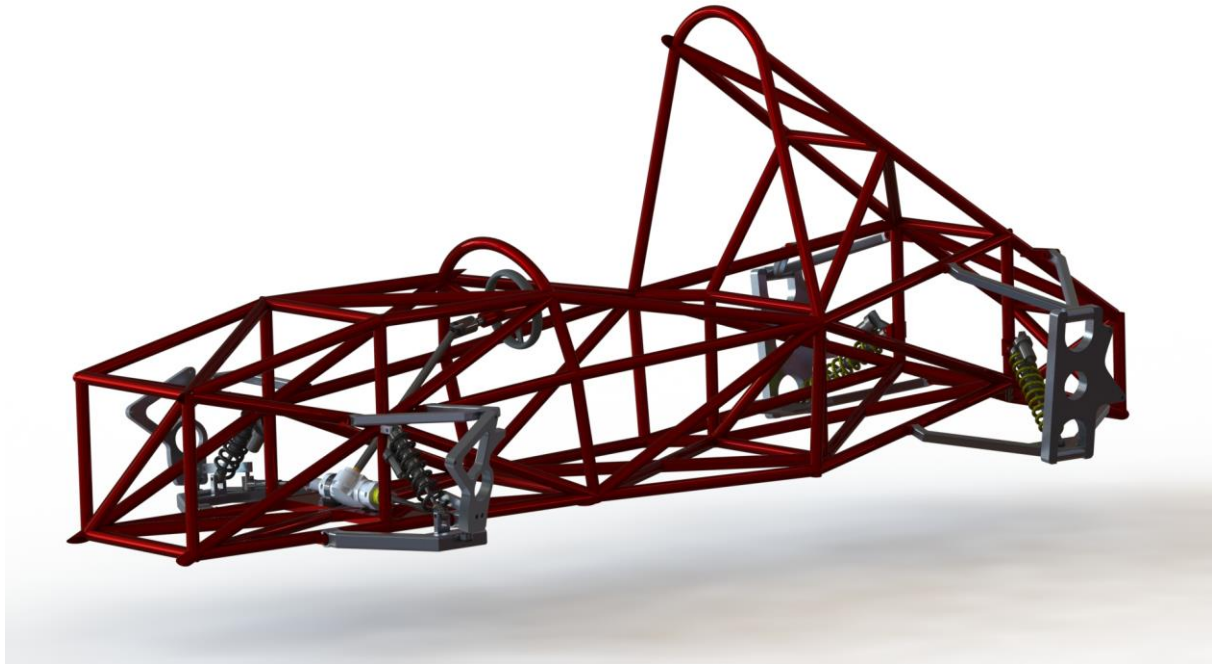


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ FORMULA STUDENT



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΠΡΟΒΕΛΕΓΓΙΟΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ (Α.Μ. 6048)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΤΣΙΡΚΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στη μελέτη και σχεδίαση σε Η/Υ του συστήματος ανάρτησης, καθώς και του συστήματος διεύθυνσης ενός τετράτροχου οχήματος τύπου «Formula SAE».

Η σημασία της συγκεκριμένης Εργασίας έγκειται στο να κατανοήσει ο φοιτητής πρώτον την πολυπλοκότητα ενός σύγχρονου οχήματος και δεύτερον των δυνατοτήτων αξιοποίησης των εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών CAD.

Στην αρχή της Εργασίας γίνεται μία γενική επισκόπηση του διαγωνισμού «Formula SAE» καθώς και των οχημάτων που μετέχουν σε αυτόν. Ακολουθεί εκτενής παρουσίαση των χαρακτηριστικών του οχήματος και ιδιαιτέρως της ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης, που αποτελούν και τα κύρια αντικείμενα μελέτης της Εργασίας. Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση του λογισμικού ψηφιακής σχεδίασης (CAD) «Dassault Systèmes SolidWorks» μέσω του οποίου θα σχεδιαστούν τα εν λόγω συστήματα του οχήματος. Ακολουθεί ανάλυση βήμα-βήμα των σταδίων σχεδίασης των δύο υποσυστημάτων (ανάρτηση και σύστημα διεύθυνσης). Εν συνεχεία, πραγματοποιείται αξιολόγηση των τελικών σχεδίων των υποσυστημάτων καθώς και μία αποτίμηση του χρησιμοποιούμενου λογισμικού CAD. Κλείνοντας, παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια των προς κατασκευή εξαρτημάτων και προτείνονται μέθοδοι κατασκευής.

Σε αυτό το σημείο, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Τσίρκα Σωτήριο, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις υποδείξεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της συγγραφής της Εργασίας.

Προβελέγγιος Χριστόδουλος
Ιούλιος 2015

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

Ο σπουδαστής
(Ονοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία ασχολείται με τη σχεδίαση του συστήματος ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης ενός μονοθέσιου τετράτροχου οχήματος τύπου «Formula SAE». Η σχεδίαση έγινε με τη χρήση του λογισμικού ψηφιακής σχεδίασης SolidWorks. Ο σκοπός είναι η αξιοποίηση του λογισμικού για τη λεπτομερή μηχανολογική σχεδίαση όλων των επιμέρους τμημάτων που συνιστούν το σύστημα ανάρτησης και το σύστημα διεύθυνσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο διαγωνισμό Formula SAE καθώς και στις τεχνικές προδιαγραφές των οχημάτων που συμμετέχουν σε αυτόν. Ο διαγωνισμός «Formula SAE» είναι ένας διαγωνισμός σχεδιασμού φοιτητών μηχανολογίας που διεξάγεται σε διάφορες τοποθεσίες ανά τον κόσμο και κύριος σκοπός του είναι η προώθηση της καριέρας και της υπεροχής στο χώρο της μηχανολογίας, καθώς εμπερικλείει όλες τις παραμέτρους που αφορούν στην αυτοκινητοβιομηχανία (<http://students.sae.org/cds/formulaseries/about.htm>).

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται το σύστημα ανεξάρτητης ανάρτησης που χρησιμοποιούν τα οχήματα αυτού του τύπου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της ανεξάρτητης ανάρτησης και ακολουθεί παρουσίαση του ρόλου που επιτελεί, των επιμέρους τμημάτων που την αποτελούν, του ρόλου του καθενός από αυτά και οι δυνατότητες ρύθμισής της. Ως επιμέρους τμήματα, ορίζονται ο άνω και ο κάτω βραχίονας ελέγχου (A-Arms), το ζεύγος ελατήριο-αποσβεστήρας (Spring-Shock absorber), το τμήμα που συνδέει τους δύο βραχίονες με τον τροχό και την κρεμαγιέρα (Upright), τα ελάσματα σύνδεσης των βραχιόνων στο χωροδικτύωμα (Brackets), ο μηχανισμός στήριξης που συνδέει το άνω τμήμα του ζεύγος ελατήριο-αποσβεστήρας με το χωροδικτύωμα, οι ράβδοι σύνδεσης των πίσω τροχών με το χωροδικτύωμα (Toe Rods), καθώς και τα ρουλεμάν και οι κοχλίες που απαιτούνται (Ball Joints & Bolts).

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το σύστημα διεύθυνσης με κρεμαγιέρα που χρησιμοποιούν τα οχήματα αυτού του τύπου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται ο ρόλος που επιτελεί το σύστημα διεύθυνσης, τα μέρη που το αποτελούν και οι δυνατότητες ρύθμισης. Ως επιμέρους τμήματα, ορίζονται η κρεμαγιέρα (Rack and Pinion), οι δύο άξονες και ο σταυρωτός σύνδεσμος που τη συνδέουν με το τιμόνι, τα στηρίγματά της σε μία εγκάρσια δοκό στο χωροδικτύωμα (Brackets), οι ράβδοι σύνδεσης με τον τροχό (Tie Rods), οι βραχίονες στροφής (Steering Arms), καθώς και τα ρουλεμάν και οι κοχλίες που απαιτούνται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό ψηφιακής σχεδίασης Dassault Systèmes SolidWorks. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μία γενική παρουσίαση και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του και ο τρόπος λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο παραμετρικός τρόπος λειτουργίας του και τα πλεονεκτήματα αυτού έναντι των απλών λογισμικών CAD, τα εργαλεία σχεδίασης (Features), η δημιουργία τμημάτων και συστημάτων (Parts & Assemblies), η σύνδεσή τους στο χώρο (Mates), καθώς και οι δυνατότητες φωτορεαλιστικής απεικόνισης (Rendering).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδίασης των επιμέρους τμημάτων της ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης (Parts), των υποσυστημάτων (Subassemblies) και του τελικού συστήματος πλαίσιο-ανάρτηση-σύστημα διεύθυνσης (Assembly). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Πρώτα τοποθετούνται στο χώρο οι τροχοί έτσι ώστε το μεταξόνιο (Wheelbase) και το μετατρόχιο (Track) του μονοθέσιου να είναι εντός των ορίων που ορίζουν οι κανονισμοί. Φροντίζεται κατά το

δυνατόν η κυκλική υποδοχή της πλήμνης στα πίσω Uprights να είναι σχεδόν ομόκεντρο με τα πίσω ημιαξόνια. Στη συνέχεια γίνεται η προκαταρκτική διαστασιολόγηση των βραχιόνων ελέγχου της πρόσθιας αριστερής (από τη θέα του οδηγού) ανάρτησης. Ως κύριο κριτήριο διαστασιολόγησης επιλέγεται η σωστή χωροταξία (Packaging). Ακολουθεί η σχεδίαση των Brackets και του Upright. Στη συνέχεια γίνεται η σύνδεση του μηχανισμού στήριξης. Το επόμενο βήμα είναι η προσθήκη του Steering arm στην κατάλληλη θέση. Ακολουθεί τοποθέτηση της κρεμαγιέρας σε κάποια εγκάρσια δοκό του δικτυώματος και σχεδιάζεται η Tie rod. Τίθενται τα κατάλληλα Mates και δημιουργείται το Assembly. Στη συνέχεια, τα συγκεκριμένα Parts τίθενται και στη δεξιά πρόσθια ανάρτηση ως συμμετρικά Parts (Mirrored). Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για τη σχεδίαση της πίσω ανάρτησης.

Στο έκτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία σύντομη αποτίμηση του χρησιμοποιούμενου λογισμικού CAD.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται κατά προσέγγιση τα κατασκευαστικά σχέδια των προς κατασκευή εξαρτημάτων καθώς και οι προτεινόμενες μέθοδοι κατασκευής.

Κλείνοντας, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που δύνανται να εξαχθούν από την ολοκλήρωση της Πτυχιακής Εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Ιστορία και εξέλιξη του αυτοκινήτου
2. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στην αυτοκινητοβιομηχανία
3. Αγωνιστικά αυτοκίνητα
4. Αγωνιστικό μονοθέσιο Formula SAE

1. ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ FORMULA SAE

- 1.1 Ιστορία του διαγωνισμού 1
- 1.2 Κανονισμοί 2

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

- 2.1 Γενικά περί συστημάτων ανάρτησης 3
- 2.2 Σημασία του συστήματος ανάρτησης 3
- 2.3 Τύποι και ιστορική αναδρομή συστημάτων ανάρτησης 4
 - 2.3.1 Άκαμπτοι άξονες 4
 - 2.3.2 Ανεξάρτητη ανάρτηση 7
- 2.4 Γωνίες Camber, Caster και Toe 13
 - 2.4.1 Γωνία Camber 13
 - 2.4.2 Γωνία Caster 14
 - 2.4.3 Γωνία Toe 14
- 2.5 Επιλογή ζεύγους αποσβεστήρα - ελατηρίου 15

3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

- 3.1 Γενικά περί συστημάτων διεύθυνσης 17
- 3.2 Γεωμετρία συστήματος διεύθυνσης 17
- 3.3 Σύστημα διεύθυνσης με κρεμαγιέρα 18

4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ DS SOLIDWORKS

- 4.1 Προϊόντα SolidWorks 20
- 4.2 Ιστορικό 20
- 4.3 Πεδία εφαρμογής 20
- 4.4 Πιστοποίηση 21
- 4.5 Λειτουργία του λογισμικού 22

5. ΣΧΕΔΙΑΣΗ FORMULA SAE ΣΤΟ SOLIDWORKS

- 5.1 Προκαταρκτική σχεδίαση οχήματος 23
- 5.2 Σχεδίαση βραχιόνων ελέγχου και brackets 26
- 5.3 Σχεδίαση των εμπρός και πίσω "Uprights" 35
- 5.4 Σχεδίαση των "Ball joints" και του "Steering arm" 41
- 5.5 Σχεδίαση της κρεμαγιέρας 46
- 5.6 Σχεδίαση της αριστερής και δεξιάς "Tie rod" 51
- 5.7 Σχεδίαση του χειριστηρίου του συστήματος διεύθυνσης και των σχετικών παρελκομένων 54
- 5.8 Σχεδίαση του εμπρός και πίσω ζεύγους ελατηρίου-αποσβεστήρα 57

5.9	Σύνοψη	66
6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CAD		
6.1	Γενικά συμπεράσματα	69
7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ		
7.1	Κατασκευαστικά σχέδια και προτεινόμενες μέθοδοι κατασκευής	70
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	134

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΙΣΤΟΡΙΑ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

Το αυτοκίνητο αποτέλεσε μία από τις σημαντικότερες εφευρέσεις του 20^{ου} αιώνα καθώς έφερε επανάσταση στις χερσαίες μεταφορές, τόσο των ανθρώπων όσο και των αγαθών. Με την πάροδο των ετών και την εξέλιξή του κατέστη σαφές ότι επρόκειτο για όχημα με βαρύτητα μεγαλύτερη από το σιδηρόδρομο, καθώς εξασφάλιζε για πρώτη φορά στην ιστορία αυτονομία μετακίνησης σε ατομικό επίπεδο.

Τα πρώτα αυτοκίνητα είχαν ήδη ισχύ και ταχύτητα πολλαπλάσια μιας ιππύλατης άμαξας και επιπλέον η παρουσία κινητήρα εξασφάλιζε την απρόσκοπτη λειτουργία τους για ώρες. Κατασκευαστικά είχαν σχεδόν την ίδια μορφή με τις άμαξες και ο οδηγός συνήθως καθόταν ψηλά και εκτεθειμένος. Τα πρώτα αυτοκίνητα ήταν επίσης ξύλινα και έφεραν ως ανάρτηση φύλλα σούστας (Leaf springs), μία διάταξη που έχει επιβιώσει ως τις μέρες μας.

Το σημείο καμπής στην ιστορία του αυτοκινήτου υπήρξε η εμφάνιση του οχήματος "Ford Model T" το 1908 στις ΗΠΑ. Επρόκειτο για το πρώτο όχημα μαζικής παραγωγής που παρήχθη σε εκατομμύρια αντίτυπα και κατέστησε το αυτοκίνητο προσιτό στις μάζες. Επιπλέον, επαναπροσδιόρισε τις αρχές της παραγωγής σε όλους σχεδόν τους τομείς της βιομηχανίας.

Το επόμενο βήμα για τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των αυτοκινήτων, υπήρξε ο Α' και Β' Παγκόσμιος Πόλεμος καθώς μέσω της ραγδαίας ανάπτυξης της αεροπορικής βιομηχανίας, προωθήθηκε και η συναφής τεχνολογία του αυτοκινήτου. Έκτοτε τα αυτοκίνητα εξελίχθηκαν πολύ και μαζί με αυτά και οι υποδομές που απαιτούνται για την κίνησή τους (δρόμοι, οδοποιητικά έργα, νομοθεσία).

Ως τελευταίο σημείο καμπής στην ιστορία και εξέλιξη του αυτοκινήτου αποτελεί η ταχύτερη εξέλιξη της πληροφορικής τις τελευταίες δύο δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Η πληροφορική αποτελεί πλέον αναπόσπαστο τμήμα της ζωής ενός αυτοκινήτου, από τη σχεδίαση μέχρι και τη συντήρηση.

Η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες, ακριβότερες και πολυπλοκότερες βιομηχανίες, καθώς το σύγχρονο αυτοκίνητο συγκεντρώνει τεχνολογία από πλήθος επιστημονικών πεδίων, όπως η Μηχανολογία (μηχανική, θερμοδυναμική, δυναμική, ρευστομηχανική), η Ηλεκτρολογία, η Πληροφορική, η Διοίκηση επιχειρήσεων, το Μάρκετινγκ, η Νομική κλπ.

Τα παραπάνω ισχύουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό σε οχήματα ειδικής χρήσεως, όπως τα μεταφορικά οχήματα και τα αγωνιστικά οχήματα. Ειδικά τα δεύτερα, αποτελούν αντικείμενο ενός ξεχωριστού κλάδου της αυτοκινητοβιομηχανίας καθώς η τεχνολογία που φέρουν τα καθιστά απαγορευτικά για μαζική παραγωγή, τόσο λόγω κόστους, όσο και λόγω δυσκολίας αυτοματοποίησης.

2. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η χρήση της πληροφορικής και ιδιαίτερα των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών έκανε την εμφάνισή της από τη δεκαετία του 1960 αλλά επεκτάθηκε ραγδαία από το 1980 και μετά. Αφορά δε όλα τα στάδια της ζωής ενός οχήματος.

Σε επίπεδο σχεδιασμού, η σύλληψη του αρχικού οχήματος από τους σχεδιαστές, η λεπτομερής σχεδίαση από τους μηχανικούς, η ανάλυση του πιθανού τρόπου κατασκευής, αποτελούν κάποια από τα συνήθη αντικείμενα εφαρμογής σύγχρονων λογισμικών CAD-CAE-CAM (Computer Aided Design – Engineering - Machining) που είναι προσανατολισμένα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι Η/Υ χρησιμοποιούνται επίσης για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός οχήματος και των επιβατών του σε πρόσκρουση.

Οι Η/Υ χρησιμοποιούνται ευρύτατα κατά τη μαζική παραγωγή ενός οχήματος. Είτε για τον έλεγχο συσκευών, όπως για παράδειγμα τη λειτουργία ρομποτικών βραχιόνων, είτε γενικότερα σε εφαρμογές αυτοματισμού που απαντούν ευρύτατα σε μία σύγχρονη βιομηχανική μονάδα. Επιπλέον χρησιμοποιούνται για το διαστασιολογικό έλεγχο των τελικών προϊόντων. Τέλος χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά εξαρτημάτων εντός του χώρου παραγωγής (ρομποτικά οχήματα) καθώς και σε εφαρμογές Logistics.

Όσον αφορά τη λειτουργία του οχήματος, τα σύγχρονα αυτοκίνητα φέρουν πλήθος ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και υποσυστημάτων, που ελέγχονται από Η/Υ. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία του κινητήρα των αυτοκινήτων ελέγχεται από ένα κεντρικό Η/Υ που καλείται "ECU (Engine Control Unit)" που ελέγχει ένα πλήθος μεγεθών μέσω αντίστοιχων αισθητήρων που αφορούν μετρήσεις θερμοκρασιών, πιέσεων κλπ. Ο κεντρικός αυτός υπολογιστής δίδει και πληροφορίες για την κατάσταση του οχήματος ώστε να διευκολύνεται η συντήρησή του.

3. ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

Η κυριότερη διαφορά των επιβατηγών αυτοκινήτων από τα αγωνιστικά, είναι η χρήση και ο σκοπός για την οποία σχεδιάζονται. Τα πρώτα σχεδιάζονται για να εξασφαλίζουν άνετη, ασφαλή και ταχεία μετακίνηση ατόμων και αποσκευών, ενώ τα δεύτερα για να εξασφαλίσουν επιτυχή συμμετοχή σε αγώνες που γίνονται σε συγκεκριμένο περιβάλλον, με συγκεκριμένο αριθμό επαγγελματιών οδηγών και χωρίς επιπλέον φορτίο.

Βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών, τα επιβατηγά αυτοκίνητα πρέπει να έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, να επιδέχονται συντήρηση, να είναι οικονομικά στη χρήση, να έχουν χαμηλό κόστος απόκτησης και να μπορούν να παραχθούν μαζικά. Επιπλέον θα πρέπει να πληρούν προδιαγραφές που ορίζονται από τη νομοθεσία καθώς προορίζονται για κίνηση σε κατοικημένες περιοχές και σε δρόμους όπου κινούνται και άλλα αυτοκίνητα, καθώς και οχήματα άλλου τύπου (δίτροχα κλπ), αλλά και πεζοί. Θα πρέπει επιπλέον να μην προκαλούν ρύπανση και ηχορύπανση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι η τεχνολογία τους θα πρέπει να ευνοεί τη μαζική παραγωγή και τον αυτοματισμό και παράλληλα να δίνει στον κατασκευαστή τη δυνατότητα κατασκευής μελλοντικών παραλλαγών.

Απεναντίας τα αγωνιστικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τεχνολογία αιχμής, χωρίς ιδιαίτερους περιορισμούς στο κόστος καθώς παράγονται σε πολύ μικρές ποσότητες. Όσον αφορά τη συντήρηση των πολύπλοκων αυτών οχημάτων, αυτή γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό. Η σχεδιάσή τους είναι εν γένει πιο απλή από των επιβατηγών καθώς συνήθως είναι μονοθέσια και οι διαστάσεις τους είναι μικρές. Το υψηλό τους κόστος οφείλεται κυρίως στα ακριβά υλικά και στο ανθρώπινο δυναμικό που χρησιμοποιείται σε όλα τα στάδια της εξέλιξης και της χρήσης τους. Τα ακριβά υλικά είναι απαραίτητα για να επιτευχθεί η πολλή υψηλή απόδοσή τους. Η μορφή τους ωστόσο δεν ευνοεί τον αυτοματισμό και τη μαζική παραγωγή και για το λόγο αυτό είναι σε μεγάλο ποσοστό χειροποίητα από εξειδικευμένο και

πεπειραμένο επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό. Τέλος, ο χρόνος ζωής τους είναι πολύ μικρός και πρακτικά μετά από μία αγωνιστική σαιζόν (περίπου μετά από ένα έτος) αντικαθίστανται.

4. ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΟΘΕΣΙΟ FORMULA SAE

Στην παρούσα εργασία θα σχεδιαστεί το σύστημα ανάρτησης και διεύθυνσης ενός αμιγώς αγωνιστικού μονοθέσιου οχήματος που προορίζεται για συμμετοχή στο διεθνή φοιτητικό διαγωνισμό Formula SAE. Πρόκειται για ένα μικρό αγωνιστικό όχημα που κινείται από κινητήρα μοτοσικλέτας, ιδιαίτερα χαμηλού κόστους, που όμως έχει τη δομή ενός αυθεντικού αγωνιστικού αυτοκινήτου, καθώς αποτελείται από ένα χωροδικτύωμα πάνω στο οποίο στηρίζεται ένα σύστημα ανεξάρτητης ανάρτησης με διπλούς βραχίονες ελέγχου. Επιπλέον, ο κινητήρας είναι τοποθετημένος στο κέντρο του οχήματος, πίσω από τον οδηγό και η κίνηση μεταδίδεται στους πίσω τροχούς. Η σχεδίαση του οχήματος και των επιμέρους συστημάτων του θα γίνει εξ' ολοκλήρου σε H/Y μέσω του λογισμικού CAD-CAE "D.S. SolidWorks".

Το αντικείμενο της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας είναι η σχεδίαση του συστήματος διεύθυνσης και του συστήματος ανάρτησης του αυτοκινήτου. Η εφαρμογή του λογισμικού δίνει τη δυνατότητα αφενός να γίνει αντιληπτός ο τρόπος σχεδίασης ενός αγωνιστικού αυτοκινήτου και αφετέρου να αξιολογηθεί η πρόοδος που έχουν φέρει τα λογισμικά ψηφιακής σχεδίασης στη σχεδίαση προϊόντων εν γένει.

1. ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ FORMULA SAE

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΥ

Ο διαγωνισμός Formula SAE είναι ένας διεθνής διαγωνισμός σχεδιασμού μονοθέσιου αγωνιστικού αυτοκινήτου από φοιτητές μηχανολογίας. Διοργανώνεται από την SAE International (πρώην "Society of Automotive Engineers"). Ξεκίνησε σε πρώτη μορφή από το πανεπιστήμιο του Χιούστον στις ΗΠΑ το 1978 και έλαβε τη σύγχρονη μορφή του δύο χρόνια αργότερα.

Ο διαγωνισμός βασίζεται στο υποθετικό σενάριο ότι μία αυτοκινητοβιομηχανία αναθέτει σε μία ομάδα την ανάπτυξη (σχεδίαση, κατασκευή, δοκιμή) ενός μονοθέσιου αγωνιστικού οχήματος πίστας. Το παραγόμενο πρωτότυπο αξιολογείται ως προς τη δυνατότητά του να μπει σε παραγωγή, με σκοπό να πωληθεί ως όχημα αναψυχής για ερασιτέχνες αγωνιζόμενους. Στα πλαίσια αυτού του διαγωνισμού, η ομάδα φοιτητών σχεδιάζει, κατασκευάζει και δοκιμάζει σε πίστα ένα πρωτότυπο μονοθέσιο, βασιζόμενη σε υπάρχοντες κανονισμούς που αποσκοπούν αφενός στο να εξασφαλίσουν τη λειτουργικότητα του οχήματος και αφετέρου να προωθήσουν τη διαχείριση προβλημάτων που προκύπτουν.

Η Formula SAE προωθεί την καριέρα και την αριστεία στο χώρο της μηχανολογίας, καθώς εμπερικλείει όλες τις όψεις της αυτοκινητοβιομηχανίας συμπεριλαμβανομένων της έρευνας, του σχεδιασμού, της κατασκευής, της δοκιμής, της ανάπτυξης, του marketing, του management και της οικονομικής διαχείρισης. Το σημαντικότερο όφελος από τη συμμετοχή στο διαγωνισμό, είναι ότι επιτρέπει στους φοιτητές να εφαρμόσουν σε πραγματικές συνθήκες τα όσα έχουν διδαχθεί.

Σήμερα ο διαγωνισμός διεξάγεται σε διάφορες τοποθεσίες. Στις ΗΠΑ διεξάγεται στο Μίσιγκαν και δευτερευόντως στην Καλιφόρνια. Παράλληλα, υπό την αιγίδα του Formula SAE, διεξάγονται παγκοσμίως και οι ακόλουθοι διαγωνισμοί:

- Formula SAE Australasia
- Formula SAE Brazil
- Formula SAE Italy
- Formula Student (UK)
- Formula Student Austria
- Formula Student Germany
- Formula SAE Japan

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2006 διεξάγεται αντίστοιχος διαγωνισμός με παρόμοιας σχεδίασης μονοθέσια που φέρουν υβριδικό κινητήρα (συνδυασμό MEK και ηλεκτροκινητήρα). Ο εν λόγω διαγωνισμός καλείται "Formula Hybrid". (<http://students.sae.org/cds/formulaseries/about.htm>)

1.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Οι κανονισμοί του διαγωνισμού δημοσιεύονται κάθε χρόνο και συνήθως αποτελούν αναθεωρημένη έκδοση των κανονισμών του προηγούμενου έτους. Αφορούν στο σύνολο του οχήματος και καλύπτουν πρακτικά όλα τα βήματα σχεδίασης και δοκιμών του μονοθεσίου. Στην παρούσα Εργασία θα αναφερθούν επιγραμματικά οι κανόνες που αφορούν στις αναρτήσεις και το σύστημα διεύθυνσης.

Στο κεφάλαιο PART T-GENERAL TECHNICAL, στο άρθρο ARTICLE 6: GENERAL CHASSIS RULES και συγκεκριμένα στις παραγράφους T6.1 και T6.2, γίνεται περιγραφή των προϋποθέσεων που πρέπει να πληροί η σχεδίαση των αναρτήσεων.

Κατ'αρχήν το όχημα θα πρέπει να φέρει ένα πλήρως λειτουργικό σύστημα αναρτήσεων εμπρός και πίσω με ελατήρια και αποσβεστήρες που να εξασφαλίζουν ελάχιστο εύρος κίνησης τροχού 50,8mm συνολικά, δηλαδή 25,4mm βύθιση και 25,4mm επαναφορά, όταν ο οδηγός βρίσκεται εντός οχήματος. Παράλληλα θα πρέπει οι αναρτήσεις να εξασφαλίζουν στο όχημα την αρμόζουσα δυναμική συμπεριφορά, αλλιώς οι κριτές δικαιούνται να αποκλείσουν την ομάδα.

Επιπλέον, οι συνδέσεις των επιμέρους τμημάτων της ανάρτησης θα πρέπει να είναι είτε ορατές, είτε προσβάσιμες με αφαίρεση κάποιου καλύμματος ώστε να δύνανται να επιθεωρηθούν από τους κριτές.

Όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση του οχήματος από το έδαφος (ground clearance), αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε σε κάθε περίπτωση, κανένα τμήμα του οχήματος πλην των ελαστικών, να μην έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Ο λόγος ύπαρξης αυτού του κανονισμού είναι το να αποτραπεί η χρήση διαφόρων αεροδυναμικών βοηθημάτων που αφενός προκαλούν φθορά στην πίστα και αφετέρου αποτελούν κίνδυνο σε περίπτωση που σπάσουν.

Όσον αφορά τους τροχούς του οχήματος, αυτοί θα πρέπει να έχουν διάμετρο μεγαλύτερη των 8 ιντσών. Σε περίπτωση που αυτός συνδέεται με την πλήμνη μέσω ενός μόνο περικοχλίου, θα πρέπει το τελευταίο να ασφαρίζει καταλλήλως. Αν πάλι συνδέεται μέσω των τυπικών κοχλιοσυνδέσεων, τότε σε περίπτωση που αυτές είναι τροποποιημένες, θα ελέγχονται ενδελεχώς από τους κριτές. Η χρήση αλουμινένιων κοχλιοσυνδέσεων επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι αυτοί είναι ανοδιωμένοι και ελάχιστα μηχανικώς κατεργασμένοι.

Στην παράγραφο T6.5 του άρθρου ARTICLE 6, του κεφαλαίου PART T-GENERAL TECHNICAL, γίνεται αναφορά στις προδιαγραφές του συστήματος διεύθυνσης.

Κατ'αρχήν το τιμόνι θα πρέπει να συνδέεται με τους πρόσθιους τροχούς μηχανικά. Συνεπώς η εφαρμογή ηλεκτρικής σύνδεσης τιμονιού-τροχών ("steer-by-wire") απαγορεύεται.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη γάρη του συστήματος διεύθυνσης θα πρέπει να είναι συνολικά 7° μετρημένη στο τιμόνι.

Το τιμόνι θα πρέπει να είναι συνδεδεμένο στη στήλη (steering column) με τρόπο που να εξασφαλίζεται η ταχεία αφαίρεσή του από τον οδηγό, όταν αυτός βρίσκεται σε κανονική θέση οδήγησης και φοράει γάντια.

Επιτρέπεται η χρήση πίσω ηλεκτρικού συστήματος διεύθυνσης (Rear wheel steering) που να στρέφει τους πίσω τροχούς, υπό την προϋπόθεση όμως ότι θα φέρει μηχανικά "στοπ" που θα τους περιορίζουν σε εύρος στροφής 6°. Ένα τέτοιο σύστημα ωστόσο θα πρέπει να ελεγχθεί από τους κριτές. Η ορθή λειτουργία του θα επιβεβαιωθεί μέσω επίδειξης, ενώ η επαλήθευση του εύρους μέσω εξοπλισμού που θα παράσχει η ομάδα.

Το τιμόνι θα πρέπει να έχει συνεχή περίμετρο σχεδόν κυκλικού ή ελλειπτικού σχήματος. Επιτρέπεται κάποια τμήματά της να είναι ευθύγραμμα όμως δεν επιτρέπονται βρόγχοι. Επιπλέον απαγορεύονται τιμόνια σχήματος "H" ή διακοπτόμενης περιμέτρου.

Όσον αφορά τη θέση του τιμονιού, αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε σε κάθε γωνιακή θέση, το ανώτατο σημείο του να μη βρίσκεται ψηλότερα από την ανώτατη επιφάνεια του εμπρός "Hoop".

Όσον αφορά την κρεμαγιέρα, θα πρέπει το κέλυφός της να είναι μηχανικώς δεμένο στο πλαίσιο. Επιπλέον, οι συνδέσεις μεταξύ όλων των εξαρτημάτων που συνδέουν το τιμόνι με τον ατέρμονα θα πρέπει να είναι μηχανικές και ορατές στους κριτές.

Τέλος, επιτρέπεται η χρήση μεταλλικών καλωδίων για τη συνδεσιμότητα εξαρτημάτων, όμως ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να συνοδεύεται από εκτενή τεχνική αναφορά. Η αναφορά θα περιγράφει πλήρως τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, τα σενάρια σε περίπτωση αστοχίας καθώς και τους τρόπους περιορισμού της αστοχίας. Αν τελικώς κριθεί ικανοποιητικό, θα επιτραπεί η χρήση του.

(<http://www.fsaeonline.com>)

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το σύστημα ανάρτησης συνιστά ένα εκ των κυριότερων συστημάτων ενός οχήματος καθώς σχετίζεται με τη την απόκρισή του σε διάφορες διεγέρσεις που δέχεται. Αυτές οι διεγέρσεις μπορεί να προέρχονται από τον οδηγό (επιτάχυνση, επιβράδυνση, στροφή του τιμονιού κλπ) ή από εξωτερικές δυνάμεις (μεταφορά βάρους, αδράνεια κλπ). Στην ουσία πρόκειται για μία διάταξη συνδεδεμένων εξαρτημάτων στο χώρο, που συνδέουν το όχημα με τους τροχούς. Στα σύγχρονα οχήματα απαντά τόσο στους εμπρός όσο και στους πίσω τροχούς.

2.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το σύστημα ανάρτησης των τροχοφόρων οχημάτων επιτελεί κυρίως τις πέντε ακόλουθες λειτουργίες (Gillespie T.):

- Να παρέχει κατακόρυφη ενδοτικότητα ώστε οι τροχοί να μπορούν να ακολουθήσουν έναν ανώμαλο δρόμο, απομονώνοντας το πλαίσιο από την τραχύτητά του
- Να διατηρεί τους τροχούς στη σωστή θέση ως προς την επιφάνεια του δρόμου
- Να αντιδρά στις δυνάμεις που ασκούνται στα ελαστικά λόγω του ελέγχου που ασκεί ο οδηγός. Στις δυνάμεις αυτές συμπεριλαμβάνονται οι διαμήκεις δυνάμεις (επιτάχυνση και φρενάρισμα), οι εγκάρσιες δυνάμεις (κίνηση σε στροφή), καθώς και οι ασκούμενες ροπές λόγω φρεναρίσματος και λόγω μηχανικής ισχύος στους κινητήριους τροχούς.
- Να αντιστέκεται στην περιστροφή του πλαισίου ως προς το διαμήκη άξονα (Rolling)
- Να διατηρεί τους τροχούς σε επαφή με το δρόμο με ελάχιστες αποκλίσεις στη φόρτισή τους

Οι σημαντικές για τη δυναμική του οχήματος ιδιότητες της ανάρτησης φαίνονται κυρίως στην κινηματική συμπεριφορά και στην απόκρισή της στις δυνάμεις και στις ροπές που πρέπει να μεταφέρει από τα ελαστικά στο πλαίσιο. Επιπλέον, άλλα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος ανάρτησης είναι το κόστος, το βάρος, η χωροταξία, η ευκολία κατασκευής, η ευκολία συναρμολόγησης κλπ.

2.3 ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα οπότε και έκαναν την εμφάνισή τους τα πρώτα αυτοκίνητα έως τη σύγχρονη εποχή, τα συστήματα αναρτήσεων εξελίσσονται συνεχώς ακολουθώντας την εξέλιξη των αυτοκινήτων και τη βελτίωση των επιδόσεών τους και της ενεργητικής τους ασφάλειας.

Εν γένει, τα πρώτα αυτοκίνητα αποτελούσαν στην ουσία άμαξες που έφεραν μηχανές εσωτερικής καύσης. Συνεπώς και οι αναρτήσεις τους ήταν πανομοιότυπες με των αμαξών. Ενδεικτικά αναφέρονται τα ελατήρια με χαλύβδινα φύλλα (Leaf Springs) που επιβιώνουν έως τις μέρες μας σχεδόν στην αρχική τους μορφή.

Έκτοτε έχουν εμφανιστεί και εξελιχθεί διάφορες διατάξεις ανάρτησης. Ωστόσο, οι αναρτήσεις υπάγονται εν γένει σε δύο κύριες κατηγορίες καθεμία εκ των οποίων λειτουργεί τελείως διαφορετικά από την άλλη. Τους άκαμπτους άξονες (solid axles) και τις ανεξάρτητες αναρτήσεις (independent suspensions). Ακολουθώς παρατίθενται και περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες εξ' αυτών (Gillespie T.).

2.3.1 ΑΚΑΜΠΤΟΙ ΑΞΟΝΕΣ

Ως άκαμπτος άξονας (solid axle ή solid beam axle) ορίζεται η διάταξη στην οποία οι δύο τροχοί συνδέονται στα δύο άκρα μιας άκαμπτης δοκού έτσι ώστε η κίνηση του ενός τροχού να μεταδίδεται και στον απέναντι τροχό. Οι άκαμπτοι κινητήριοι άξονες (solid drive axle) απαντούν κατά κανόνα στο πίσω μέρος πολλών πισωκίνητων οχημάτων και ημιφορτηγών, καθώς και στο πρόσθιο μέρος πολλών τετρακίνητων ημιφορτηγών. Άκαμπτοι άξονες χρησιμοποιούνται ευρέως και στην πρόσθια ανάρτηση των φορτηγών καθώς σε αυτά τα οχήματα η ανάρτηση δέχεται υψηλά φορτία.

Ένα εκ των κυριότερων πλεονεκτημάτων του άκαμπτου άξονα είναι ότι εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση των συνδεδεμένων τροχών ελαχιστοποιώντας έτσι τη φθορά των ελαστικών. Το κυριότερο μειονέκτημά του είναι ότι είναι επιρρεπής σε ταλαντώσεις που εμφανίζονται κατά τη στροφή των τροχών.

Οι τρεις κυριότεροι τύποι άκαμπτου άξονα, είναι οι ακόλουθοι:

2.3.1.1 ΑΞΟΝΑΣ HOTCHKISS

Πρόκειται για τη συνηθέστερη μορφή άκαμπτου κινητηρίου άξονα. Ο άξονας στηρίζεται σε ημι-ελλειπτικά φύλλα σούστας (semi-elliptic leaf springs) και εντός αυτού βρίσκονται τα ημιαξόνια που λαμβάνουν κίνηση από την άτρακτο μετάδοσης που διατρέχει το όχημα κατά μήκος (όταν το όχημα είναι πισωκίνητο ή τετρακίνητο). Η διάταξη δεν περιλαμβάνει ελικοειδή ελατήρια – καθώς αυτά αντικαθίσταται από τη σούστα – και την απόσβεση αναλαμβάνει ένα ζεύγος αποσβεστήρων (shock absorbers). Τα φύλλα σούστας

είναι τοποθετημένα κατά μήκος και ο άξονας συνδέεται σε αυτά περίπου στο μέσον του μήκους τους.

Επισημαίνεται πως τα φύλλα σούστας αποτελούν εν γένει την απλούστερη και οικονομικότερη διάταξη ανάρτησης. Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται ένα τυπικός άξονας Hotchkiss:

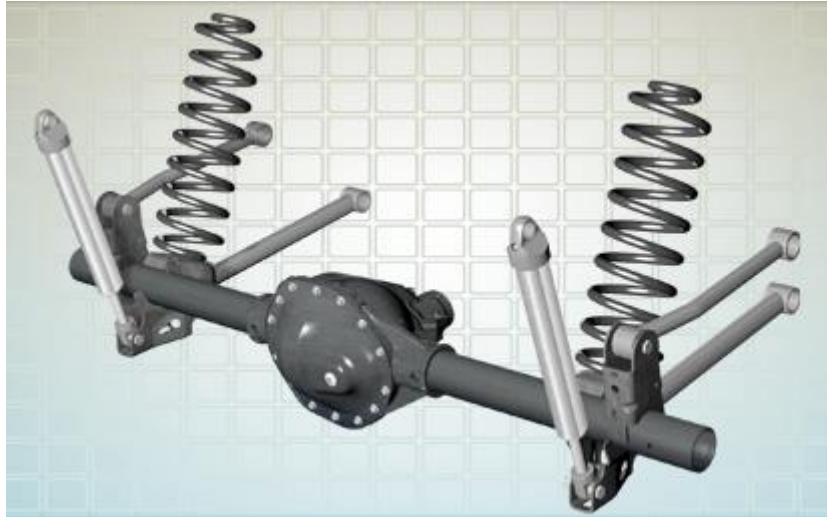


Σχήμα 2.1: Πίσω άξονας Hotchkiss από ημιφορτηγό τύπου Dodge Ram (<http://www.allpar.com>)

2.3.1.2 ΑΚΑΜΠΤΟΣ ΑΞΟΝΑΣ ΤΕΤΡΑΠΛΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ (FOUR LINK)

Η ανάρτηση τετραπλών συνδέσμων εμφανίστηκε στα μεγάλα πισωκίνητα επιβατηγά οχήματα που έφεραν άκαμπτο πίσω άξονα, λόγω των ατελειών που επιδείκνυαν οι αντίστοιχες διατάξεις με φύλλα σούστας. Στην ουσία η διάταξη συνίσταται από δύο ζεύγη βραχιόνων ελέγχου ανά τροχό, με διαφορετικό προσανατολισμό. Πιο συγκεκριμένα οι δύο κάτω βραχίονες έχουν σχεδόν διαμήκη προσανατολισμό και παρέχουν διαμήκη έλεγχο του άξονα, ενώ οι δύο άνω βραχίονες είναι τοποθετημένοι λοξά και απορροφούν τόσο τις ροπές επιτάχυνσης/φρεναρίσματος όσο και τις εγκάρσιες δυνάμεις. Σε μία εναλλακτική εκδοχή αυτής της ανάρτησης, οι πάνω βραχίονες μπορούν να αντικατασταθούν από ένα A-Arm παραμένοντας λειτουργικά ισοδύναμη. Η δυνατότητα αντικατάστασης των φύλλων από ελικοειδή ελατήρια προσφέρει στην ανάρτηση αυξημένες δυνατότητες και μεγαλύτερη άνεση.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται ένα τυπικός άξονας τετραπλών συνδέσμων:



Σχήμα 2.2: Ανάρτηση με άκαμπτο άξονα τετραπλών συνδέσμων
(<http://www.fabtechmotorsports.com>)

2.3.1.3 ΑΚΑΜΠΤΟΣ ΑΞΟΝΑΣ DE DION

Ο άξονας De Dion πρωτοεμφανίστηκε το 1894 και αποτελεί στην ουσία μία ενδιάμεση δομή μεταξύ του άκαμπτου άξονα και της ανεξάρτητης ανάρτησης. Πρόκειται για μία διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά το παρελθόν. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του άξονα De Dion είναι ότι η ανάρτηση αυτή δεν περιλαμβάνει το διαφορικό, καθώς αυτό είναι συνδεδεμένο με το πλαίσιο. Με τον τρόπο αυτό η μη αναρτώμενη μάζα του οχήματος μειώνεται και παράλληλα αυξάνεται ο διαθέσιμος εσωτερικός χώρος του οχήματος και γενικότερα υπάρχει μεγαλύτερη σχεδιαστική ελευθερία από χωροταξικής απόψεως. Το κυριότερο μειονέκτημά του είναι η παρουσία ενός απαραίτητου ολισθαίνοντος τμήματος (sliding tube) που προσδίδει στο σύστημα τριβές.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται ένα τυπικός άξονας De Dion:



Σχήμα 2.3: Σύστημα ανάρτησης με άξονα De Dion (www.kfz-tech.de)

2.3.2 ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗ ΑΝΑΡΤΗΣΗ

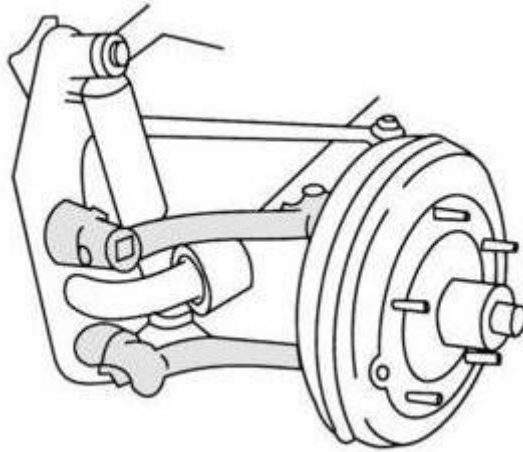
Σε αντίθεση με τους άκαμπτους άξονες, η ανεξάρτητη ανάρτηση παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητης κατακόρυφης κίνησης των δύο τροχών του ίδιου άξονα. Δηλαδή η κίνηση του ενός τροχού δεν επηρεάζει την κίνηση του απέναντι. Στη σύγχρονη εποχή η πλειοψηφία των επιβατηγών αυτοκινήτων και των ελαφρών φορτηγών χρησιμοποιεί ανεξάρτητη πρόσθια ανάρτηση, λόγω του ότι επιτρέπει περισσότερο χώρο για τον κινητήρα και λόγω του ότι επιδεικνύει καλύτερη αντίσταση στις ταλαντώσεις λόγω στροφής των τροχών. Επιπλέον, η ανεξάρτητη ανάρτηση χαρακτηρίζεται από υψηλότερη αντίσταση στο "Rolling".

