



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Εργαστήριο Σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)



Διπλωματική Εργασία

Άγγελου-Μιχαήλ Βαρδή

AM: 2013010144

Σχεδιασμός και κινηματική ανάλυση του συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού

Επιβλέπων: Νικόλαος Μπιλάλης

Στην οικογένειά μου.

Έχοντας φτάσει στο τέλος του κύκλου σπουδών μου και έχοντας αποκτήσει πολύτιμες γνώσεις, σχηματίζει δυνατές φιλίες κι έχοντας ζήσει τις πιο ευχάριστες στιγμές της νεανικής μου ζωής ήρθε πλέον η ώρα της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο και επιβλέποντα Καθηγητή της εργασίας μου κ. Νικόλαο Μπιλάλη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, την πολύτιμη καθοδήγησή του, τις γνώσεις που μου παρείχε καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε για τη βοήθειά μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τους φίλους μου οι οποίοι υπήρξαν το πιο ευχάριστο κομμάτι των φοιτητικών μου χρόνων. Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το δώσω στην οικογένειά μου, στον πατέρα μου Παντελή, στη μητέρα μου Μαρκέλλα και στα αδέλφια μου Γιάννη και Βασίλη που πάντα βρίσκονταν στο πλάι μου και με στήριξαν σε κάθε βήμα της ζωής μου. Η παρακάτω διπλωματική εργασία είναι λοιπόν αφιερωμένη σε αυτούς.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	σελ. 5
Κεφ. 1: Κατηγορίες αναρτήσεων.....	σελ. 6
1.1 Ανεξάρτητες.....	σελ. 6
1.2 Εξαρτημένες.....	σελ. 13
1.3 Ημι-ανεξάρτητες.....	σελ. 16
Κεφ. 2: Αποτελούμενα Μέρη Ανάρτησης.....	σελ. 17
Κεφ. 3: Βασικοί όροι.....	σελ. 20
3.1: Αναρτώμενη μάζα και μη αναρτώμενη μάζα (Sprung and unsprung mass).....	σελ. 20
3.2: Αποτύπωμα επαφής τροχού(ελαστικού) (Contact patch).....	σελ. 21
3.3: Γωνία Camber.....	σελ. 22
3.4: Γωνία Toe.....	σελ. 23
3.5: Άξονας Kingpin (Kingpin Axis).....	σελ. 24
3.6: Γωνία Caster.....	σελ. 24
3.7: Γωνία KPI (King Pin Inclination).....	σελ. 25
3.8: Ακτίνα τριβής του τροχού με το έδαφος (Scrub radius).....	σελ. 27
3.9: Κέντρο μάζας (Κέντρο βάρους) του οχήματος.....	σελ. 28
3.10: Κέντρο κύλισης του σώματος (roll center).....	σελ. 28
3.11: Γωνία Slip (Slip angle).....	σελ. 30
Κεφ. 4: Τρισδιάστατος σχεδιασμός Ανάρτησης διπλού ψαλιδιού με χρήση CAD (Computer aided design)	σελ. 32
4.1: Σασί.....	σελ. 33
4.2: Σύστημα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού.....	σελ. 38
4.2.1: Ψαλίδια.....	σελ. 39
4.2.1.1: Upper wishbone assembly (Άνω ψαλίδι).....	σελ. 39
4.2.1.2: Lower wishbone assembly (Κάτω ψαλίδι).....	σελ. 42
4.2.2: Αμορτισέρ (Shock absorber assembly).....	σελ. 45
4.2.3: Σύστημα τοποθέτησης τροχού (Wheel hub assembly).....	σελ. 53

4.3: Τροχοί (Wheel assembly).....σελ. 60	σελ. 60
4.4: Exploded view.....σελ. 63	σελ. 63
Κεφ. 5: Συσχέτιση μεταξύ των βασικών όρων.....σελ. 75	σελ. 75
5.1: Μεταβολή της γωνίας Camber λόγω της κύλισης του σώματος (Camber – Body roll).....σελ. 75	σελ. 75
5.2: Μεταβολή γωνίας Camber κατά την κατακόρυφη κίνηση του τροχού.....σελ. 80	σελ. 80
5.3: Γωνία Caster και η επιρροή της στη γωνία Camber.....σελ. 83	σελ. 83
5.4: Γωνία KPI και η επιρροή της στην ακτίνα τριβής (Scrub radius) και τη γωνία camber.....σελ. 86	σελ. 86
5.5: Επιρροή της γωνίας toe στην ευστάθεια του οχήματος.....σελ. 95	σελ. 95
5.6: Γεωμετρία Ackermann και anti-Ackermann και η επιρροή της γωνίας slip.....σελ. 99	σελ. 99
Κεφ. 6: Μοντελοποίηση και κινηματική ανάλυση του συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού.....σελ. 103	σελ. 103
6.1: Εισαγωγή.....σελ. 103	σελ. 103
6.2: Μοντελοποίηση.....σελ. 104	σελ. 104
6.2.1: Ορισμός των βασικών όρων του κινηματικού συστήματος.....σελ. 104	σελ. 104
6.3: Κινηματική ανάλυση του μοντέλου.....σελ. 106	σελ. 106
6.3.1: Βρόγχος OABCO.....σελ. 106	σελ. 106
6.3.2: Βρόγχος OADEFO.....σελ. 107	σελ. 107
6.3.3: Περιορισμοί για την εύρεση των θέσεων των αρθρώσεων.....σελ. 107	σελ. 107
6.3.4: Μοντελοποίηση για την εύρεση των γωνιών camber, caster, KPI και toe σε σχέση με τη μετατόπιση του τροχού.....σελ. 108	σελ. 108
6.3.5: Κατασκευή του κινηματικού μοντέλου στο NX 12.0σελ. 113	σελ. 113
6.3.5.1: Καθορισμός αρχικών διαστάσεων του συστήματος ανάρτησης.....σελ. 113	σελ. 113
6.3.5.2: Εισαγωγή διανυσμάτων.....σελ. 117	σελ. 117
6.3.5.3: Πίνακες κατανομής γωνιών ανάρτησης και μετατόπισης του τροχού.....σελ. 120	σελ. 120
6.3.6: Ανασκόπηση και συμπεράσματα.....σελ. 128	σελ. 128
Κεφ. 7: Πηγές.....σελ. 129	σελ. 129
Κεφ. 8: Παράρτημα μηχανολογικών σχεδίων (drawings).....σελ. 133	σελ. 133

Σύστημα Ανάρτησης Αυτοκίνητου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάρτηση του οχήματος θεωρείται ο μηχανισμός ο οποίος συνδέει τον τροχό απευθείας στο σώμα ή σε κάποιο πλαίσιο που είναι συνδεδεμένο σε αυτό. Εφόσον ένα άκαμπτο όχημα με περισσότερους από τρεις τροχούς είναι ένα υπερστατικό σύστημα, είναι αναγκαίο η δομή του οχήματος να είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να επιτρέπει την ταυτόχρονη επαφή των τροχών με το έδαφος. Εναλλακτικά οι τροχοί συνδέονται σε ένα σταθερό και άκαμπτο σώμα μέσω ενός παραμορφώσιμου συστήματος, το σύστημα ανάρτησης. Η λύση αυτή έχει υιοθετηθεί στη μεγάλη πλειοψηφία των οχημάτων ενώ η πρώτη λύση υιοθετήθηκε στον παρελθόν σε άμαξες και γενικά σε οχήματα που κινούνταν με πολύ μικρή ταχύτητα.

Σε πολλές περιπτώσεις στην παραμορφωσιμότητα της ανάρτησης πρέπει να προστεθεί παραμορφωσιμότητα του σώματος γεγονός που παίζει σημαντικό ρόλο στο χειρισμό και στα χαρακτηριστικά άνεσης του οχήματος.

Για να επιτύχουν το σκοπό τους οι αναρτήσεις πρέπει να:

- Επιτρέπουν την κατανομή δυνάμεων που ανταλλάσσονται μεταξύ των τροχών και του εδάφους υπακούοντας στις σχεδιαστικές προδιαγραφές του οχήματος για κάθε κατάσταση φορτίου.
- Καθορίζουν την «αίσθηση» του οχήματος υπό την επίδραση στατικών και ημιστατικών δυνάμεων.
- Εξασφαλίζουν ώστε οι τροχοί να ακολουθούν το προφίλ οδοστρώματος με όσο το δυνατό μικρότερη διακύμανση του ελαστικού.
- Διατηρούν τους τροχούς σε θέση που να επιτρέπουν τον έλεγχο πηδαλιούχησης κατά τη διάρκεια ελιγμών

Αξίζει να σημειωθεί ότι εισάγοντας μια παραμορφώσιμη σύνδεση σε ένα όχημα, εισάγουμε γεωμετρικές παραλλαγές στο σώμα οι οποίες προέρχονται από το φορτίο και από το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Αυτές οι παραλλαγές περιγράφονται μέσω των τριών συντεταγμένων του κέντρου βάρους του οχήματος στο σύστημα συντεταγμένων x, y, z καθώς και τις τρεις γωνίες του οχήματος στο σύστημα αναφοράς yaw, pitch, roll (στροφική οριζόντια κίνηση, κλίση, κύλιση).

Επιπροσθέτως εκτός των προαναφερόμενων λειτουργιών της ανάρτησης που δύνανται να πραγματοποιηθούν σε ένα ελαστικό σύστημα υπάρχει μια ακόμα σημαντική λειτουργία που πραγματοποιεί ένα σύστημα ανάρτησης και αυτή είναι:

- Η απορρόφηση και η εξομάλυνση των κραδασμών που δέχεται ο τροχός από τις ανωμαλίες του δρόμου, οι οποίοι μεταδίδονται στο σώμα του οχήματος

Για την πραγματοποίηση της τελευταίας λειτουργίας είναι αναγκαίο ένα κατάλληλο σύστημα απόσβεσης (damping system). Η λειτουργία απόσβεσης είναι τόσο σημαντική που σε οχήματα με δύο ή τρεις τροχούς εγκαθίστανται αναρτήσεις παρόλο που δεν είναι οχήματα με υπερστατικό σώμα.

Θεωρητικά τα λάστιχα από μόνα τους απομονώνουν το σώμα του οχήματος από τις δυνάμεις που προέρχονται από το οδόστρωμα όμως οι ελαστικές και οι αποσβεστικές τους ιδιότητες δεν είναι

επαρκείς ώστε να επιτύχουν τον κατάλληλο χειρισμό και τα επιθυμητά επίπεδα άνεσης παρά μόνο σε πολύ μικρές ταχύτητες και σε λείους δρόμους.

Συνεπώς οι αναρτήσεις είναι καθοριστικές για την επίτευξη ικανοποιητικής οδικής συμπεριφοράς και άνεσης καθώς και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του κάθε οχήματος.

Όσο για τους τροχούς, πρέπει να είναι ελεύθεροι να κινούνται σε κατεύθυνση σχεδόν κάθετη με το έδαφος σε συνδυασμό με την περιστροφή τους και την αλλαγή της πορείας τους. Η κάθετη κίνησή τους πρέπει να διαχειρίζεται μέσω των συνδέσμων της ανάρτησης ούτως ώστε να εγγυάται η σωστή θέση του ελαστικού σε σχέση με το έδαφος. Η ικανότητα ενός τροχού να αντιδρά στις ασκούμενες δυνάμεις καθορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην επιφάνεια του ισημερινού του τροχού με το έδαφος καθώς και με το κέντρο του τροχού.

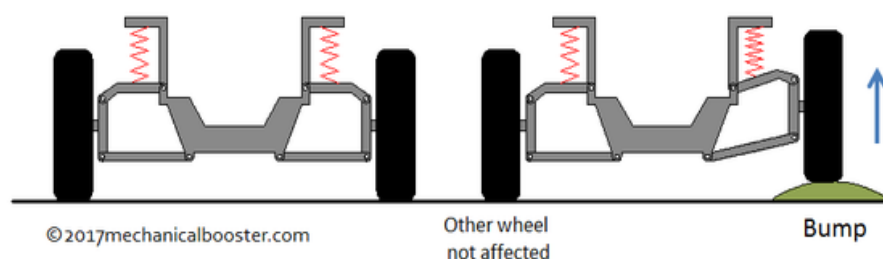
Εάν υποθέσουμε πως η ανάρτηση δρα σαν «φίλτρο» ανάμεσα στο σώμα και στον δρόμο, σχεδιασμένο να περιορίζει το μέγεθος των δυνάμεων που δημιουργούνται από τις ανωμαλίες του δρόμου και από τους ελιγμούς του οδηγού, τότε αυτό το «φίλτρο» δεν θα πρέπει να βλάπτει τη δυνατότητα ελέγχου του οχήματος σε διάφορα σενάρια οδήγησης. Τα κρατήματα του οχήματος δεν εξαρτώνται μόνο από τη μάζα και τη ροπή αδράνειας, τις γεωμετρικές του ιδιότητες (είδος πρόσφυσης, θέση κέντρου βάρους, μήκος μεταξόνιου, είδος οδοστρώματος), τα ελαστικά αλλά και τις αναρτήσεις.

1. Κατηγορίες Αναρτήσεων

Οι αναρτήσεις κατατάσσονται συνήθως σε τρεις κατηγορίες:

1.1 Ανεξάρτητες (independent suspensions)

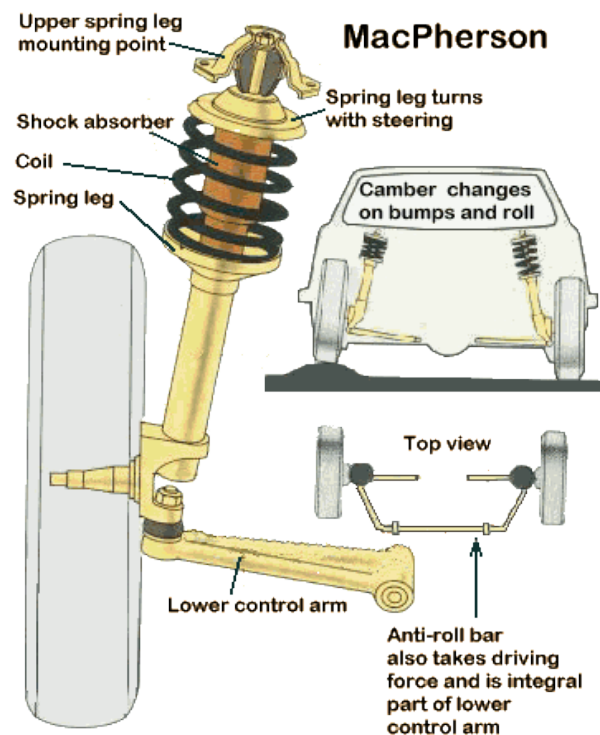
Σε αυτού του είδους τις αναρτήσεις δεν υπάρχει μηχανική σύνδεση των δυο κέντρων των τροχών που κινούνται στον ίδιο άξονα. Έτσι μια δύναμη που ασκείται σε έναν τροχό δεν επηρεάζει τον άλλο τροχό (ο σύνδεσμος πηδαλίου, η αντιολισθητική ράβδος και τα βοηθητικά πλαίσια δε λαμβάνονται υπόψιν). Συγκεκριμένα το κύριο πλεονέκτημα των ανεξάρτητων αναρτήσεων είναι ότι επιτρέπουν την κάθετη κίνηση ενός τροχού χωρίς να επηρεάζεται η κίνηση του άλλου τροχού. Πρέπει οι σύνδεσμοι να περιορίζουν πέντε από τους έξι βαθμούς ελευθερίας του τροχού (του κέντρου του τροχού συγκεκριμένα). Θεωρητικά ο μη περιορισμένος βαθμός ελευθερίας πρέπει να είναι πάντα κάθετος στο έδαφος όμως αυτό πρακτικά είναι αδύνατο. Παρόλα αυτά οι ανεξάρτητες αναρτήσεις διαθέτουν πολλούς σχηματισμούς και διατάξεις ώστε να επιτύχουν όσο το δυνατό καλύτερα το παραπάνω χαρακτηριστικό.



Independent Suspension

Ανάρτηση MacPherson

Εφευρέθηκε το 1955 από τον Earle S. MacPherson και αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ανάρτησης παγκοσμίως για μικρού και μεσαίου μεγέθους οχήματα. Ορισμένες βιομηχανίες υιοθετούν την ανάρτηση αυτή και σε μεγάλα οχήματα και μερικές φορές και σε αυτοκίνητα απόδοσης. Κυρίως χρησιμοποιείται στον μπροστινό άξονα και σπανιότερα και στον πίσω. Αποτελείται από ένα μοναδικό άκρο (ελατήριο και αποσβεστικό σύστημα), την αντιολισθητική μπάρα (anti roll bar) και ένα ψαλίδι στο κάτω μέρος της ανάρτησης (lower arm). Η διασταύρωση μεταξύ της αναρτώμενης με την μη αναρτώμενη μάζα πραγματοποιείται με σφαιροειδή άρθρωση (ball joint) από τη μεριά του τροχού κι έναν άξονα πλευρικού πλαισίου (side frame axis) ο οποίος επιτρέπει διάφορες ρυθμίσεις της ανάρτησης. Το άκρο το οποίο αποτελεί το σύστημα ελατηρίου-αποσβέστη είναι συνδεδεμένο στον φορέα του κέντρου του τροχού (hub carrier). Το συγκεκριμένο άκρο χρησιμοποιείται και ως άξονας πηδαλιούχησης. Ο αποσβέστης έχει δύο σκοπούς. Να απαλύνει τη σχετική κίνηση μεταξύ του τροχού και του σώματος και να συμμετέχει στην κινηματική του τροχού μέσω της αντιολισθητικής ράβδου και του κάτω άκρου (lower arm). Η δοκός του αποσβέστη έχει μεγαλύτερη διάμετρο (25 mm) σε σχέση με έναν αποσβέστη άλλης κατηγορίας ανάρτησης (14 mm).

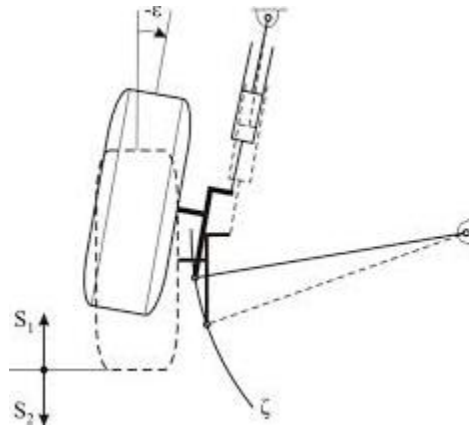


Πλεονεκτήματα ανάρτησης MacPherson

- Εύκολη συναρμολόγηση
- Χαμηλό κόστος σε σύγκριση με την απόδοση που προσφέρει
- Μικρή μάζα του συστήματος
- Μικρό πλάτος που αφήνει περισσότερο χώρο για τον κινητήρα λόγω της έλλειψης του επάνω ψαλιδιού, πράγμα χρήσιμο για μικρού μεγέθους αυτοκίνητα.
- Η αναλογία μετατόπισης του ελατηρίου σε σχέση με τον αποσβέστη είναι 1 (damper displacement/spring displacement = 1)

Μειονεκτήματα ανάρτησης MacPherson

- Χαμηλή ακρίβεια
- Υψηλό ύψος της ανάρτησης
- Υψηλή ακτίνα τριβής (scrub radius, θα αναλυθεί παρακάτω)
- Μετατόπιση του άξονα kingpin (θα αναλυθεί παρακάτω)
- Περιορισμένες δυνατές ρυθμίσεις ανάρτησης
- Αύξηση της γωνίας camber κατά τη διάρκεια παλμών της ανάρτησης

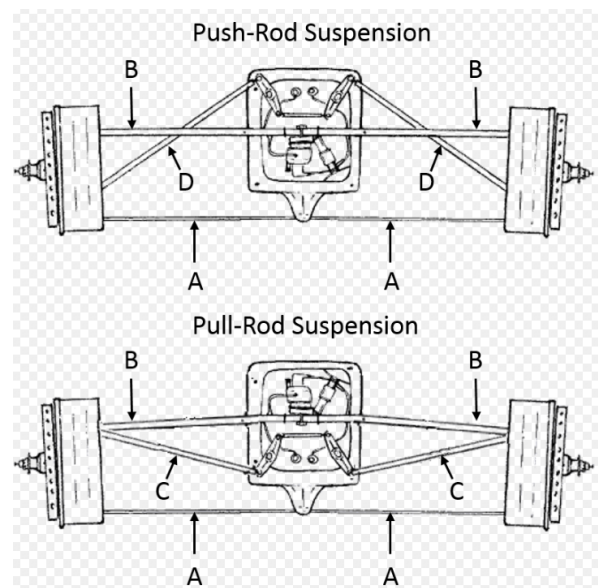
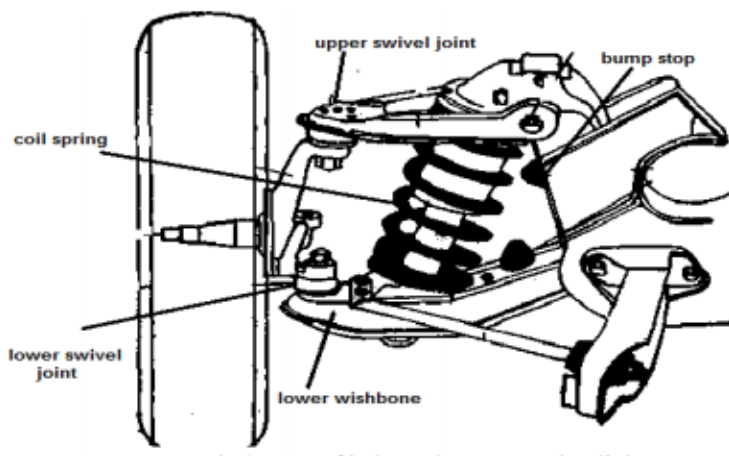


Ανάρτηση με διπλά ψαλίδια (Double Wishbone suspension)

Ως το σύστημα ανάρτησης που αποτελεί το βασικό αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας θα αναλυθεί περαιτέρω στα παρακάτω κεφάλαια. Η ανάρτηση με διπλά ψαλίδια ξεκίνησε να χρησιμοποιείται από αυτοκινητοβιομηχανίες τη δεκαετία του 1930 και αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες ανάρτησης παγκοσμίως. Το συγκεκριμένο σύστημα ανάρτησης χρησιμοποιεί δύο ψαλίδια (wishbones) σχήματος A (ή σπανιότερα σχήματος L και μια απλής μπάρας). Κάθε ψαλίδι έχει δυο σημεία τοποθέτησης στο σασί και ένα σημείο τοποθέτησης στην άρθρωση στο κέντρο του τροχού. Τα πάνω και κάτω ψαλίδια συνδέονται με τους τροχούς με σφαιρικές αρθρώσεις (ball joints) οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση του τροχού σε διάφορες κατευθύνσεις. Η κατακόρυφη κίνηση ελέγχεται μέσω του αποσβέστη κραδασμών (shock absorber) και του ελατηρίου (coil springs) τα οποία είναι τοποθετημένα ανάμεσα η δίπλα στα

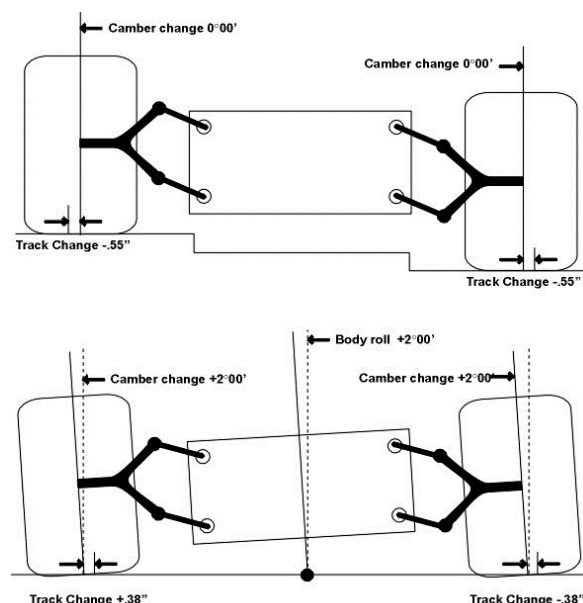
ψαλίδια. Ρυθμίζοντας προσεκτικά τη σχέση μηκών και σχετικών γωνιών μεταξύ των άνω και κάτω ψαλιδιών, ένας μηχανικός μπορεί να τροποποιήσει τον αίσθηση και το χειρισμό του οχήματος. Οι ρυθμίσεις αυτές που αφορούν την κίνηση των τροχών περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως η γωνία *camber*, η γωνία *caster*, το σχήμα *toe*, το ύψος του κέντρου κύλισης, η ακτίνα τριβής των τροχών (*scrub radius*) και το *scuff* (όλες οι προαναφερθείσες έννοιες θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια). Οι αναρτήσεις με διπλά ψαλίδια χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα απόδοσης και σπορ σεντάν και κουπέ αυτοκίνητα. Επίσης παραλλαγές της ανάρτησης αυτής όπως η τεχνολογία εφελκυστικής ράβδου (*pushrod*) ή θλιπτικής ράβδου (*pullrod*) χρησιμοποιείται στα πρωταθλήματα μηχανοκίνητου αθλητισμού όπως η Formula 1, η Indycar και το WEC (World Endurance Championship).

Double wishbone suspension



Πλεονεκτήματα ανάρτησης με διπλά ψαλίδια

- Βέλτιστος σχεδιασμός των ελαστο-κινηματικών παραμέτρων, ειδικά στην επαναφορά της γωνίας *camber*.



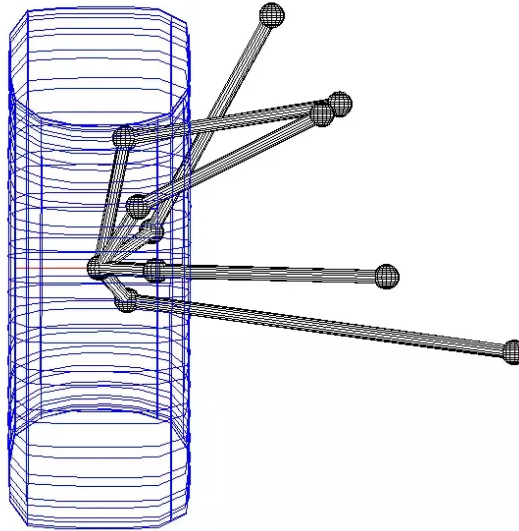
- Οι αποσβέστες κραδασμών δεν αποτελούν δομικό κομμάτι με αποτέλεσμα τη βελτίωση της άνεσης λόγω της μείωσης υστέρησης.
- Δυνατότητα μείωσης του ύψους του προφίλ του καπό

Μειονεκτήματα ανάρτησης με διπλά ψαλίδια

- Μεγαλύτερο κόστος κατασκευής λόγω του μεγαλύτερου αριθμού κομματιών (ένα παραπάνω ψαλίδι και τα ρουλεμάν του σε σχέση με την ανάρτηση MacPherson).
- Παραπάνω κομμάτια για την σύνδεση του άνω ψαλιδιού.
- Ο χώρος που καταλαμβάνει το άνω ψαλίδι είναι αξιοσημείωτος. Τα οχήματα με εγκάρσια τοποθετημένους κινητήρες απαιτούν την υψηλή έκδοση αυτής της ανάρτησης η οποία λόγω του μειωμένου μήκους του άνω ψαλιδιού μειώνει τη δυνατότητα βέλτιστης ελαστο-κινηματικής απόδοσης.
- Ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων και ρουλεμάν μπορούν να επηρεάσουν τις γωνίες των τροχών λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων στα λάστιχα των ρουλεμάν με αρνητικές επιπτώσεις στη φθορά των ελαστικών.
- Η υψηλή τιμή φορτίου πέδησης μπορεί να έχει αρνητική επιρροή στην ελαστικότητα στον ευθύ άξονα.

Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων (Multi-link suspension)

Στις αναρτήσεις πολλαπλών συνδέσμων χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρεις πλευρικές δοκοί και μια ακόμη (σχεδόν) κάθετη ή οριζόντια. Κάθε άκρο της ανάρτησης αυτής έχει σκοπό τη μείωση ή και την αποτροπή των έξι βαθμών ελευθερίας του άξονα (πάνω, κάτω, δεξιά, αριστερά, μπροστά, πίσω). Σε ορισμένες περιπτώσεις τα άκρα διαθέτουν κεκαμμένους σωλήνες (σχήματος Γάμα) παράλληλα με το μάκρος τους ώστε να επιτυγχάνουν το απαραίτητο ελεύθερο ύψος (clearance) γύρω από έναν άξονα ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν την κατάλληλη γωνία προσβολής ώστε να στερεώνονται στο κέντρο. Όλα μαζί τα άκρα τοποθετούν τον τροχό στο σωστό σημείο και σχηματίζουν ένα σταθερό πλαίσιο αγκυροβολημένο στο κέντρο το οποίο το εμποδίζει από το να κινείται με τρόπο που δε θα έπρεπε. Κάθε δοκός είναι τοποθετημένη σε αρθρώσεις και στις δυο κατευθύνσεις (δεξιά και αριστερά) και είναι ελεύθερη να κινείται κάθετα στην κίνηση της ανάρτησης αλλά μόνο εφόσον τα άκρα της ανάρτησης δεν είναι λυγισμένα ή σπασμένα.



Πλεονεκτήματα Ανάρτησης πολλαπλών συνδέσμων (Multi-link suspension)

- Είναι ο καλύτερος συνδυασμός μεταξύ οδηγικού χειρισμού, άνεσης και διαθέσιμου χώρου.
- Είναι κατάλληλη για οχήματα off-road εφόσον επιτρέπει στο όχημα να είναι πιο ελαστικό και πιο προσαρμόσιμο στις διακυμάνσεις του εδάφους.
- Δίνει το πλεονέκτημα στον σχεδιαστή-μηχανικό να αλλάζει διάφορες παραμέτρους της ανάρτησης χωρίς να επηρεάζεται ολόκληρος ο μηχανισμός σε αντίθεση με την ανάρτηση διπλών ψαλιδιών.

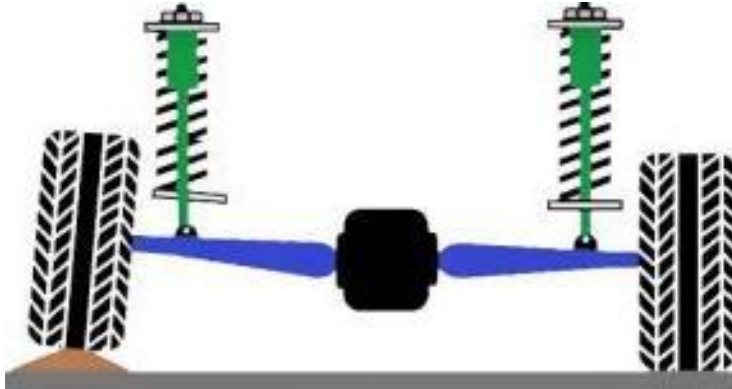
Μειονεκτήματα Ανάρτησης πολλαπλών συνδέσμων (Multi-link suspension)

- Υψηλή περιπλοκότητα σχεδιασμού και κατασκευής καθώς η γεωμετρία της απαιτεί ανάλυση και έλεγχο μέσω τρισδιάστατου σχεδιαστικού λογισμικού CAD (computer aided design).
- Υψηλό κόστος κατασκευής και συνεπώς υψηλή τιμή πώλησης λόγω των πολλών αποτελούμενων μερών και των υψηλών διεργασιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Ανάρτηση αιωρούμενου άξονα (Swing axles)

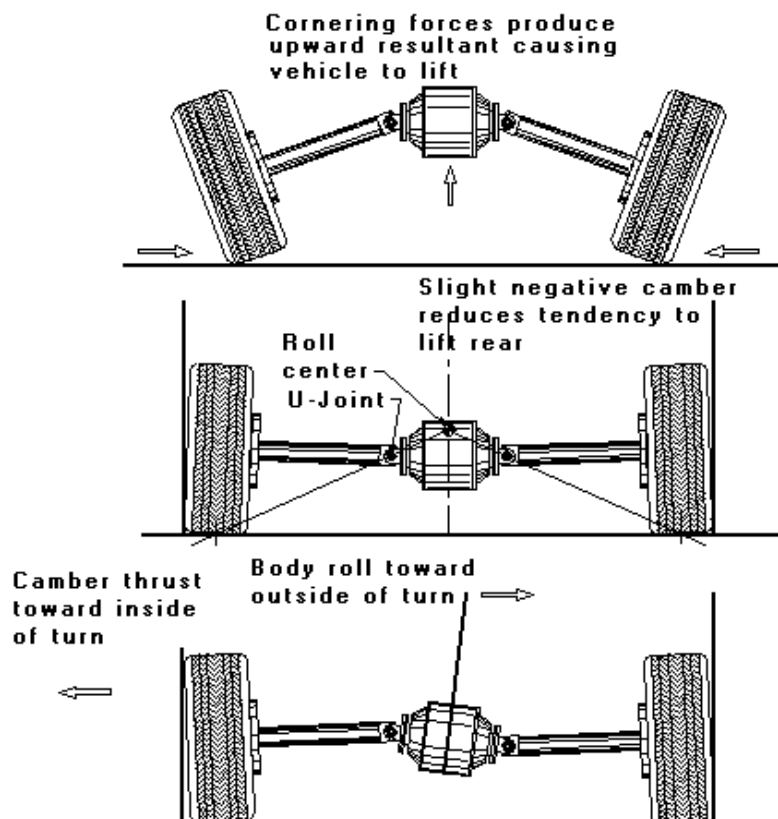
Η ανάρτηση αιωρούμενου άξονα είναι μια φθηνή μέθοδος ανάρτησης του οδηγούντος άξονα ειδικά στις περιπτώσεις που ο κινητήρας και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι συνδεδεμένα μαζί. Μια καθολική άρθρωση (universal joint) βρίσκεται σε κάθε ημι-δοκό εκτός του διαφορικού συστήματος. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον κάθε τροχό να αντιδρούν στις ανωμαλίες του δρόμου ανεξάρτητα. Ο αιωρούμενος

άξονας απομονώνει τον κινητήρα και το κιβώτιο από τους κραδασμούς που προκαλούνται από τα εξογκώματα του δρόμου το οποίο σημαίνει πως το σύστημα κινητήρα-κιβωτίου δε χρειάζεται να κινηθεί ώστε να τους απορροφήσει.



Πλεονεκτήματα Ανάρτησης αιωρούμενου άξονα

- Μειωμένη μη αναρτώμενη μάζα εφόσον το διαφορικό είναι τοποθετημένο στο σασί.
- Εξαλείφει την ταυτόχρονη αλλαγή της γωνίας camber και στους δυο απέναντι τροχούς.
- Χαμηλό κόστος και περιπλοκότητα κατασκευής.

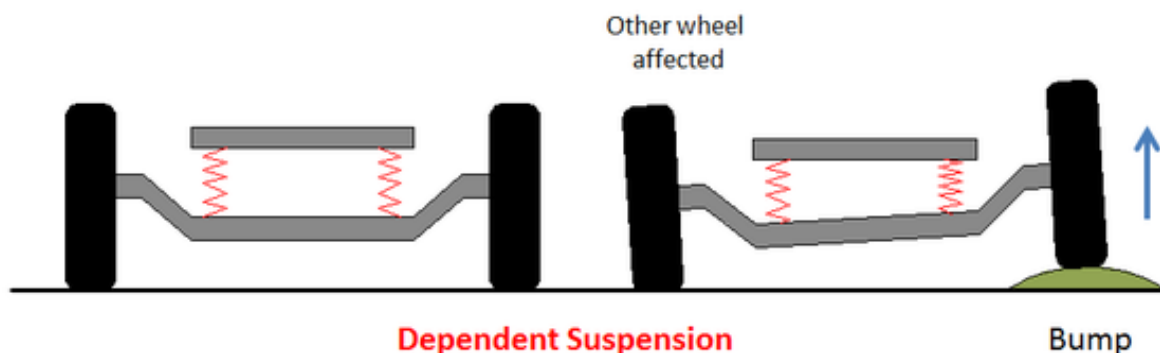


Μειονεκτήματα Ανάρτησης αιωρούμενου άξονα

- Κανένας έλεγχος της γωνίας camber εφόσον η κίνηση των αξόνων είναι κυκλική με κέντρο το διαφορικό με αποτέλεσμα τη απότομη αλλαγή της γωνίας camber και συνεπώς του τμήματος επαφής του ελαστικού με το έδαφος.
- Αυξομειώσεις ύψους (jacking) όταν το όχημα διασχίζει οδόστρωμα με εξογκώματα, οι οποίες αυξάνουν το κέντρο βάρους με αποτέλεσμα τον κίνδυνο ανασήκωσης του οχήματος ή ακόμα και ανατροπής (rollover).
- Οι αλλαγές της γωνίας camber προκαλούν επίσης μείωση της προσκόλλησης των πίσω τροχών λόγω των δυνάμεων πηδαλιούχησης προκαλώντας υπερστροφή (oversteer).

1.2 Εξαρτημένες (dependent suspensions)

Οι εξαρτημένες αναρτήσεις ή άκαμπτοι άξονες (rigid axles) παρέχουν μια συμπαγής σύνδεση μεταξύ των δύο τροχών του ίδιου άξονα. Έτσι κάθε κίνηση ενός τροχού λόγω ανωμαλιών του οδοστρώματος επηρεάζει τον συνδεδεμένο τροχό. Ως αποτέλεσμα της όλο και συνεχόμενης βελτίωσης των σύγχρονων οχημάτων οι εξαρτημένες αναρτήσεις δεν είναι πλέον τόσο κοινές σε επιβατικά οχήματα. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται σε εμπορικά οχήματα και σε οχήματα εκτός δρόμου (off-road). Διαθέτουν το πλεονέκτημα της σχετικά απλής κατασκευής και εξαλείφουν σχεδόν ολοκληρωτικά τη μεταβολή της γωνίας camber των τροχών και συνεπώς μειώνουν δραστικά τη φθορά των ελαστικών. Υπάρχουν πολλοί τρόποι εγκατάστασης ενός άκαμπτου άξονα (solid axle). Οι πιο γνωστοί τύποι εξαρτημένων αναρτήσεων είναι:



Φύλλα Σούστας (Leaf springs)

Σε αυτή την κατηγορία ο άξονας είναι τοποθετημένος σε οριζόντια φύλλα σούστας τα οποία διαθέτουν ελαστικότητα στον κάθετο άξονα y ενώ ταυτόχρονα είναι δύσκαμπτα στον οριζόντιο άξονα x . Τα φύλλα αυτά είναι συνδεδεμένα στο σασί με πύρο στο ένα άκρο και με περιστρεφόμενο σύνδεσμο στο άλλο. Αυτή η σύνδεση επιτρέπει τη μεταβολή του μήκους της ανάρτησης και συνεπώς την προσαρμογή της στο εκάστοτε φορτίο που ασκείται στο όχημα.

Ένα αρχικό μειονέκτημα των φύλλων σούστας ήταν η ενδιάμεση τριβή ανάμεσα στα φύλλα η οποία επηρέαζε την απόδοση και την άνεση του οχήματος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την αντικατάσταση των πολλαπλών φύλλων με ένα ενιαίο φύλλο το οποίο διαθέτει μεγάλο πάχος κοντά στο κέντρο και μικρό πάχος στις άκρες. Η απαίτηση στη σύγχρονη εποχή για άνετη οδήγηση στα επιβατικά οχήματα επιβάλλει την υιοθέτηση φύλλων υψηλής ελαστικότητας πράγμα που καθιστά αυτού του είδους αναρτήσεις ανίκανες να διαχειριστούν υψηλές ροπές πέδησης και επιτάχυνσης οδηγώντας σε axle tramp δηλαδή ανασήκωση των φύλλων από τη μία μεριά του άξονα και καθίζηση των φύλλων στην άλλη μεριά λόγω επιτάχυνσης ή πέδησης αναλόγως. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού είναι η χρήση δοκών Panhard οι οποίοι ελέγχουν τις πλευρικές εκτροπές και η χρήση υστερούντων βραχιόνων (trailing arms) οι οποίοι αντιστέκονται στις ροπές επιτάχυνσης και πέδησης. Παρά όμως αυτές τις βελτιώσεις αυτή η κατηγορία αναρτήσεων χρησιμοποιείται πλέον σπάνια σε επιβατικά οχήματα. Παρόλα αυτά χρησιμοποιούνται σε οχήματα τα οποία δεν είναι υψηλής σημασίας η άνεση όπως για παράδειγμα μεσαίου βεληνεκούς εμπορικά οχήματα στα οποία σημασία έχει η χωρητικότητα φορτίου. Σε αυτά τα οχήματα για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που αναπτύχθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται βαρύτερες ή διπλού σταδίου αναρτήσεις.



Πλεονεκτήματα φύλλων σούστας:

- Εξαιρετικά απλός σχεδιασμός
- Είναι η μοναδική ανάρτηση που επιτρέπει πλήρη επαναφορά της γωνίας camber λόγω κύλισης (roll).
- Υψηλή ανθεκτικότητα κατάλληλη για εκτός δρόμου (off-road) και βαρέα (heavy duty) οχήματα.
- Οι παλμοί των τροχών είναι υψηλότεροι των παλμών της ανάρτησης λόγω της κύλισης πράγμα που επιτρέπει σε off-road οχήματα να ξεπερνούν εγκάρσια χαντάκια.

Μειονεκτήματα φύλλων σούστας:

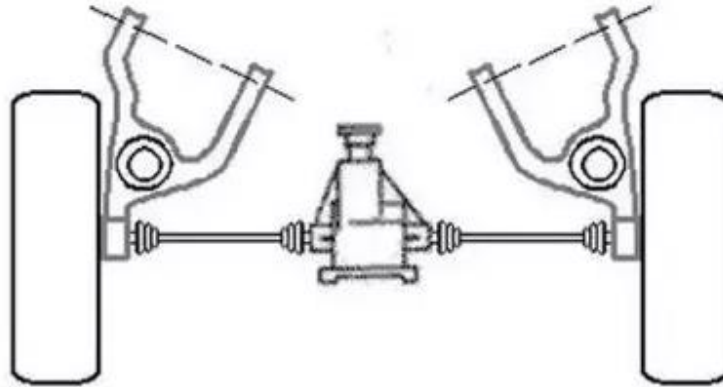
- Υψηλή υψομετρική μεταβολή του δαπέδου του σώματος που οδηγεί σε μείωση του χώρου αποσκευών.
- Υψηλός περιορισμός στις θήκες των τροχών (wheel cases) γεγονός που μειώνει το πλάτος του χώρου αποσκευών
- Υψηλή μη-αναρτώμενη μάζα.
- Οι γωνίες λειτουργίας των τροχών δεν μπορούν να ρυθμιστούν.
- Ανεπαρκή ελαστο-κινηματικά χαρακτηριστικά.
- Μικρή ελαστικότητα στον ευθύ άξονα (τον άξονα κίνησης του οχήματος).
- Μικρή στιβαρότητα κύλισης (roll stiffness).
- Δονήσεις που προκαλούνται από τύπου S παραμορφώσεις στα φύλλα λόγω axle tramp.

**Υστερούντες Βραχίονες (Trailing arms)**

Αυτή η κατηγορία ανάρτησης εφαρμόζεται σε μικρού και μεσαίου μεγέθους αυτοκίνητα και μόνο στον πίσω άξονα.

Και οι δύο τροχοί είναι στερεωμένοι σε βραχίονα με πορεία παράλληλη στην κίνηση των τροχών, ο οποίος βραχίονας είναι ελεύθερος να περιστρέφεται σε σχέση με το σώμα. Ο άξονας περιστροφής των δύο βραχιόνων είναι συνήθως ο ίδιος και είναι παράλληλος στον άξονα y του οχήματος. Κατά τη διάρκεια των παλμών της ανάρτησης το μεταξόνιο επηρεάζεται από αυτή την κίνηση όμως οι γωνίες toe παραμένουν σταθερές. Η γωνία camber των τροχών είναι ανάλογη της

κύλισης του οχήματος (body roll) δηλαδή δεν υπάρχει ανάκαμψη της γωνίας camber (camber recovery).



Πλεονεκτήματα υστερούντων βραχιόνων:

- Η υστέρηση είναι πολύ χαμηλή όταν γίνεται χρήση ρουλεμάν.
- Η διείσδυση της ανάρτησης στην περιοχή που βρίσκεται ο χώρος αποσκευών είναι ελάχιστη.
- Είναι απλή στην κατασκευή και συνεπώς έχει χαμηλό κόστος παραγωγής.
- Είναι εύκολη στη συναρμολόγηση
- Είναι κατάλληλη για οδηγούντες άξονες επίσης.
- Διαθέτει μειωμένη μη αναρτώμενη μάζα (θα αναλυθεί παρακάτω).

Μειονεκτήματα υστερούντων βραχιόνων:

- Εγκάρσιες παραμορφώσεις των βραχιόνων που προκαλούνται από τις στρωφικές δυνάμεις κατά τη διάρκεια πηδαλιούχησης προκαλούν υπερστροφή.
- Δεν υπάρχει ανάκαμψη της γωνίας camber (camber recovery).
- Χαμηλή ελαστικότητα στον ευθύ άξονα (παράλληλα με την κίνηση του οχήματος) λόγω της ακαμψίας των υψηλά φορτωμένων ρουλεμάν
- Δεν υπάρχουν ανεξάρτητες παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να βελτιωθεί η ελαστοκινηματική συμπεριφορά
- Υψηλή μεταφορά δονήσεων από τους τροχούς λόγω της ακαμψίας των ρουλεμάν πάλι λόγω της υψηλής τιμής φορτίου των ρουλεμάν.

1.3 Ημι-ανεξάρτητες (semi-independent suspensions)

Οι ημι-ανεξάρτητες αναρτήσεις διαθέτουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά ανάμεσα στις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Σε αυτή την κατηγορία τα κέντρα των τροχών δεν μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα διότι

δε συνδέονται με μια αρθρωτή κατασκευή. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κατασκευής αυτής εξασφαλίζουν ότι η ευκαμψία δεν παραμελείται. Οι κατασκευές αυτές συμπεριλαμβάνουν τους λεγόμενους περιστρεφόμενους άξονες (twist axles).

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των κατηγοριών αυτών που ξεχωρίζει τις περιστρεφόμενες από τις μη περιστρεφόμενες αναρτήσεις είναι ότι ενώ οι ανεξάρτητες συναρτήσεις είναι εξ αρχής σχεδιασμένες ως περιστρεφόμενες, οι εξαρτημένες αναρτήσεις δεν εφαρμόζονται σε άξονες πηδαλιούχησης με εξαίρεση μερικά βιομηχανικά και off-road οχήματα. Το ίδιο ισχύει άνευ εξαίρεσης και για τις ημι-ανεξάρτητες αναρτήσεις.

Τα περισσότερα είδη αναρτήσεων μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στους κινητήριους όσο στους αδρανείς άξονες χωρίς να μεταβάλλεται ο αρχικός σχεδιασμός της ανάρτησης με εξαίρεση τη δυσκαμψία των αρθρώσεων.

Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τα αποσβεστικά και τα ελαστικά συστήματα, οι αναρτήσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε *παθητικές* ή *ενεργές*. Στην πρώτη κατηγορία η ελαστική αντίδραση του συστήματος ανάρτησης καθορίζεται μόνο από την παραμόρφωση του καθώς το σύστημα απόσβεσης μπορεί να σπαταλήσει μόνο ένα μέρος της λαμβάνουσας ενέργειας. Στη δεύτερη κατηγορία το σύστημα ανάρτησης μπορεί να δεχθεί ενέργεια από άλλες πηγές (τον κινητήρα ή κάποια ενδιάμεση αποθήκη ενέργειας του κινητήρα) για να επηρεάσει την κινητικότητα του σώματος με σκοπό τη μείωση της ώστε να επέλθει σε κατάσταση στατικής ισορροπίας.

