθετης επίδρασης από την βαρύτητα τείνει με φορά προς τον δεξί τροχό.

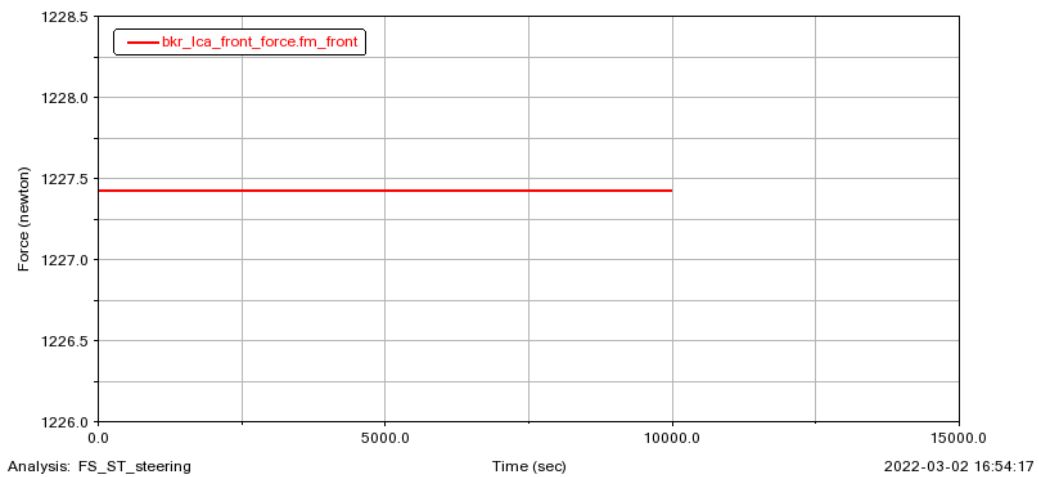


Εικόνα 3.18 – Ασκούμενη δύναμη στο δεξί hub του συστήματος ανάρτησης

Σε αυτό το σημείο, αποτυπώνουμε τις μετρήσεις για το άνω και κάτω ψαλίδι της δεξιάς ρόδας (όπως και παραπάνω, από την οπτική του οδηγού):



Εικόνα 3.19 – Δεχόμενη δύναμη στο άνω ψαλίδι, στον δεξί τροχό

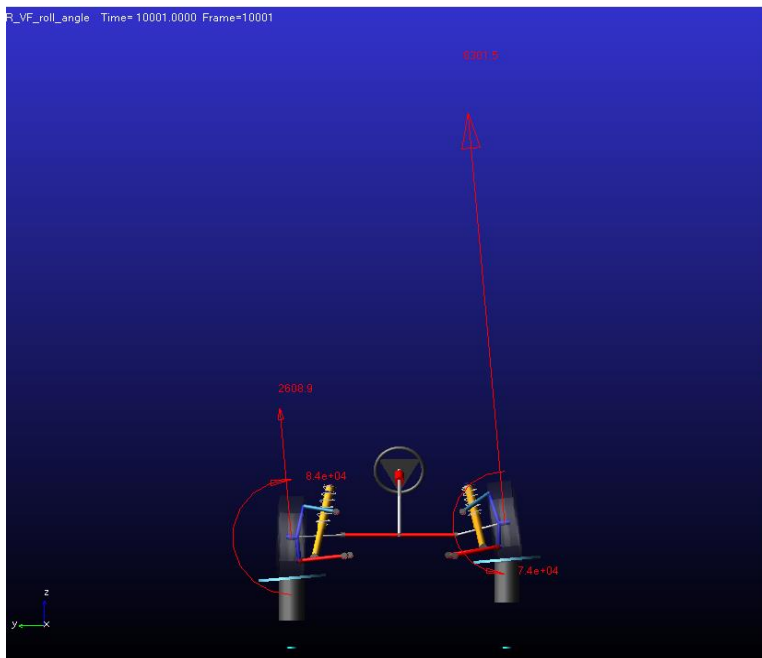


Εικόνα 3.20 – Δεχόμενη δύναμη στο κάτω ψαλίδι, στον δεξί τροχό

3.5 Ολίσθηση τροχών στην εμπρός ανάρτηση (Slip angle, α)

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε με την παρουσίαση των δεδομένων της προσομοίωσης για συνθήκες ολίσθησης όπου, πιθανών να προέρχονται μετά από κάποια παρεμβολή στην επιθυμητή πορεία του οχήματος μας.

Συνήθως, το φαινόμενο της ολίσθησης στον μηχανοκίνητο αθλητισμό παρατηρείτε είτε όταν ανατρέπεται, η επιθυμητή πορεία του οχήματος ή διαφορετικά η αγωνιστικά γραμμή από κάποια κρούση, είτε όταν το αμάξωμα αδυνατεί να πραγματοποιήσει την πορεία του λόγω υψηλών φορτίων στους τροχούς.

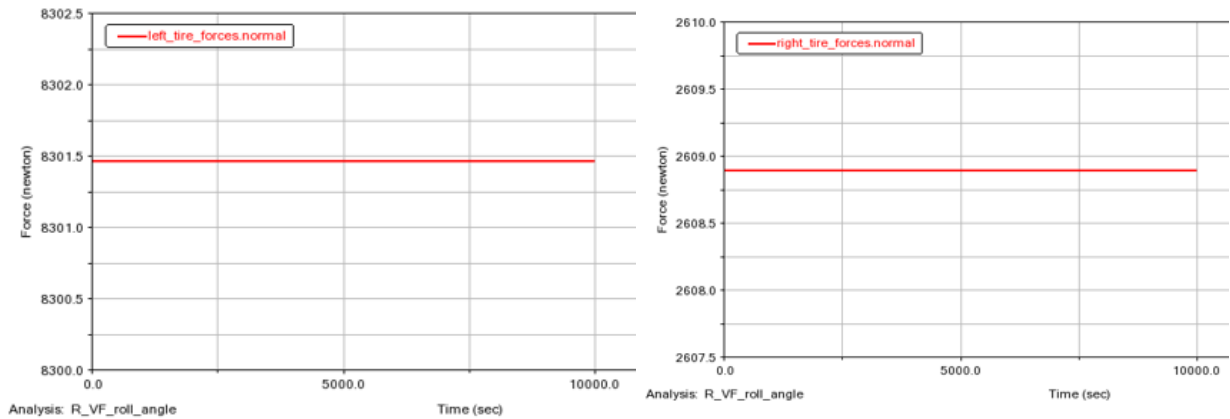


Εικόνα 3.21 – Παρουσίαση του φαινομένου ολίσθησης τροχών

Το δεύτερο, παρατηρείται κυρίως στην προσπάθεια του οχήματος να εκτελέσει μια στροφή με υψηλό μέτρο ταχύτητας. Σαν αίτιο η τριβή ολίσθησης υπερβαίνει αυτή της τριβής κύλισης και δημιουργεί απότοκα επικίνδυνα για τον οδηγό και τους γύρω του.

Για τον λόγο αυτό ο παγκόσμιος οργανισμός *Formula Student* δημιουργεί αγωνίσματα που απαιτούν όσο το δυνατόν γίνεται μικρότερη τελική ταχύτητα και εστιάζει περισσότερο στην ικανότητα του αμαξώματος να αντέχει κάτω από συνθήκες κόπωσης (λόγου χάρη, Αγώνισμα *Endurance* με απαιτούμενα 22 χιλιόμετρα για την εκτέλεση του).

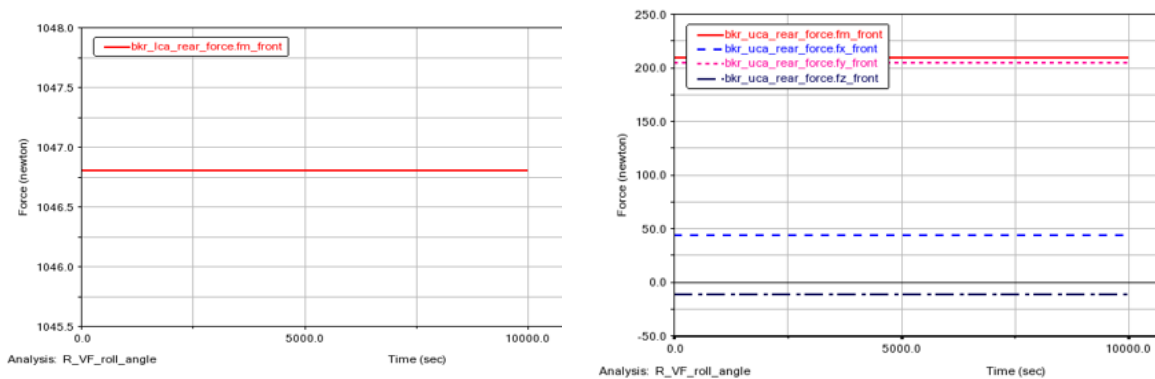
Στην συνέχεια, για τον λόγο του έντονου φαινομένου που συμβαίνει εμφανίζονται δυνάμεις στην ρόδα που δέχεται το μεγαλύτερο φορτίο (αριστερός τροχός, από την οπτική του οδηγού) μεγαλύτερου μέτρου από αυτό που έχουμε καταγράψει από τις προσομοιώσεις στις υπόλοιπες συνθήκες.



Εικόνες 3.21, 3.22 – Δύναμη που ασκείται στο σημείο επαφής του ελαστικού με το δάπεδο, στον δεξιό και αριστερό τροχό

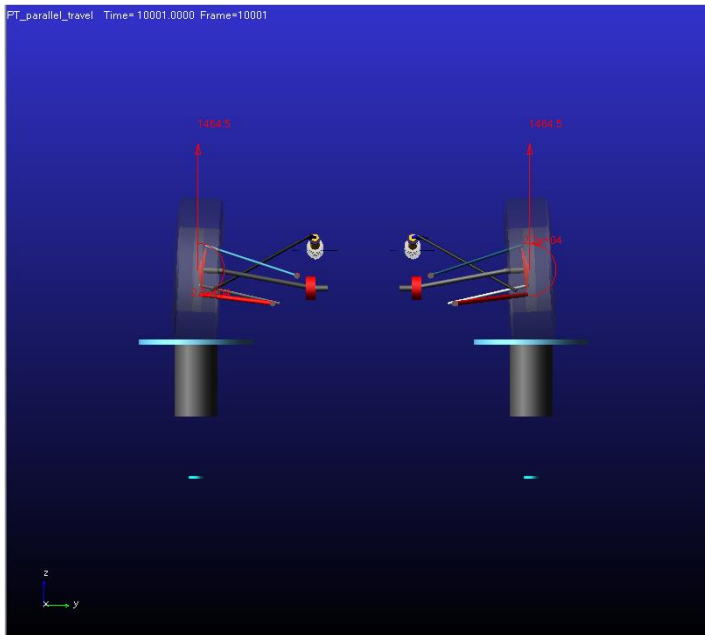
Αυτή η υψηλή τιμή φαίνεται στις εικόνες 3.21, 3.22 και μας προϋδεάζει για την σημαντικότητα που πρέπει να υποβάλλουμε για τον σωστό σχεδιασμό του hub, το οποίο η ύπαρξη του οφείλεται στην πραγματοποίηση δεσμού μεταξύ της ρόδας και του άξονα κίνησης.

Όπως θα προσθέσουμε οι εικόνες 3.23 και 3.24 δηλώνουν πως αυτές οι υψηλές τιμές δυνάμεων παρουσιάζονται μόνο στα μέρη που προαναφέρθηκαν όμως στο άνω και κάτω ψαλίδι οι τάσεις δεν μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο.