Ακολούθως παρατίθενται και σχολιάζονται συνοπτικά οι συνήθεις τύποι ανεξάρτητης ανάρτησης που απαντούν στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία.

2.3.2.1 *Trailing Arm Suspension*

Πρόκειται για μία από τις παλαιότερες, απλούστερες και οικονομικότερες μορφές ανεξάρτητης ανάρτησης που χρησιμοποιείται από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Η διάταξη αυτή συνίσταται από παράλληλους βραχίονες που στο ένα άκρο τους στηρίζονται στο πλαίσιο και στο άλλο στο ελατήριο. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στους τροχούς να παραμένουν παράλληλοι με το όχημα.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία τυπική ανάρτηση αυτού του τύπου:



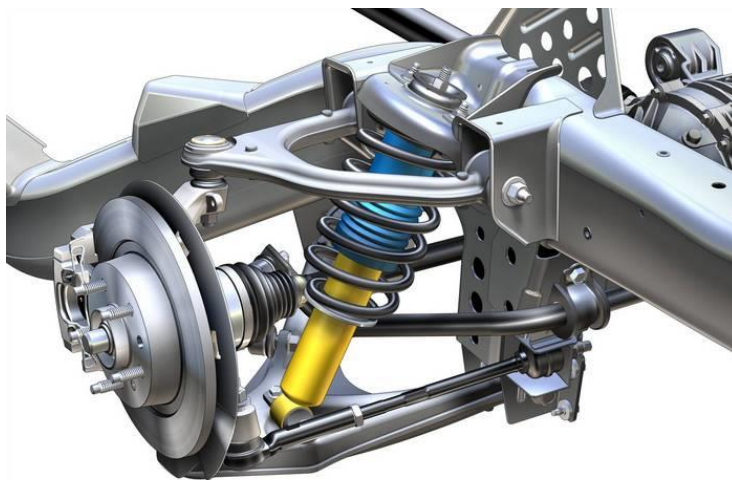
Σχήμα 2.4: Πρόσθια ανεξάρτητη ανάρτηση τύπου "Trailing Arm Suspension" (Gillespie T.)

2.3.2.2 Ανάρτηση με διπλά ψαλίδια (*Short – Long Arm Suspension*)

Πρόκειται για μία από τις διαδεδομένες μορφές ανεξάρτητης ανάρτησης. Απαντά στην πλειοψηφία των επιβατηγών αυτοκινήτων αμερικανικής κατασκευής από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο έως και σήμερα. Στην ουσία συνίσταται από δύο άνισους βραχίονες ελέγχου ("ψαλίδια") σχήματος Α, γνωστά και ως "A-Arms" (ή "Wishbone" στη Βρετανία). Συνήθως το κάτω ψαλίδι είναι μακρύτερο από το πάνω, ενώ σε κάποιες λειτουργικά ισοδύναμες παραλλαγές, το ένα εξ'αυτών αντικαθίσταται από μία ράβδο.

Αυτός ο τύπος ανάρτησης ενδείκνυται για οχήματα που έχουν τον κινητήρα μπροστά και την κίνηση πίσω - ιδιαιτέρως δε αν ο κινητήρας είναι τοποθετημένος κατά το διαμήκη άξονα - για χωροταξικούς λόγους. Επιπλέον, είναι κατάλληλος για οχήματα στα οποία η ανάρτηση στηρίζεται σε χωριστό υποπλαίσιο. Βασικό μειονέκτημα αποτελεί η απαίτηση για λεπτομερή ρύθμιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ανάρτησης ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή συμπεριφορά του οχήματος στο δρόμο.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία τυπική ανάρτηση αυτού του τύπου:



Σχήμα 2.5: Σύστημα ανάρτησης με διπλά άνισα ψαλίδια
(www.thefactoryfiveforum.com)

2.3.2.3 Ανάρτηση με γόνατα MacPherson (MacPherson Strut)

Πρόκειται για μία διάταξη που απαντά σε μεγάλο ποσοστό της πρόσθιας ανάρτησης των προσθιοκίνητων οχημάτων παγκοσμίως. Εφευρέθηκε από τον Αμερικανό Earl S. MacPherson και η εφαρμογή της ξεκίνησε αμέσως μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Η γεωμετρία της είναι παρόμοια με αυτή της ανάρτησης διπλών ψαλιδιών. Ως "γόνατο" νοείται το τηλεσκοπικό ομόκεντρο ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα το οποίο είναι πακτωμένο και στα δύο του άκρα - το άνω στο πλαίσιο (συνήθως στους "θόλους" των τροχών και το κάτω στη βάση του τροχού. Ο τροχός συνδέεται με το πλαίσιο μέσω δύο ράβδων, μία που παραλαμβάνει τα διαμήκη φορτία και μία που παραλαμβάνει τα εγκάρσια.

Η ανάρτηση με γόνατα MacPherson παρέχει μεγάλο χωροτακτικό πλεονέκτημα και για το λόγο αυτό ενδείκνυται για προσθιοκίνητα οχήματα με τον κινητήρα τοποθετημένο εμπρός και εγκάρσια (σε άξονα κάθετο στο διαμήκη άξονα του οχήματος). Επιπλέον, η διάταξη επιτρέπει μεγαλύτερη διαδρομή ανάρτησης και για το λόγο αυτό ενδείκνυται για χρήση σε οχήματα με αυτοφερόμενο πλαίσιο, έτσι ώστε το άνω άκρο του να είναι πακτωμένο ψηλά, στην κορυφή του "θόλου" του τροχού. Παράλληλα, η ανάρτηση αυτή αποτελείται από λιγότερα εξαρτήματα συγκριτικά με άλλα συστήματα. Ως βασικό μειονέκτημα θεωρείται η ακαταλληλότητα χρήσης σε οχήματα χαμηλού ύψους, καθώς όπως προαναφέρθηκε το άνω άκρο στηρίζεται αρκετά ψηλά και επιπλέον η ίδια η διάταξη έχει αρκετά μεγάλο ύψος.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία τυπική ανάρτηση με γόνατα MacPherson:



Σχήμα 2.6: Τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση ανάρτησης με γόνατο MacPherson (www.carbibles.com)

2.3.2.4 Πίσω ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων (Multi-Link Rear Suspension)

Πρόκειται για έναν τύπο ανεξάρτητης πίσω ανάρτησης που είναι ιδιαίτερος διαδεδομένος τα τελευταία χρόνια στα επιβατηγά οχήματα. Κύριο γνώρισμα αυτής της διάταξης είναι η παρουσία σφαιρικών συνδέσμων (ball joints) για τη σύνδεση της πλειονότητας των εξαρτημάτων, που εξασφαλίζει την απουσία καμπτικών ροπών. Εν γένει στην ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων απαντούν τέσσερις συνδέσεις (linkages) σε κάθε τροχό που εξασφαλίζουν τον εγκάρσιο και διαμήκη έλεγχο του τροχού, καθώς και αντίδραση στις ροπές λόγω φρεναρίσματος. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται πέντε συνδέσεις ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ακρίβεια ελέγχου. Το βασικότερο πλεονέκτημα της ανάρτησης αυτού του τύπου είναι ότι η χρήση συνδέσεων προσδίδει ευελιξία στους σχεδιαστές ώστε να επιλέξουν τον κατάλληλο συνδυασμό που θα τους δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία τυπική ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων:

Audi A3 Sportback
Mehrlenker-Hinterachse
Multi-link rear suspension

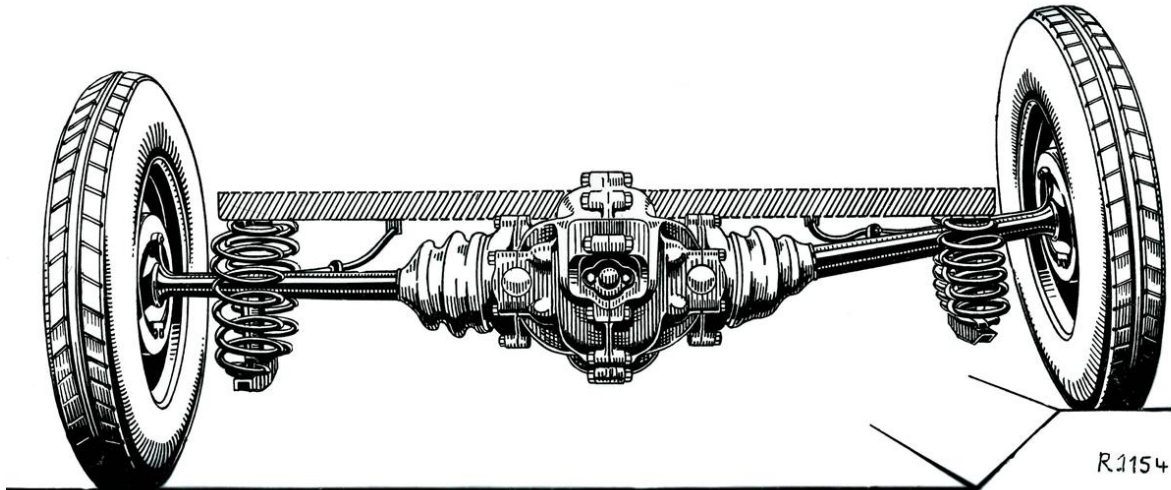


Σχήμα 2.7: Σύστημα ανάρτησης πολλαπλών συνδέσμων (Audi AG)

2.3.2.5 Ανάρτηση "Swing Axle"

Η ανάρτηση "Swing Axle" αποτελεί την απλούστερη μορφή ανεξάρτητης ανάρτησης. Την εφηύρε ο Edmund Rumpler στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και από τη δεκαετία του 1930 χρησιμοποιήθηκε σε πολλά ευρωπαϊκά αυτοκίνητα. Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ανάρτησης αυτού του τύπου είναι ότι τα ημιαξόνια είναι μονίμως κάθετα στο επίπεδο των τροχών. Αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί και το βασικότερο μειονέκτημά της, καθώς επηρεάζει δυσμενώς τη συμπεριφορά των τροχών στις στροφές. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη ανάρτηση δεν είναι διαδεδομένη στα σύγχρονα οχήματα.

Στην ακόλουθη εικόνα παρατίθεται μία τυπική ανάρτηση αυτού του τύπου:



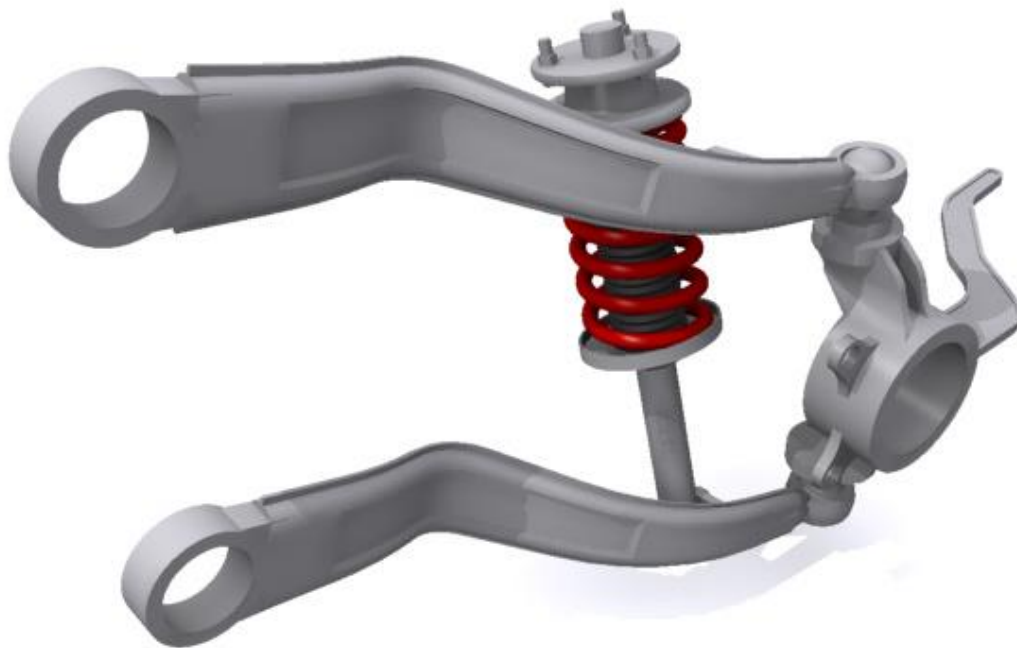
Σχήμα 2.8: Ανάρτηση "Swing Axle" (www.mercedes-benz.com)

2.3.2.6 Ανάρτηση "Trailing Arm" και "Semi-Trailing Arm"

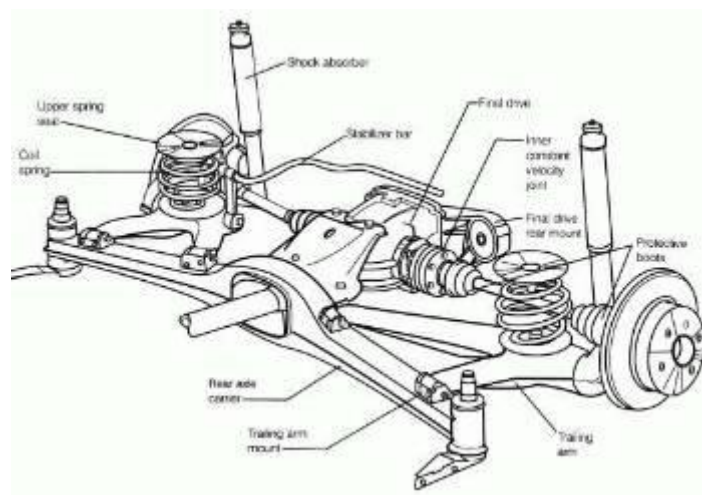
Η ανάρτηση "Trailing Arm" χρησιμοποιείται εν γένει σε ακριβά οχήματα και σε οχήματα επιδόσεων. Οι βραχίονες ελέγχου ("Trailing Arms) απορροφούν τις διαμήκεις δυνάμεις και τις ροπές λόγω φρεναρίσματος. Σε κάποιες εφαρμογές τα ημιαξόνια δρουν ως άνω βραχίονες ελέγχου και απλές ράβδοι ως κάτω εγκάρσιοι βραχίονες ελέγχου. Αυτή η μορφή ανάρτησης έχει το πλεονέκτημα της μείωσης της μη αναρτώμενης μάζας, καθώς το διαφορετικό είναι συνδεδεμένο στο πλαίσιο.

Η ανάρτηση "Semi-Trailing Arm" παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα όσον αφορά τη μορφή του βραχίονα ελέγχου. Ο άξονας περιστροφής του έχει κλίση της τάξεως των 25° ως προς το διαμήκη άξονα του οχήματος. Η παρουσία αυτού του βραχίονα παράγει ελαφρά στροφή των τροχών καθώς αυτοί αναπηδούν κατακόρυφα.

Στις ακόλουθες εικόνες παρατίθενται μία τυπική ανάρτηση "Trailing Arm" και μία τυπική ανάρτηση "Semi-Trailing Arm" αντίστοιχα:



Σχήμα 2.9: Τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση ανάρτησης "Trailing Arm" (www.carbibles.com)



Σχήμα 2.10: Ανάρτηση "Semi-Trailing Arm" (store.vacmotorsports.com)

2.4 ΓΩΝΙΕΣ CAMBER, CASTER ΚΑΙ TOE

Εν γένει, οι τροχοί ενός αυτοκινήτου δεν είναι ποτέ παράλληλοι μεταξύ τους, ούτε κάθετοι στο οδόστρωμα, ούτε παράλληλοι με το διαμήκη άξονα συμμετρίας του. Σχηματίζουν γωνίες που επηρεάζουν άμεσα την οδική συμπεριφορά του οχήματος, την άνεση των επιβατών, τη φθορά των ελαστικών και την ασφάλεια. Οι γωνίες αυτές καλούνται γωνίες "Camber", "Caster" και "Toe".

Οι τιμές που λαμβάνουν δίνονται από τον κατασκευαστή. Σε περίπτωση απόκλισης, οι τιμές ρυθμίζονται μέσω μίας τυπικής διαδικασίας που καλείται "Ζυγοστάθμιση".

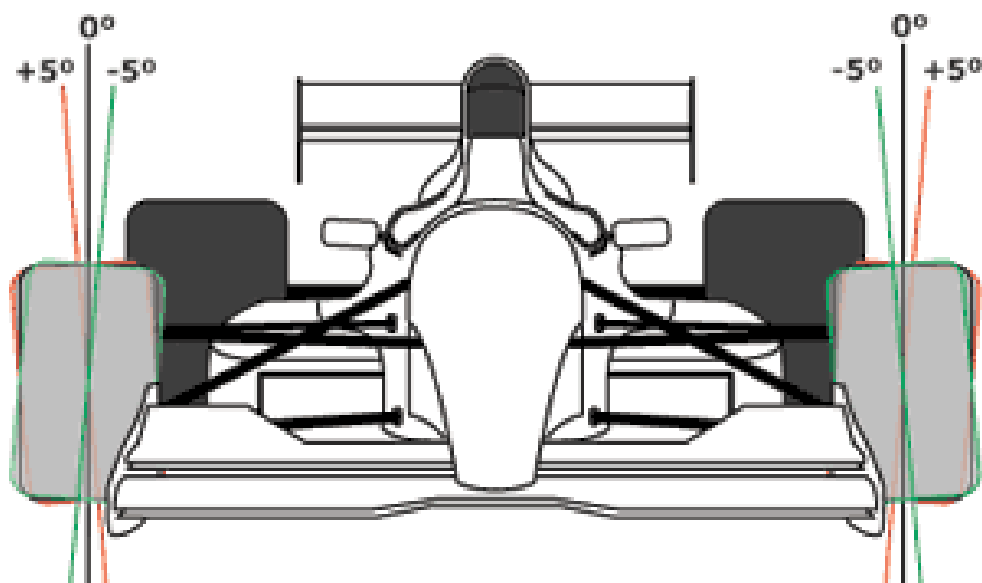
Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύεται η φύση και ο ρόλος της καθεμίας γωνίας (www.dionysopoulos.gr).

2.4.1 ΓΩΝΙΑ CAMBER

Ως γωνία Camber ορίζεται η γωνία που σχηματίζουν οι τροχοί του οχήματος με την κατακόρυφο, όπως παρατηρούμε το όχημα σε πρόωση. Η γωνία Camber μετριέται σε μοίρες και ορίζεται ως αρνητική όταν το άνω μέρος του τροχού κλίνει προς το κέντρο του οχήματος και ως θετική όταν κλίνει προς το εξωτερικό του οχήματος.

Η γωνία Camber επιλέγεται συνήθως αρνητική ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη φθορά των ελαστικών και να αξιοποιείται η μέγιστη δυνατή επιφάνεια του ελαστικού. Εάν η τιμή της γωνίας Camber αποκλίνει από την εργοστασιακή, αυτό συνεπάγεται ανομοιόμορφη φθορά ελαστικών, καθώς και αλλοιωμένη αίσθηση του τιμονιού που δέχεται ο οδηγός όταν το όχημα στρίβει. Τέλος, εάν οι τιμές της γωνίας Camber του αριστερού και δεξιού τροχού απέχουν πολύ, αυτό συνεπάγεται την τάση του οχήματος όταν κινείται σε ευθεία, να κατευθυνθεί προς την πλευρά του περισσότερο θετικού (ή λιγότερο αρνητικού) Camber.

Στο ακόλουθο σχήμα διακρίνεται η εν λόγω γωνία:



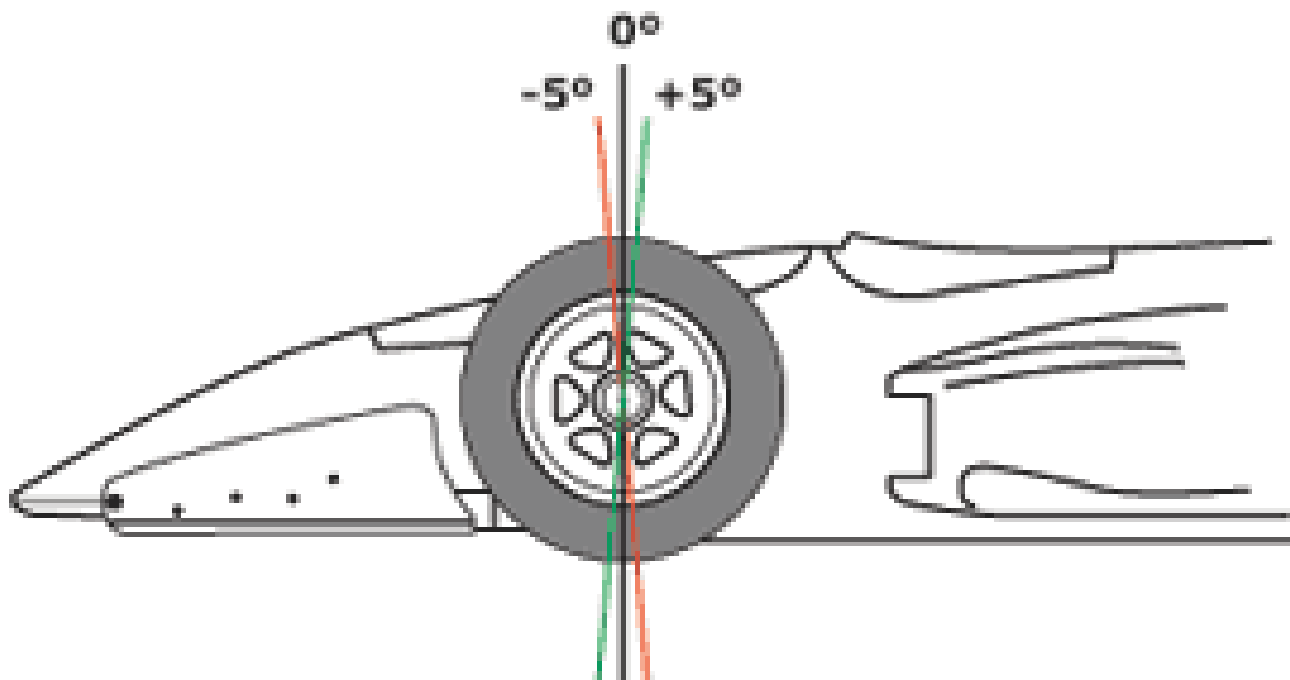
Σχήμα 2.11: Γωνία Camber (www.dionysopoulos.gr)

2.4.2 ΓΩΝΙΑ CASTER

Ως γωνία Caster ορίζεται η γωνία που σχηματίζει ο νοητός άξονας περιστροφής του τροχού του οχήματος με την κατακόρυφο, όπως παρατηρούμε το όχημα σε πλάγια όψη. Η γωνία Caster μετριέται σε μοίρες και ορίζεται ως αρνητική όταν το κάτω μέρος του νοητού άξονα βρίσκεται πίσω από την κατακόρυφο και ως θετική όταν βρίσκεται εμπρός από την κατακόρυφο.

Η πλειονότητα των οχημάτων έχει θετική γωνία Caster καθώς αυτή εξασφαλίζει ευστάθεια, καλή κατευθυντικότητα, καθώς και ροπή επαναφοράς των εμπρός τροχών στην ευθεία θέση μετά από στροφή. Οι τιμές που λαμβάνει η γωνία Caster ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του οχήματος. Ως τάξη μεγέθους μπορεί να θεωρηθεί το εύρος 1-10 μοίρες. Εάν η τιμή της γωνίας Caster αποκλίνει από την εργοστασιακή, αυτό συνεπάγεται πρόβλημα στην επαναφορά των τροχών στην ευθεία θέση, αστάθεια του οχήματος, καθώς και υπερβολικά μεγάλη ή μικρή δυσκολία στροφής του τιμονιού. Τέλος, εάν οι τιμές της γωνίας Caster του αριστερού και δεξιού τροχού απέχουν πολύ, αυτό συνεπάγεται την τάση του οχήματος όταν κινείται σε ευθεία, να κατευθυνθεί προς την πλευρά του λιγότερο θετικού Caster.

Στο ακόλουθο σχήμα διακρίνεται η εν λόγω γωνία:



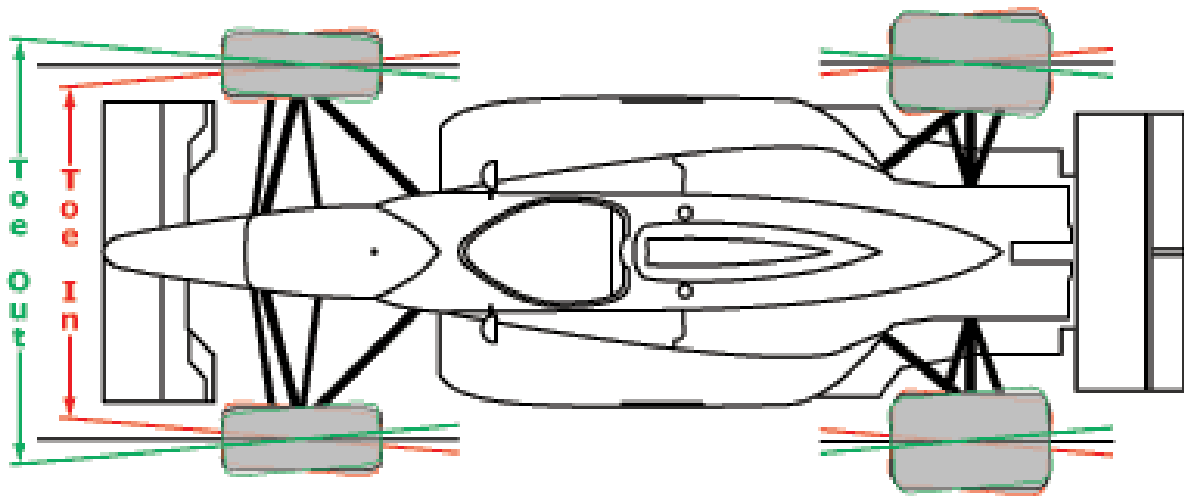
Σχήμα 2.12: Γωνία Caster (www.dionysopoulos.gr)

2.4.3 ΓΩΝΙΑ TOE

Ως γωνία Toe ορίζεται η γωνία που σχηματίζουν οι νοητοί άξονες των τροχών του ίδιου άξονα, όπως παρατηρούμε το όχημα σε κάτωψη. Η γωνία Toe μετριέται σε μοίρες ή σε χιλιοστά και ορίζεται ως θετική ("Toe-in") ή αρνητική ("Toe-out") στην περίπτωση που οι νοητοί αυτοί άξονες τέμνονται εμπρός ή πίσω από τον άξονα των τροχών αντίστοιχα. Σε κάποιες περιπτώσεις οχημάτων, η τιμή αυτή μπορεί να είναι μηδενική, δηλαδή οι τροχοί του άξονα να είναι παράλληλοι. Εάν η τιμή της γωνίας αυτής αποκλίνει από την εργοστασιακή,

αυτό συνεπάγεται αστάθεια του οχήματος, έντονη και ανομοιόμορφη φθορά ελαστικών, καθώς και λανθασμένη θέση του τιμονιού.

Στο ακόλουθο σχήμα διακρίνεται η εν λόγω γωνία:



Σχήμα 2.13: Γωνία Toe (www.dionysopoulos.gr)

2.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΕΥΓΟΥΣ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ-ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ

Η επιλογή ζεύγους αποσβεστήρα -ελατηρίου ("Coilover") γίνεται κυρίως με κριτήριο το βάρος του οχήματος, το επιθυμητό του ύψος (απόσταση από το έδαφος) και τη χρήση του. Με βάση αυτά τα κριτήρια, επιλέγεται ένα ζεύγος με κατάλληλο συντελεστή απόσβεσης και κατάλληλη σταθερά ελατηρίου. Κατά κανόνα, στα οχήματα του διαγωνισμού FSAE, που το βάρος τους είναι της τάξης των 250 Kg, επιλέγονται αμορτισέρ από αγωνιστικά ποδήλατα τύπου "Mountain Bike". Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το αμορτισέρ "ROCO TST R 215,5X63.5 Rear Suspension" της εταιρίας Marzocchi. Το κόστος του στην Ελλάδα είναι της τάξεως των 270 €.

Το συγκεκριμένο αμορτισέρ, καθώς και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, παρατίθενται στην ακόλουθη εικόνα:



Σχήμα 2.14: "Coilover" της εταιρίας Marzocchi (www.marzocchi.com)

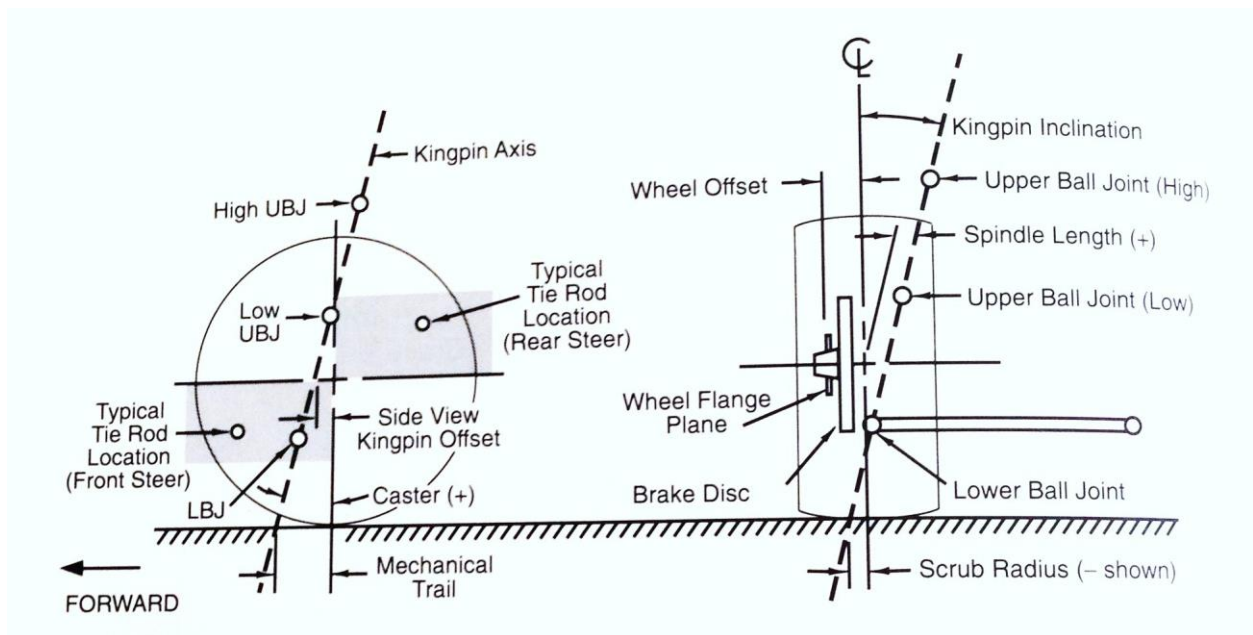
3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ

Η σχεδίαση του συστήματος διεύθυνσης ενός οχήματος έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη δυναμική του συμπεριφορά. Η λειτουργία που επιτελεί είναι το να στρίβει τους εμπρός τροχούς αποκρινόμενο στις εντολές του οδηγού, ώστε να εξασφαλιστεί ο έλεγχος της διεύθυνσης του οχήματος. Ωστόσο, η πραγματική γωνία στροφής είναι αποτέλεσμα και άλλων παραγόντων, όπως η γεωμετρία της ανάρτησης και η γεωμετρία-αντιδράσεις των επιμέρους τμημάτων που αποτελούν το σύστημα διεύθυνσης. Επιπλέον, στην περίπτωση προσθιοκίνητου οχήματος, η πραγματική γωνία στροφής επηρεάζεται και από τη γεωμετρία-αντιδράσεις από το σύστημα παραγωγής/μετάδοσης ισχύος (powertrain) (Gillespie T.).

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ

Ένα από τα κύρια μεγέθη που ορίζονται στο σύστημα διεύθυνσης των τροχοφόρων οχημάτων είναι ο άξονας περιστροφής, που καλείται "kingpin". Αφορά παλαιότερες διατάξεις αναρτήσεων και στις ανεξάρτητες αναρτήσεις ο όρος διατηρείται και υπονοεί τον άξονα περιστροφής που ορίζουν ο άνω και ο κάτω σύνδεσμος του τροχού με τους βραχίονες. Καθώς ο τροχός πρέπει να στρέφεται και να κινείται κατακόρυφα ταυτόχρονα, οι εν λόγω σύνδεσμοι είναι σφαιρικοί ("ball joints"). Για διάφορους λόγους, ο νοητός αυτός άξονας δεν είναι ούτε κατακόρυφος ούτε διέρχεται από το κέντρο του τροχού. Απεναντίας, βρίσκεται υπό γωνία και ως προς τους τρεις άξονες. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται σχηματικά η γεωμετρία του άξονα περιστροφής τροχού που συνδέεται σε ανεξάρτητη ανάρτηση:



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία του άξονα περιστροφής τροχού (Milliken W. & Milliken D.)

Όπως παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα, στην πλάγια όψη και στην πρόοψη, ορίζονται πλήθος μεγεθών που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οχήματος και που η επιλογή της τιμής τους αποτελεί εν γένει συμβιβασμό επιδόσεων (performance) και χωροταξίας (packaging). (Milliken W. & Milliken D.)

3.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕ ΚΡΕΜΑΓΙΕΡΑ

3.3.1. Γενικά

Το σύστημα διεύθυνσης με κρεμαγιέρα (Rack and pinion) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη διάταξη συστήματος διεύθυνσης που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των σύγχρονων αυτοκινήτων.

3.3.2. Αρχή λειτουργίας και γεωμετρία

Η διάταξη αποτελείται από έναν οδοντωτό τροχό (Pinion) που συνδέεται με το τιμόνι και έναν ατέρμονα κοχλία (Rack) που συνδέεται με τον τροχό μέσω ράβδου (Tie rod). Ο ατέρμων κοχλίας μετασχηματίζει την περιστροφική κίνηση του τιμονιού σε γραμμική κίνηση της ράβδου. Με τη σειρά της η ράβδος μετατρέπει τη γραμμική της κίνηση σε περιστροφική κίνηση του τροχού γύρω από τον άξονα περιστροφής του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα διεύθυνσης των οχημάτων χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολλών συνδέσεων. Αυτές οι συνδέσεις αποτελούν πηγή ελαστικότητας και χάρης που καθιστούν το σύστημα ανακριβές και δε δίδουν στον οδηγό την αίσθηση της θέσης και

του προσανατολισμού των τροχών. Αυτό συνεπάγεται μειωμένο έλεγχο του οχήματος και συνεπώς μειωμένη ασφάλεια. Για το λόγο αυτό τα επιμέρους εξαρτήματα μιας ανάρτησης θα πρέπει να είναι άκαμπτα και καλά συνδεδεμένα. (Milliken W. & Milliken D.)

3.3.3. Λόγος στροφής (Steering ratio)

Ο ολικός λόγος στροφής (Overall steering ratio) ορίζεται ως ο λόγος της γωνίας στροφής του τιμονιού προς την πραγματική γωνία στροφής των τροχών. Οι τιμές που λαμβάνει εξαρτώνται κατά κανόνα από τον τύπο του οχήματος. Στα αγωνιστικά αυτοκίνητα δρόμου κυμαίνεται μεταξύ 20:1 ("αργό") στα αυτοκίνητα πίστας με πολύ ανοικτές στροφές έως 10:1 ("πολύ γρήγορο") στα μονοθέσια της Formula 1 σε πίστες με κλειστές στροφές. Στα μικρά μονοθέσια (Go-kart) μπορεί να φτάσει και την τιμή 1:1. Εν γένει πάντως, στα επιβατηγά αυτοκίνητα λαμβάνει τιμές στο εύρος 16:1 έως 18:1.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάποιες διατάξεις συνδέσεων, το σύστημα διεύθυνσης μπορεί να μην είναι γραμμικό, δηλαδή ο λόγος να αποτελεί συνάρτηση της γωνίας στροφής. Αυτό συμβαίνει επίσης και στα υποβοηθούμενα συστήματα διεύθυνσης. (Milliken W. & Milliken D.)

3.3.4. Υπολογισμός λόγου στροφής

Ο λόγος στροφής στα συστήματα διεύθυνσης με κρεμαγιέρα υπολογίζεται μέσω του "παράγοντα c" (c-factor) του ατέρμονα και του μήκους του βραχίονα στροφής (steering arm length). Επισημαίνεται πως το τελευταίο ισούται με την απόσταση του άξονα περιστροφής (King pin axis) και του εξωτερικού σφαιρικού συνδέσμου της "tie rod". Ο "παράγοντας c" αποτελεί στην ουσία τη σχέση μετάδοσης του ατέρμονα και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c\text{-factor} = \text{travel (in)} / 360^\circ \text{ pinion rotation}$$

όπου "travel" είναι η ευθύγραμμη μετακίνηση του ατέρμονα και "360° pinion rotation" η μία πλήρης περιστροφή του "pinion" και συνεπώς του τιμονιού. Συνεπώς συμβολίζει το πόσο μετακινείται γραμμικά με μία πλήρη στροφή του τιμονιού. Συνεπώς ο λόγος στροφής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Steer ratio} = \arcsin(c\text{-factor} / \text{steering arm length}) / 360$$

όπου τα μήκη και οι γωνίες έχουν μονάδες [in] και [°] αντίστοιχα.

Η παραπάνω σχέση είναι ακριβής για τις περιπτώσεις που ο βραχίονας στροφής είναι κάθετος στην "tie rod", όπως φαίνεται σε κάτωψη και πρόοψη. Σε αντίθετη περίπτωση απαιτείται διόρθωση της σχέσης. (Milliken W. & Milliken D.)

4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ DS SOLIDWORKS

4.1 ΠΡΟΪΟΝΤΑ SOLIDWORKS

Τα προϊόντα SolidWorks καλύπτουν όλες τις πλευρές της εξέλιξης ενός προϊόντος, μέσω μίας ολοκληρωμένης διαδικασίας συνεχούς ροής εργασίας (work flow), που περιλαμβάνει το σχεδιασμό (design), την επαλήθευση (verification), το βιώσιμο σχεδιασμό (sustainable design), την επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων στο project, καθώς και τη διαχείριση δεδομένων (data management). Η χρήση του επιτρέπει στους σχεδιαστές και στους μηχανικούς να συνδέσουν πολλά τεχνολογικά πεδία, μειώνοντας τον κύκλο σχεδιασμού ενός καινοτόμου βιομηχανικού προϊόντος, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και παραδίδοντας ταχύτερα το προϊόν στην αγορά.

Τα προϊόντα SolidWorks μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες στα έξι ακόλουθα αντικείμενα:

- Τρισδιάστατη ψηφιακή σχεδίαση (3D CAD)
- Εξομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (Simulation)
- Διαχείριση δεδομένων του προϊόντος (Product Data Management)
- Τεχνική επικοινωνία (Technical Communication)
- Ηλεκτρολογικό σχεδιασμό (Electrical Design)
- Υπηρεσίες τρισδιάστατων εφαρμογών (λογισμικό "3DEXPERIENCE")

4.2 ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Η εταιρία SolidWorks ιδρύθηκε το 1993 στη Μασαχουσέτη των Η.Π.Α. και το 1997 αγοράστηκε από τη γαλλική Dassault Systèmes S.A. που αποτελεί ηγέτη στο χώρο. Η εταιρία προσφέρει πλήρες λογισμικό 3D που επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργήσει, να εξομοιώσει, να δημοσιεύσει και να διαχειριστεί σχεδιαστικά δεδομένα. Τα προϊόντα της είναι εύκολα στην εκμάθηση και τη χρήση και καθιστούν τη σχεδίαση καλύτερη, ταχύτερη και οικονομικώς αποτελεσματικότερη.

4.3 ΠΕΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το λογισμικό SolidWorks χρησιμοποιείται σε πλήθος αγορών, συμπεριλαμβανομένων της βιομηχανίας, της ιατρικής, της επιστημονικής, της κατανάλωσης, της εκπαίδευσης, της τεχνολογίας και των μεταφορών.

Το πελατολόγιό της εταιρίας είναι ιδιαιτέρως ευρύ και συνίσταται τόσο από εταιρίες διαφόρων μεγεθών, όσο και από μεμονωμένους χρήστες. Οι εγκατεστημένες θέσεις

παγκοσμίως υπερβαίνουν τις 2.719.805 και αφορούν περισσότερους από 210.800 οργανισμούς.

4.4 ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η γνώση της χρήσης του λογισμικού SolidWorks μπορεί να πιστοποιηθεί μέσω της απόκτησης πιστοποιητικών (Certificates), που καλύπτουν όλα τα επίπεδα γνώσης και όλα τα προϊόντα SolidWorks. Ακολουθώς παρατίθενται και περιγράφονται συνοπτικά τα παρεχόμενα πιστοποιητικά:

- Certified SOLIDWORKS Associate (CSWA): Πρόκειται για πιστοποιητικό βασικής γνώσης δημιουργίας Εξαρτημάτων (Parts), Διατάξεων (Assemblies) και Τεχνικών σχεδίων (Drawings).
- Certified SOLIDWORKS Associate - Academic (CSWA - Academic): Πρόκειται για αναβαθμισμένη εκδοχή του πιστοποιητικού CSWA
- Certified SOLIDWORKS Professional (CSWP): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης του λογισμικού σε επαγγελματικό επίπεδο
- Certified SOLIDWORKS Expert (CSWE): Πρόκειται για αναβαθμισμένη εκδοχή του πιστοποιητικού CSWP
- Certified Enterprise PDM Administrator (CEPA): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης του λογισμικού SOLIDWORKS Enterprise Product Data Management
- Certified Sustainable Design Associate (CSDA): Πρόκειται για πιστοποιητικό που αφορά το βιώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό σχεδιασμό
- Certified SOLIDWORKS Associate - Simulation (CSWA-S): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης διεξαγωγής μηχανικής ανάλυσης (stress analysis) μέσω χρήσης του εργαλείου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) που είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό
- Certified SOLIDWORKS Professional Advanced Sheet Metal (CSWPA-SM): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης χρήσεως του εργαλείου μορφοποίησης λαμαρίνας (Sheet Metal) που είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό
- Certified SOLIDWORKS Professional Advanced Weldments (CSWPA-WD): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης χρήσεως του εργαλείου σχεδίασης μορφοδοκών (Weldments)
- Certified SOLIDWORKS Professional Advanced Surfacing (CSWPA-SU): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης χρήσεως των εργαλείων σχεδίασης πολύπλοκων επιφανειών (Advanced Surfacing)
- Certified SOLIDWORKS Professional Advanced Mold Tools (CSWPA-MT): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης χρήσεως του εργαλείου σχεδίασης και ανάλυσης τύπων (Mold Tools)
- Certified SOLIDWORKS Professional Advanced Drawing Tools (CSWPA-DT): Πρόκειται για πιστοποιητικό γνώσης χρήσεως των εργαλείων δημιουργίας τυποποιημένων μηχανολογικών σχεδίων (Drawing)
- Certified SOLIDWORKS Professional - Simulation (CSWP-S): Πρόκειται για αναβαθμισμένη εκδοχή του πιστοποιητικού CSWA-S

Οι εξετάσεις για όλα τα παραπάνω πιστοποιητικά δίδονται μέσω διαδικτύου. Συγκεκριμένα, ο ενδιαφερόμενος εργάζεται στο λογισμικό που είναι εγκατεστημένο στον προσωπικό του Η/Υ και συμπληρώνει σε μία διαδικτυακή φόρμα τις απαντήσεις στα ερωτήματα που του τίθενται. Οι απαντήσεις προκύπτουν από το σχέδιο και συνεπώς έτσι εξετάζεται έμμεσα ο υποψήφιος.

Εάν κριθεί επιτυχών, προωθείται σε ένα διαδικτυακό τόπο όπου λαμβάνει το πιστοποιητικό του σε ηλεκτρονική εκτυπώσιμη μορφή.

(www.solidworks.com)

4.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το SolidWorks ανήκει στην κατηγορία των λογισμικών παραμετρικής ψηφιακής σχεδίασης. Πρόκειται για λογισμικά στα οποία υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής ενός ήδη σχεδιασμένου σώματος ή επιφάνειας, μέσω μεταβολής κάποιας/κάποιων διάστασής του. Αυτή η δυνατότητα δεν υπήρχε στα αρχικά λογισμικά ψηφιακής σχεδίασης, καθώς δε διατηρούσαν ιστορικό εντολών και δεν υπήρχε η δυνατότητα επιστροφής σε προηγούμενα βήματα.

Μέσω του SolidWorks, ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει αρχικά διάφορα εξαρτήματα που καλούνται "Parts" και εν συνεχεία να συνθέσει με αυτά μία κατασκευή ("Assembly") ορίζοντας κατάλληλες σχέσεις σύνδεσης μεταξύ τους. Αυτές οι σχέσεις καλούνται "Mates" και προσομοιάζουν την πραγματικότητα, δηλαδή απαντούν και στην πραγματική εκδοχή της κατασκευής. Ενδεικτικά αναφέρεται η περίπτωση της ομόκεντρης σχέσης δύο κυλινδρικών σωμάτων (πχ ένας κυλινδρικός πείρος με την αντίστοιχη οπή) και η περίπτωση της δεδομένης απόστασης δύο παράλληλων επίπεδων επιφανειών.