Ο σκοπός αυτού του είδους ανάρτησης είναι να περιορίζει τη μετατόπιση του σώματος στο ελάχιστο, πράγμα απαραίτητο ώστε να δίνεται στον οδηγό η αντίληψη της ευστάθειας του οχήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πλειοψηφία τους οι παραγόμενες αναρτήσεις οχημάτων είναι παθητικές.

2. Αποτελούμενα Μέρη Ανάρτησης

Για την επίτευξη των λειτουργιών που περιγράφηκαν παραπάνω οι αναρτήσεις συναρμολογούνται από πληθώρα εξαρτημάτων τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Ρουλεμάν ή Σύνδεσμοι (Bearing components or linkages)

Αποτελούν μέρη του μηχανισμού που συνδέει τον τροχό στο σώμα και εγγυόνται τους βαθμούς ελευθερίας των τροχών και της σωστής θέσης τους αναφορικά με το έδαφος. Επίσης καθορίζουν τη σχετική κίνηση του τροχού αναφορικά με το σώμα του οχήματος και τέλος μεταφέρουν στο σώμα μέρος του φορτίου που προκύπτει από το κομμάτι επαφής του ελαστικού με το έδαφος.

Ρουλεμάν



Σύνδεσμοι



Πρωταρχικά ελαστικά μέρη (Primary elastic members)

Περιλαμβάνουν ελατήρια (ελικοειδή ελατήρια, ημιελλειπτικά ελατήρια (σούστες), ράβδοι στρέψης, πνευματικά συστήματα), αντιστρεπτικές ράβδους (anti-roll bars) και stop springs. Αυτά τα μέρη συνδέουν τον τροχό με το σώμα ελαστικά και αποθηκεύουν την ενέργεια που παράγεται από το ανομοιόμορφο προφίλ του οδοστρώματος και καθορίζουν τη θέση και στάση του σώματος με βάση το φορτίο που ασκείται στο σώμα.

Ελατήρια



Αντιστρεπτικές ράβδοι



Σούστες



Πνευματικά συστήματα



Δευτερεύοντα ελαστικά μέρη (Secondary elastic members)

Περιλαμβάνουν ελαστικούς μονωτήρες (bushings) στις αρθρώσεις συνδέσμων. Σε κάποιες από αυτές τις αρθρώσεις παρέχεται ελαστική προσαρμοστικότητα.

Αρχικά αυτή η ιδιότητα ήταν αντιληπτή ως μειονέκτημα καθώς αποφεύγονταν η λίπανση των αρθρώσεων και γινόταν χρήση ελαστομερικών αρθρώσεων.

Πιο πρόσφατα όμως έγινε κατανοητό πως αυτή η ιδιότητα μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να βελτιωθεί ο σχεδιασμός της ελαστο-κινηματικής συμπεριφοράς της ανάρτησης και των ιδιοτήτων άνεσης της.

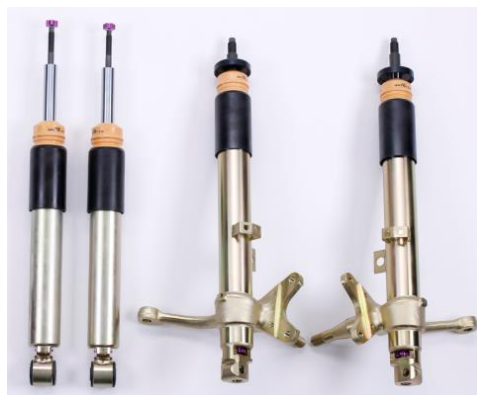
Η παραμόρφωση των αρθρώσεων αυτών παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του χειρισμού του οχήματος.

Μονωτήρες



Αποσβεστικά μέρη (Damping members)

Είναι στην ουσία οι απορροφητές κραδασμών ή αμορτισέρ (shock absorbers), άλλα πρέπει να θυμόμαστε πως τόσο τα πρωταρχικά όσο και τα δευτερεύοντα ελαστικά μέρη έχουν μη αμελητέα χωρητικότητα σπαταλώμενης ενέργειας. Τα αμορτισέρ είναι υπεύθυνα για να ξοδεύουν την ελαστική ενέργεια που αποθηκεύεται από τα ελαστικά μέρη και να επιτρέπουν την ταλαντούμενη απόσβεση του σώματος αποφεύγοντας στατικούς κραδασμούς ή αντηχήσεις.

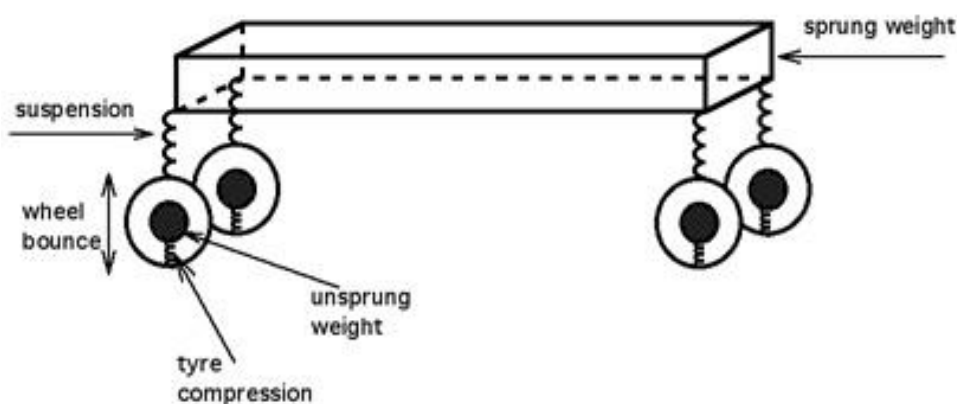




3. Βασικοί Όροι

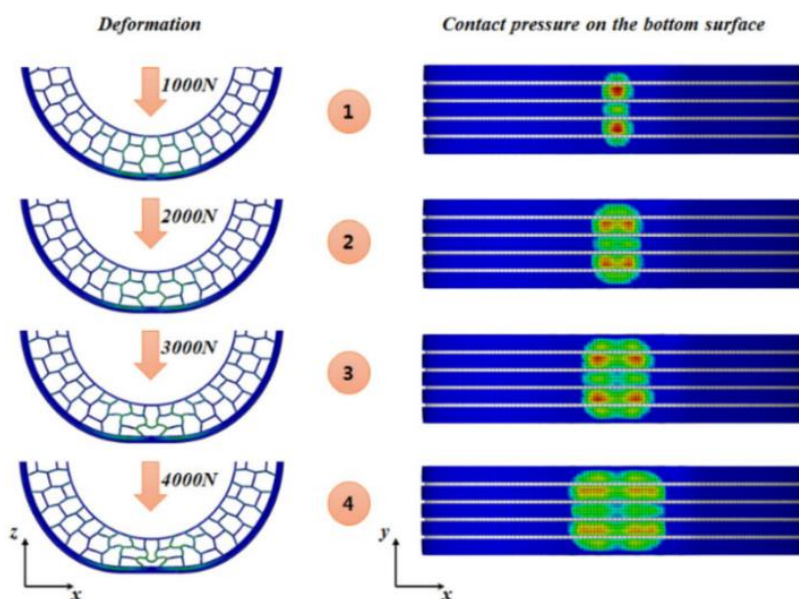
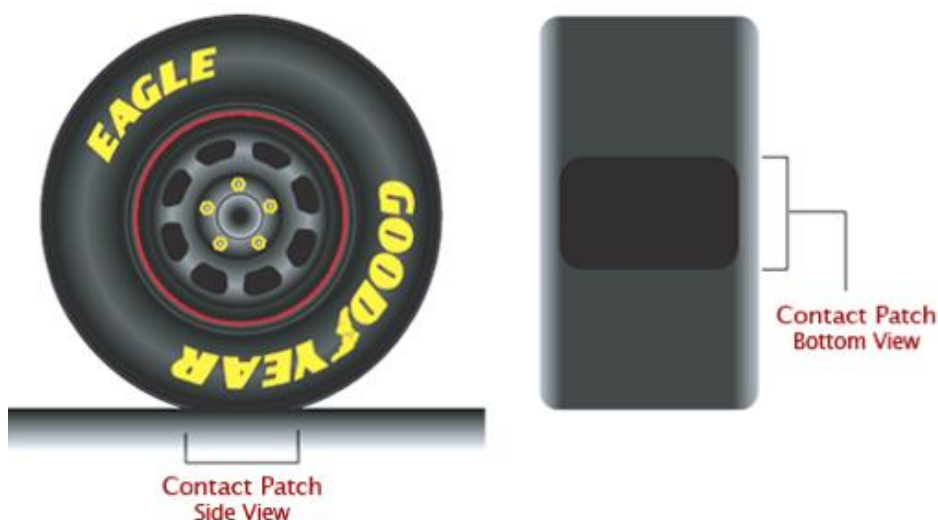
3.1 Αναρτώμενη μάζα και μη αναρτώμενη μάζα (Sprung and unsprung mass)

Ορίζουμε ως αναρτώμενη μάζα το μέρος της συνολικής μάζας του οχήματος το οποίο είναι ελεύθερο να κινείται σε σχέση με το έδαφος λόγω της εφαρμογής της ανάρτησης. Αυτή περιλαμβάνει το σασί, την καμπίνα, τον κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, το ντεπόζιτο, το χώρο αποσκευών, το σώμα του οχήματος και γενικώς ό,τι αναρτάται από το σύστημα ανάρτησης. Το μέρος της συνολικής μάζας του οχήματος το οποίο δεν αλλάζει τη θέση του και δεν αναρτάται από το σύστημα ανάρτησης ονομάζεται μη αναρτώμενη μάζα. Η αναρτώμενη μάζα αποτελείται από όλα τα μέρη της ανάρτησης, τους συνδέσμους, τα δισκόφρενα, τις δαγκάνες των φρένων και προφανώς τους τροχούς. Μερικά τμήματα της ανάρτησης συμπεριλαμβάνονται ταυτόχρονα στην αναρτώμενη και στη μη αναρτώμενη μάζα του οχήματος. Για να εκτιμηθεί η συνεισφορά του τμήματος σε αυτές τις δύο κατηγορίες, η μάζα του τμήματος διαχωρίζεται σε δύο μέρη συγκεντρωμένα ιδεωδώς στις αρθρώσεις της ανάρτησης με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η ροπή αδράνειας και να σταθεροποιείται η θέση του κέντρου βάρους.



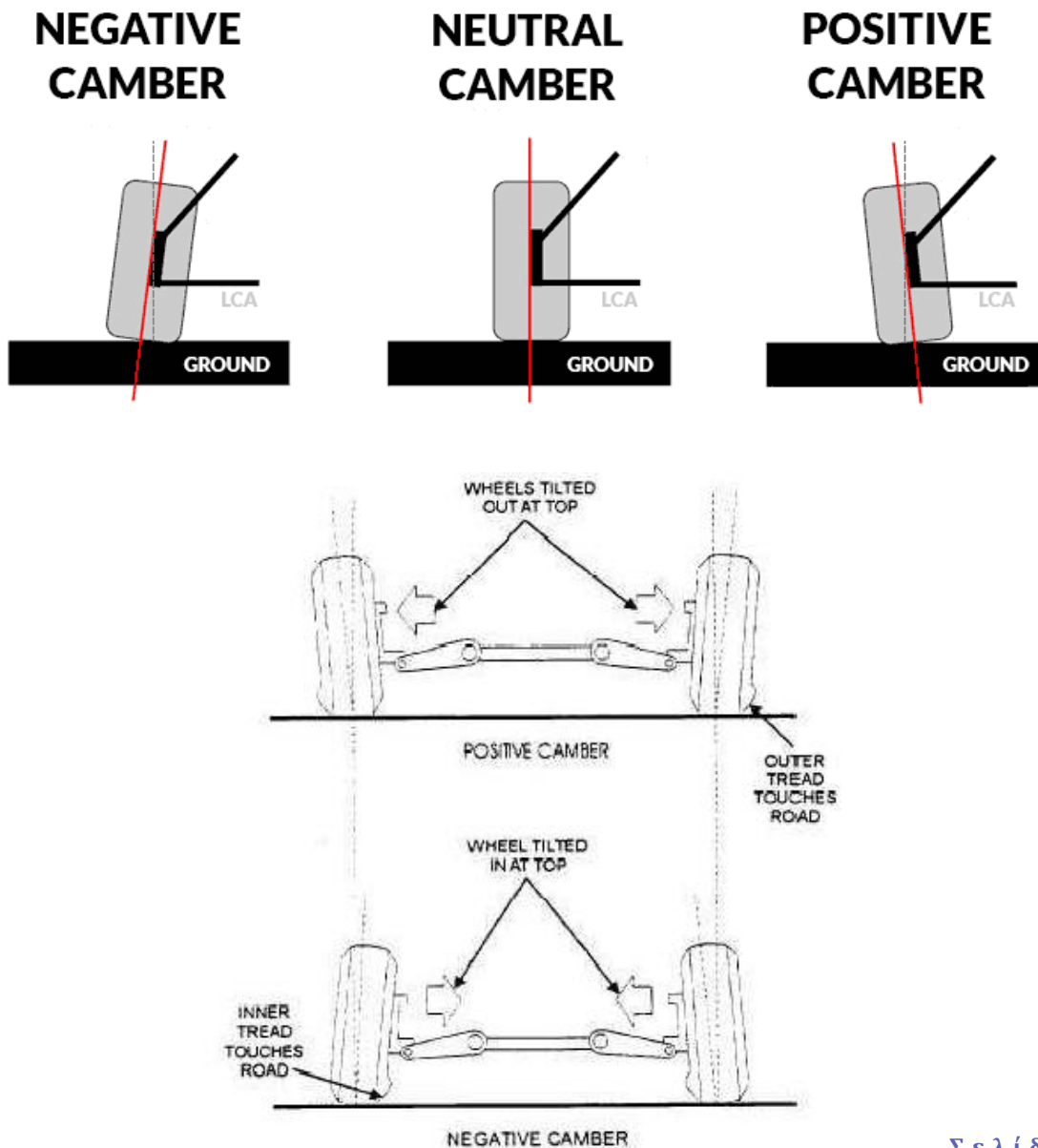
3.2 Αποτύπωμα επαφής τροχού(ελαστικού) (Contact patch)

Ως αποτύπωμα επαφής του τροχού ορίζουμε το τμήμα (ποσοστό) του ελαστικού το οποίο ανά πάσα στιγμή βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Το αποτύπωμα επαφής δημιουργεί την πρόσφυση η οποία είναι υπεύθυνη για την επιτάχυνση, επιβράδυνση και πηδαλιούχηση του οχήματος. Αποτελεί από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που βελτιστοποιεί ένα σύστημα ανάρτησης καθώς η συμπεριφορά και επίδοση του ελαστικού καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το προφίλ (σχήμα) και το μέγεθος του αποτυπώματος επαφής. Σκοπός του συστήματος ανάρτησης είναι να αυξήσει στο μέγιστο δυνατό το μέγεθος του αποτυπώματος επαφής και ταυτόχρονα να το κατανέμει συμμετρικά σε ολόκληρο το πλάτος του ελαστικού ώστε να μην είναι συγκεντρωμένο στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό του πλάτους αυτού εξασφαλίζοντας παράλληλα και την ομοιόμορφη θερμική κατανομή στο αποτύπωμα αυτό.



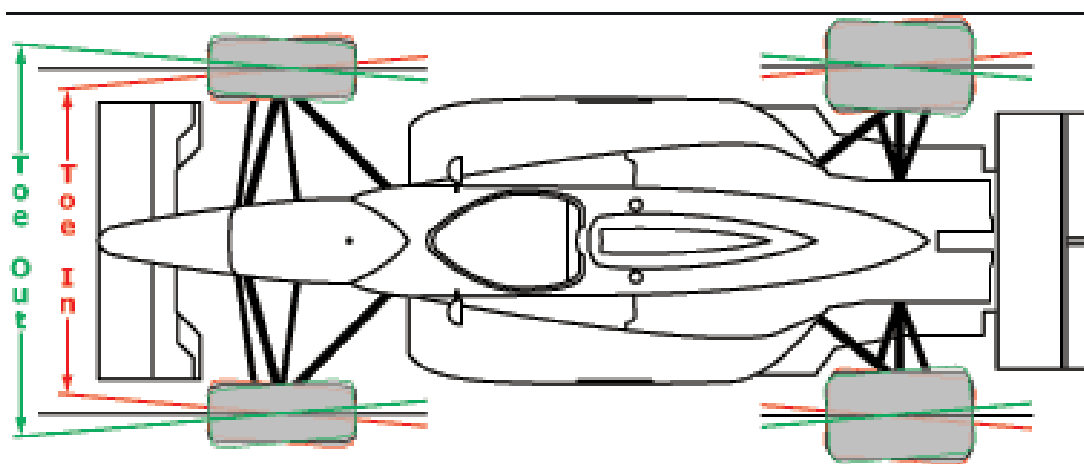
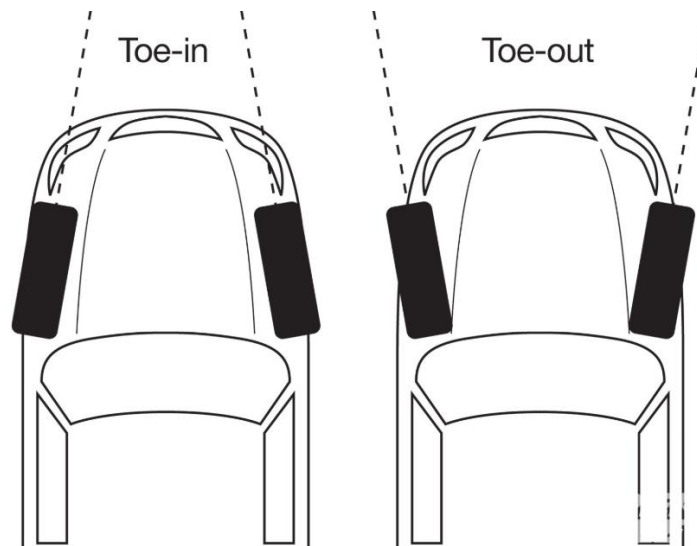
3.3 Γωνία Camber

Κοιτώντας το όχημα στην πρόσοψη ή στην πίσω όψη η γωνία camber ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τροχού (συνεπώς και του ελαστικού) σε σχέση με το οδόστρωμα (υποθέτοντας ότι το οδόστρωμα είναι εντελώς επίπεδο). Όταν το όχημα δε βρίσκεται σε κίνηση ο τροχός διατηρεί σταθερή γωνία camber. Όταν όμως το όχημα εισέρχεται σε στροφή λόγω της κύλισης του σώματος (body roll) η γωνία camber καθώς και το αποτύπωμα επαφής (contact patch) του τροχού με το έδαφος μειώνεται. Η σωστή ρύθμιση της γωνίας camber είναι απαραίτητη για τη σωστή οδηγική συμπεριφορά του οχήματος για λόγους οι οποίοι θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Ένα όχημα μπορεί να έχει μηδενική γωνία camber (ο τροχός είναι εντελώς κάθετος με το έδαφος), αρνητική γωνία camber (το άνω μέρος του τροχού μετακινείται πιο κοντά στο σασί) και θετική γωνία camber (το άνω μέρος του τροχού μετακινείται προς τα έξω).



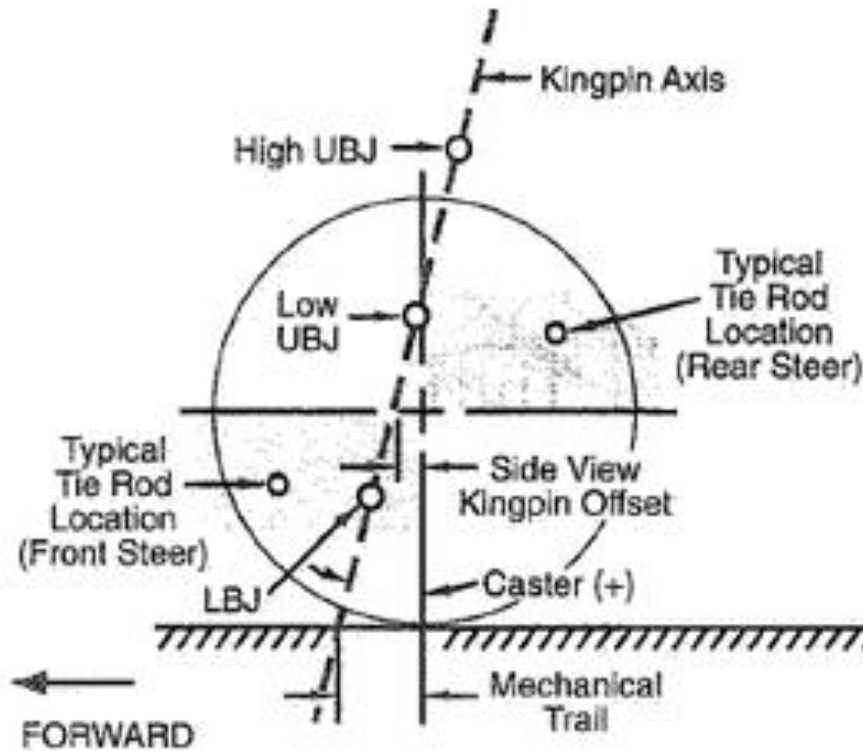
3.4 Γωνία Toe

Κοιτώντας κατακόρυφα το όχημα δηλαδή στην άνω όψη ή στην κάτοψη ορίζουμε τη γωνία toe ως τη συμμετρική γωνία που σχηματίζουν οι τροχοί με τον κατακόρυφο άξονα (τον άξονα παράλληλο με την πορεία του οχήματος). Η γωνία toe καθορίζει τη σταθερότητα του οχήματος τόσο στην ευθεία κίνηση όσο και στις στροφές καθώς είναι υπεύθυνη για το ποσοστό υπερστροφής (oversteer) και υποστροφής (understeer) του οχήματος. Ένα όχημα μπορεί να έχει μηδενική γωνία toe (οι τροχοί είναι εντελώς παράλληλοι με τον κατακόρυφο άξονα), θετική γωνία toe (οι τροχοί «δείχνουν» προς τα μέσα δηλαδή προς τον κατακόρυφο άξονα) ή αρνητική γωνία toe (οι τροχοί «δείχνουν» προς τα έξω δηλαδή μακριά από τον κατακόρυφο άξονα).



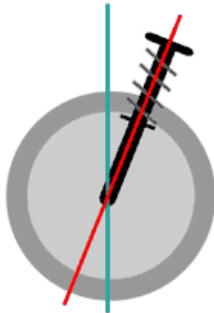
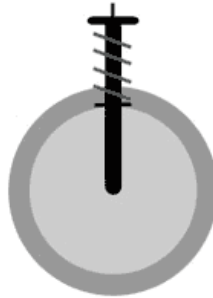
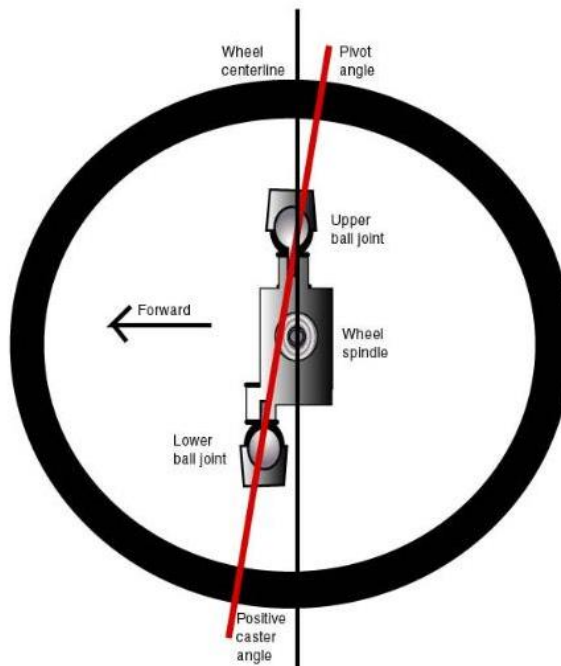
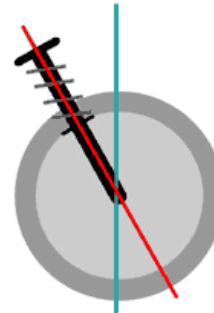
3.5 Άξονας Kingpin (Kingpin Axis)

Κοιτώντας το όχημα από την πλαϊνή όψη ορίζουμε ως άξονα king pin τον άξονα που σχηματίζεται ενώνοντας την έξω άρθρωση του άνω ψαλιδιού με την έξω άρθρωση του κάτω ψαλιδιού. Αποτελεί τον άξονα περιστροφής των τροχών κατά την πηδαλιούχηση του οχήματος.



3.6 Γωνία Caster

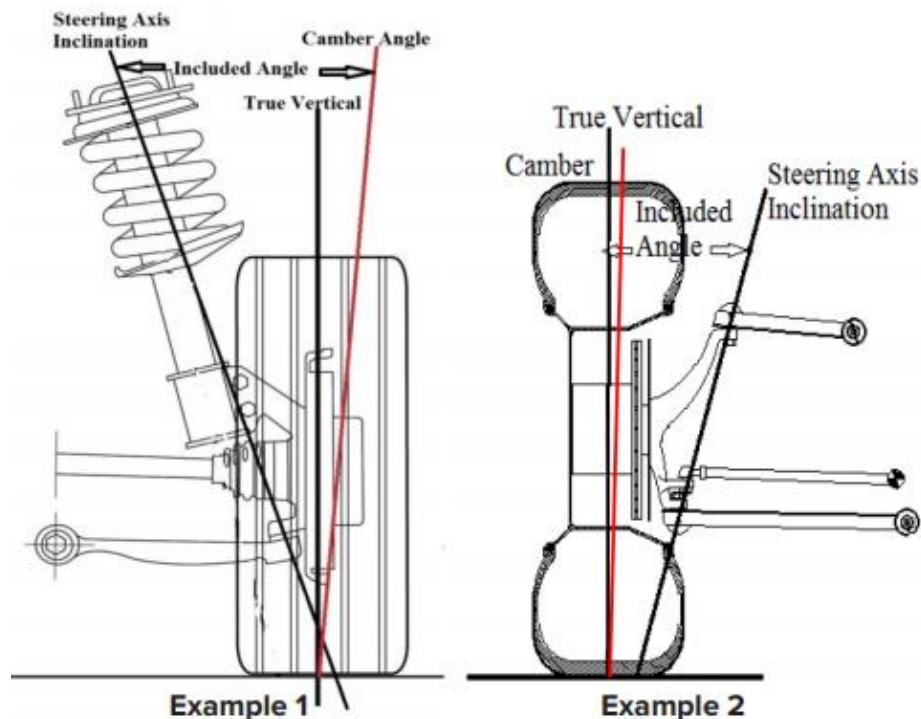
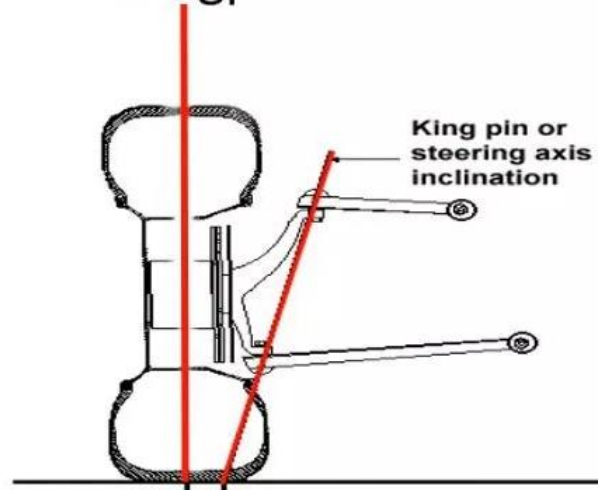
Κοιτώντας το όχημα από την πλαϊνή όψη ορίζουμε ως γωνία caster τη γωνία που σχηματίζει ο κάθετος άξονας που διέρχεται από το κέντρο του τροχού με τον άξονα περιστροφής του τροχού kingpin (ο οποίος άξονας στις αναρτήσεις διπλού ψαλιδιού καθορίζεται από τις δυο σφαιρικές αρθρώσεις που συνδέουν τα ψαλίδια με τους τροχούς και γύρω από αυτόν περιστρέφεται ο τροχός υπό την επίδραση του συστήματος πηδαλιούχησης). Όπως και με τη γωνία camber έτσι και η γωνία caster επηρεάζει το ποσοστό του αποτυπώματος επαφής του τροχού (contact patch) στις στροφές και ρυθμίζεται ανάλογα με τη φύση και τις απαιτήσεις του οχήματος από τον κατασκευαστή. Επίσης παρέχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια. Ένα όχημα μπορεί να διαθέτει μηδενική γωνία caster (ο κάθετος άξονας είναι παράλληλος με τον άξονα που σχηματίζουν οι σφαιρικοί σύνδεσμοι), θετική γωνία caster (ο άνω σύνδεσμος είναι τοποθετημένος πίσω από τον κάθετο άξονα που διέρχεται το κέντρο του τροχού), ή αρνητική γωνία caster (ο άνω σύνδεσμος είναι τοποθετημένος εμπρός από τον κάθετο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του τροχού).

**POSITIVE
CASTER****NEUTRAL
CASTER****NEGATIVE
CASTER****3.7 Γωνία KPI (King Pin Inclination)**

Κοιτώντας το όχημα από την πρόσοψη ή την πίσω όψη ορίζουμε ως τη γωνία KPI τη γωνία που σχηματίζει ο άνω και κάτω σύνδεσμος της ανάρτησης διπλού ψαλιδιού με τον κάθετο στο οδόστρωμα άξονα που διέρχεται από το κέντρο του τροχού. Η μετατόπιση του άνω συνδέσμου προς τα μέσα (προς

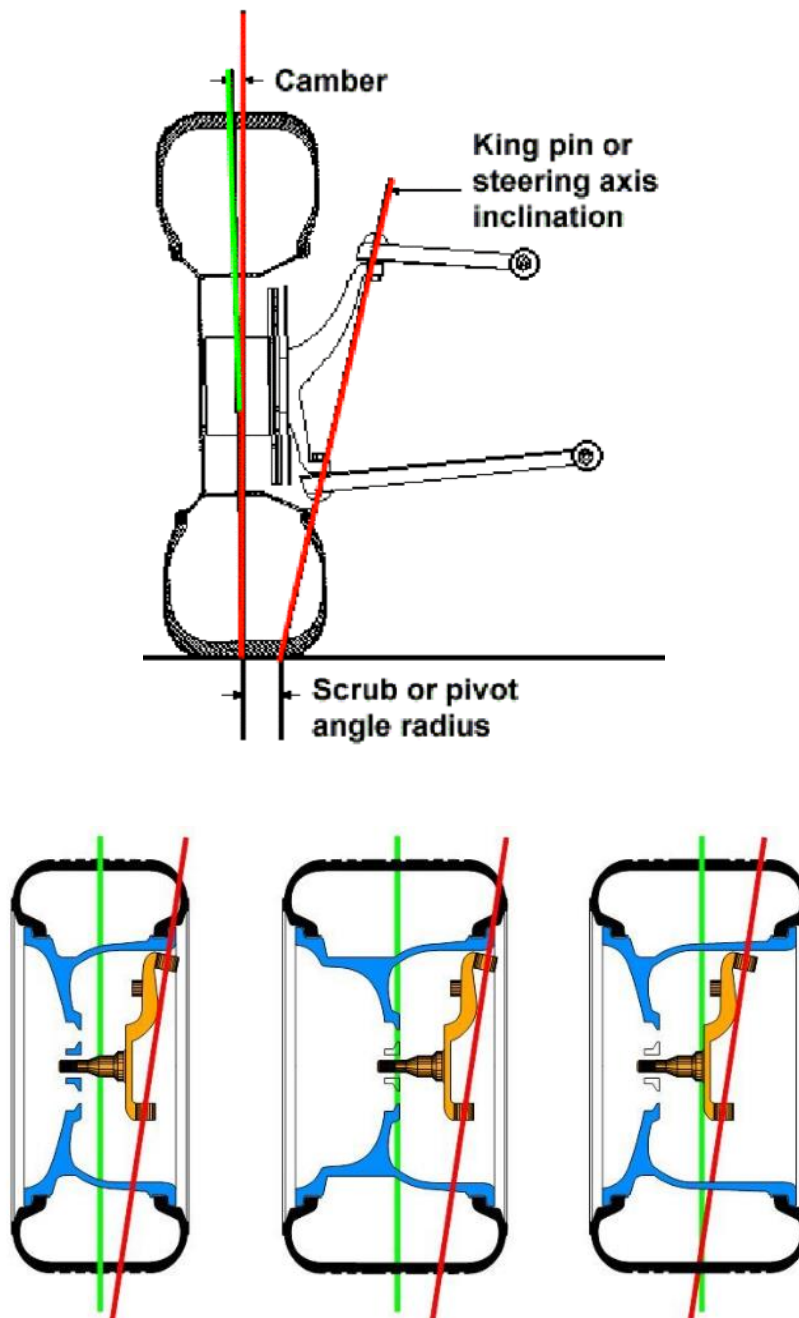
το σασί του οχήματος) αποσκοπεί στην πρόσθεση αρνητικής γωνίας camber στις στροφές και συνεπώς στη βελτιστοποίηση του αποτυπώματος επαφής του τροχού. Επίσης πρέπει να ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της γωνίας caster και της γωνίας στατικού camber. Η συντριπτική πλειοψηφία των τετράτροχων οχημάτων διαθέτουν γωνία μετατόπισης KPI, ρύθμιση η οποία προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. Όλα τα οχήματα που διαθέτουν γωνία KPI διαθέτουν θετική μετατόπιση του άνω συνδέσμου δηλαδή ο άνω σύνδεσμος είναι πιο κοντά στο σασί από τον κάτω σύνδεσμο.

Kingpin inclination



3.8 Ακτίνα τριβής του τροχού με το έδαφος (Scrub radius)

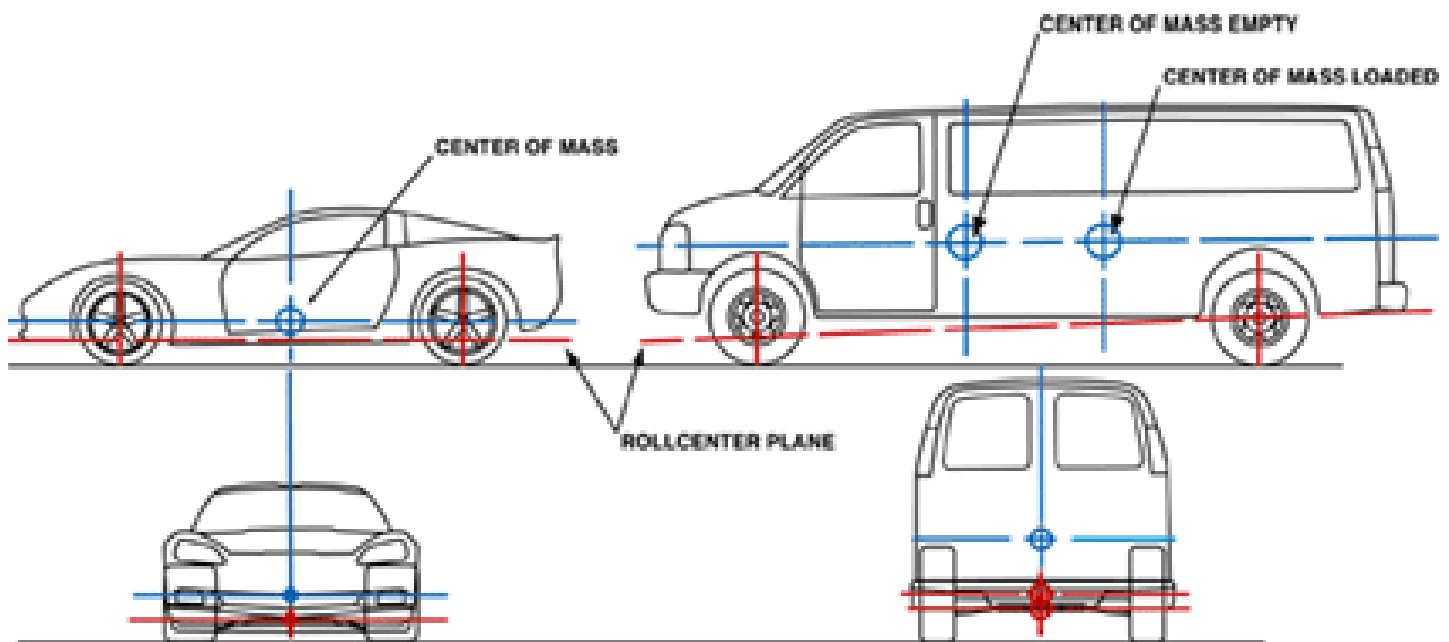
Κοιτώντας το όχημα από την πρόσοψη ή την πίσω όψη ορίζουμε ως ακτίνα τριβής του τροχού (scrub radius) την απόσταση του κέντρου του αποτυπώματος επαφής (contact patch) από το σημείο τομής (pivot point) του άξονα kingpin δηλαδή του άξονα που σχηματίζουν οι δύο σύνδεσμοι των ψαλιδιών με το οδόστρωμα. Η απόσταση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα κατά την πέδηση ή την επιτάχυνση του οχήματος η δύναμη τριβής του ελαστικού με το έδαφος η οποία είναι παράλληλη με τη φορά των τροχών να ασκεί μια περιστροφική δύναμη (ροπή) στον τροχό γύρω από το pivot point εφόσον αυτό είναι σταθερό.



Scrub Radius changes with rim width & offset

3.9 Κέντρο μάζας (Κέντρο βάρους) του οχήματος

Ορίζουμε ως κέντρο μάζας του οχήματος ως το μοναδικό υποθετικό σημείο το οποίο λαμβάνεται υπόψιν ως το σημείο συγκέντρωσης της συνολικής μάζας του οχήματος. Είναι δηλαδή το σημείο στο οποίο μπορεί να ασκηθεί δύναμη για την πρόκληση γραμμικής κίνησης χωρίς να προκληθεί γωνιακή κίνηση. Στο σημείο αυτό εφαρμόζονται οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα.

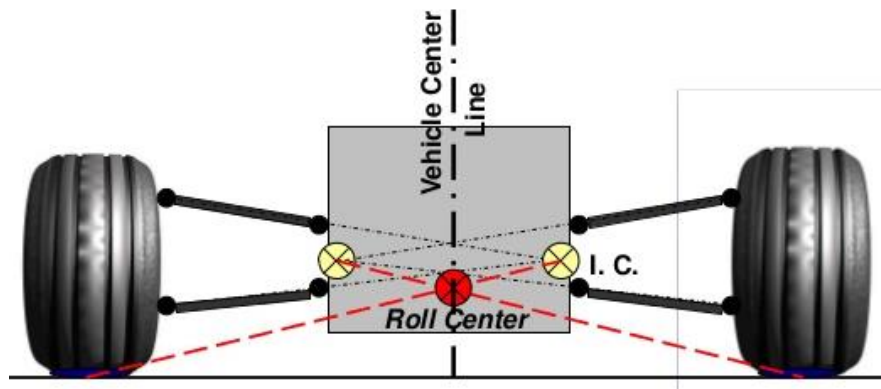
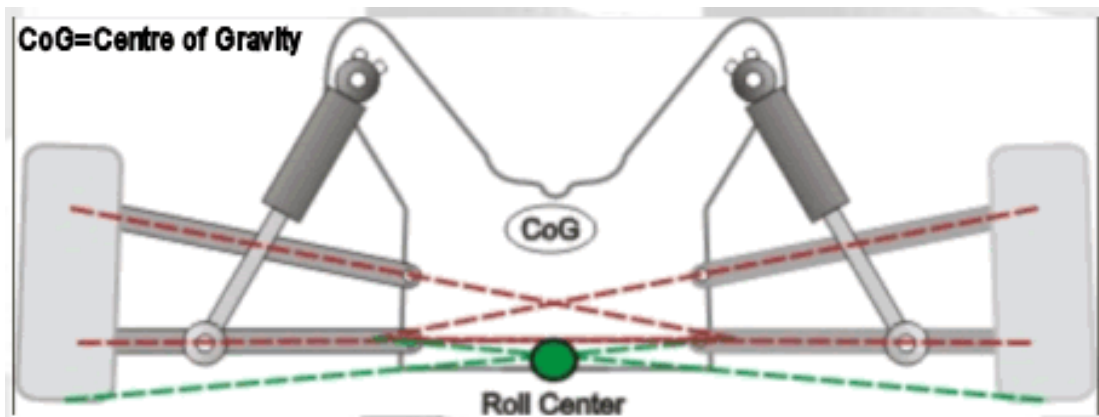


3.10 Κέντρο κύλισης του σώματος (roll center)

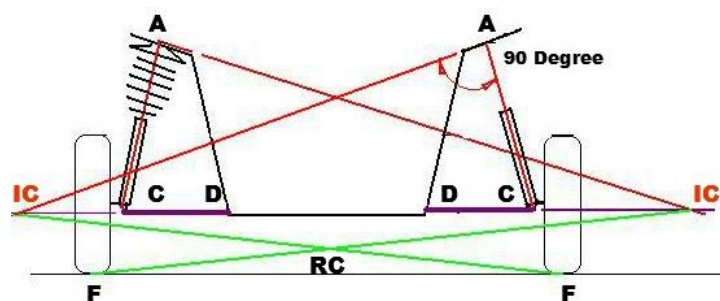
Ως κέντρο κύλισης του οχήματος ορίζεται το νοητό σημείο επάνω στην κάθετη κεντρική γραμμή του οχήματος γύρω από το οποίο το όχημα κυλά χάρη στις αναρτήσεις με άξονα κύλισης τον άξονα παράλληλο στην πορεία του οχήματος (ευθεία) ο οποίος διέρχεται από αυτό το σημείο. Ο τρόπος υπολογισμού του κέντρου κύλισης είναι ο εξής: Αρχικά σχηματίζουμε δύο ευθείες γραμμές ως προέκταση των άνω άκρων της ανάρτησης και άλλες δυο ως προέκταση των κάτω άκρων αντίστοιχα. Βρίσκουμε τα σημεία τομής των άνω γραμμών με τις κάτω και συγκεκριμένα το σημείο τομής της άνω αριστερά γραμμής με την κάτω αριστερά γραμμή και την άνω δεξιά γραμμή με την κάτω δεξιά γραμμή. Έτσι σχηματίζονται δύο σημεία τομής (ένα αριστερά κι ένα δεξιά). Φέρνουμε ευθεία γραμμή από το αριστερά

σημείο τομής στο κέντρο του κάτω μέρους του δεξιού ελαστικού και αντιστοίχως φέρνουμε ευθεία γραμμή από το δεξιά σημείο τομής στο κέντρο του κάτω μέρους του αριστερού ελαστικού. Το σημείο που τέμνονται αυτές οι δύο νέες ευθείες είναι το κέντρο κύλισης του οχήματος (roll center).

Κέντρο κύλισης σε αναρτήσεις διπλού ψαλιδιού



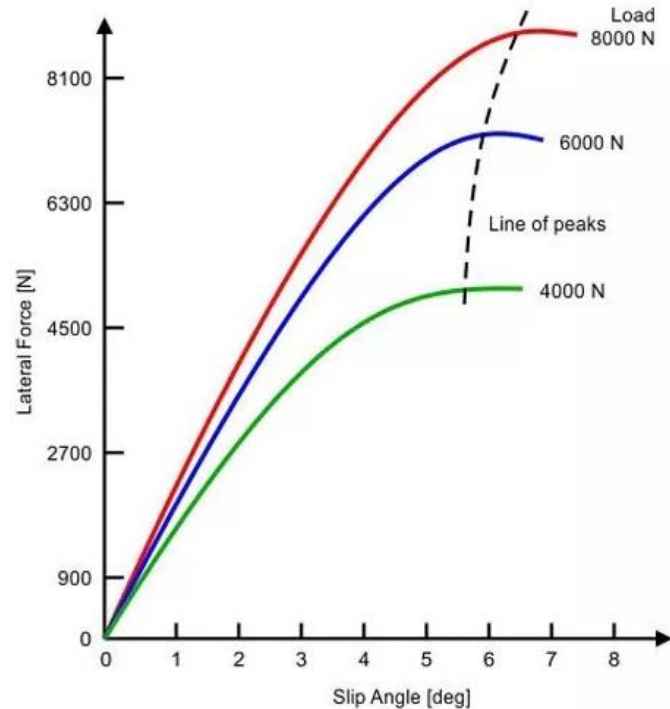
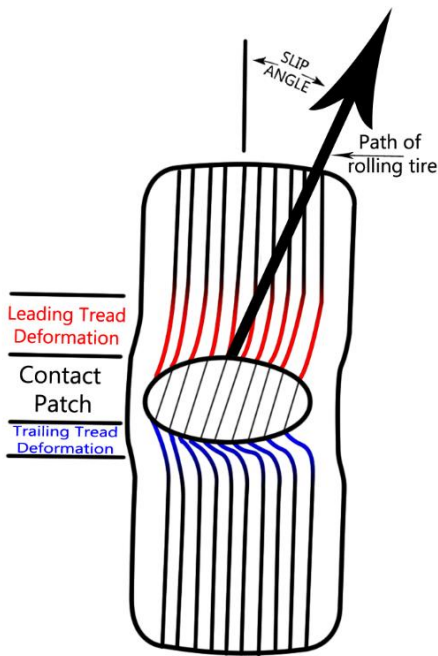
Κέντρο κύλισης σε αναρτήσεις MacPherson



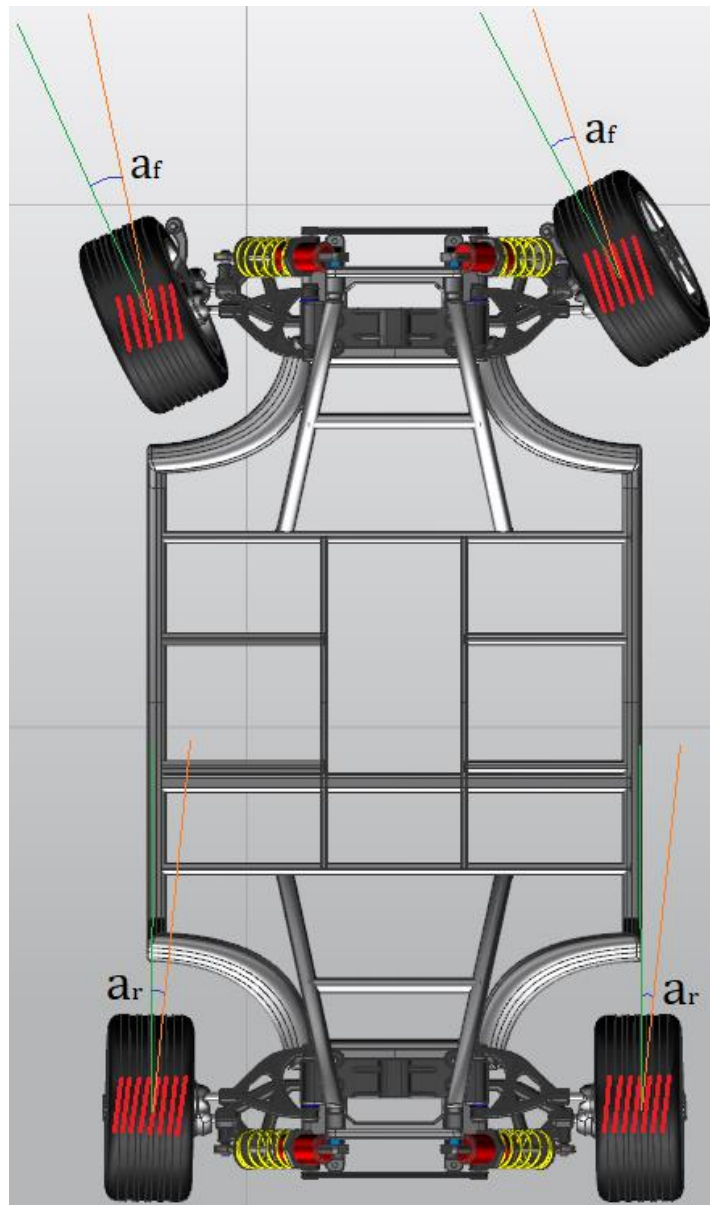
MacPherson strut Roll Center location

3.11 Γωνία Slip (Slip angle)

Ως γωνία slip ορίζουμε τη γωνία που σχηματίζει η πορεία του τροχού με την πορεία του αποτυπώματος επαφής αφού παραμορφωθεί κατά τη διάρκεια της στρέψης ενός οχήματος που κινείται με μη μηδενική ταχύτητα. Λόγω της ελαστικότητας και συνεπώς της παραμορφωσιμότητας του ελαστικού οι πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται στο contact patch το επηρεάζουν στο να τείνει να αντιστέκεται στην περιστροφή και συνεπώς στη μεταβολή της πορείας του. Αυτό έχει ως συνέπεια να δημιουργείται η γωνία slip η οποία επεξηγεί το λόγο για τον οποίο τα οχήματα δεν στρέφονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο (ίδια γωνία) με τον οποίο στρέφονται οι τροχοί. Η σχέση μεταξύ πρόσφυσης και γωνίας slip φαίνεται στην παρακάτω γεωμετρική παράσταση.