Εικόνες 3.23, 3.24 – Δυνάμεις στο κάτω και άνω ψαλίδι κατά την εκτέλεση ολίσθησης των τροχών

3.6 Παράλληλη διαδρομή τροχών στην οπίσθια ανάρτηση



Εικόνα 3.25 – Απεικόνιση παράλληλης διαδρομής των τροχών

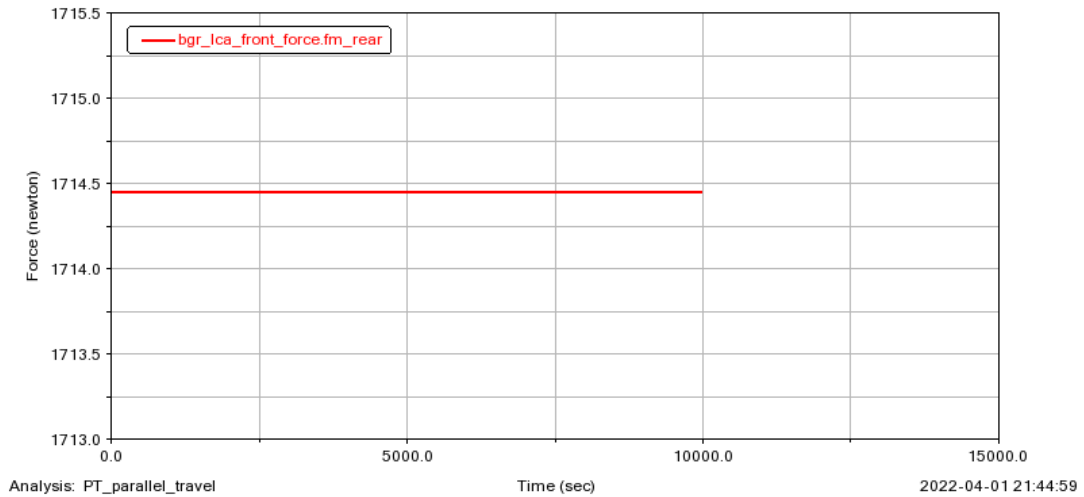
Στην προσπάθεια της εργασίας να μην γίνει κουραστική για τον αναγνώστη, θα συμβεί προσπάθεια ώστε τα δεδομένα της δυναμικής ανάλυσης στην πίσω ανάρτηση να ενταχθούν με λιγότερο πλαγιαρισμό συγκριτικά με προηγούμενα κεφάλαια. Κυρίως για τον απλούστατο λόγο πως πλέον ο αναγνώστης έχει αποκτήσει τις απαραίτητες γνώσεις ώστε να καταλαβαίνει την σημασιολογία των διαγραμμάτων κάτω από παρόμοιες

συνθήκες με αυτές της εμπρός ανάρτησης, φυσικά, με την απώλεια της στροφής των τροχών.

Σε αυτό το σημείο εύλογο θα ήταν, να σημειωθεί πως το οπίσθιο σύστημα ανάρτησης είναι εξίσου σημαντικό με το μπροστά, με την διαφορά πως δέχεται μεγαλύτερο τμήμα των φορτίων που εκπέμπονται από τον άξονα που συνδέει τον θερμικό κινητήρα ή το ηλεκτρικό μοτέρ με τις ρόδες.

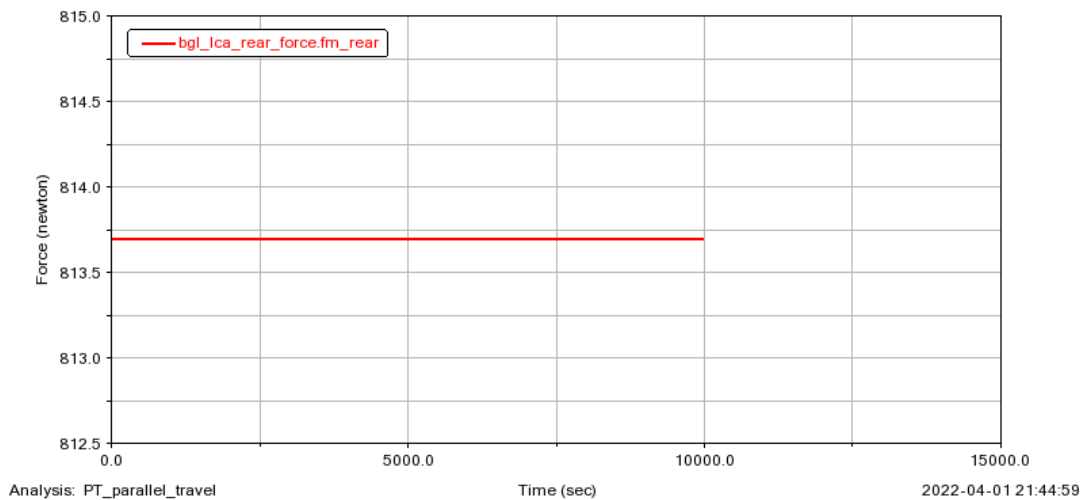
Επιπρόσθετα, κυρίαρχο στοιχείο της ανάρτησης παραμένει να είναι η στήριξη μεταξύ του αμαξώματος και των τροχών, όμως κρίνεται αναγκαίο να εξετάσουμε την αντοχή του συστήματος που γεωμετρικά σχεδιάσαμε στις δυνάμεις που πρόκειται να δεχθεί κάτω από τις συνθήκες που θα προσομοιώσουμε.

Αρχικά, παραθέτοντας τα διαγράμματα για τις δεχόμενες δυνάμεις στο άνω και κάτω ψαλίδι των αναρτήσεων, τα οποία, πρακτικά, είναι τα μέρη που χρειάζεται να διακατέχονται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά και υλικά που δημιουργούν υψηλότερη αντοχή στις υψηλές τάσεις.



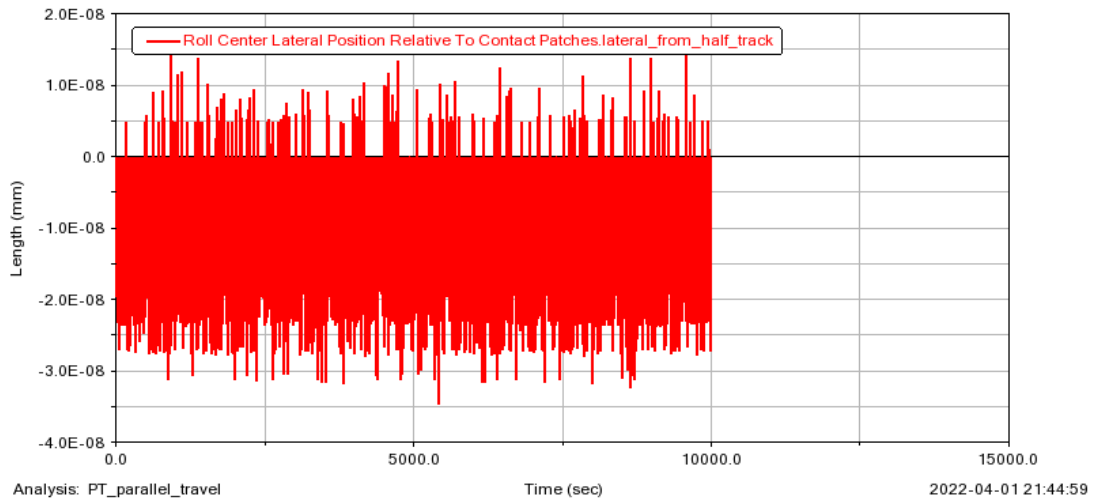
Εικόνα 3.26 – Δύναμη συγκριτικά με τον χρόνο προσομοίωσης στο κάτω ψαλίδι

Στην συνέχεια, παραθέτουμε ένα ενδιαφέρον γράφημα που οπτικοποιεί το σημείο επαφής της ρόδας και πόσο αυτό αποκλίνει κατά την διαδικασία της συνθήκης.



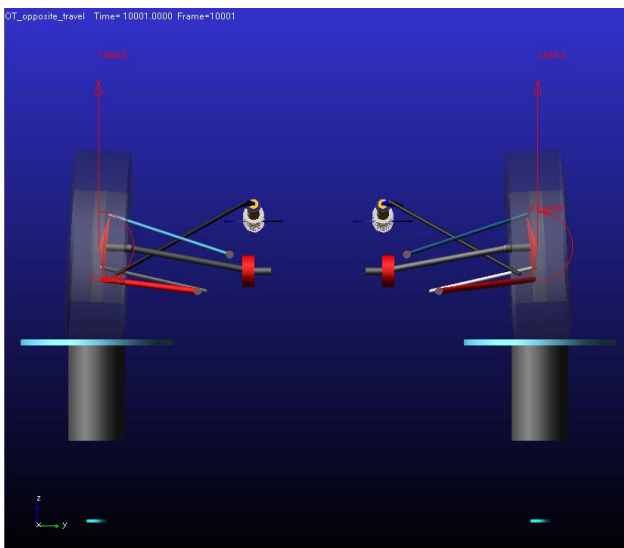
Εικόνα 3.27 – Δύναμη συγκριτικά με τον χρόνο προσομοίωσης στο άνω ψαλίδι

Η παρατήρηση του διαγράμματος θα βοηθήσει τους μηχανικούς που θα εξετάσουν την εργασία αυτή να αποφασίσουν για τον κινητήρα που θα χρησιμοποιήσουν και θα μπορέσουν να διαθέτουν μερικά δεδομένα για την καλύτερη κατανόηση της θέρμανσης ή υπερθέρμανσης των ελαστικών.



Εικόνα 3.28 – Σύγκριση ολίσθησης των τροχών με το σημείο επαφής των τροχών στην συνθήκη που εξετάζουμε

3.7 Αντίθετη διαδρομή τροχών στην όπισθεν ανάρτηση



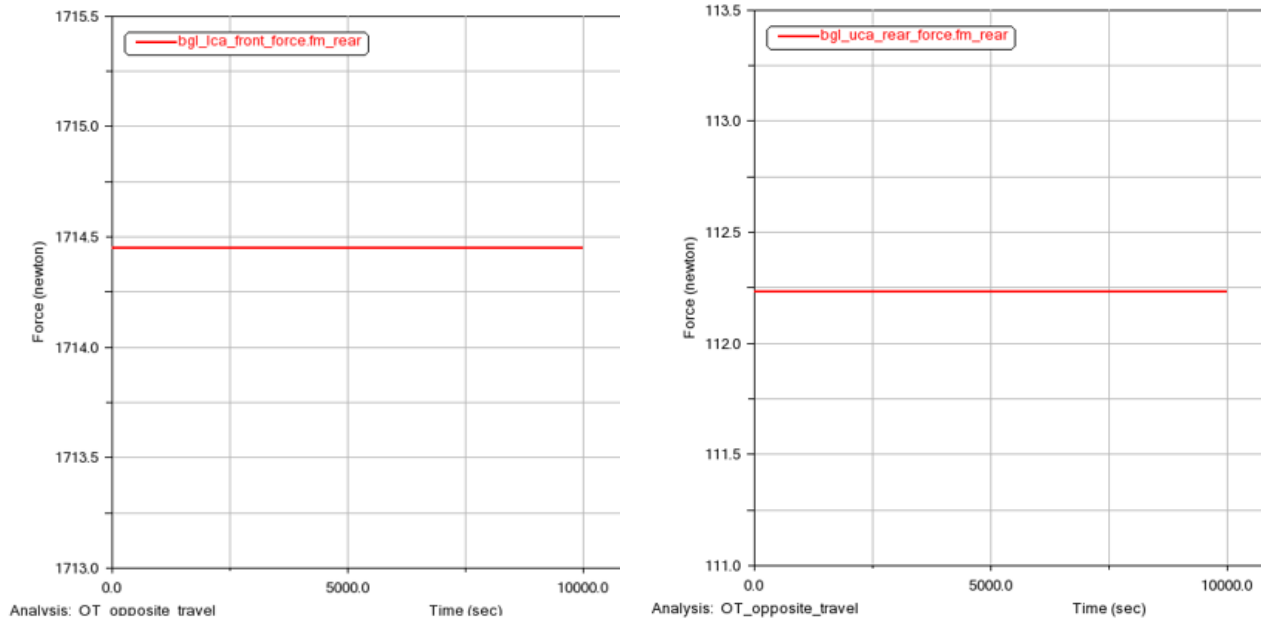
Εικόνα 3.29 – Υπόδειξη προσομοίωσης αντίθετης διαδρομής τροχών στην οπίσθια ανάρτηση, σύμφωνα με το Adams/Car

Τώρα λοιπόν, γνωρίζοντας πως και πού εμφανίζεται αυτή η διαδρομή των τροχών, μπορούμε να παραθέσουμε την εικόνα που πηγάζει από την προσομοίωση και να έχουμε την δυνατότητα να κατανοήσουμε πως τα κάθετα βέλη δηλώνουν τις δυνάμεις που δέχεται η ρόδα, χωρίς να χρειαστεί να προσθέσουμε ξεχωριστό διάγραμμα που να υποδεικνύει τις τιμές αυτές, όπως συνέβη προηγουμένως.