Το λογισμικό διαθέτει τη δυνατότητα σχεδίασης αρχικών σχεδίων από τα οποία προκύπτουν στερεά σώματα ή επιφάνειες. Αυτά θεωρούνται σχεδιαστικές οντότητες ("entities"). Η περαιτέρω επεξεργασία τους γίνεται μέσω διαφόρων εικονικών διαδικασιών που καλούνται "Features".

Κλείνοντας πρέπει να επισημανθεί ότι το λογισμικό διαθέτει ενσωματωμένο πρόγραμμα φωτορεαλισμού που επιτρέπει τη φωτορεαλιστική απεικόνιση του προϊόντος (Rendering) λαμβάνοντας υπόψη τα υλικά, τα χρώματα και το φυσικό περιβάλλον που έχει ορίσει ο χρήστης. Δίδεται έτσι η δυνατότητα να αναπαρασταθεί το προϊόν όσο πιστότερα γίνεται, χωρίς να έχει ακόμη κατασκευαστεί.

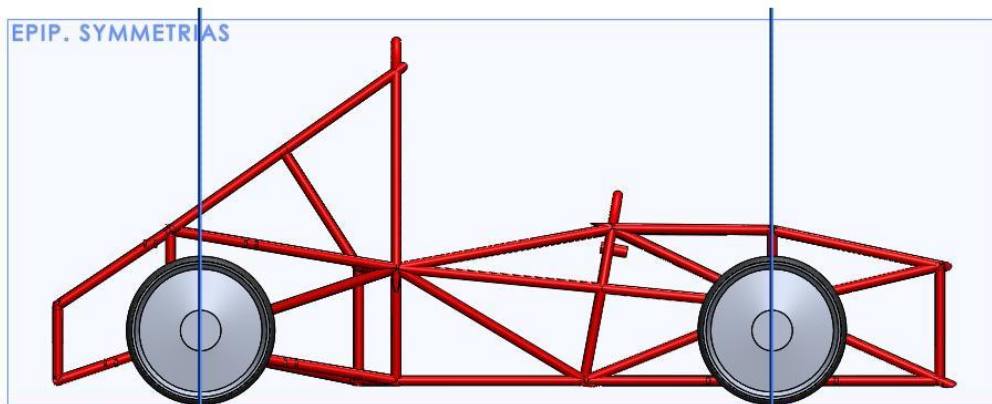
5. ΣΧΕΔΙΑΣΗ FORMULA SAE ΣΤΟ SOLIDWORKS

5.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

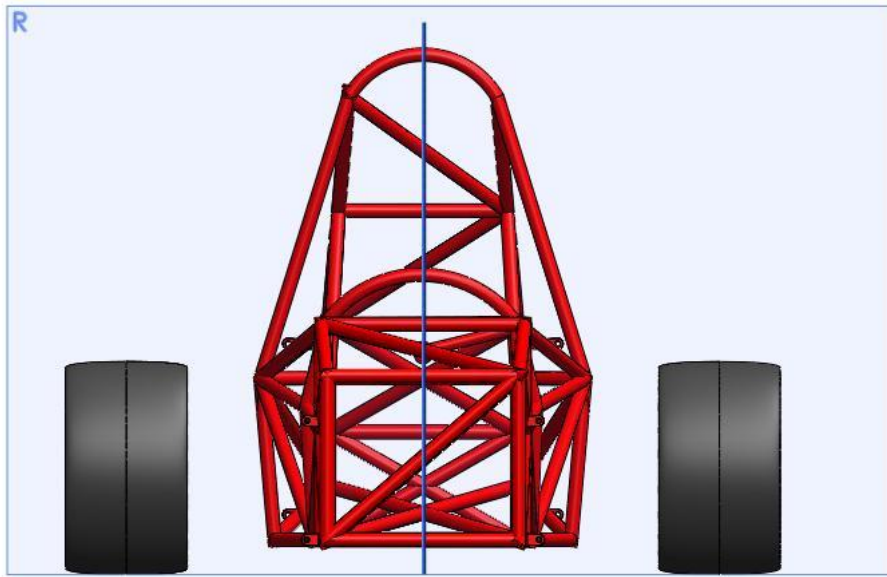
Η σχεδίαση του συστήματος διεύθυνσης ξεκινά με την τοποθέτηση του πλαισίου – που έχει σχεδιαστεί από την ομάδα – σε ένα κενό Assembly. Εν συνεχεία τοποθετούνται ομοιώματα των τροχών, διαστάσεων περίπου 15.5 in(διάμετρος) × 230 mm (πλάτος). Οι τροχοί τοποθετούνται σε θέσεις τέτοιες ώστε το μεταξόνιο του οχήματος να είναι περίπου 1520 mm (εντός του ορίου των 1525 mm, που αναφέρεται στο Άρθρο 2/Παράγραφος T2.3 των προδιαγραφών του διαγωνισμού) και το μετατρόχιο περίπου 1100 mm.

Η προκαταρτική σχεδίαση του οχήματος είναι θεμελιώδους σημασίας καθώς επιτρέπει τον αρχικό προσεγγιστικό προσδιορισμό των διαστάσεων των επιμέρους τμημάτων της ανάρτησης που αποτελεί και το πρώτο βήμα για τη λεπτομερή τους σχεδίαση.

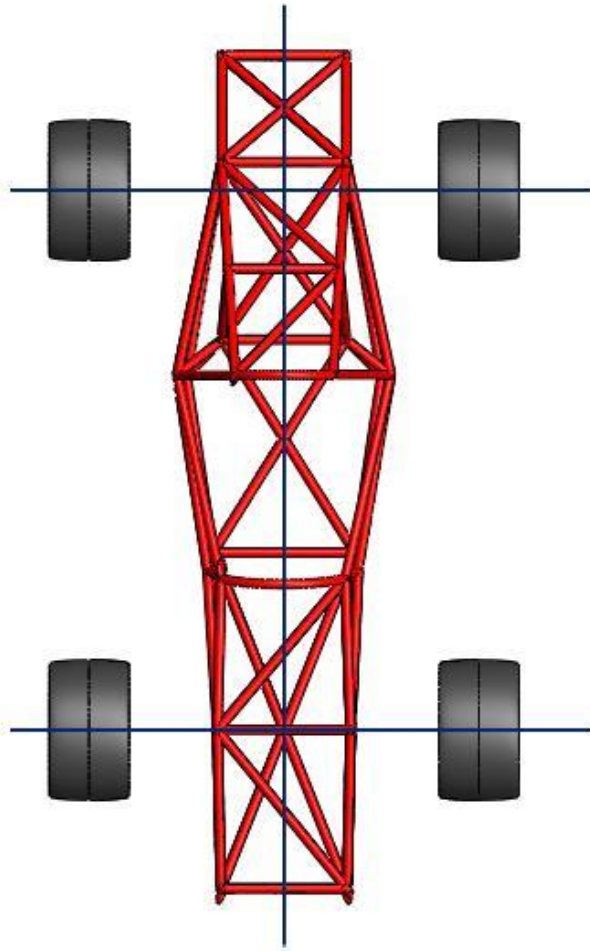
Στις ακόλουθες εικόνες φαίνεται η αρχική θέση των τροχών ως προς το πλαίσιο:



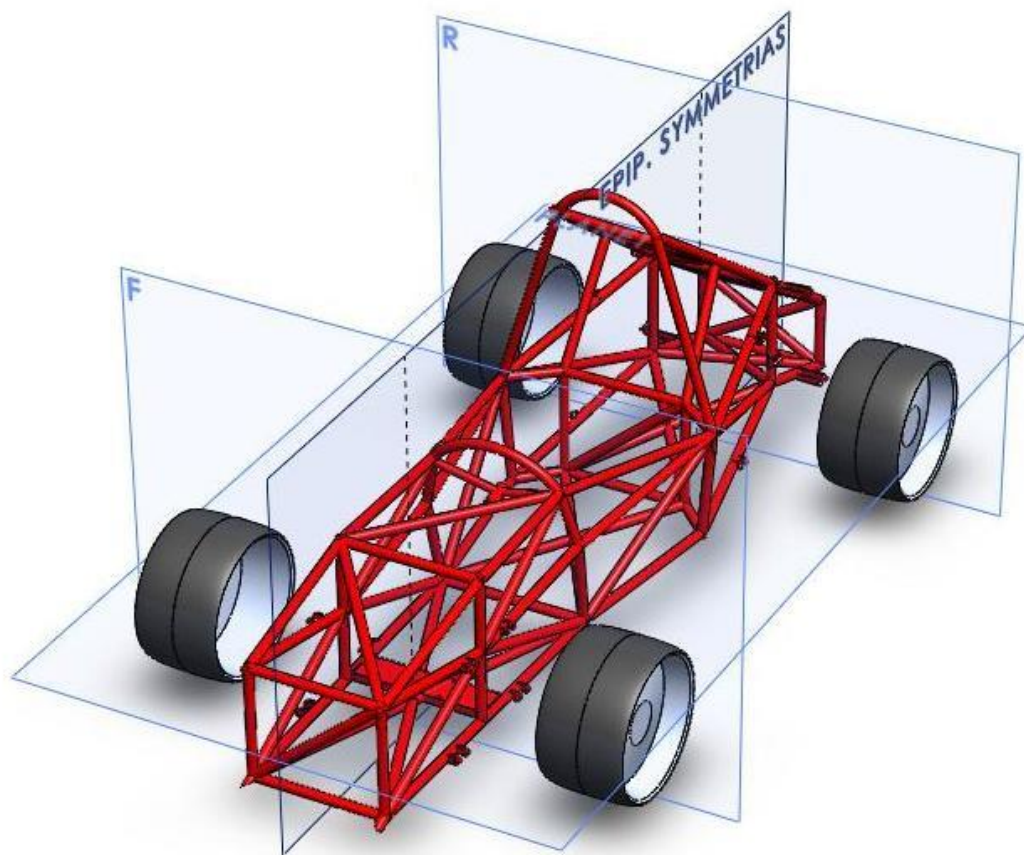
Σχήμα 5.1: Πλάγια όψη του αρχικού οχήματος



Σχήμα 5.2: Πρόοψη του αρχικού οχήματος



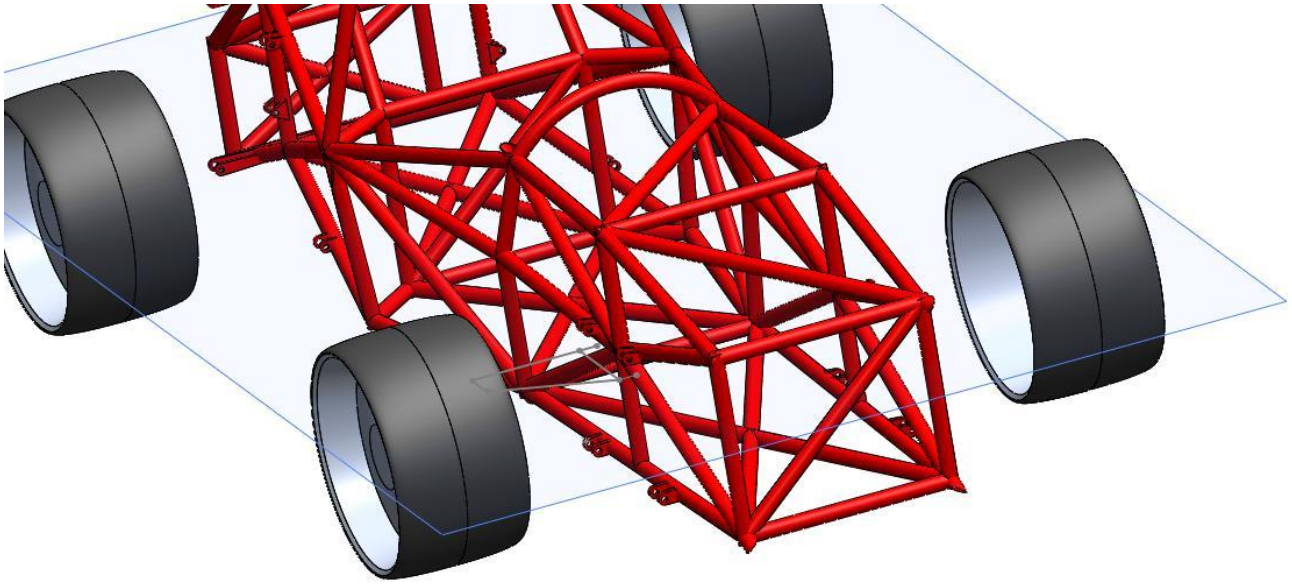
Σχήμα 5.3: Κάτοψη του αρχικού οχήματος



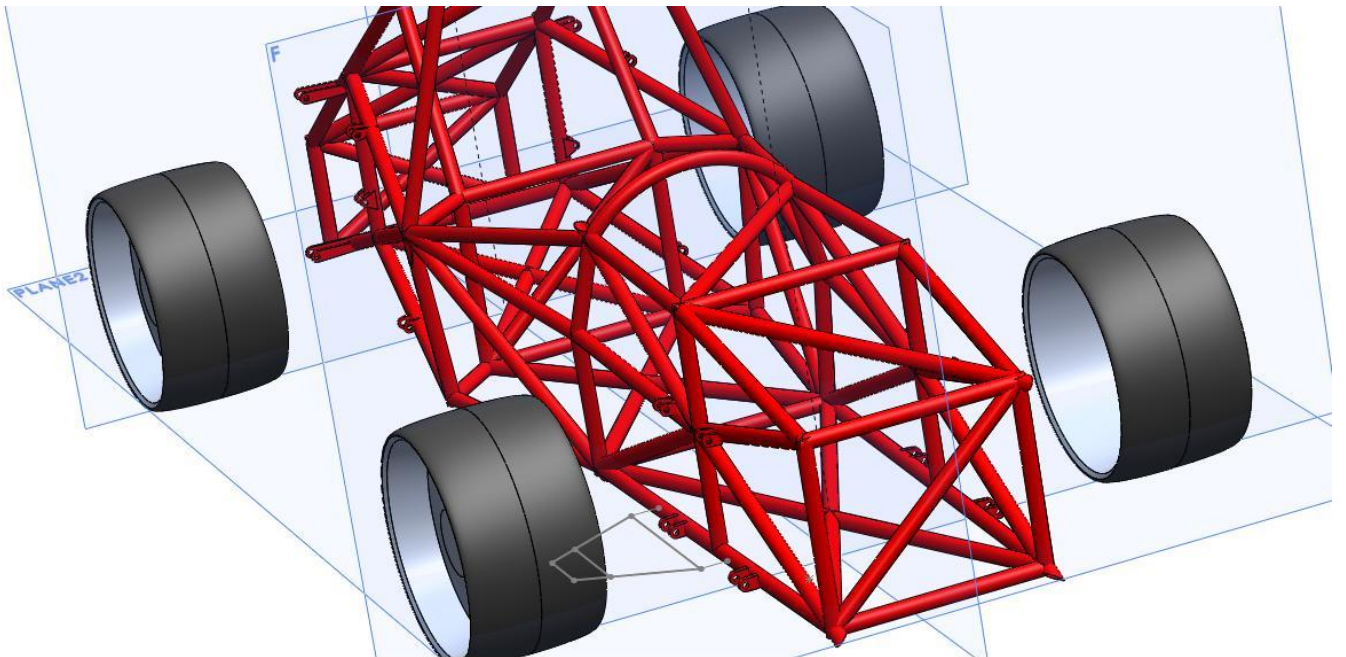
Σχήμα 5.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού οχήματος

5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΒΡΑΧΙΟΝΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ BRACKETS

Μετά την τοποθέτηση των τροχών, σχεδιάζεται χονδροειδώς το άνω και κάτω εμπρός δεξιό ψαλίδι στο περιβάλλον του Assembly σε ένα επίπεδο παράλληλο με το Top Plane, καθώς έτσι ελέγχεται πλήρως η χωροταξία της περιοχής:

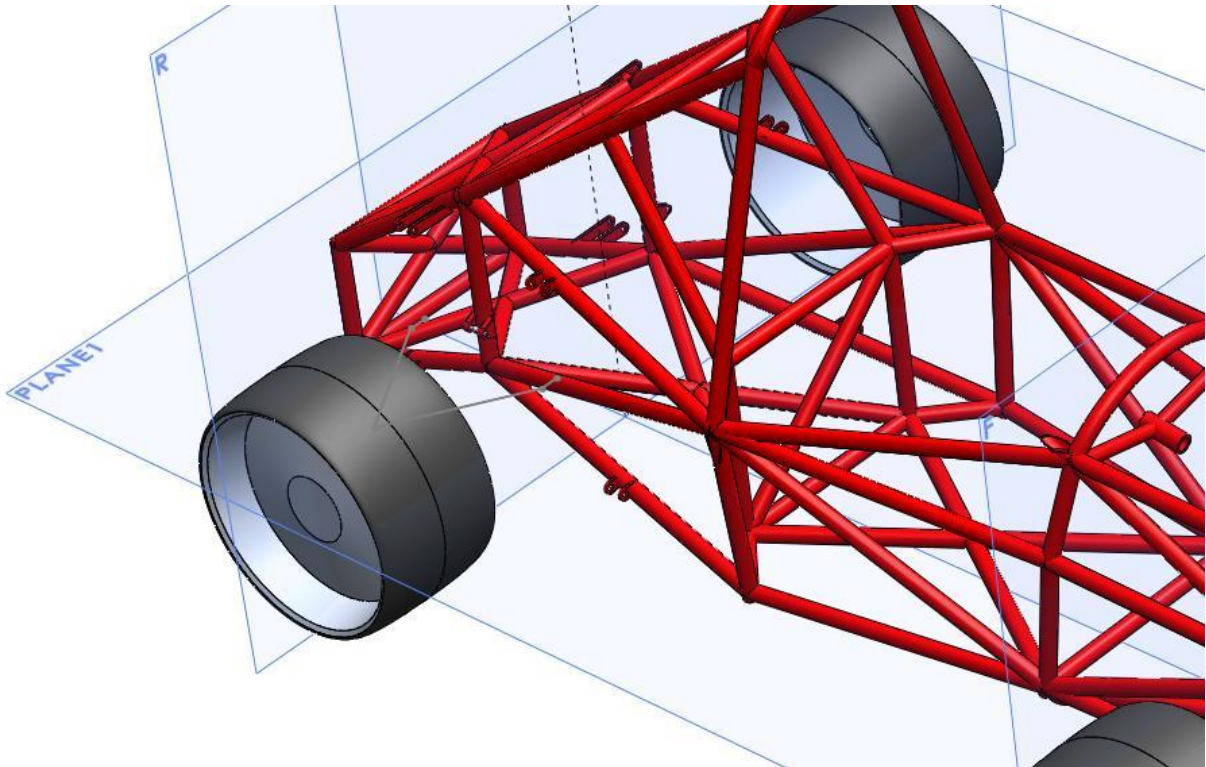


Σχήμα 5.5: Προκαταρκτική σχεδίαση πρόσθιου άνω δεξιού "A-Arm"

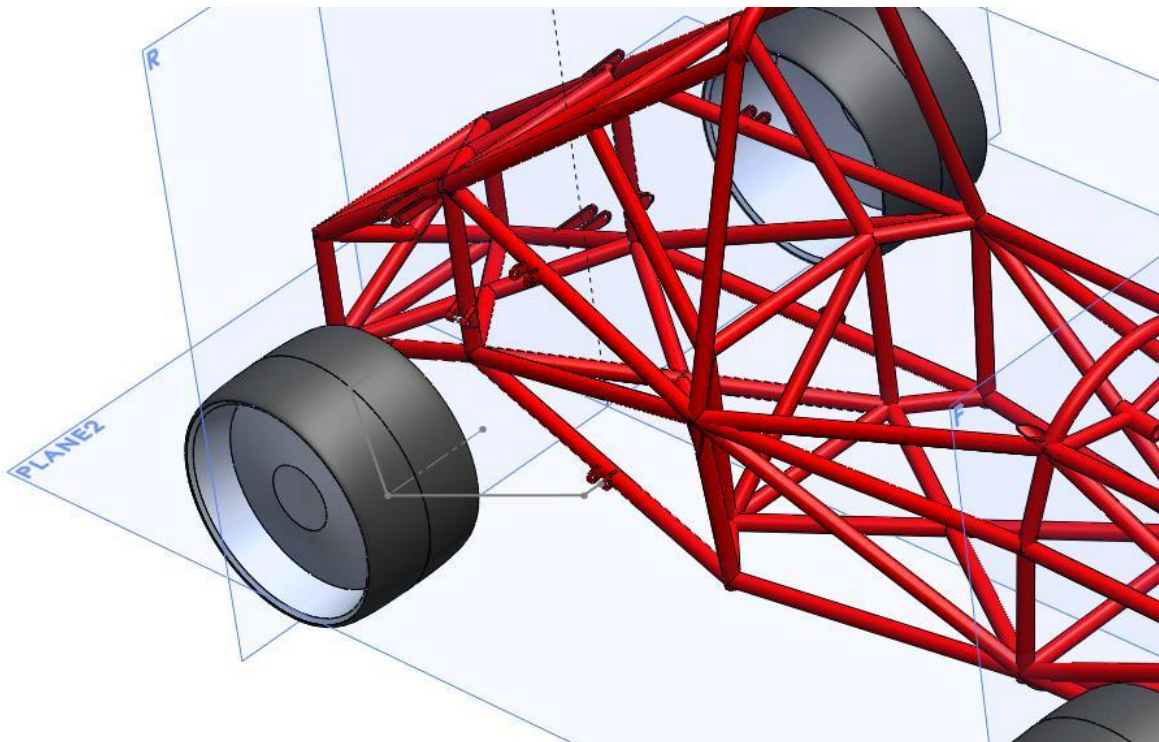


Σχήμα 5.6: Προκαταρκτική σχεδίαση πρόσθιου κάτω δεξιού "A-Arm"

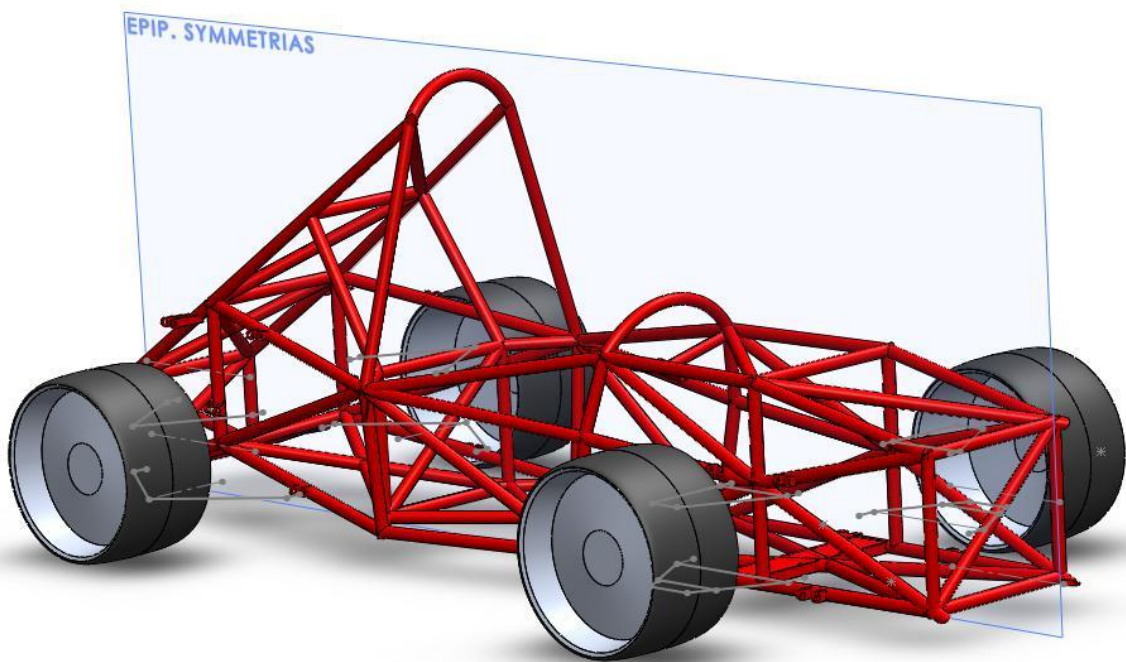
Με βάση την ίδια λογική σχεδιάζονται και οι βραχίονες ελέγχου της πίσω ανάρτησης:



Σχήμα 5.7: Προκαταρκτική σχεδίαση πίσω άνω δεξιού "A-Arm"



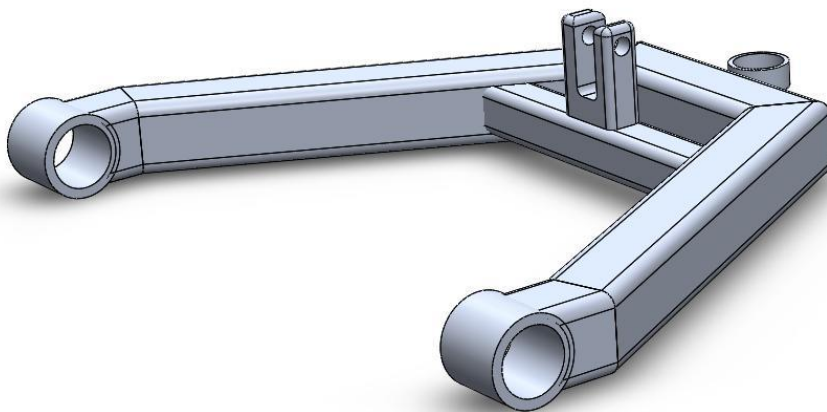
Σχήμα 5.8: Προκαταρκτική σχεδίαση πίσω κάτω δεξιού "A-Arm"



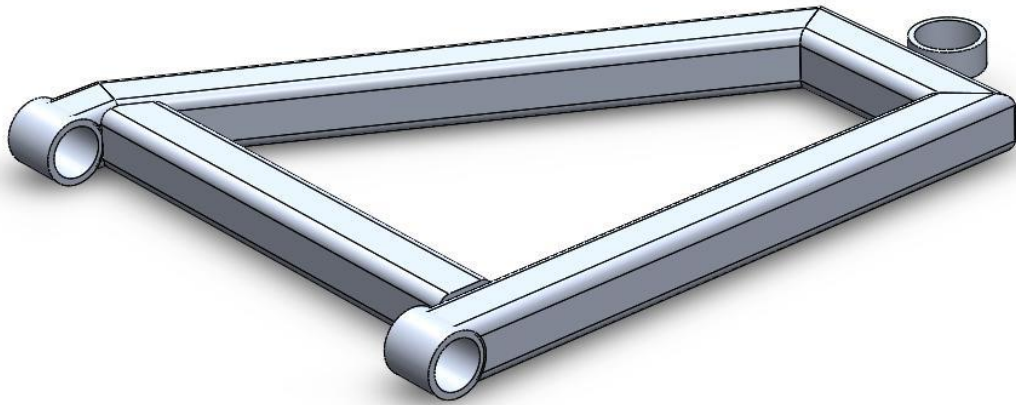
Σχήμα 5.9: Οι οκτώ βραχίονες ελέγχου του οχήματος

Βάσει των παραπάνω σχεδίων, σχεδιάζονται οι βραχίονες λαμβάνοντας υπόψη ότι στους κάτω βραχίονες υπάρχει η βάση στήριξης του ζεύγους ελατήριο-αποσβεστήρας. Επιπλέον, στα εσωτερικά άκρα τους είναι διαμορφωμένη η στήριξη στα Brackets του πλαισίου και στο εξωτερικό άκρο η υποδοχή για το Ball Joint. Οι ίδιοι οι βραχίονες κατασκευάζονται από συγκολλητές αλουμιένιες μορφοδοκούς (στο λογισμικό καλούνται "Structural Members"). Ως διατομή επιλέγεται η διάσταση "ISO/SQUARE TUBE/(20×20×2)mm" και ως υλικό το κράμα 1060 ALLOY που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του SolidWorks.

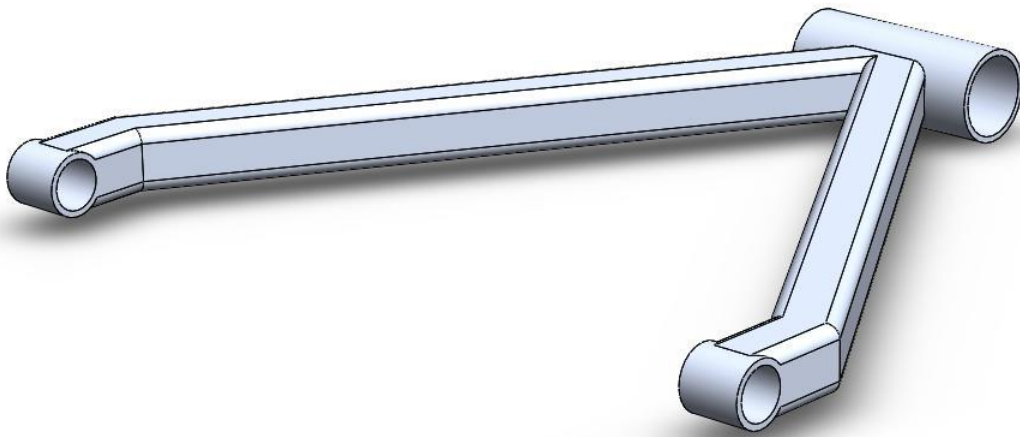
Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνονται οι βραχίονες ελέγχου:



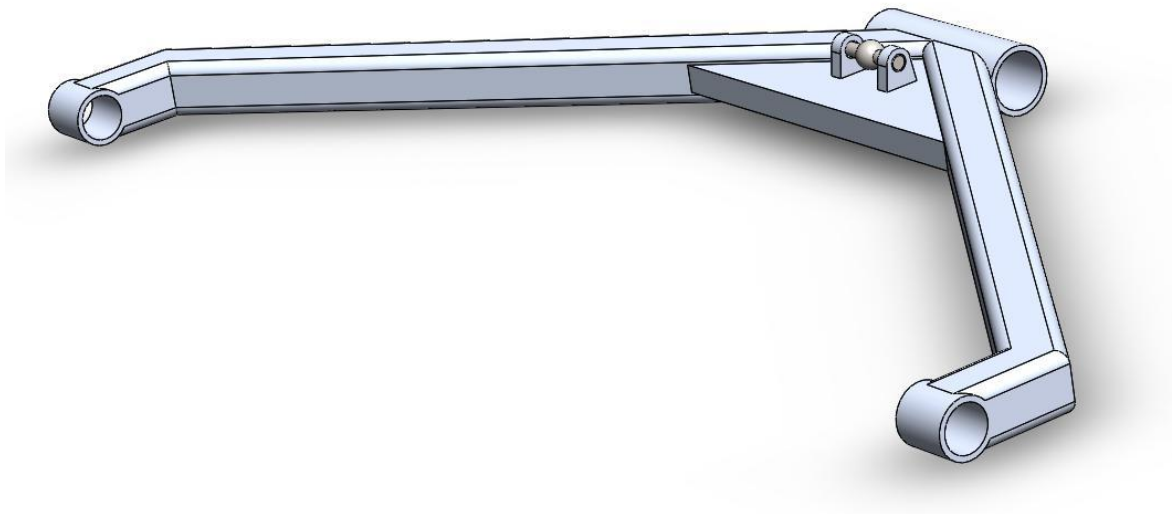
Σχήμα 5.10: Εμπρός και κάτω δεξιό A-Arm



Σχήμα 5.11: Εμπρός και πάνω δεξιό A-Arm



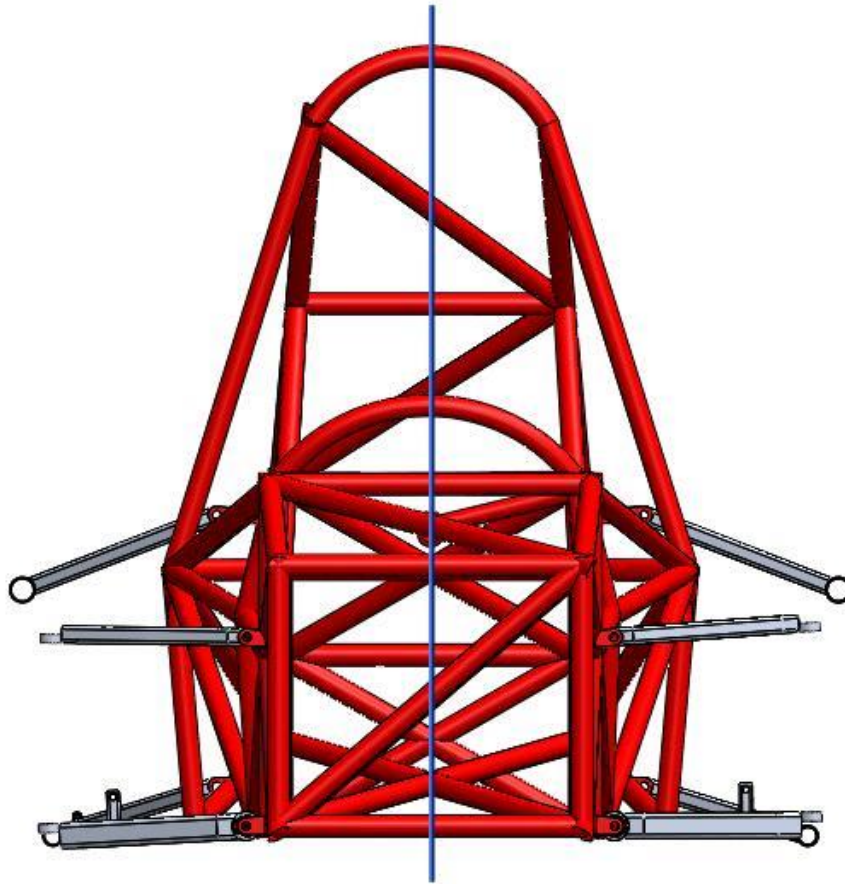
Σχήμα 5.12: Πίσω και πάνω δεξιό A-Arm



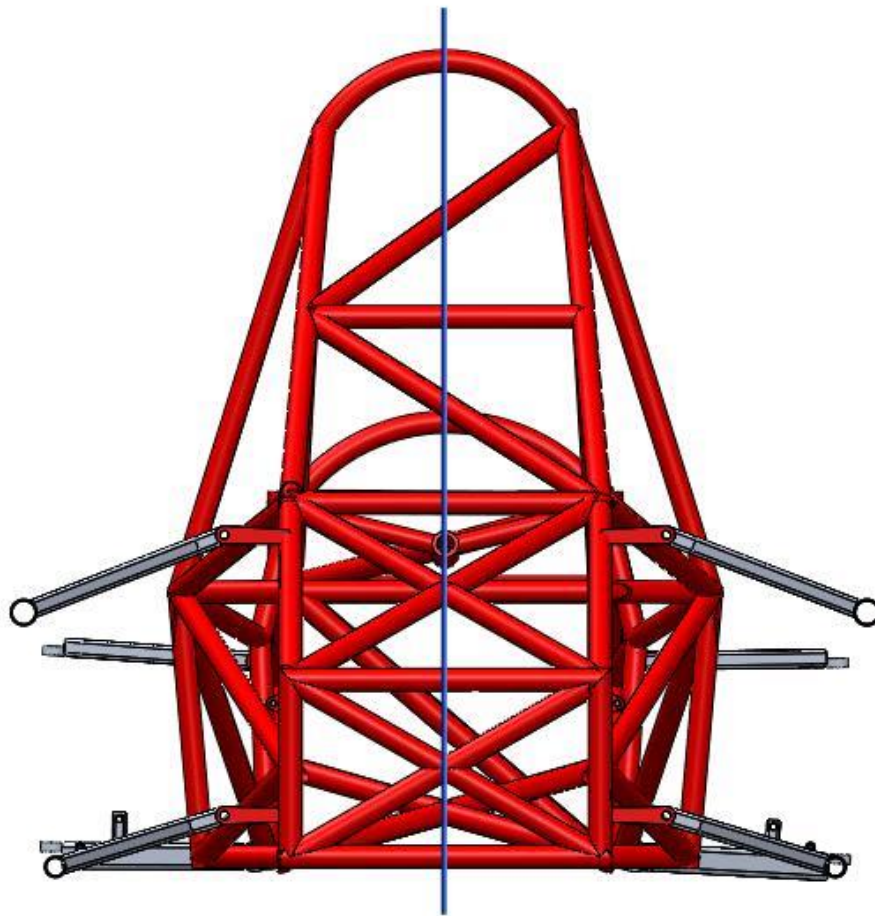
Σχήμα 5.13: Πίσω και κάτω δεξιό A-Arm (Το BallJoint συνδέεται με τον αποσβεστήρα)

Έχοντας σχεδιάσει τους βραχίονες ελέγχου, σχεδιάζουμε και τα Brackets στο πλαίσιο για την στήριξη αυτών. Πρόκειται για Extruded στερεά που στην πραγματική εφαρμογή θα συγκολληθούν πάνω στο πλαίσιο.

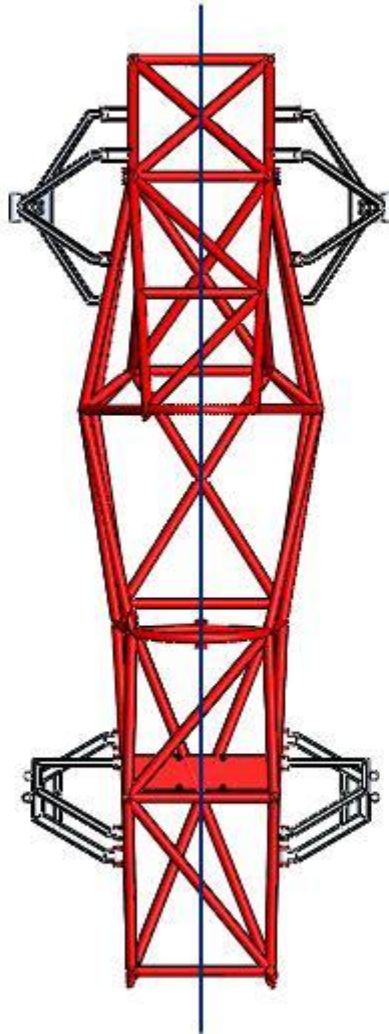
Τελικώς, τα ψαλίδια ενώνονται με το πλαίσιο στο τελικό Assembly. Η θέση τους στο τελικό όχημα φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες:



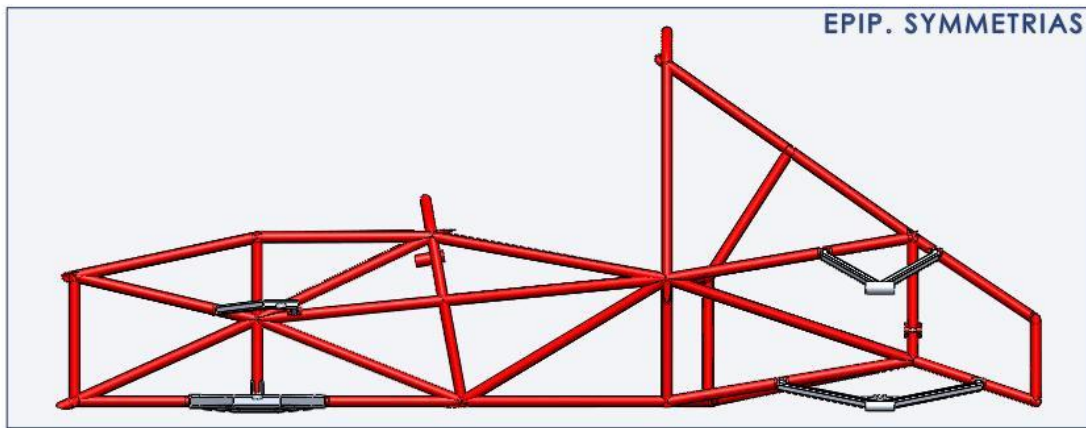
Σχήμα 5.14: Η θέση των οκτώ βραχιόνων ελέγχου στο πλαίσιο (Πρόοψη)



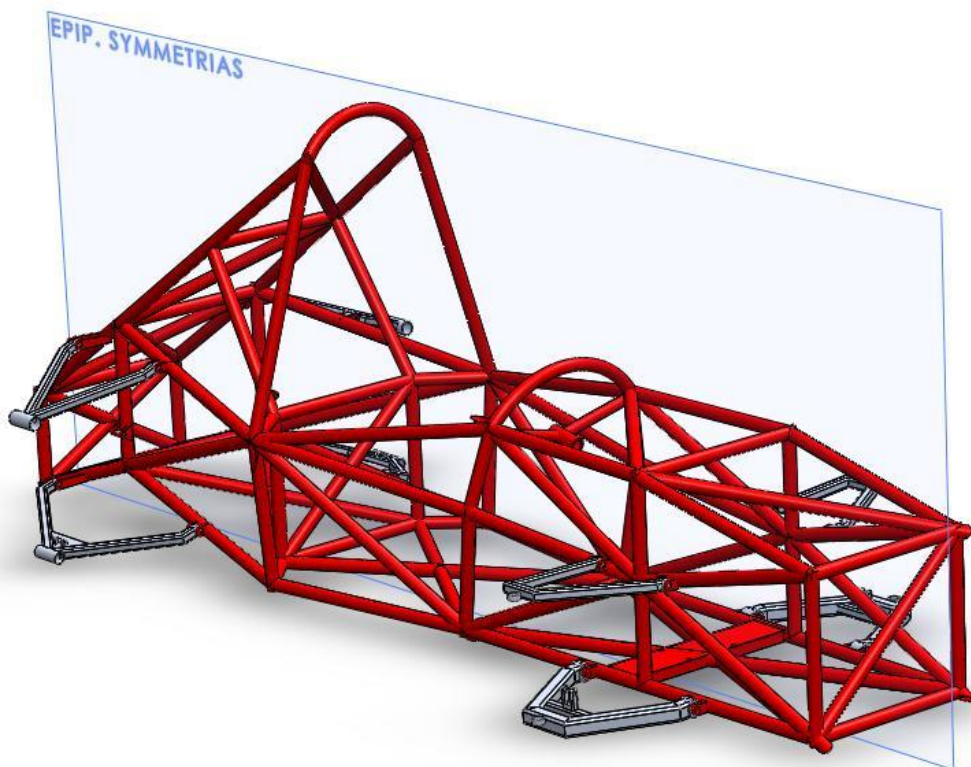
Σχήμα 5.15: Η θέση των οκτώ βραχιόνων ελέγχου στο πλαίσιο (Πίσω όψη)



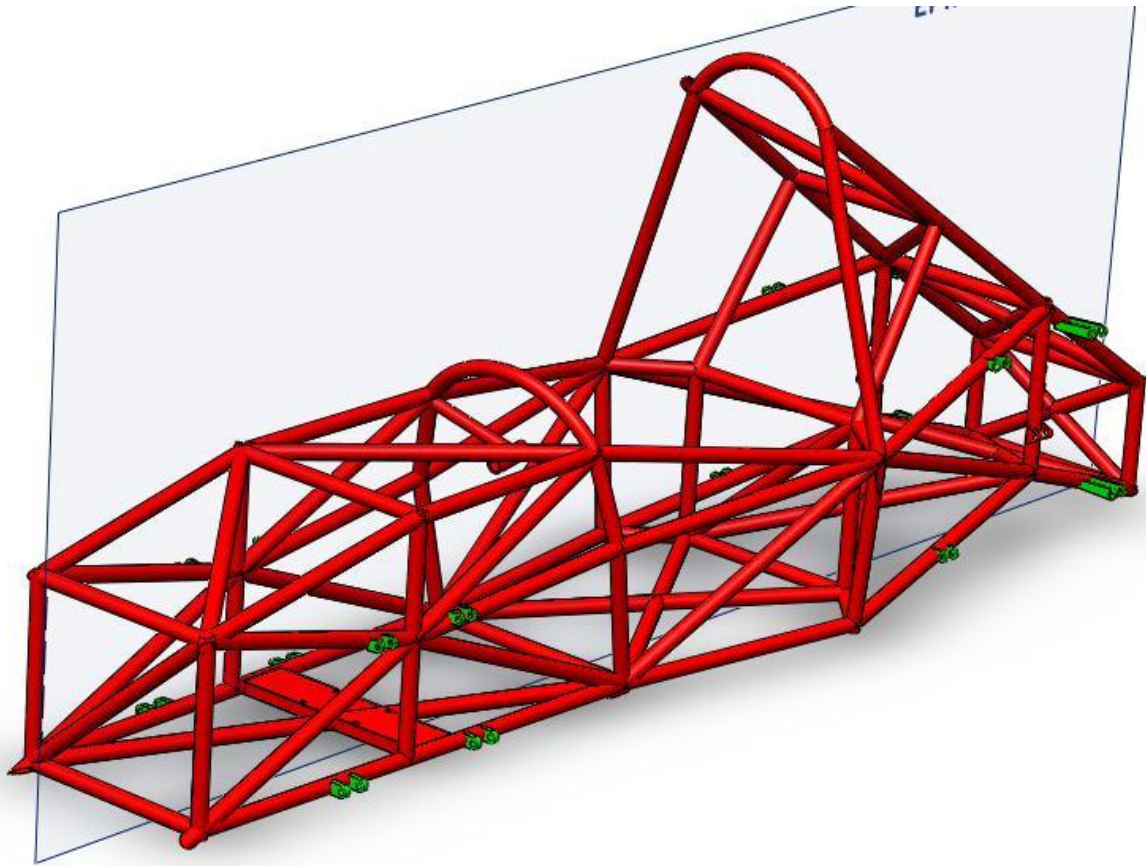
Σχήμα 5.16: Η θέση των οκτώ βραχιόνων ελέγχου στο πλαίσιο (Κάτοψη)



Σχήμα 5.17: Η θέση των οκτώ βραχιόνων ελέγχου στο πλαίσιο (Πλάγια όψη)



Σχήμα 5.18: Η θέση των οκτώ βραχιόνων ελέγχου στο πλαίσιο (Τρισδιάστατη απεικόνιση)



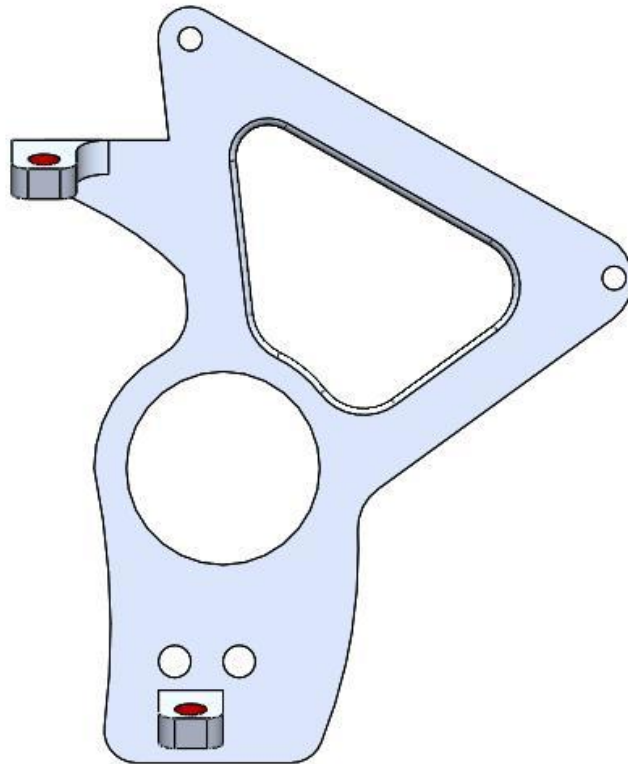
Σχήμα 5.19: Η θέση των δεκαέξι Brackets στο πλαίσιο με πράσινο χρώμα (Τρισδιάστατη απεικόνιση)

5.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΕΜΠΡΟΣ ΚΑΙ ΠΙΣΩ "UPRIGHTS"

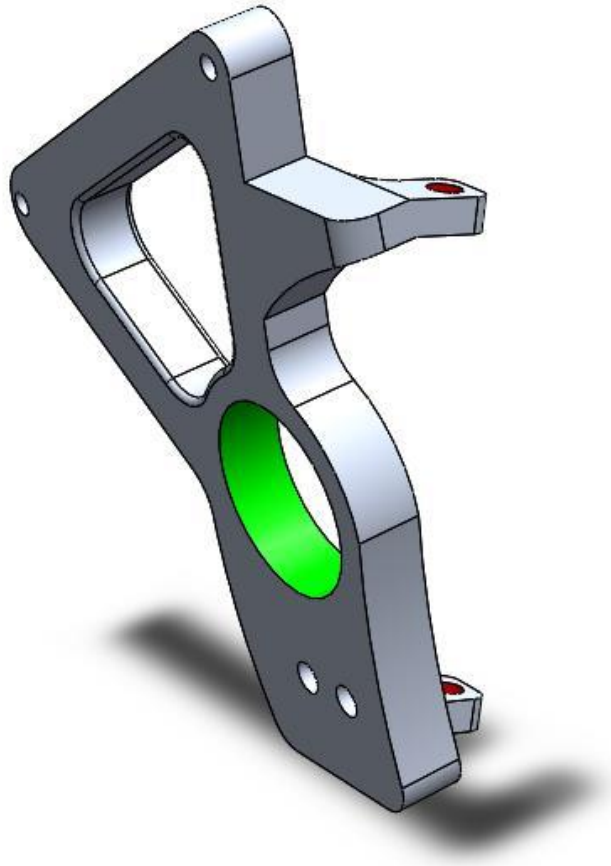
Στη συνέχεια ακολουθεί η σχεδίαση του τμήματος που συνδέει τον τροχό με την ανάρτηση. Συνήθως καλείται "Knuckle" αλλά στα οχήματα αυτού του τύπου απαντά και ως "Upright". Στην περίπτωση του μονοθεσίου είναι ένα CNC κομμάτι.