Βλέπουμε πως αρχικά η πρόσφυση αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η γωνία slip, έπειτα αυξάνεται μη γραμμικά ώσπου μεγιστοποιείται σε ένα σημείο και συνεχίζει να μειώνεται μη γραμμικά ώσπου οι τροχοί πλέον ολισθαίνουν πλήρως. Επίσης παρατηρούμε πως εφόσον αυξάνεται η αναρτώμενη μάζα του οχήματος αυξάνονται και οι πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται στους τροχούς και κατά συνέπεια αυξάνεται η μέγιστη γωνία slip. Η βέλτιστη γωνία slip για τα περισσότερα οχήματα (εξαρτάται από το είδος και τις προδιαγραφές του οχήματος) κυμαίνεται κοντά στις 6 με 7 μοίρες σε σχέση με την πορεία του τροχού. Είναι δηλαδή το επιθυμητό ποσοστό slip που προσφέρουν στο όχημα τη μέγιστη δυνατή πρόσφυση και συνεπώς τη βέλτιστη οδηγική συμπεριφορά στις στrofές. Αξίζει να σημειωθεί πως η γωνία slip έχει άμεσο αντίκτυπο στην οδηγική συμπεριφορά του οχήματος όσον αφορά την πηδαλιούχηση. Παρακάτω βλέπουμε την παραμόρφωση του αποτυπώματος επαφής στο όχημα καθώς και τις γωνίες slip που σχηματίζονται.



Εφόσον οι δυνάμεις πρόσφυσης δεν είναι ισάξιες για κάθε τροχό και λόγω της συνεχούς μεταφοράς βάρους οι γωνίες slip αντιστοίχως δεν θα είναι ισάξιες. Ως γενικός κανόνας εάν οι γωνίες slip των μπροστινών τροχών a_f είναι μεγαλύτερες από τις γωνίες slip των πίσω τροχών a_r το όχημα θα τείνει να υποστρέφει (understeer), ενώ εάν οι γωνίες a_f είναι μικρότερες από τις γωνίες a_r το όχημα θα υπερστρέφει (oversteer) και τέλος εάν οι γωνίες a_f και a_r έχουν λόγο 1:1 το όχημα θα διαθέτει ουδέτερη πηδαλιουχική συμπεριφορά.

4. Τρισδιάστατος σχεδιασμός Ανάρτησης διπλού ψαλιδιού με χρήση CAD (Computer aided design)

Στις σύγχρονες βιομηχανίες είναι απαραίτητη η χρήση λογισμικών τρισδιάστατης σχεδίασης CAD διότι συμβάλουν σημαντικά στην κατασκευή, τροποποίηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός σχεδίου καθώς αυξάνουν την παραγωγικότητα του σχεδιαστή και βελτιώνουν την ποιότητα σχεδίασης. Επίσης βοηθούν στην επικοινωνία μεταξύ των μελών της βιομηχανίας εφόσον δίνουν τη δυνατότητα αρχειοθέτησης των σχεδίων σε βάσεις δεδομένων, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την διαδικασία του manufacturing δηλαδή την κατασκευή του τελικού προϊόντος. Μέσω τέτοιων λογισμικών σχεδίασης δίνεται στο σχεδιαστή η δυνατότητα κατασκευής 2D ή 3D σχέδια εισάγοντας πληροφορίες όπως οι πρώτες ύλες, διαδικασίες, διαστάσεις καθώς και οι ανοχές κίνησης και ασκούμενων δυνάμεων του επιθυμητού τελικού προϊόντος. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που προσφέρουν τα συστήματα CAD είναι η δυνατότητα δημιουργίας animations στην οποία ο σχεδιαστής μπορεί εξετάσει την κινησιολογία του σχεδίου χωρίς την ανάγκη να κατασκευαστεί ένα μέρος του σχεδίου ή ακόμα και το τελικό προϊόν στην πραγματικότητα σε κλίμακα. Στη σύγχρονη εποχή τα συστήματα CAD αποτελούν αναπόσπαστο βιομηχανικό εργαλείο καθώς χρησιμοποιούνται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, τις ναυπηγικές και αεροναυπηγικές βιομηχανίες αλλά και στην κατασκευή κτιρίων καθώς η αρχιτεκτονική δομή των σημερινών κτιρίων πραγματοποιείται χάρη σε τέτοια συστήματα.

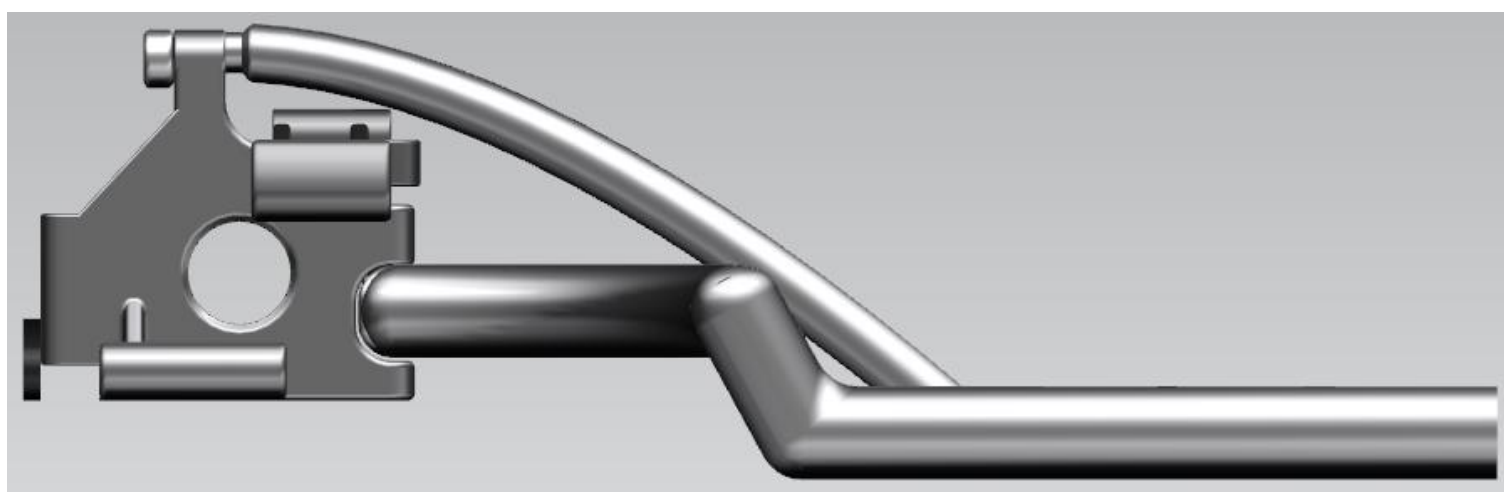
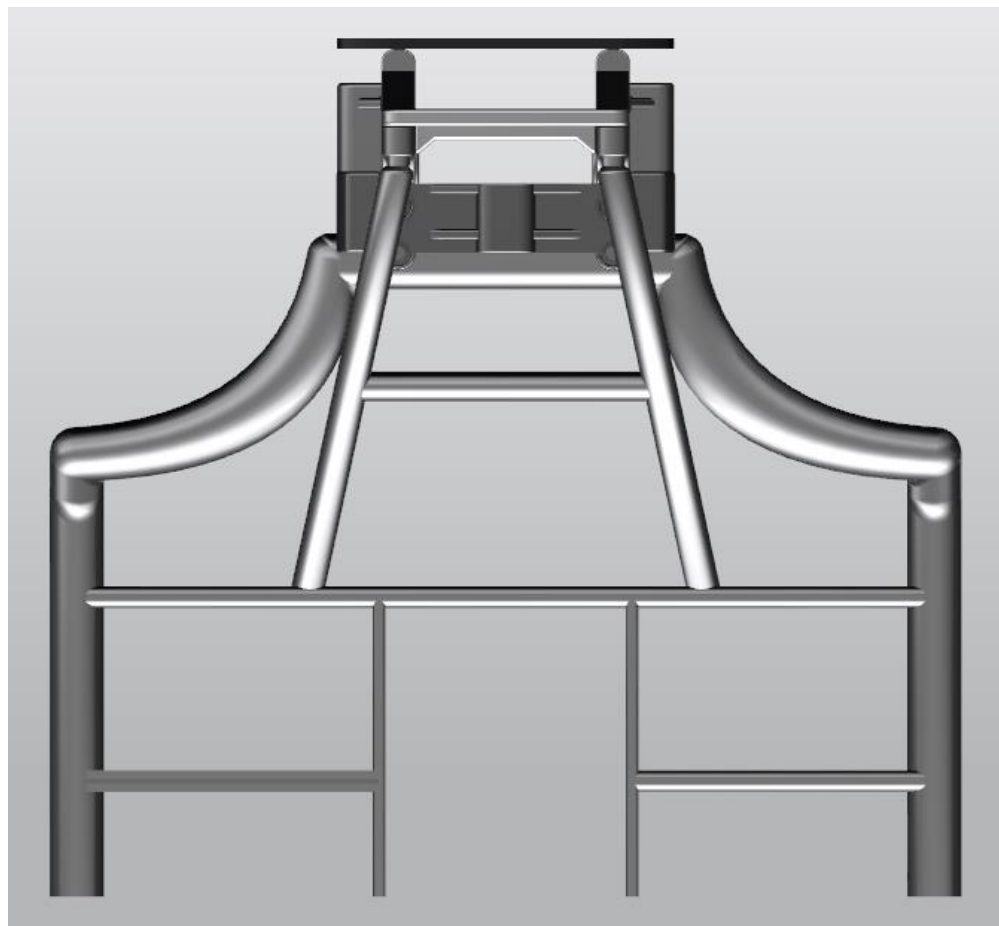
Κατασκευή Ανάρτησης διπλού ψαλιδιού

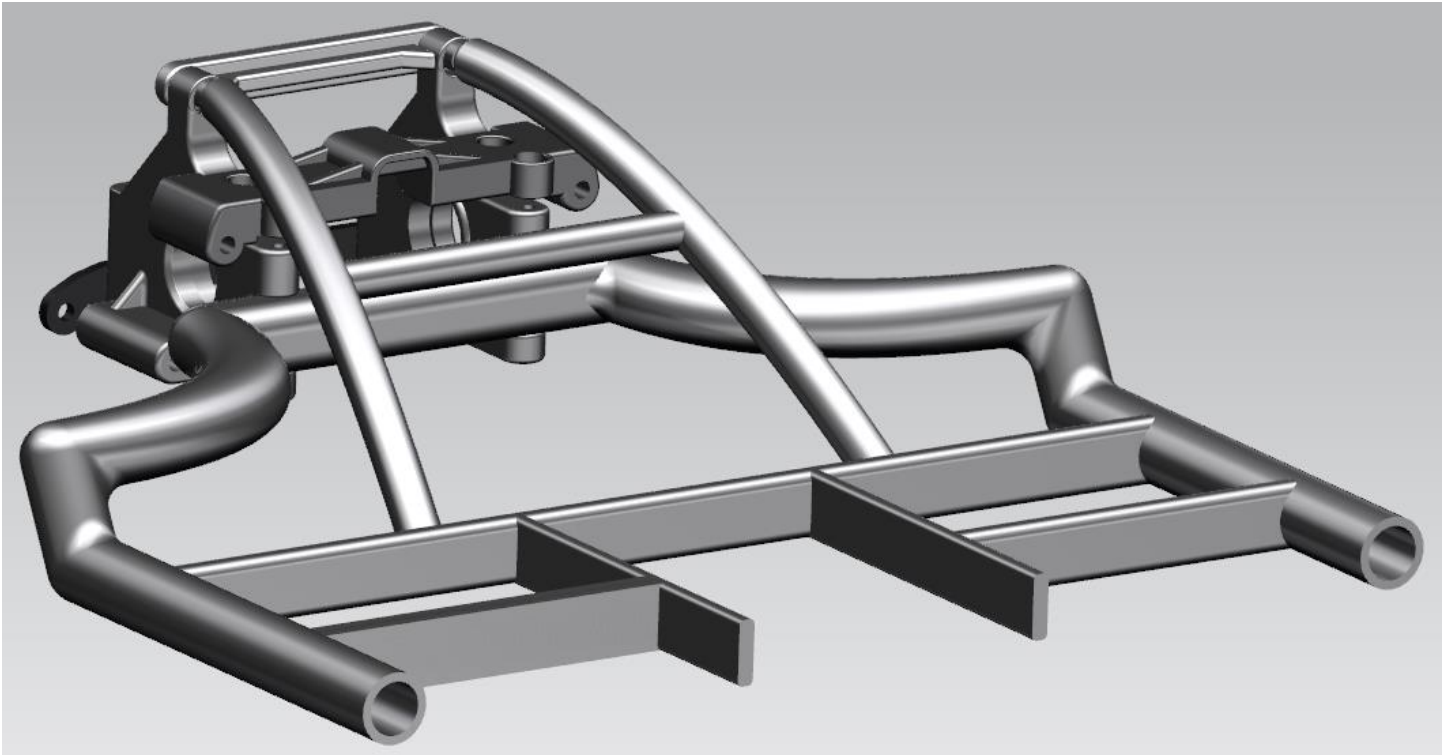
Το πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της ανάρτησης διπλού ψαλιδιού είναι το NX 12.0 της Siemens. Το σχέδιο παρουσιάζει ένα τετράτροχο όχημα το οποίο αποτελείται από το σασί, το σύστημα ανάρτησης και τους τροχούς συμπεριλαμβανομένων των αποτελούμενων μερών τους με τους συνδέσμους τους.

Τα αποτελούμενα μέρη του σχεδίου παρουσιάζονται παρακάτω:

4.1 Σασί

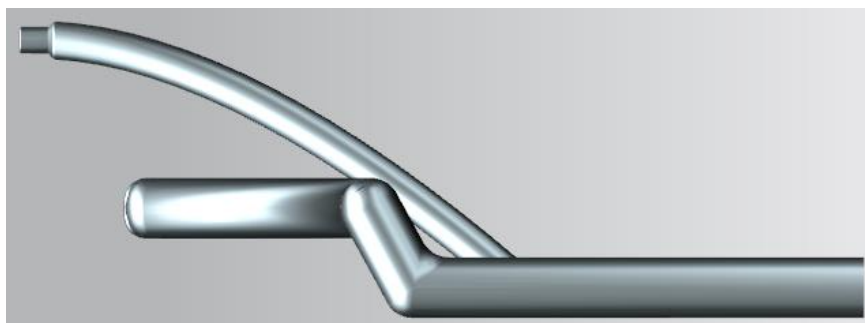
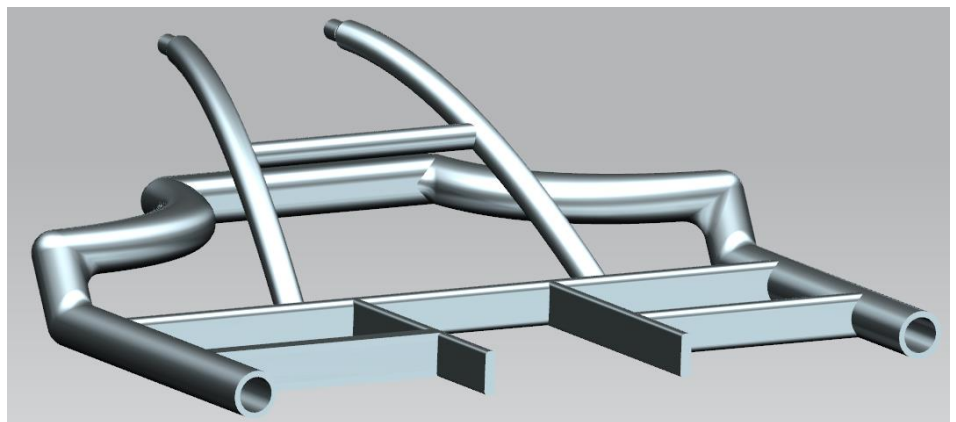
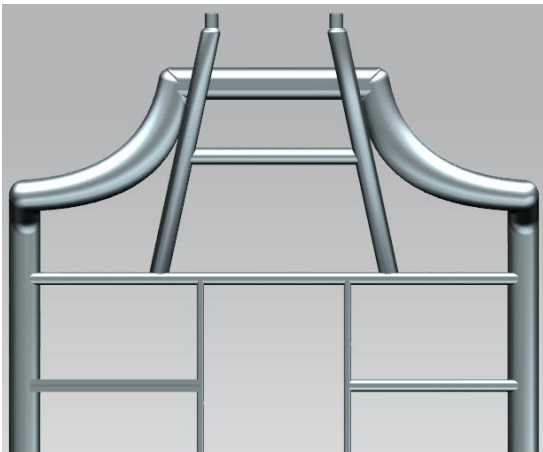
Αποτελεί το στατικό κομμάτι του οχήματος και στο συγκεκριμένο σχέδιο είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση του συστήματος ανάρτησης με τους τροχούς. Το συναρμολογημένο σασί (chassis assembly) φαίνεται παρακάτω:



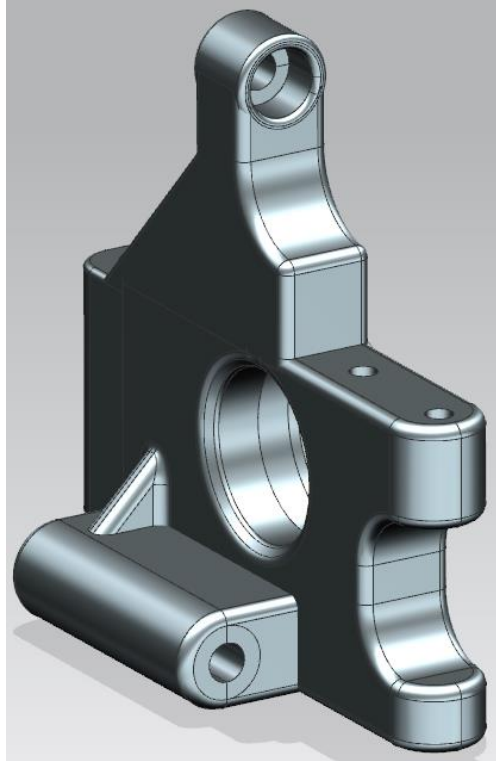
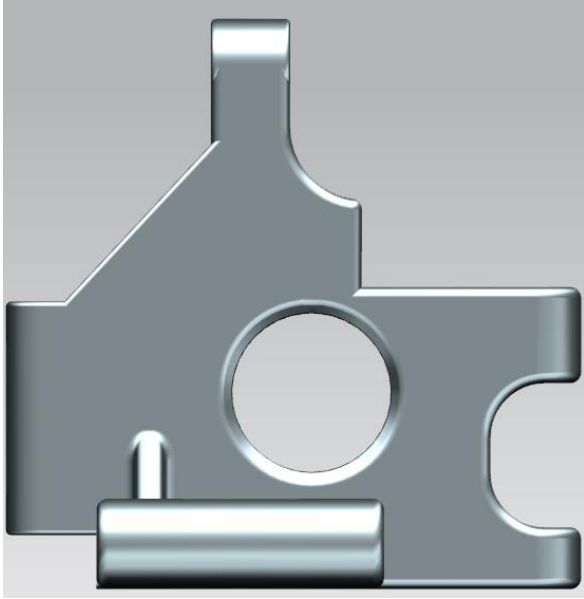


Το chassis assembly αποτελείται από τα εξής parts:

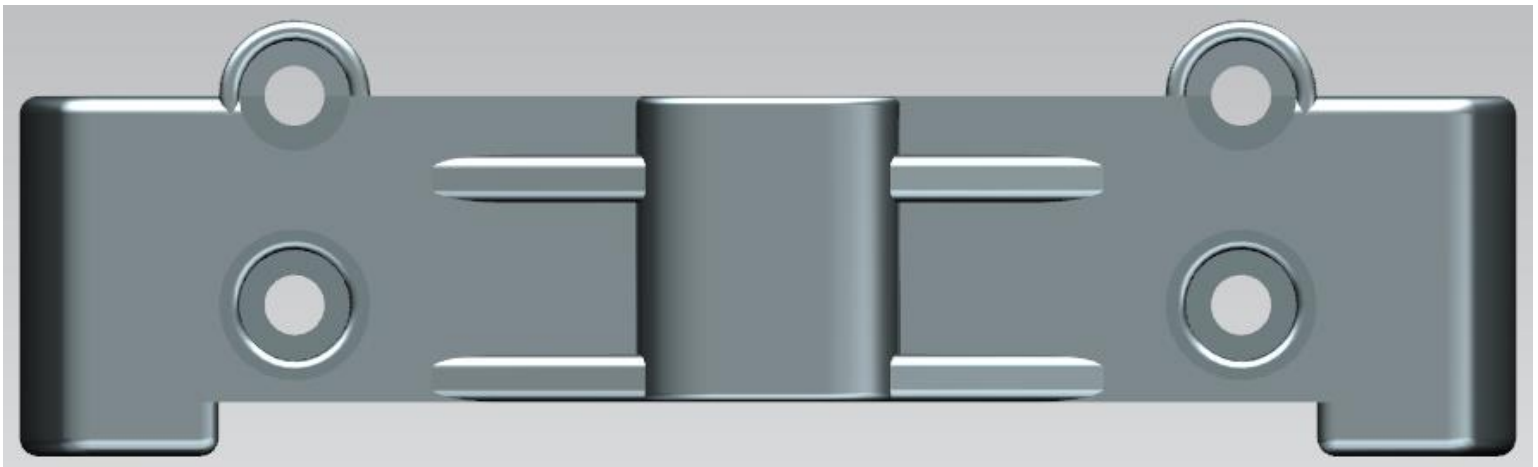
Main chassis: Είναι το σύνολο των συνδεδεμένων δοκών στο οποίο κάθετα το σώμα του οχήματος και πάνω σε αυτό συνδέεται το σύστημα ανάρτησης (μπρος και πίσω). (Σχεδιάστηκε το σασί στο ήμισυ του μεταξονίου του οχήματος καθώς το υπόλοιπο σασί είναι συμμετρικό αντίγραφο του αρχικού οπότε προστίθεται στο τελικό assembly με την εντολή mirror assembly)

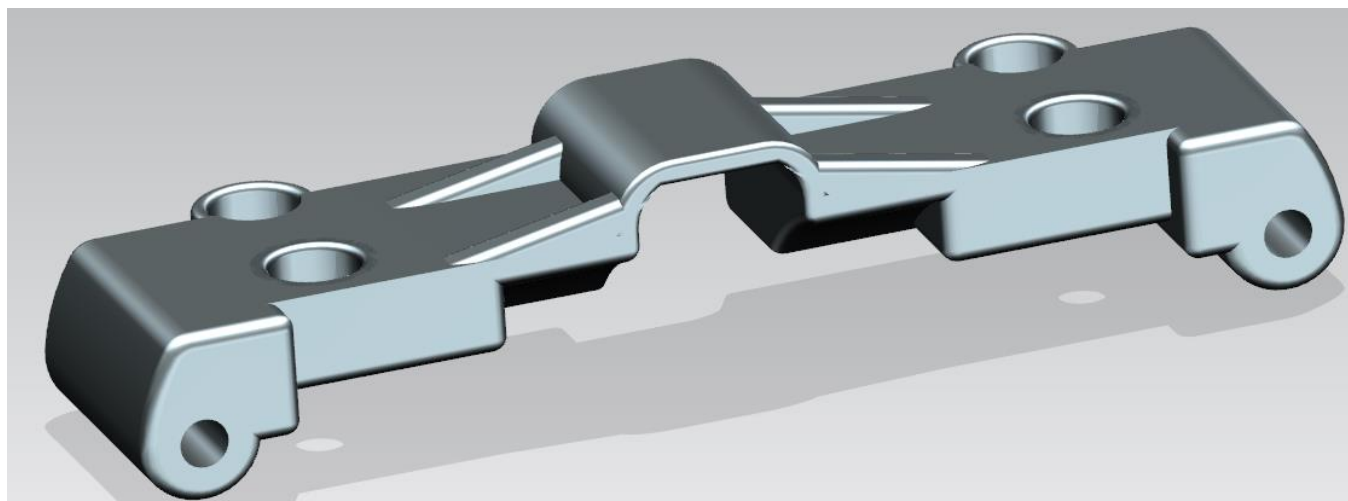
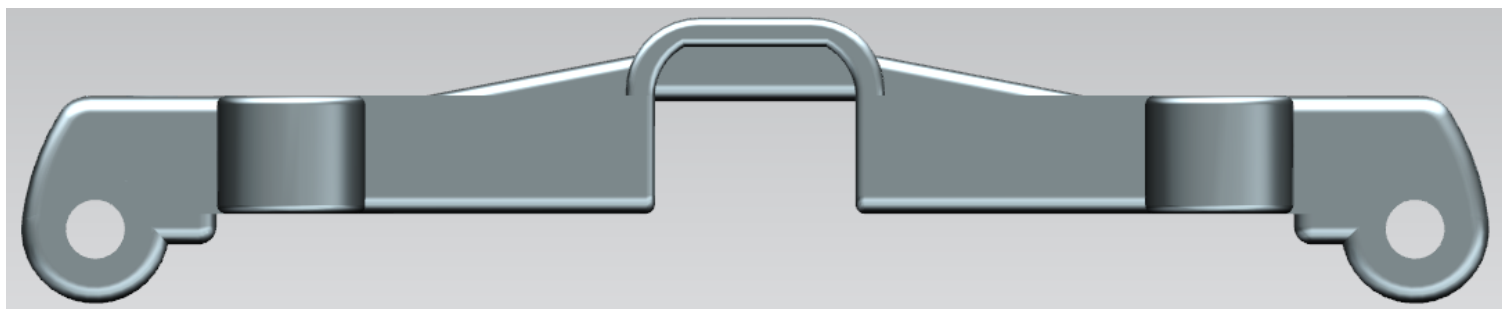


Side plates: Αποτελούν το μέρος του σασί στο οποίο τοποθετείται και προσδένεται τόσο το main chassis αλλά και τα κάτω ψαλίδια του συστήματος ανάρτησης. Επίσης διαθέτουν οπή από την οποία διέρχονται τα ημιαξόνια καθώς και ανάμεσα τους υπάρχει αρκετός χώρος για την τοποθέτηση του διαφορικού συστήματος. (Απεικονίζεται το δεξί side plate. Το αριστερό side plate είναι συμμετρικό αντίγραφο και δημιουργείται με mirror assembly)



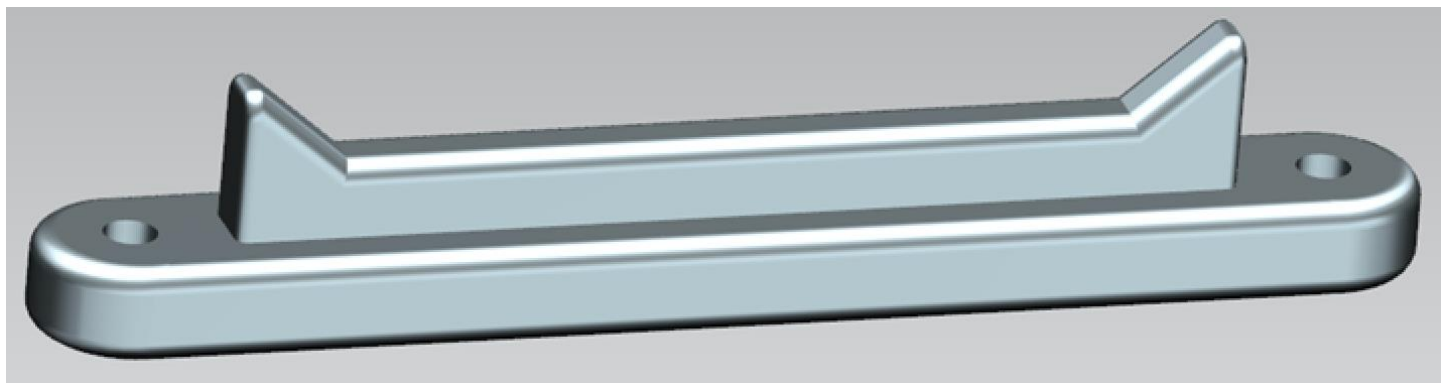
Upper arm mount: Είναι το στατικό μέρος του σασί στο οποίο τοποθετούνται τα άνω ψαλίδια.



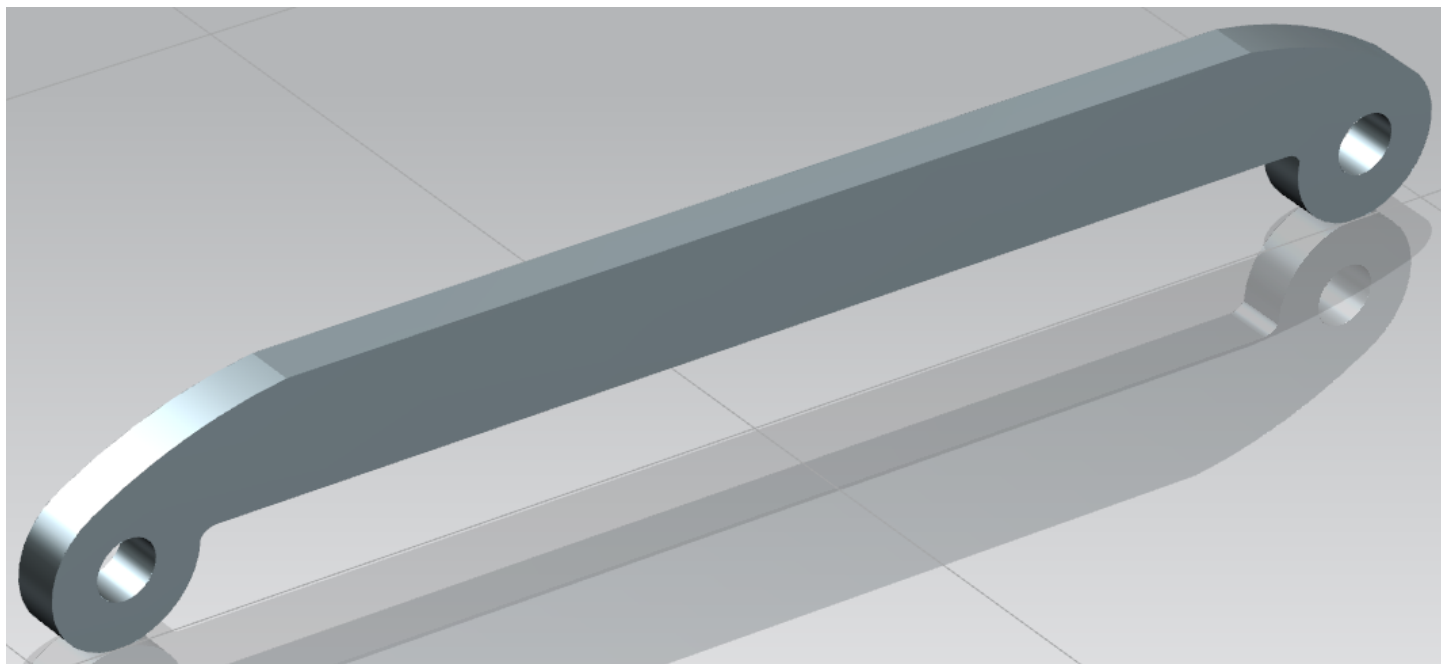


Shock brace: Αποτελεί μέρος του σασί υπεύθυνο για την στατική ακαμψία του συστήματος. Συμβάλλει στην παρεμπόδιση του chassis flex δηλαδή την κάμψη του σασί λόγω των δυνάμεων στροφής (cornering forces). Πάνω σε αυτό τοποθετούνται και δένονται τα αποσβεστικά μέρη της ανάρτησης από την άνω πλευρά.



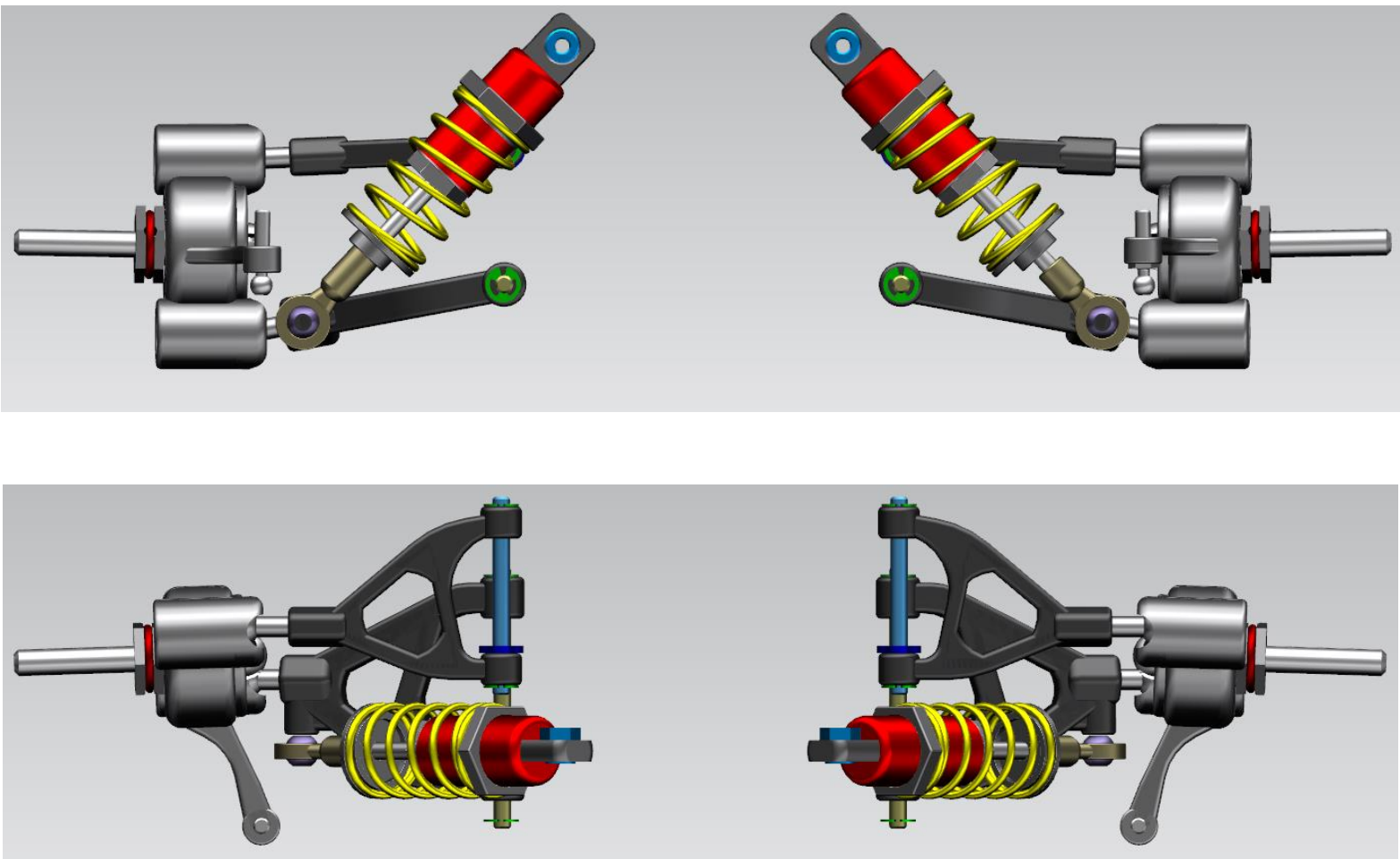


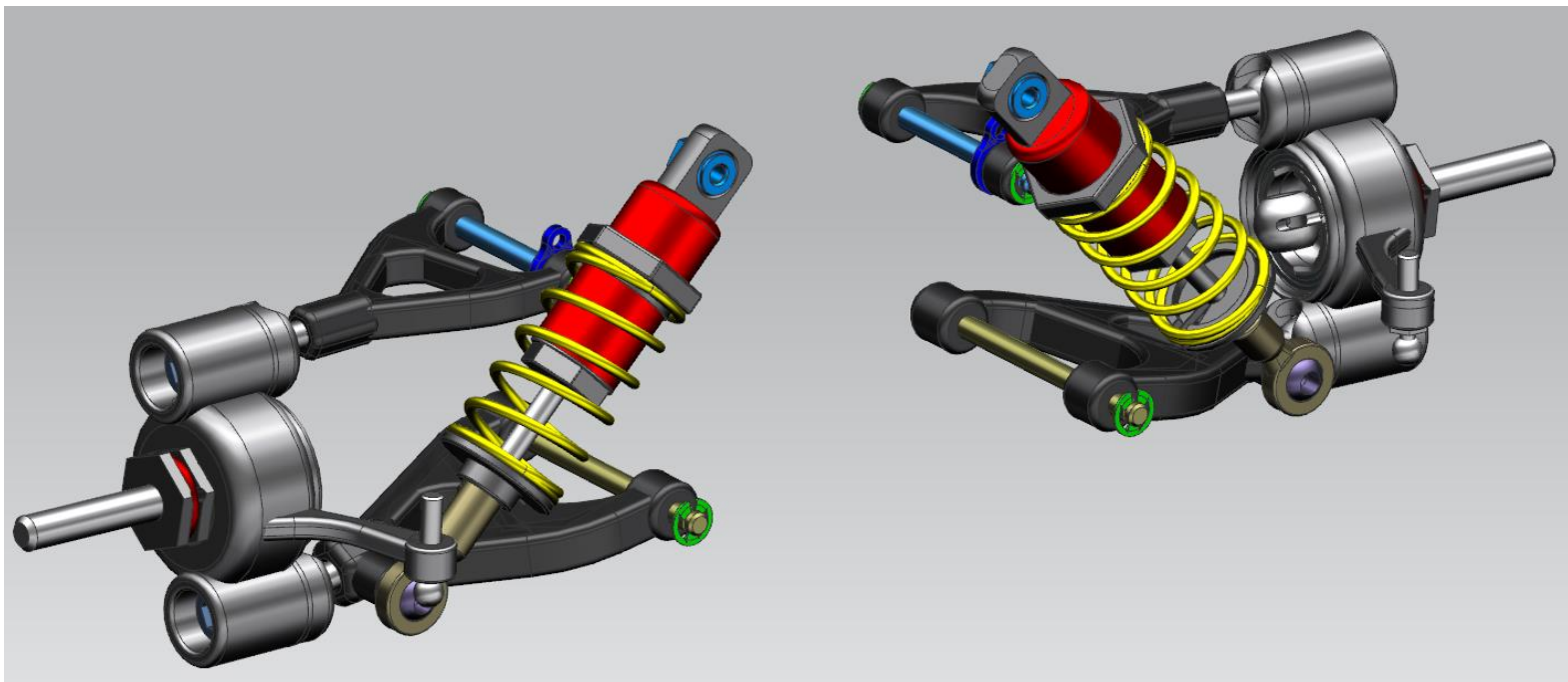
Lower arm brace: Όπως και το shock brace έτσι και το lower arm brace είναι υπεύθυνο για τη στατική ακαμψία του συστήματος ανάρτησης καθώς συγκρατεί το κάτω μέρος του σασί σταθερό. Επίσης συγκρατεί σταθερά τα κάτω ψαλίδια.



4.2 Σύστημα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού

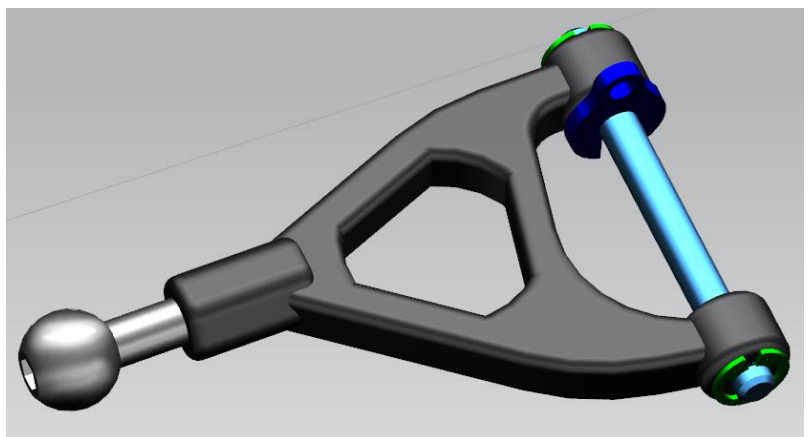
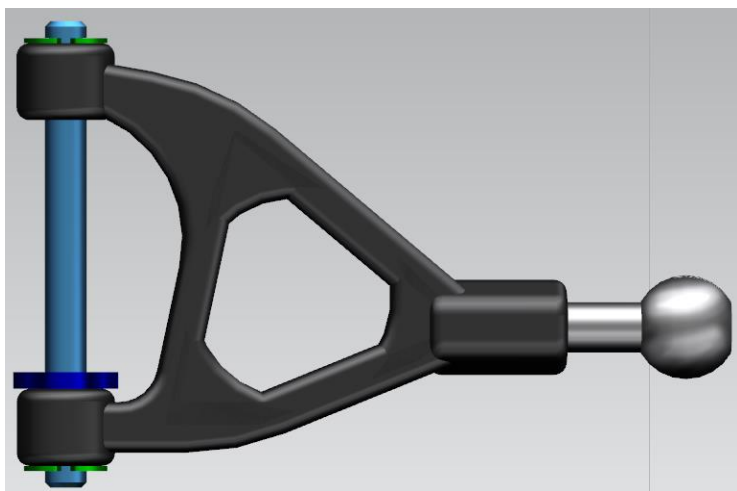
Εμπεριέχει όλα τα ελαστικά (πρωταρχικά και δευτερεύοντα) μέρη, τα αποσβεστικά μέρη και τους συνδέσμους που πραγματοποιούν τη λειτουργία ανάρτησης στο όχημα. Επίσης εμπεριέχει τις βάσεις τοποθέτησης των τροχών καθώς και τις σφαιρικές αρθρώσεις που συνδέονται με τα ημιαξόνια τα οποία δίνουν κίνηση στους τροχούς. Παρακάτω βλέπουμε το συναρμολογημένο σύστημα ανάρτησης (assembly) του μπροστινού άξονα. Το σύστημα ανάρτησης του πίσω άξονα κατασκευάζεται με mirror assembly με τη διαφορά ότι στο σύστημα του πίσω άξονα είναι απύσχα η σούστα πηδαλιούχησης (ball stud) καθώς και η προεξοχή του wheel hub carrier για τη σύνδεση σε άξονα πηδαλιούχησης.