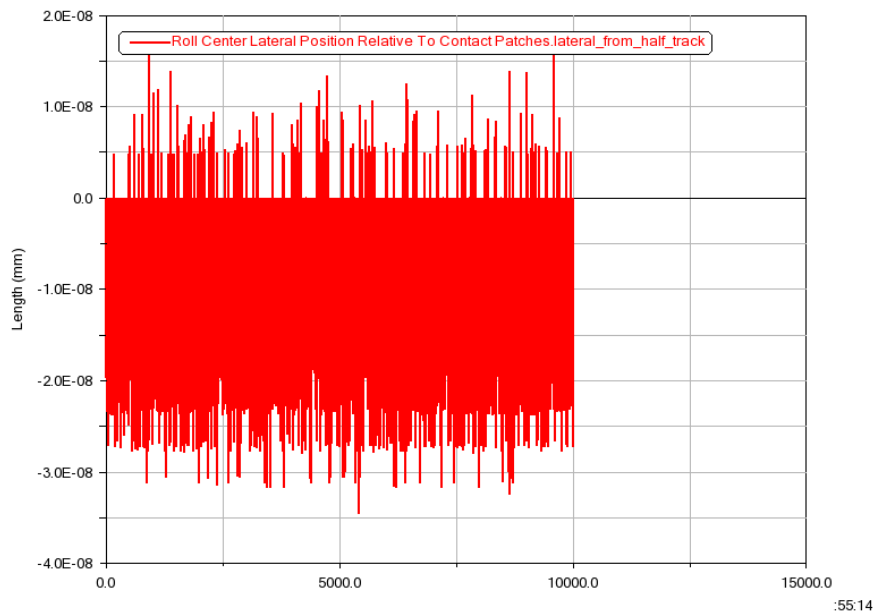
Μετέπειτα, χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο υπόδειξης των συναρτήσεων για τα ψαλίδια της

ανάρτησης και την σύγκριση της ολίσθησης των τροχών συγκριτικά με το σημείο επαφής του τροχού με το έδαφος.

Έτσι, προκύπτει:



Εικόνες 3.30, 3.31 - Δυνάμεις στο άνω και κάτω ψαλίδια στην οπισθέλκουσα ανάρτηση

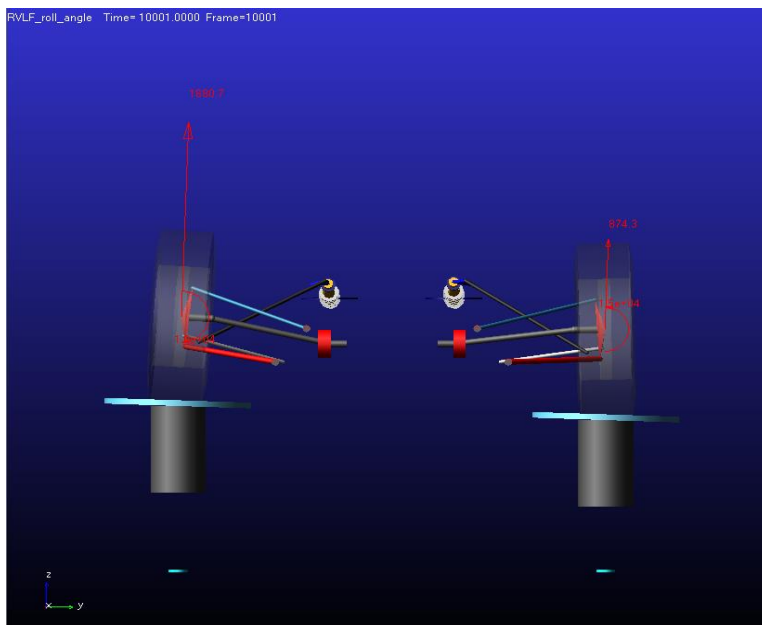


Εικόνα 3.32 – Σύγκριση του σημείου επαφής της ρόδας με την πιθανή ολίσθηση

3.8 Πλάγια ολίσθηση τροχών στην πίσω ανάρτηση

Συνηθίζεται ομάδες, στον διαγωνισμό *Formula Student*, που δεν διακατέχουν πολυετή εμπειρία κατασκευής οχημάτων και εξέτασης αυτών στις πίστες ανά τον κόσμο να δημιουργούν μονοθέσια με την τοποθέτηση μηχανής, θερμικής ή ηλεκτρικής, πίσω από το κάθισμα του οδηγού και η μετάδοση της κίνησης να πραγματοποιείται μόνο στις όπισθεν ρόδες.

Γνωρίζοντας πως η ομάδα του πανεπιστημίου Πελοποννήσου «*Formula ONE Team*», συγκρίνοντας με την προσωπική μου εμπειρία από την συμμετοχή μου στην ομάδα «*Prom Racing NTUA*», του Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην πόλη της Αθήνας, δεν διαθέτει ακόμα την εμπειρία για να πραγματοποιήσει μονοθέσιο ικανό να υποστηρίξει στο Software ή hardware την δυνατότητα τεσσάρων “*motor*”, ένα ανά ρόδα, και τον αυτοματισμό που θα χρειαστεί.

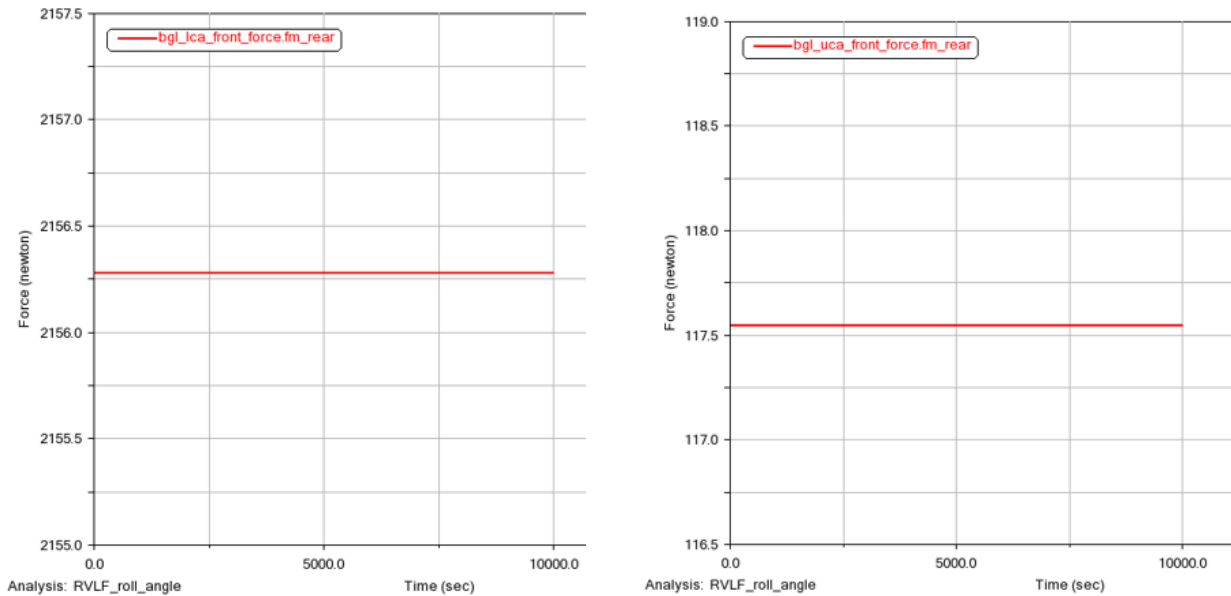


Για τον λόγο αυτό η πλάγια ολίσθηση των πίσω τροχών, με την σκέψη πως θα δημιουργηθεί στο μέλλον μονοθέσιο με πίσω κίνηση, χρειάζεται να υποστεί προσομοίωση με μεγάλη σοβαρότητα, κυρίως επειδή οι πιθανότητες να ολισθήσουν πλάγια οι πίσω τροχοί είναι αυξημένες συγκριτικά με τους εμπρός τροχούς.

Εικόνα 3.33 – Αποτύπωση προσομοίωσης πλάγιας ολίσθησης τροχών στην πίσω ανάρτηση, σύμφωνα με το *Adams/Car*

Σε αυτό το σημείο θα επισυνάψουμε τα γραφήματα που υπολογίστηκαν από τον αλγόριθμο της εταιρίας *MSC Software* και θα τα εισάγουμε στο επόμενο κεφάλαιο στην στατική προσομοίωση για να ελέγξουμε εάν τα τρισδιάστατα σχέδια είναι ικανά να υποστηρίξουν τις δυνάμεις που πραγματώθηκαν από την δυναμική ανάλυση.

Επομένως, θα έχουμε:

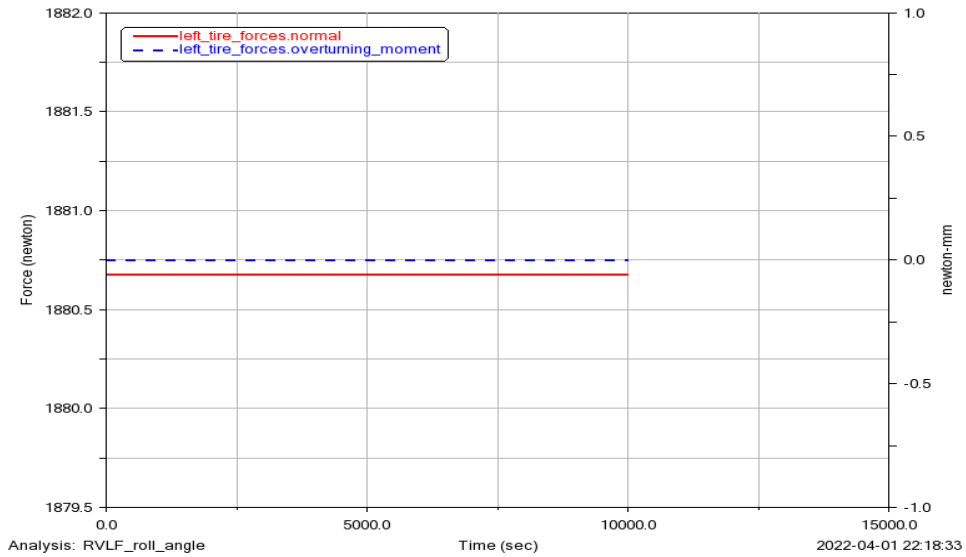


Εικόνες 3.34, 3.35 – Δεχόμενες δυνάμεις στο άνω και κάτω ψαλίδι στην οπίσθια ανάρτηση κατά την εκτέλεση ολίσθησης τροχών

Στην συνέχεια, θα προσθέσουμε τα διαγράμματα των δυνάμεων που ασκούνται στα ελαστικά, όμως με την προσθήκη της δύναμης που χρειάζεται ώστε να συμβεί απώλεια της επαφής της εκάστοτε ρόδας με το έδαφος και σε εκείνο το σημείο και ύστερα να κινδυνεύει το όχημα να εκτροχιαστεί με όλα τα απότοκα που αυτό θα πραγματώσει.

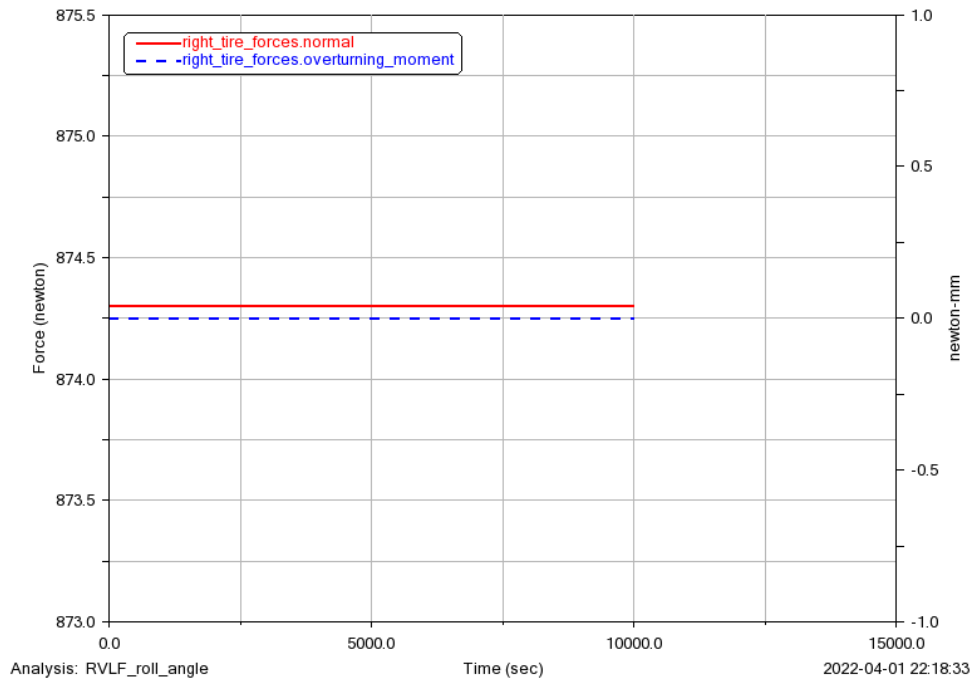
Φυσικά, οι τιμές αυτές δεν είναι αξιώματα, όμως είναι σημαντικές για να επιστήσουμε την προσοχή μας σε πραγματικά δεδομένα που θα συναντήσουμε από τους σένσορες σε διάφορα τμήματα του συστήματος ανάρτησης πάντοτε με τον γνώμονα της ασφάλειας του οδηγού και των εθελοντών στον διαγωνισμό που θα πάρει μέρος το όχημα μας.