Επισημαίνεται πως όλα τα Uprights φέρουν υποδοχή για την τοποθέτηση της πλήμνης. Τα δυο πρόσθια φέρουν οπές για να βιδωθούν οι σφαιρικοί σύνδεσμοι των εμπρός βραχιόνων ελέγχου, καθώς και οπές για να βιδωθεί ο βραχίονας στροφής των τροχών (Steering Arm). Τα δύο πίσω συνδέονται με τους πίσω βραχίονες ελέγχου μέσω απλών κυλινδρικών υποδοχών.

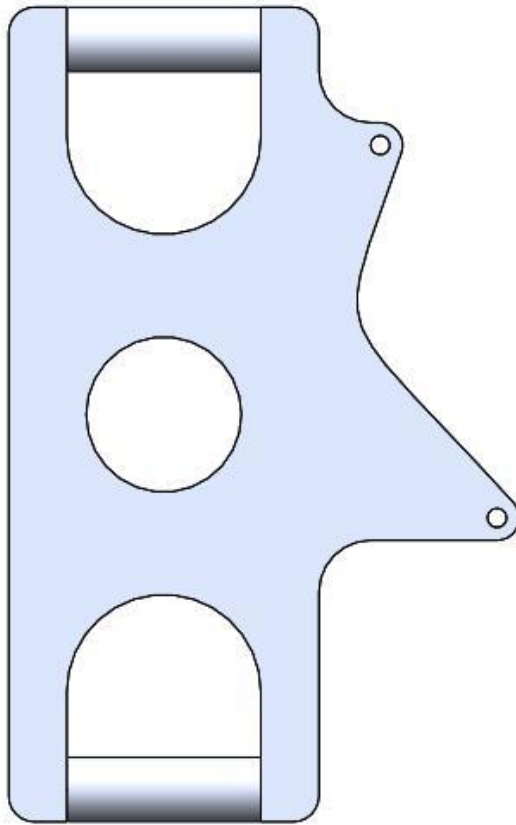
Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνονται τα τέσσερα Uprights του οχήματος:



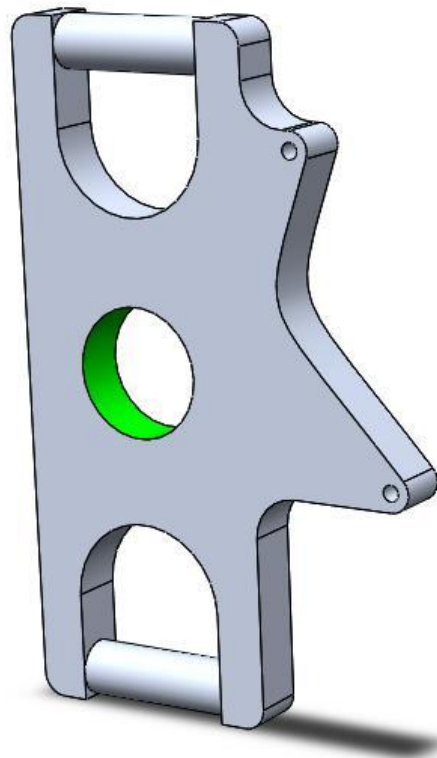
Σχήμα 5.20: Εμπρός αριστερό Upright (Με κόκκινο χρώμα τα σημεία εφαρμογής των Ball Joints)(Πλάγια όψη)



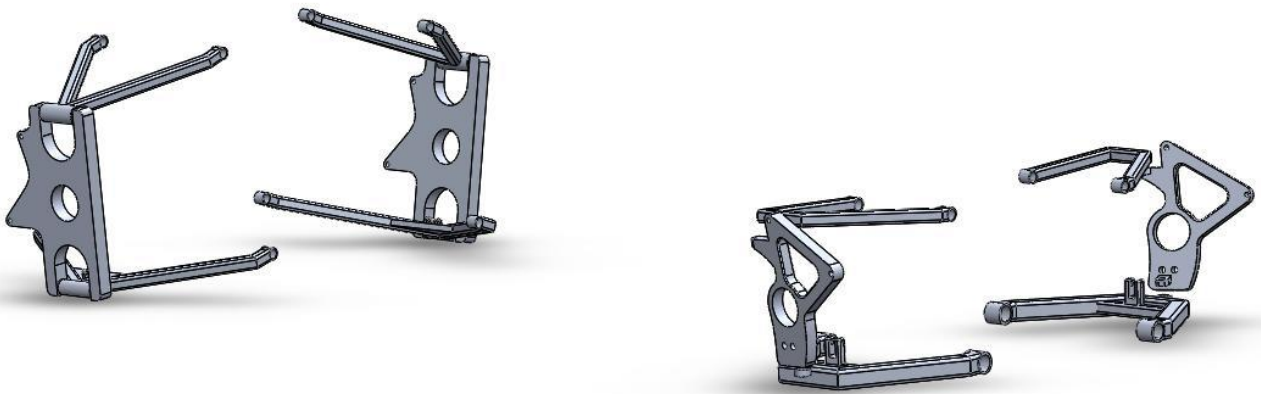
Σχήμα 5.21: Εμπρός αριστερό Upright (Με πράσινο χρώμα η υποδοχή της πλήμνης)



Σχήμα 5.22: Πίσω αριστερό Upright (Πλάγια όψη)



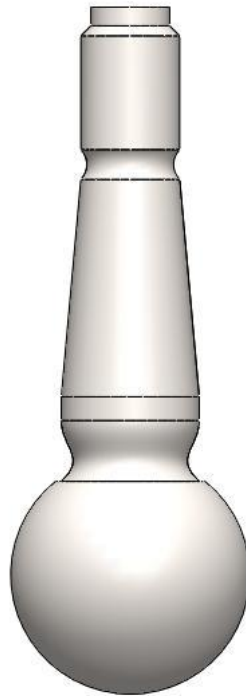
Σχήμα 5.23: Πίσω αριστερό Upright (Με πράσινο χρώμα η υποδοχή της πλήμνης)



Σχήμα 5.24: Τα τέσσερα Uprights του οχήματος και τα αντίστοιχα τέσσερα ζεύγη ψαλιδιών

5.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ "BALL JOINTS" ΚΑΙ ΤΟΥ "STEERING ARM"

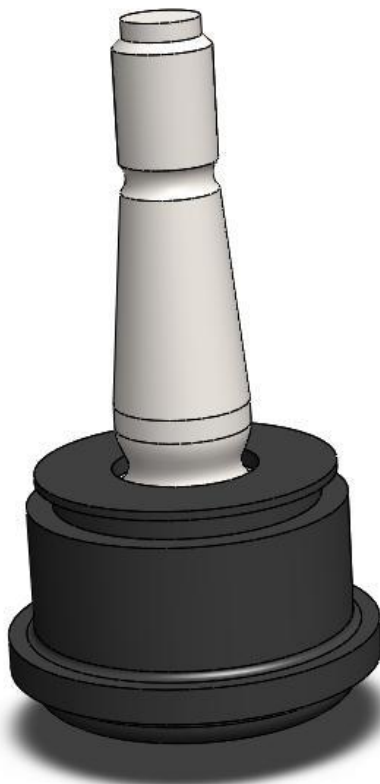
Οι σφαιρικοί σύνδεσμοι αποτελούνται εν γένει από τη σφαίρα που φέρει στο άκρο της το σπείρωμα, από την υποδοχή της, από κάποιες επενδύσεις εντός της υποδοχής, από ένα ρυθμιστικό ελατήριο και από το περικόχλιο. Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε μία απλοποιημένη αλλά πλήρως λειτουργική εκδοχή τους. Ο σύνδεσμος αποτελείται από το εσωτερικό τμήμα και από την υποδοχή του. Στο Assembly, τα δύο Parts συνδέονται ομόκεντρα. Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνεται ο σύνδεσμος καθώς και η σύνδεση των Uprights και των A-Arms που επιτυγχάνεται μέσω αυτών:



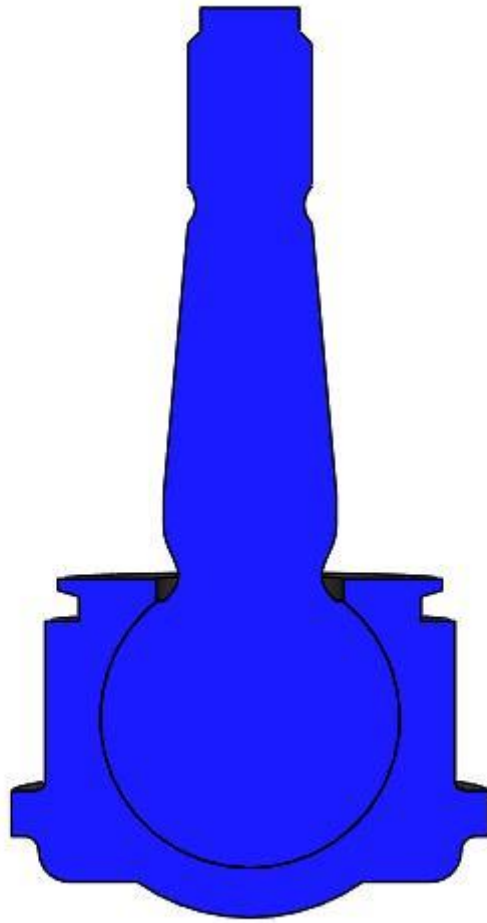
Σχήμα 5.25: Σφαιρικός σύνδεσμος (εσωτερικό τμήμα)



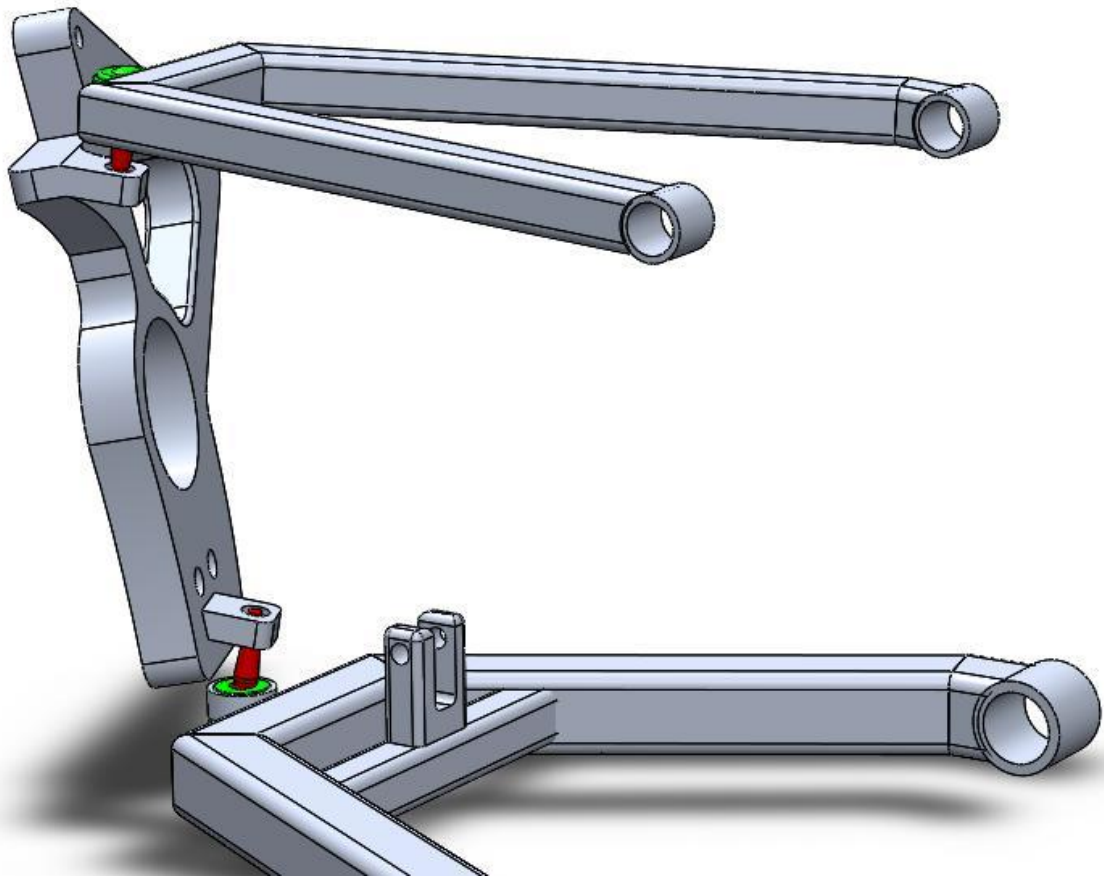
Σχήμα 5.26: Σφαιρικός σύνδεσμος (εξωτερικό τμήμα)



Σχήμα 5.27: Σφαιρικός σύνδεσμος (τριδιάστατη απεικόνιση)

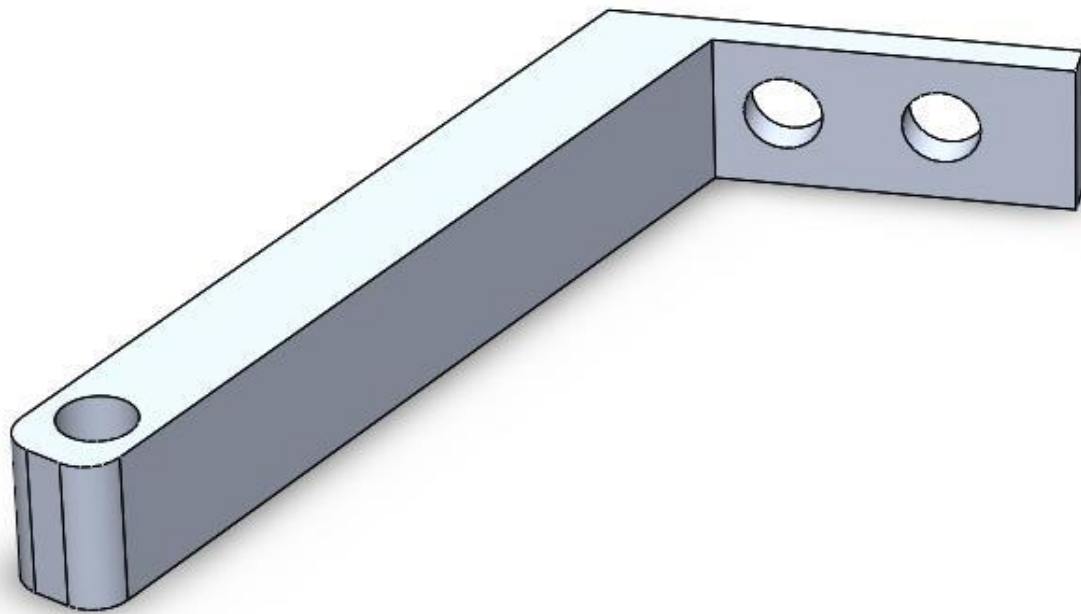


Σχήμα 5.28: Σφαιρικός σύνδεσμος (τομή)

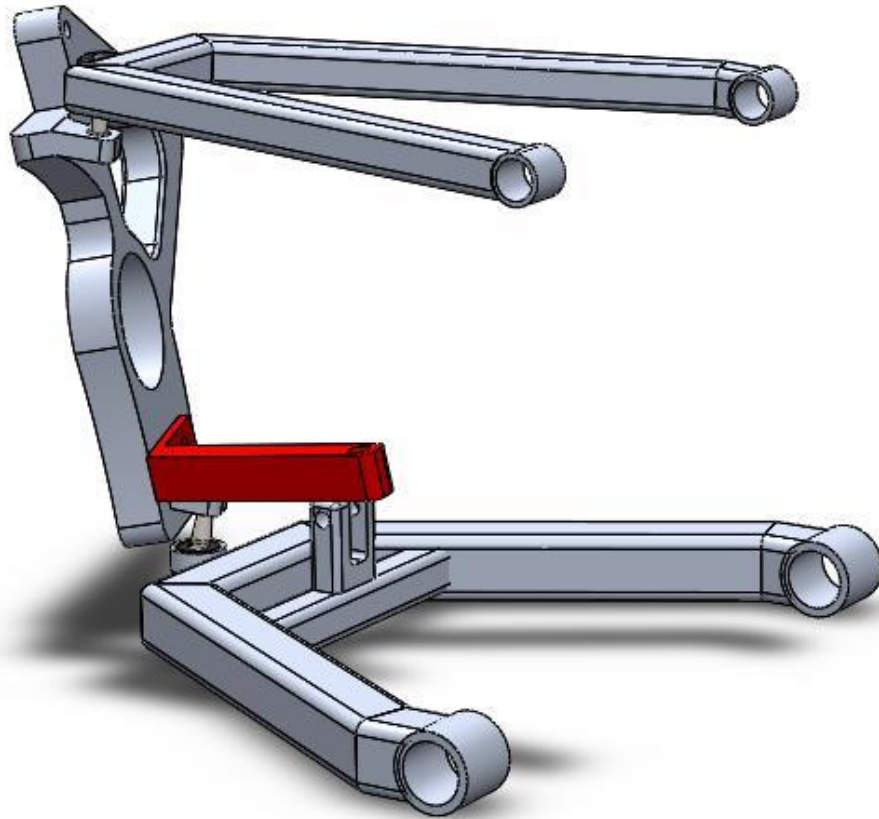


Σχήμα 5.29: Η θέση του άνω και κάτω συνδέσμου στην εμπρός αριστερή ανάρτηση (με κόκκινο και πράσινο χρώμα το εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα αντίστοιχα)

Στη συνέχεια σχεδιάζεται ο βραχίονας στροφής των τροχών (Steering arm). Πρόκειται για το τμήμα που συνδέει το Upright με τη ράβδο που είναι συνδεδεμένη με τον ατέρμονα (Tie rod), Ο βραχίονας, καθώς και η θέση αυτού, φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Σχήμα 5.30: Steering Arm της εμπρός αριστερής ανάρτησης

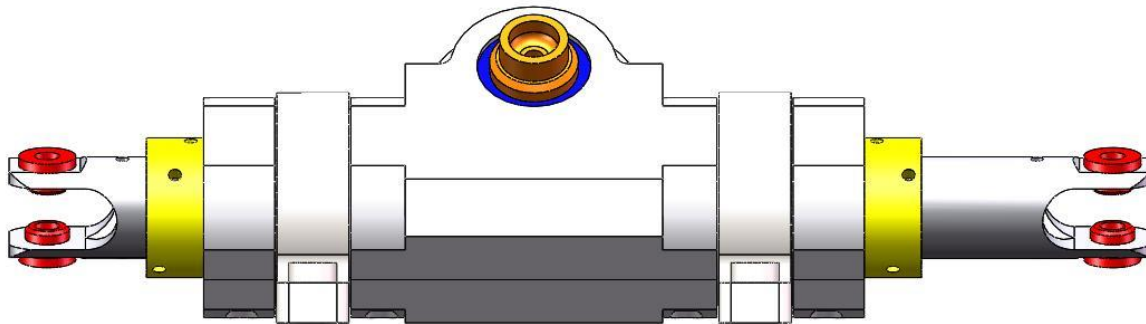


Σχήμα 5.31: Η θέση του Steering Arm στην εμπρός αριστερή ανάρτηση (με κόκκινο χρώμα)

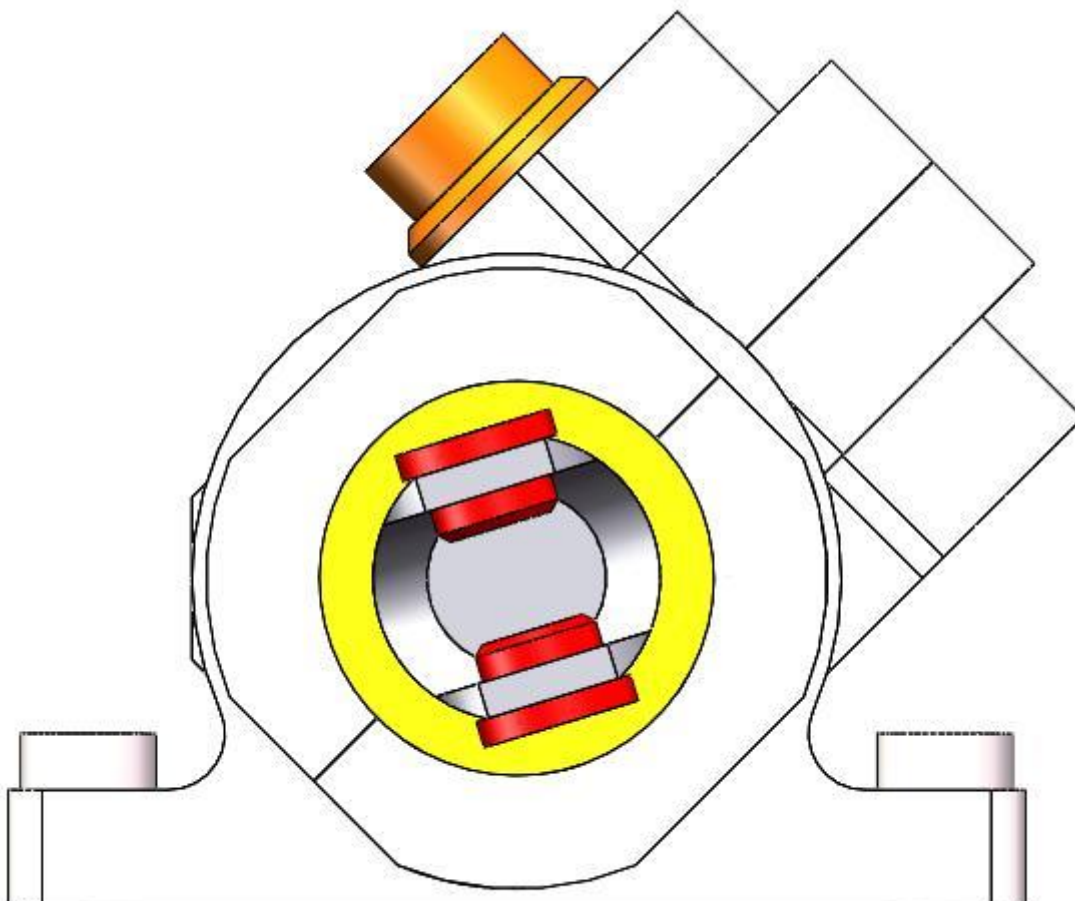
5.5 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΚΡΕΜΑΓΙΕΡΑΣ

Μετά τη σχεδίαση και τοποθέτηση των εμπρός ψαλιδιών ακολουθεί η σχεδίαση της κρεμαγιέρας και η τοποθέτησή της στο πλαίσιο. Σχεδιάζονται τα επιμέρους τμήματά της – ο ατέρμων κοχλίας, το "Pinion" και διάφορα συνοδευτικά εξαρτήματα - και εν συνεχεία το τελικό Assembly. Επιπλέον σχεδιάζεται μία εγκάρσια δοκός στο πλαίσιο όπου θα στερεωθεί το κάλυμμα της κρεμαγιέρας. Επισημαίνεται πως η κρεμαγιέρα τοποθετείται σε επίπεδο εγκάρσιο προς το πλαίσιο, όσο το δυνατόν πιο κοντά από το επίπεδο που τοποθετήθηκαν οι εμπρός τροχοί κατά την προκαταρκτική σχεδίαση.

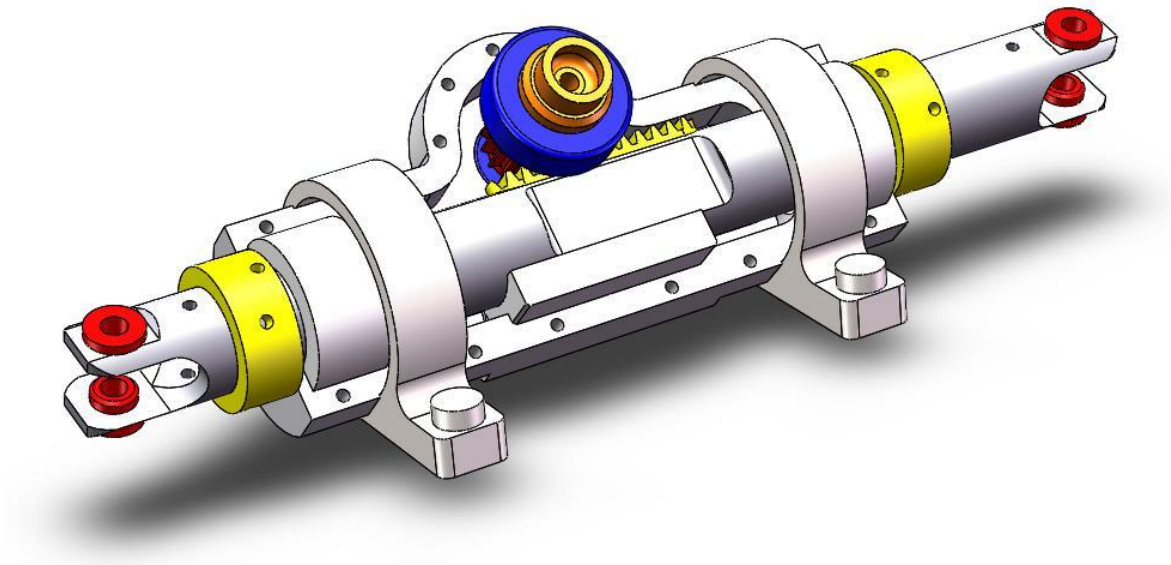
Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνονται η κρεμαγιέρα, τα επιμέρους τμήματά της, καθώς και η θέση της στο όχημα:



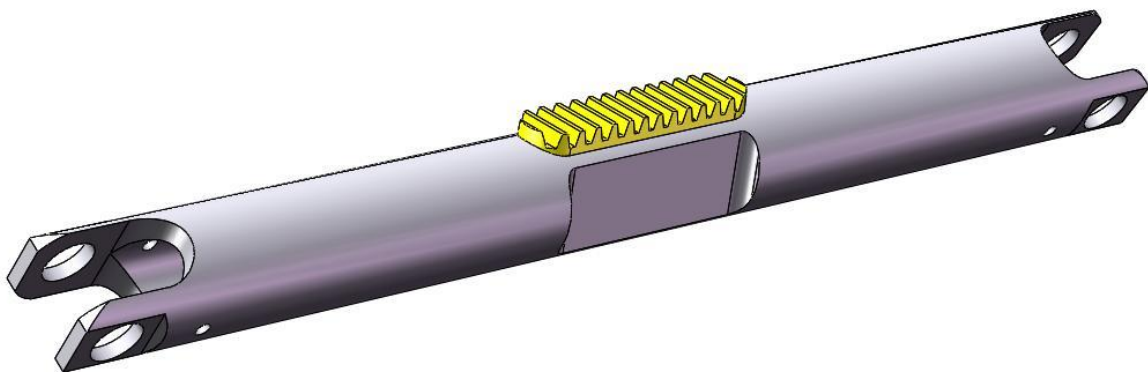
Σχήμα 5.32: Κρεμαγιέρα (Πρόοψη από τη θέση του οδηγού)



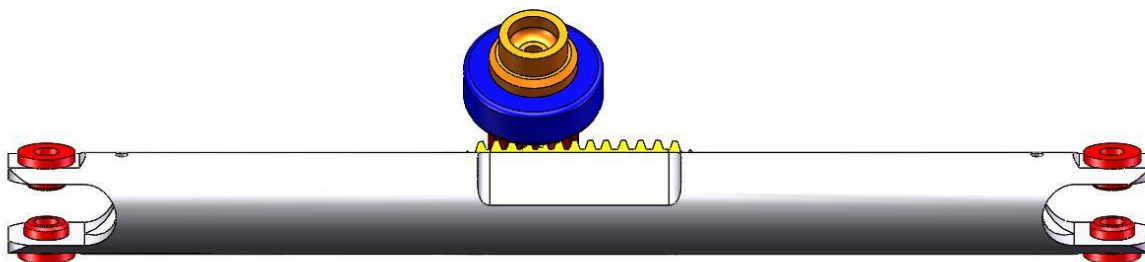
Σχήμα 5.33: Κρεμαγιέρα (Πλάγια δεξιά όψη)



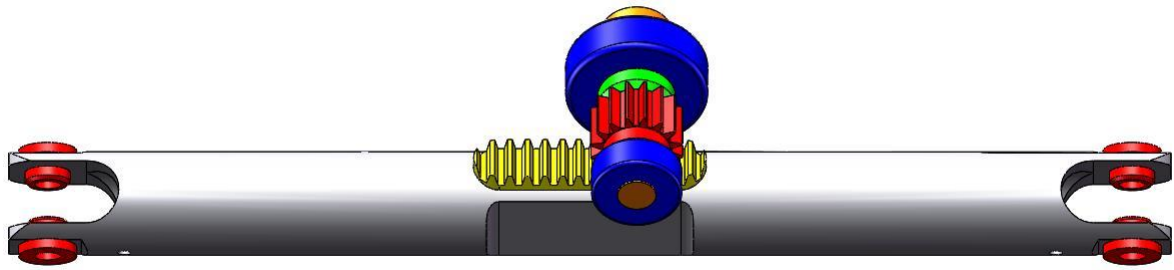
Σχήμα 5.34: Κρεμαγιέρα (Τρισδιάστατη όψη από τη θέση του οδηγού)



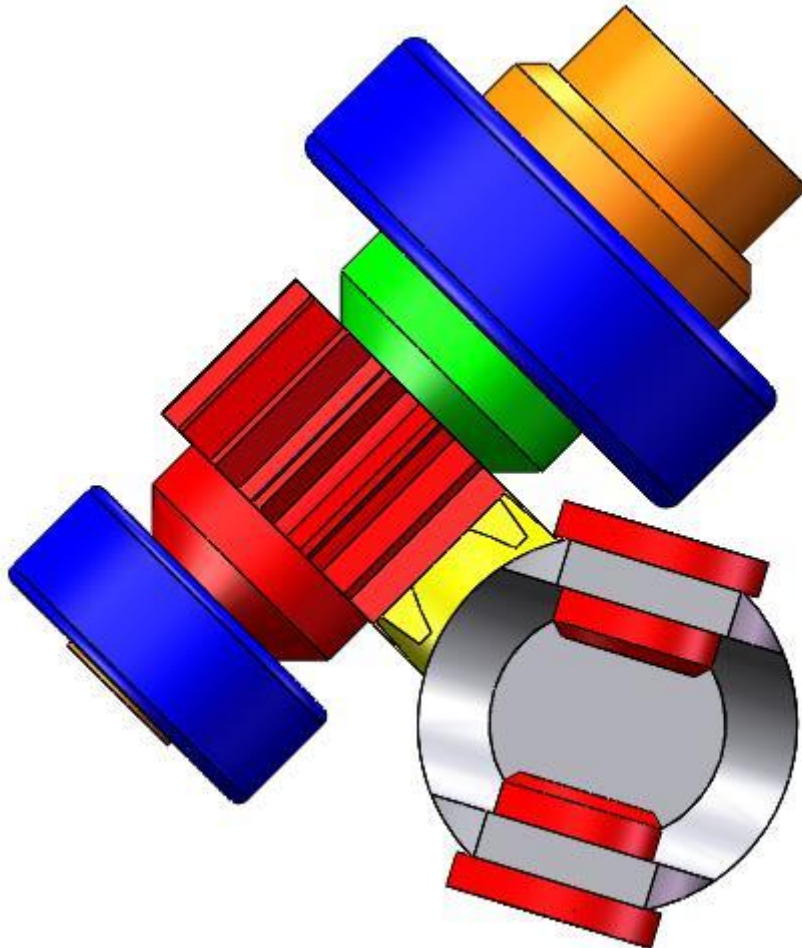
Σχήμα 5.35: Ατέρμων κοχλίας



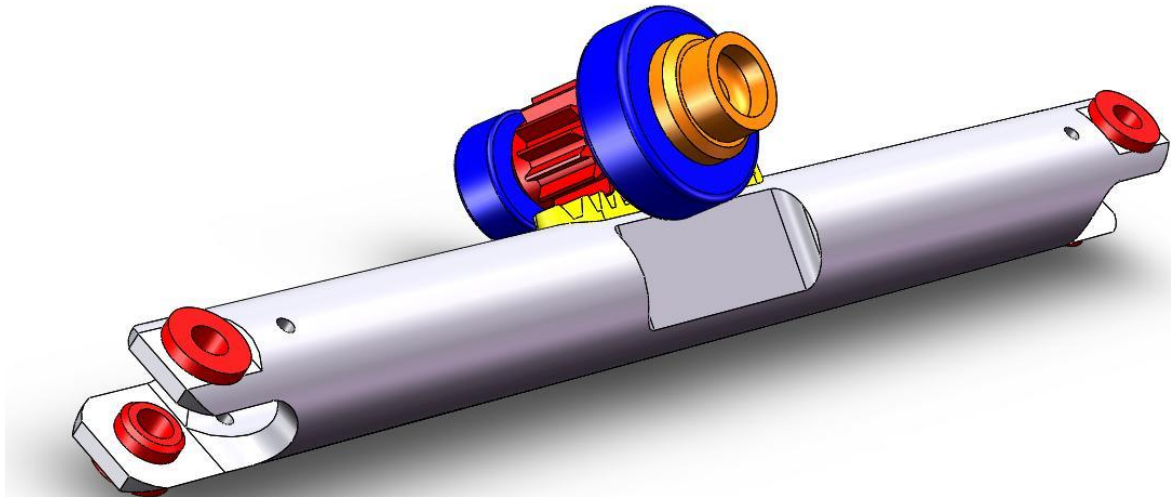
Σχήμα 5.36: Ατέρμων κοχλίας και Pinion (Πρόοψη)



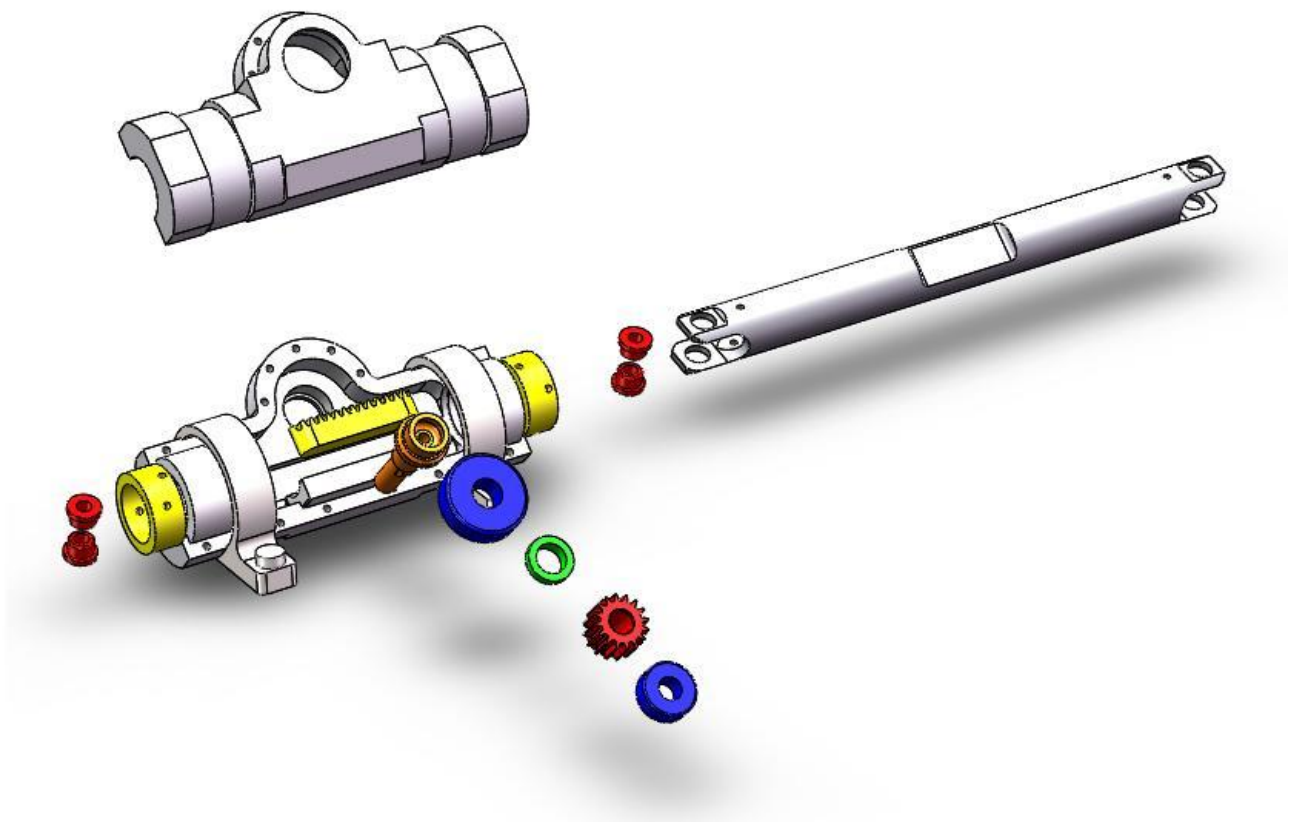
Σχήμα 5.37: Ατέρμων κοιλίας και Pinion (Πίσω όψη)



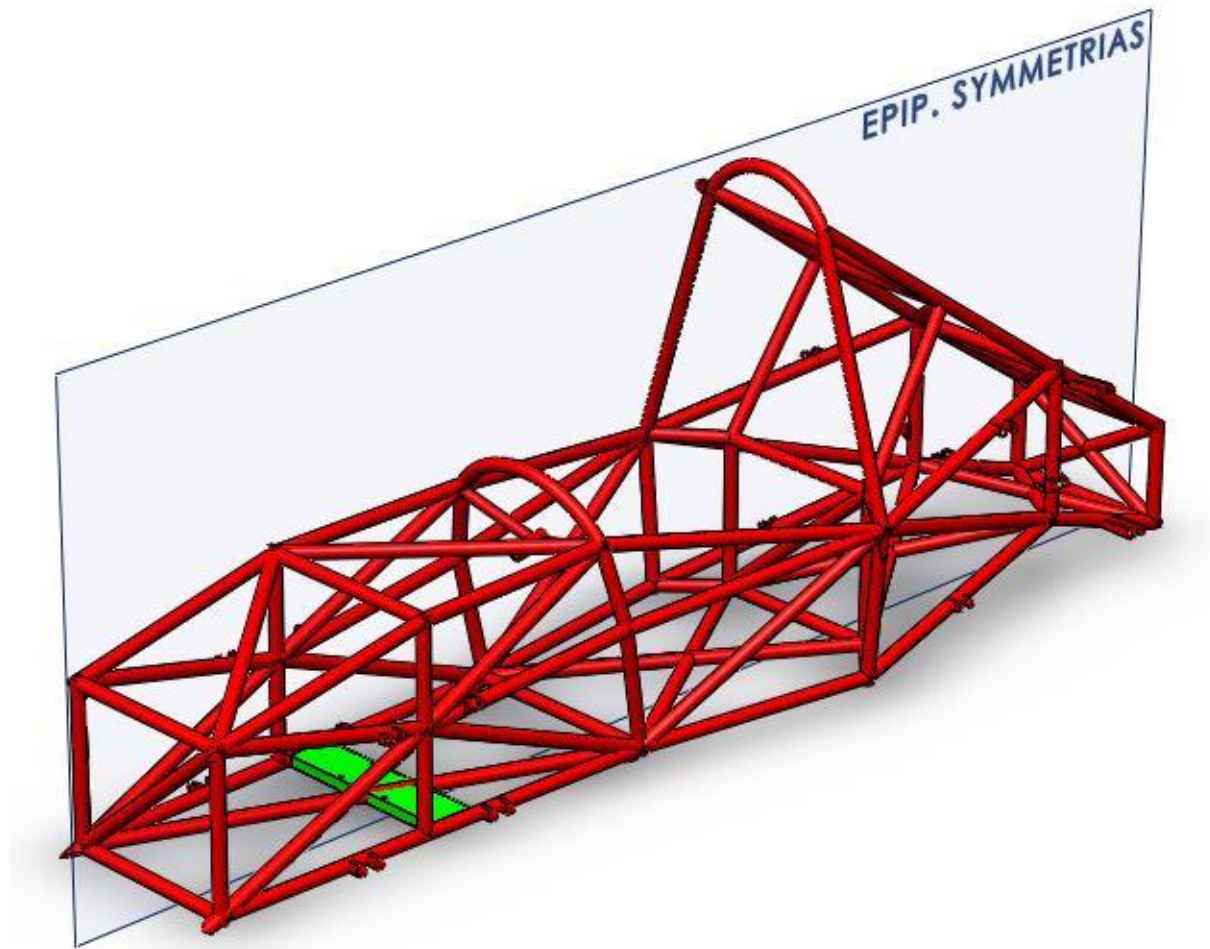
Σχήμα 5.38: Ατέρμων κοιλίας και Pinion (Πλάγια αριστερή όψη)



Σχήμα 5.39: Ατέρμων κοχλίας και Pinion (Τρισδιάστατη όψη)



Σχήμα 5.40: Η κρεμαγιέρα και τα επιμέρους τμήματά της (Exploded View)



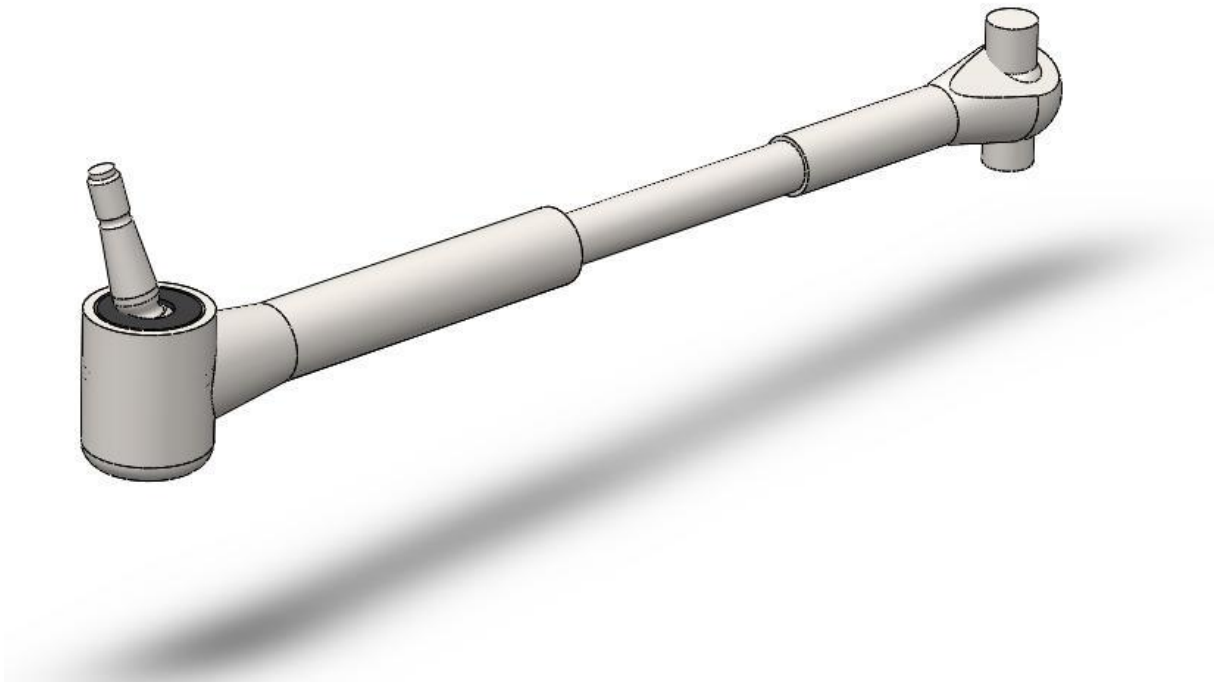
Σχήμα 5.41: Η εγκάρσια δοκός στήριξης της κρεμαγιέρας (Με πράσινο χρώμα)

5.6 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΑΡΙΣΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑΣ "TIE ROD"

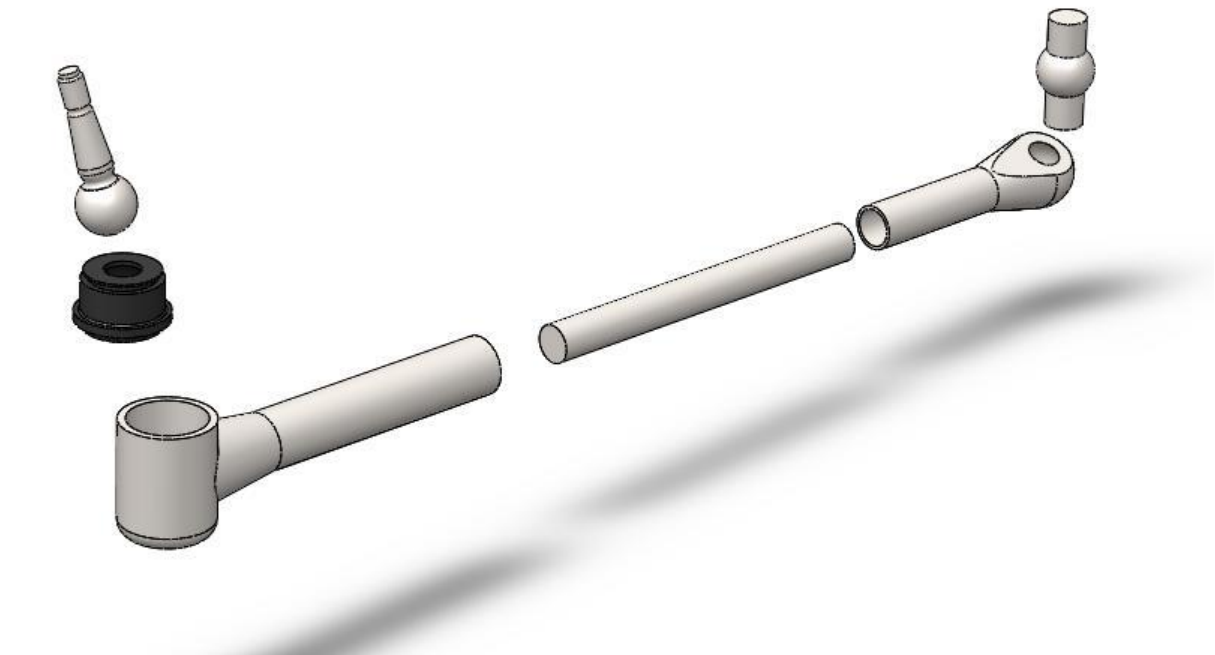
Με το πλαίσιο, τα ψαλίδια, την κρεμαγιέρα, τους βραχίονες στροφής και τα Uprights στη θέση τους, σχεδιάζονται και τοποθετούνται οι ράβδοι που συνδέουν τον ατέρμονα κοχλία της κρεμαγιέρας με τους βραχίονες στροφής των Uprights (Tie Rods).