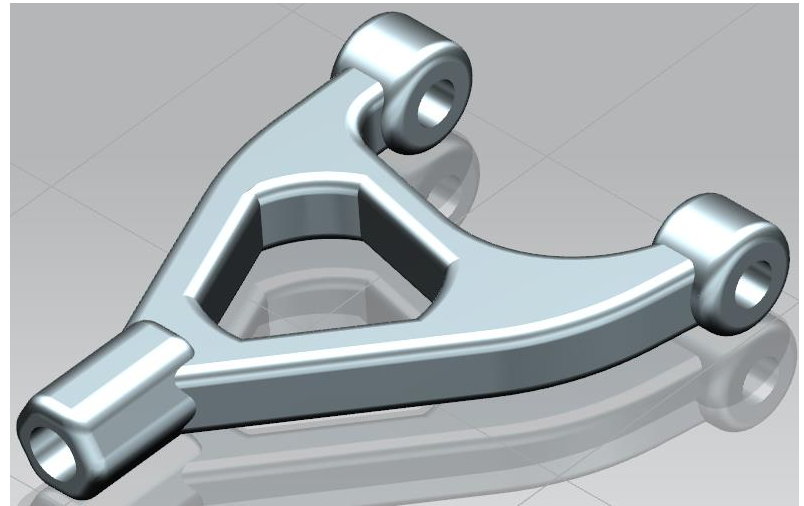
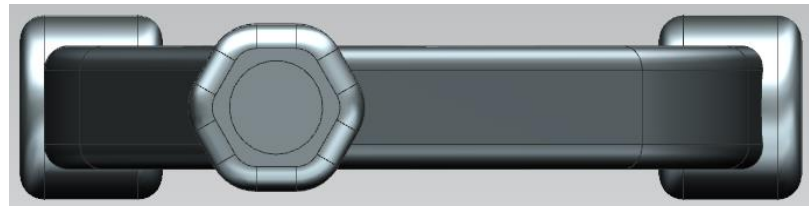
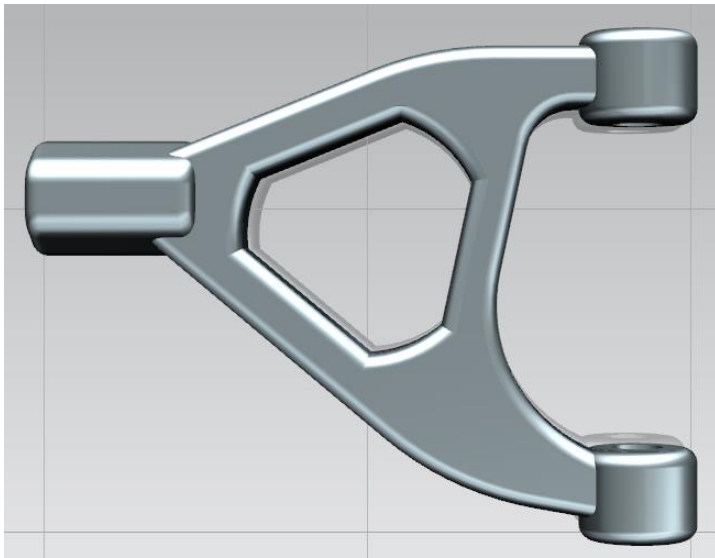


4.2.1 Ψαλίδια

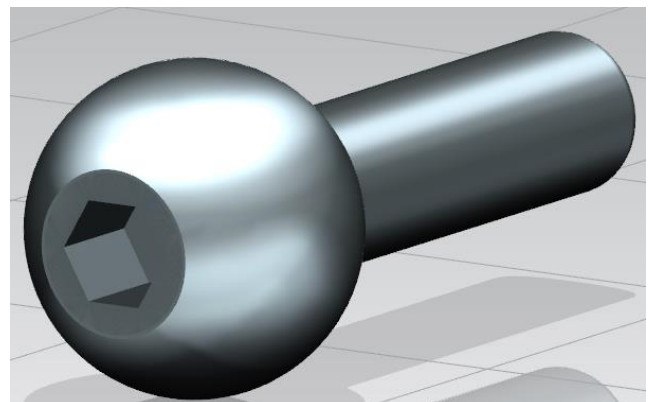
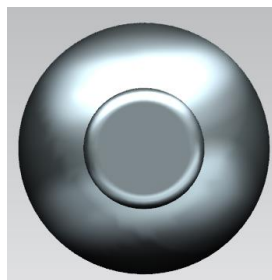
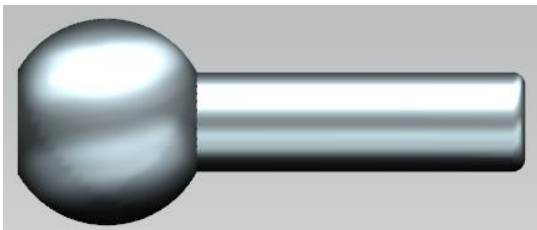
4.2.1.1 Upper wishbone assembly (Άνω ψαλίδι):



Τα αποτελούμενα μέρη του άνω ψαλιδιού φαίνονται παρακάτω:

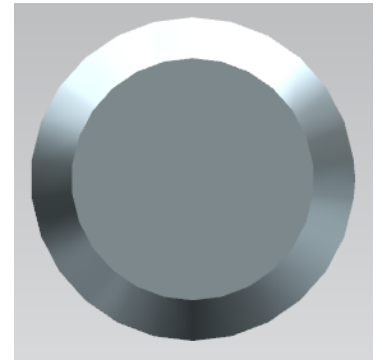
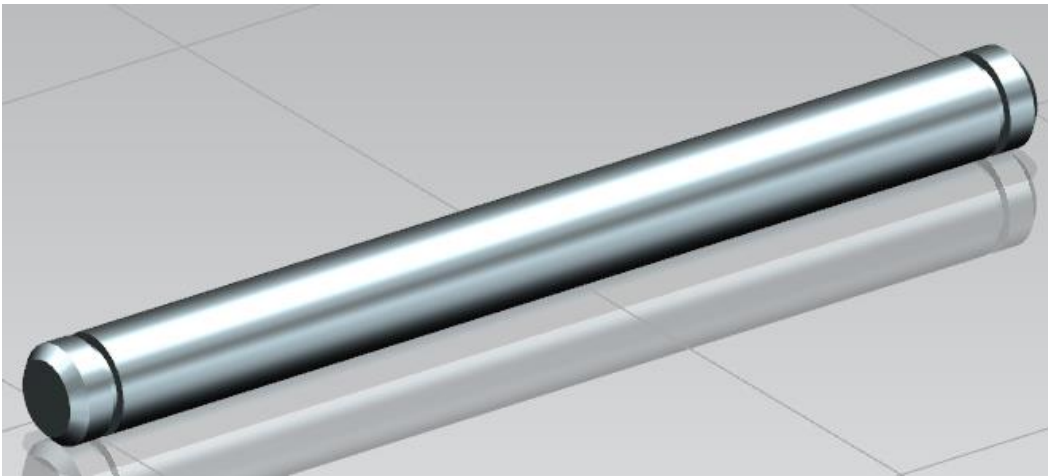
Upper wishbone:**Pillow ball:**

Τοποθετείται στο τελικό άκρο των ψαλιδιών και συνδέει τα ψαλίδια με τον τροχό. Είναι ανεξάρτητο από το ψαλίδι γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να ρυθμίσει τη γωνία camber των τροχών τοποθετώντας διαφορετικό pillow ball (μεγαλύτερο ή μικρότερο αναλόγως την ανοχή του ψαλιδιού) και τη σωστή συσχέτιση του με το pillow ball του δεύτερου ψαλιδιού. Η άκρη του είναι σφαιρική για να μπορεί να κινείται ελεύθερα και να προσαρμόζεται στις κινήσεις που πραγματοποιεί ο τροχός στους 6 άξονες.

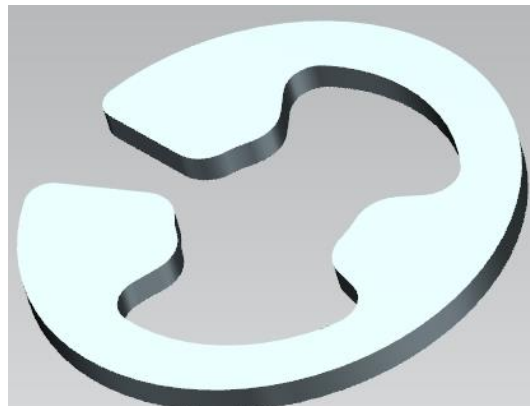


Upper hinge pin:

Είναι ο πείρος ο οποίος συνδέει το άνω ψαλίδι με το upper arm mount το οποίο όπως προαναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί μέρος του σασί. Διαθέτει κυλινδρικό σχήμα γεγονός που επιτρέπει στο ψαλίδι να περιστρέφεται γύρω από αυτό (γύρω από άξονα παράλληλο στην πορεία του οχήματος) και συνεπώς να παρέχει στον τροχό βαθμό ελευθερίας κίνησης στον κατακόρυφο (κυρίως) και οριζόντιο άξονα.

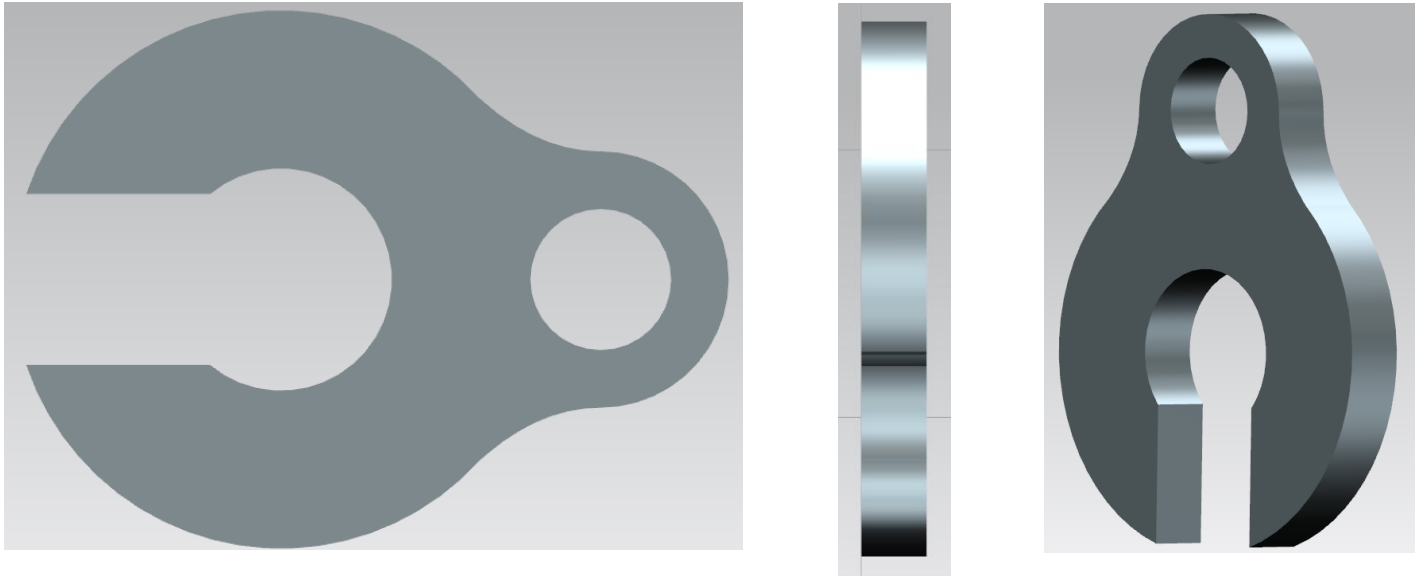
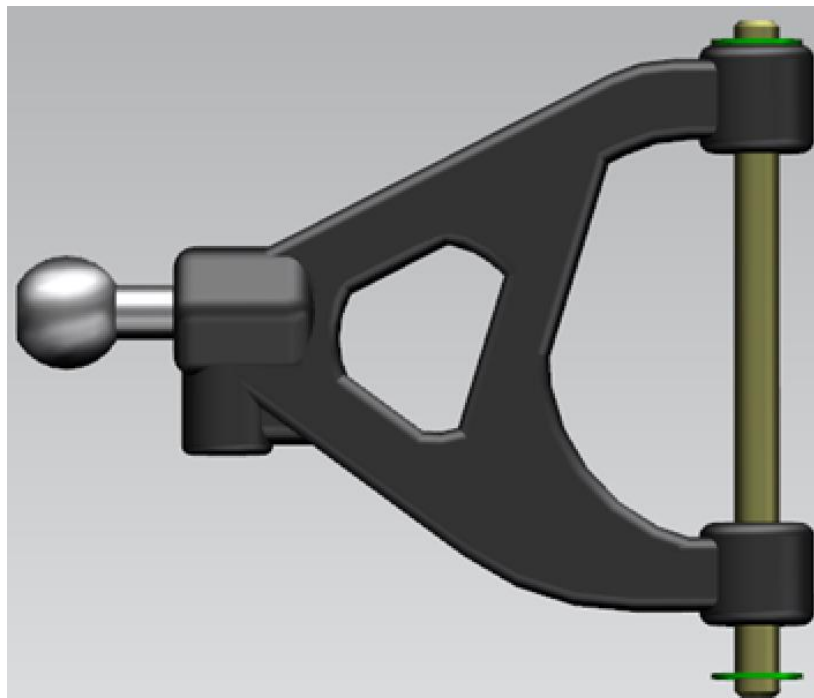
**E clip:**

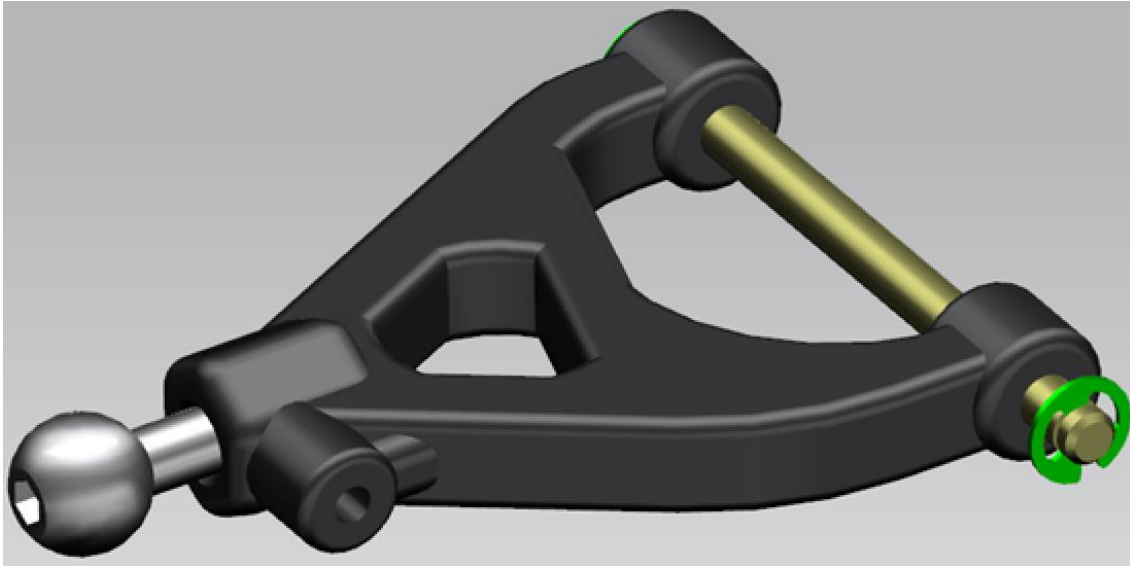
Είναι η ασφάλεια που τοποθετείται στα κενά του upper hinge pin και αποσκοπεί στη σταθεροποίηση του ψαλιδιού που είναι τοποθετημένο στο σασί ώστε να μην μετακινείται το ψαλίδι επάνω στον οριζόντιο άξονα λόγω των κραδασμών που προκαλούνται από το ανομοιόμορφο οδόστρωμα.



Adjustment clip:

Αποτελεί είδος πιάστρας που αποσκοπεί στην προσαρμογή του συστήματος ανάρτησης που χρησιμοποιείται στο τρέχον σασί. Καθιστά το σασί ικανό να δεχθεί διαφόρων ειδών αναρτήσεις διπλού ψαλιδιού ανεξαρτήτως μεγέθους. Αυτό σημαίνει πως σε περίπτωση που η απόσταση των δύο σημείων τοποθέτησης (στο σασί) του ψαλιδιού είναι μεγαλύτερο των προδιαγραφών τότε τοποθετείται adjustment clip ώστε να καλυφθεί το κενό της περίσσειας απόστασης και να μην υπάρχει ανεπιθύμητη κίνηση του ψαλιδιού λόγω των κραδασμών.

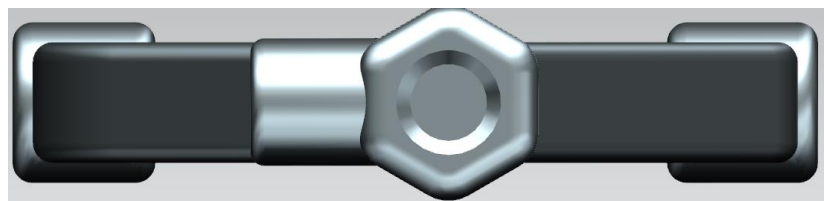
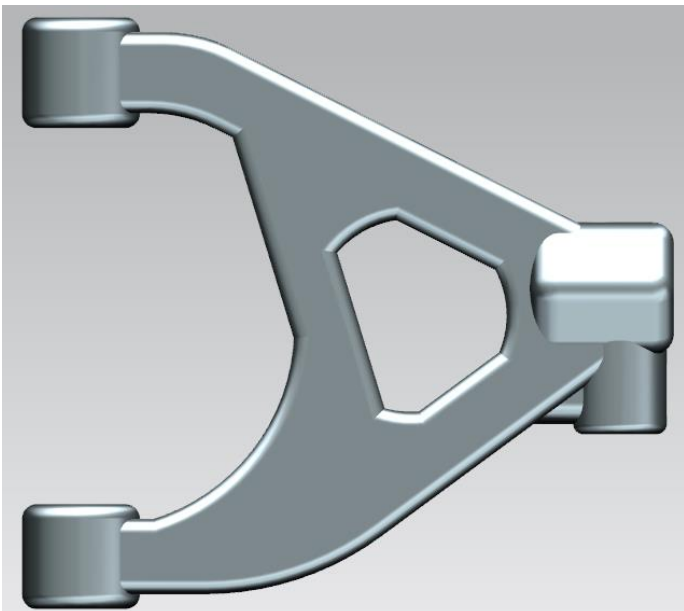
**4.2.1.2 Lower wishbone assembly (Κάτω ψαλίδι)****Lower wishbone:**

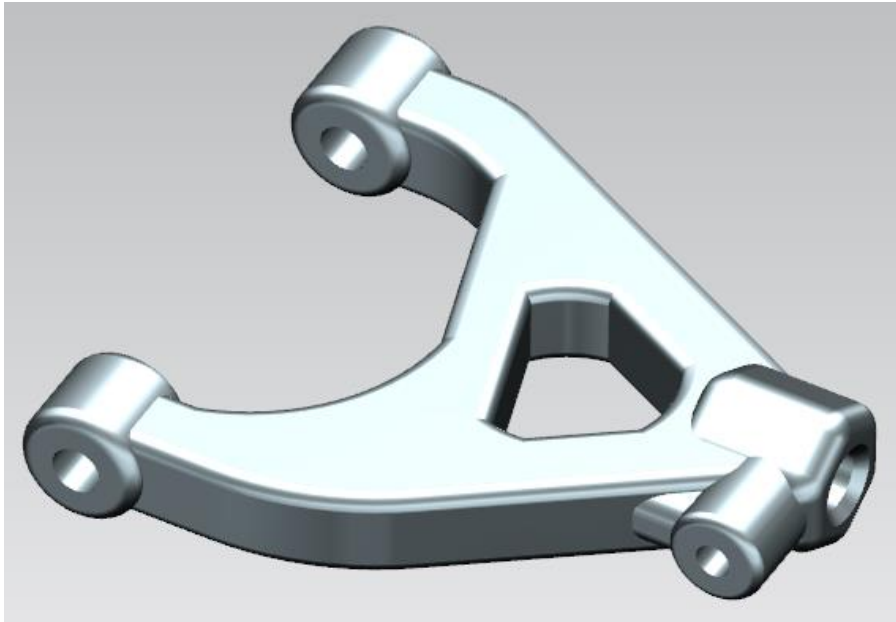


Τα αποτελούμενα μέρη του lower wishbone assembly είναι:

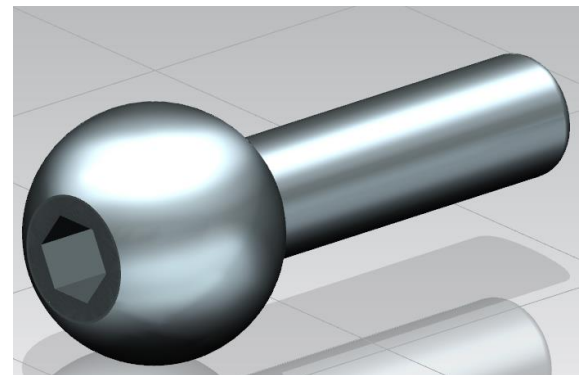
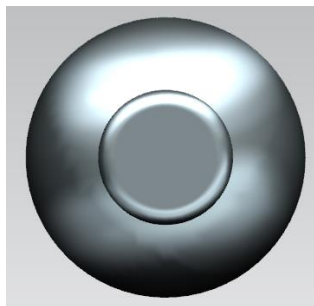
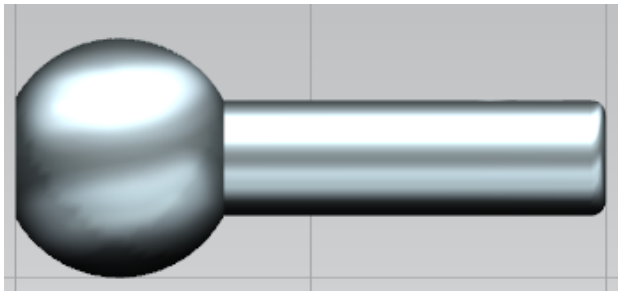
Lower wishbone:

Αποτελεί το κάτω ψαλίδι του συστήματος διπλού ψαλιδιού. Η διαφορά του με το άνω ψαλίδι είναι ότι διαθέτει οπή για την τοποθέτηση του κάτω μέρους του αποσβέστη. Αυτό σημαίνει πως το κάτω ψαλίδι είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά της κινητικής ενέργειας που προέρχεται από τους κραδασμούς του οχήματος καθώς διασχίζει ένα ανομοιόμορφο οδόστρωμα, στον αποσβέστη.



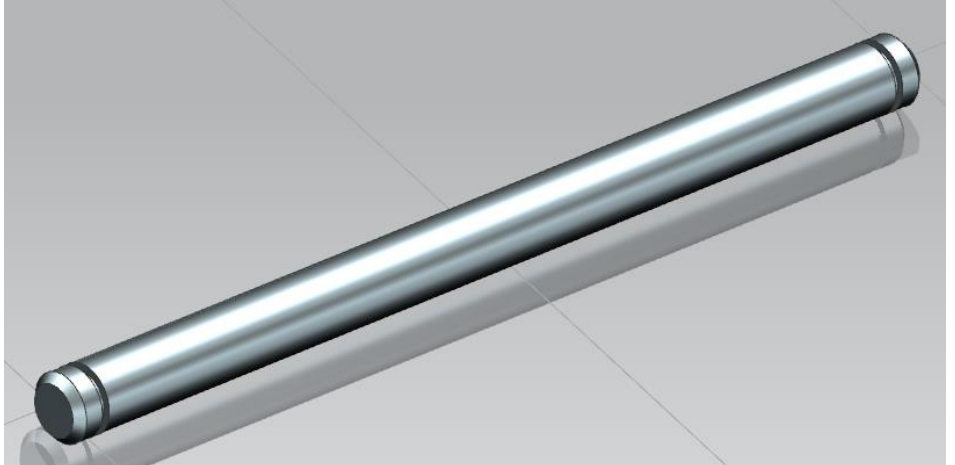
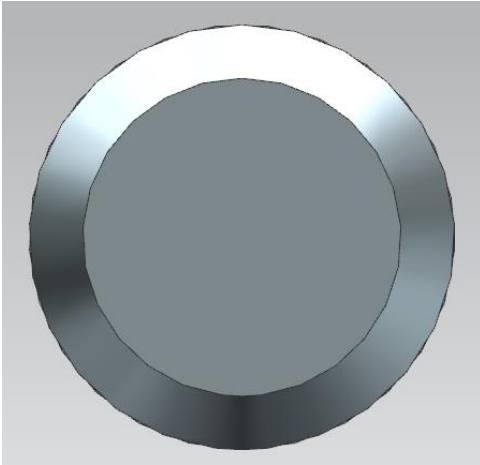
**Pillow ball:**

Ομοίως με το άνω pillow ball έτσι και το κάτω pillow ball συνδέει το κάτω ψαλίδι με τον τροχό και δίνει στο μηχανικό δυνατότητες ρύθμισης της γωνίας camber.

**Lower hinge pin:**

Είναι ο πείρος που συνδέει το κάτω ψαλίδι με τον τροχό. Πραγματοποιεί την ίδια ακριβώς λειτουργία με το upper hinge pin και το σχήμα του είναι επίσης κυλινδρικό ώστε να επιτρέπει την περιστροφική κίνηση του ψαλιδιού. Είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το upper hinge pin καθώς το κάτω ψαλίδι έχει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ακρών τοποθέτησης στο σασί. Επίσης διαθέτει χώρο για την τοποθέτηση του lower arm brace συμβάλλοντας στη σταθερότητα και ακαμψία του συστήματος.

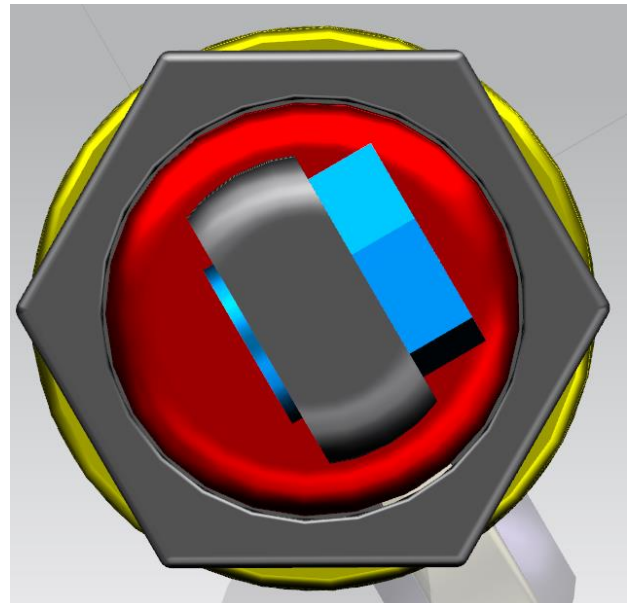
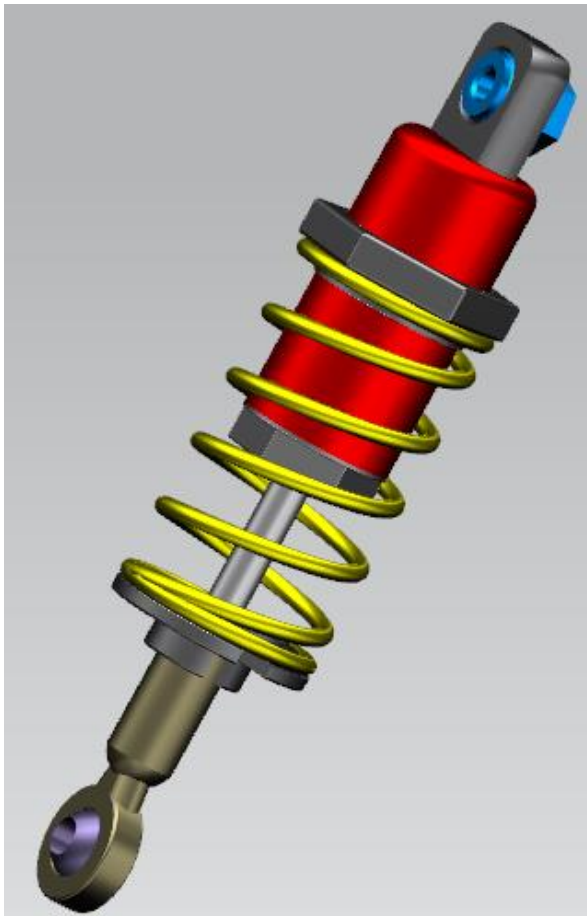
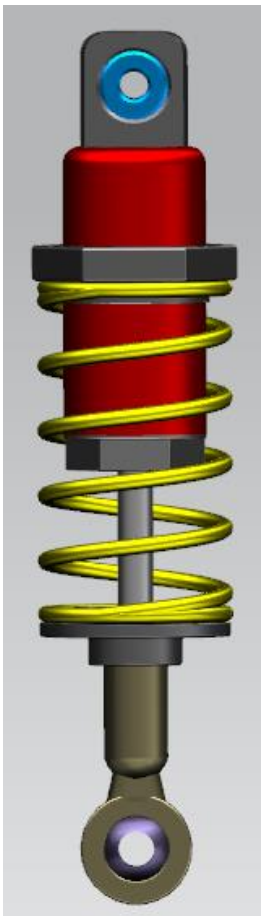




Η σύσφιξη και σταθεροποίηση του ψαλιδιού στο σασί γίνεται με τοποθέτηση E-clip στα δύο άκρα του ψαλιδιού.

4.2.2 Αμορτισέρ (Shock absorber assembly)

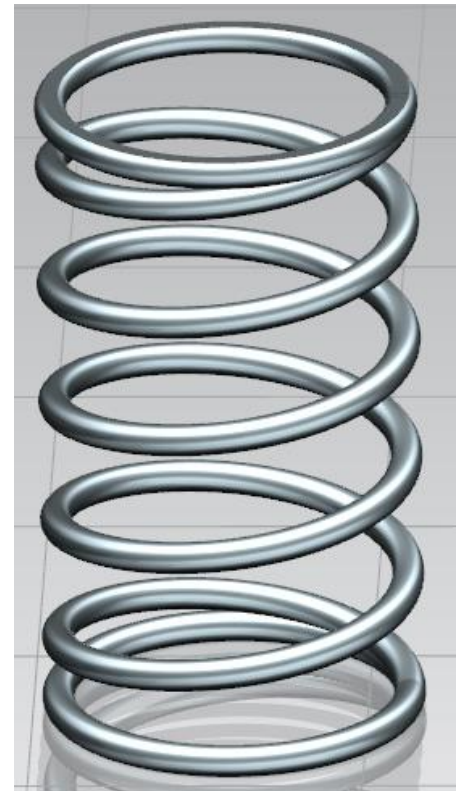
Το σύστημα αμορτισέρ είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας που προέρχεται από την κίνηση του κάτω ψαλιδιού (που είναι συνδεδεμένο με τον τροχό) λόγω των κραδασμών του οχήματος που προκαλούνται από ανωμαλίες στο οδόστρωμα σε κάποιο άλλου είδος ενέργειας (κυρίως θερμική) η οποία έπειτα διαχέεται στο περιβάλλον. Αποτελείται από το ελατήριο, το πιστόνι το οποίο κινείται σε ευθεία γραμμή εντός του αποσβέστη, τα πώματα τα οποία συνδέουν το σύστημα αμορτισέρ στο σασί και στο κάτω ψαλίδι αντιστοίχως καθώς και ο ρυθμιστής υψομέτρου.



Τα αποτελούμενα μέρη του coilover assembly είναι τα εξής:

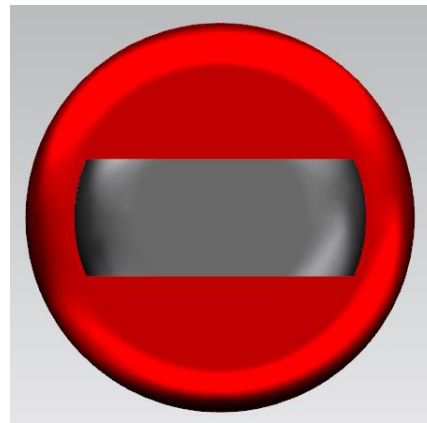
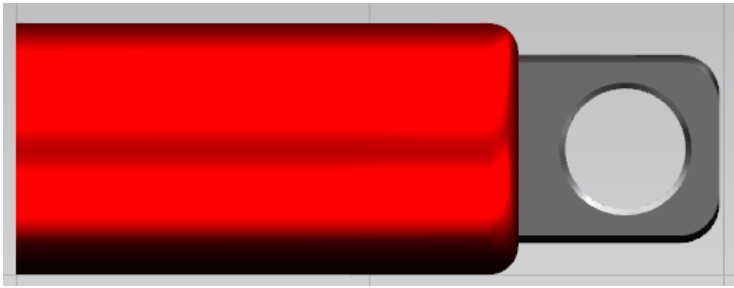
Spring:

Είναι το ελατήριο το οποίο είναι το πρωταρχικό ελαστικό μέρος της ανάρτησης και στην ουσία πραγματοποιεί τη διαδικασία της απόσβεσης και μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε θερμική.



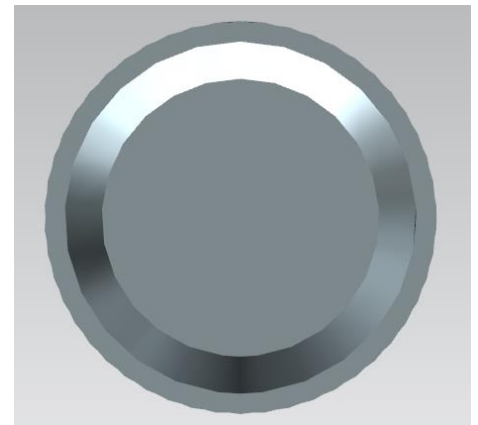
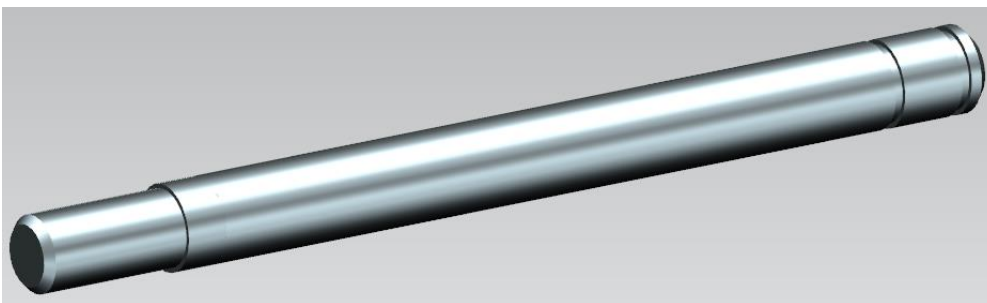
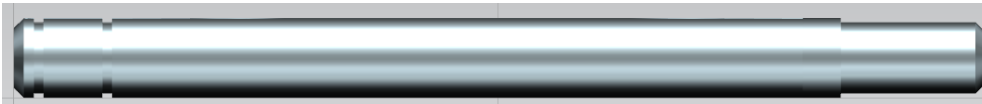
Shock body:

Είναι ο θάλαμος στον οποίο κινείται το πιστόνι σε παλινδρομική κίνηση υπό την άσκηση δύναμης από την κίνηση του κάτω ψαλιδιού. Ο ρόλος του είναι να εξασφαλίζει την ευθεία κίνηση του ελατηρίου (παράλληλα δηλαδή με την κίνηση του πιστονιού) κι εφόσον ο θάλαμος διαθέτει συγκεκριμένο ύψος να θέτει ουσιαστικά το όριο συμπίεσης του ελατηρίου και συνεπώς της ανάρτησης. Ο θάλαμος εμπεριέχει είτε έγκλειστο αέριο ή υγρό ανάρτησης (τύπος ελαίου) το οποίο διαθέτει υψηλό ιξώδες και συνεπώς συμβάλλει στη μείωση της δημιουργίας αφρού, της παγίδευσης ανεπιθύμητου αέρα και της φθοράς καθώς και στη λίπανση και στην ψύξη του θαλάμου. Στο άνω μέρος του shock body υπάρχει οπή στην οποία τοποθετείται κουζινέτο για το δέσιμο του αμορτισέρ στο σασί.



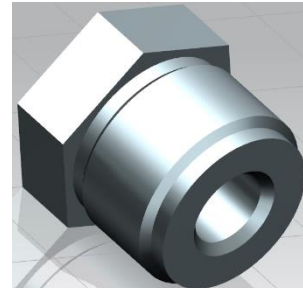
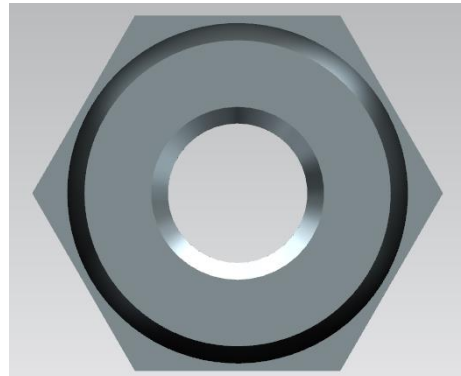
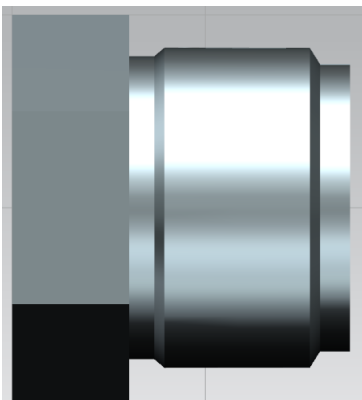
Shock shaft:

Είναι ο άξονας που συνδέει το σημείο τοποθέτησης του αμορτισέρ στο κάτω ψαλίδι με το πιστόνι που εισέρχεται στο θάλαμο απόσβεσης. Μεταφέρει δηλαδή στο πιστόνι την κινητική ενέργεια από την κίνηση του κάτω ψαλιδιού στο πιστόνι και εξασφαλίζει την πλευρική ακαμψία του αμορτισέρ.



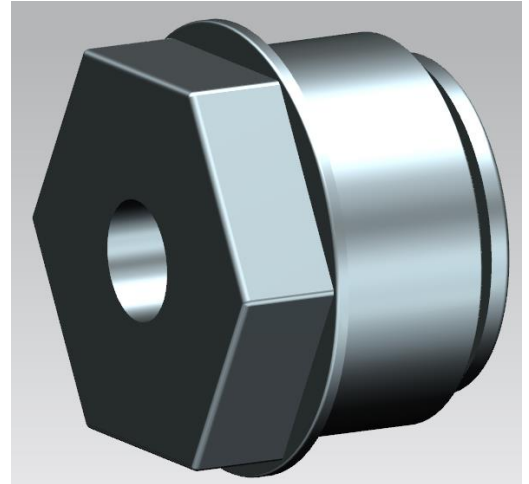
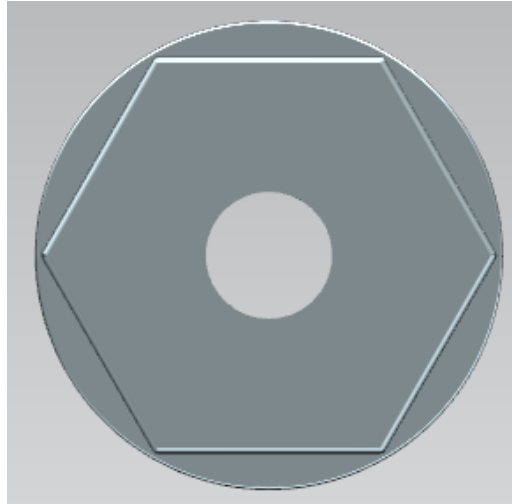
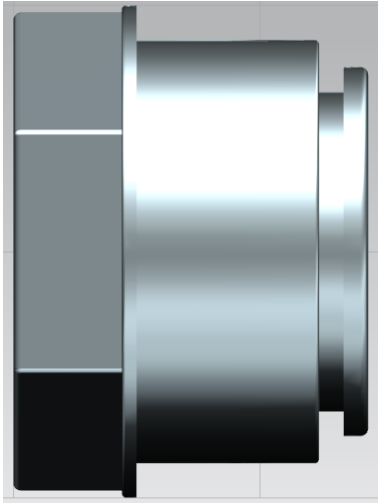
Shock bushing:

Είναι το κουζινέτο το οποίο συνδέει το άνω μέρος του shock body και συνεπώς του αμορτισέρ στο shock brace το οποίο αποτελεί μέρος του σασί.



Shock cartridge:

Αποτελεί το κάτω μέρος του αποσβέστη και συνδέεται με το shock body. Συμβάλλει στην έγκληση του ρευστού ανάρτησης μέσα στο θάλαμο. Στο κέντρο διαθέτει οπή μέσα από την οποία διέρχεται το shock shaft κατά την κίνηση του πιστονιού.

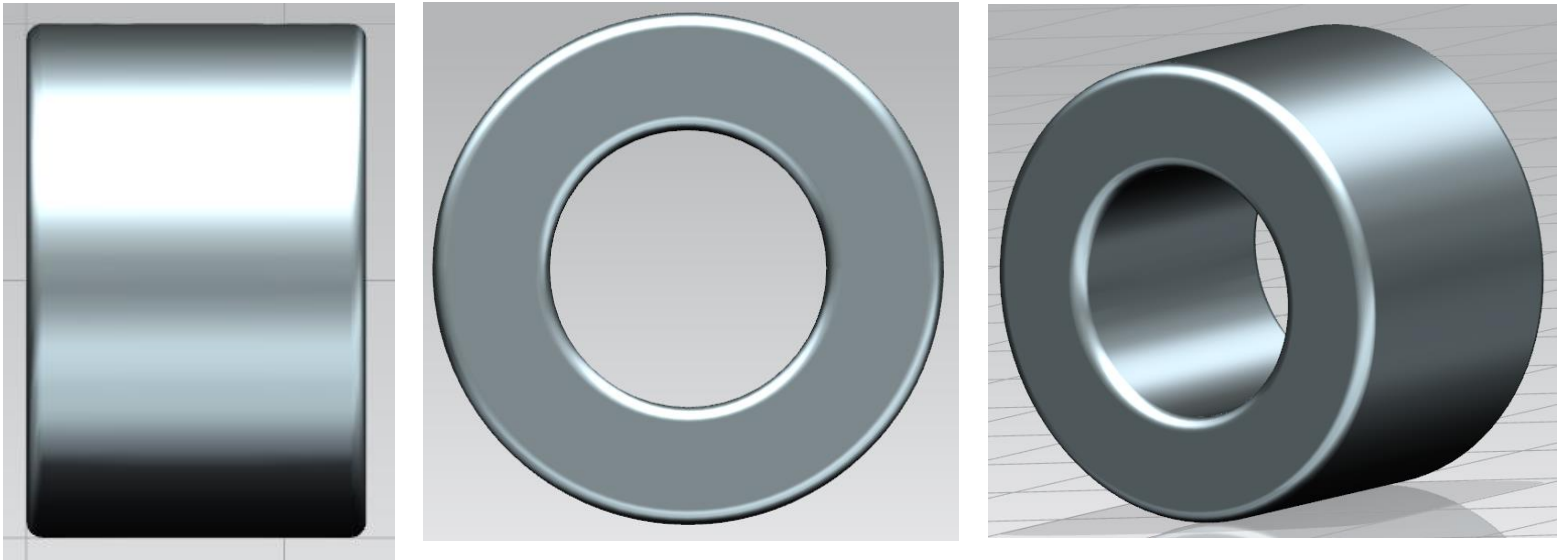
**Shock cartridge cover:**

Είναι το πώμα του shock cartridge και αποτελεί τη βάση στην οποία κάθετα το πιστόνι.

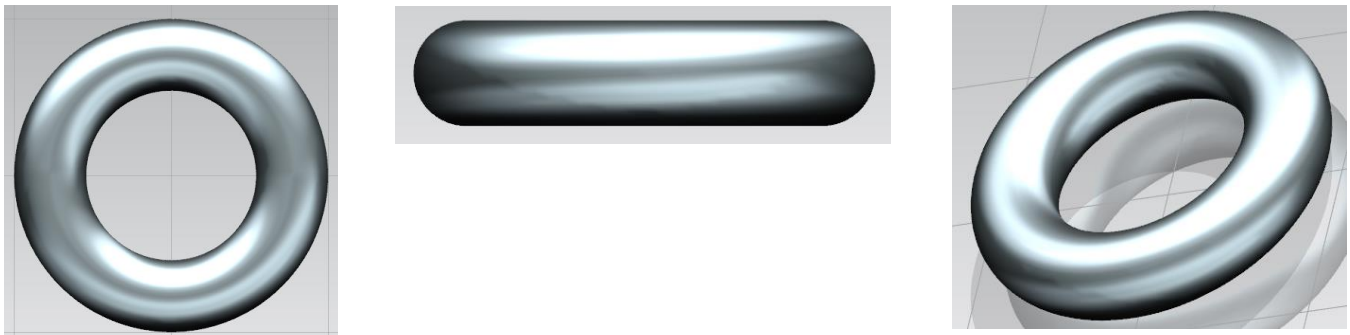


Shock cartridge spacer:

Αποτελεί τον αποστατήρα που τοποθετείται εντός του shock cartridge και σε συνδυασμό με o-rings (θα αναλυθούν παρακάτω) αποσκοπεί στην απαλοιφή αερίων που αναπτύσσονται εντός του αποσβέστη.

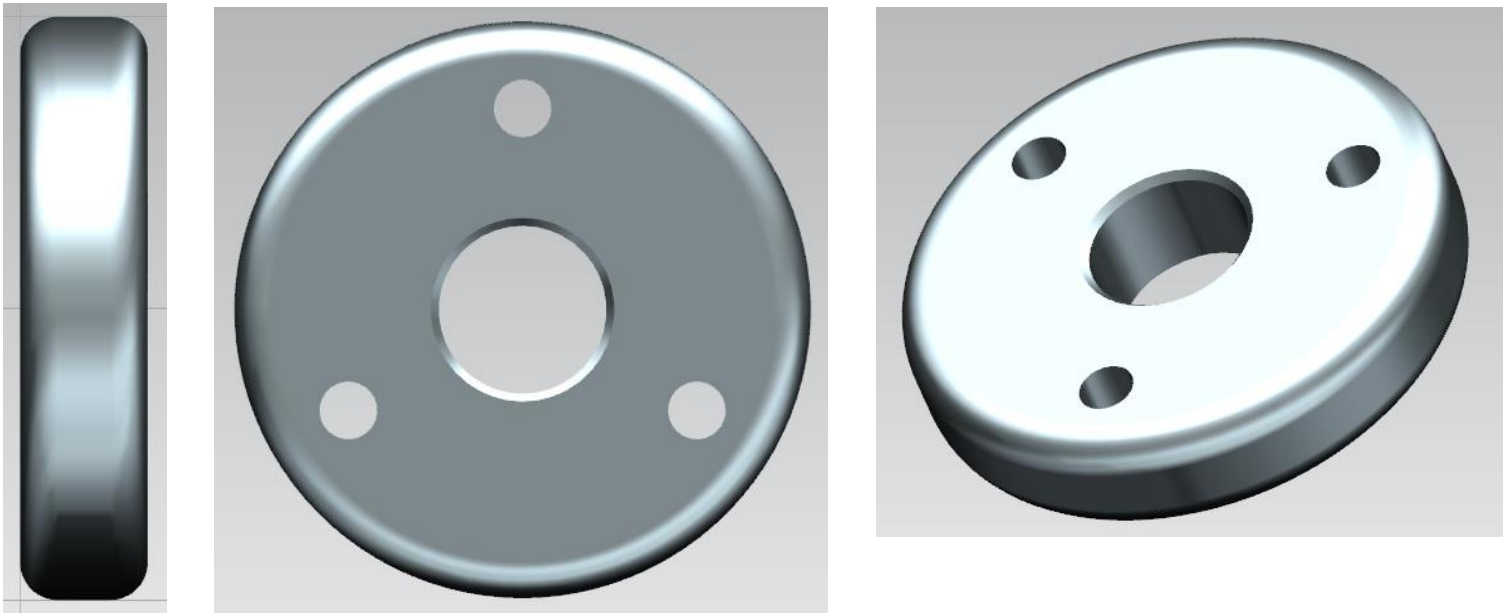
**O-ring:**

Είναι ελαστικοί μονωτήρες οι οποίοι είναι συνήθως κατασκευασμένοι από λάστιχο και αποσκοπούν στην παρεμπόδιση της επαφής του shock cartridge spacer στα άνω και κάτω τοιχώματα του shock cartridge και στην ουσία αποσβένουν την κίνηση του spacer ώστε να είναι ομαλή κατά την παλινδρόμηση του αμορτισέρ. Τοποθετούνται δύο o-rings, ένα άνω και ένα κάτω του spacer.

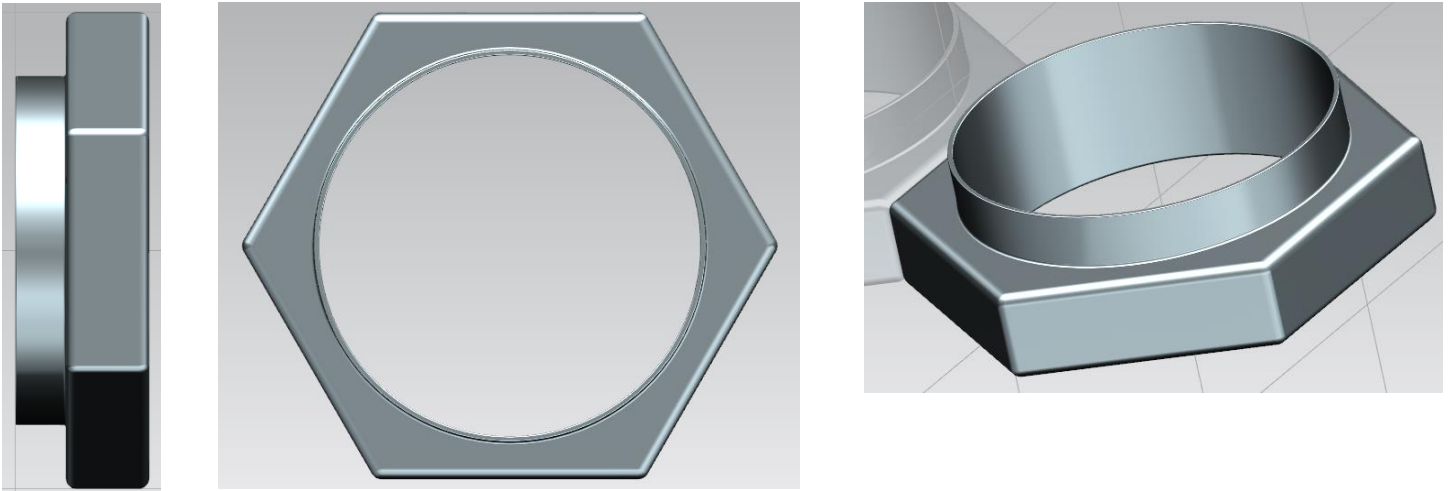


Piston:

Είναι το πιστόνι το οποίο είναι συνδεδεμένο στην άκρη του shock shaft και μαζί κινούνται μέσα στο θάλαμο απόσβεσης παλινδρομικά. Το πιστόνι μετακινεί το ρευστό που βρίσκεται μέσα στο θάλαμο συμβάλλοντας στην απόσβεση του αμορτισέρ και όταν το πιστόνι βρίσκεται σε επαφή με το άνω μέρος του θαλάμου σημαίνει ότι το αμορτισέρ έχει συμπιεστεί στο όριο του. Το πιστόνι διαθέτει οπές οι οποίες επιτρέπουν τη μεταφορά του ρευστού εντός του θαλάμου (εφόσον δεν συμπιέζεται το ρευστό και απλά μεταφέρεται) και καθιστούν δυνατή την κίνηση του μέσα σε αυτόν (αν δεν υπήρχαν οι οπές το πιστόνι δε θα μπορούσε να κινηθεί ειδικά στην περίπτωση υγρού που είναι μη συμπιεστό ρευστό). Το πιστόνι συγκρατείται από άνω και κάτω με e-clips.