Για το αριστερό ελαστικό προκύπτει:



Εικόνα 3.36 – Παρουσίαση ασκούμενων δυνάμεων και ροπών στην αριστερή ρόδα, για το σημείο επαφής και την στιγμή εκτροχιασμού του τροχού από το δάπεδο.

Για το δεξί ελαστικό, θα έχουμε:



Εικόνα 3.37 - Παρουσίαση ασκούμενων δυνάμεων και ροπών στην δεξιά ρόδα, για το σημείο επαφής και την στιγμή εκτροχιασμού του τροχού από το δάπεδο.

4 Στατική ανάλυση τμημάτων του συστήματος ανάρτησης

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα επικεντρωθούμε στην σημασία που έχει η στατική ανάλυση ως προς την ευρύτερη κατανόηση του συστήματος που σχεδιάσαμε. Φυσικά, θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που υπολογίστηκαν από την δυναμική ανάλυση.

Σε αυτό το σημείο, να σημειωθεί πως θα αποτυπωθεί στατική μελέτη των μέγιστων τιμών τάσεων και δυνάμεων, σε κάθε άξονα. Αυτό συμβαίνει διότι εάν διασφαλίσουμε την ορθή λειτουργία του συστήματος στις μέγιστες κατά μέτρο τιμές ανά της μονάδας μέτρησης τότε οι τιμές με μικρότερο μέτρο, παρόλο που δεν θεωρούνται λιγότερο σημαντικές, για την απλοποίηση του τρόπου συγγραφής, θα παραλειφθούν.

4.1 Στατική ανάλυση με την βοήθεια του πακέτου SolidWorks της εταιρίας - Dassault Systèmes

Το Premium πακέτο του προγράμματος SolidWorks δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να μπορέσει να επεξεργαστεί τους περίπλοκους αλγορίθμους μέσω ενός φιλικού περιβάλλοντος για τον χρήστη δίχως να χρειαστεί ο ίδιος να εκτελέσει ανώτερα μαθηματικά και μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για την εκτέλεση της προσομοίωσης.

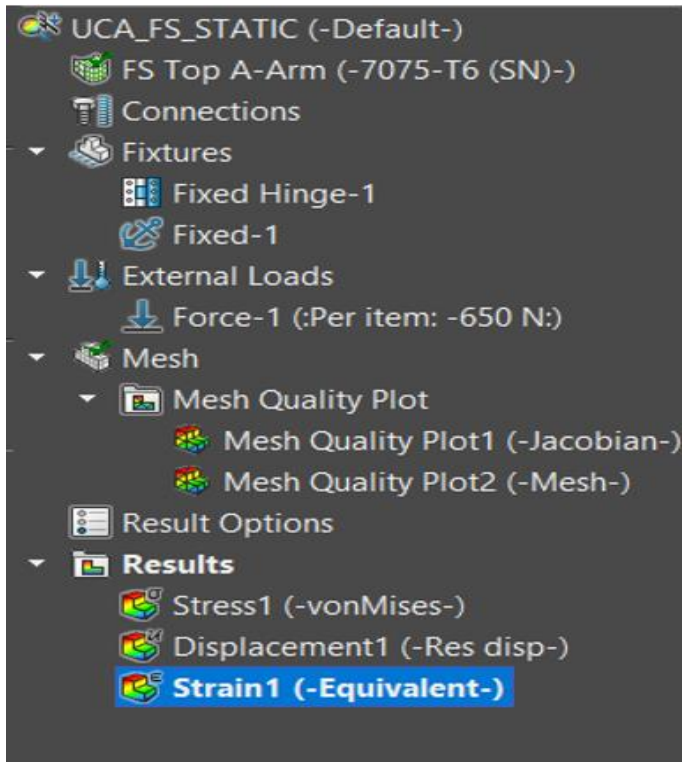
Ο χρήστης, όμως καλείται να είναι εξοικειωμένος με τις λειτουργίες του προγράμματος ώστε να έχει την ευχέρεια να τοποθετήσει με ορθό τρόπο την κατεύθυνση των δυνάμεων και των ροπών πάνω στις κατάλληλες επιφάνειες των αντικειμένων που επικεντρωνόμαστε σε αυτήν την εργασία.

Στην συνέχεια, θα αφιερώσουμε την προσοχή μας στην παρουσίαση των τμημάτων που δέχονται το μεγαλύτερο μέρος των δυνάμεων και σε ακραίες συνθήκες λόγω των επαναλαμβανόμενων κραδασμών, ίσως, να κινδυνεύουν και με το φαινόμενο της αστοχίας.

4.1.1 Παρουσίαση διαδικασίας στατικής μελέτης πεπερασμένων στοιχείων σε τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης.

Εν αρχή, θα αποτυπώσουμε την διαδικασία που εφαρμόσαμε σε όλες τις μελέτες στατικής ανάλυσης των επιμερών τμημάτων του εμπρός και του πίσω συστήματος ανάρτησης. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την υπόδειξη κάθε σημείου όπου ο χρήστης καλείται αυτόνομα να κάνει επιλογές για την διαδικασία και την μέθοδο της ανάλυσης που θα ακολουθήσει.

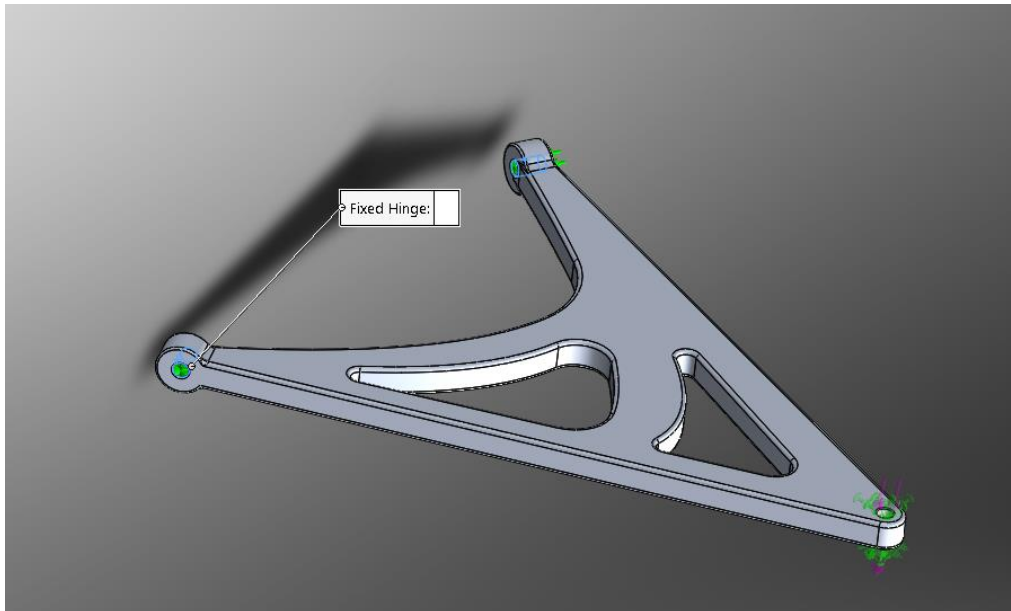
Για τον προαναφερόμενο λόγο, θα παρουσιάσουμε τα βήματα που χρησιμοποιήσαμε για να πραγματοποιήσουμε την ανάλυση στα τμήματα των αναρτήσεων. Επιλέχθηκε να συμβεί η μελέτη του άνω ψαλιδιού στο εμπρός σύστημα ανάρτησης διότι είναι εξαιρετικής σημασίας κομμάτι και η προετοιμασία του για την μελέτη των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται κατάλληλη για την υπόδειξη του περιβάλλοντος του προγράμματος SolidWorks.



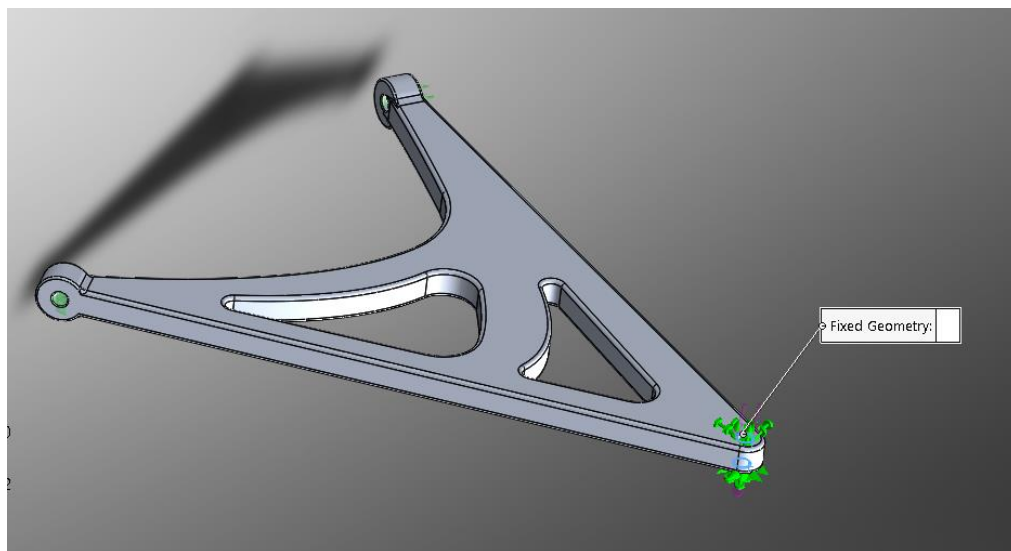
Ονομάσαμε την ανάλυση UCA_FS_STATIC με σκοπό οι ονομασίες να πηγάζουν από την ίδια σημασιολογία που προσδιορίστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Επιπλέον, το περιβάλλον υποδεικνύει στον χρήστη τα βήματα που κρίνονται απαραίτητα να ακολουθήσει για την πραγματοποίηση μιας ορθής ανάλυσης και στο τέλος μετά από περίπλοκους υπολογισμούς παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις τάσεων, δομικών μετατοπίσεων και εντάσεων.

Εικόνα 4.1 – Περιβάλλον ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων του SW

Έτσι, για το πρώτο βήμα, όπως ακριβώς φαίνεται στις εικόνες 4.2 και 4.3 χρειάζεται να έχουμε γνώση της κίνησης που συμβαίνει σε κάθε μέρος, με την συγκεκριμένη περίπτωση το ψαλίδι στα δύο άκρα να εκτελούν κίνηση άρθρωσης (*fixed hinge*) ενώ το μπροστινό σημείο να είναι πακτωμένο (*fixed geometry*) λόγω της συναρμολόγησής του με συνδέσμους και του τροχού πλήμνης (*hub*).