Η ράβδος αποτελείται από τρία μέρη. Το εσωτερικό που φέρει ένα σφαιρικό σύνδεσμο για τη σύνδεση με το ένα άκρο του ατέρμονα, το εξωτερικό που φέρει ένα σφαιρικό σύνδεσμο για τη σύνδεση με το βραχίονα στροφής και το κεντρικό που τα συνδέει.

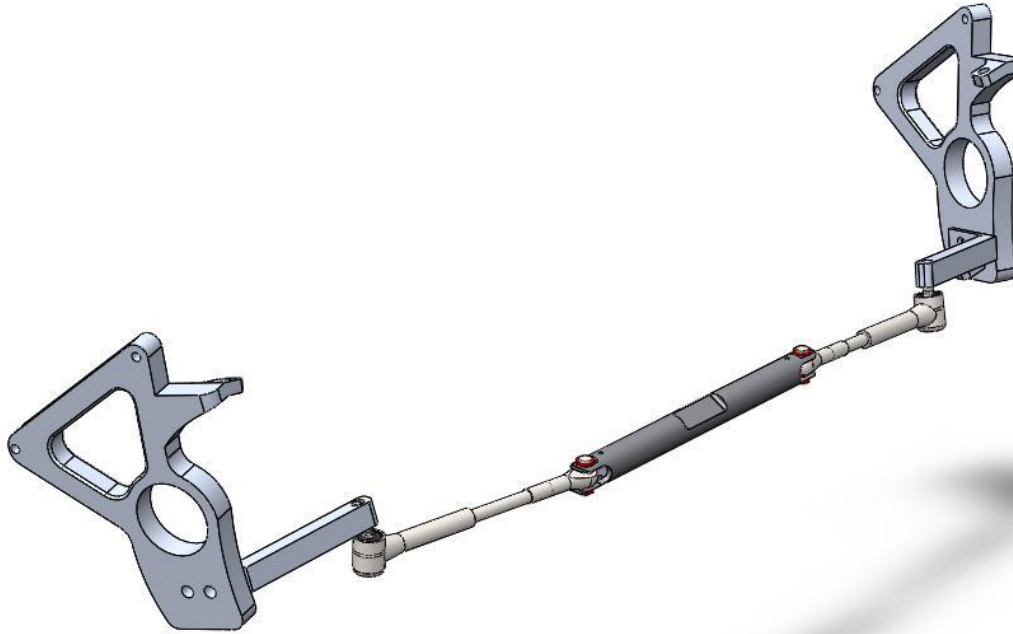
Η γεωμετρία και η θέση των παραπάνω εξαρτημάτων φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες:



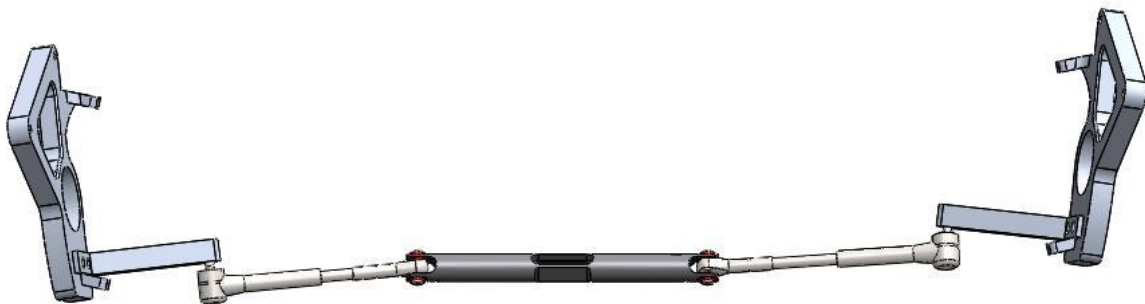
Σχήμα 5.42: Η αριστερή (όπως φαίνεται από τη θέση του οδηγού) "Tie Rod"



Σχήμα 5.43: Τα επιμέρους τμήματα της αριστερής (όπως φαίνεται από τη θέση του οδηγού) "Tie Rod". Από αριστερά προς τα δεξιά: Εξωτερικό τμήμα και εξωτερικό Balljoint, κεντρικό τμήμα εσωτερικό τμήμα και εσωτερικό Balljoint



Σχήμα 5.44: Η σύνδεση της αριστερής και δεξιάς "Tie Rod" με το αντίστοιχο άκρο του ατέρμονα και τον αντίστοιχο βραχίονα στροφής, όπως φαίνονται από τη θέση του οδηγού (Τρισδιάστατη απεικόνιση)



Σχήμα 5.45: Η σύνδεση της αριστερής και δεξιάς "Tie Rod" με το αντίστοιχο άκρο του ατέρμονα και τον αντίστοιχο βραχίονα στροφής, όπως φαίνονται από τη θέση του οδηγού (Πρόοψη)

5.7 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΩΝ

Ακολουθεί η σχεδίαση των δύο ράβδων ("κολώνες") που μεταφέρουν την κίνηση από το Pinion της κρεμαγιέρας στο τιμόνι. Το σύστημα συνίσταται από την άνω ράβδο, την κάτω ράβδο, το σύνδεσμό τους (σταυροειδής σύνδεσμος), τις συγκολλημένες δοκούς στήριξης της άνω ράβδου στο πλαίσιο και το τιμόνι.

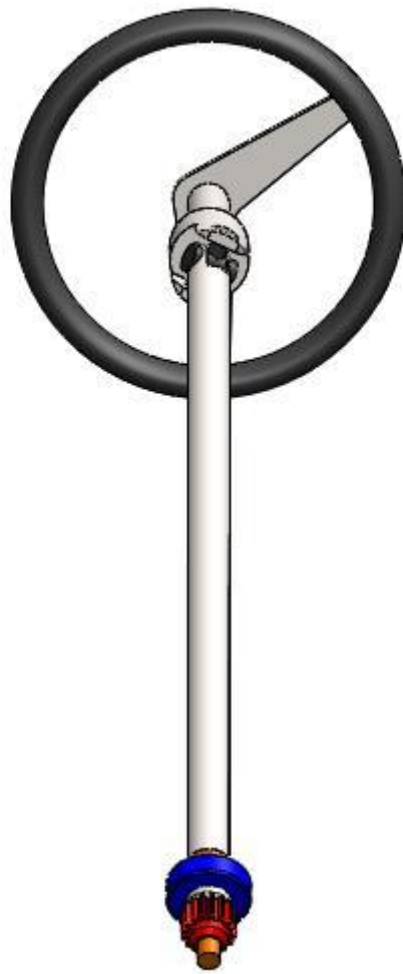
Η γεωμετρία και η θέση των παραπάνω εξαρτημάτων φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες:



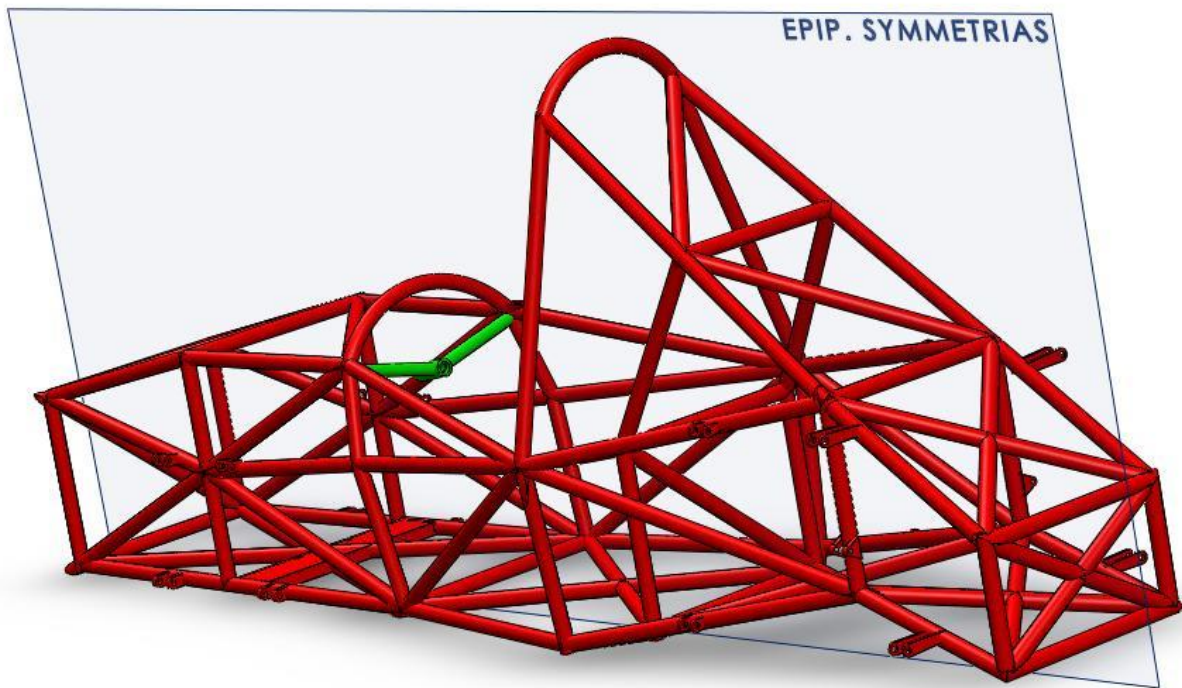
Σχήμα 5.46: Χειριστήριο του συστήματος διεύθυνσης. Από αριστερά προς τα δεξιά: Pinion, κάτω ράβδος, σταυροειδής σύνδεσμος, άνω ράβδος και τιμόνι



Σχήμα 5.47: Χειριστήριο του συστήματος διεύθυνσης (Πλάγια όψη)



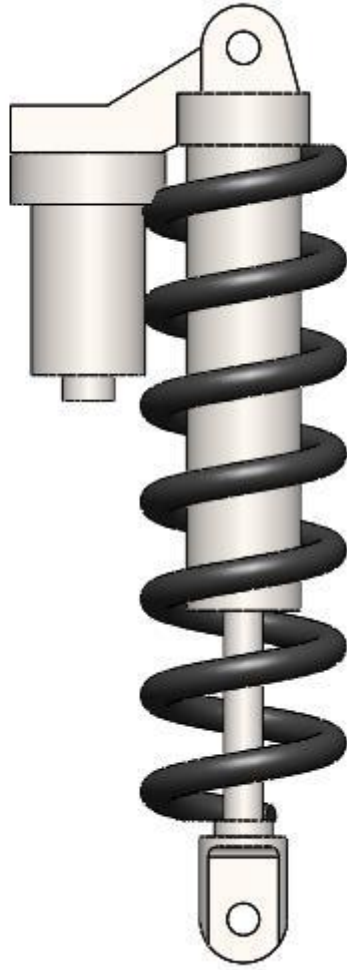
Σχήμα 5.48: Χειριστήριο του συστήματος διεύθυνσης (Πρόοψη)



Σχήμα 5.49: Στήριγμα της άνω ράβδου του συστήματος διεύθυνσης (με πράσινο χρώμα)

5.8 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΕΜΠΡΟΣ ΚΑΙ ΠΙΣΩ ΖΕΥΓΟΥΣ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ-ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ

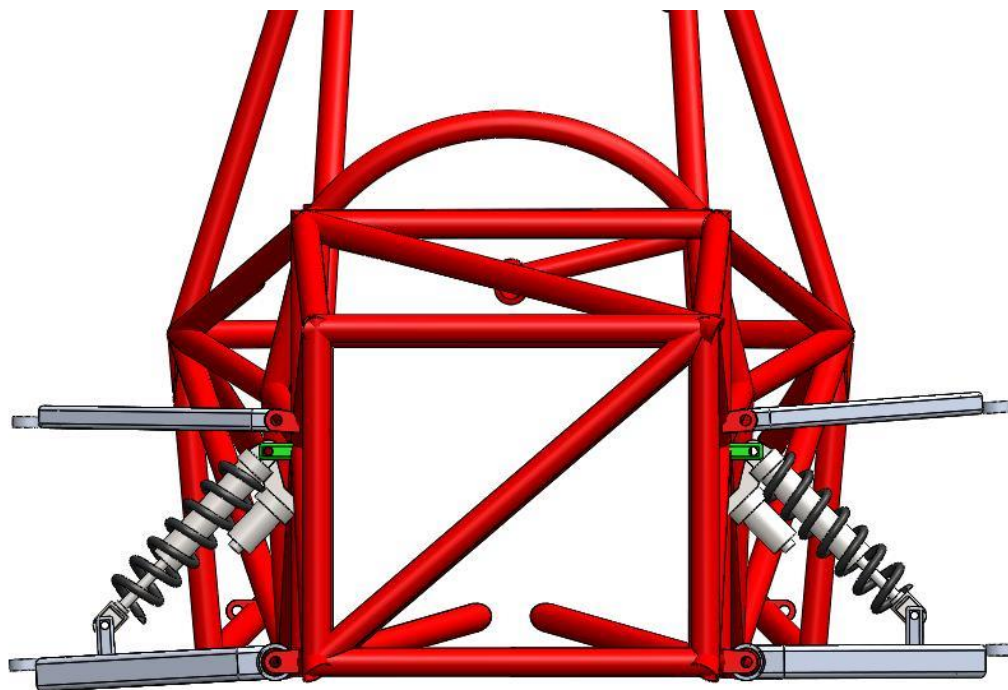
Ακολουθεί η σχεδίαση του ελατηρίου και του αποσβεστήρα καθώς και των δύο εμπρός Brackets του πλαισίου (ένα για κάθε πλευρά του οχήματος) όπου στερεώνεται το άνω άκρο του ζεύγους. Τα δύο εξαρτήματα σχεδιάζονται και τοποθετούνται στο τελικό Assembly, όπως φαίνεται και στις ακόλουθες εικόνες:



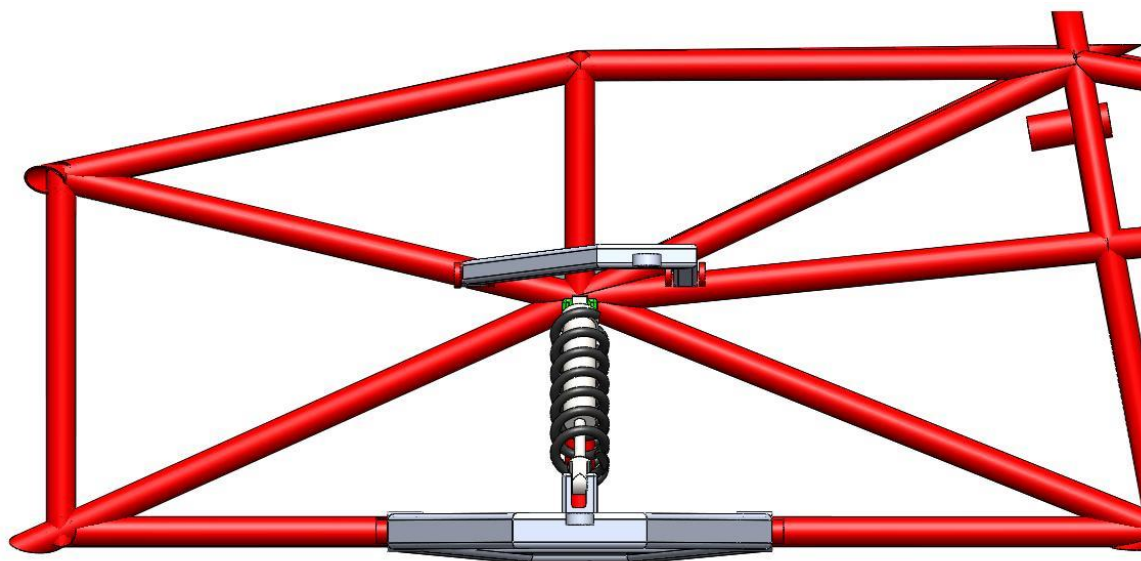
Σχήμα 5.50: Ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα (Πρόοψη)



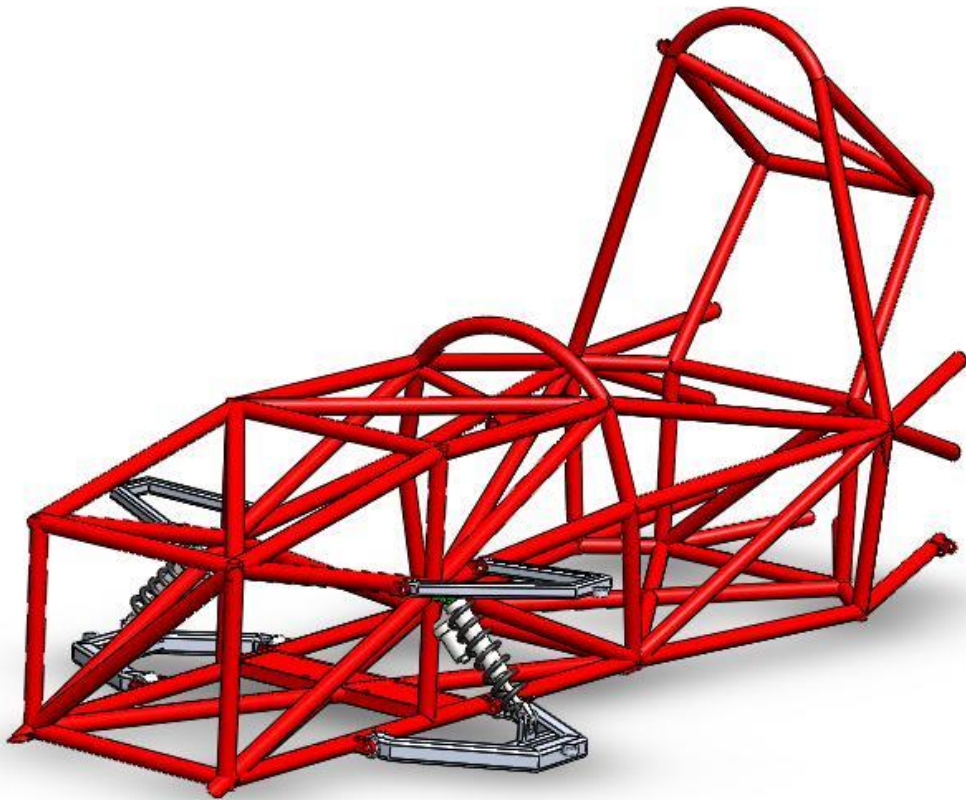
Σχήμα 5.51: Ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα. Από πάνω προς τα κάτω: Άνω τμήμα αποσβεστήρα, ελατήριο, κάτω τμήμα αποσβεστήρα



Σχήμα 5.52: Τα δύο εμπρός ζεύγη ελατηρίου-αποσβεστήρα και τα δύο Brackets σύνδεσης με το πλαίσιο (με πράσινο χρώμα) (Πρόοψη)

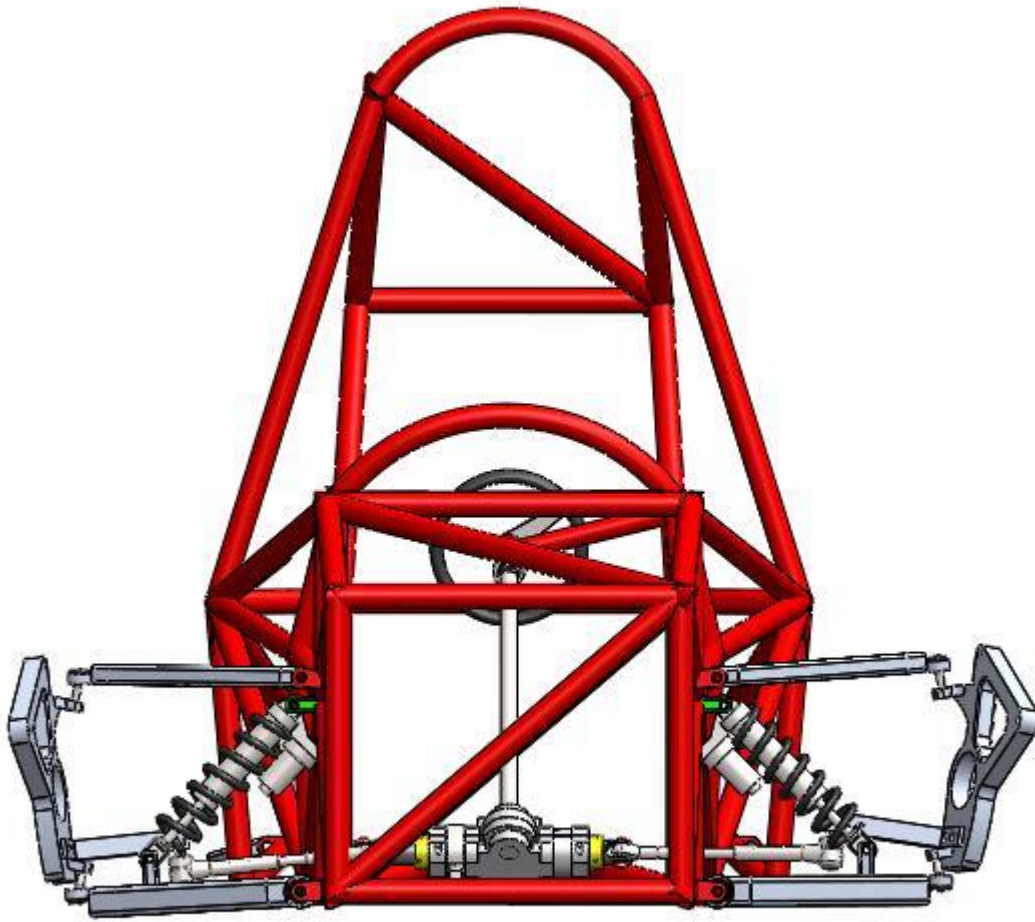


Σχήμα 5.53: Τα δύο εμπρός ζεύγη ελατηρίου-αποσβεστήρα και τα δύο Brackets σύνδεσης με το πλαίσιο (με πράσινο χρώμα) (Πλάγια όψη)

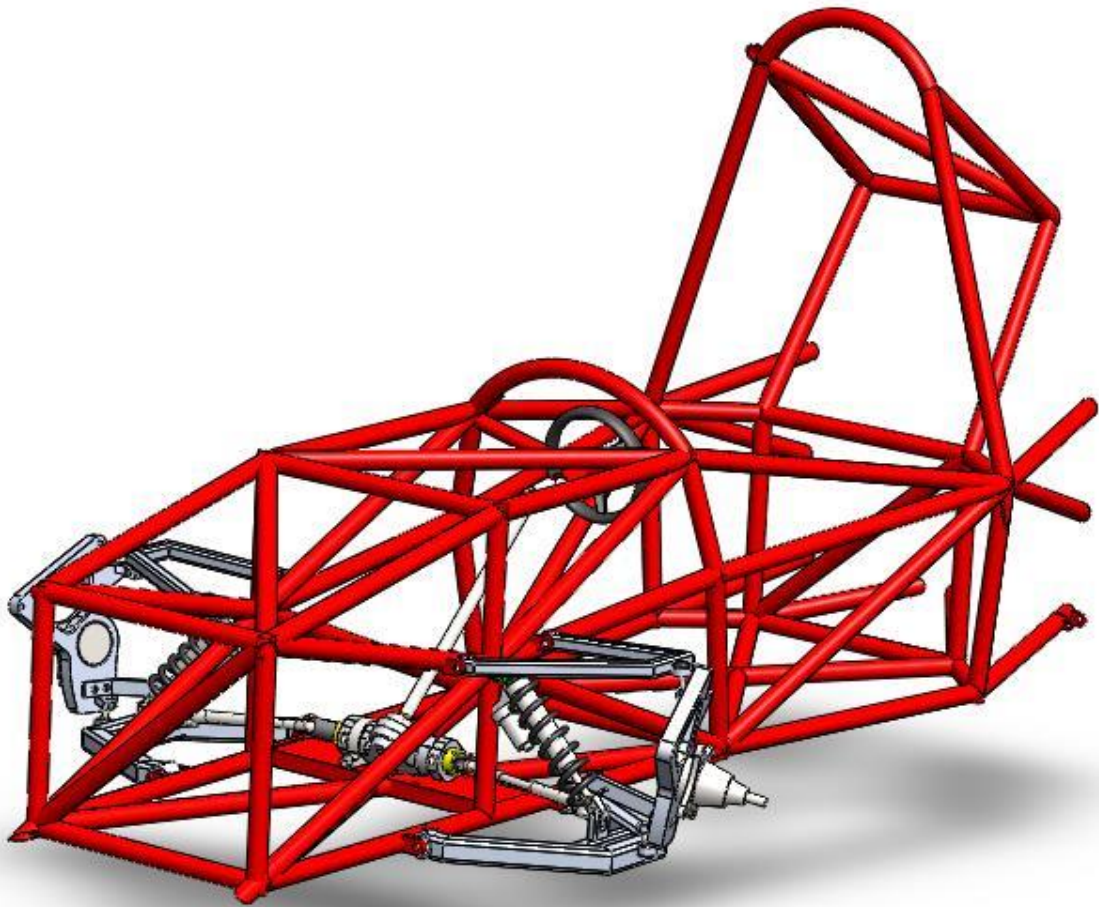


Σχήμα 5.54: Τα δύο εμπρός ζεύγη ελατηρίου-αποσβεστήρα και τα δύο Brackets σύνδεσης με το πλαίσιο (με πράσινο χρώμα) (Τρισδιάστατη όψη)

Στις ακόλουθες δύο εικόνες φαίνεται το πλήρες σύστημα διεύθυνσης και η εμπρός ανάρτηση:



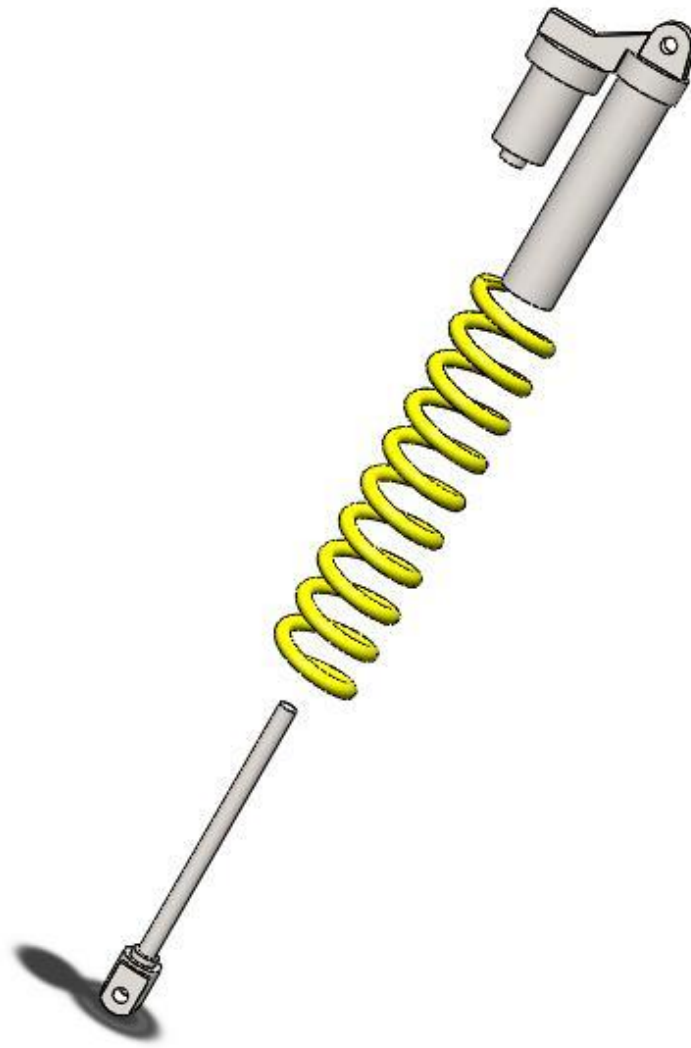
Σχήμα 5.55: Σύστημα διεύθυνσης και η εμπρός ανάρτηση (Πρόοψη)



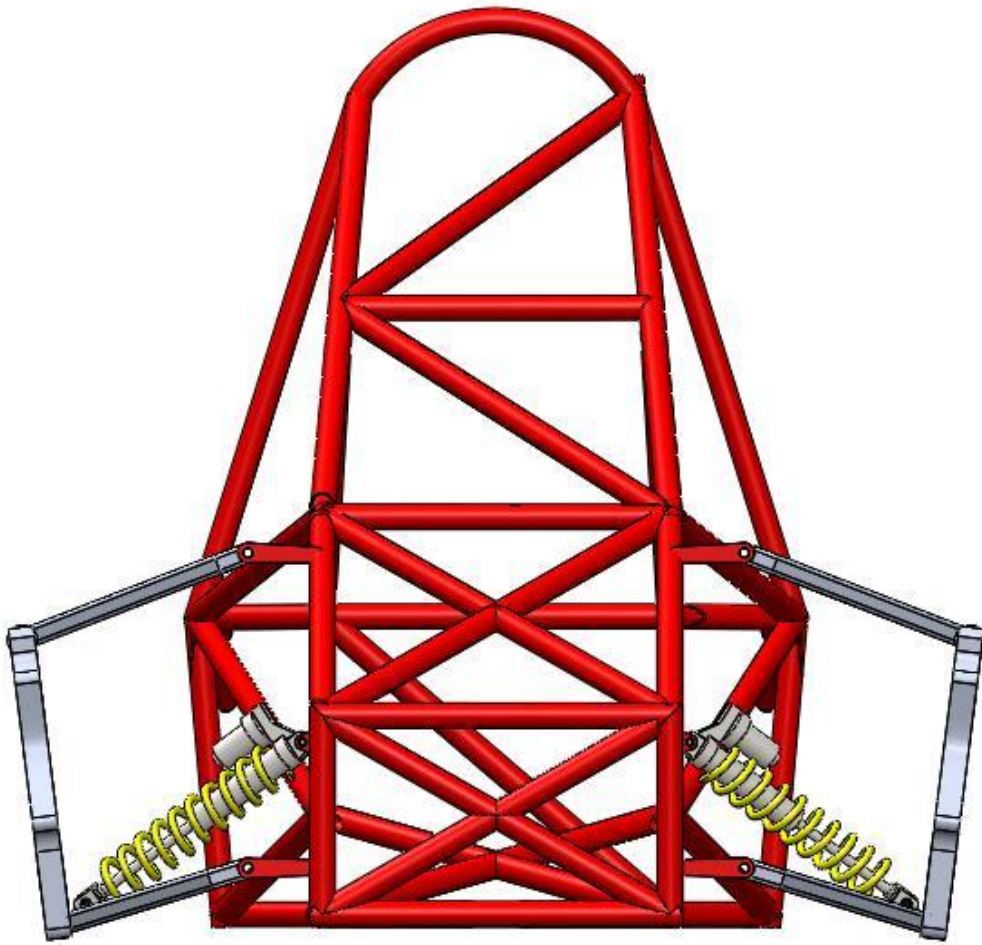
Σχήμα 5.56: Σύστημα διεύθυνσης και η εμπρός ανάρτηση (Τρισδιάστατη όψη)

Το πίσω ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα είναι πανομοιότυπο με το εμπρός, όμως το κάτω τμήμα του αποσβεστήρα και το ελατήριο έχουν μεγαλύτερο μήκος. Επιπλέον τα πίσω Brackets του πλαισίου φέρουν σφαιρικό σύνδεσμο – όπως άλλωστε και τα πίσω κάτω ψαλίδια – καθώς το ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα βρίσκεται σε διαφορετικό επίπεδο με τα Brackets.

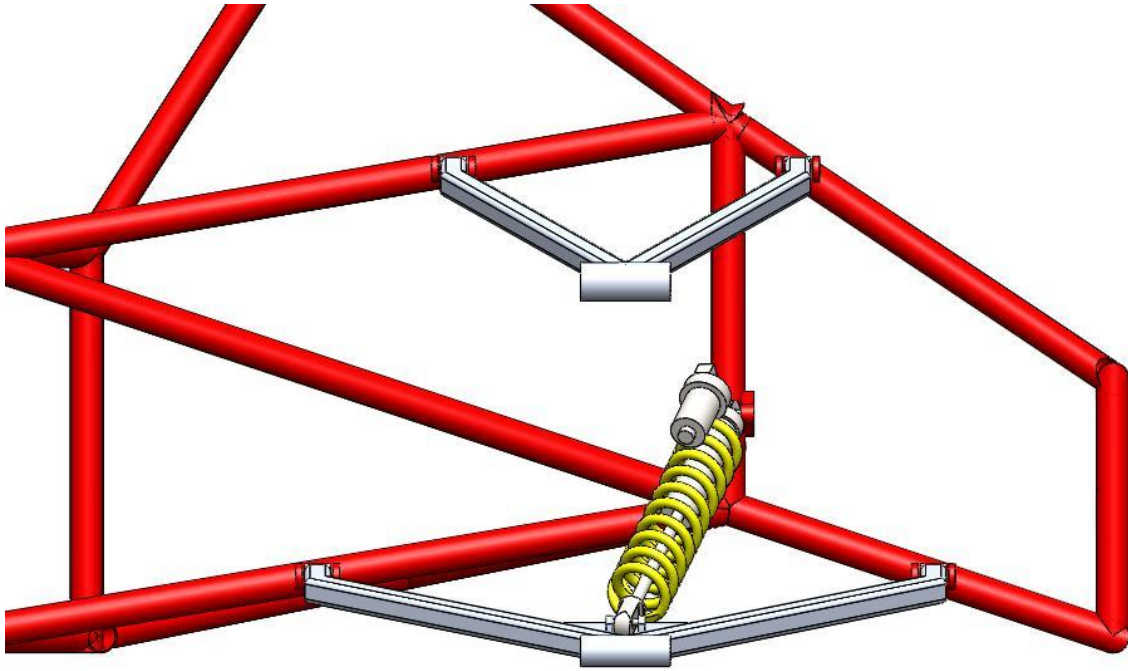
Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνεται το πίσω ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα, καθώς και η θέση τους στην πίσω ανάρτηση:



Σχήμα 5.57: Πίσω ζεύγος ελατηρίου-αποσβεστήρα



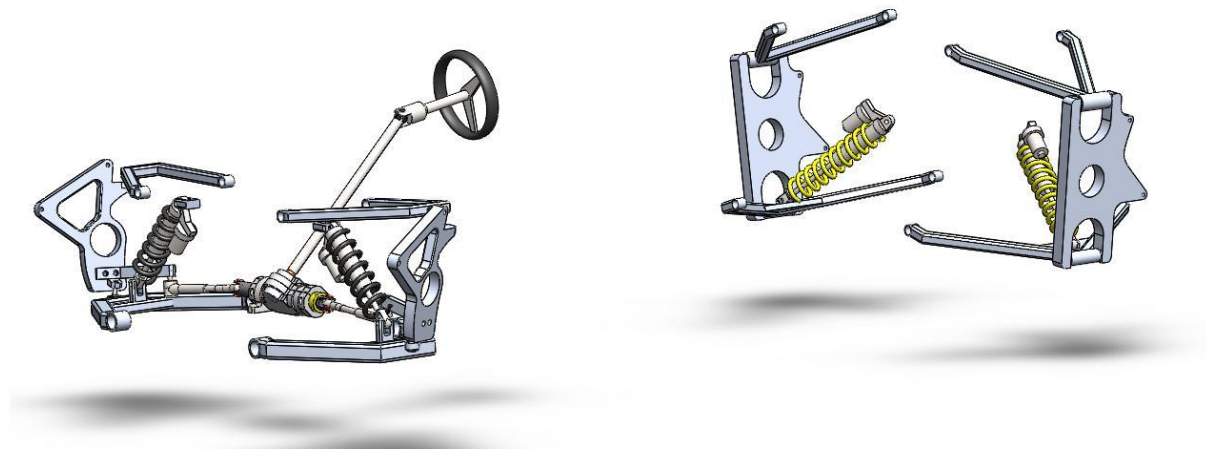
Σχήμα 5.58: Η πίσω ανάρτηση (Πίσω όψη)



Σχήμα 5.59: Η πίσω ανάρτηση (Πλάγια όψη)

5.9 ΣΥΝΟΨΗ

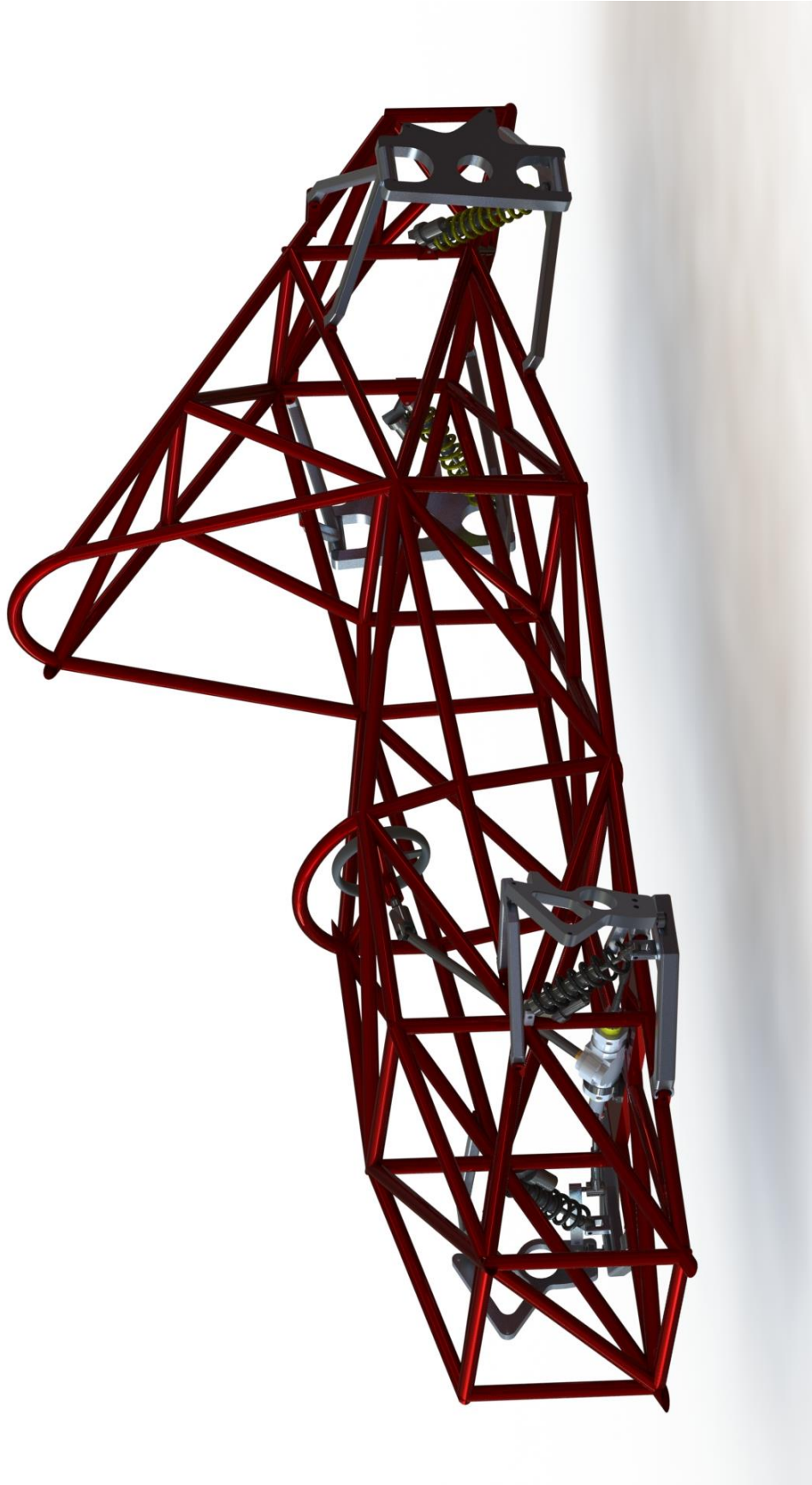
Με τη σχεδίαση της πίσω ανάρτησης τελειώνει πρακτικά η σχεδίαση του συστήματος ανάρτησης. Στις ακόλουθες εικόνες διακρίνεται το σύστημα ανάρτησης και το σύστημα διεύθυνσης του οχήματος, καθώς και η θέση τους στο όχημα:



Σχήμα 5.60: Το σύστημα ανάρτησης και το σύστημα διεύθυνσης του οχήματος



Σχήμα 5.61: Φωτορεαλιστική απεικόνιση (Rendered) του συστήματος ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης του οχήματος



Σχήμα 5.62: Φωτορεαλιστική απεικόνιση (Rendered) του πλαισίου, του συστήματος ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης του οχήματος

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CAD

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με το πέρας της σχεδίασης του οχήματος, εξάγονται κάποια σημαντικά συμπεράσματα.