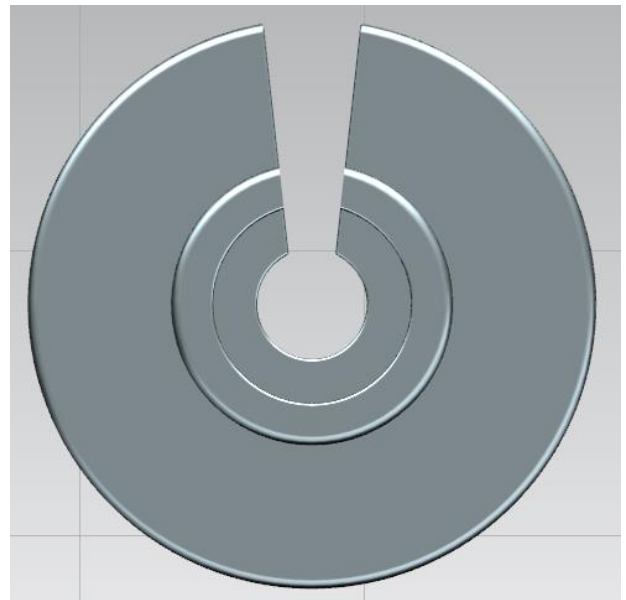
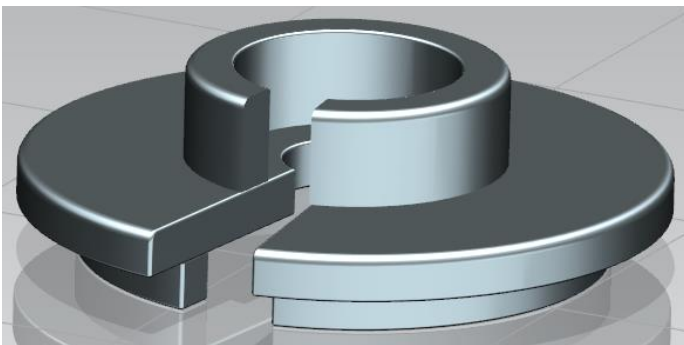
**Shock spring adjustment nut:**

Είναι το περικόχλιο που τοποθετείται επάνω στο shock body (περιτυλίγει ουσιαστικά το shock body) και αποτελεί το άνω όριο του spring καθώς το spring συμπιέζεται και επεκτείνεται με την κάθετη ταλάντωση του αμορτισέρ. Αποτελεί δηλαδή την άνω βάση πάνω στην οποία πραγματοποιείται η συμπίεση του ελατηρίου. Το εξάρτημα μπορεί να ρυθμιστεί υψομετρικά επάνω στο shock body γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να ρυθμίσει τη σκληρότητα του ελατηρίου και συνεπώς την οδηγική συμπεριφορά του οχήματος.



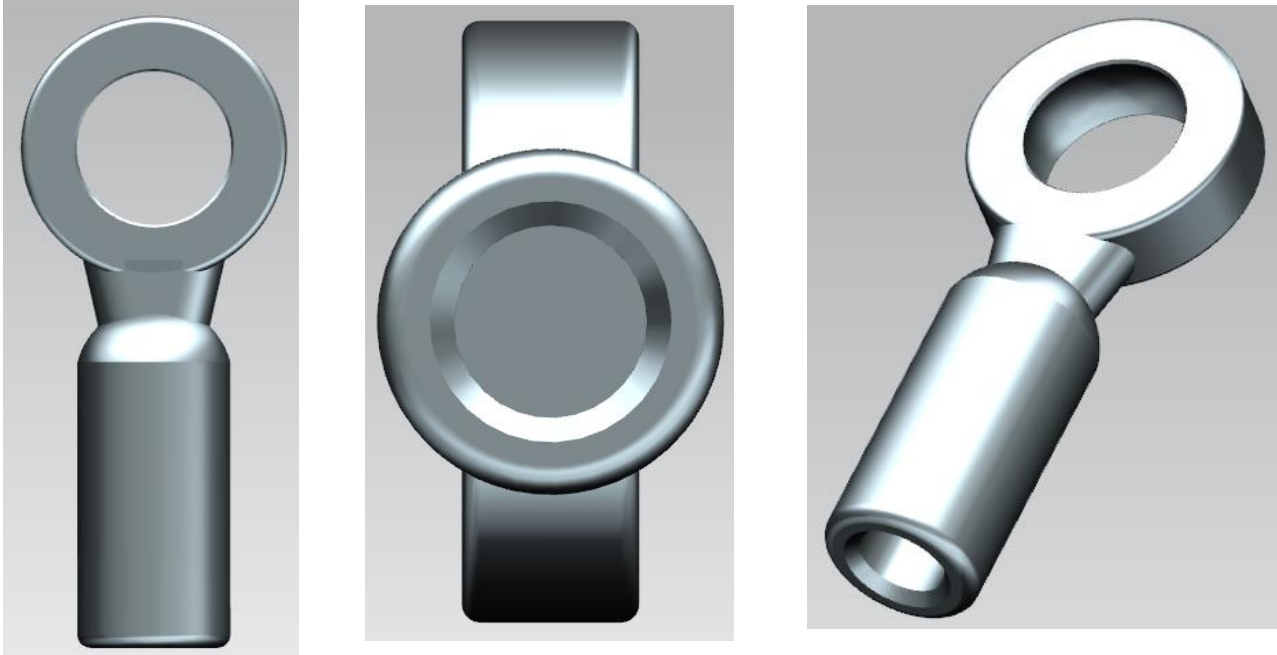
Spring Cup:

Αποτελεί την κάτω βάση στην οποία τοποθετείται το spring και είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά της κινητικής ενέργειας από το οδόστρωμα στο ελατήριο. «Σπρώχνει» δηλαδή το ελατήριο προς το shock body και χάρη στο spring adjustment nut που είναι σταθερό το ελατήριο συμπιέζεται και επιτυγχάνεται απόσβεση.

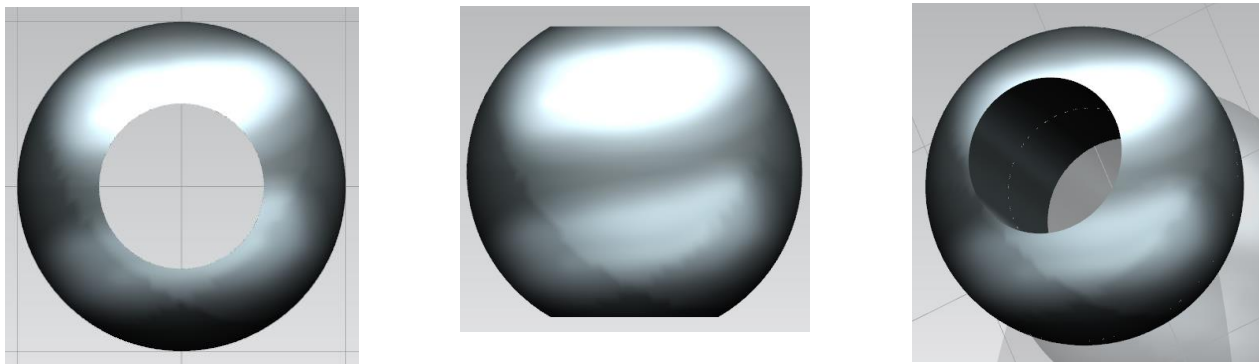


Ball end:

Είναι το κουζινέτο που συνδέει το κάτω μέρος του συστήματος αμορτισέρ με το κάτω ψαλίδι. Δένεται πάνω στο εξάρτημα misc ball (θα αναλυθεί αμέσως μετά) από την κάτω μεριά και με το spring cup από την πάνω μεριά. Αποτελεί την κάτω βάση ολόκληρου του συστήματος αμορτισέρ.

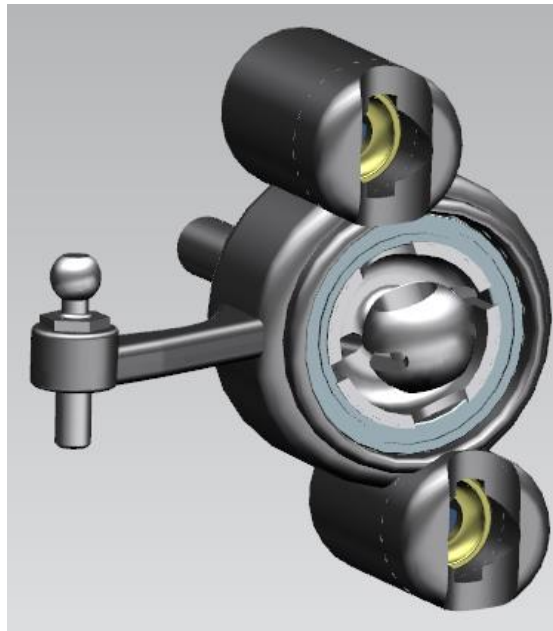
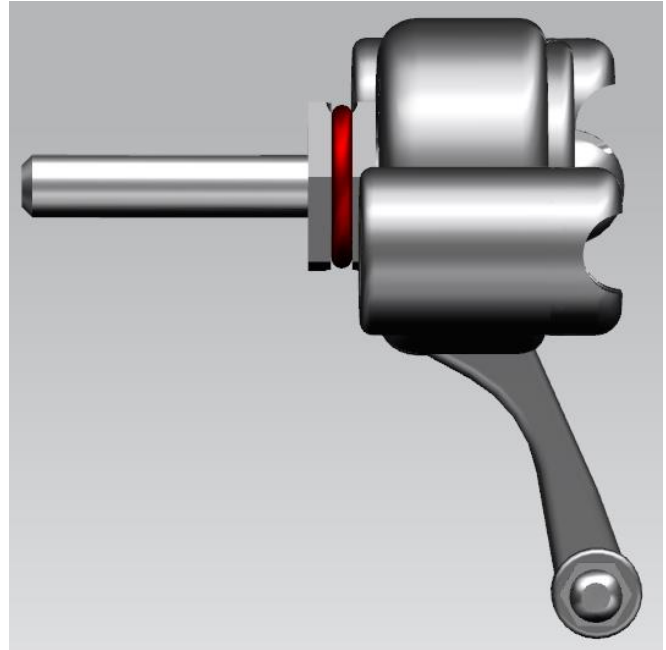
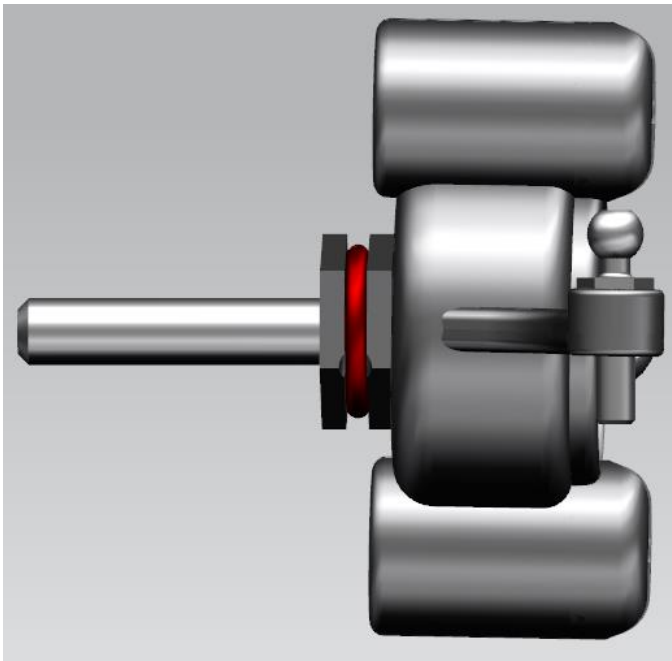
**Misc ball:**

Είναι κυκλική άρθρωση πάνω στην οποία δένεται το ball end και συνεπώς ολόκληρο το κάτω μέρος του αμορτισέρ. Αυτό τοποθετείται στο κάτω ψαλίδι και δίνει τη δυνατότητα στο ball end (και συνεπώς στο αμορτισέρ) να περιστρέφεται κατά την κίνηση του ψαλιδιού εφόσον η κίνηση του ψαλιδιού είναι και αυτή περιστροφική και το αμορτισέρ είναι τοποθετημένο σε γωνία και όχι εντελώς κάθετα στο έδαφος.



4.2.3 Σύστημα τοποθέτησης τροχού (Wheel hub assembly)

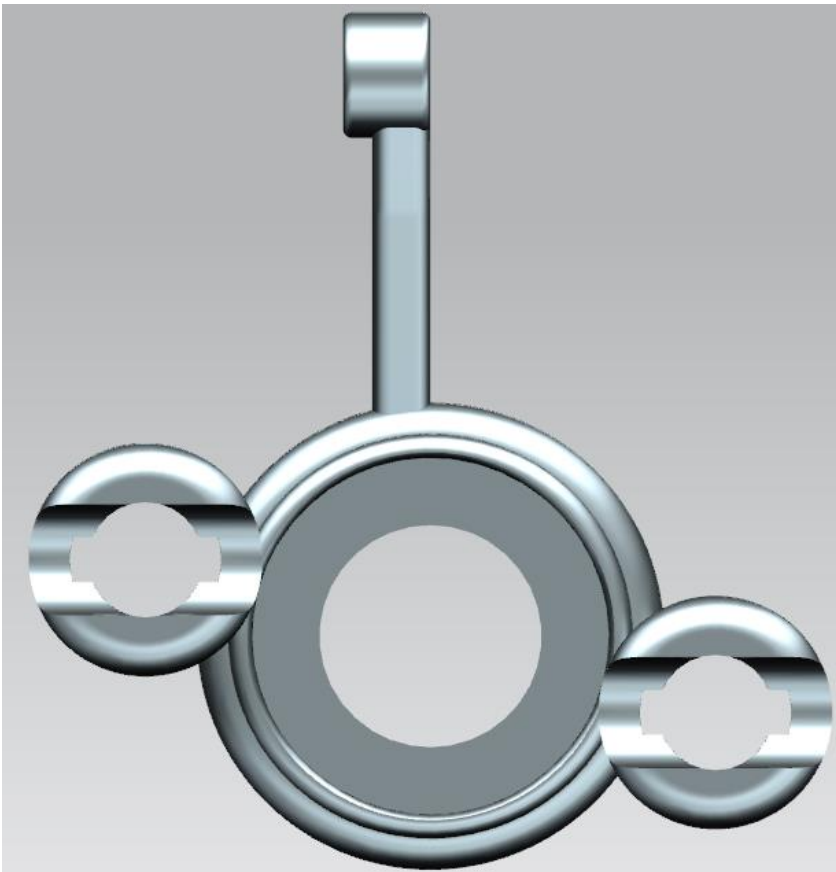
Είναι το σύστημα που συνδέει τα δυο ψαλίδια της ανάρτησης με τους τροχούς. Είναι υπεύθυνο για τη σταθερότητα των τροχών εν κινήσει, την μεταφορά της περιστροφικής ενέργειας από τον κινητήριο άξονα στους τροχούς, την πηδαλιούχηση των τροχών και τέλος δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό για την εύκολη τοποθέτηση και εξαγωγή του τροχού από το σύστημα.

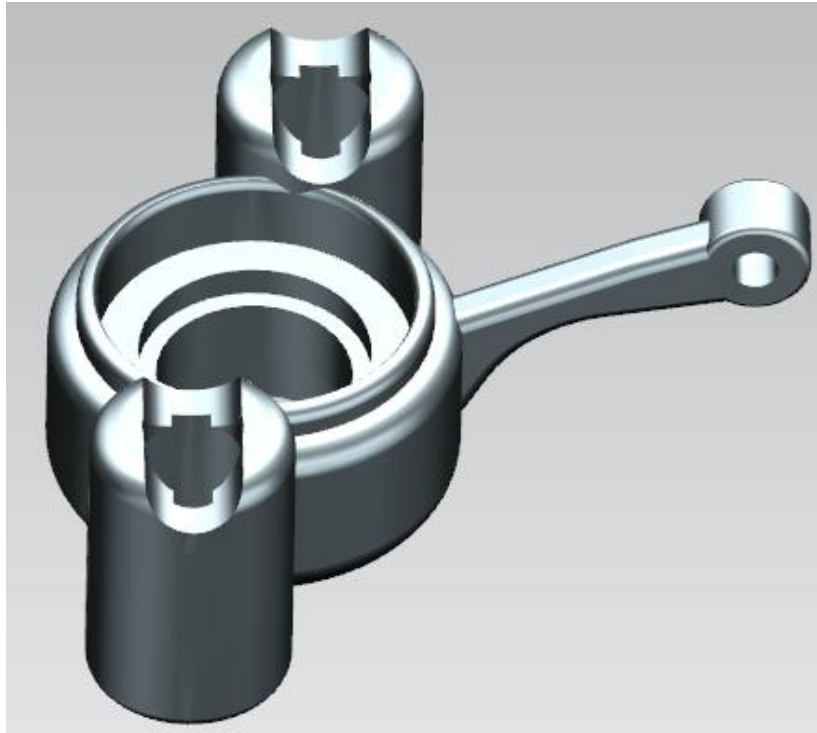


Τα αποτελούμενα μέρη του Wheel hub assembly είναι:

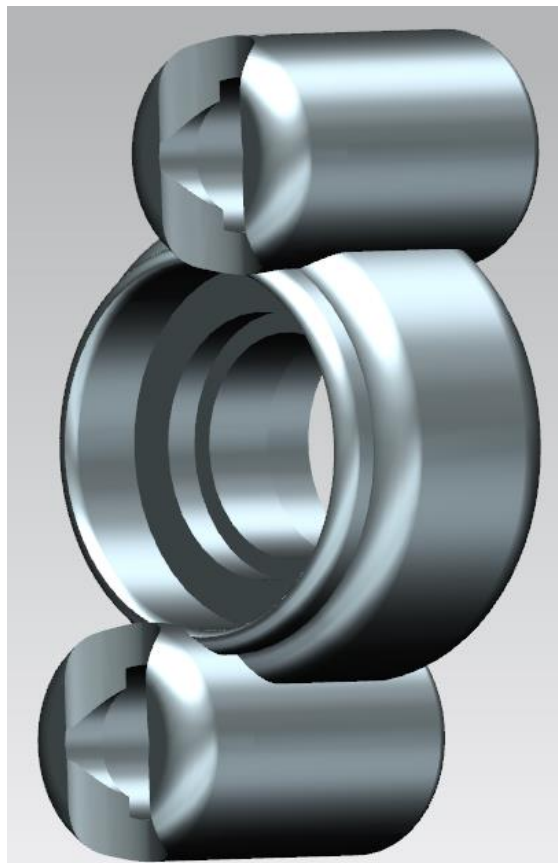
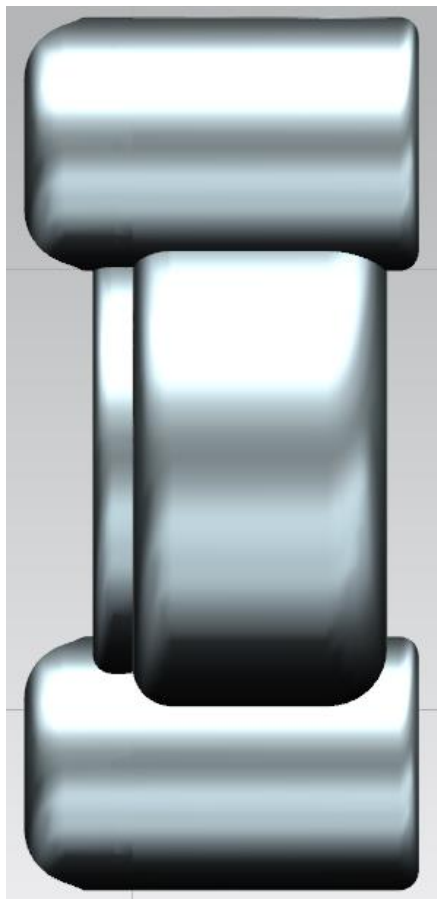
Front hub carrier:

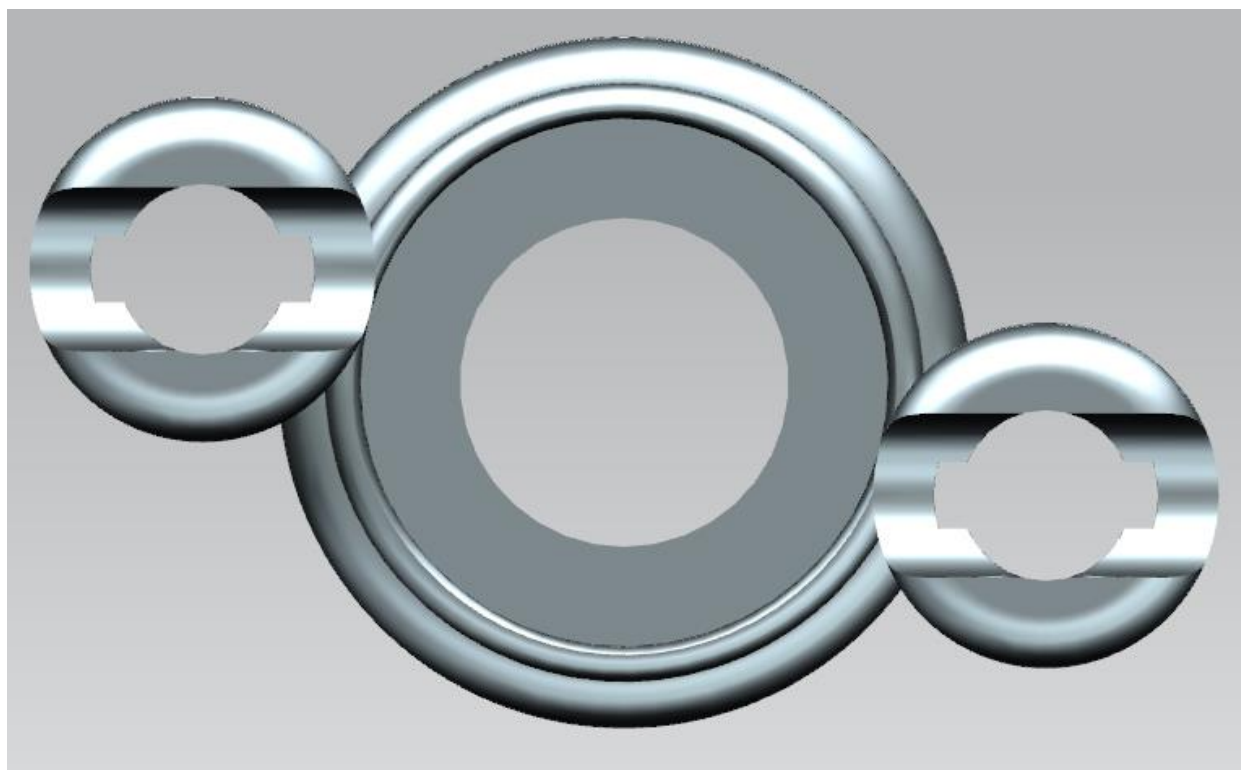
Είναι η βάση τοποθέτησης τόσο των μπροστινών τροχών αλλά και των pillow ball των ψαλιδιών. Αποτελεί το βασικότερο κομμάτι του wheel hub assembly καθώς είναι υπεύθυνο για τρεις διαφορετικές ενέργειες. Πρώτον διαθέτει μεγάλη οπή στο κέντρο στην οποία εισέρχεται το wheel axle (θα αναλυθεί αμέσως μετά) το οποίο από την μέσα μεριά είναι συνδεδεμένο με το ημιαξόνιο που προσφέρει περιστροφική κίνηση στον τροχό και από την έξω μεριά είναι υπεύθυνο για την τοποθέτηση και το δέσιμο του τροχού. Δεύτερον διαθέτει προεξοχή στην οποία τοποθετείται το ball stud (θα αναλυθεί παρακάτω) το οποίο συνδέεται με τον άξονα πηδαλιούχησης γεγονός που δίνει στους τροχούς τη δυνατότητα στροφής του οχήματος. Τρίτον Διαθέτει άνω και κάτω οπές (θήκες) τοποθέτησης των pillow ball των ψαλιδιών και αποτελεί το σημείο σύνδεσης του τροχού και του συστήματος ανάρτησης γεγονός που μεταφέρει την κινητική ενέργεια των κραδασμών των τροχών στην ανάρτηση.



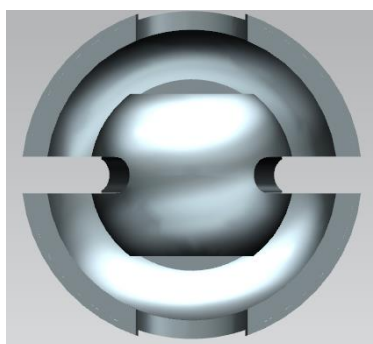
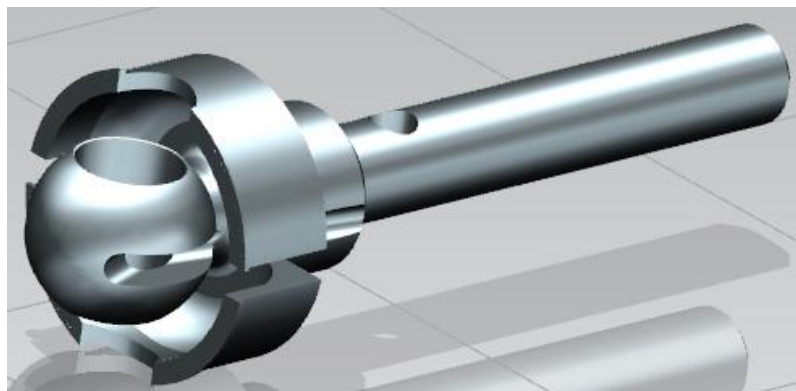
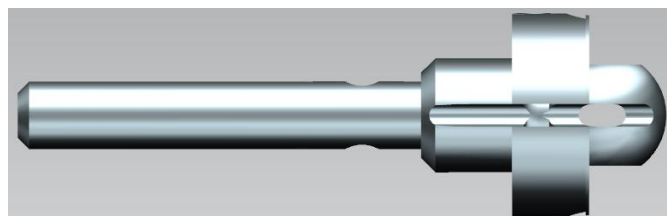
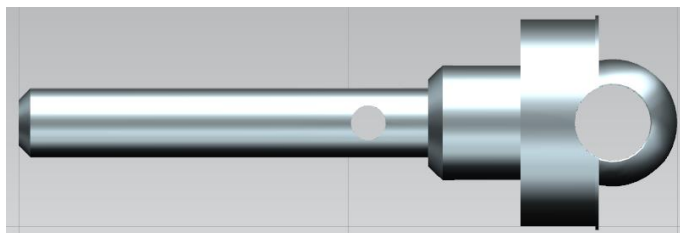
**Rear hub carrier:**

Είναι η βάση τοποθέτησης των πίσω τροχών. Πραγματοποιεί τις ίδιες ενέργειες με το front hub carrier με εξαίρεση την πηδαλιούχηση καθώς δεν διαθέτει προεξοχή για τοποθέτηση ball stud.



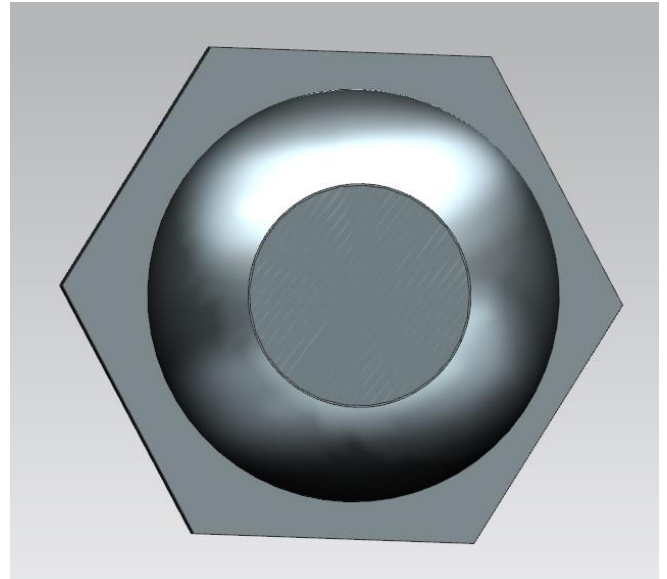
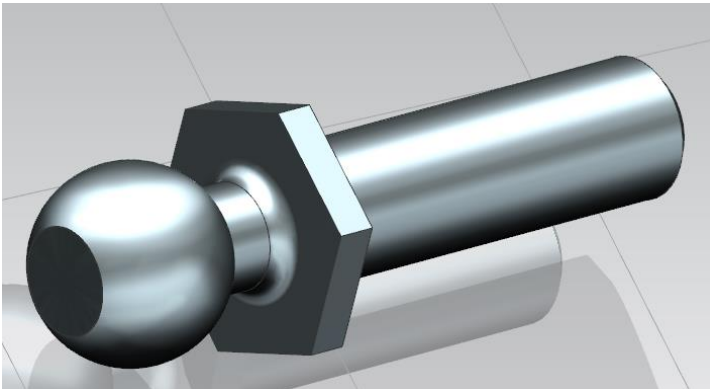
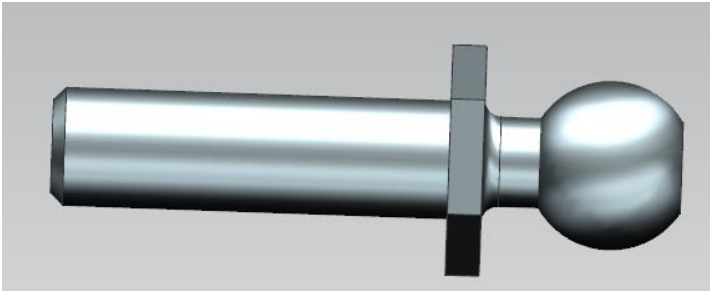
**Wheel axle:**

Είναι ο άξονας που συνδέει το ημιαξόνιο με τον τροχό προσφέροντάς του περιστροφική κινητική ενέργεια και επίσης αποτελεί τον άξονα τοποθέτησης και περιστροφής του τροχού. Τοποθετείται μέσα στη μεγάλη οπή του wheel hub.

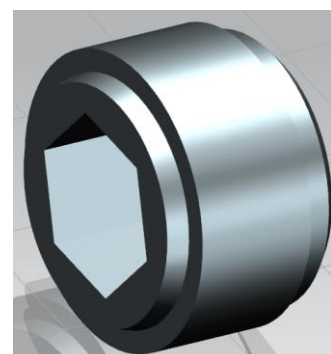
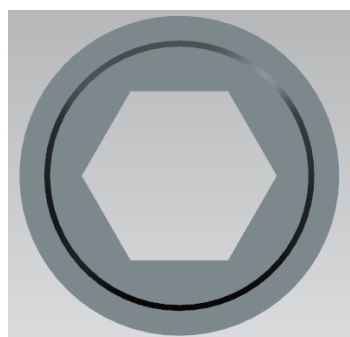
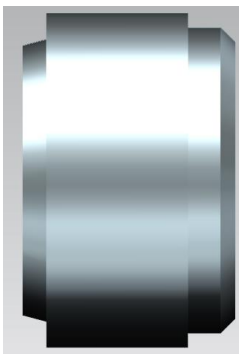


Ball stud:

Είναι ο ορθοστάτης ο οποίος τοποθετείται επάνω στην οπή της προεξοχής του wheel hub. Διαθέτει σφαιρική άρθρωση η οποία συνδέεται με τον άξονα πηδαλιούχησης του οχήματος και είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του συστήματος του τροχού γύρω από τον άξονα kingpin και συνεπώς τη στρόφη του οχήματος.

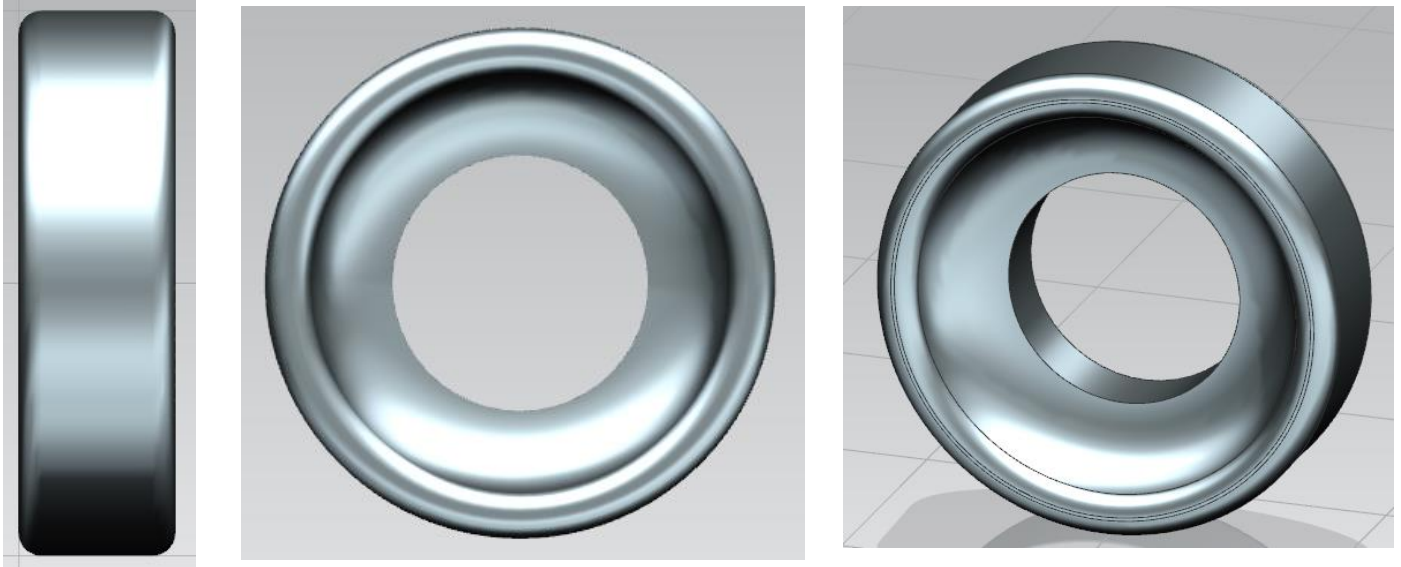
**Pillow ball retainer:**

Είναι ο συγκρατητής των pillow ball των ψαλιδιών. Τοποθετούνται εντός των οπών του hub carrier και πάνω σε αυτούς τοποθετούνται τα pillow ball bushings (θα αναλυθούν αμέσως μετά) τα οποία με τη σειρά τους συγκρατούν τα pillow balls. Είναι ρυθμιζόμενα γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο μηχανικό να ρυθμίσει το πόσο εσωτερικά ή εξωτερικά θα βρίσκεται η άρθρωση του άνω ή του κάτω ψαλιδιού. Με αυτό τον τρόπο πραγματοποιείται η ρύθμιση της γωνίας camber.

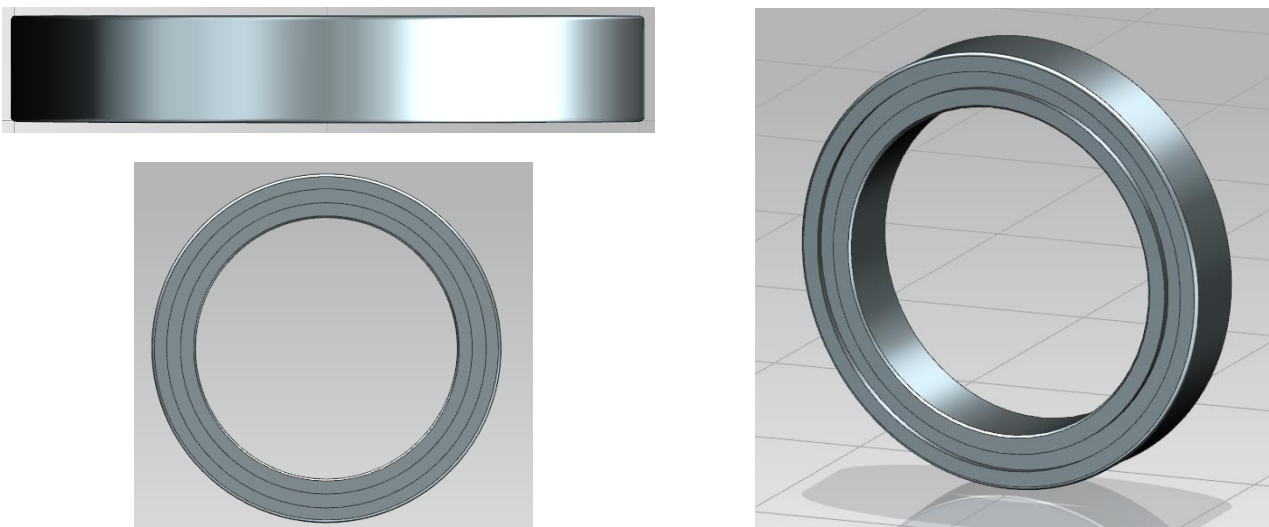


Pillow ball bushing:

Είναι ο μονωτήρας πάνω στον οποίο κάθεται το pillow ball του ψαλιδιού. Διαθέτει σφαιρικό πλαίσιο εντός του οποίου δίνεται η δυνατότητα ελεύθερης κίνησης και περιστροφής του pillow ball γεγονός που συμβάλλει στην προσαρμοστικότητα του pillow ball σε κάθε είδος κραδασμού και μετακίνησης του τροχού λόγω ανώμαλου οδοστρώματος.

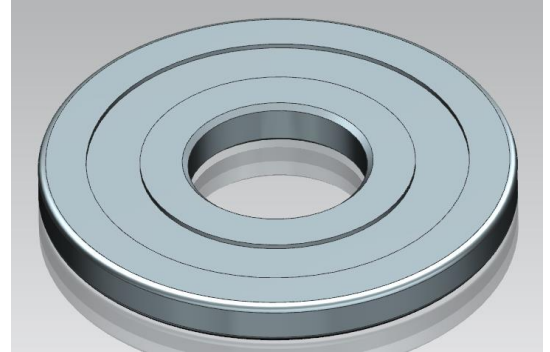
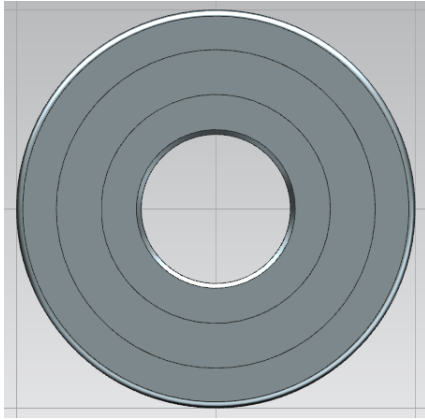
**Front hub bearing:**

Είναι το ρουλεμάν που τοποθετείται στη μεγάλη οπή του hub carrier μαζί με το wheel axle (περικλείει στην ουσία το wheel axle) και είναι υπεύθυνο για τη στήριξη του περιστρεφόμενου wheel axle και την ελάττωση της τριβής ανάμεσα στο hub carrier και το wheel axle.

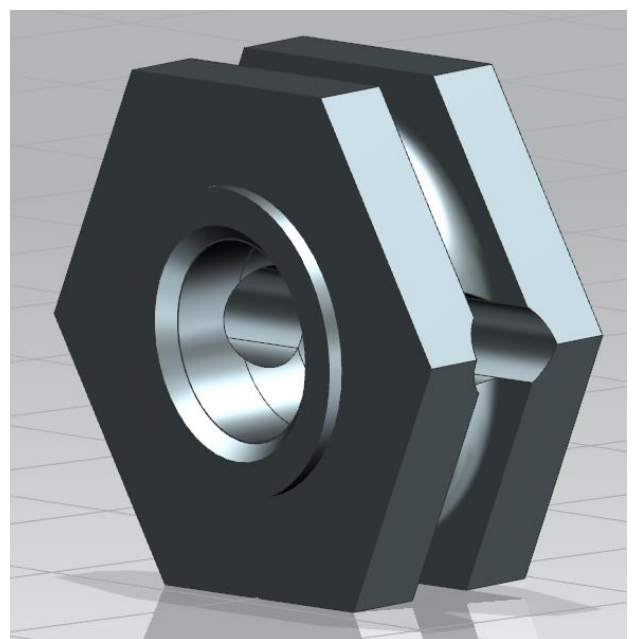
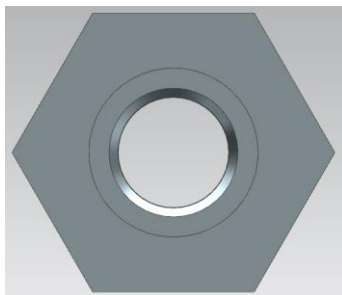
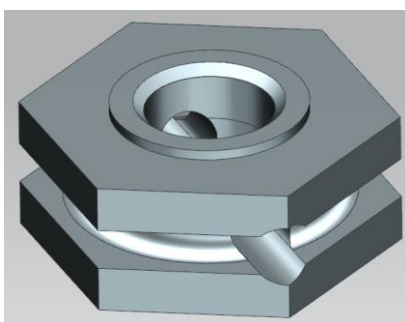
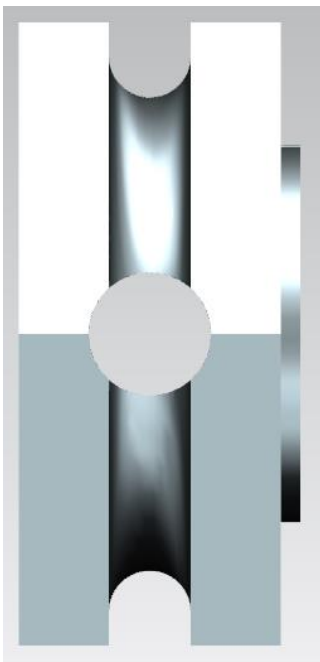


Rear hub bearing:

Είναι το ρουλεμάν που συγκρατεί το wheel axle στο σημείο στένωσης της μεγάλης οπής του hub carrier και ελαττώνει τις τριβές ανάμεσα στο wheel axle και στο hub carrier.

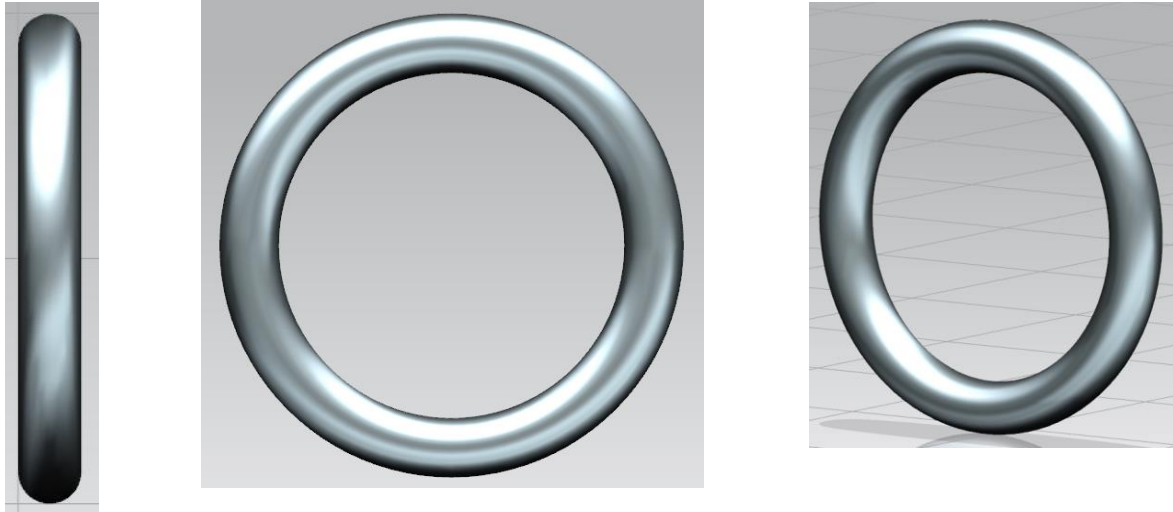
**Hex drive:**

Αποτελεί το περικόχλιο το οποίο τοποθετείται περιμετρικά του wheel axle και πίσω από το hub bearing (προς τα έξω). Είναι υπεύθυνο για τη συγκράτηση του hub bearing ώστε να μην κινείται κατά μήκος του wheel axle και να διατηρείται σταθερό. Επίσης είναι ρυθμιζόμενο γεγονός που δίνει στο μηχανικό τη δυνατότητα να επιλέξει την απόσταση των τροχών από το σύστημα ανάρτησης (και συνεπώς από το αμάξωμα) ή να εγκαταστήσει στο όχημα τροχούς μικρότερου πλάτους.

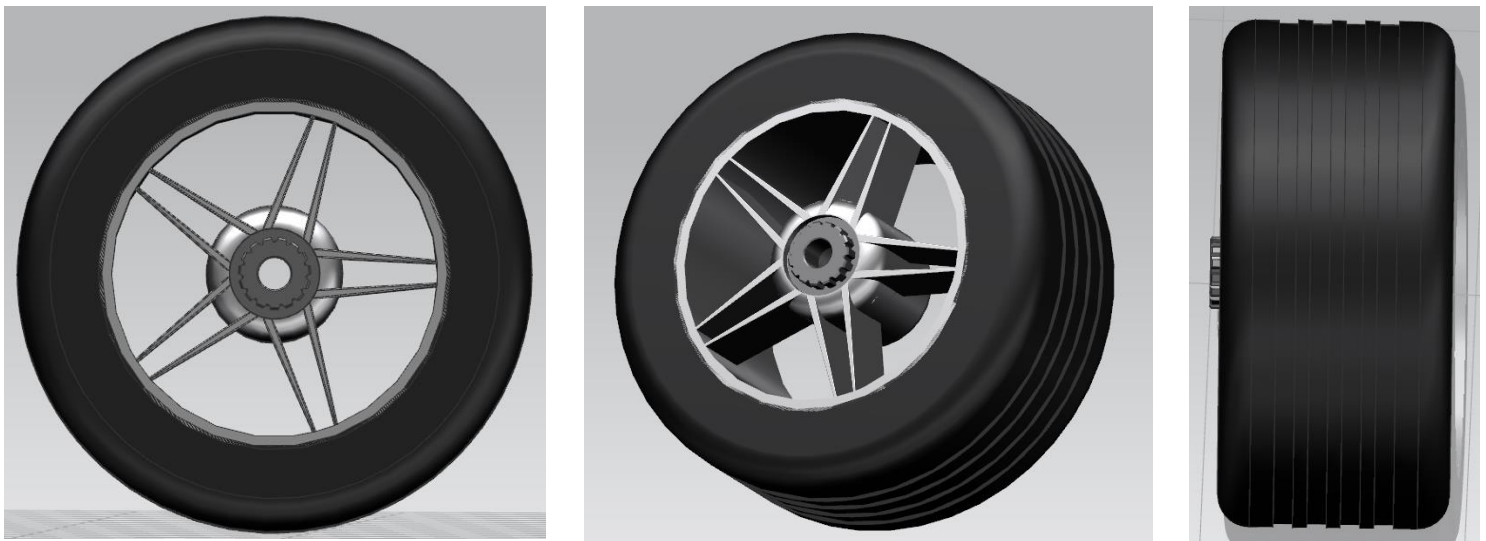


Hex retaining o-ring:

Είναι ελαστικός μονωτήρας κατασκευασμένος από λάστιχο και αποσκοπεί στην συγκράτηση και τη θερμική προστασία του hex drive. Τοποθετείται περιμετρικά του hex drive στο κατάλληλα διαμορφωμένο κενό.