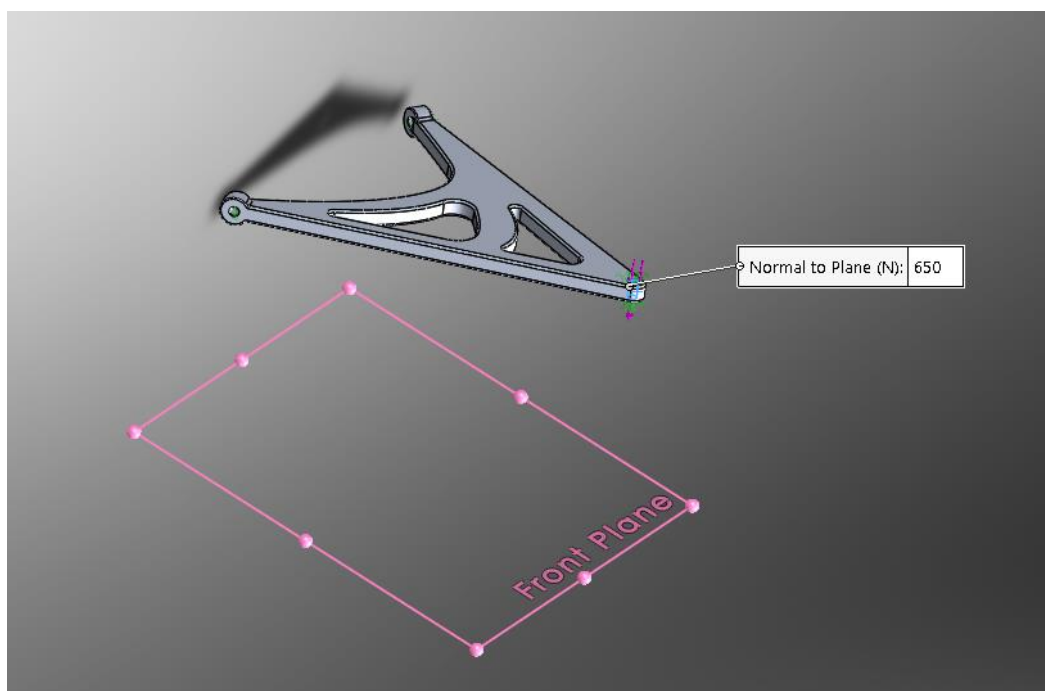
Εικόνα 4.2 – Σημεία στο ψαλίδι που χρησιμοποιείται άρθρωση για την ευκολία της κίνησης



Εικόνα 4.3 – Σημείο πακτωμένης γεωμετρίας για την εξυπηρέτηση συναρμολόγησής με σύνδεσμο

Μετάπειτα, εφαρμόζουμε τις δυνάμεις ή τις ροπές αναλόγως πάντοτε τα δεδομένα που διαθέτουμε από την δυναμική μας ανάλυση, στην κατάλληλη διεύθυνση και στην σωστή επιφάνεια. Αυτοί οι παράγοντες είναι οι πιο σημαντικοί ώστε οι υπολογισμοί να ανταποκρίνονται στο υψηλότερο δυνατόν βαθμό με την πραγματικότητα.

Η εικόνα 4.4 αποτυπώνει αυτούς του παράγοντες, με την σημείωση πως η αρνητική τιμή στο μέτρο της δύναμης υποδεικνύει την αρνητική φορά, δηλαδή η διεύθυνση της δύναμης τείνει προς το έδαφος.



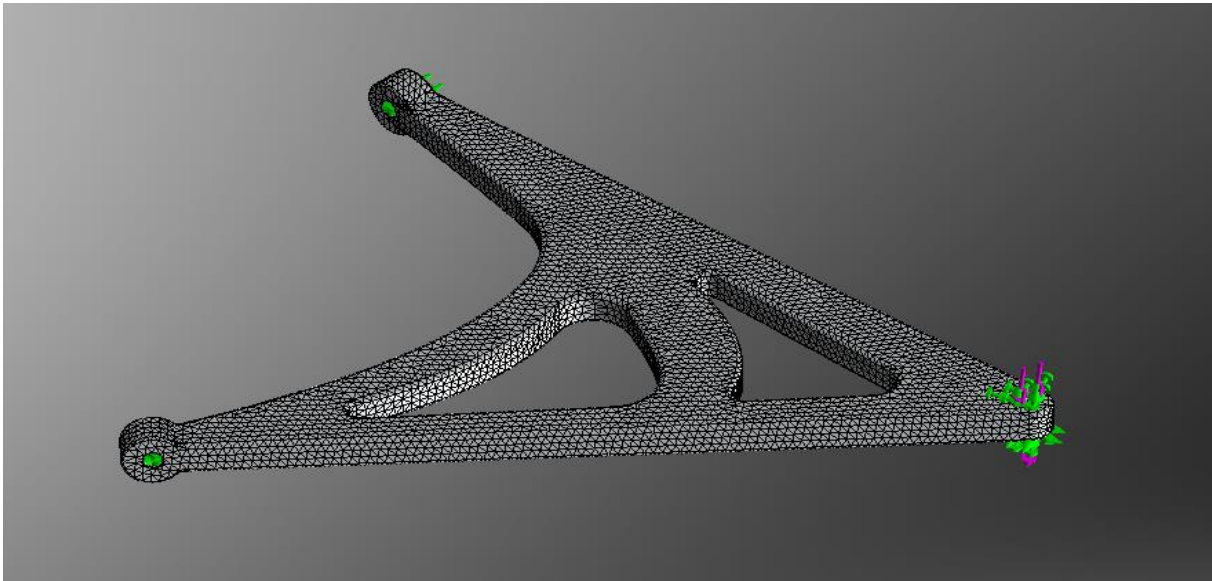
Εικόνα 4.4 – Αποτύπωση διεύθυνσης δύναμης 650 Newton στο εμπρός κυκλικό άνοιγμα του ψαλιδίου

Επόμενο βήμα είναι να εκτελέσουμε την εντολή ‘Mesh this geometry’, όπου δημιουργεί τον διαχωρισμό του τρισδιάστατου σχεδίου μας σε μια σειρά τριγώνων με σκοπό ο υπολογισμός των πεπερασμένων στοιχείων να πραγματοποιηθεί με ευκολία.

Αυτή η διαδικασία χρειάζεται ένα ισχυρό σύστημα υπολογιστή για να μπορέσει να υπολογίσει την αριθμητική μέθοδο (Jacobian) με όσο το δυνατόν μικρότερη αστοχία.

Να σημειωθεί, πως μία επαγγελματική στατική ανάλυση μπορεί να διαρκέσει από ώρες έως και ημέρες, προφανώς λοιπόν η εργασία αυτή δεν διαθέτει εργαλεία τέτοια που να προσομοιάζουν με τόσο ρεαλιστική λεπτομέρεια την στατικότητα των υλικών.

Παρόλα αυτά, η ανάλυση που θα πραγματοποιήσουμε για την πτυχιακή εργασία θα διαθέτει επιστημονική ακεραιότητα και οι μετρήσεις του προγράμματος θα βρίσκονται σε λογική συνέχεια.

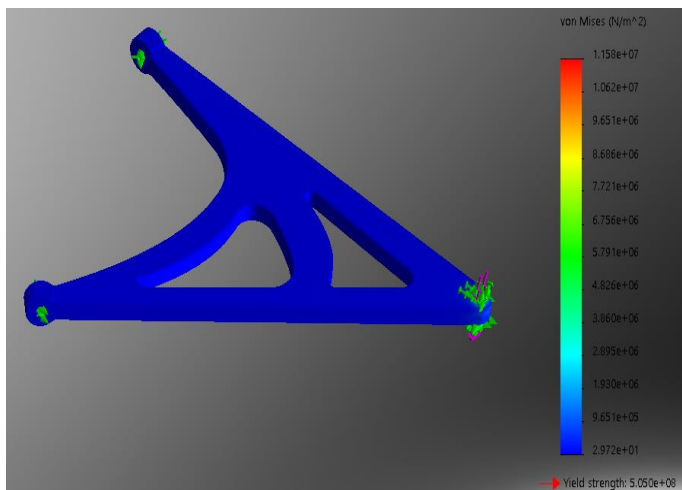


Εικόνα 4.5 – Αποτύπωση της γεωμετρίας Mesh, με την μορφή τριγώνων

Μετάπειτα, εκτελούμε την εντολή ‘Run this study’ και το υπολογιστικό σύστημα εμφανίζει στην οθόνη μας, τις απόρροιες της στατικής ανάλυσης με τρεις επιστημονικά καταρτισμένες μεθόδους.

Πρώτη, είναι αυτή της μηχανικής καταπόνησης (mechanical stress) και μετράτε σε von mises (N/m^2), κατά την οποία προκύπτει παραμόρφωση του σώματος μας ανάλογα με το ποσό των δυνάμεων που δέχεται.

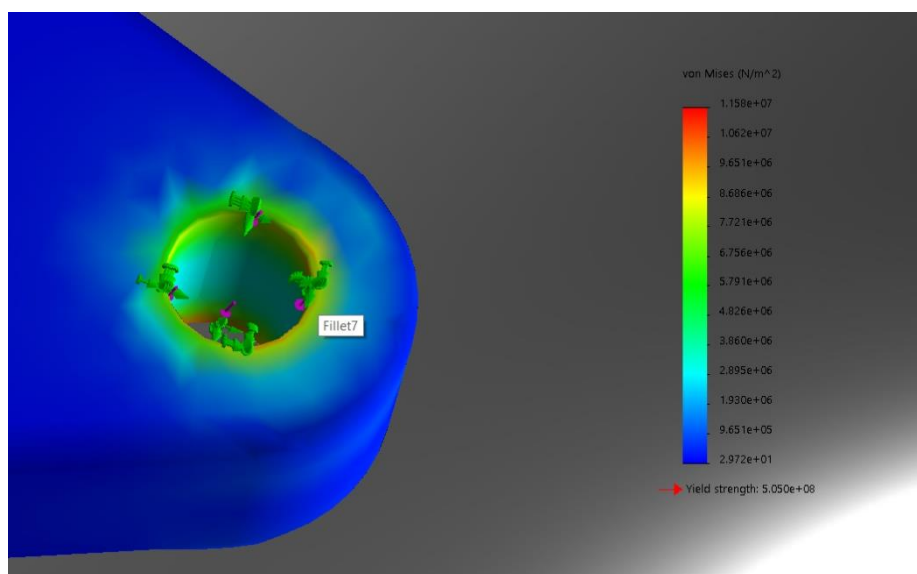
Επιπλέον, το κόκκινο χρώμα συμβολίζει υψηλά ποσά παραμόρφωσης ενώ το μπλε συμβολίζει μικρή καταπόνηση.



Εικόνα 4.6 – Ανάδειξη μηχανικής καταπόνησης (Von Mises)

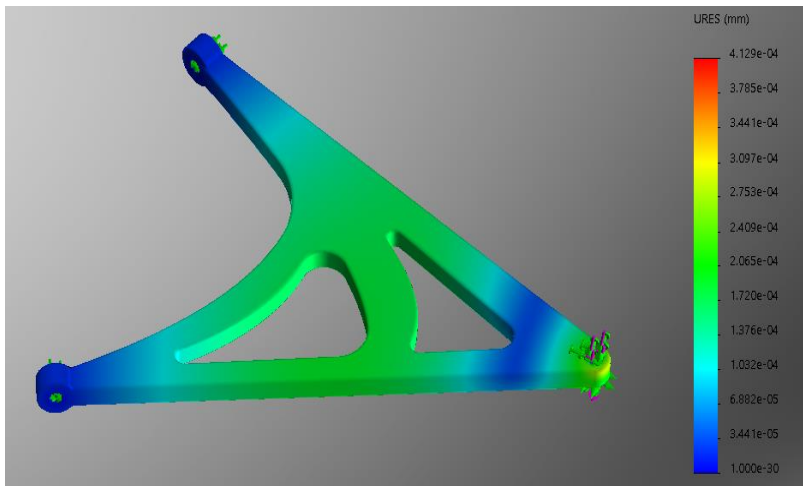
Όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 4.6 και 4.7, η παραμόρφωση δεν νοείται ως σημαντικού μέτρου εφόσον το πλήθος του τμήματος είναι με χρώμα μπλε και τιμές $2.97e+01 \text{ N/mm}^2$. Ακόμη, στο κάτω μέρος έχει υπολογιστεί και το σημείο διαρροής το οποίο ανέρχεται σε $5.05e+08 \text{ N/mm}^2$.

Στην παρακάτω εικόνα, όπου εστιάζουμε στο σημείο όπου ασκείται η δύναμη φαίνεται πως η καταπόνηση ασκεί μεγαλύτερη επίδραση στο σώμα μας.



Εικόνα 4.7 – Καταπόνηση του σώματος με εστίαση στο σημείο άσκησης της δύναμης

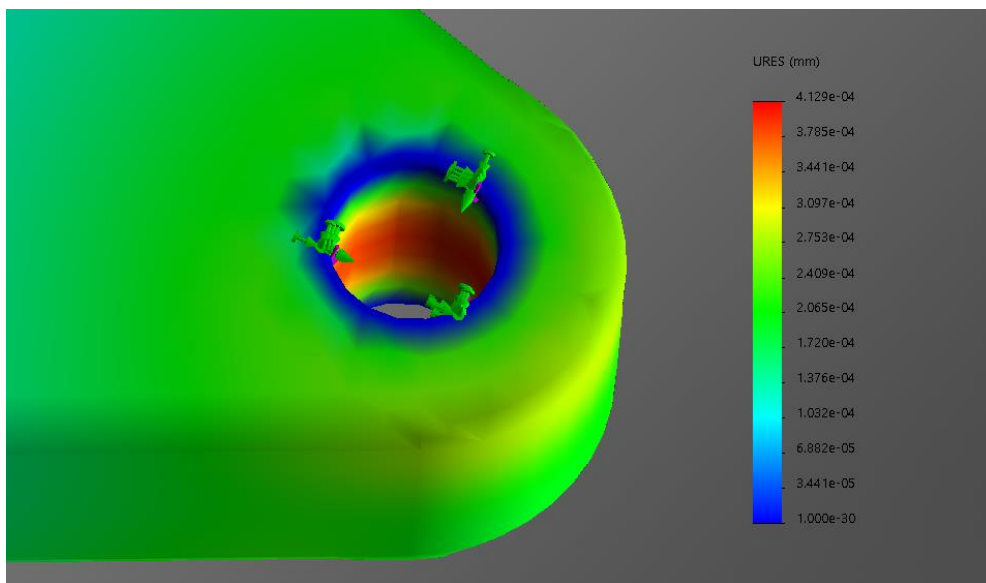
Επόμενο βήμα για την επίδειξη των απότοκων της προσομοίωσης είναι η εμφάνιση φαινομένου της μηχανικής μετατόπισης, δηλαδή το φαινόμενο κατά το οποίο το σώμα αλλοιώνεται κατά την γεωμετρία του, συνήθως βέβαια αναφερόμαστε σε εξαιρετικά μικρές μεταβολές της τάξης των 10^{-4} χιλιοστών.