Εν πρώτης, η χρήση των σύγχρονων λογισμικών παραμετρικής ψηφιακής σχεδίασης επιτρέπει τον πλήρη και αναλυτικό σχεδιασμό μίας μηχανολογικής κατασκευής με πρακτικά μηδενικό κόστος. Το τρισδιάστατο μοντέλο σχεδιάζεται και ελέγχεται ως προς τη λειτουργικότητά του χωρίς να κατασκευαστεί καν.

Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα διορθώσεων σε μεταγενέστερο χρόνο, τόσο στα επιμέρους τμήματα, όσο και στο Assembly.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της κίνησης των εξαρτημάτων του Assembly μέσω κατάλληλων εργαλείων (Motion study). Ταυτόχρονα υπάρχει η δυνατότητα διάλυσης και επανασύνθεσής του (explode & collapse view) από τα μέρη που το συνιστούν. Μέσω αυτών των διαδικασιών, μπορεί να δημιουργηθούν κινούμενες εικόνες (animation) με μεγάλη ποικιλία επιλογών, δίνοντας στον τελικό ενδιαφερόμενο μία πλήρη και λεπτομερή εικόνα του εσωτερικού και του εξωτερικού της κατασκευής.

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη προγράμματος φωτορεαλισμού στο λογισμικό, παρέχει τη δυνατότητα φωτορεαλιστικής απεικόνισης του μοντέλου. Συνδυασμένη με την παραγωγή κινούμενων εικόνων, αυτή η δυνατότητα δίνει μία απόλυτα ρεαλιστική άποψη του τελικού προϊόντος.

7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

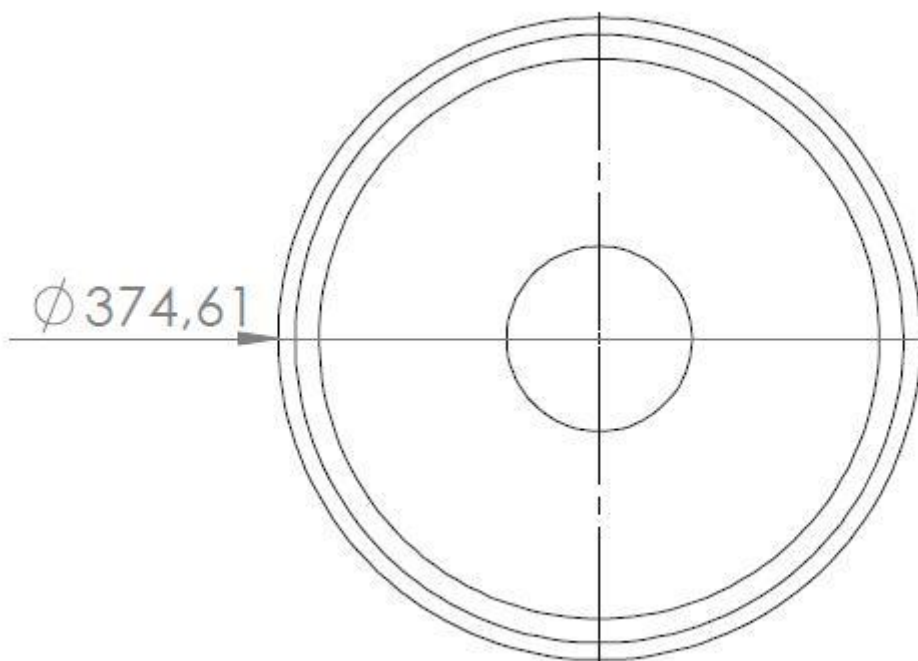
7.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται τα κατασκευαστικά διδιάστατα σχέδια κάποιων εκ των εξαρτημάτων του συστήματος ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης. Οι τιμές των διαστάσεων είναι προσεγγιστικές και αφορούν τα εξαρτήματα που μπορούν να κατασκευαστούν ειδικά για το όχημα. Οι ακριβείς διαστάσεις τους συνεπώς, εξαρτώνται από τα εμπορικά εξαρτήματα που θα τοποθετηθούν, καθώς και από τη συνολική σχεδίαση του οχήματος.

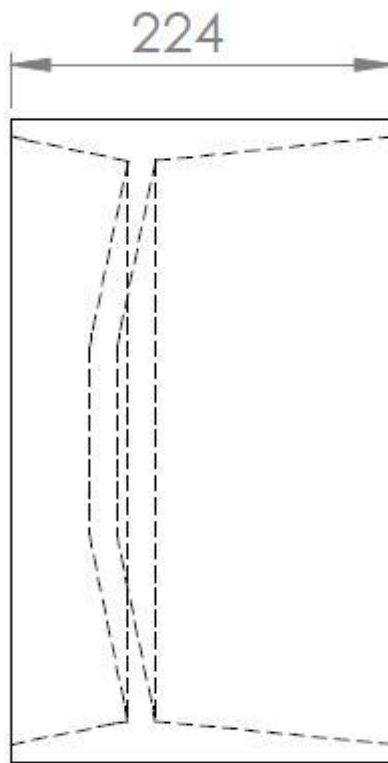
Επιπλέον, παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια κάποιων από τα εξαρτήματα που έχουν βοηθητικό ρόλο στο Assembly και δεν αποτελούν αντικείμενο της εργασίας (πχ τροχοί).

Μαζί με τα κατασκευαστικά σχέδια, προτείνονται και οι μέθοδοι κατασκευής των αντίστοιχων εξαρτημάτων.

Τροχοί

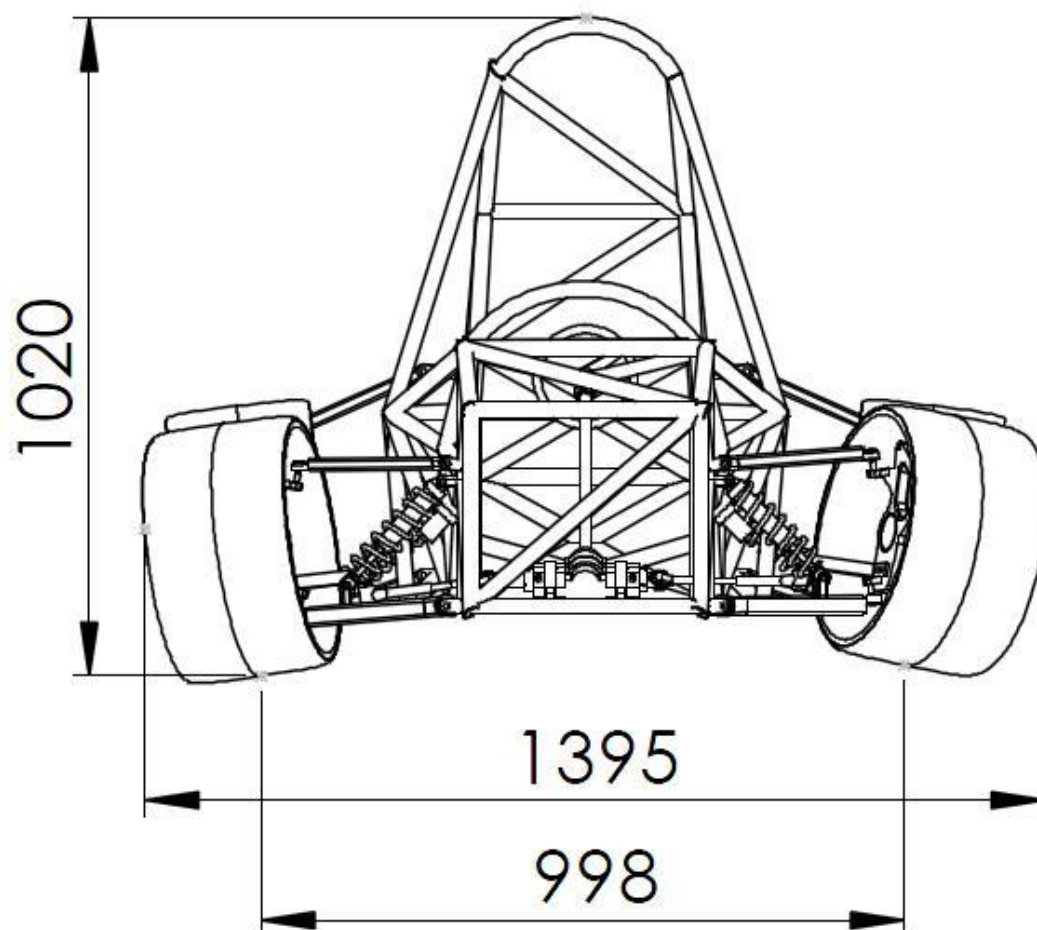


Σχήμα 7.1: Τροχός (πλάγια όψη)

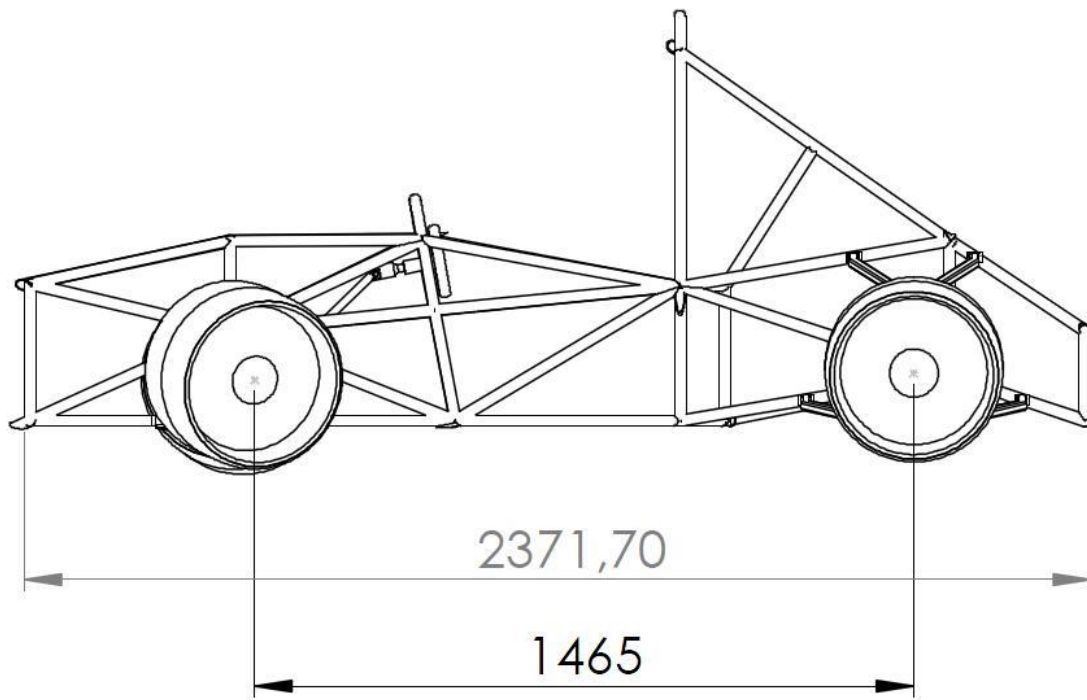


Σχήμα 7.2: Τροχός (πρόοψη)

Συνολικό όχημα

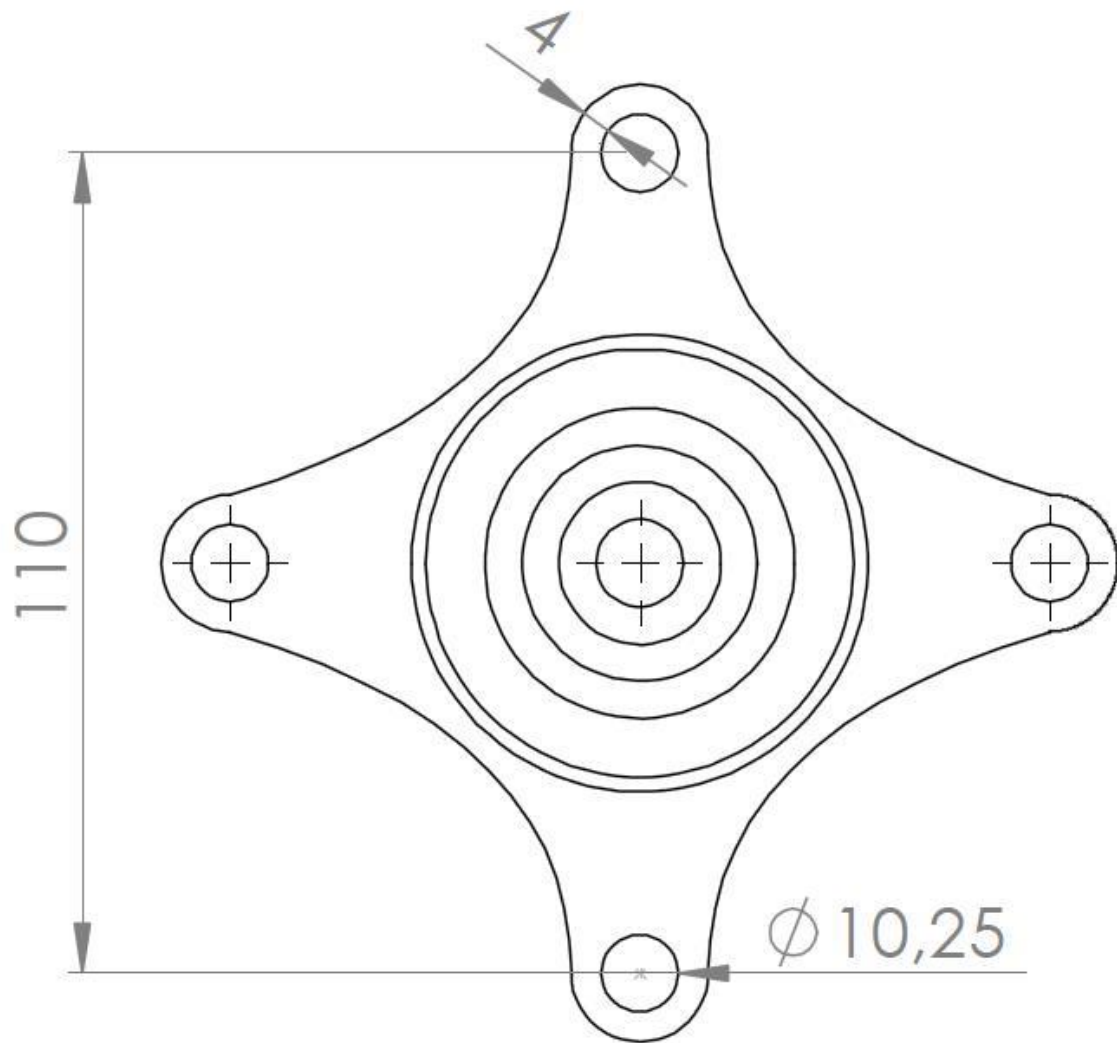


Σχήμα 7.3: Συνολικό όχημα (πρόοψη)

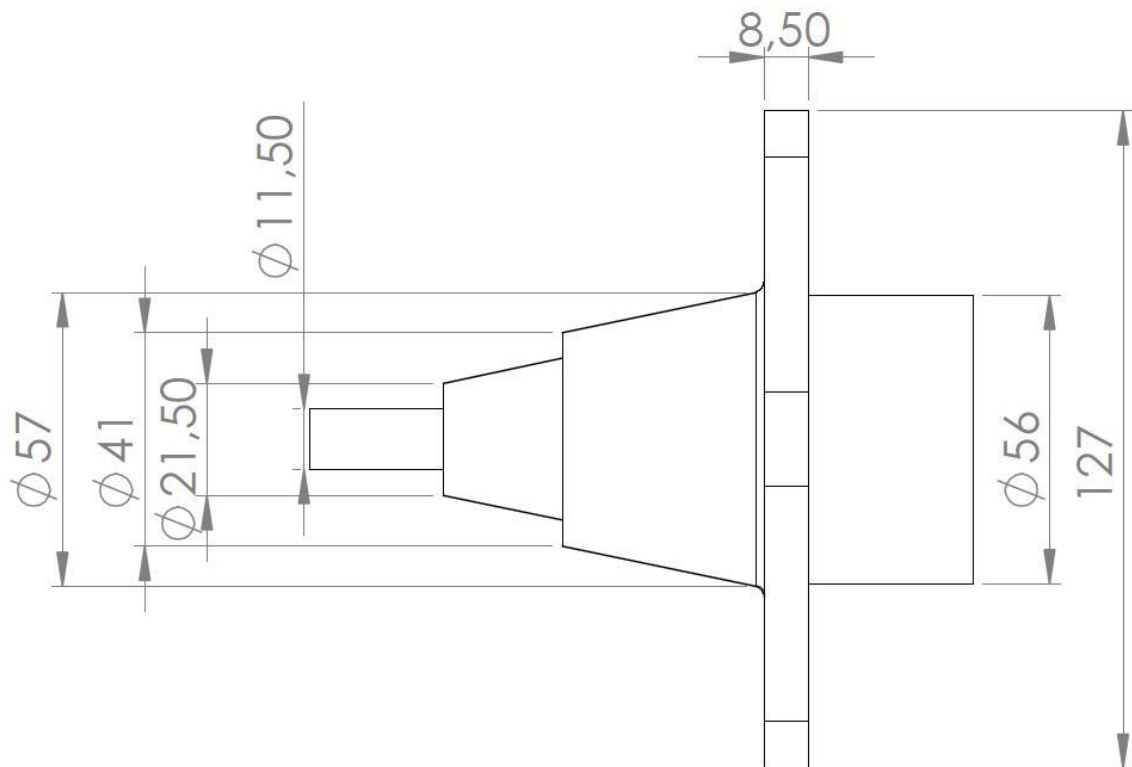


Σχήμα 7.4: Συνολικό όχημα (πλάγια όψη)

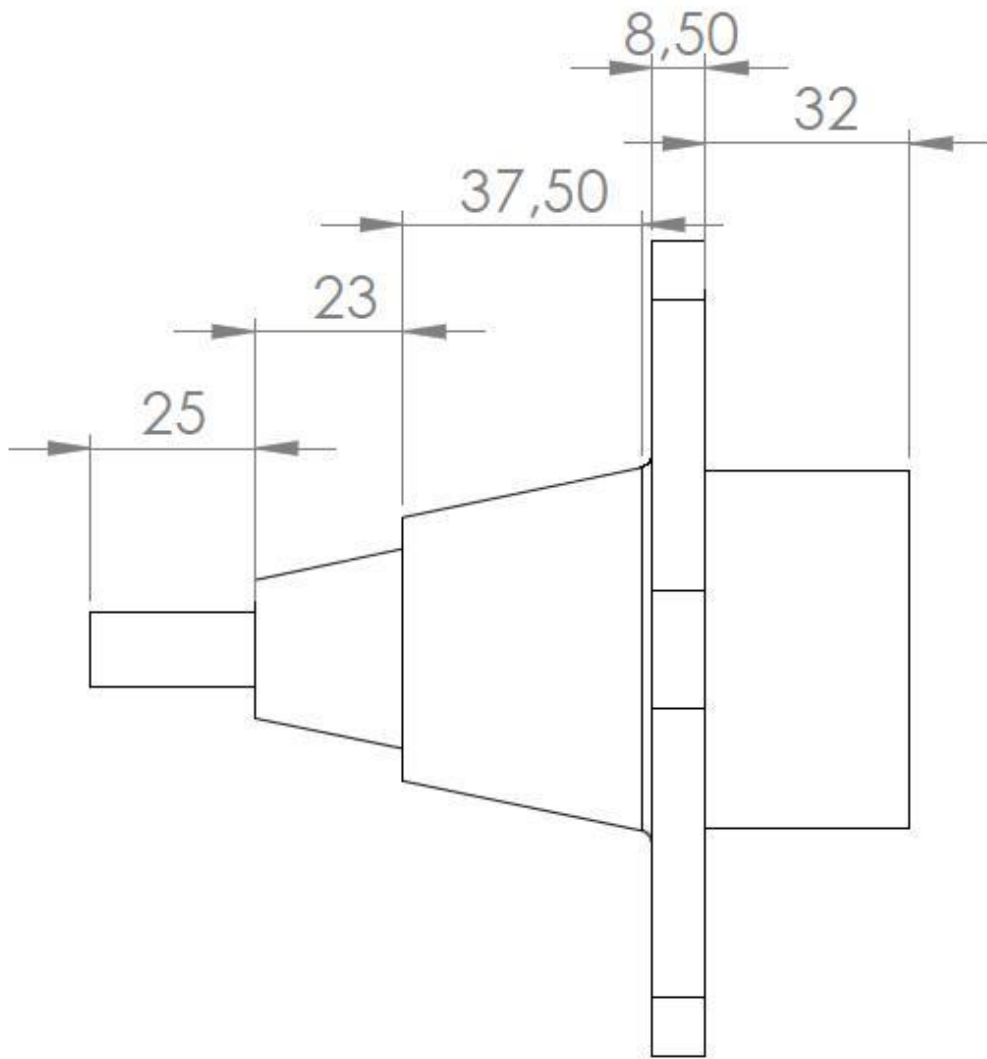
Spindle



Σχήμα 7.5: Spindle (πλάγια όψη)

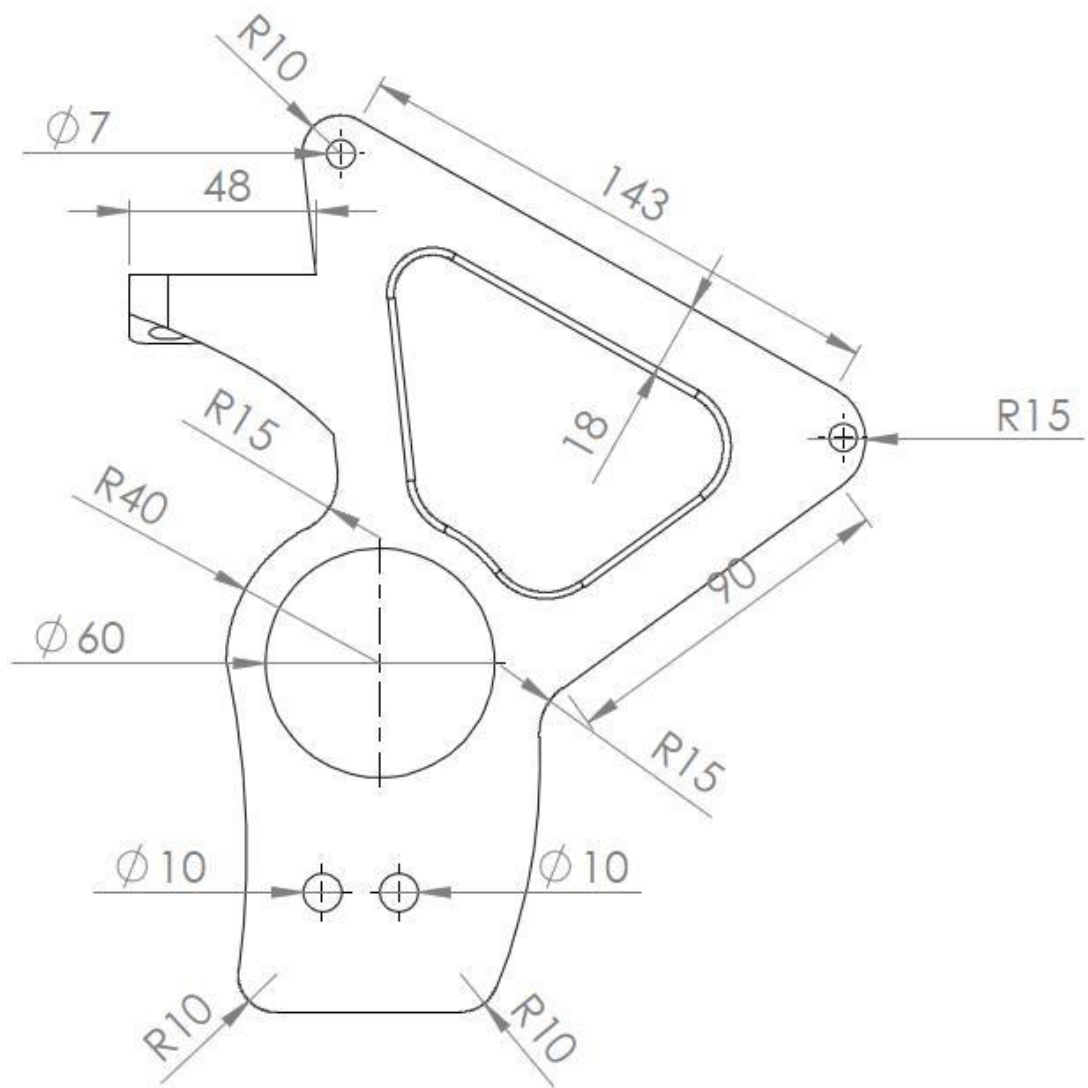


Σχήμα 7.6: Spindle (κάτοψη)

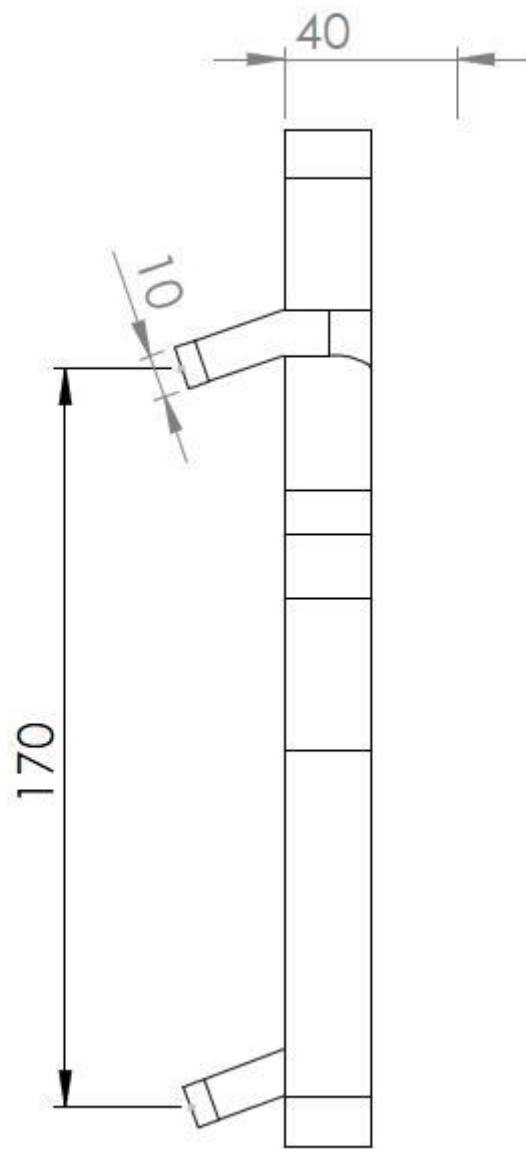


Σχήμα 7.7: Spindle (πρόοψη)

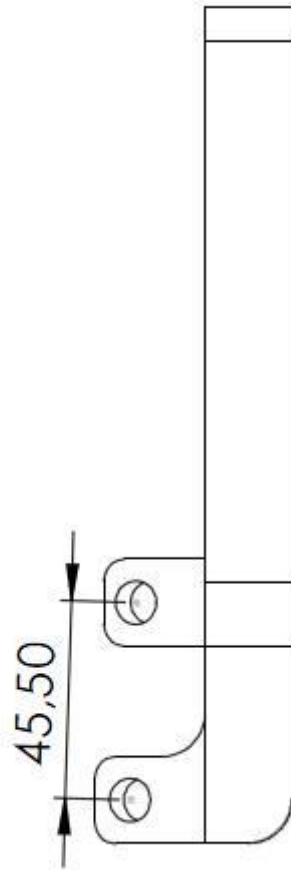
Εμπρός δεξιό Upright



Σχήμα 7.8: Εμπρός δεξιό Upright (πλάγια όψη)

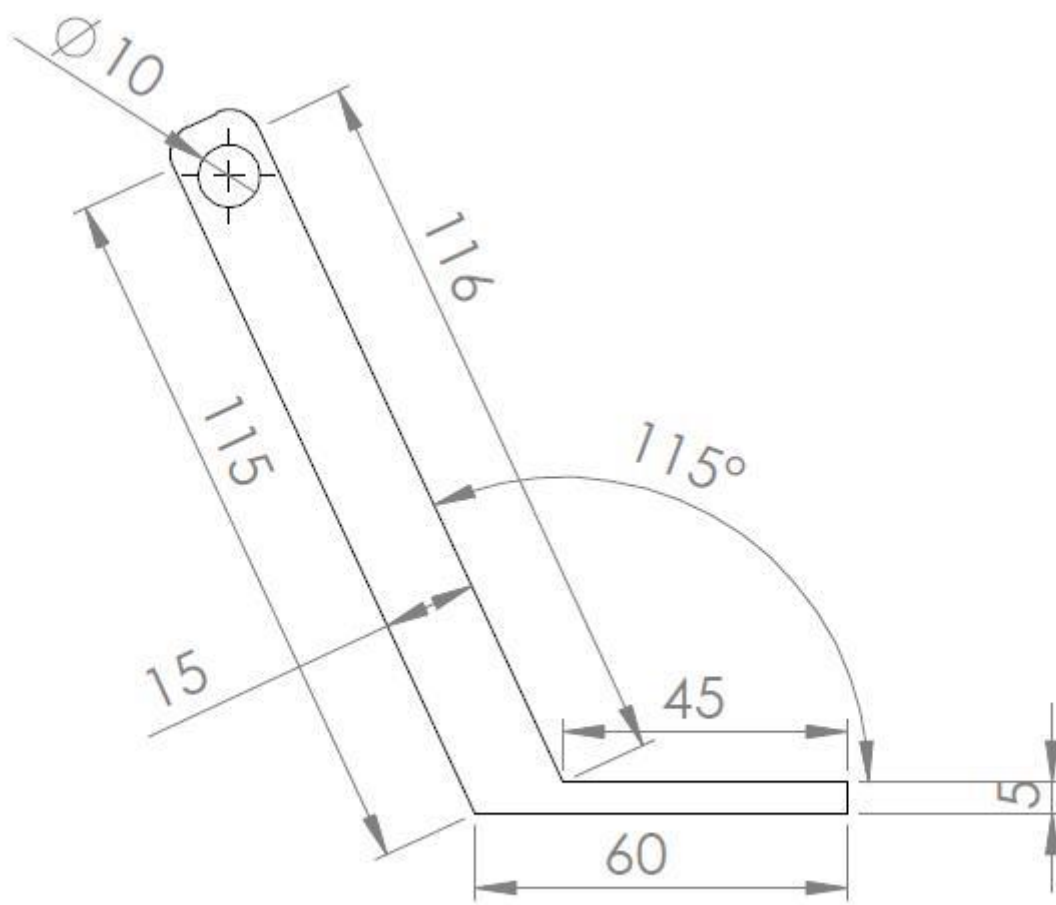


Σχήμα 7.9: Εμπρός δεξιό Upright (πρόοψη)

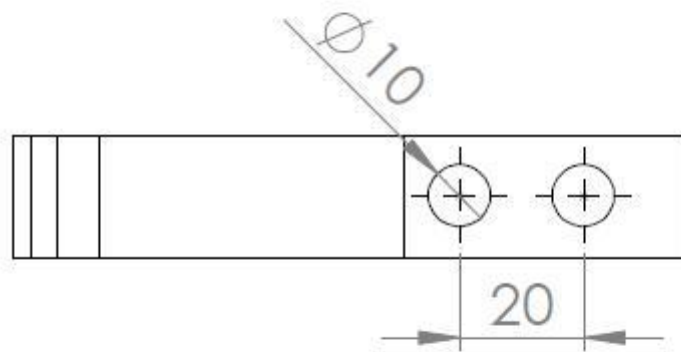


Σχήμα 7.10: Εμπρός δεξιό Upright (κάτοψη)

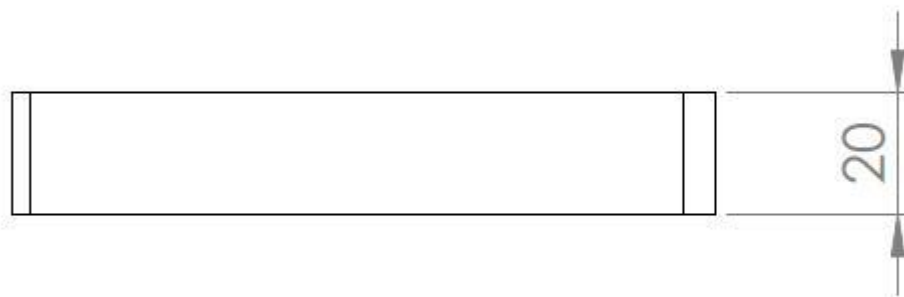
Εμπρός αριστερό Steering Arm



Σχήμα 7.11: Εμπρός αριστερό Steering Arm (κάτοψη)

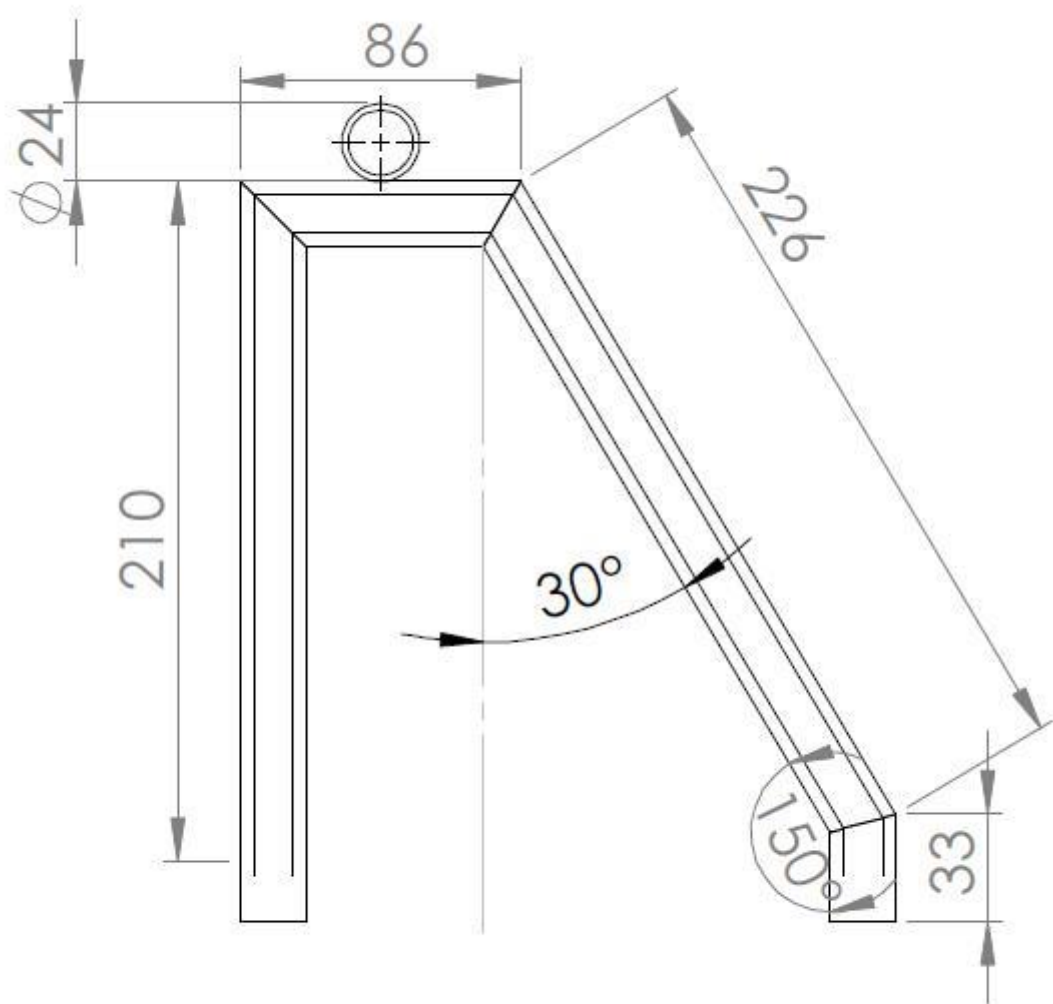


Σχήμα 7.12: Εμπρός αριστερό Steering Arm (πλάγια όψη)

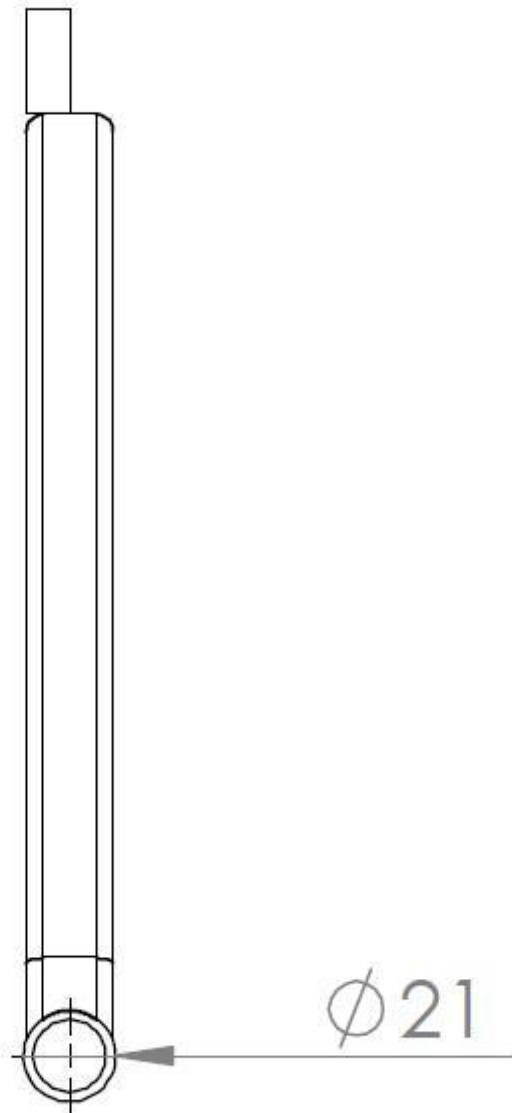


Σχήμα 7.13: Εμπρός αριστερό Steering Arm (πρόοψη)

Άνω μπροστά δεξιό Ψαλίδι

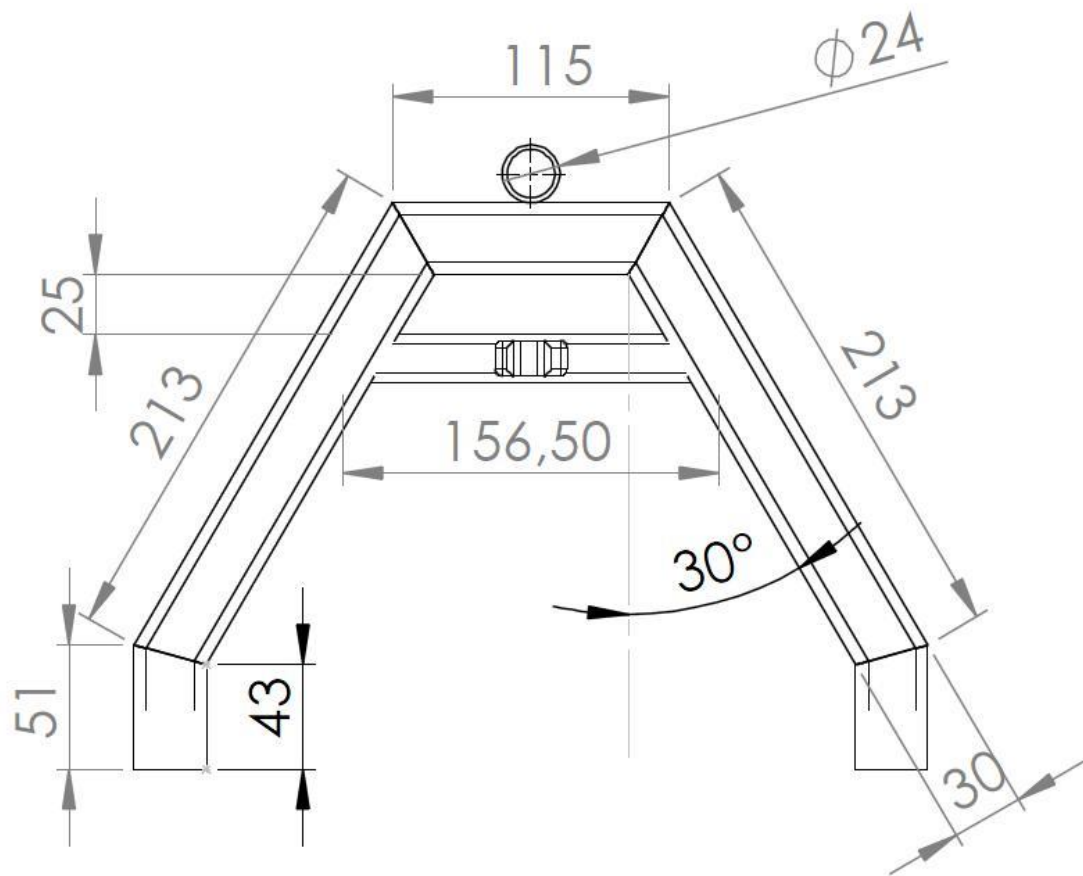


Σχήμα 7.14: Άνω μπροστά δεξιό Ψαλίδι (κάτοψη)

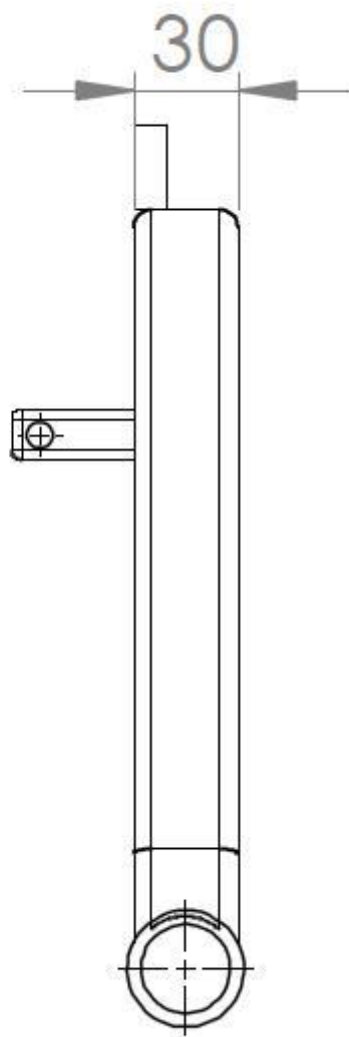


Σχήμα 7.15: Άνω μπροστά δεξιό Ψαλίδι (πρόοψη)