**4.3 Τροχοί (Wheel assembly)**

Οι τροχοί αποτελούν το πρωταρχικό εξάρτημα που ευθύνεται για την κίνηση του οχήματος και τη μεταφορά της κινητικής ενέργειας από το οδόστρωμα στο σύστημα ανάρτησης. Περιέχουν τη ζάντα και το ελαστικό το οποίο τοποθετείται περιμετρικά της ζάντας.

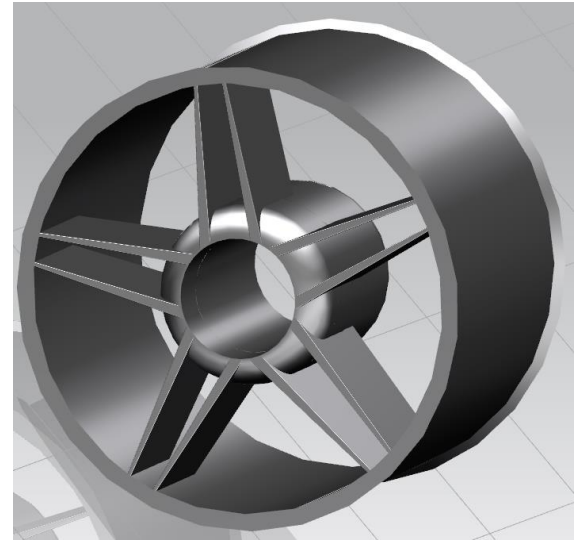
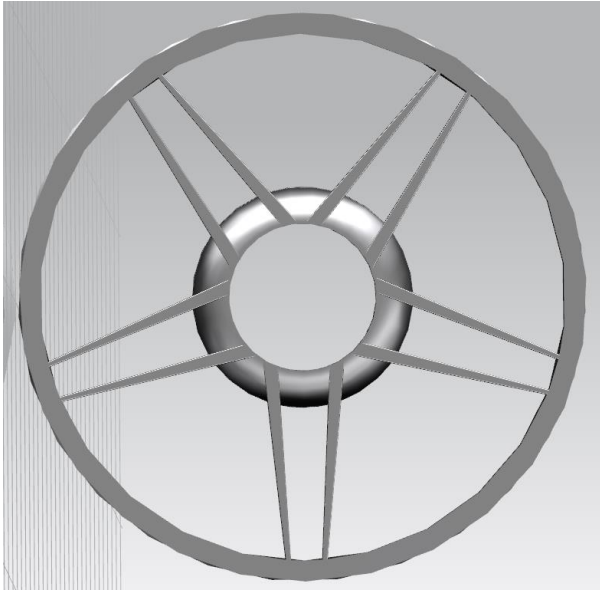


Tyre:

Είναι το ελαστικό το οποίο λόγω του υψηλού συντελεστή τριβής που διαθέτει αντιστέκεται στην ολίσθηση κατά την περιστροφή του τροχού σε σχέση με το έδαφος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το τμήμα του τροχού που έρχεται σε επαφή με το οδόστρωμα να ασκεί δύναμη αντίθετη στην πορεία του οχήματος μετακινώντας το όχημα προς τα εμπρός. Αυτή η δύναμη είναι γνωστή ως πρόσφυση (traction). Το ελαστικό διαθέτει αυλάκια (grooves) τα οποία δίνουν τη δυνατότητα διαφυγής στο νερό, στο χώμα, στα χαλίκια, στο χιόνι κλπ. σε περίπτωση που το οδόστρωμα καλύπτεται με κάποιο από αυτά τα στοιχεία. Τα αυλάκια αυτά εξασφαλίζουν πως θα υπάρχει η μέγιστη δυνατή πρόσφυση σε οποιοδήποτε έδαφος και δε θα είναι προσκολλημένα στο ελαστικό τα προαναφερθέντα στοιχεία. Επίσης εξασφαλίζουν το συνεχή εξαερισμό των ελαστικών ο οποίος συμβάλλει στην ψύξη τους άρα και στην αποφυγή υπερθέρμανσης γεγονός που παρατείνει το προσδόκιμο ζωής των ελαστικών.

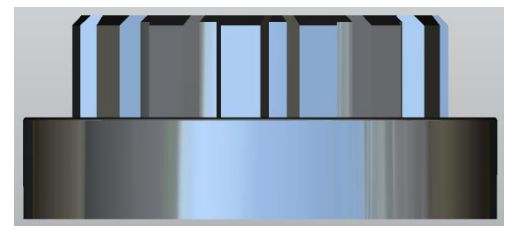
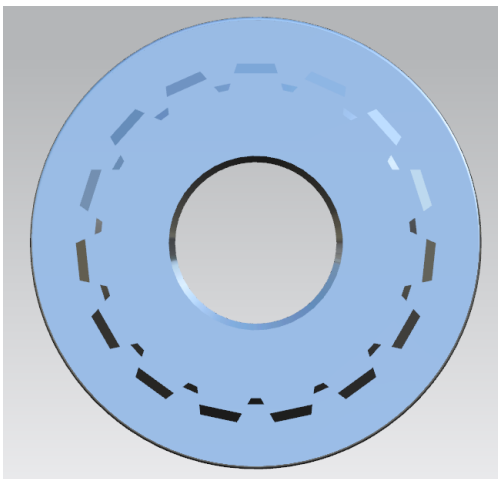
**Rim:**

Είναι η ζάντα πάνω στην οποία τοποθετείται το ελαστικό και αποτελεί το σκελετό του τροχού. Διαθέτει κυκλικό σχήμα ώστε να εξασφαλίζει την ομαλή κύλιση του τροχού στο οδόστρωμα. Συνήθως κατασκευάζεται από αλουμίνιο λόγω της ελαφρότητας και ελαστικότητας του (σε περίπτωση άσκησης μεγάλης δύναμης το σχήμα της ζάντας απλώς μεταβάλλεται και δεν σπάει) ή από ανθρακόνημα το οποίο είναι εξαιρετικά ελαφρύ και σκληρό άλλα αρκετά εύθραυστο. Στο κέντρο διαθέτει μεγάλη οπή στην οποία τοποθετείται από την έξω μεριά το wheel nut που σταθεροποιεί τον τροχό στο σύστημα ανάρτησης και από μέσα διαθέτει το πλαίσιο το οποίο συνδέεται με το hub carrier.



Center lock wheel nut:

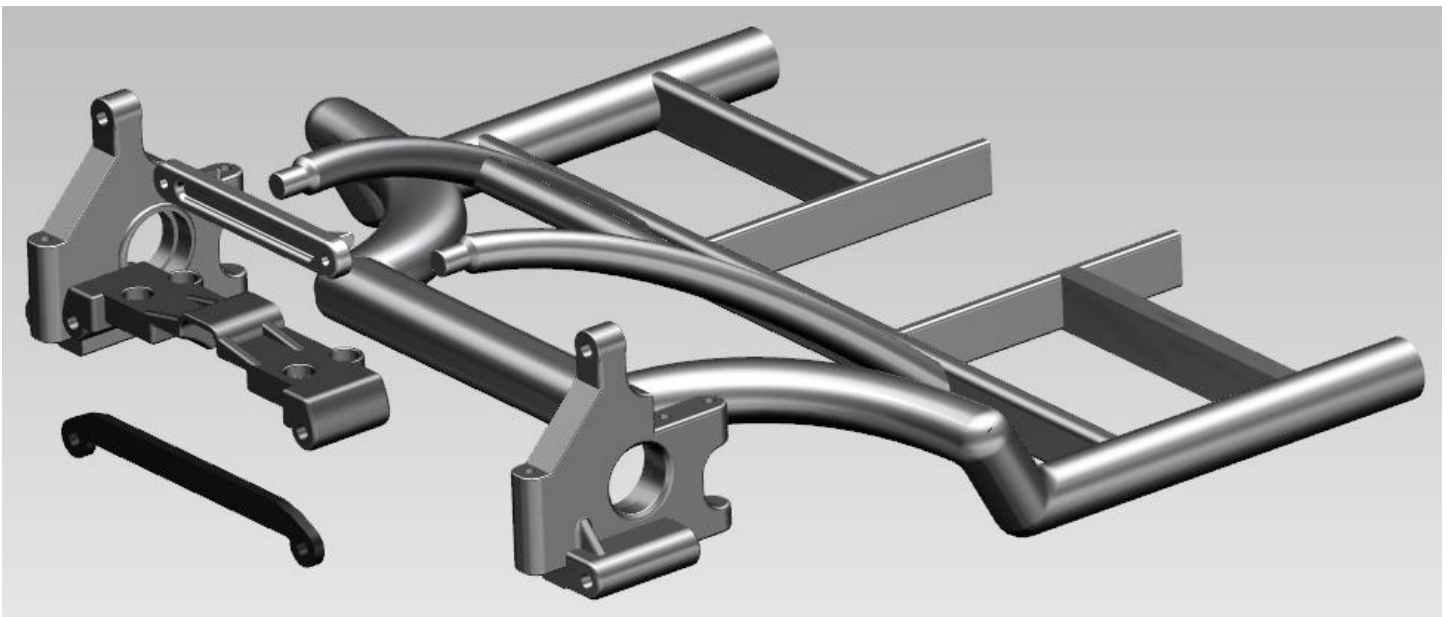
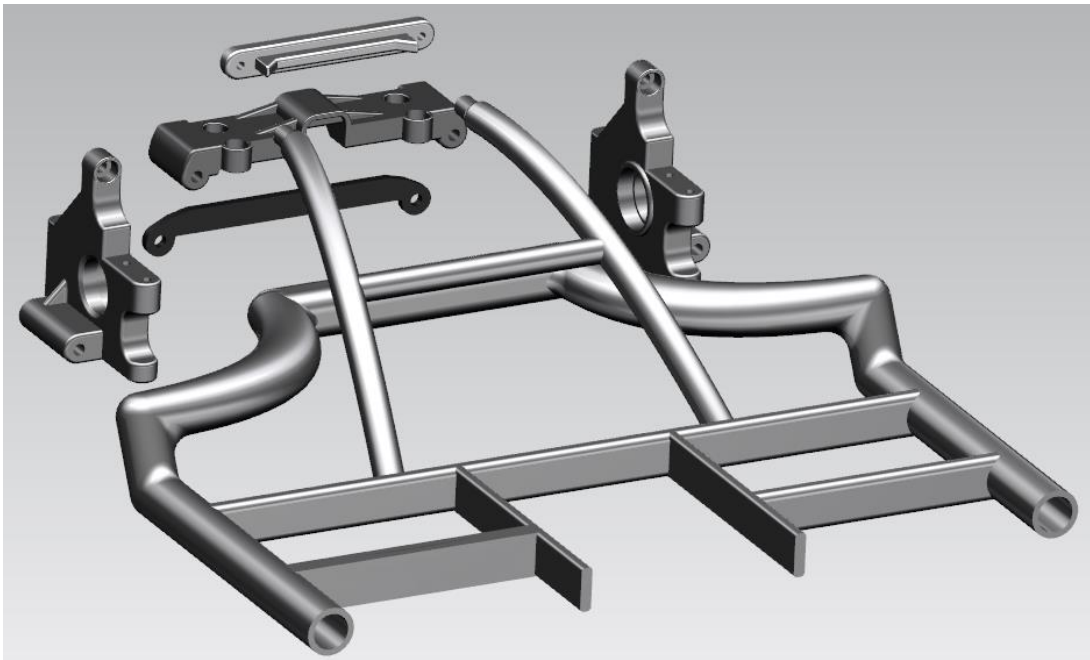
Ο τροχός του οχήματος που κατασκευάστηκε διαθέτει κεντρικό μηχανισμό κλειδώματος που χρησιμοποιείται συνήθως σε σπορ και αγωνιστικά οχήματα και όχι μπουλόνια όπως στα περισσότερα επιβατικά οχήματα. Προσφέρει το πλεονέκτημα της γρήγορης εισαγωγής και εξαγωγής του τροχού με το μειονέκτημα ότι χρειάζεται ο μηχανικός να διαθέτει το κατάλληλο ηλεκτρικό εργαλείο με μεγάλη ροπή για την περιστροφή του wheel nut ενώ ταυτόχρονα διαθέτει πολύ μεγαλύτερο κόστος. Παρακάτω βλέπουμε αυτόν το μηχανισμό.



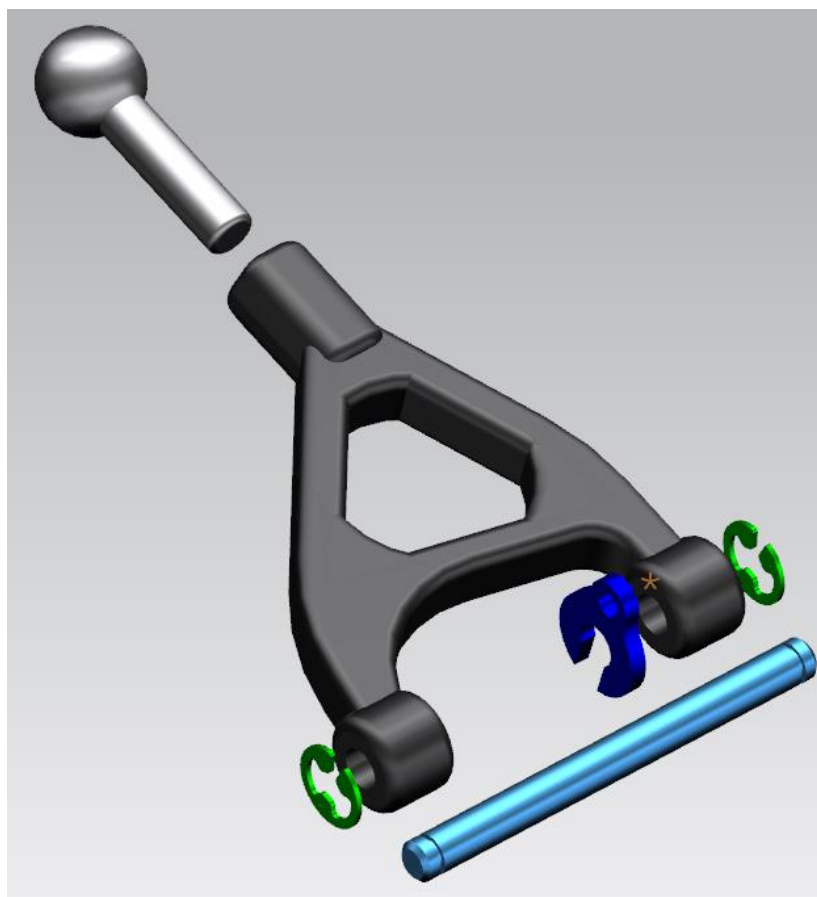
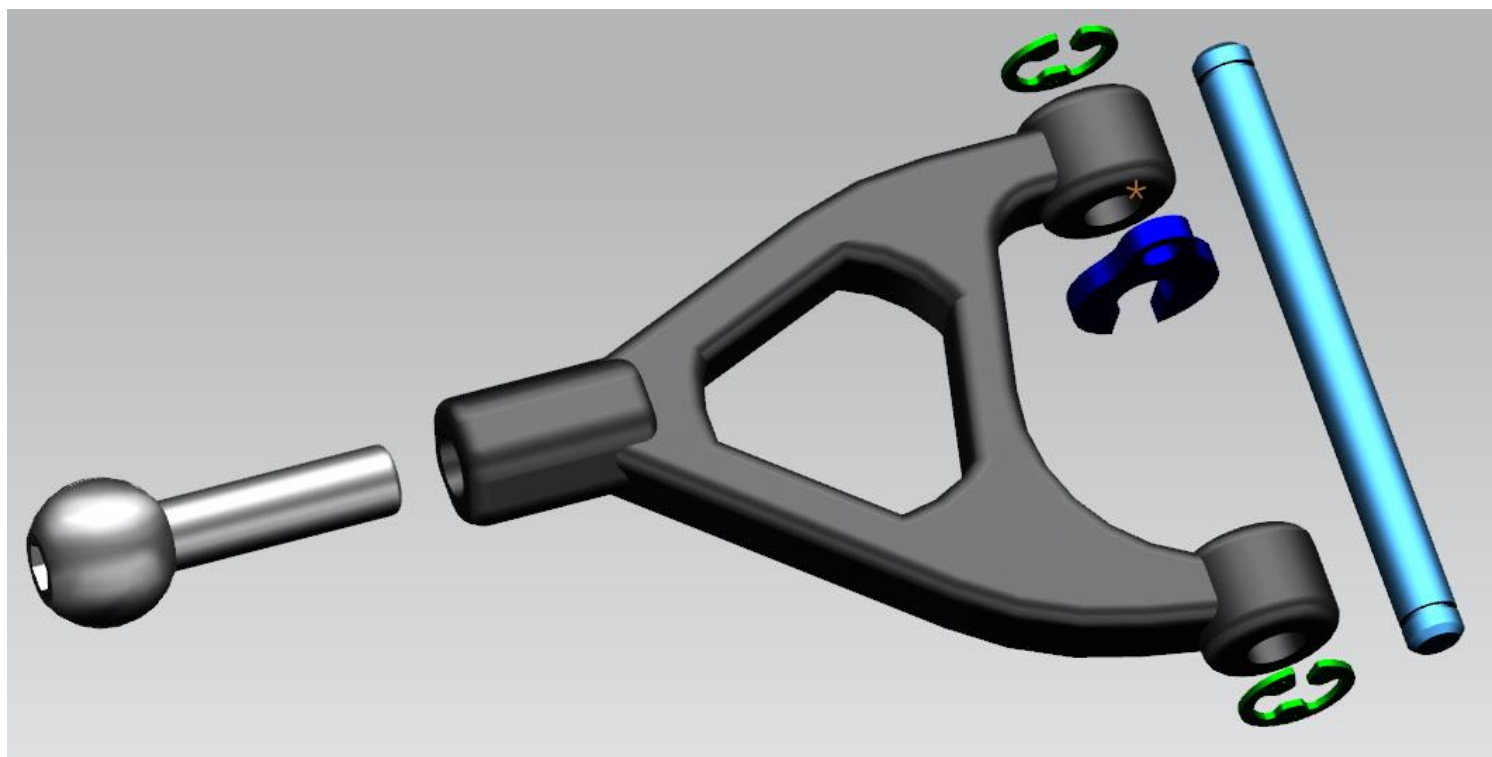
4.4 Exploded view

Παρακάτω φαίνονται τα μέρη του συστήματος καθώς και ολόκληρο το σύστημα του οχήματος σε exploded view. Η συγκεκριμένη μορφή προβολής δίνει τη δυνατότητα της γρήγορης κατανόησης του τρόπου σύνδεσης όλων των μερών μεταξύ τους, του αριθμού των μερών καθώς και τη σειρά κατά την οποία είναι εφικτή η συναρμολόγηση των μερών ώστε να κατασκευαστεί το τελικό προϊόν. Επίσης συμβάλλει στην αρίθμηση των μερών του συστήματος από τους μηχανικούς ώστε να μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα μηχανολογικό σχέδιο ή ακόμη και σε ένα εγχειρίδιο χρήσης.

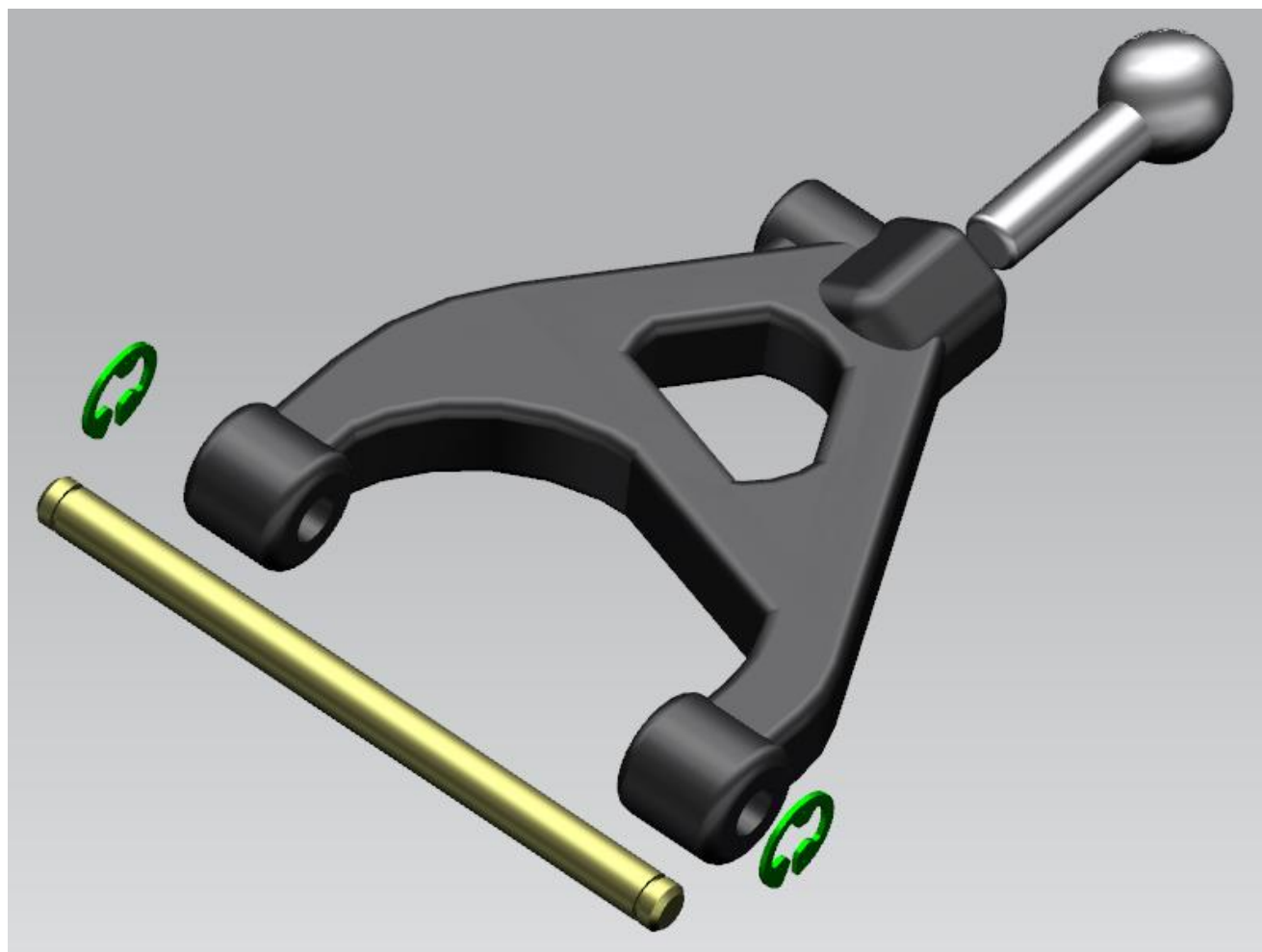
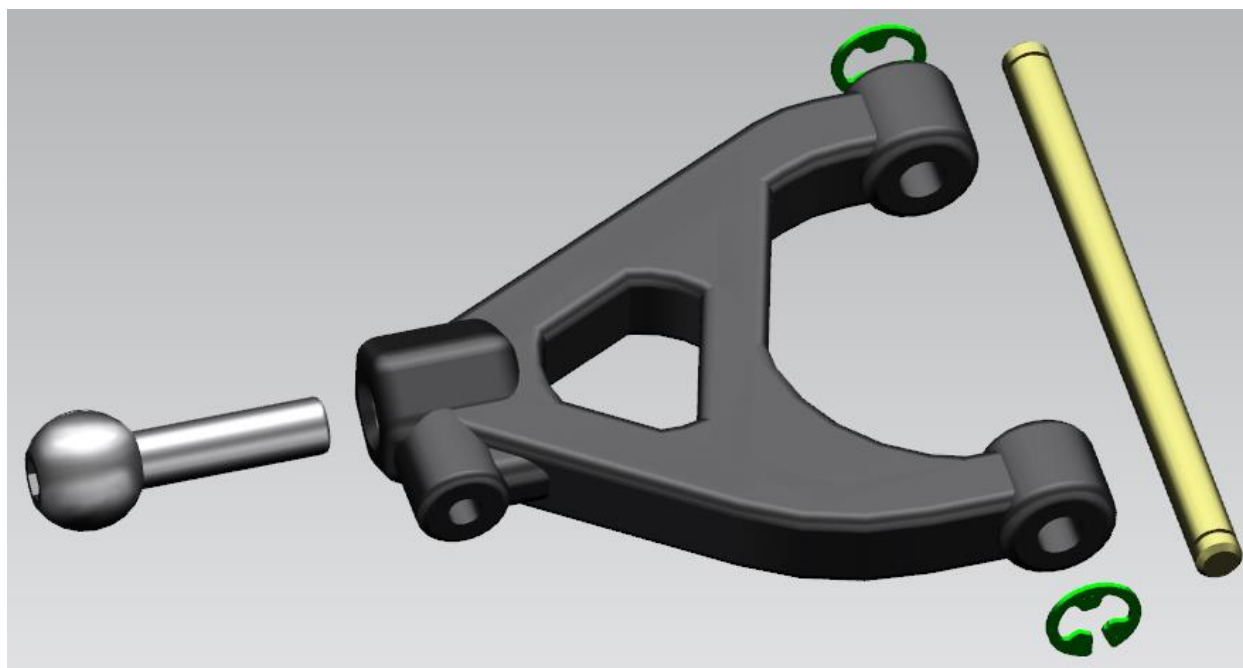
To Chassis σε μορφή Exploded View



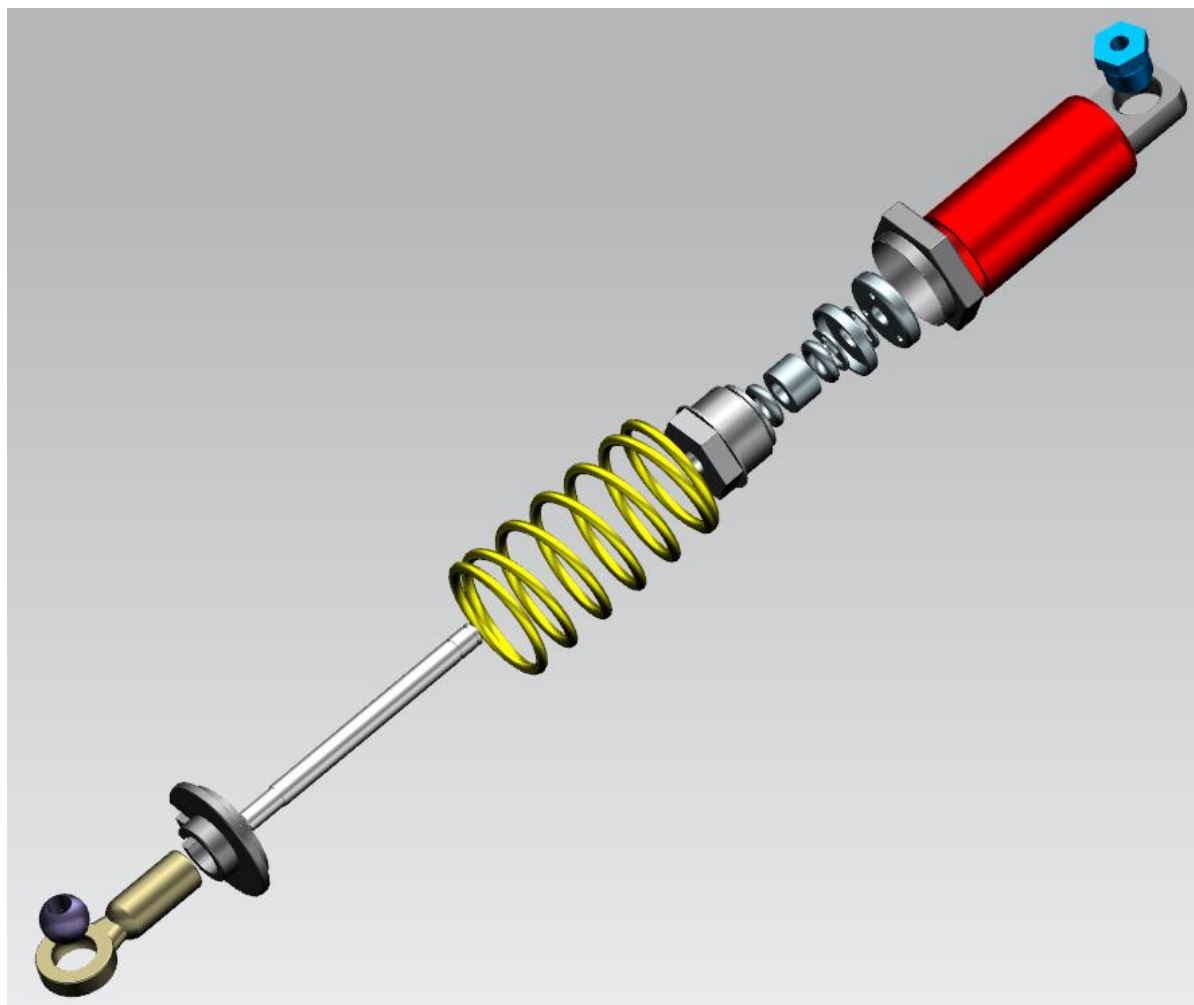
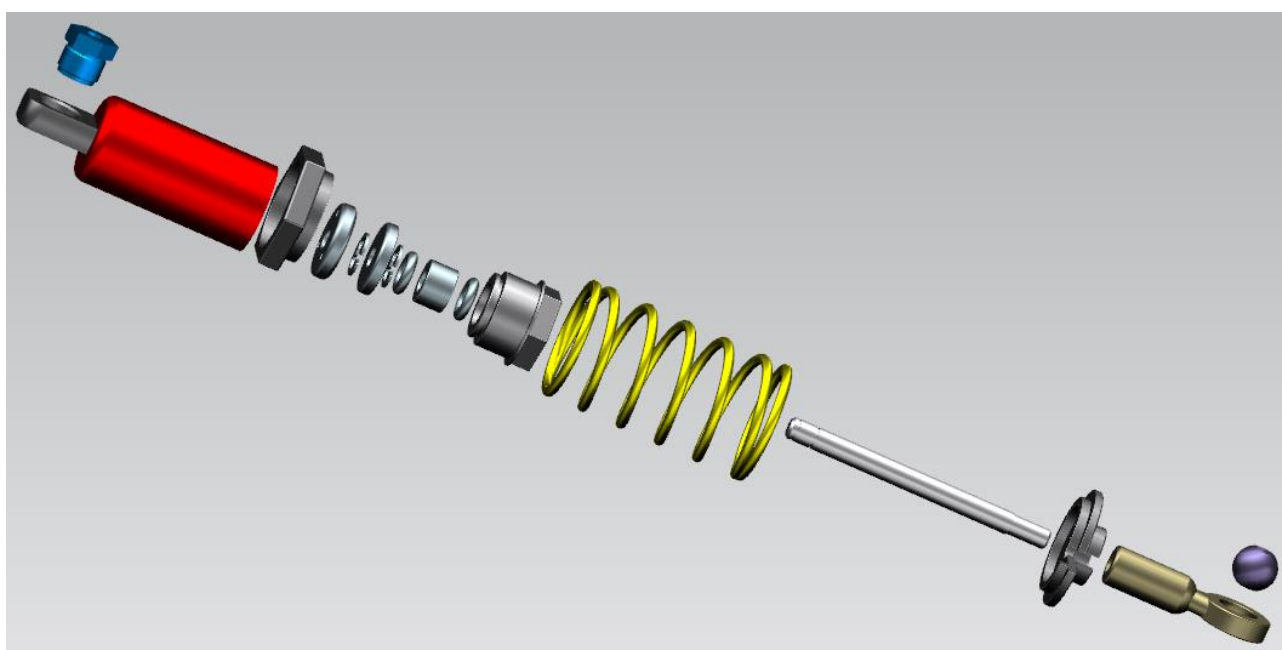
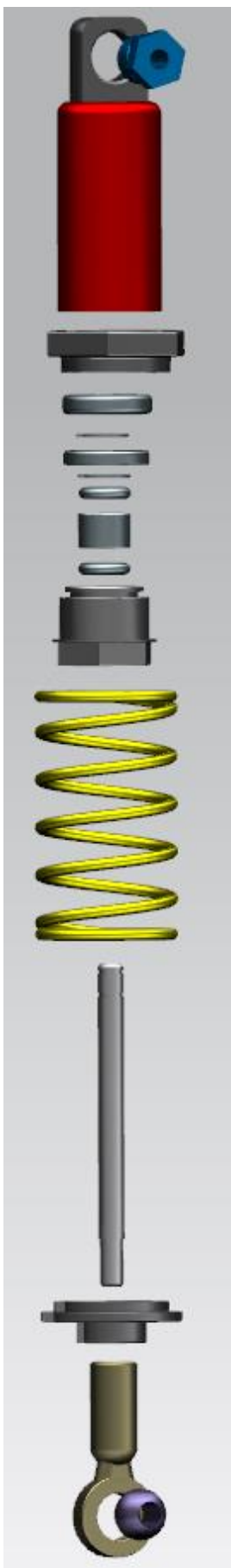
Το άνω ψαλίδι σε μορφή Exploded View



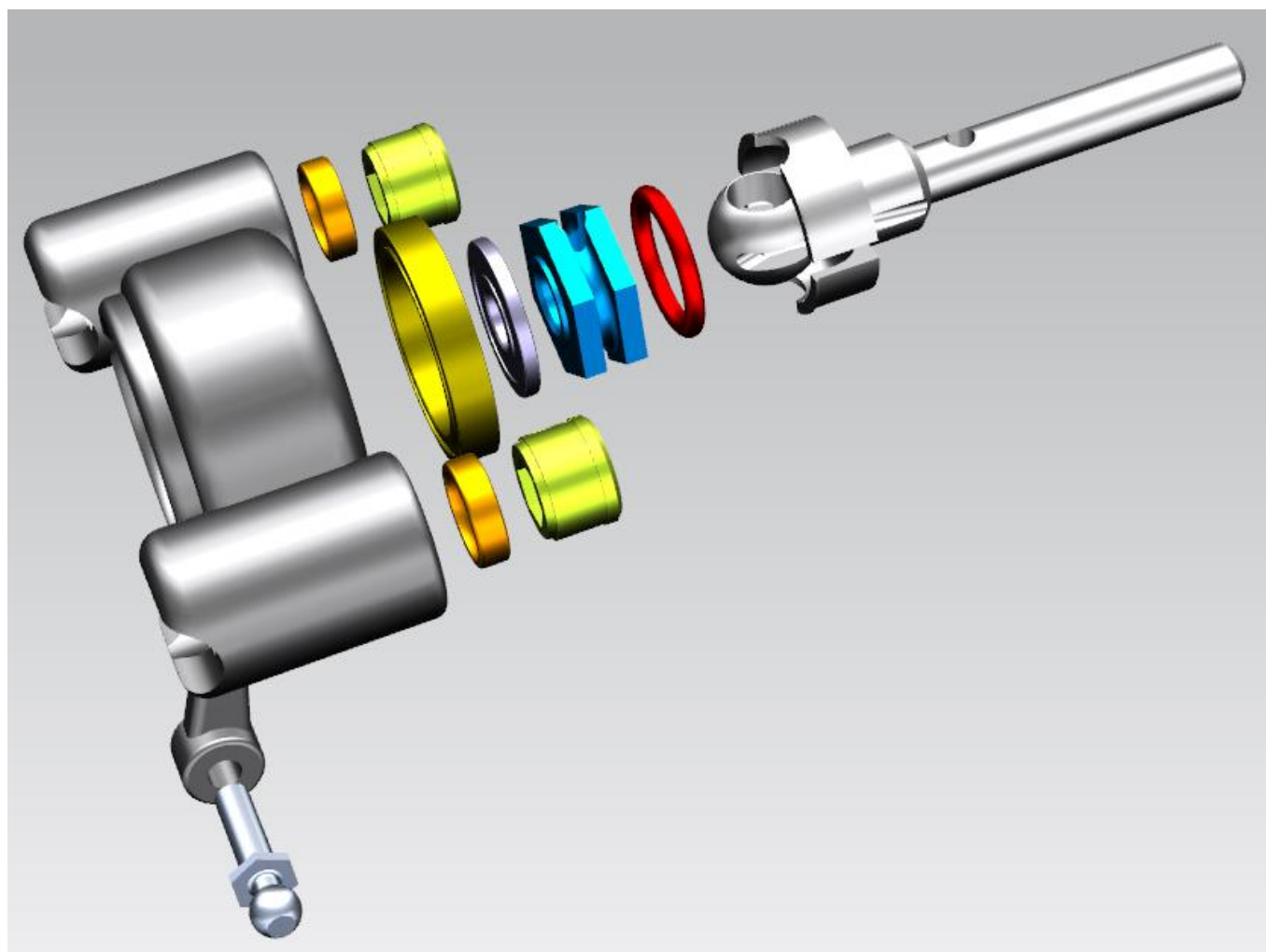
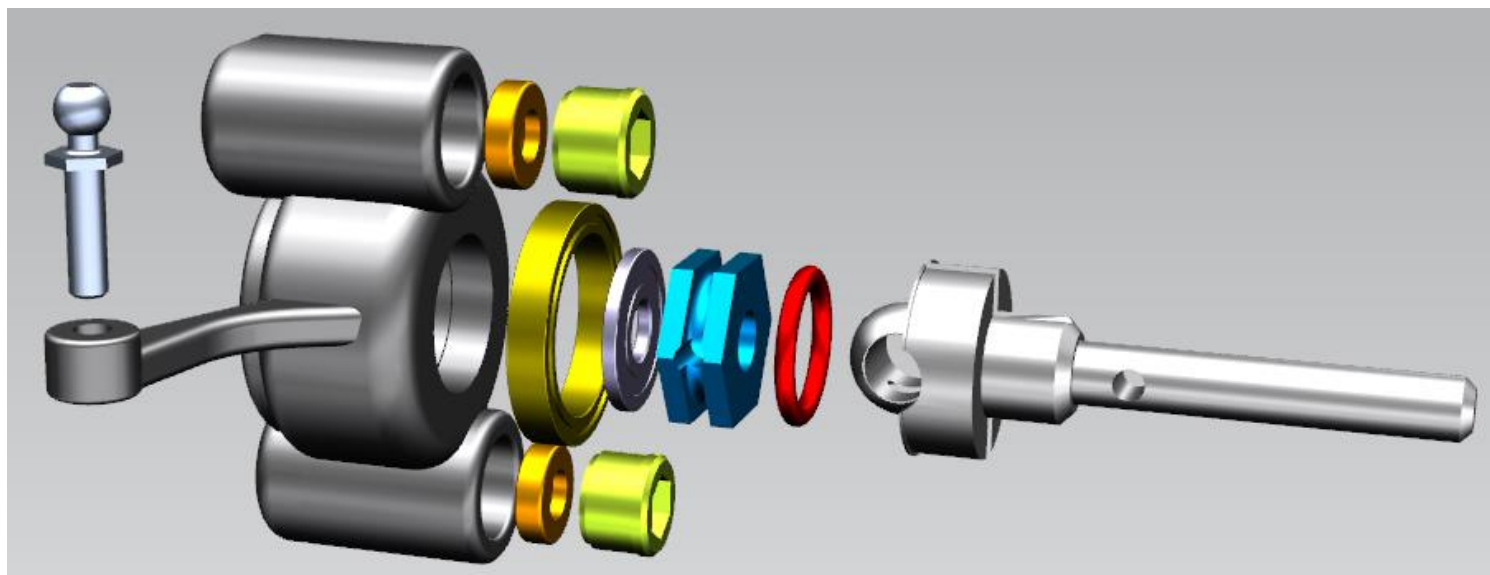
Το κάτω ψαλίδι σε μορφή Exploded View



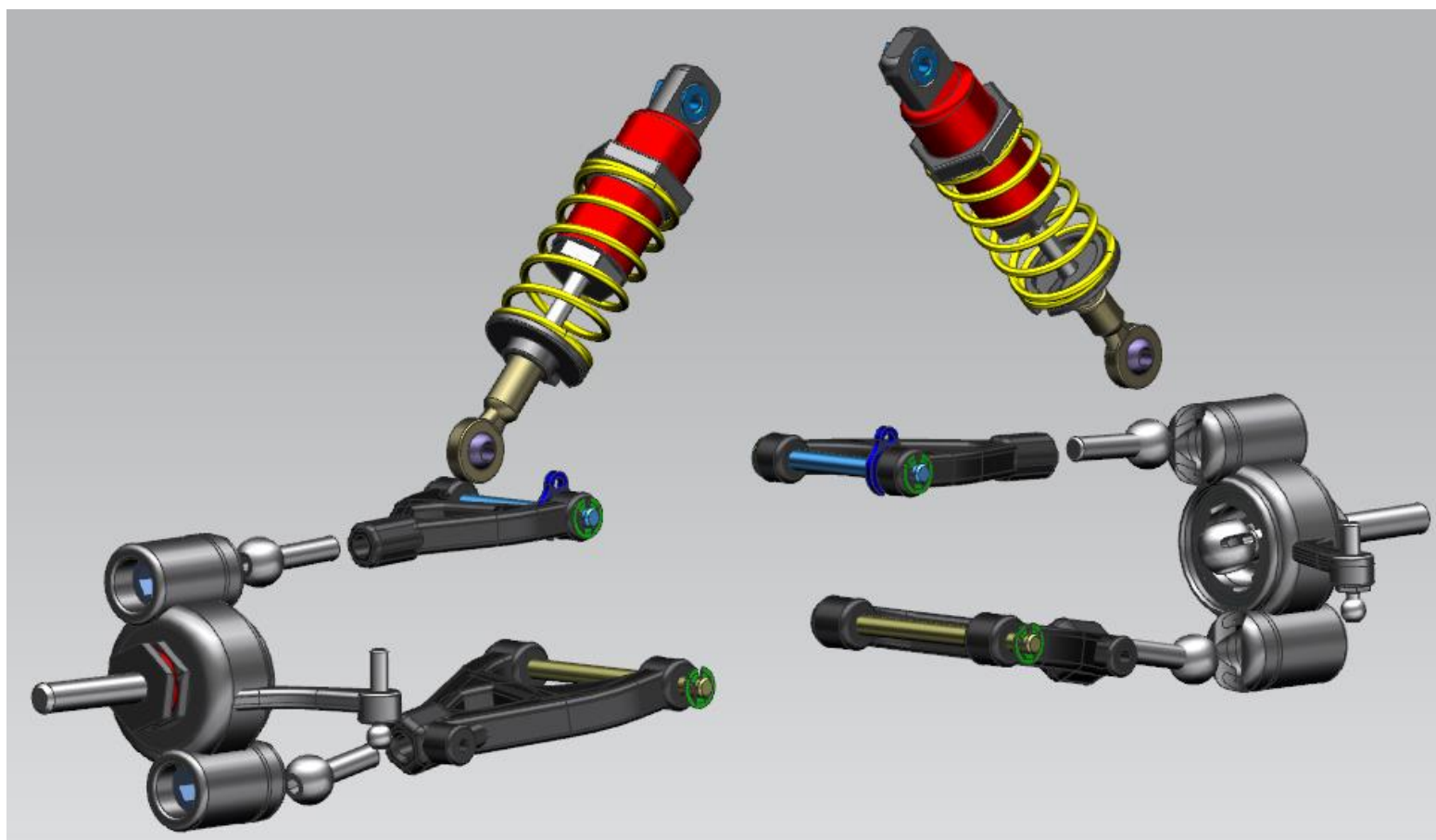
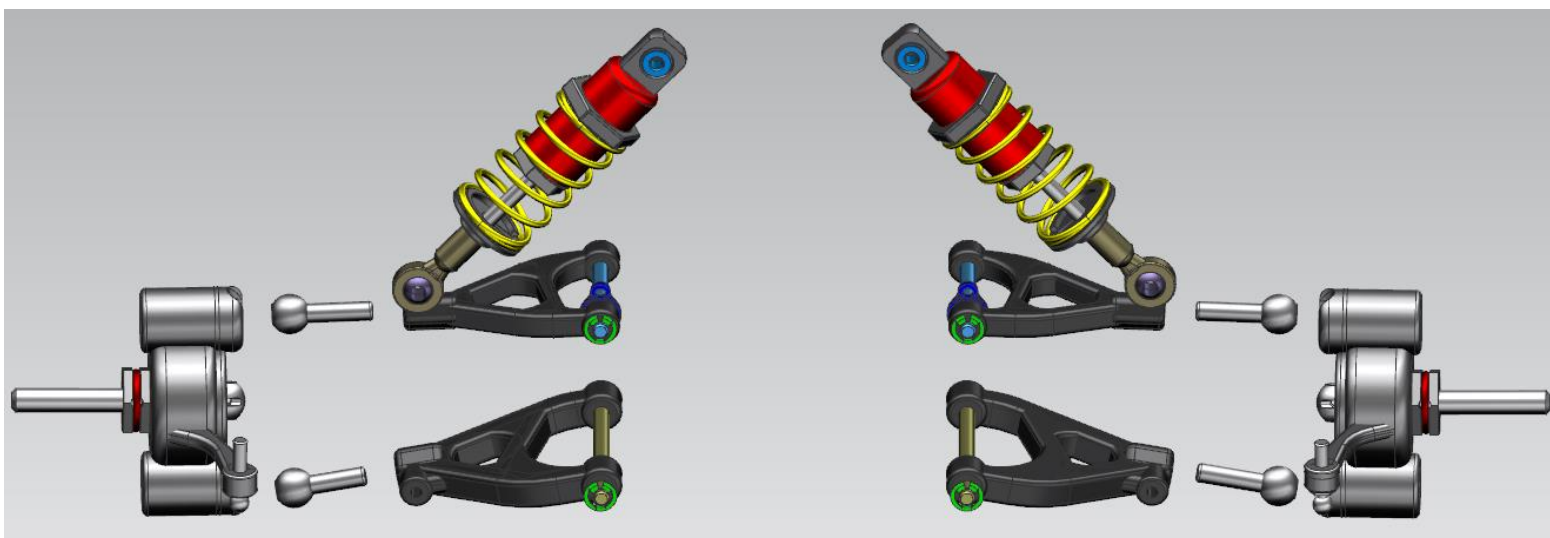
Το Αμορτισέρ σε μορφή Exploded View