Εικόνα 4.8 – Αποτύπωση μηχανικής μετατόπισης σε χιλιοστά – displacement URES

Όμως η συνεχής επανάληψη τους, λόγω της κίνησης του συστήματος δημιουργεί την αναγκαιότητα για περαιτέρω μελέτη στην προσπάθεια αποφυγής αστοχιών που οδηγούν πολλές φορές και σε ατυχήματα κατά την αγωνιστική περίοδο.

Όπως και παραπάνω στην εικόνα 4.9 εστιάζουμε στο σημείο όπου η δύναμη τέμνει το σημείο επαφής και παρατηρούμε την επίδραση που έχει πάνω στο αντικείμενο που παρουσιάζουμε την μελέτη μας.



Εικόνα 4.9 – Μηχανική μετατόπιση σώματος με εστίαση στο σημείο επαφής με την δύναμη

4.2 Δυναμική προσομοίωση των κομματιών που απαρτίζουν το εμπρός σύστημα ανάρτησης.

Όπως γίνεται γνωστό και από την επικεφαλίδα στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματώσουμε τα αποτελέσματα που διεξάχθηκαν μετά από την εκτέλεση των δυναμικών ταλαντώσεων στα μέρη που συνδυάζουν μηχανικά το σύστημα ανάρτησης.

Να σημειωθεί πως για κάθε κομμάτι, θα παρουσιάσουμε την μέγιστη τιμή που θα δεχθεί σε Newton και δεν θα επιστήσουμε την προσοχή μας στην αποτύπωση των απότοκων μετά από κάθε κίνηση που μπορεί να φέρει πέρας το σύστημα ανάρτησης, όπως φανερώθηκε στην κινηματική ανάλυση του [κεφαλαίου 3](#).

Αυτή η διεργασία πραγματοποιείται για να διευκολύνουμε τον αναγνώστη ως προς την κατανόηση των επιδράσεων που παρουσιάζονται σε ένα ταλαντωτικό σύστημα κατά την εκτέλεση πολύπλοκων και επαναλαμβανόμενων κινήσεων.

Επομένως, ο μηχανικός που θα αφιερώσει τον χρόνο του στην μελέτη αυτής της πτυχιακής θα βρίσκεται σε θέση να κατανοήσει πως τα υψηλά μέτρα δυνάμεων – κάθετων και στρεπτικών - μπορούν να αλλοιώσουν την γεωμετρία των σωμάτων και να επιφέρουν αστοχίες σε ένα σύστημα που βρίσκεται υπό κίνηση, συχνά κάτω από το καθεστώς μεγάλου μέτρου ταχυτήτων.

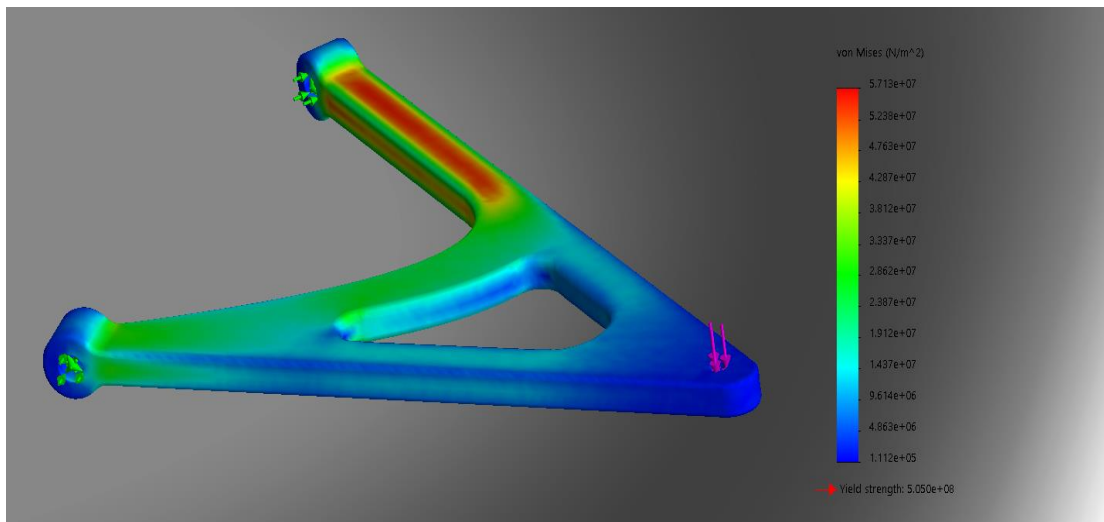
Επιπλέον, για το άνω ψαλίδι της εμπρός ανάρτησης ήδη εμφανίσαμε την στατική απόρροια με αριθμητικά δεδομένα στο σύνολο της φωτογραφίας για την μελλοντική υπόδειξη αυτών σε πτυχιακές εργασίες κάτω από το ίδιο θέμα.

Ξεκινάμε, με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, με μέρη τα απότοκα που παρουσιάσαμε παραπάνω.

4.2.1 Στατική ανάλυση στο κάτω ψαλίδι - εμπρός ανάρτησης

Εφόσον στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείξαμε την διεργασία που εκτελούμε για την εμφάνιση των μετρήσεων που υπολογίζονται στην απλή μορφή των στατικών προσομοιώσεων, σε αυτό το στάδιο της εργασίας θα επικεντρωθούμε στις μετρήσεις αποτυπώνοντας αυτές με την μορφή εικόνων.

Επομένως, για την καταπόνηση μέσω της διαδικασίας Von Mises θα έχουμε:

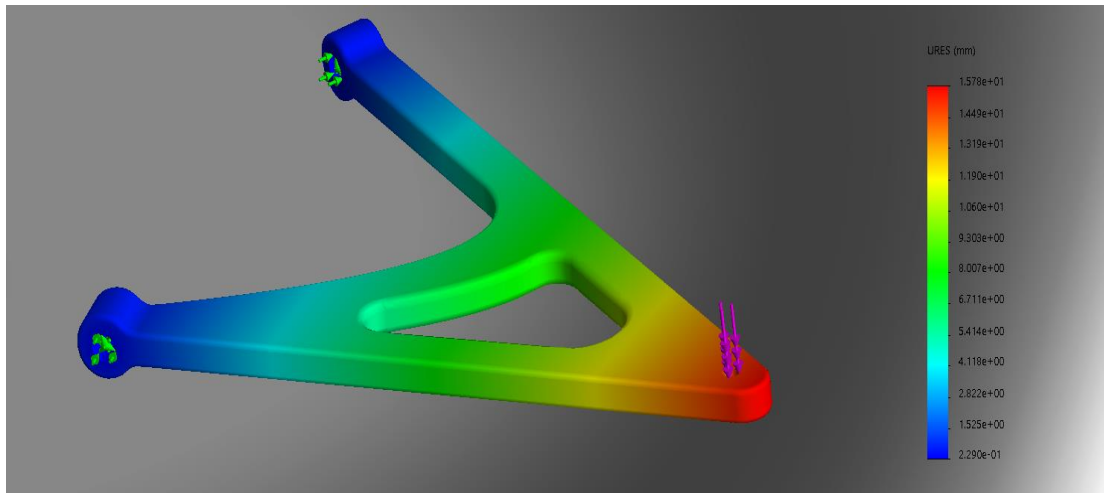


Εικόνα 4.10 – Ανάδειξη μηχανικής καταπόνησης με την διαδικασία Von Mises (N/mm²)

Όπως αναγνωρίζεται από την εικόνα 4.10 υψηλές καταπονήσεις παρατηρούνται στο άνω άκρο του σώματος μας αυξάνοντας τις πιθανότητες αστοχίας του ψαλιδιού σε εκείνο το σημείο.

Αυτή η παρατήρηση είναι εξαιρετικά χρήσιμη όταν, κατά την διάρκεια του αγώνα ή των εμφανίσεων του οχήματος μας σε πίστα για εργασίες εξάσκησης, λαμβάνουμε μετρήσεις στο εύρος των τιμών αυτών να γνωρίζουμε εάν ο οδηγός βρίσκεται σε κίνδυνο ή εάν δίνεται η δυνατότητα σε αυτόν να οδηγήσει περισσότερο ‘απότομα’.

Έτσι για την μετατόπιση των δεσμών μέσω του μαθηματικού μοντέλου URES, θα έχουμε:

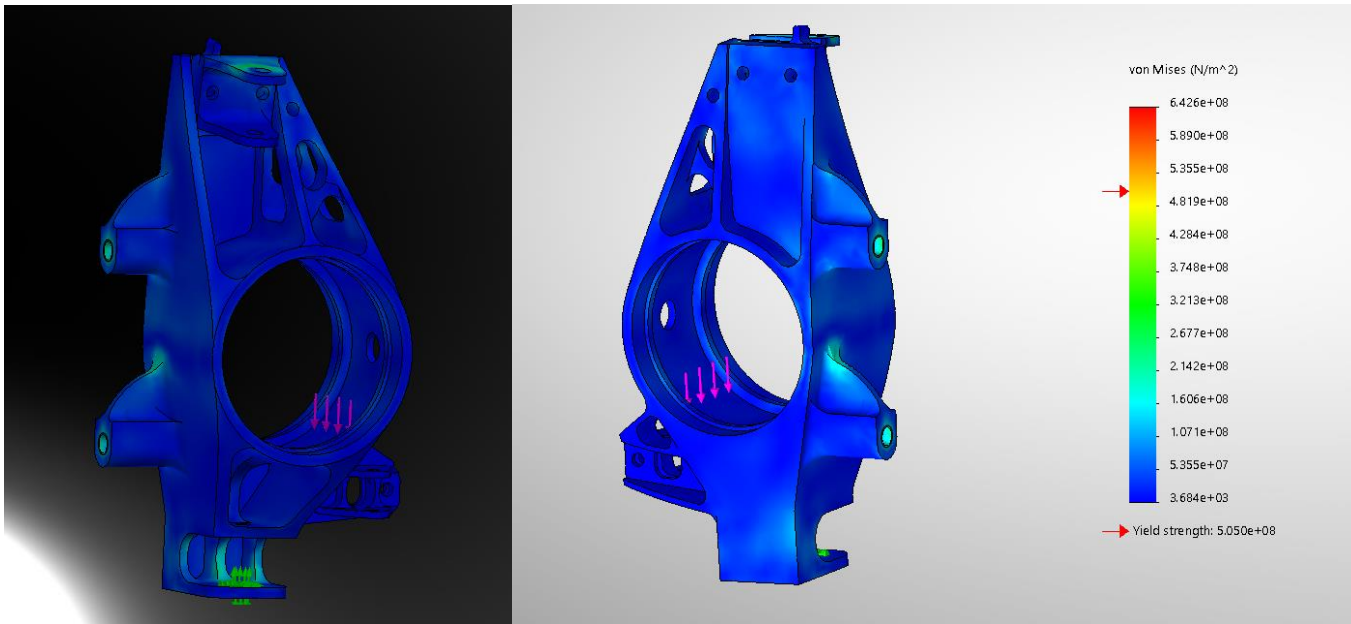


Εικόνα 4.11 – Μετατόπιση δεσμών κάτω ψαλιδιού σε χιλιοστά, μέθοδος URES

4.2.2 Μοντέλο μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχών (Wheel Hub)