Κάτω μπροστά δεξιό Ψαλίδι

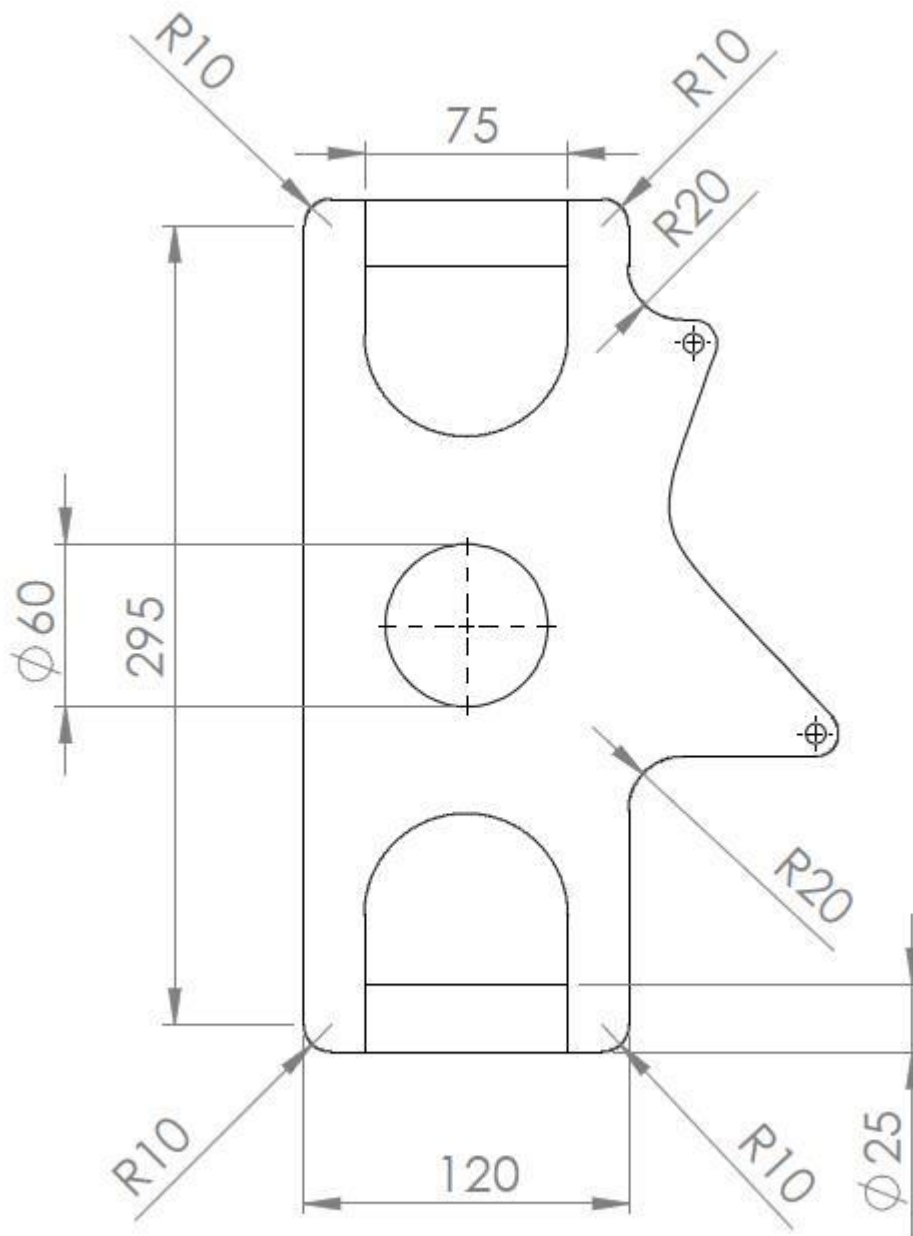


Σχήμα 7.16: Κάτω μπροστά δεξιό Ψαλίδι (κάτοψη)

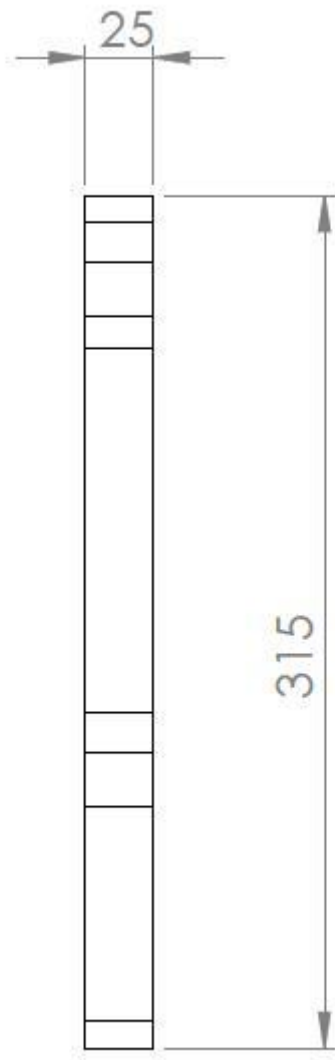


Σχήμα 7.17: Κάτω μπροστά δεξιό Ψαλίδι (πρόοψη)

Πίσω αριστερό Upright

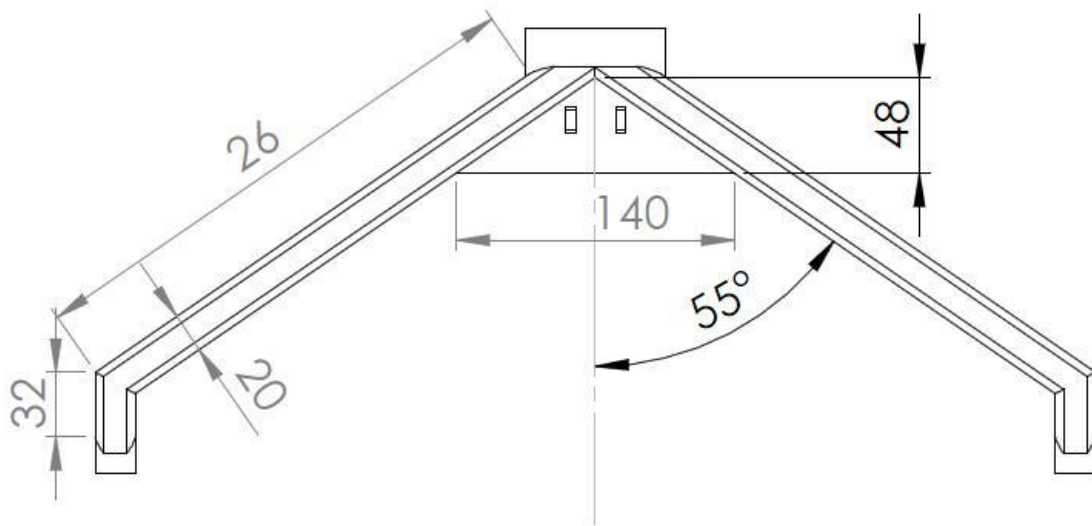


Σχήμα 7.18: Πίσω αριστερό Upright (πλάγια όψη)

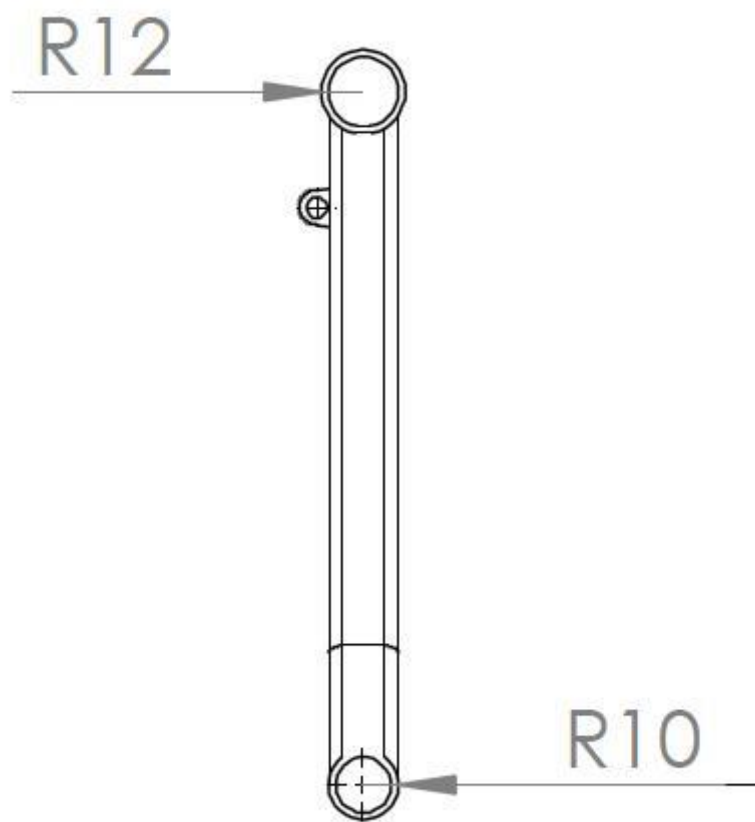


Σχήμα 7.19: Πίσω αριστερό Upright (πλάγια όψη)

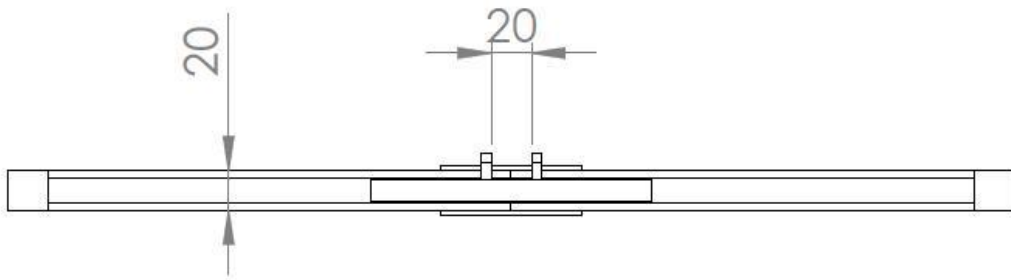
Κάτω πίσω αριστερό Ψαλίδι



Σχήμα 7.20: Κάτω πίσω αριστερό Ψαλίδι (κάτοψη)

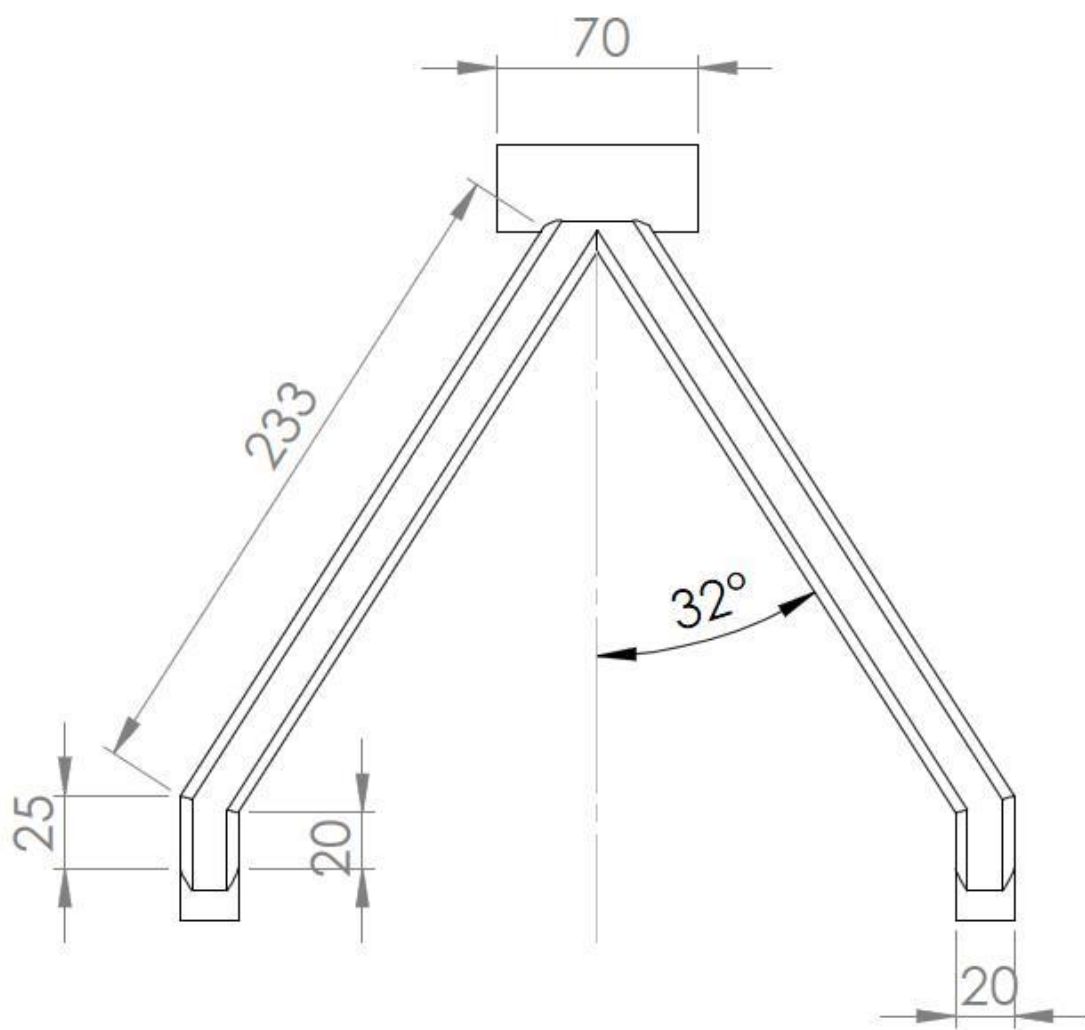


Σχήμα 7.21: Κάτω πίσω αριστερό Ψαλίδι (πρόοψη)

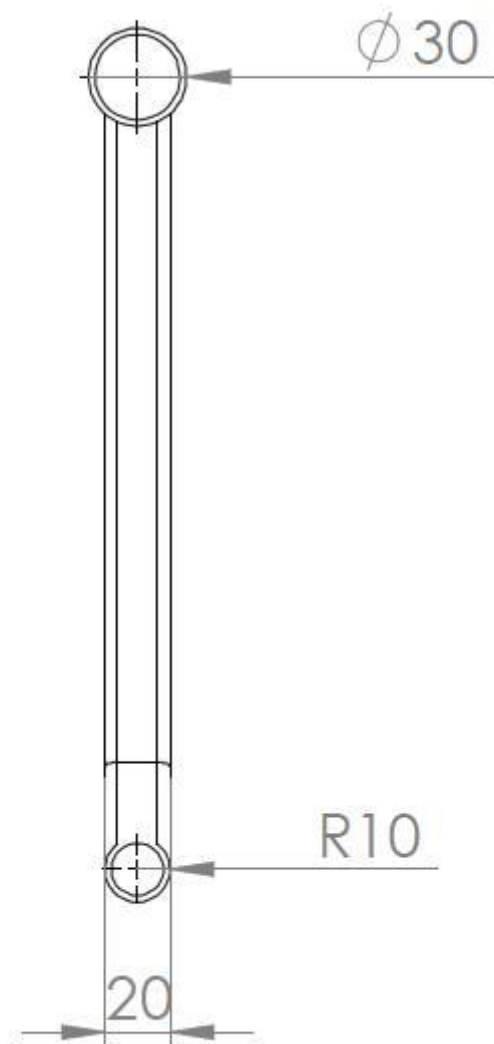


Σχήμα 7.22: Κάτω πίσω αριστερό Ψαλίδι (πλάγια όψη)

Άνω πίσω αριστερό Ψαλίδι

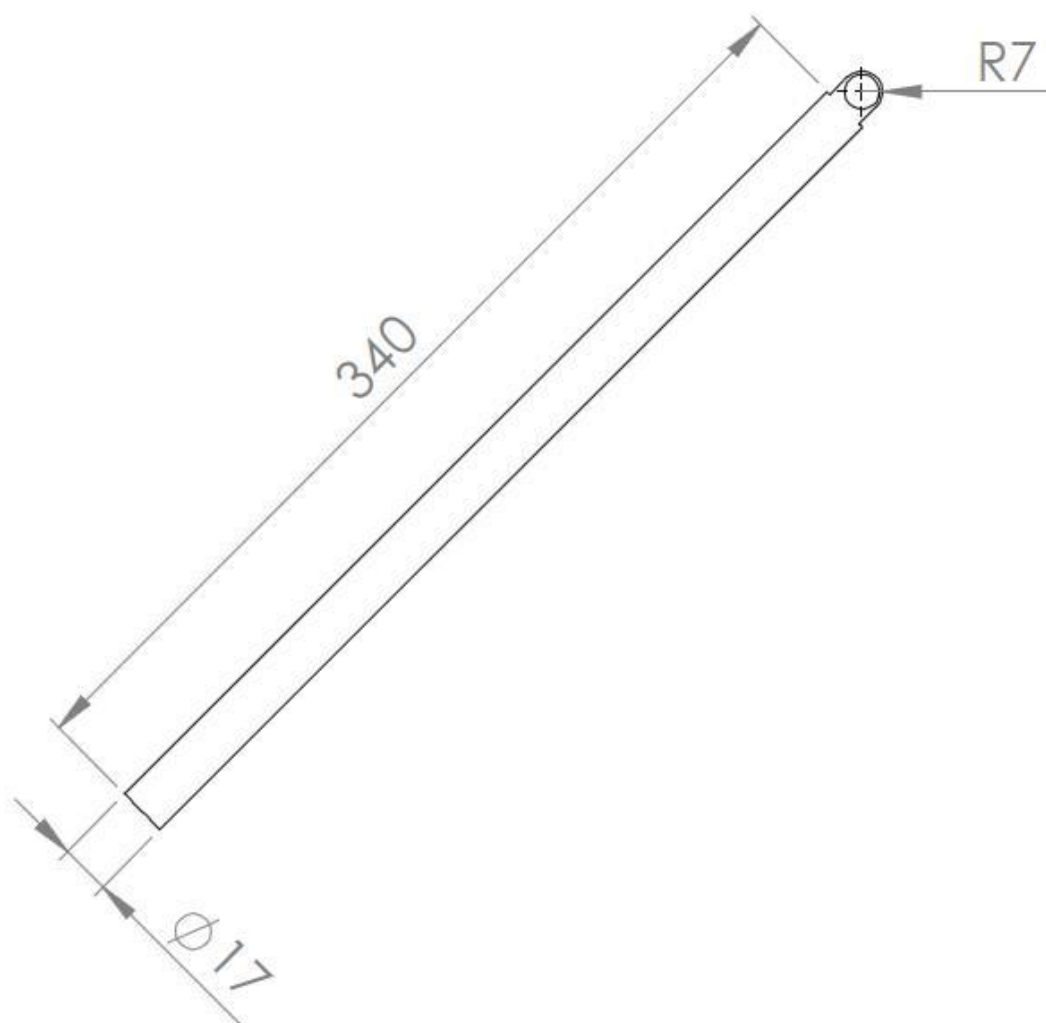


Σχήμα 7.23: Άνω πίσω αριστερό Ψαλίδι (κάτοψη)



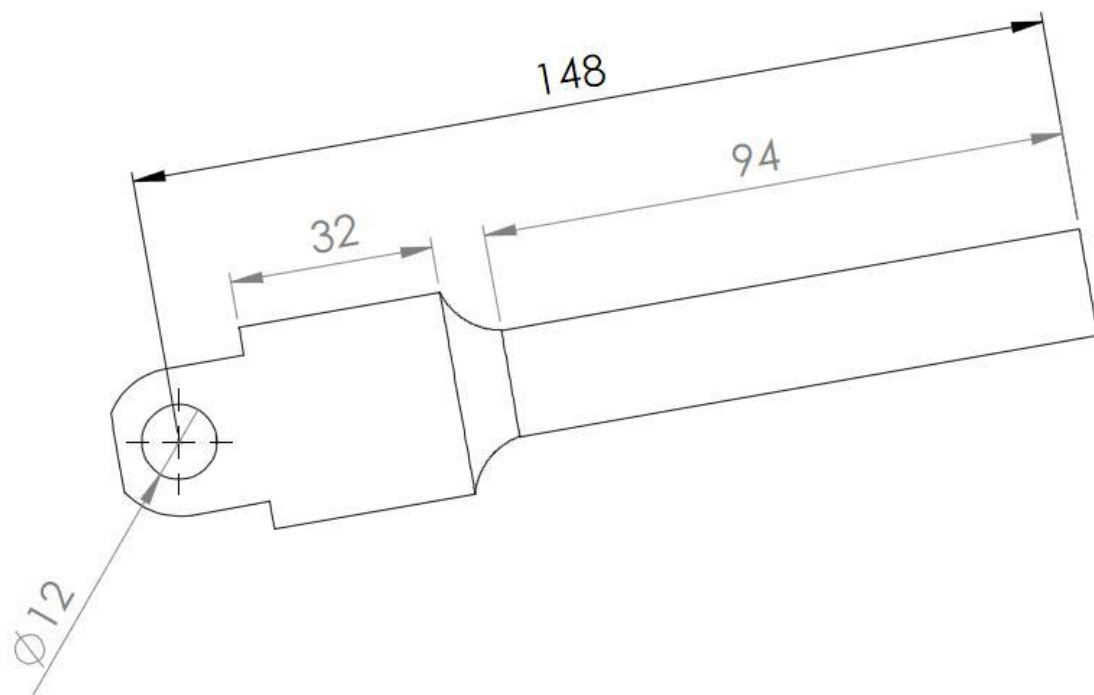
Σχήμα 7.24: Άνω πίσω αριστερό Ψαλίδι (πλάγια όψη)

Κάτω κολώνα τιμονιού

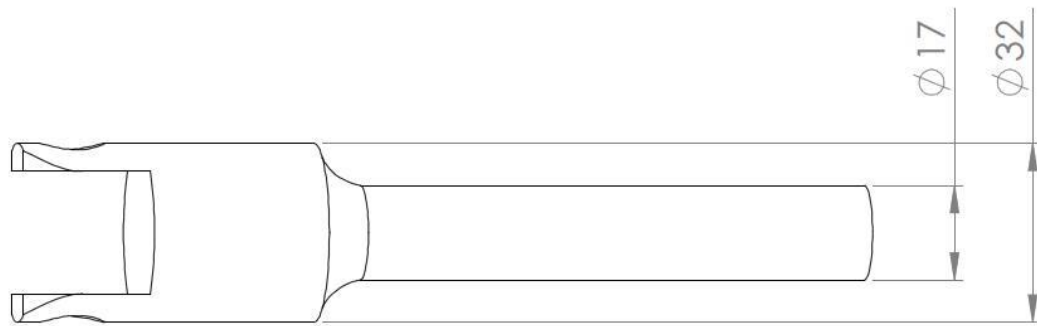


Σχήμα 7.25: Κάτω κολώνα τιμονιού (πλάγια όψη)

Άνω κολώνα τιμονιού

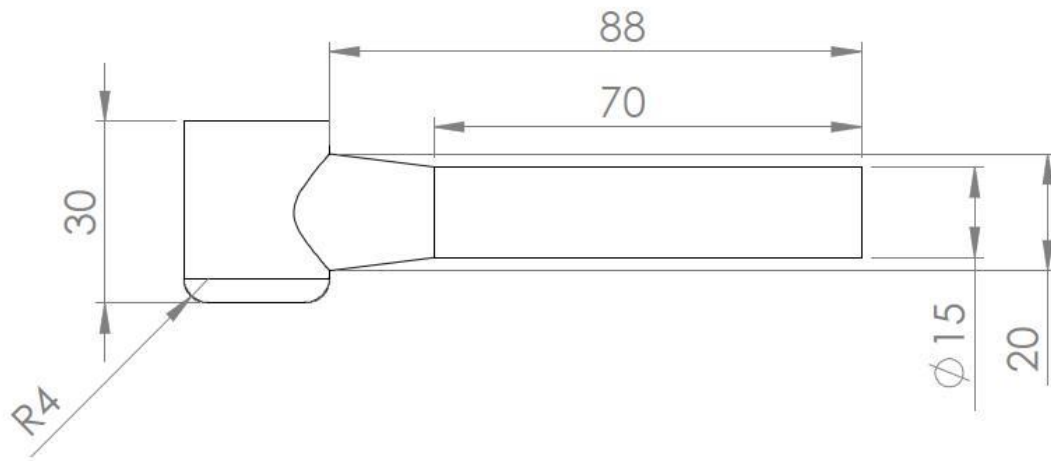


Σχήμα 7.26: Άνω κολώνα τιμονιού (πλάγια όψη)

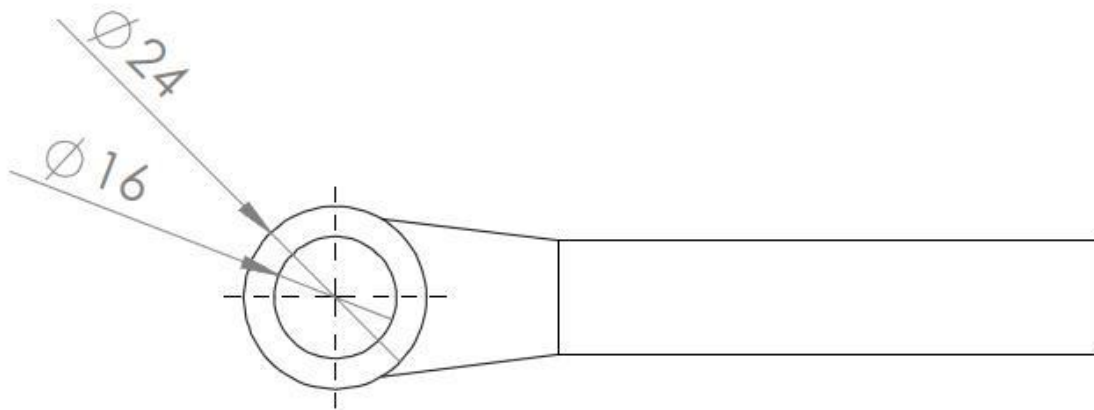


Σχήμα 7.27: Άνω κολώνα τιμονιού (κάτοψη)

Αριστερό εξωτερικό Tie Rod End



Σχήμα 7.28: Αριστερό εξωτερικό Tie Rod End (πρόοψη)

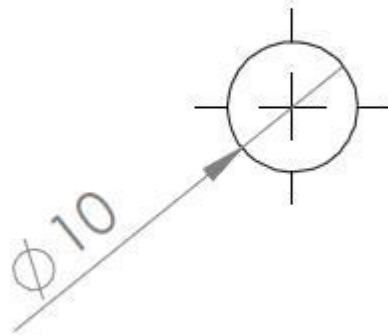


Σχήμα 7.29: Αριστερό εξωτερικό Tie Rod End (κάτοψη)

Tie Rod

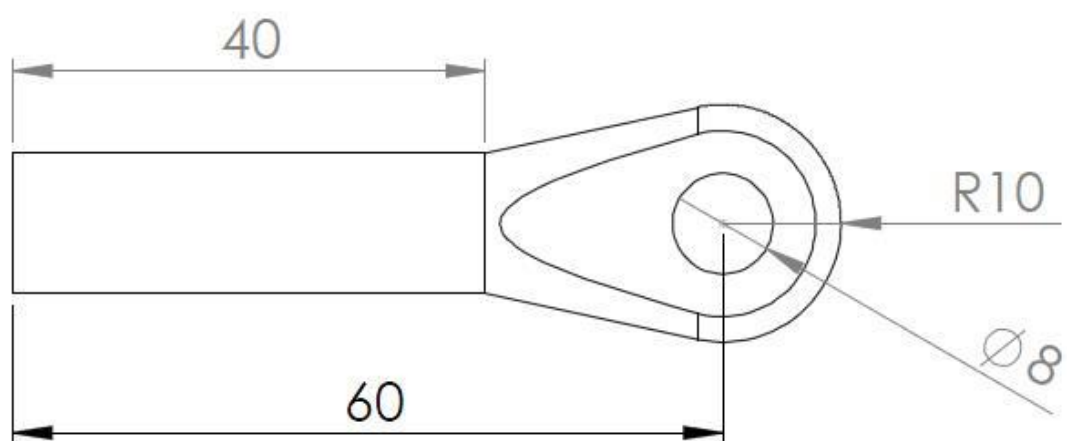


Σχήμα 7.30: Tie Rod (πρόοψη)

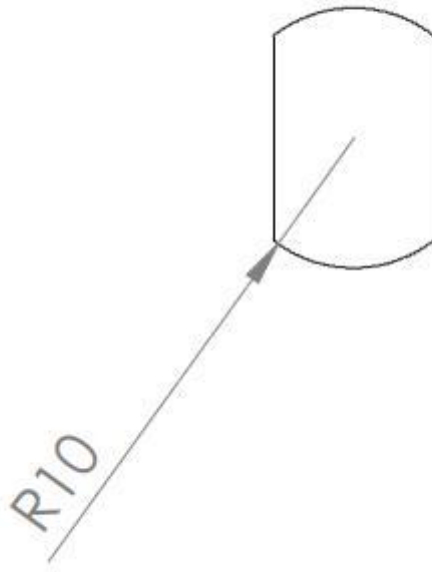


Σχήμα 7.31: Tie Rod (πλάγια όψη)

Αριστερό εσωτερικό Tie Rod End

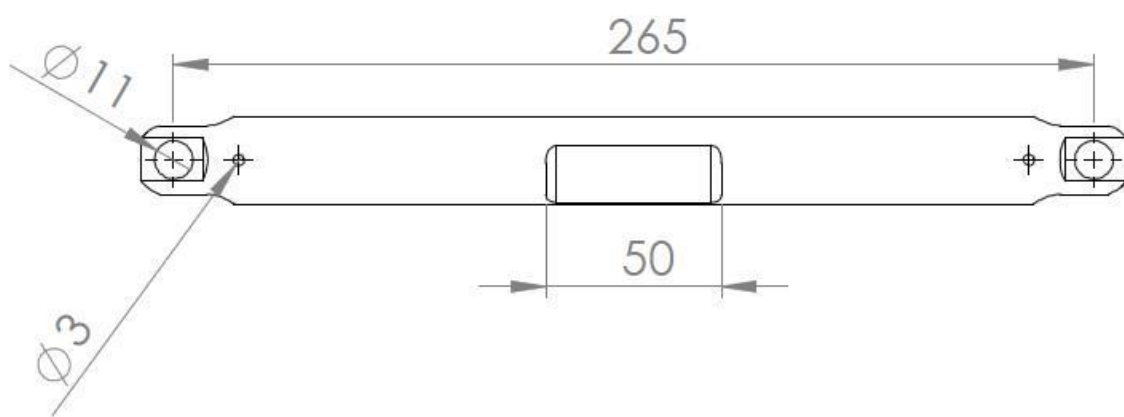


Σχήμα 7.32: Αριστερό εσωτερικό Tie Rod End (πρόοψη)



Σχήμα 7.33: Αριστερό εσωτερικό Tie Rod End (πλάγια όψη)

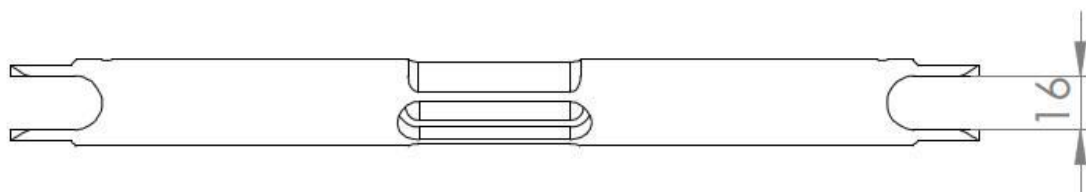
Βάση ατέρμονα



Σχήμα 7.34: Βάση ατέρμονα (πρόοψη)

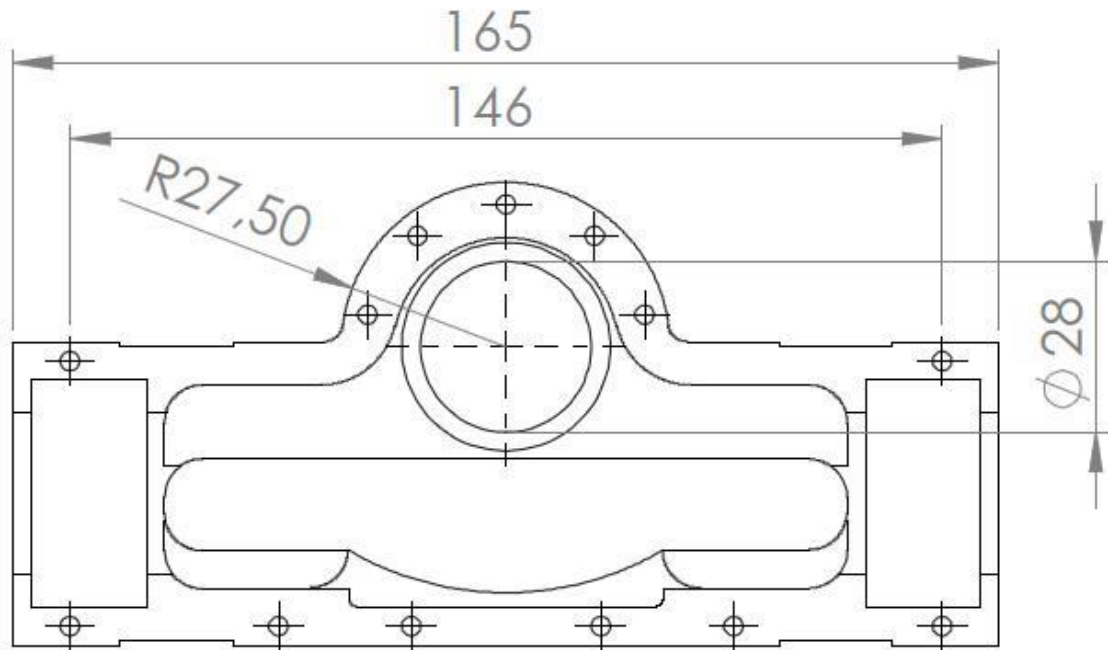


Σχήμα 7.35: Βάση ατέρμονα (πλάγια όψη)

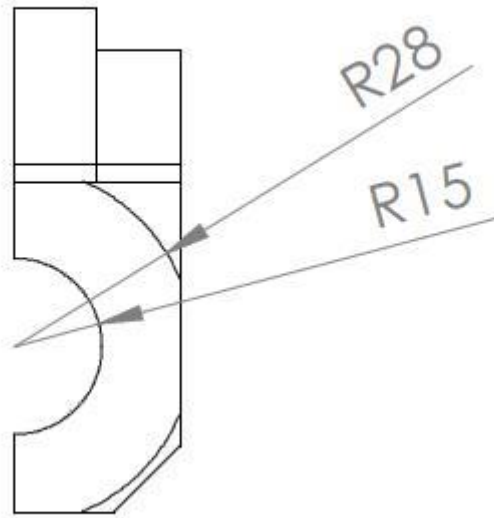


Σχήμα 7.36: Βάση ατέρμονα (κάτοψη)

Άνω κάλυμμα Ατέρμονα

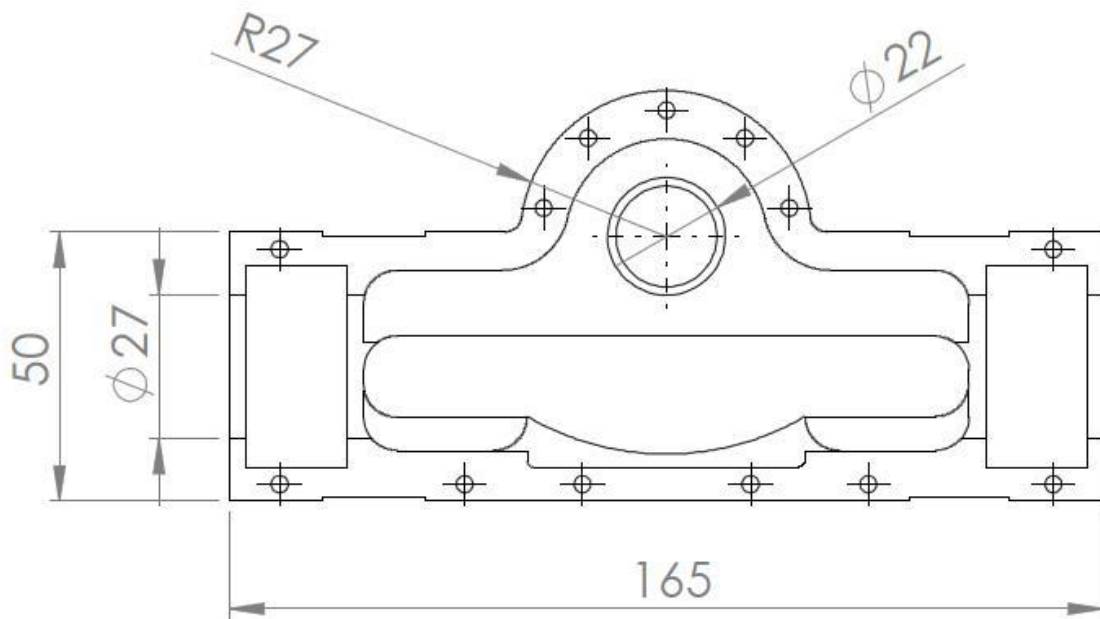


Σχήμα 7.37: Άνω κάλυμμα Ατέρμονα (πρόοψη)

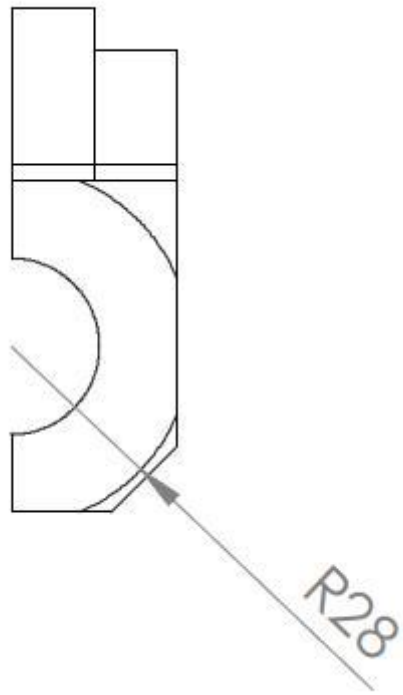


Σχήμα 7.38: Άνω κάλυμμα Ατέρμονα (πλάγια όψη)

Κάτω κάλυμμα Ατέρμονα

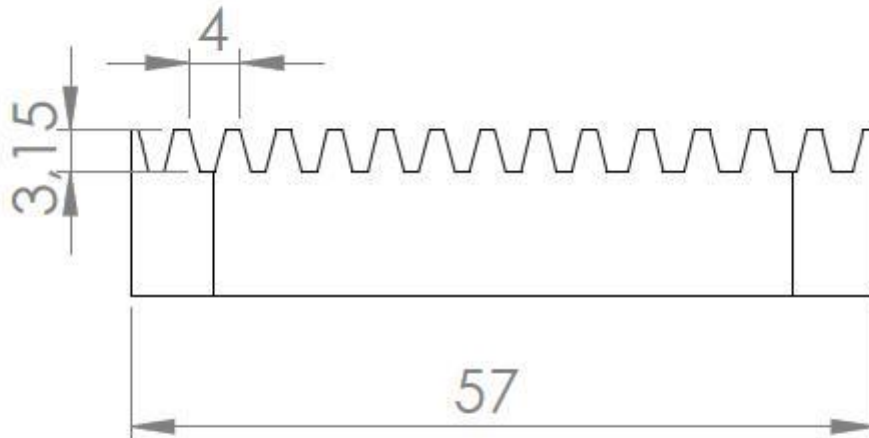


Σχήμα 7.39: Κάτω κάλυμμα Ατέρμονα (πρόοψη)

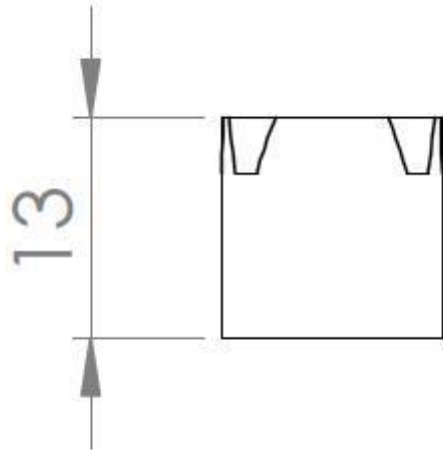


Σχήμα 7.40: Κάτω κάλυμμα Ατέρμονα (πλάγια όψη)

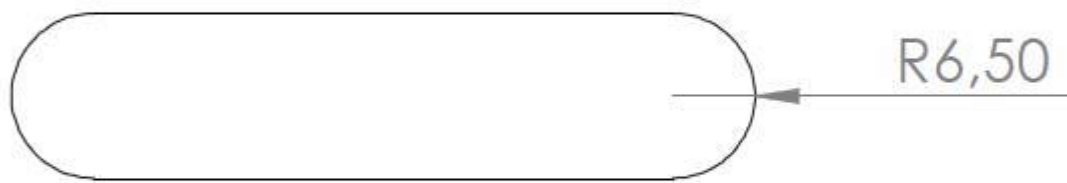
Ατέρμων κοχλίας



Σχήμα 7.41: Ατέρμων κοχλίας (πρόοψη)

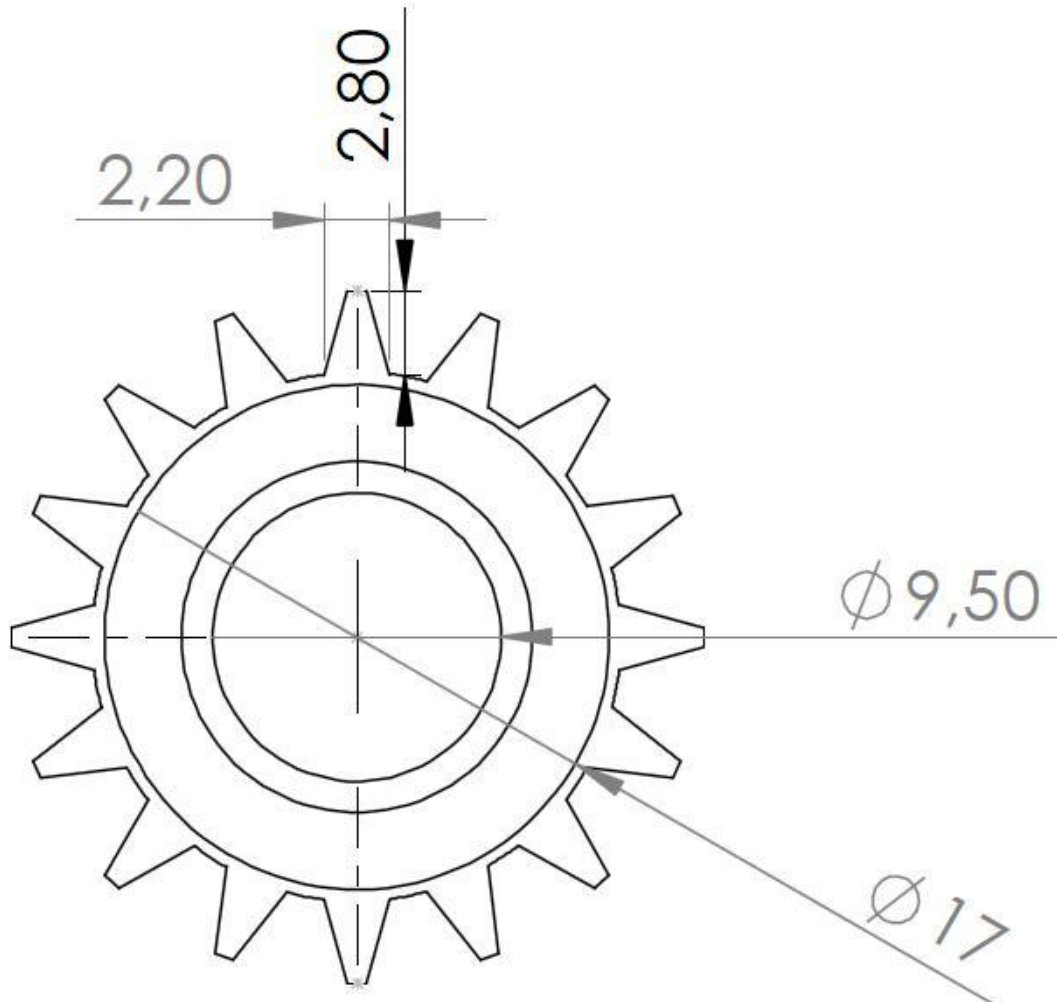


Σχήμα 7.42: Ατέρμων κοχλίας (πλάγια όψη)

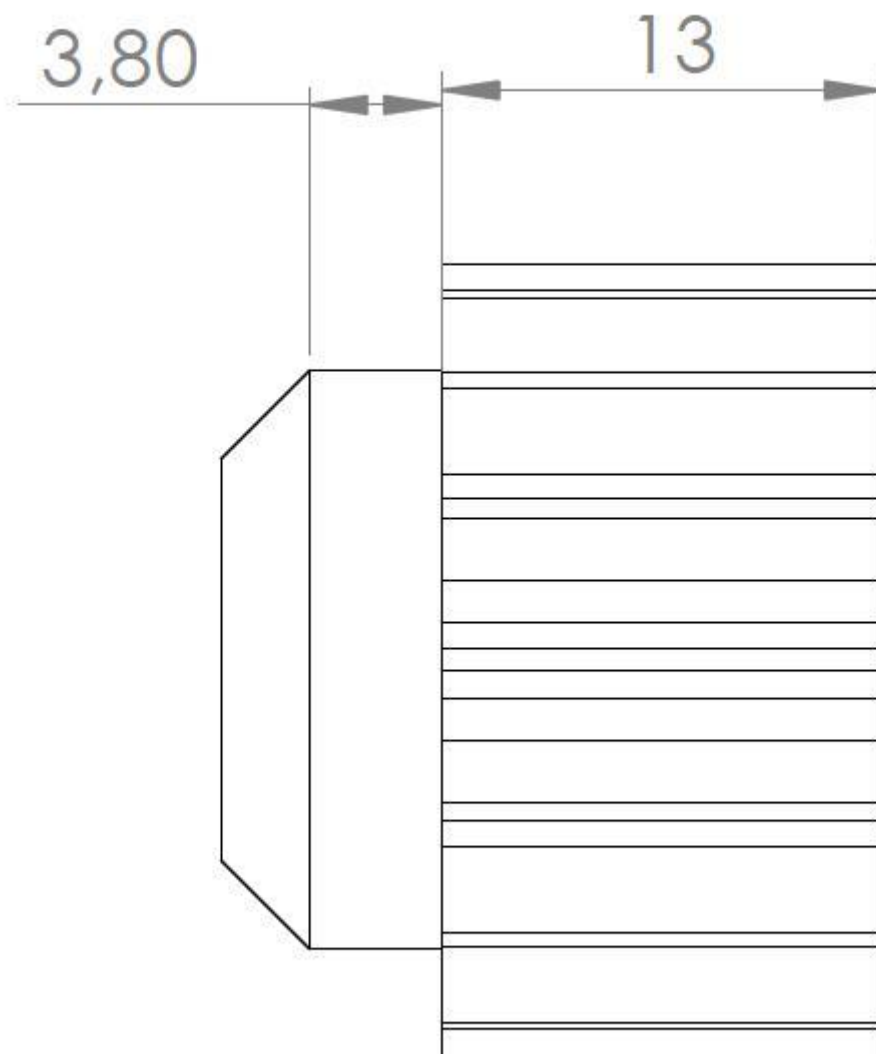


Σχήμα 7.43: Ατέρμων κοχλίας (κάτοψη)