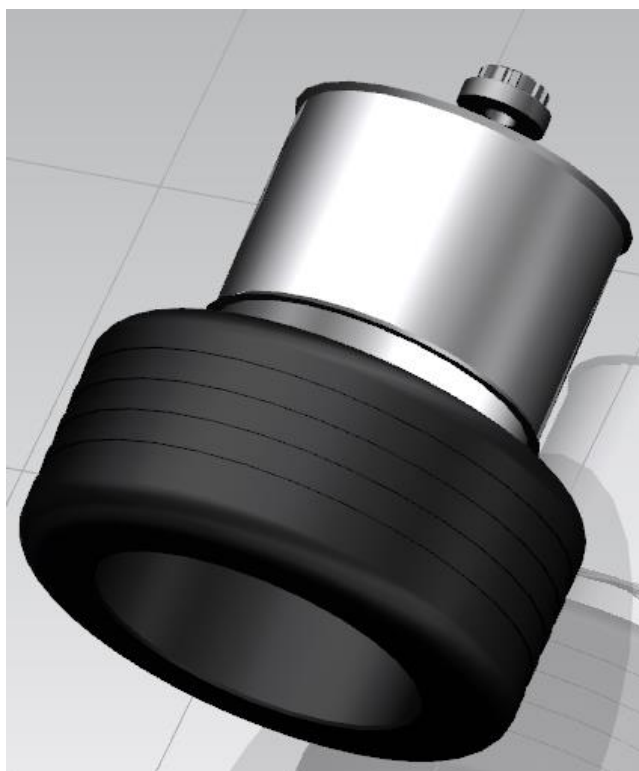
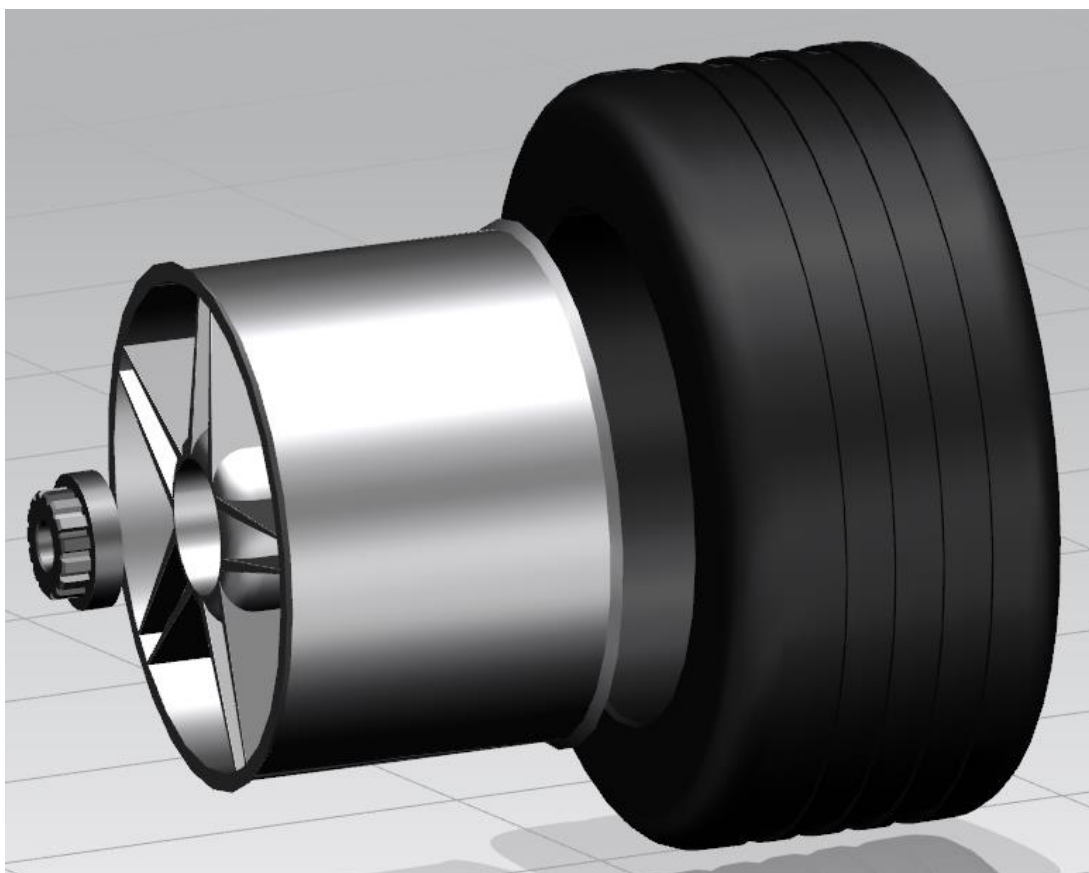
Το Σύστημα τοποθέτησης τροχού σε μορφή Exploded View



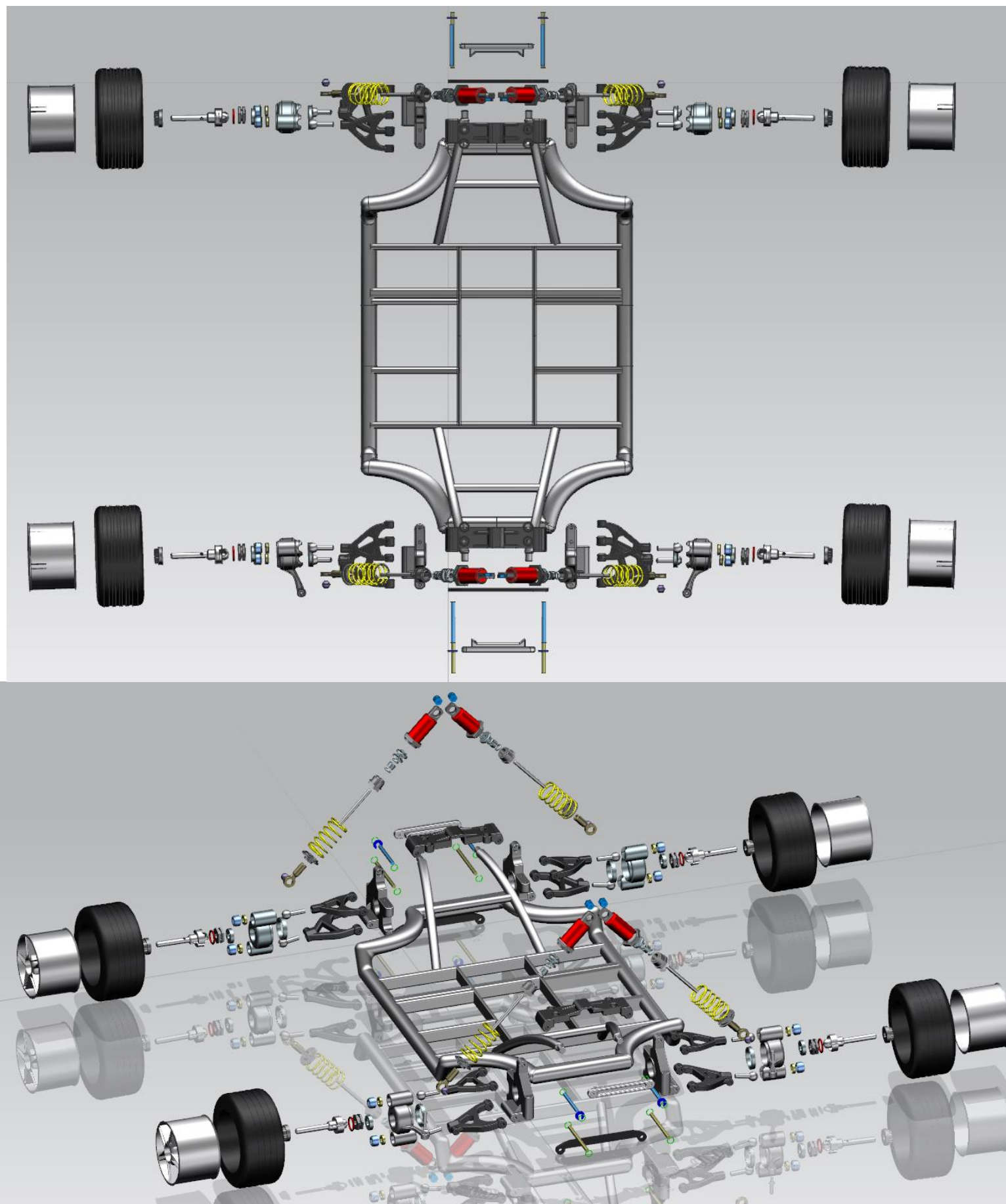
Το σύστημα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού σε μορφή Exploded View

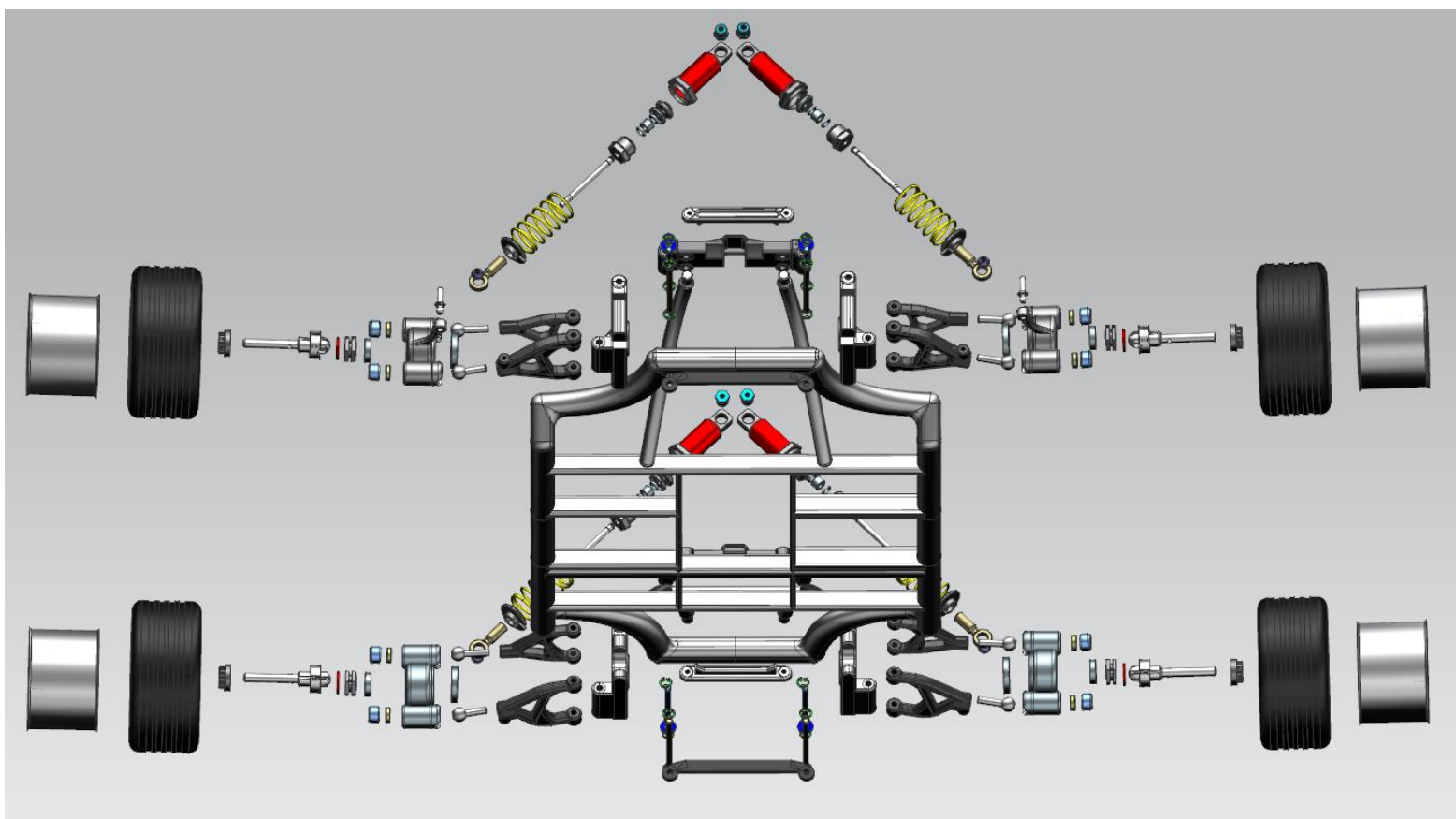
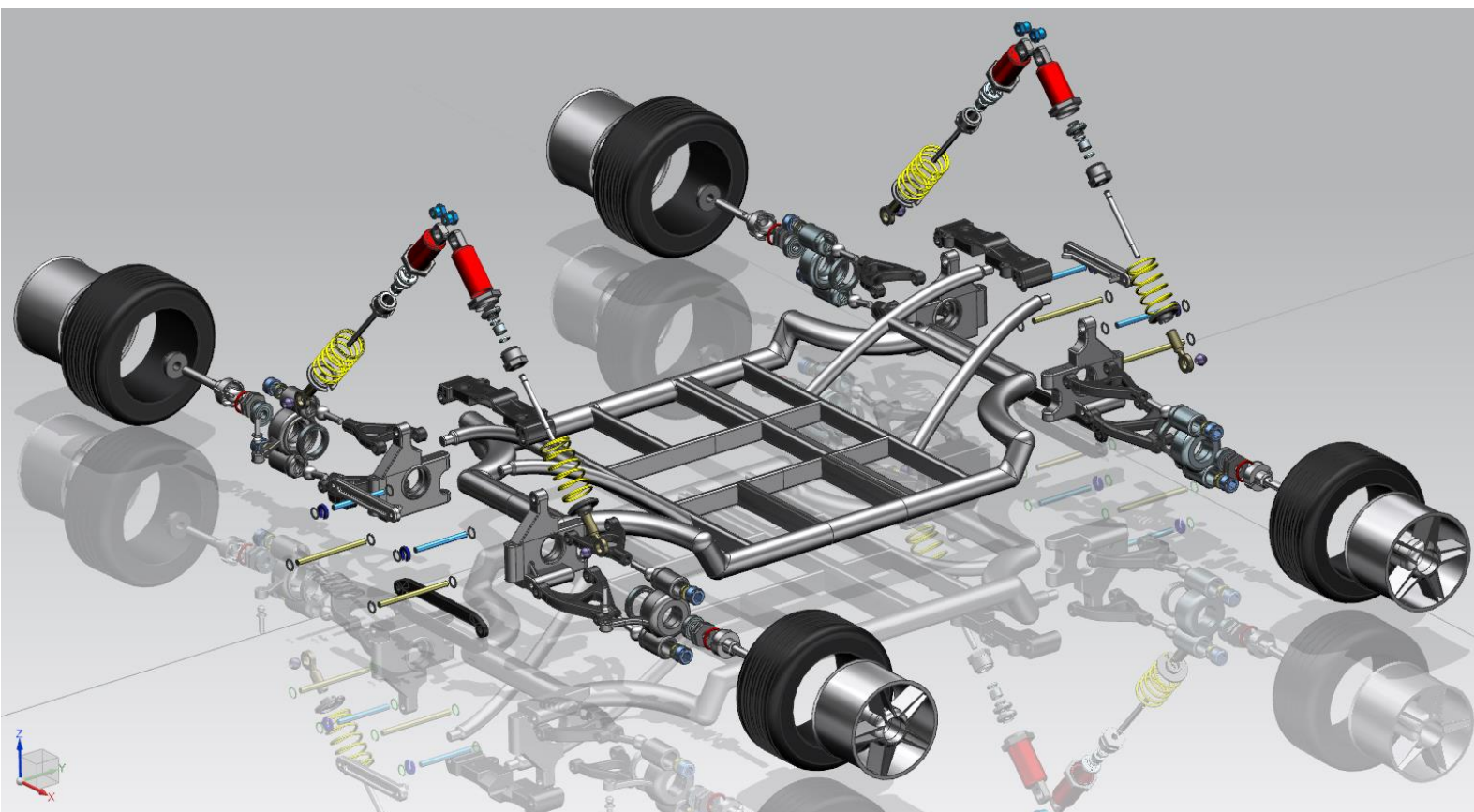


Ο τροχός σε μορφή Explode View

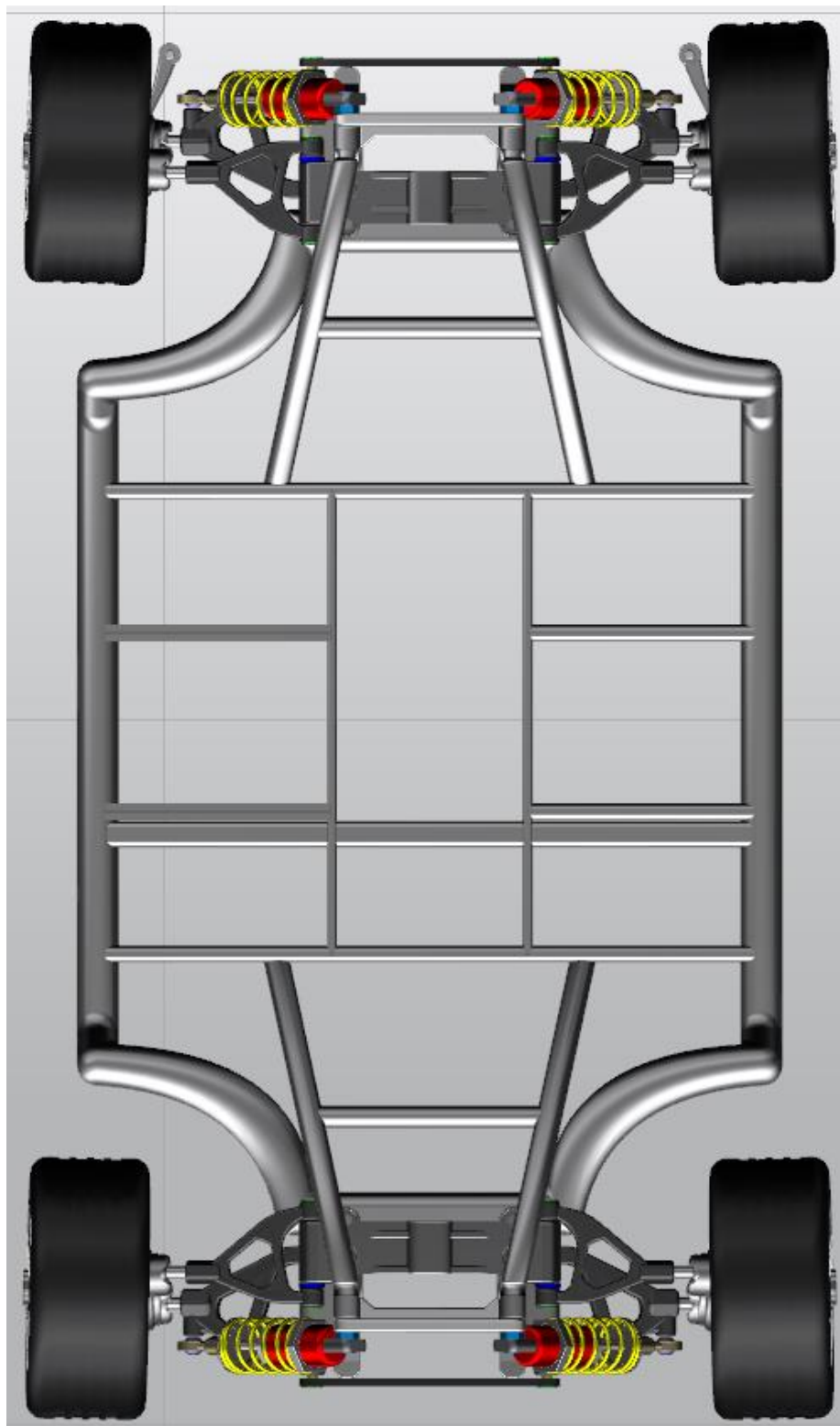


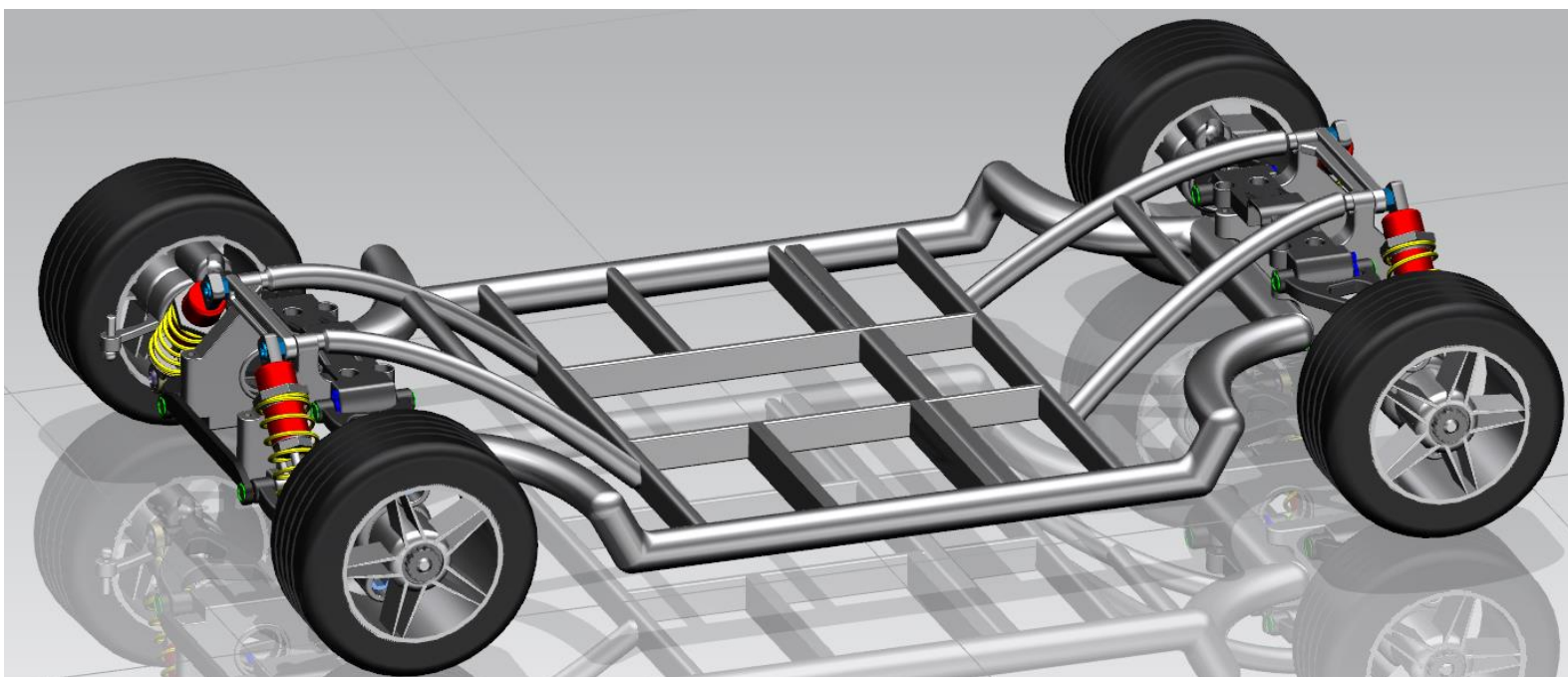
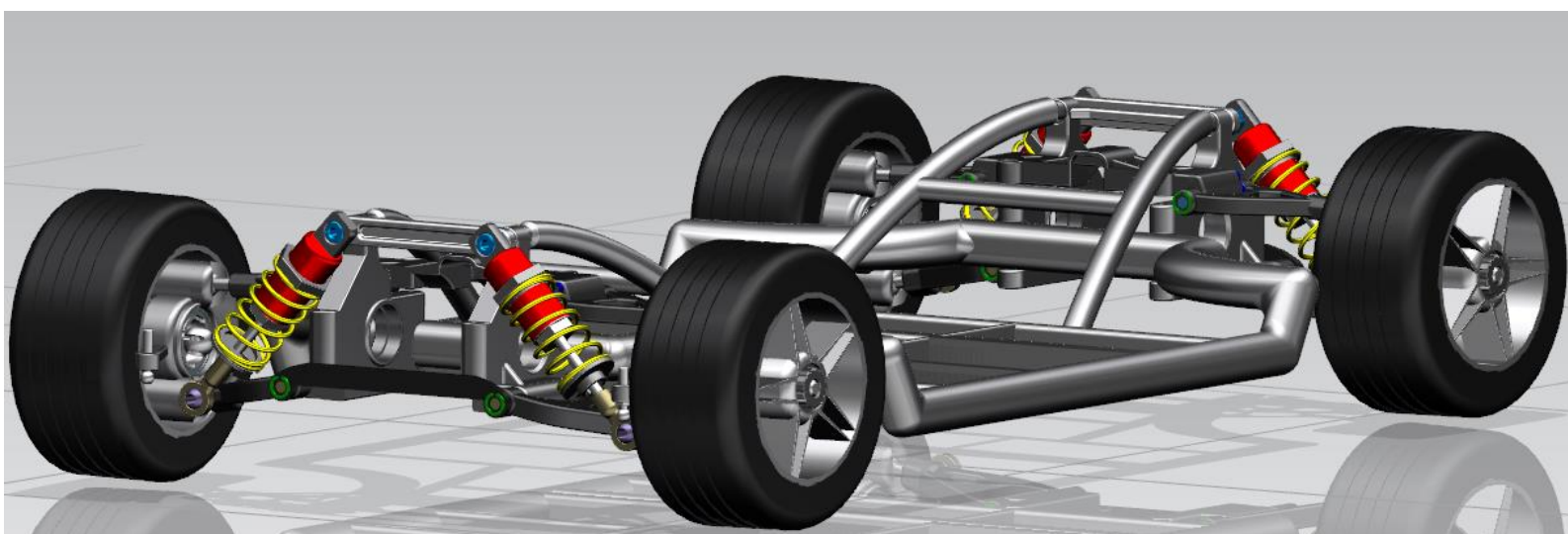
Το τελικό όχημα σε μορφή Exploded View

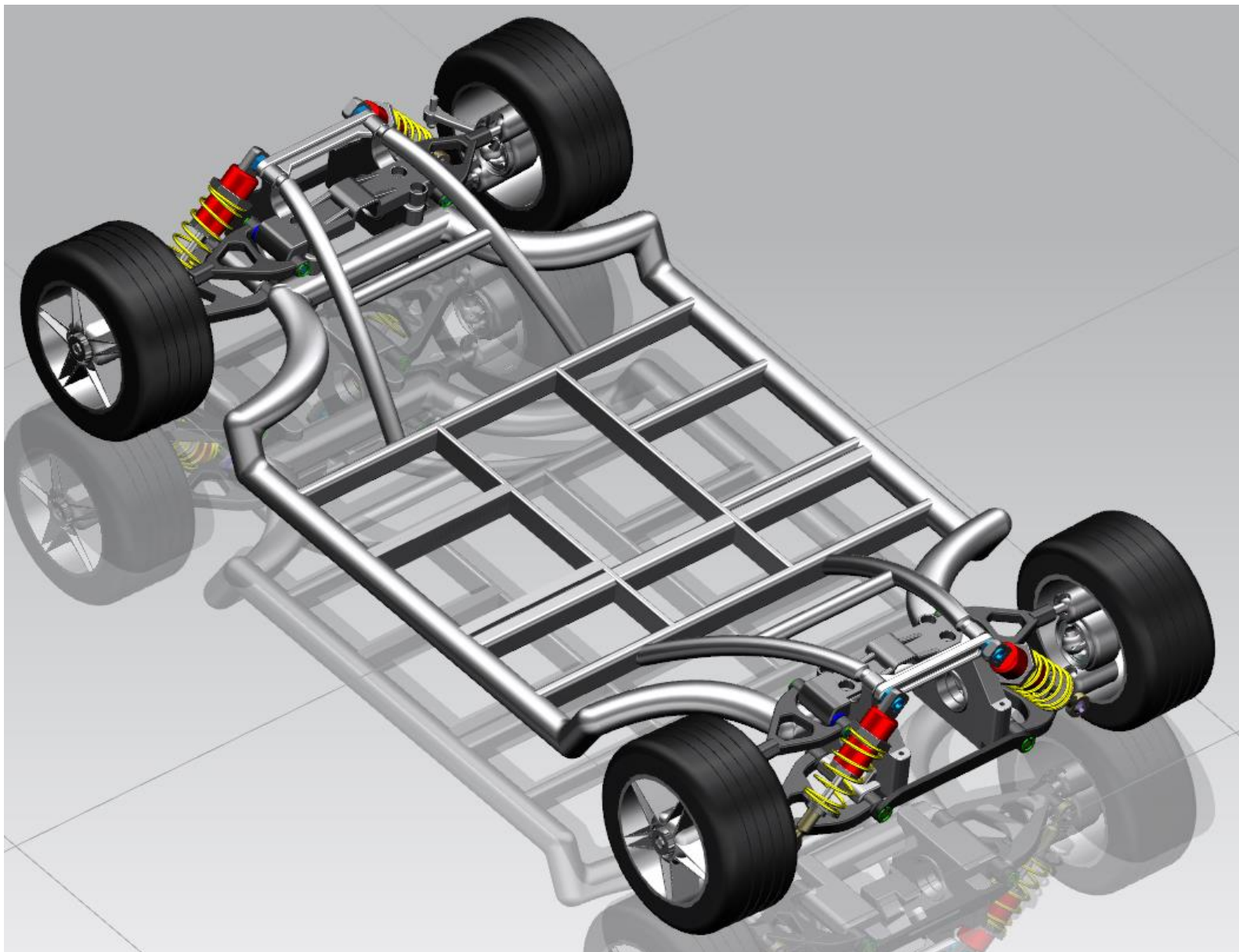




Το συναρμολογημένο τελικό όχημα







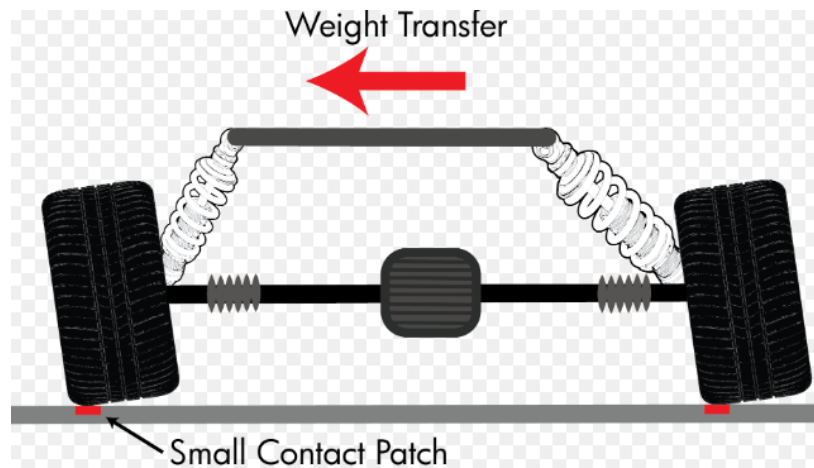
5. Συσχέτιση μεταξύ των βασικών όρων

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια ο σκοπός του συστήματος ανάρτησης είναι η βελτιστοποίηση του αποτυπώματος επαφής (contact patch) του τροχού με το οδόστρωμα και συγκεκριμένα η μεγιστοποίηση του και ταυτόχρονα η ομοιόμορφη κατανομή του. Γνωρίζοντας ότι η κινητήρια δύναμη του οχήματος είναι η πρόσφυση δηλαδή η δύναμη τριβής που ασκείται από τον κινούμενο τροχό (ελαστικό) προς το οδόστρωμα, στόχος της ανάρτησης είναι να μεγιστοποιήσει την επιφάνεια τριβής του ελαστικού με το οδόστρωμα γεγονός που θα μεγιστοποιήσει την ασκούμενη πρόσφυση. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το αποτύπωμα επαφής τους οποίους λαμβάνουν υπόψιν οι μηχανικοί κατά την κατασκευή και τη ρύθμιση ενός συστήματος ανάρτησης.

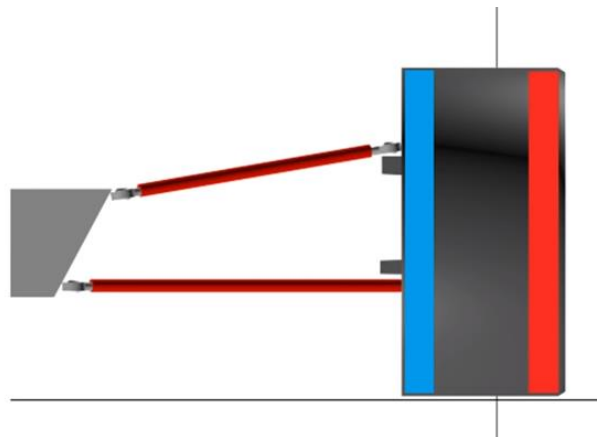
5.1 Μεταβολή της γωνίας Camber λόγω της κύλισης του σώματος (Camber – Body roll)

Εφόσον στα περισσότερα οχήματα το κέντρο βάρους του σώματος ευρίσκεται άνω του κέντρου κύλισης του, αυτό έχει σαν συνέπεια κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης η αδράνεια του κέντρου βάρους να ασκεί ροπή γύρω από το σημείο κύλισης που αυτό σημαίνει πως ολόκληρο το σώμα του οχήματος θα περιστραφεί γύρω από το κέντρο κύλισης (γύρω από τον άξονα παράλληλο στην πορεία του οχήματος που τέμνει το κέντρο κύλισης) και συγκεκριμένα με φορά αντίθετη της φοράς στροφής του οχήματος. Κατά την κύλιση του οχήματος και κατά συνέπεια και του συστήματος ανάρτησης πραγματοποιείται μεταβολή στη γωνία camber των τροχών και αυτός είναι ο λόγος που η πρόσφυση μεταβάλλεται κατά την πηδαλιούχηση του οχήματος.

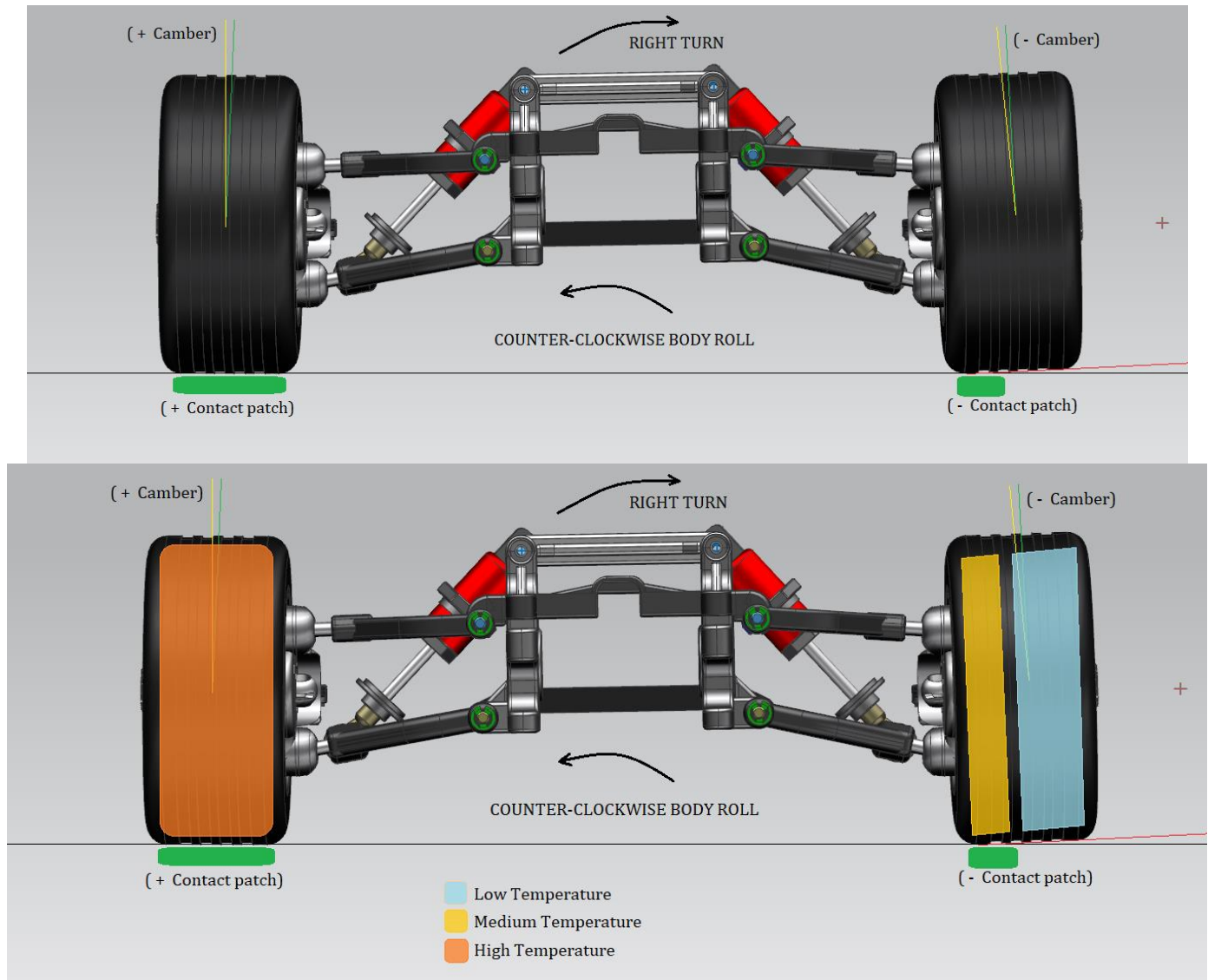
Κατά τη δεξιά στροφή ενός οχήματος διπλού ψαλιδιού τα άνω ψαλίδια τα οποία είναι προσδεμένα στο σασί του οχήματος ακολουθούν την φορά της ορμής του σώματος. Αυτό έχει σαν συνέπεια το άνω δεξί ψαλίδι να τραβά προς το μέρος του την άνω άρθρωση του δεξιού τροχού και αντιστοίχως το άνω αριστερό ψαλίδι να σπρώχνει την άνω άρθρωση του αριστερού τροχού προς τα αριστερά. Τα κάτω ψαλίδια ακολουθούν με τη σειρά τους τη φορά αδράνειας (το κάτω δεξί ψαλίδι τραβά την κάτω άρθρωση του δεξιού τροχού και το κάτω αριστερό ψαλίδι σπρώχνει την κάτω άρθρωση του αριστερού τροχού) όμως σε πολύ μικρότερο βαθμό καθώς το κάτω μισό του τροχού είναι πολύ πιο σταθερό καθώς βρίσκεται κοντά στο σημείο άσκησης της πρόσφυσης που αυτό σημαίνει πως η κάτω άρθρωση θα περιστρέφεται με πολύ μικρότερο ρυθμό από την άνω. Αυτή η άσκηση δύναμης των ψαλιδιών στις αρθρώσεις του τροχού προκαλούν μεταβολή στη γωνία camber του οχήματος. Συγκεκριμένα κατά την δεξιά πηδαλιούχηση στον δεξί τροχό μειώνεται η γωνία camber του εσωτερικού τροχού και αυξάνεται η γωνία camber του εξωτερικού τροχού. Αυτή η μεταβολή επηρεάζει άμεσα το αποτύπωμα επαφής (contact patch) του τροχού. Εάν ένα όχημα διαθέτει μηδενική γωνία camber όταν κινείται σε ευθεία πορεία θα υποστεί μεγάλη μείωση του αποτυπώματος επαφής λόγω της μεταβολής των γωνιών camber που θα προκληθούν από την κύλιση του σώματος, Επομένως το όχημα θα ασκεί στο οδόστρωμα πολύ μικρότερη πρόσφυση και συνεπώς θα επηρεαστεί αρνητικά η οδηγική του συμπεριφορά.



Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα της μηδενικής γωνίας camber είναι η σημαντική υπερθέρμανση των τμημάτων επαφής του ελαστικού κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης. Αυτό συμβαίνει διότι με τη μείωση της γωνίας camber μειώνεται το αποτύπωμα επαφής και ταυτόχρονα αυξάνεται η δύναμη τριβής εφόσον το ελαστικό πρέπει εκτός από την τριβή της ευθύγραμμης πρόσφυσης να διαχειριστεί και την τριβή του ελαστικού λόγω της φυγόκεντρου δύναμης που προέρχεται από τη μεταφορά του βάρους δεξιά και αριστερά. Στην εικόνα βλέπουμε την κατανομή θερμοκρασίας του εξωτερικού ελαστικού κατά τη στροφή του οχήματος προς τα αριστερά και παρατηρούμε πως το θερμοκρασιακό προφίλ του ελαστικού είναι μη συμμετρικό μειώνοντας τη ζωή του ελαστικού.

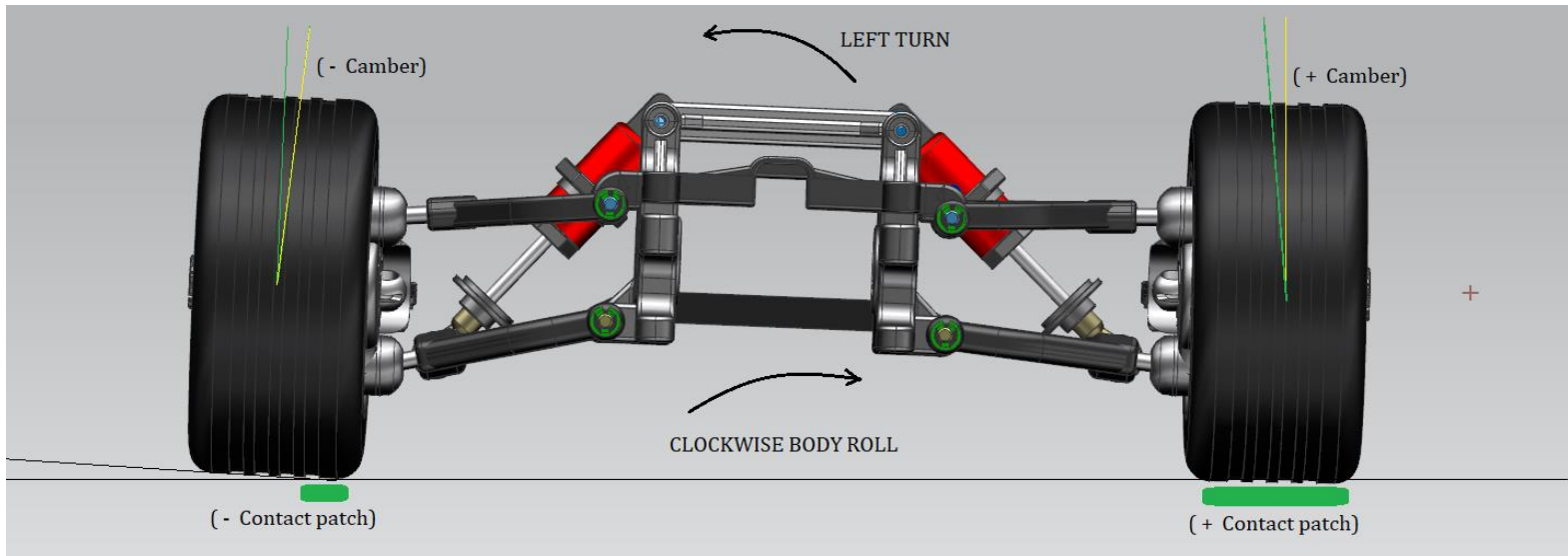


Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ρυθμίζοντας το όχημα ώστε οι τροχοί του να διαθέτουν μικρή αρνητική γωνία camber (το πολύ 1 μοίρα για επιβατικά οχήματα, 2 με 3 μοίρες για αγωνιστικά). Παρακάτω βλέπουμε το όχημα με τη βοήθεια του προγράμματος NX 12.0 σε κατάσταση ηρεμίας (μηδενικής πηδαλιούχησης) το οποίο έχει υποστεί ρύθμιση της γωνίας camber (-1 μοίρα). Χάρη στο animation “Body Roll Mechanics” βλέπουμε την κύλιση του συστήματος ανάρτησης και συνεπώς μεταβολή της γωνίας camber και του θερμικού προφίλ των τροχών κατά την πηδαλιούχηση πρώτα δεξιά και έπειτα αριστερά.

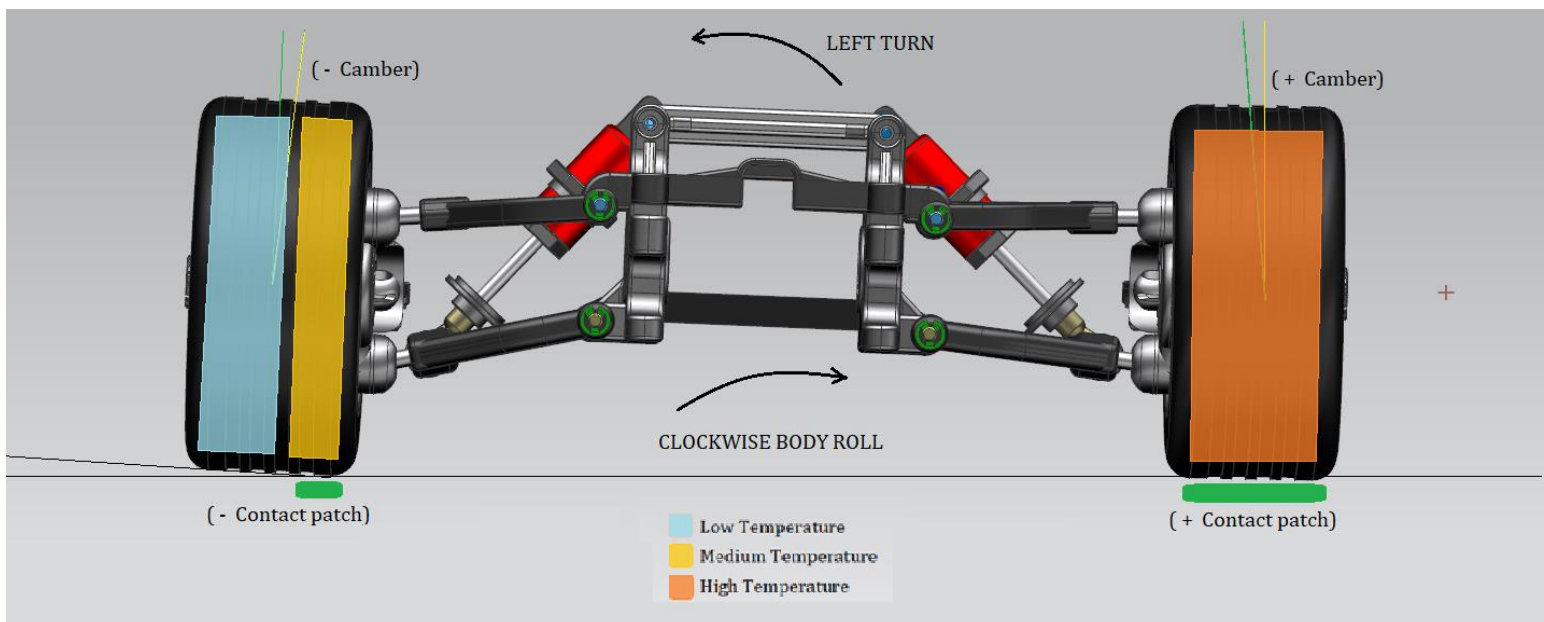


Παρατηρούμε πως με την ρύθμιση της γωνίας camber κατά -1 μοίρα κατά την στροφή του οχήματος προς τα δεξιά ο δεξιός τροχός υπόκειται μείωση της γωνίας camber και συνεπώς και μείωση του αποτυπώματος επαφής. Όμως στον αριστερό τροχό ο οποίος διέθετε προηγουμένως αρνητική γωνία camber προστίθεται θετική γωνία camber με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το αποτύπωμα επαφής του ελαστικού.