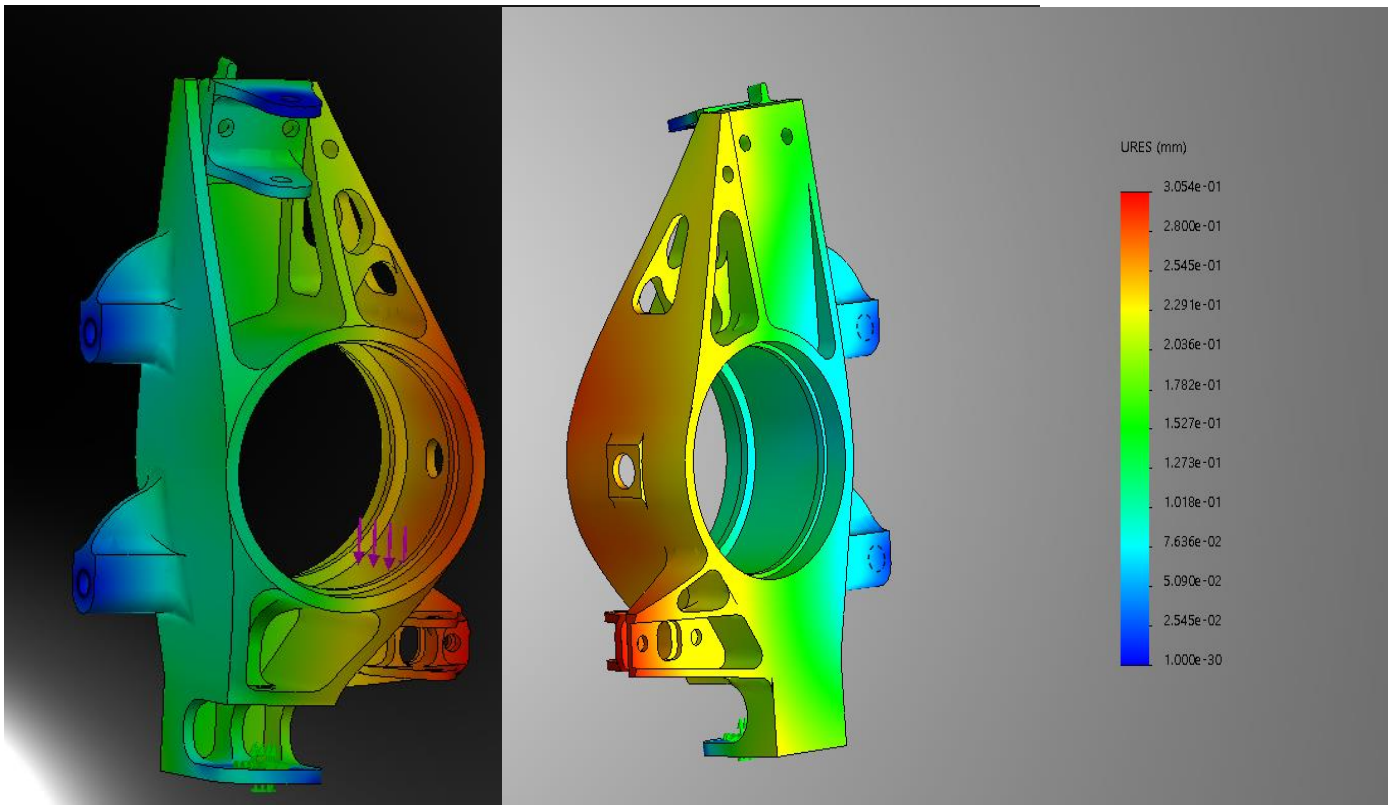
Το σώμα αυτό έχει εξαιρετική σημασία στο σύστημα ανάρτησης διότι πάνω σε αυτό επιδρούν οι υψηλότερες σε μέτρο δυνάμεις, κάτι που αναγκάζει την μορφή του να είναι ογκώδης και με σχετικά μεγάλο πάχος μεταξύ των τοιχωμάτων του.

Για την μηχανική καταπόνηση, οι τιμές έχουν ως εξής:



Εικόνα 4.12 – Καταπόνηση μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχού – Μέθοδος Von Mises

Ενώ για την μετατόπιση θα ισχύει:



Εικόνα 4.12 – Μετατόπιση δεσμών μηχανικής πλήμνης εμπρός τροχού, μέθοδος URES

4.3 Δυναμική προσομοίωση των κομματιών που απαρτίζουν το οπίσθιο σύστημα ανάρτησης.

Σε αυτό το σημείο, έχοντας διαθέσιμα και τα φορτία αντίδρασης των στελεχών, σκεπτόμενοι πως οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά υψηλοί μπορούμε να συνεχίσουμε την παρουσίαση μας.

Να σημειώσουμε πως τα σώματα μας θα κατασκευαστούν από αλουμίνιο 7075 – T6, συνήθης επιλογή σε αεροναυπηγικές και αγωνιστικές εφαρμογές, με όριο διαρροής εφελκυσμού 505MPa.

Για την αποφυγή επανάληψης πανομοιότυπων υπολογισμών, δεν παρατίθενται απότοκα τάσεων για το κάτω ψαλίδι της οπίσθιας ανάρτησης, καθώς σε αυτό λόγω έλλειψης κάμψης, οι συντελεστές ασφαλείας είναι αρκετά μεγαλύτεροι.

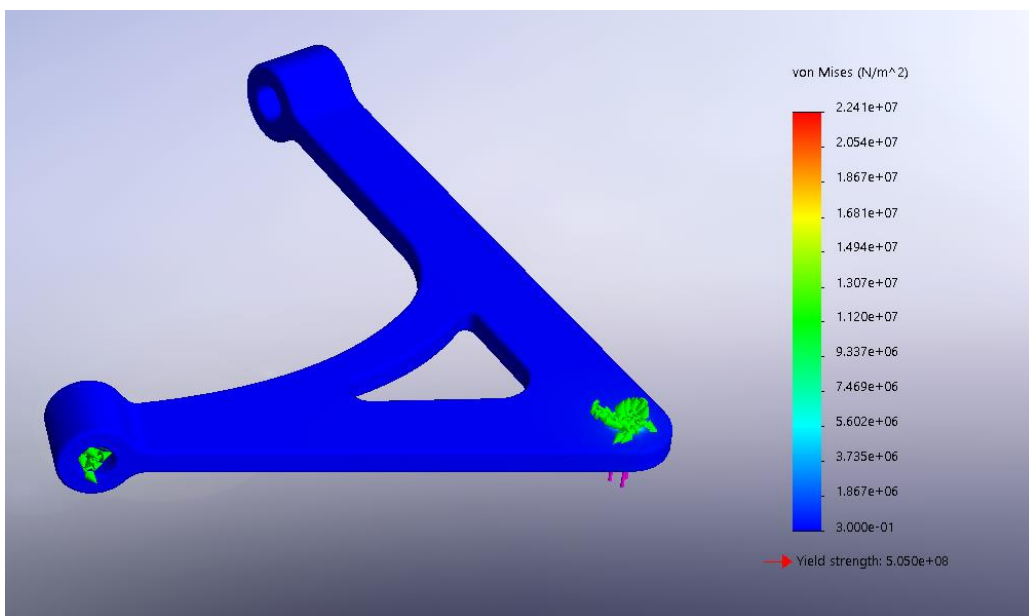
Μια ακόμη, σημαντική παράμετρος, για την πραγματική κατανόηση ενός συστήματος ανάρτησης πρωτότυπου αγωνιστικού οχήματος, είναι η επαλήθευση των επιλογών και των υπολογισμών που έγιναν στα βήματα σχεδιασμού.

Για τον λόγο αυτό χρειάζεται να αποτυπώσουμε με σαφήνεια τα δεδομένα που υπολογίσαμε με την βοήθεια των υπολογιστικών προγραμμάτων και να καταλήξουμε στο εάν αυτά μας ευχαριστούν ή εάν χρειάζεται να προβούμε σε τυχόν διαφορετικές γεωμετρίες τόσο χωρικά αλλά τόσο και στις ίδιες τις γεωμετρίες

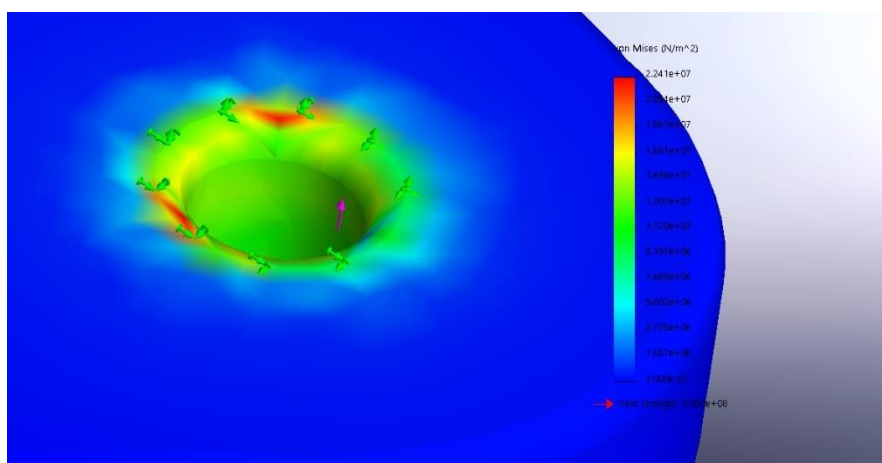
4.3.1 Δυναμική ανάλυση στο άνω ψαλίδι της πίσω ανάρτησης

Όσον αφορά το άνω ψαλίδι στην πίσω ανάρτηση προκύπτουν αρκετά παρόμοια απότοκα από πλευράς τάσεων με αυτά της εμπρός, αυτό συμβαίνει γιατί έχουμε καταλήξει σε συγκεκριμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά που απαρτίζουν τα σώματα μας.

Επομένως, για την μηχανική καταπόνηση με την μέθοδο υπολογισμού Von Mises, προκύπτουν οι εξής τιμές:

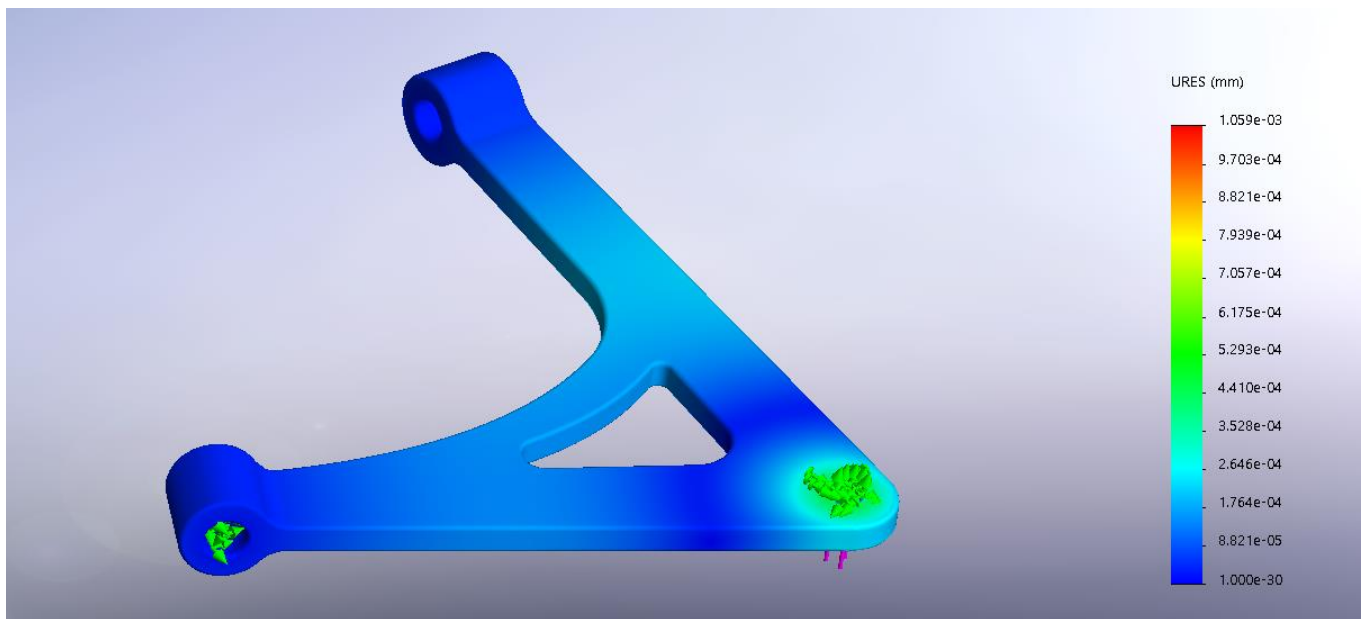


Εικόνα 4.13 – Απεικόνιση καταπόνησης στο άνω ψαλίδι της οπίσθιας ανάρτησης – Μέθοδος Von Mises