"Πινιόν"

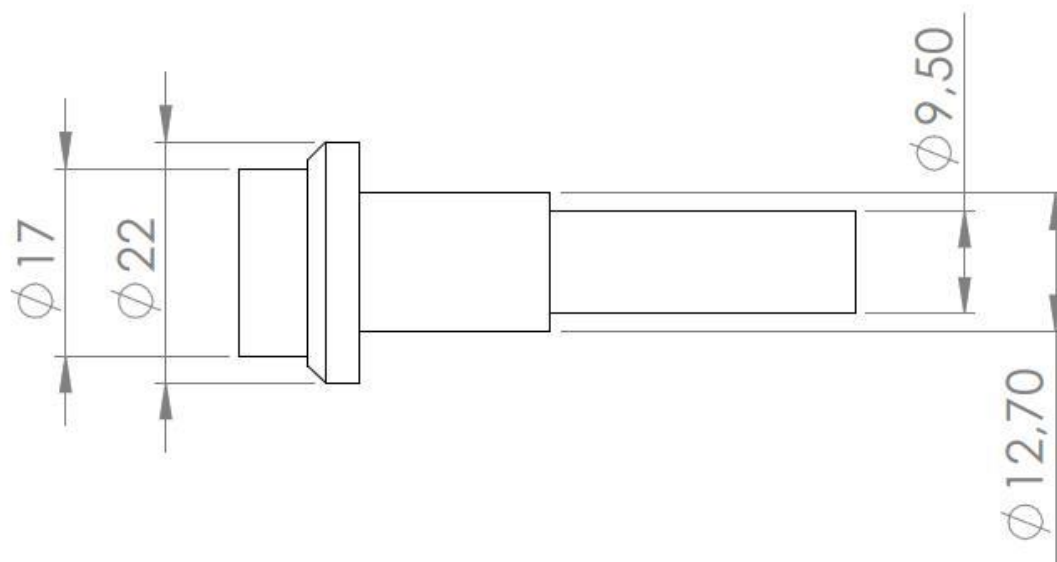


Σχήμα 7.44: "Πινιόν" (πρόοψη)

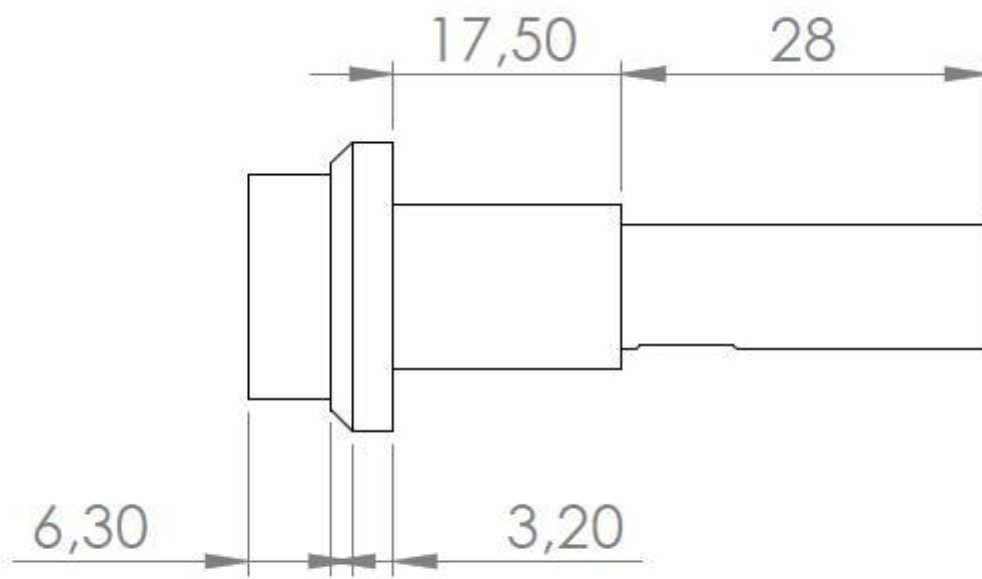


Σχήμα 7.45: "Πινιόν" (πλάγια όψη)

Άξονας του "Πινιόν"



Σχήμα 7.46: Άξονας του "Πινιόν" (κάτοψη)

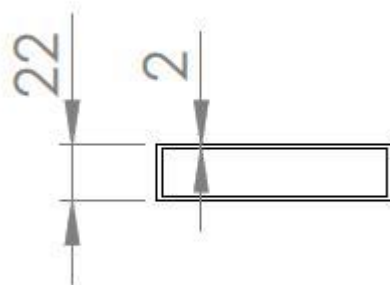


Σχήμα 7.47: Άξονας του "Πινιόν" (πλάγια όψη)

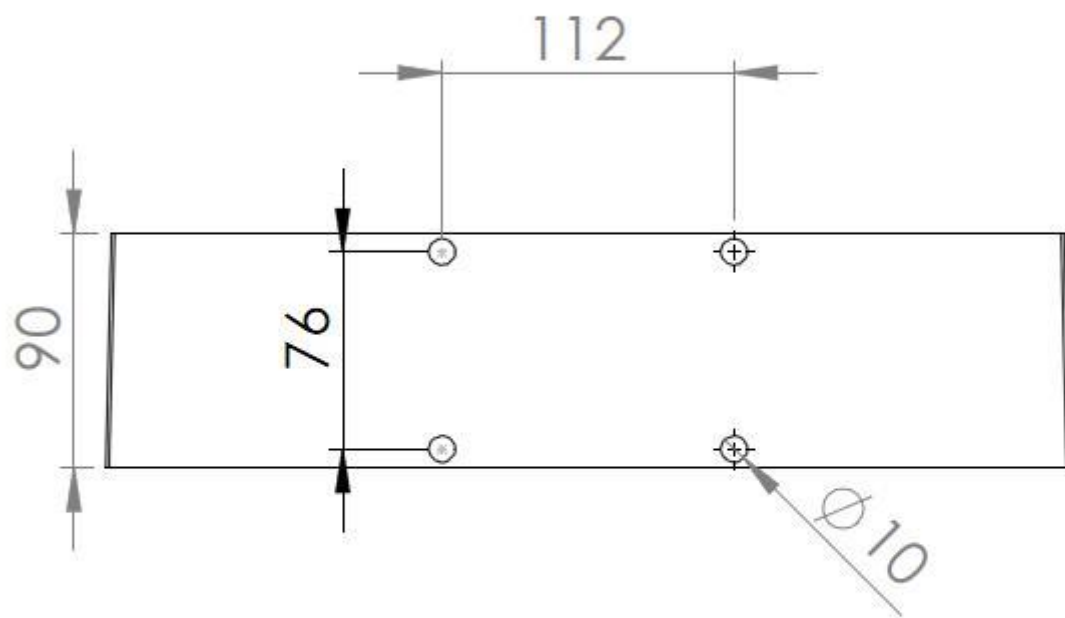
Δοκός στήριξης Κρεμαγιέρας



Σχήμα 7.48: Δοκός στήριξης Κρεμαγιέρας (πρόοψη)

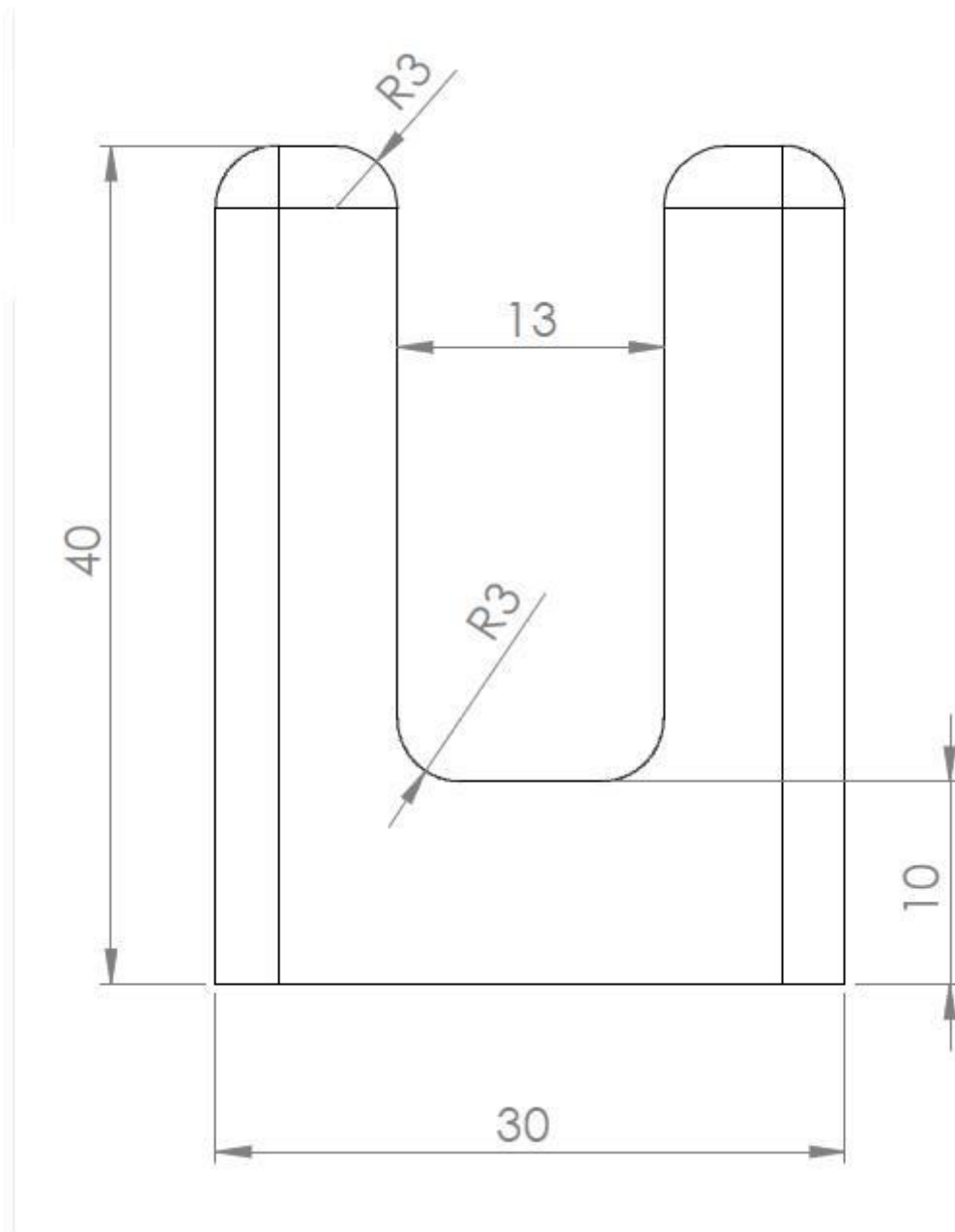


Σχήμα 7.49: Δοκός στήριξης Κρεμαγιέρας (πλάγια όψη)

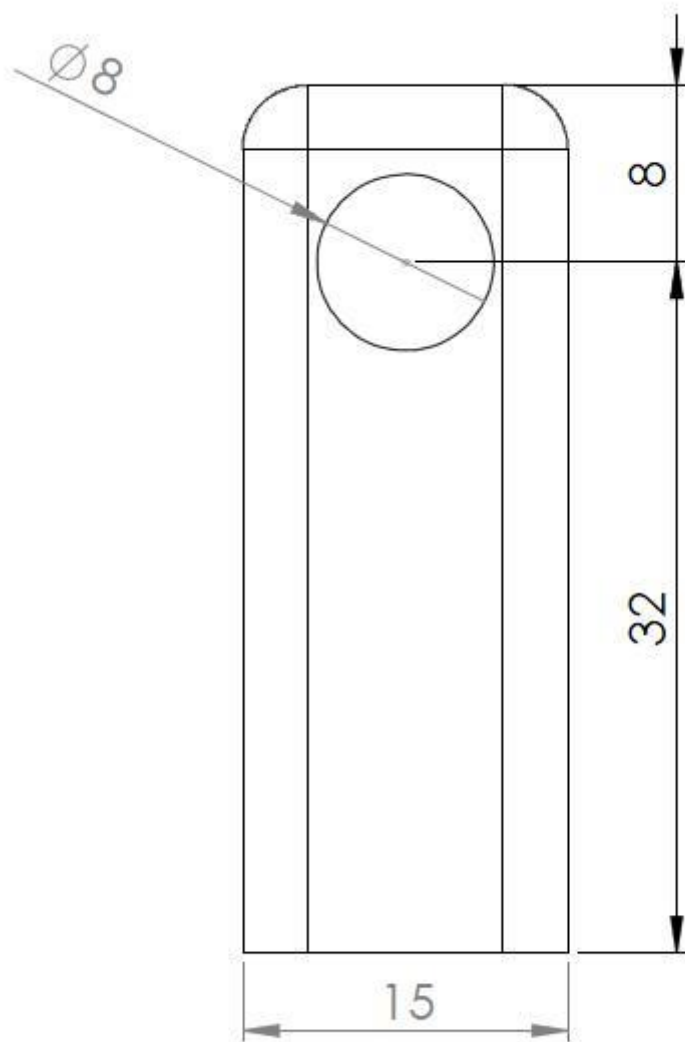


Σχήμα 7.50: Δοκός στήριξης Κρεμαγιέρας (κάτοψη)

Στήριγμα εμπρός αριστερού αμορτισέρ

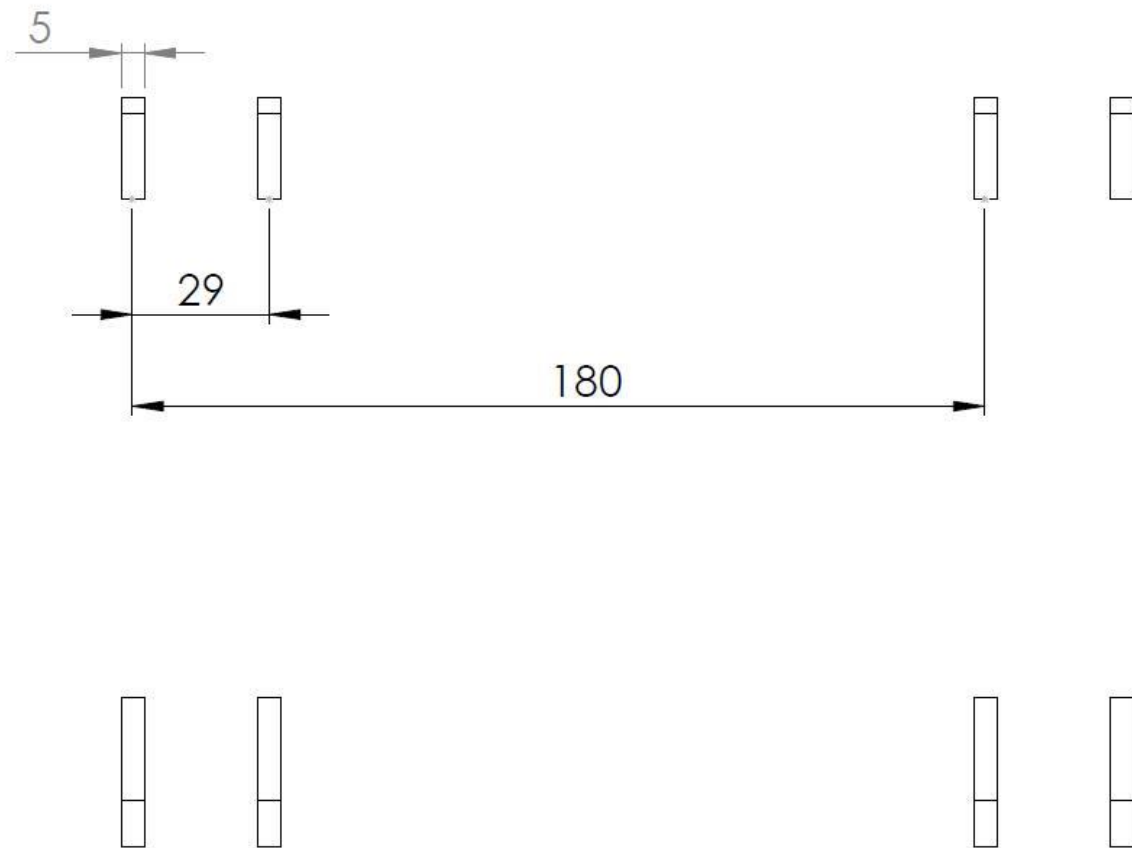


Σχήμα 7.51: Στήριγμα εμπρός αριστερού αμορτισέρ (κάτοψη)

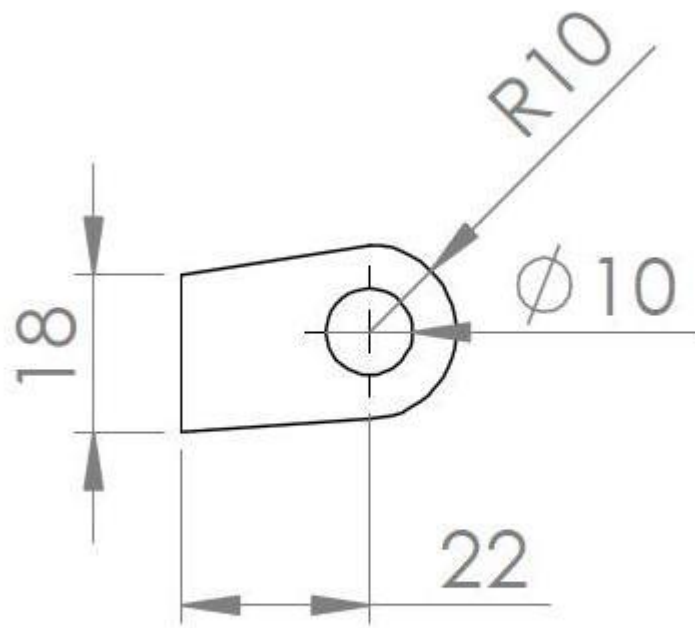


Σχήμα 7.52: Στήριγμα εμπρός αριστερού αμορτισέρ (πλάγια όψη)

Brackets εμπρός άνω αριστερού Ψαλιδιού

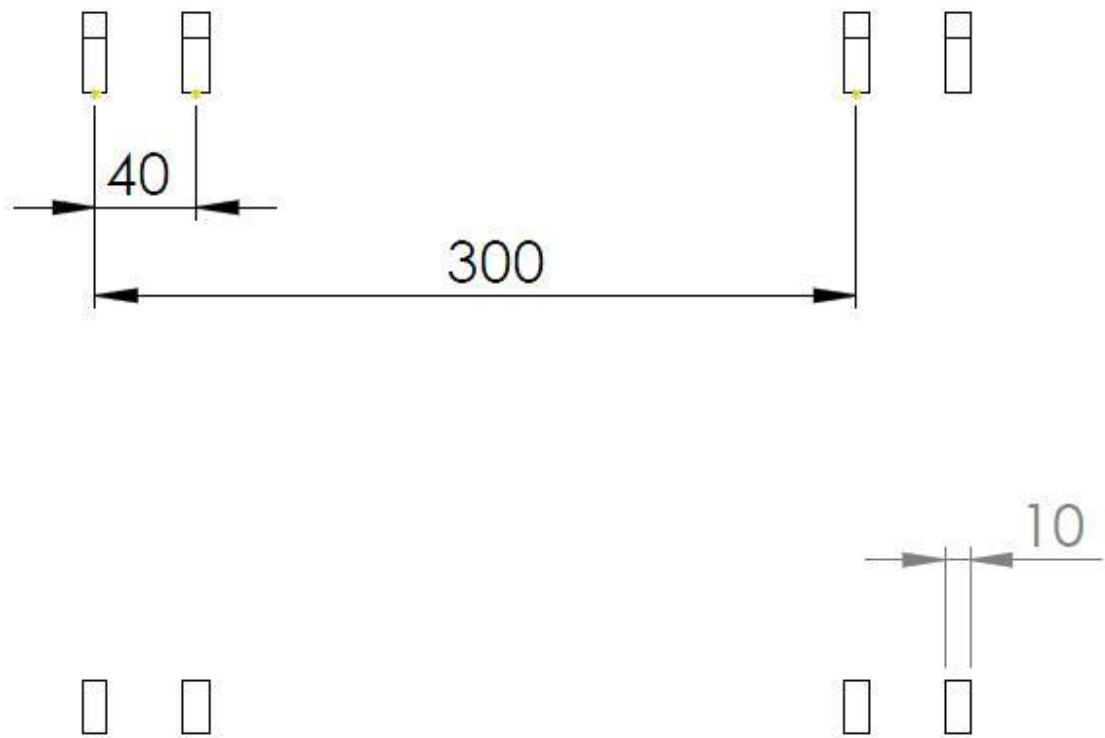


Σχήμα 7.53: Brackets εμπρός άνω αριστερού Ψαλιδιού (πλάγια όψη και κάτοψη)

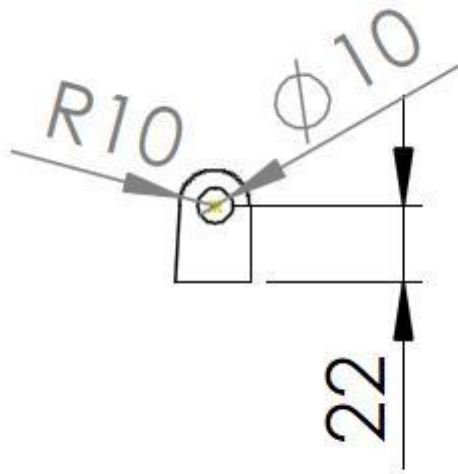


Σχήμα 7.54: Brackets εμπρός άνω αριστερού Ψαλιδιού (πρόοψη)

Brackets εμπρός κάτω αριστερού Ψαλιδιού

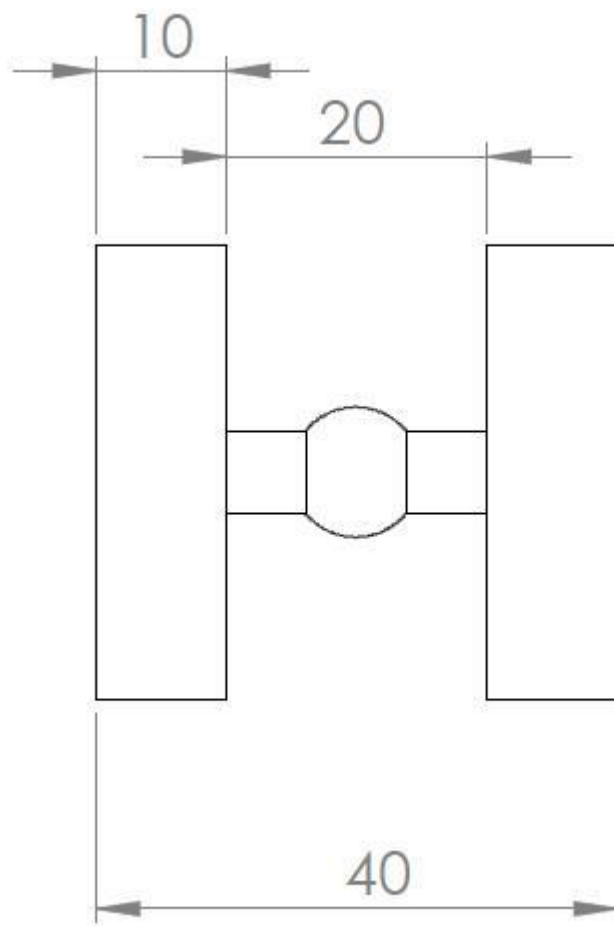


Σχήμα 7.55: Brackets εμπρός κάτω αριστερού Ψαλιδιού (πλάγια όψη και κάτοψη)

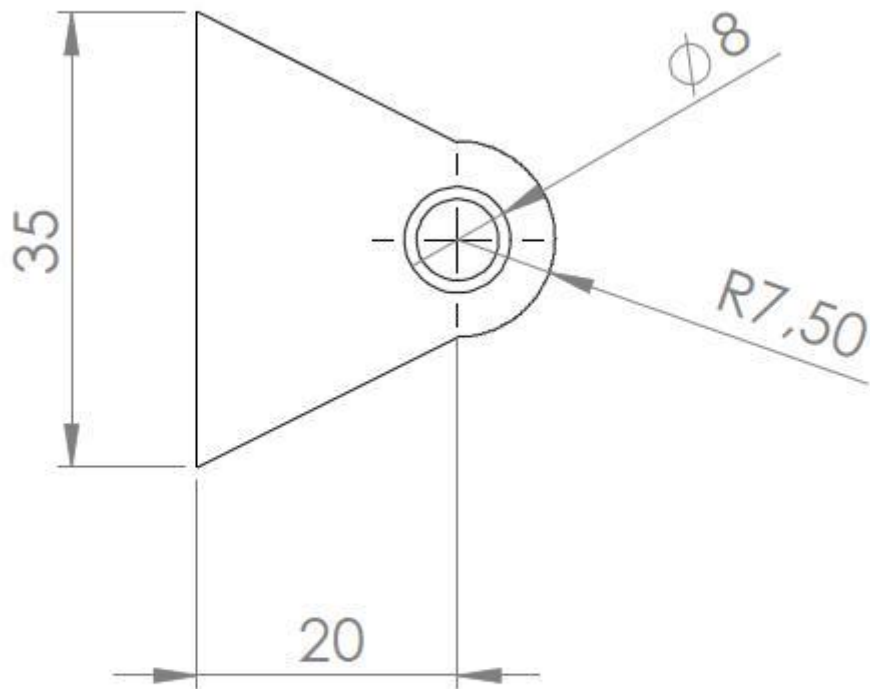


Σχήμα 7.56: Brackets εμπρός κάτω αριστερού Ψαλιδιού (πρόοψη)

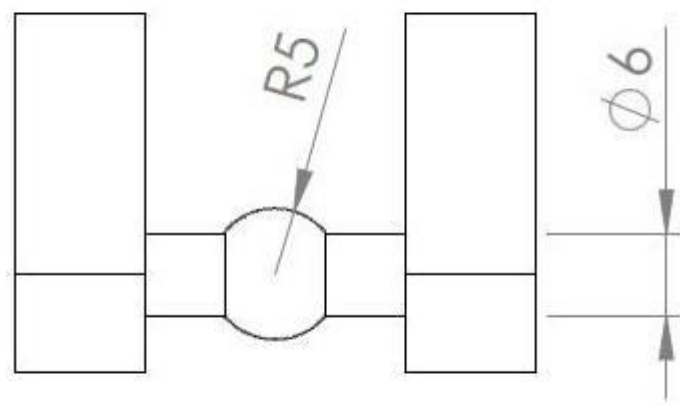
Στήριγμα πίσω αριστερού αμορτισέρ



Σχήμα 7.57: Στήριγμα πίσω αριστερού αμορτισέρ (πλάγια όψη)

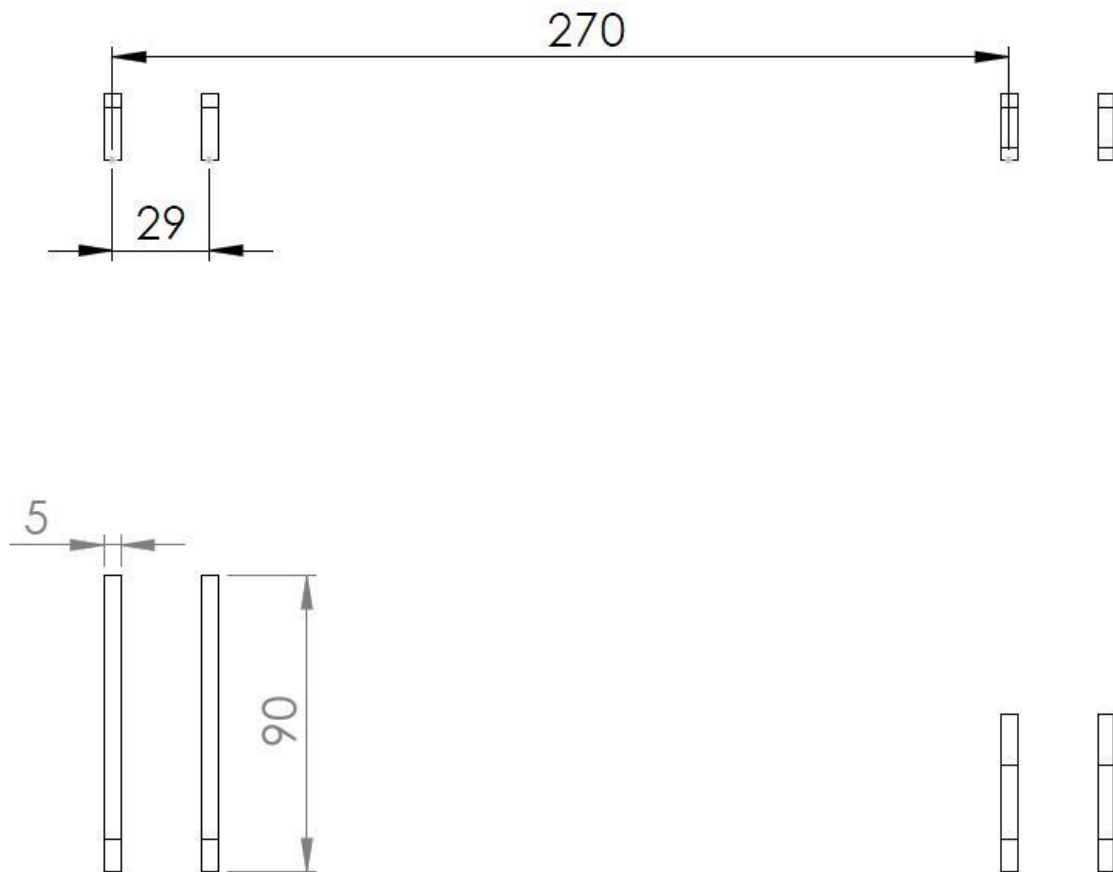


Σχήμα 7.58: Στήριγμα πίσω αριστερού αμορτισέρ (πρόοψη)

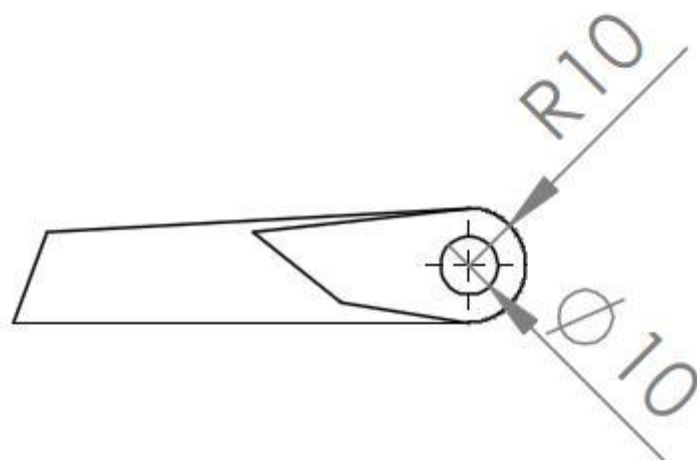


Σχήμα 7.59: Στήριγμα πίσω αριστερού αμορτισέρ (κάτοψη)

Brackets πίσω άνω αριστερού Ψαλιδιού

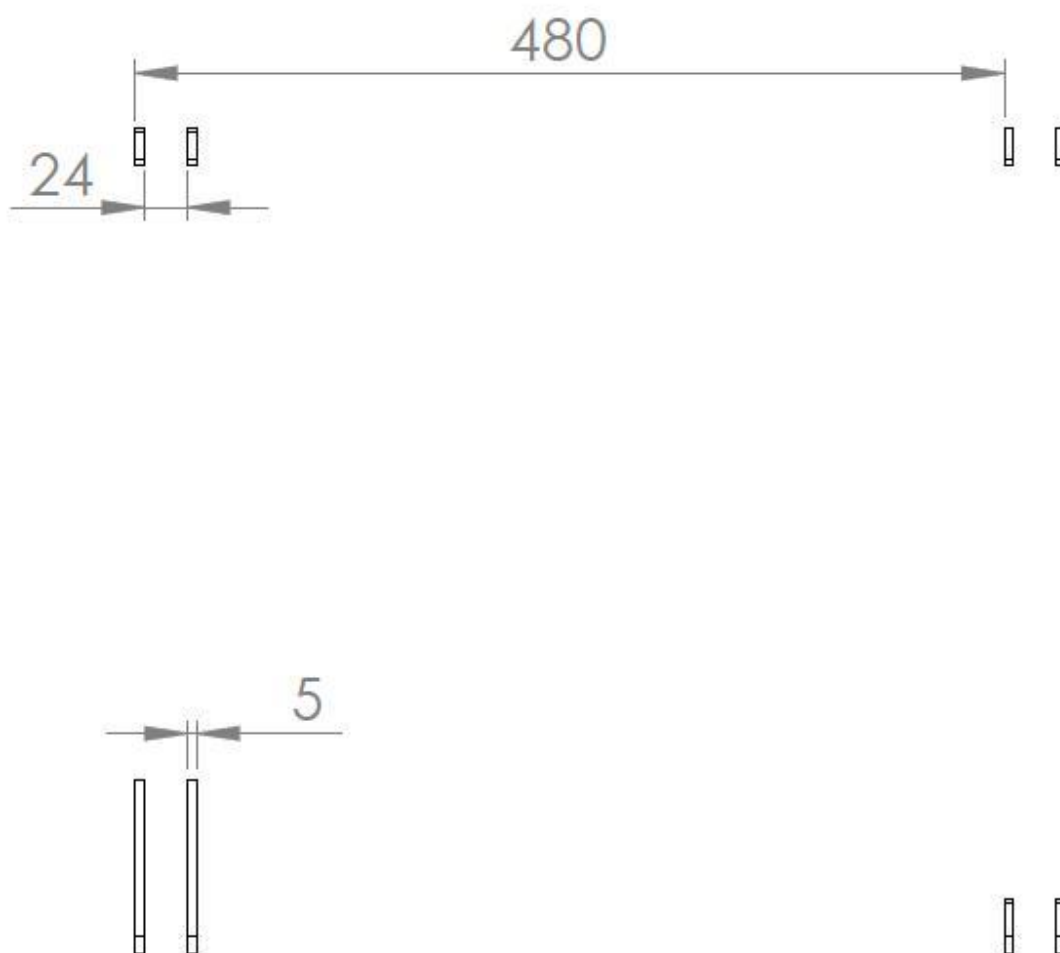


Σχήμα 7.60: Brackets πίσω άνω αριστερού Ψαλιδιού (πλάγια όψη και κάτοψη)

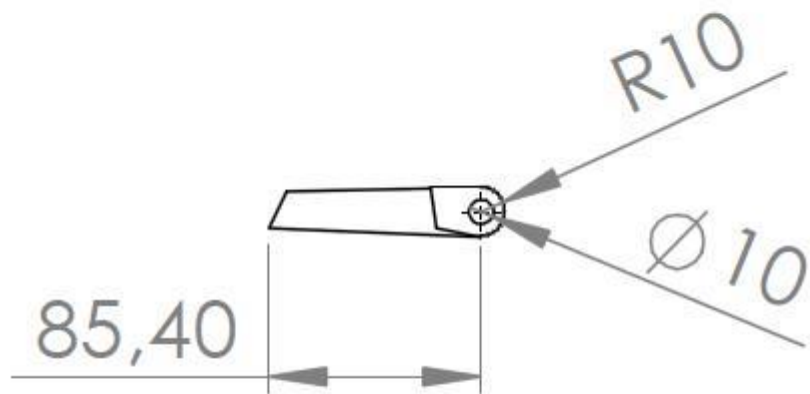


Σχήμα 7.61: Brackets πίσω άνω αριστερού Ψαλιδιού (πρόοψη)

Brackets πίσω κάτω αριστερού Ψαλιδιού

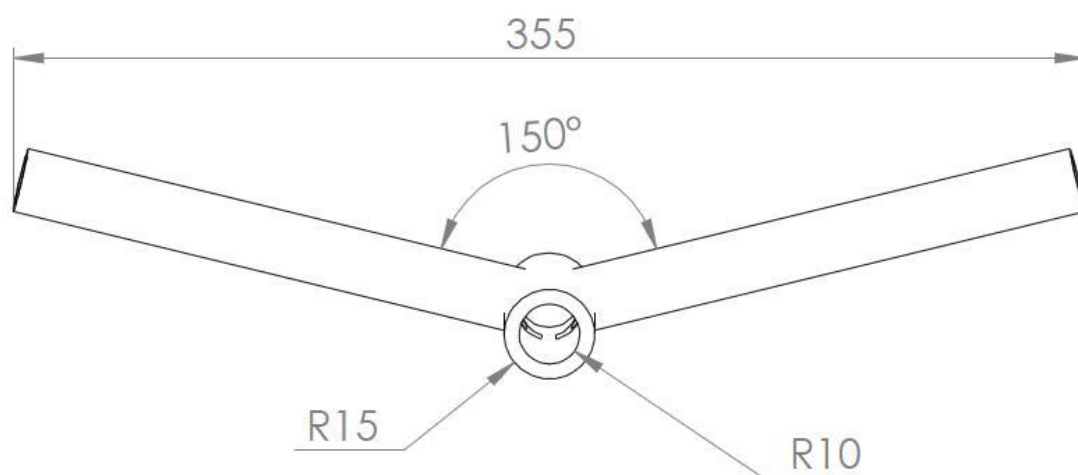


Σχήμα 7.62: Brackets πίσω κάτω αριστερού Ψαλιδιού (πλάγια όψη και κάτοψη)

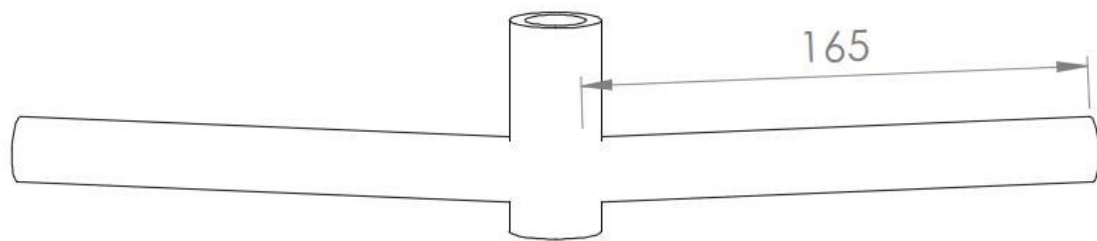


Σχήμα 7.63: Brackets πίσω κάτω αριστερού Ψαλιδιού (πρόοψη)

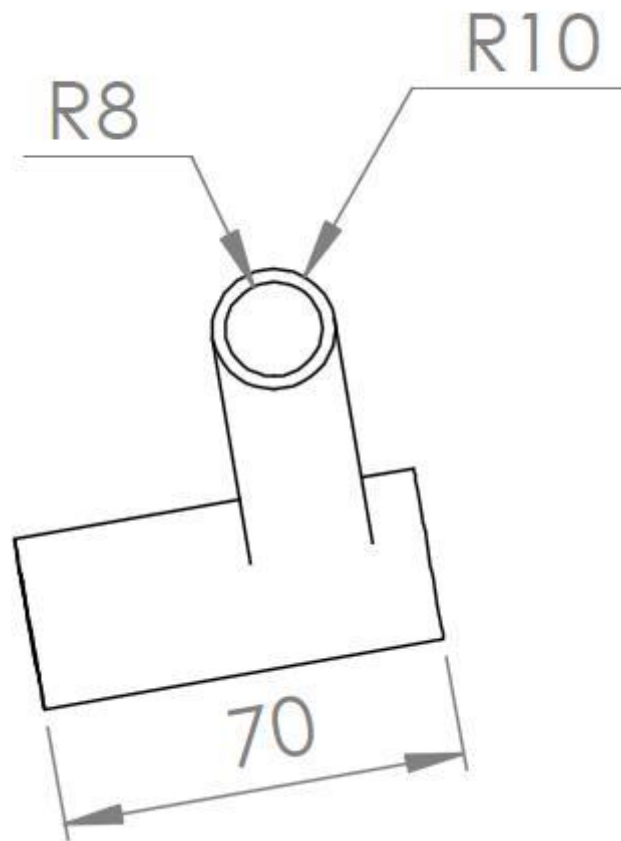
Στήριγμα κολώνας τιμονιού



Σχήμα 7.64: Στήριγμα κολώνας τιμονιού (πρόοψη)



Σχήμα 7.65: Στήριγμα κολώνας τιμονιού (κάτοψη)



Σχήμα 7.65: Στήριγμα κολώνας τιμονιού (πλάγια όψη)

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία πραγματοποιήθηκε επιτυχώς η μοντελοποίηση σε Η/Υ, του συστήματος ανάρτησης και του συστήματος διεύθυνσης ενός αγωνιστικού μονοθέσιου οχήματος τύπου «Formula SAE». Το μονοθέσιο αποτελεί αντικείμενο μελέτης, σχεδίασης και κατασκευής μίας ευρείας ομάδας Σπουδαστών του Ιδρύματος, στην οποία εντάσσεται και ο γράφων. Μετά το πέρας της κατασκευής του, η ομάδα θα συμμετάσχει στο σχετικό διεθνή διαγωνισμό «FORMULA STUDENT».

Η επιτυχής περάτωση της Εργασίας επιτεύχθηκε μέσω στοχευμένων βημάτων. Προηγήθηκε η απαραίτητη βιβλιογραφική μελέτη και συντάχθηκε το θεωρητικό μέρος που αποτελεί τη βάση για την κατανόηση των δύο κυρίων αντικειμένων της (σύστημα ανάρτησης και σύστημα διεύθυνσης). Ακολούθησε εκτενής αναζήτηση στη βιβλιογραφία και στο διαδίκτυο προκειμένου να δημιουργηθούν τα ψηφιακά μοντέλα στο λογισμικό σχεδίασης SolidWorks. Στη συνέχεια εξήχθησαν τα διδιάστατα σχέδια από τα εν λόγω μοντέλα και ακολούθησε η συγγραφή της Εργασίας.

Τα συμπεράσματα που δύνανται να εξαχθούν από την ολοκλήρωση της Πτυχιακής Εργασίας είναι πολλά και αφορούν τόσο το επιστημονικό κομμάτι, όσο και το εκπαιδευτικό.

Όσον αφορά το πρώτο, πραγματοποιήθηκε μία αναλυτική εμβάθυνση στα επιμέρους εξαρτήματα που συνιστούν το σύστημα ανάρτησης και το σύστημα διεύθυνσης ενός ελαφρού αγωνιστικού αυτοκινήτου, καθώς και στον τρόπο που αυτά συνδέονται και συνεργάζονται μεταξύ τους. Η δυνατότητα δημιουργίας συναρμολογημάτων μέσω του λογισμικού, συνέβαλε τα μέγιστα σε αυτό. Επιπλέον, διερευνήθηκαν σε βάθος οι δυνατότητες του λογισμικού SolidWorks και των λογισμικών CAD εν γένει.

Όσον αφορά το εκπαιδευτικό κομμάτι, ιδιαίτερη σημασία είχε η επαφή του γράφοντος με τους κανονισμούς σχεδίασης του μονοθέσιου, καθώς πρόκειται για κανονισμούς εφάμιλλους με αυτούς ενός οποιουδήποτε πραγματικού βιομηχανικού προϊόντος. Οι κανονισμοί είναι λεπτομερείς, μακροσκελείς και έχουν συνταχθεί από τη διεθνή ομοσπονδία SAE. Επιπλέον, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι εν γένει παρόμοια με αυτή που ακολουθείται για τη σύλληψη, μελέτη και σχεδίαση ενός οποιουδήποτε βιομηχανικού προϊόντος.

Συνοψίζοντας, η παρούσα Εργασία αποτέλεσε την αφορμή για μία πρώτη εκτενή επαφή με τους κανόνες και τις διαδικασίες της Έρευνας και Ανάπτυξης ενός βιομηχανικού προϊόντος και ιδιαίτερος ενός εκ των πολυπλοκότερων της σύγχρονης εποχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Gillespie T., *Fundamentals of vehicle dynamics*, Society of Automotive Engineers, Warrendale PA, 1992
2. Milliken W. and Milliken D., *Race car vehicle dynamics*, SAE International, Warrendale PA, 1995
3. <http://www.allpar.com>
4. <http://www.carbibles.com>
5. <http://www.dionysopoulos.gr>
6. <http://www.fabtechmotorsports.com>
7. <http://www.fsae.com/forums>
8. <http://www.fsaeonline.com/>
9. <http://www.kfz-tech.de>
10. <https://www.marzocchi.com/Docs/Marzocchi-2013-MTB-lineup-EU.pdf>
11. <http://www.mercedes-benz.com>
12. <http://www.sae.org>
13. <http://www.solidworks.com>
14. <http://www.store.vacmotorsports.com>
15. <http://www.thefactoryfiveforum.com>