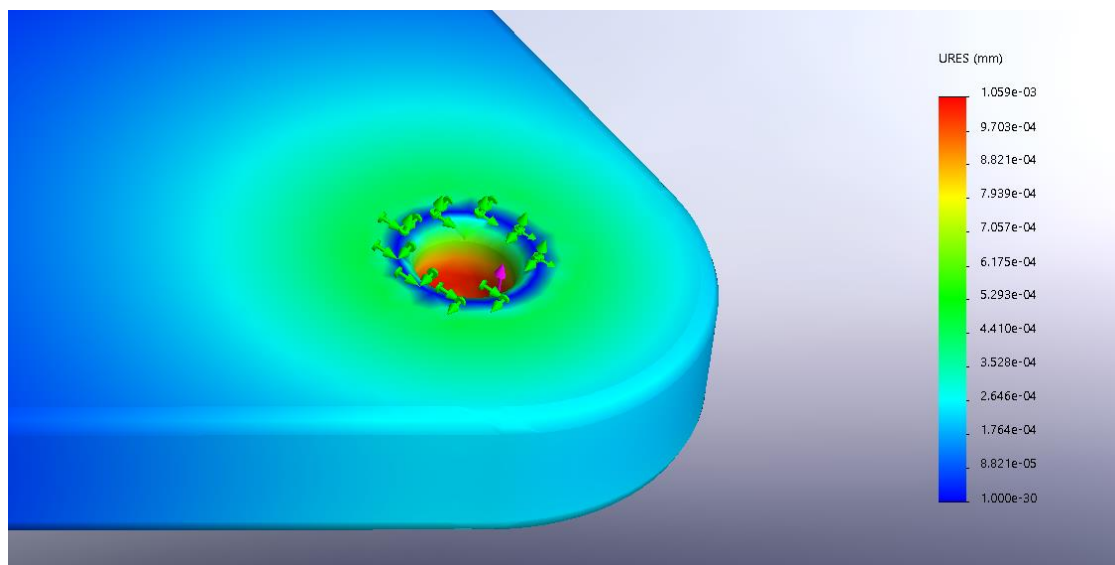


Εικόνα 4.14 – Εστίαση στο σημείο εφαρμογής της δύναμης κατά την καταπόνηση

Ενώ αντίστοιχα για την μετατόπιση προκύπτουν απότοκα όμοια με την εικόνα 4.14:



Εικόνα 4.15– Μηχανική μετατόπιση στο άνω ψαλίδι, σύμφωνα με την μέθοδο URES σε χιλιοστά (mm)

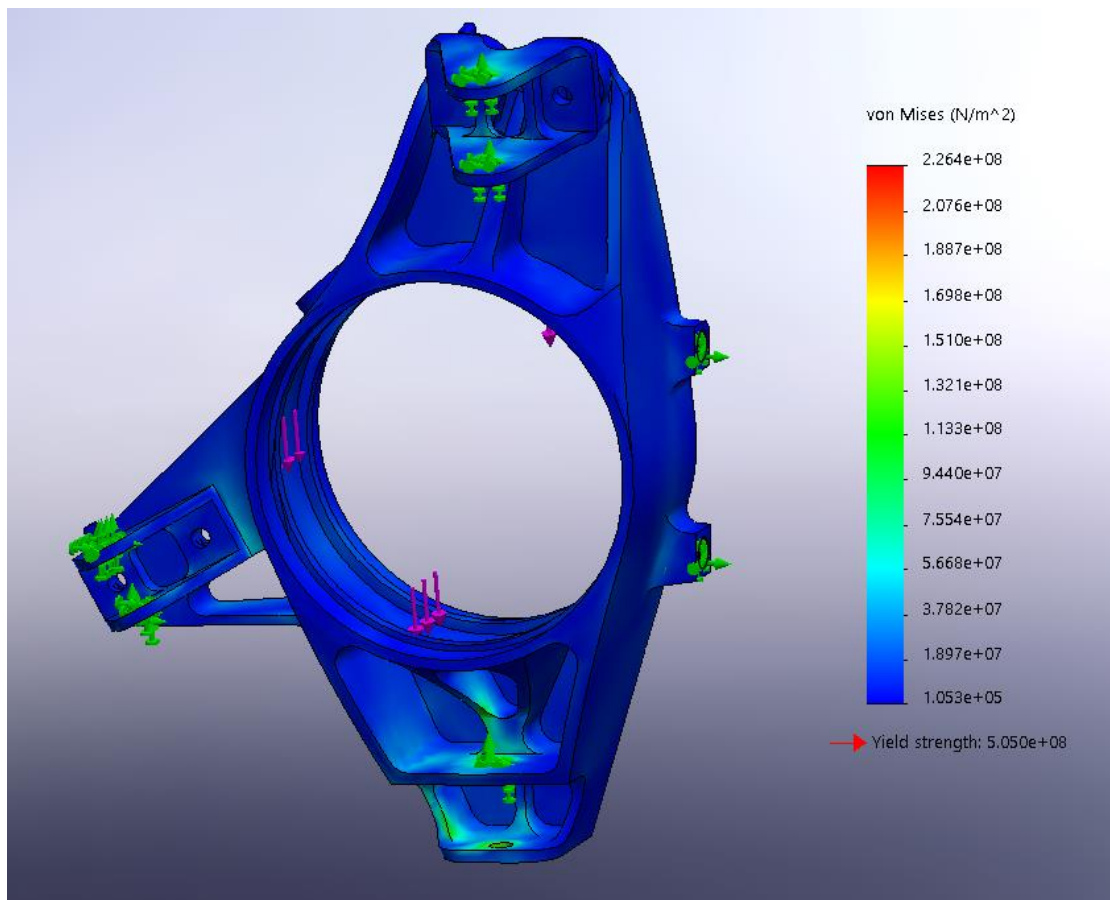


Εικόνα 4.16 – Εστίαση στο σημείο εφαρμογής της τάσης, όπου φανερόνται και υψηλότερες τιμές παραμόρφωσης

4.3.2 Αποτελέσματα δυναμικής προσομοίωσης μηχανικής πλήμνης

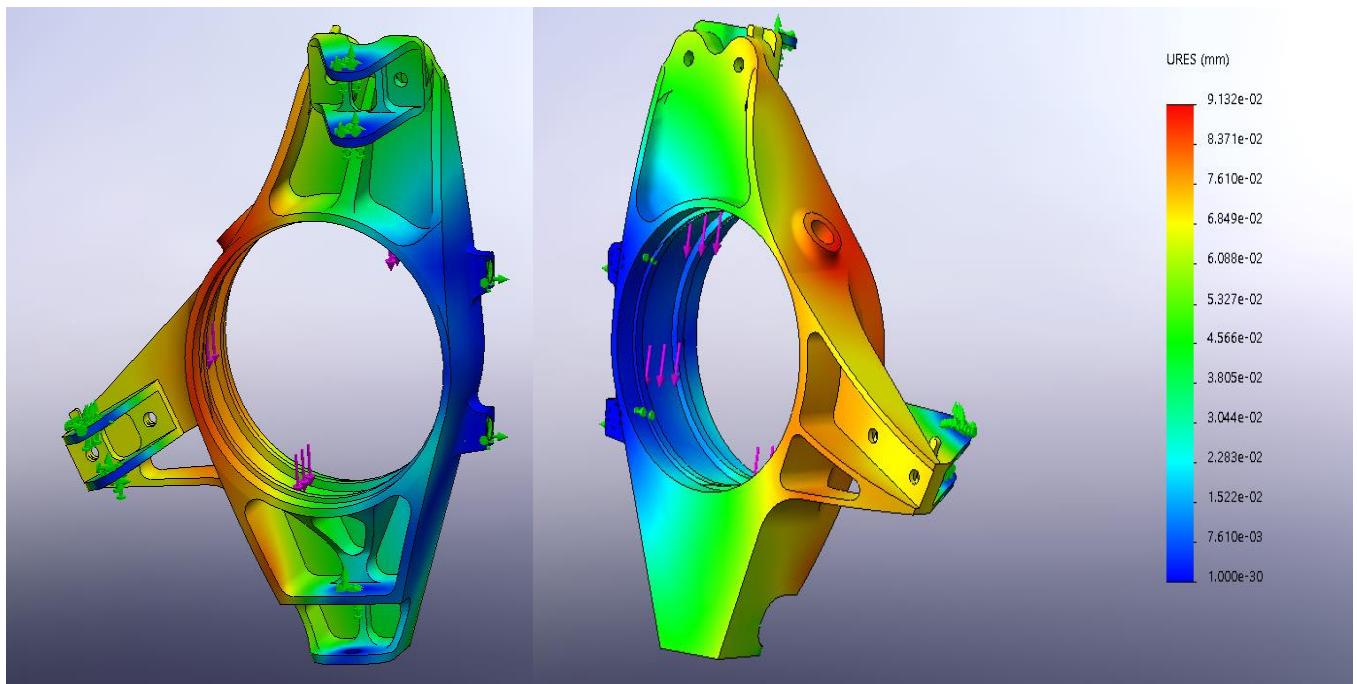
Όπως και στις προηγούμενες εικόνες, περιμένουμε η συγκέντρωση των τάσεων να είναι στην μετάβαση των διαμέτρων, που παρά την χρήση fillet, μπορεί να προκύψει και από μη επαρκώς πυκνό πλέγμα.

Δηλαδή, θα έχουμε για την καταπόνηση του σώματος:



Εικόνα 4.17 – Καταπόνηση στην πλήμνη του πίσω τροχού – Von Mises.

Αντίστοιχα, για την μετατόπιση, προκύπτουν τιμές:



Εικόνα 4.18 – Μετατόπιση στην πλήμνη του πίσω τροχού, με την μέθοδο υπολογισμού URES

5 Συμπεράσματα & μελλοντικές προτάσεις

Η παρούσα εργασία δημιουργήθηκε με κύριο σκοπό τον εμπλουτισμό της ελληνικής βιβλιογραφίας πάνω στην διαδικασία του σχεδιασμού και της ανάλυσης ενός συστήματος ανάρτησης.

Θα ήθελα ακόμα να προσθέσω πως ευελπιστώ αυτή η εργασία να γίνει κίνητρο για τους φοιτητές του πανεπιστημίου Πελοποννήσου να εστιάσουν την προσοχή τους στην ενασχόληση με τις ομάδες που απαρτίζουν την οικογένεια του Formula Student, μιας και παρόλο που υφίσταται ομάδα στο τμήμα μηχανολόγων δεν είναι αρκετό το ενδιαφέρον ώστε να πραγματοποιηθεί μελέτη για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μονοθέσιου.

Εν γένει, κατά την προσπάθεια ως προς την κάλυψη όλων των σχετικών παραμέτρων, διατηρώντας παράλληλα λογική στην έκταση του κειμένου, δεν πραγματοποιήθηκε μεγάλη επιστημονική εμβάθυνση στα επιμέρους αντικείμενα που το κάθε κεφάλαιο πραγματευόταν.

Στην συνέχεια, η πτυχιακή αυτή θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο ενασχόλησης των επόμενων φοιτητών ως προς την βελτίωση της όσον αφορά τον διαφορετικό σχεδιασμό των σωμάτων, την προσθήκη συνδέσμων και την εξέταση των κομματιών κάτω από διαφορετικές συνθήκες υπό το καθεστώς προοδευτικών δυνάμεων.

Ως προς όλες τις περιπτώσεις, η βιβλιογραφία χρήζει εμπλουτισμού σε θέματα εξέλιξης αγωνιστικών οχημάτων και ο γράφων ευελπιστεί να συνεχιστούν σχετικές προσπάθειες στο μέλλον.

6 Βιβλιογραφία

[1] Reza N. Jazar: Advanced Vehicle Dynamics

[2] E. Velenis and P. Tsiotras: Minimum Time vs Maximum Exit velocity Path Optimization During Cornering

[3] Derek Seward: Race Car Design, 2014

[4] Adam Theander: Design of a Suspension for a Formula Student Race Car

[5] Evan Flickinger: Design & Analysis of FSAE car suspension members

[6] William F. & Douglas L. Milliken: Race Car Vehicle Dynamics

[7] Steven Webb: Vehicle Simulation to Drive FSAE Design Decisions

[8] Thomas D. Gillespie: Fundamentals of Vehicle Dynamics

[9] Engin Tanik & Volkan Parlaktas: On the analysis of double wishbone suspension

[10] Juri Resev, Lembit Roosimolder & Mrko Siitas: Over- and understeering with a limited slip differential