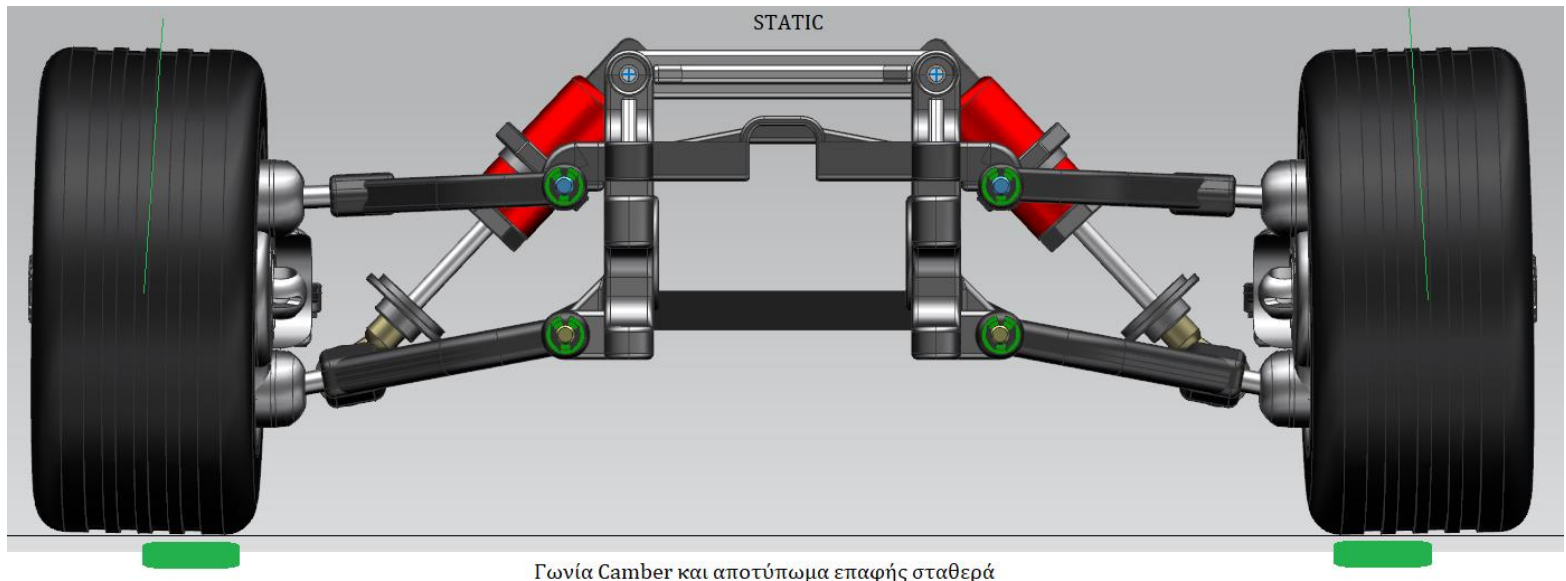
Αντιστοίχως κατά τη στροφή του οχήματος προς τα αριστερά με την ρύθμιση της γωνίας camber κατά -1 μοίρα ο αριστερός τροχός υπόκειται μείωση της γωνίας camber και συνεπώς και μείωση του αποτυπώματος επαφής όμως στον δεξιό τροχό ο οποίος διέθετε προηγουμένως αρνητική γωνία camber προστίθεται θετική γωνία camber με αποτέλεσμα να αυξάνεται το αποτύπωμα επαφής του ελαστικού.



Το πλεονέκτημα αυτής ρύθμισης είναι πως παρόλο που έχουμε μείωση του αποτυπώματος επαφής στον εσωτερικό τροχό, ο εξωτερικός τροχός ο οποίος είναι υπεύθυνος να διαχειριστεί τη μεταφορά του βάρους (weight transfer) (κατά την πηδαλιούχηση το κέντρο βάρους μεταφέρεται προσωρινά προς τη φορά της φυγόκεντρου δύναμης του σώματος δηλαδή την «αντίθετη» φορά της πηδαλιούχησης) είναι πλέον τελείως κάθετος με το έδαφος και διαθέτει το μέγιστο αποτύπωμα επαφής. Αυτό προσφέρει βέλτιστη πρόσφυση στις στροφές και προβλέψιμη οδηγική συμπεριφορά. Είναι δηλαδή πιο επιθυμητό να διαθέτουμε μειωμένη πρόσφυση στον εσωτερικό τροχό αλλά μέγιστη πρόσφυση στον εξωτερικό τροχό εφόσον αυτός καλείται να αντιμετωπίσει υψηλότερα φορτία. Επίσης η θερμοκρασιακή κατανομή είναι ομοιόμορφη ισομοιράζοντας το φορτίο της τριβής σε ολόκληρο το αποτύπωμα επαφής συμβάλλοντας σημαντικά στη ζωή του ελαστικού και στις επιδόσεις του οχήματος, Παρακάτω βλέπουμε το ομοιόμορφο θερμικό προφίλ του εξωτερικού τροχού που έχει να αντιμετωπίσει το μεγαλύτερο φορτίο,



Ένα μικρό μειονέκτημα της ρύθμισης της γωνίας camber κατά -1 μοίρα είναι πως κατά τη διάρκεια της ευθύγραμμης κίνησης (κατάσταση μηδενικής πηδαλιούχησης άρα μηδενικής κύλισης σώματος) το αποτύπωμα επαφής των τροχών θα είναι μειωμένο σε σχέση με το να είχαμε ρυθμίσει την ανάρτηση με μηδενική γωνία camber.



Παρόλα αυτά αποδεχόμαστε αυτό το μειονέκτημα καθώς δεν επηρεάζει σημαντικά την πρόσφυση, το θερμικό προφίλ του ελαστικού και συνεπώς την οδηγική συμπεριφορά του οχήματος στην ευθύγραμμη κίνηση, ώστε να λάβουμε το σημαντικό πλεονέκτημα της σταθερότητας και της μέγιστης πρόσφυσης του οχήματος στις στροφές πράγμα που αυξάνει τόσο την επίδοση όσο και την ασφάλεια του οχήματος. Για αυτό τον λόγο σχεδόν όλα τα τετράτροχα οχήματα που παράγονται ρυθμίζονται από τους κατασκευαστές ώστε να διαθέτουν μικρή αρνητική γωνία camber. Η σωστή ρύθμιση της γωνίας camber παίζει πρωταρχικό ρόλο στα οχήματα που λαμβάνουν μέρος σε πρωταθλήματα μηχανοκίνητου αθλητισμού καθώς η παραμικρή ρύθμιση της γωνίας αυτής μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την οδηγική επίδοση και την ικανότητα ελέγχου τους από τους οδηγούς.

5.2 Μεταβολή γωνίας Camber κατά την κατακόρυφη κίνηση του τροχού

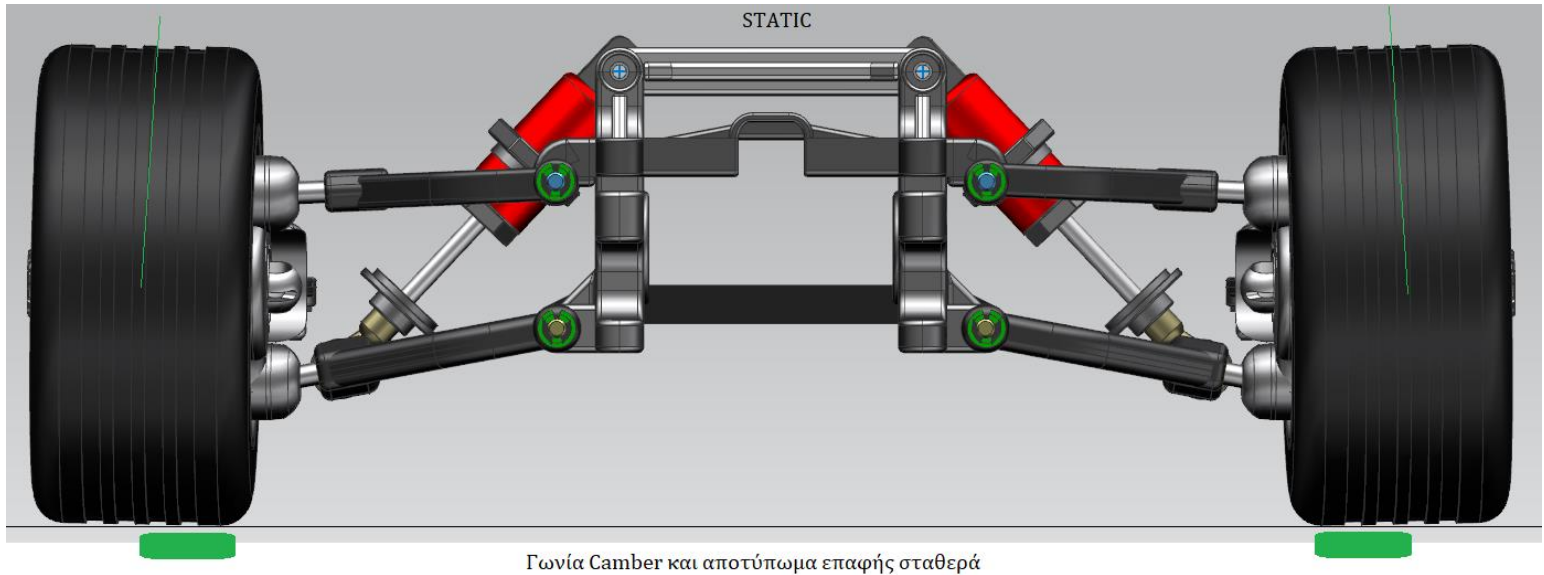
Κατά τη διαδικασία της επαφής του τροχού με εξόγκωμα στο οδόστρωμα η δυναμική ενέργεια που προέρχεται από τη σύγκρουση του τροχού σε αυτό μεταφέρεται από τον τροχό στα ψαλίδια και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια η οποία περιστρέφει τα ψαλίδια με ωρολογιακή ή αντιωρολογιακή φορά. Η γεωμετρία, τα σημεία τοποθέτησης καθώς και το μήκος των ψαλιδιών επηρεάζουν άμεσα τη μεταβολή της γωνίας camber που θα προκύψει με την περιστροφή των ψαλιδιών. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια ένα σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού είναι ότι διαθέτει ελάχιστη μεταβολή της γωνίας camber κατά την «κατακόρυφη» κίνηση του τροχού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διατηρείται το αποτύπωμα επαφής (contact patch) των τροχών σταθερό ακόμα και στην περίπτωση που μόνο ένας από τους δύο τροχούς έρχεται αντιμέτωπος με εξόγκωμα ή λακκούβα. Για να είναι όμως αυτού του είδους οι αναρτήσεις ικανές να διατηρούν σταθερά τα χαρακτηριστικά που μόλις περιγράψαμε θα πρέπει ο μηχανικός να ρυθμίσει σωστά τις παραμέτρους τοποθέτησης του τροχού και τις γωνίες του συστήματος ανάρτησης (γωνίες KPI, camber) ώστε να υπάρχει η μικρότερη δυνατή διακύμανση στα χαρακτηριστικά αυτά.

Επίσης θα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα το μήκος των άνω ψαλιδιών σε σχέση με τα κάτω ψαλίδια. Δεδομένου ότι στα συστήματα διπλού ψαλιδιού τα άνω ψαλίδια είναι μικρότερα από τα κάτω, διαθέτοντας άνω ψαλίδια υπερβολικά μικρότερα από τα κάτω ψαλίδια (τα σημεία τοποθέτησης τους στο σασί να είναι πολύ πιο κοντά στον τροχό) θα προσφέρει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της γωνίας camber στις στροφές με το μειονέκτημα όμως της σημαντικής μείωσης της γωνίας camber όταν ο τροχός συναντά ανωμαλίες στο οδόστρωμα η ασκείται αυξημένο φορτίο στο σώμα. Αντιστοίχως έχοντας άνω ψαλίδια με σχεδόν ίσο ή εντελώς ίσο μήκος με τα κάτω υπάρχει το πλεονέκτημα της σταθερής γωνίας camber στην κάθετη κίνηση του τροχού αλλά με μειονέκτημα τη σημαντική αυξομείωση της κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης. Συνεπώς θα πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ των δύο μηκών ώστε να εξισορροπηθούν τα πλεονεκτήματα με τα μειονεκτήματα. Γενικώς τόσο τα άνω όσο και τα κάτω ψαλίδια είναι επιθυμητό να διαθέτουν το μέγιστο δυνατό μήκος (με τη σωστή διαφορά μήκους φυσικά) ούτως ώστε η περιστροφική κίνηση του τροχού να είναι όσο το δυνατό λιγότερο παραβολική και η γωνία camber να αυξομειώνεται όσο το δυνατό λιγότερο.

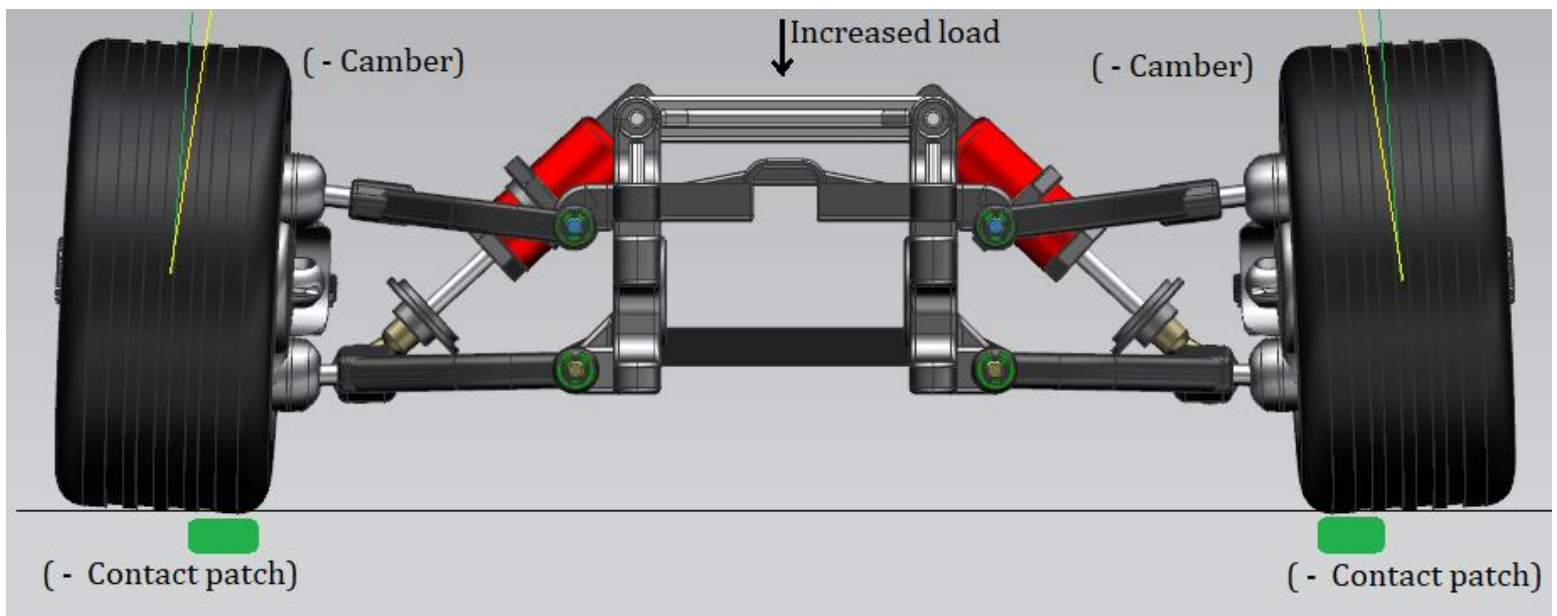
Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιστροφική δύναμη που ασκείται στα ψαλίδια μπορεί να προέλθει επίσης και από αυξημένο φορτίο του ίδιου του οχήματος (χωρίς την απαραίτητη ύπαρξη ανωμαλιών στο οδόστρωμα). Στην περίπτωση αυτή το αυξημένο βάρος του οχήματος ασκεί δυναμική ενέργεια στα σημεία τοποθέτησης των ψαλιδιών με το σασί και εφόσον όπως προαναφέραμε η κάτω άρθρωση τροχού-ψαλιδιού είναι πιο σταθερή από την άνω άρθρωση (λόγω της τοποθέτησης του πιο κοντά στο σημείο άσκησης της πρόσφυσης) τότε δημιουργείται ροπή ωρολογιακής φοράς η οποία λόγω της γεωμετρίας των ψαλιδιών τραβά την άνω άρθρωση περισσότερο από την κάτω αυξάνοντας τη γωνία camber.

Στο όχημα που κατασκευάστηκε χάρη στο animation Suspension Travel Mechanics (Bumps) βλέπουμε τη αυξομείωση της γωνίας camber και του αποτυπώματος επαφής

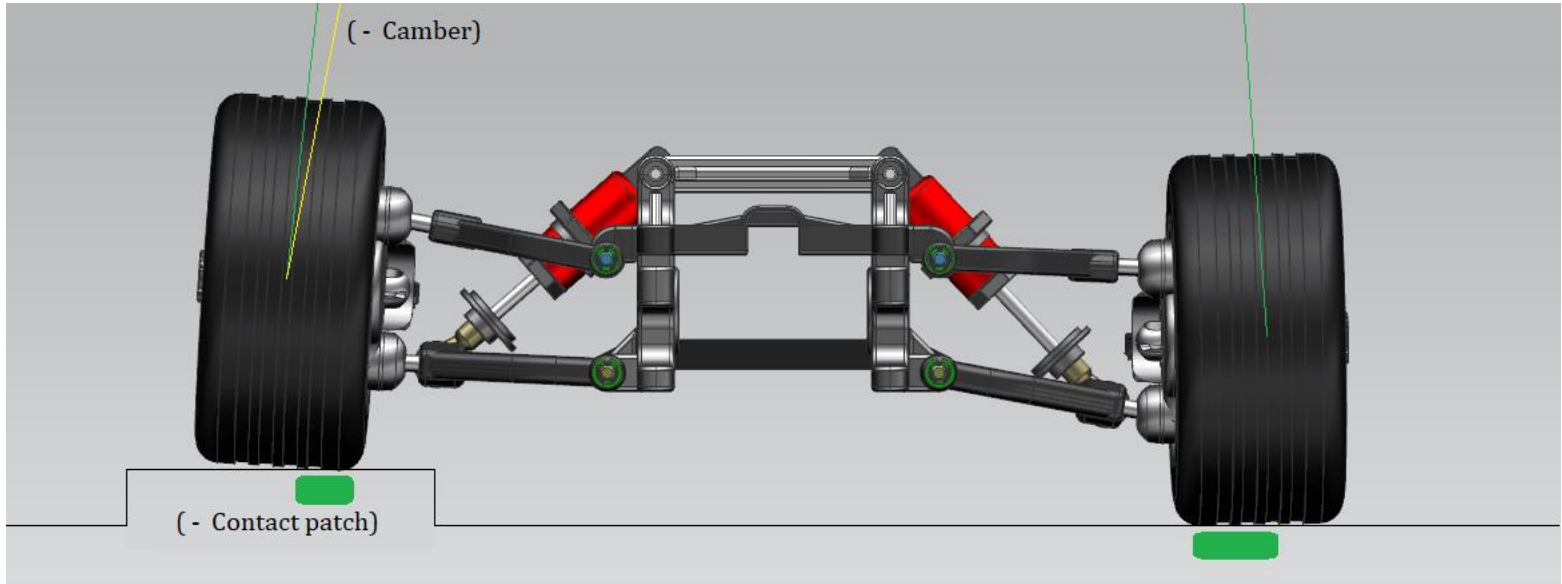
Όχημα σε ηρεμία



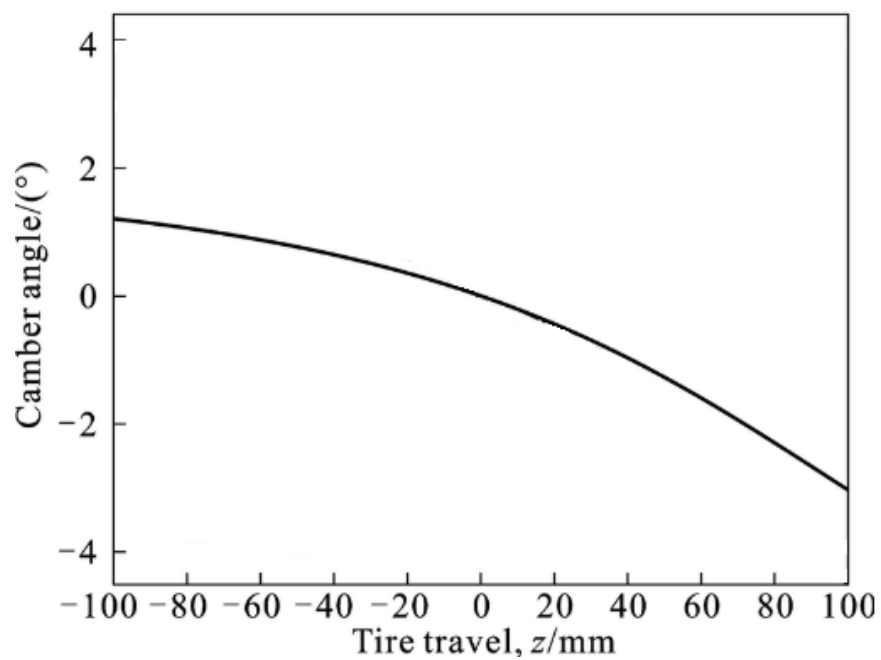
Όχημα με αυξημένο φορτίο



Όχημα που διέρχεται άνω εξογκώματος

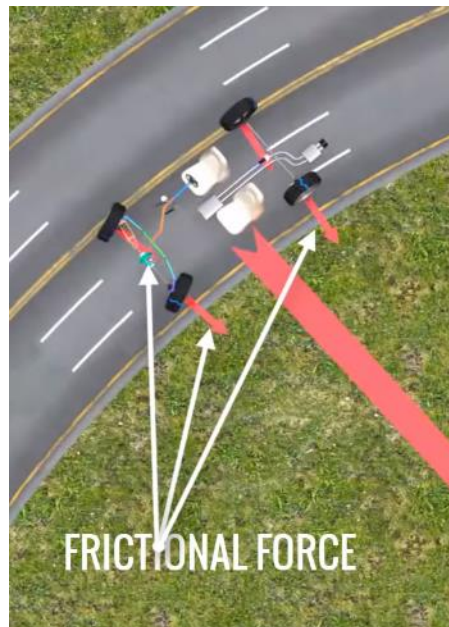


Η μεταβολή της γωνίας camber κατά τη κάθετη κίνηση του τροχού φαίνεται στο παρακάτω εμπειρικό διάγραμμα

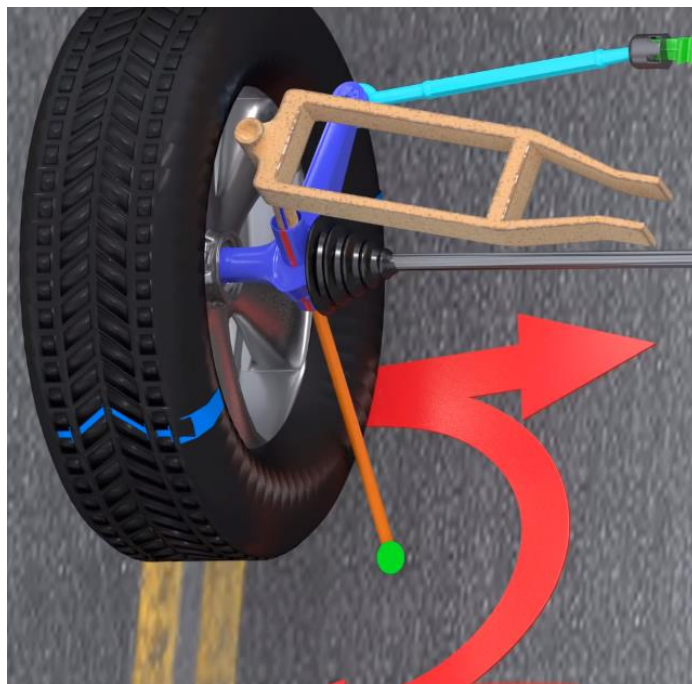
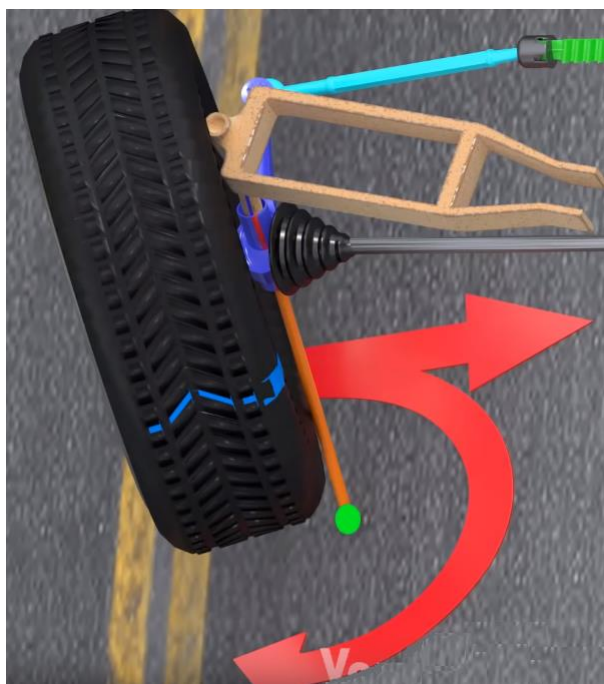
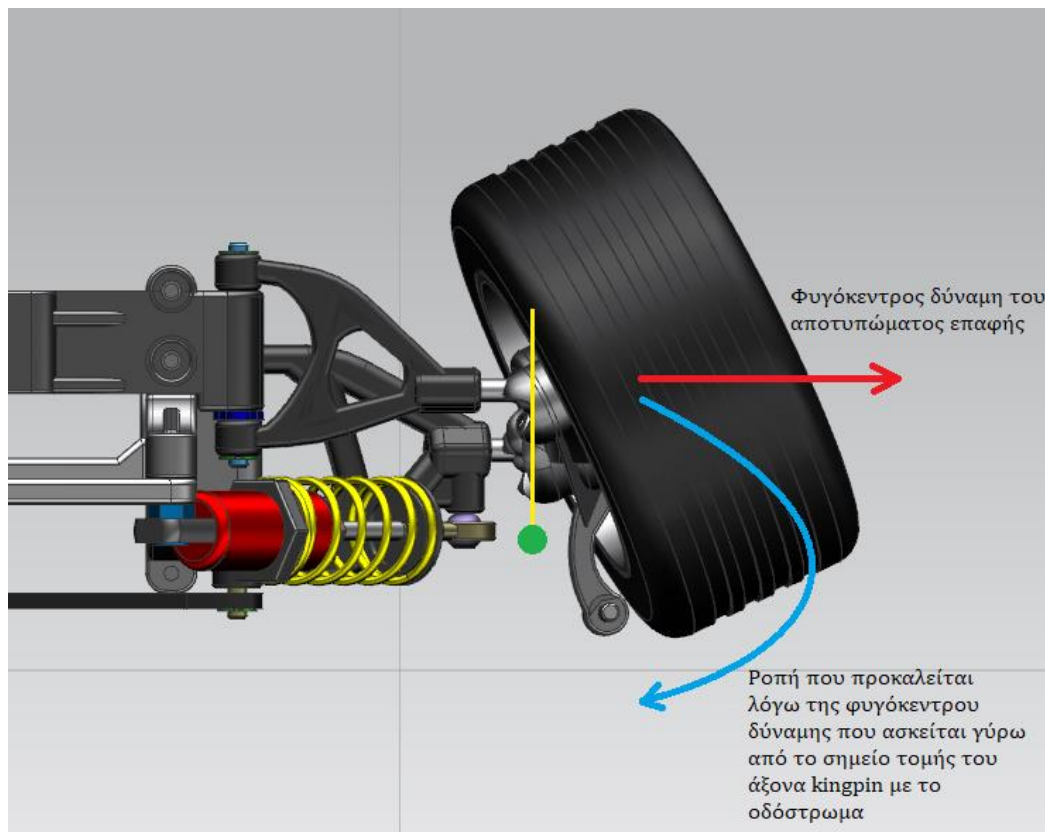
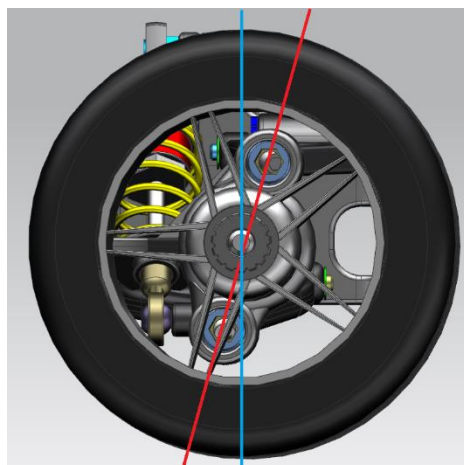


5.3 Γωνία Caster και η επιρροή της στη γωνία Camber

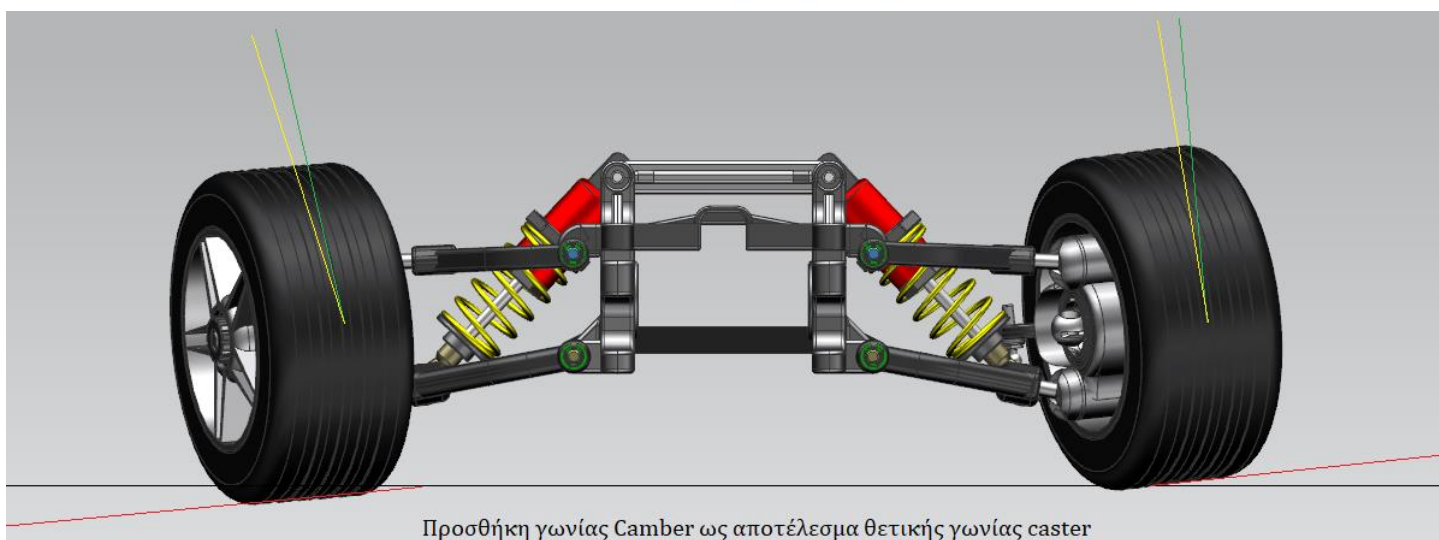
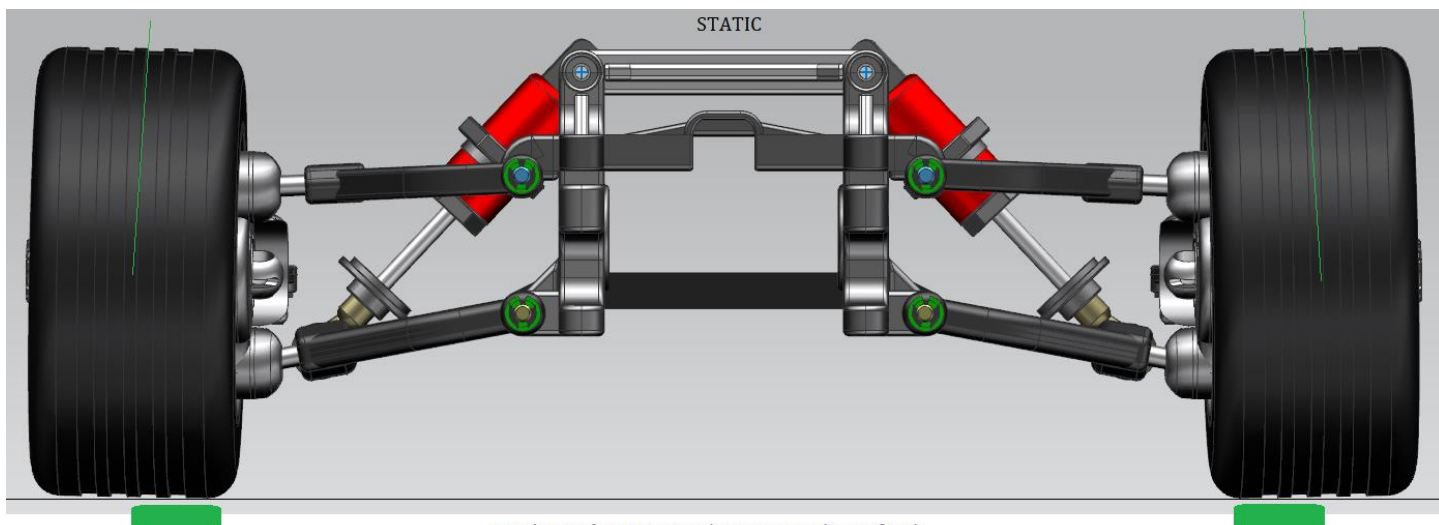
Η συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων που κατασκευάζονται διαθέτουν θετική γωνία caster. Το σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει αυτή η γωνιακή μετατόπιση του άξονα πηδαλιούχησης κατά τη θετική φορά (positive caster) είναι ότι ο νέος άξονας περιστροφής του τροχού τέμνει το οδόστρωμα σε σημείο εμπρός του αποτυπώματος επαφής του τροχού στην ευθύγραμμη κίνηση. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο περιστροφής ή *rinot point*. Λόγω της μετατόπισης αυτής το αποτύπωμα επαφής κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης ασκεί φυγόκεντρο δύναμη γύρω από το *rinot point*. Εφόσον η φυγόκεντρος δύναμη θα έχει κοινή κατεύθυνση με την κατεύθυνση της πηδαλιούχησης θα δημιουργεί ροπή γύρω από το *rinot point* η οποία θα επαναφέρει τον τροχό στην ευθεία πορεία προσφέροντας ταυτόχρονα feedback στον οδηγό. Το φαινόμενο αυτό διακρίνεται στα καρότσια των σουπερμάρκετ στα οποία ο άξονας πηδαλιούχησης είναι μπροστά από το κέντρο περιστροφής των ροδακιών. Τα ροδάκια με την κάθε κίνηση του καροτσιού τείνουν να ακολουθήσουν την πορεία κίνησης του και αυτό λόγω της ροπής που ασκείται μπροστά από το σημείο επαφής των ροδακιών με το έδαφος. Τα οχήματα που κατασκευάζονται ως επί το πλείστον δεν διαθέτουν μηδενική γωνία caster. Αυτό διότι εφόσον το *rinot point* και το αποτύπωμα επαφής θα εφάπτονται η φυγόκεντρος δύναμη θα ασκείται σε μηδενική απόσταση από το *rinot point* οπότε δεν θα δημιουργείται ροπή επαναφοράς. Ως αποτέλεσμα ο οδηγός συνεχώς θα χρειάζεται να ασκεί συνεχή πίεση στο τιμόνι κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης για να επαναφέρει το όχημα σε ευθεία κίνηση αλλά και για να το κρατήσει σταθερό στην ευθεία θέση καθιστώντας τη διαδικασία οδήγησης πολύ πιο δύσκολη. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι κανένα όχημα δεν διαθέτει αρνητική γωνία caster. Εφόσον στην αρνητική γωνία caster το *rinot point* θα βρίσκεται πίσω από το αποτύπωμα επαφής η φυγόκεντρος δύναμη που θα ασκούταν από τα φορτία του contact patch θα δημιουργούσε ροπή η οποία δεν θα αντιστεκόταν στην στρέψη αλλά αντιθέτως θα την μεγιστοποιούσε δημιουργώντας απότομη ενίσχυση στην στρέψη του οχήματος αλλά και δυσκολία στην επαναφορά του στην ευθεία κίνηση. Ένα παράδειγμα είναι στην όπισθεν κίνηση ενός οχήματος με θετική γωνία caster. Εφόσον η κίνηση είναι αντίθετη της ευθείας οι εμπρός ρόδες θα διαθέτουν πλέον αρνητική γωνία caster. Στην όπισθεν παρατηρούμε πως με την αύξηση της ταχύτητας παρατηρείται και αύξηση της αστάθειας του οχήματος καθώς αυξάνονται τα φορτία των τροχών και συνεπώς η φυγόκεντρος δύναμη που ασκείται στον τροχό. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε πως η φυγόκεντρος δύναμη που ασκούν τα ελαστικά εξαρτάται από την στρέψη του οχήματος (ωρολογιακή στροφή → φυγόκεντρος δύναμη προς τα δεξιά, αντιωρολογιακή στροφή → φυγόκεντρος δύναμη προς τα αριστερά).



Η ροπή επαναφοράς του τροχού στην ευθεία πορεία φαίνεται παρακάτω



Ένα ακόμα πλεονέκτημα της θετικής γωνίας caster είναι ότι προσθέτει αρνητική γωνία camber γεγονός που συμβάλλει στην στρέψη του οχήματος εφόσον βελτιστοποιεί το αποτύπωμα των τροχών.



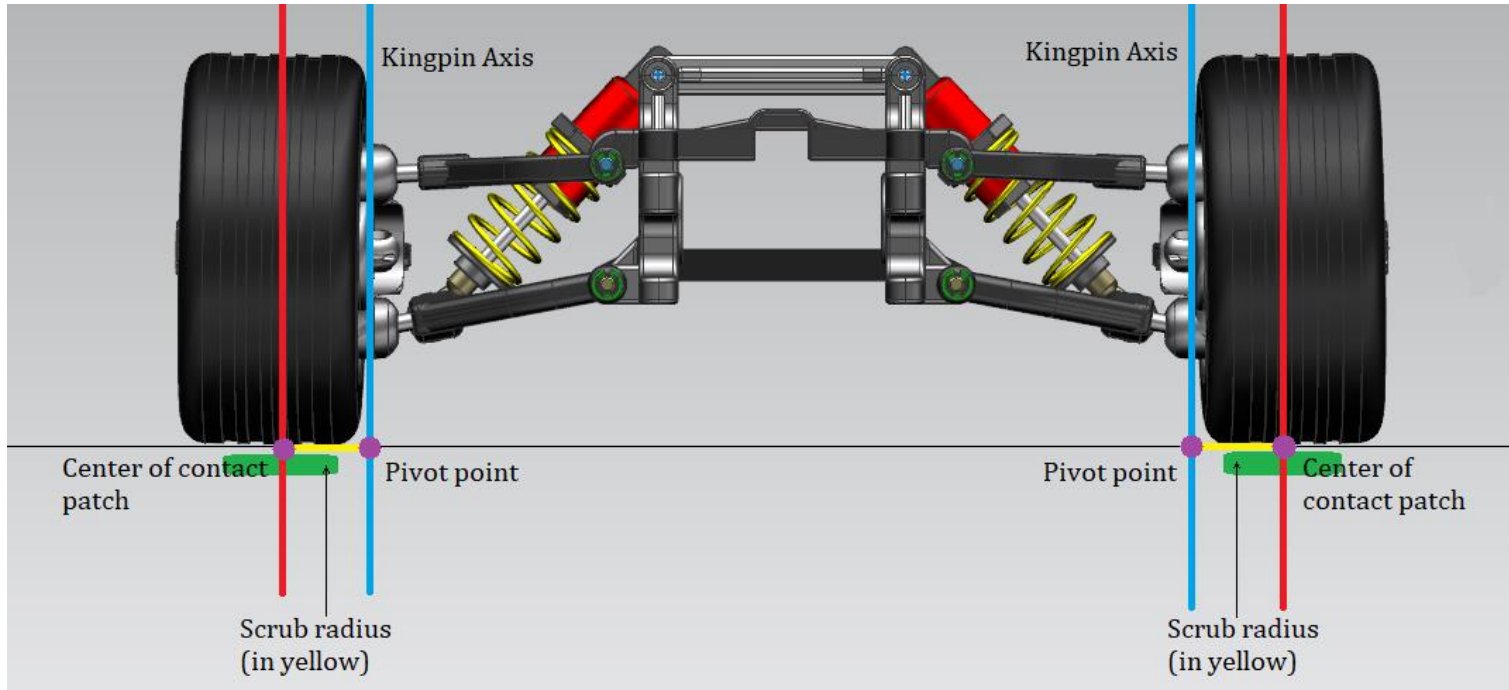
Γνωρίζοντας ότι με μηδενική γωνία camber και caster ένα όχημα κατά την πηδαλιούχηση του θα αποκτούσε αύξηση της γωνίας camber στον εξωτερικό τροχό και μείωση της στον εσωτερικό τροχό λόγω body roll, πράγμα ανεπιθύμητο καθώς οι τροχοί δε θα ήταν ικανοί να αντιμετωπίσουν τα φορτία που ασκούνται στα αποτυπώματα επαφής, προσθέτοντας θετική γωνία caster οι αυξομειώσεις αυτές της γωνίας camber αντιστρέφονται καθώς πλέον οι τροχοί δέχονται την αντίστροφη γωνία camber από αυτή που θα δεχόντουσαν κανονικά. Ως συνέπεια το όχημα θα διατηρούταν σταθερό και ελέγξιμο στις στροφές καθιστώντας μη απαραίτητη την αλλαγή της γωνίας camber (συνεπώς και του μειονεκτήματος του μειωμένου αποτυπώματος επαφής στην ευθεία κίνηση). Παρόλα αυτά πρέπει να επισημανθεί πως η εισαγωγή υπερβολικά μεγάλης θετικής γωνίας caster καθιστά επίπονο τον έλεγχο του οχήματος καθώς οι τροχοί τείνουν να ευθυγραμμιστούν πάρα πολύ έντονα με τον οδηγό να πρέπει να ασκεί μεγάλη δύναμη στο πηδάλιο για να στραφεί το όχημα κι επίσης μειώνει σημαντικά το προσδόκιμο ζωής των ελαστικών.

5.4 Γωνία KPI και η επιρροή της στην ακτίνα τριβής (Scrub radius) και τη γωνία camber

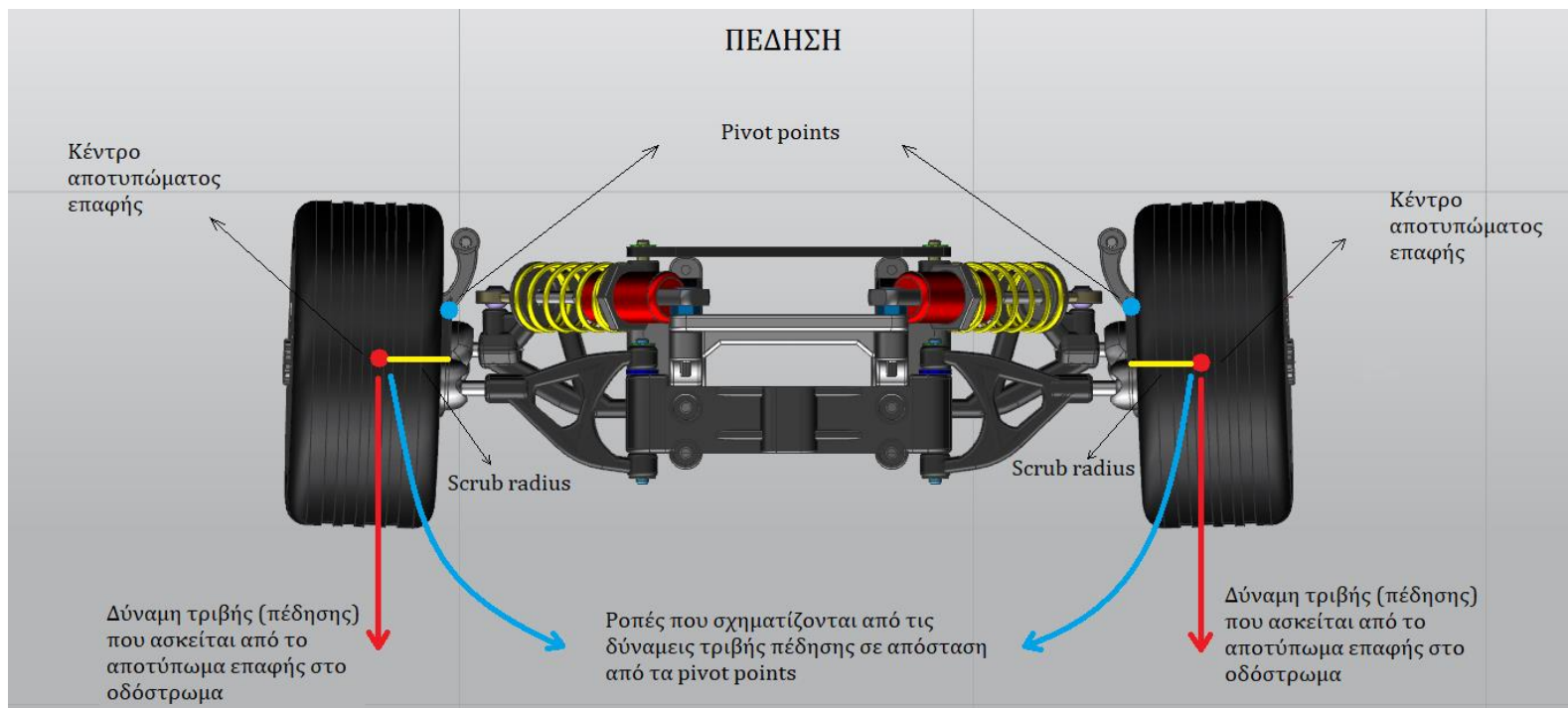
Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια η ακτίνα τριβής είναι η απόσταση του pivot point από το κέντρο του αποτυπώματος επαφής. Ένα όχημα μπορεί να διαθέτει θετικό scrub radius δηλαδή το κέντρο του αποτυπώματος επαφής να βρίσκεται εκτός του pivot point (του σημείου τομής του άξονα kingpin με το έδαφος), μηδενικό scrub radius που σημαίνει το pivot point και το κέντρο του contact patch να έχουν μηδενική απόσταση στο επίπεδο του οδοστρώματος, η αρνητικό scrub radius στο οποίο το pivot point βρίσκεται εκτός του κέντρου του contact patch.

Εάν υποθέσουμε ότι το όχημα διαθέτει μηδενική γωνία KPI με θετική ακτίνα τριβής και υπόκειται σε πέδηση ή ροπή που προκαλείται από τη δύναμη τριβής του ελαστικού με το οδόστρωμα προκαλεί την περιστροφή των τροχών προς τα έξω (toe out) κι εφόσον τα επίπεδα πρόσφυσης των τροχών είναι διαφορετικά μεταξύ τους (στην πραγματικότητα ποτέ τα επίπεδα πρόσφυσης δεν είναι ίδια) και οι εμπρός τροχοί έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται η μεγαλύτερη δύναμη τριβής θα υπερισχύσει και το όχημα θα τείνει να στρίψει (δεξιά ή αριστερά) κατά τη διάρκεια πέδησης παρόλο που το πηδάλιο βρίσκεται στην ευθεία θέση. Αντιστοίχως κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης οι τροχοί θα περιστρέφονται προς τα μέσα (toe in) και θα προκαλείται το φαινόμενο γνωστό ως torque steer δηλαδή η περιστροφή των τροχών στην κατεύθυνση της υπερισχύουσας δύναμης τριβής κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης παρόλο που το πηδάλιο διατηρείται στην ευθεία θέση.

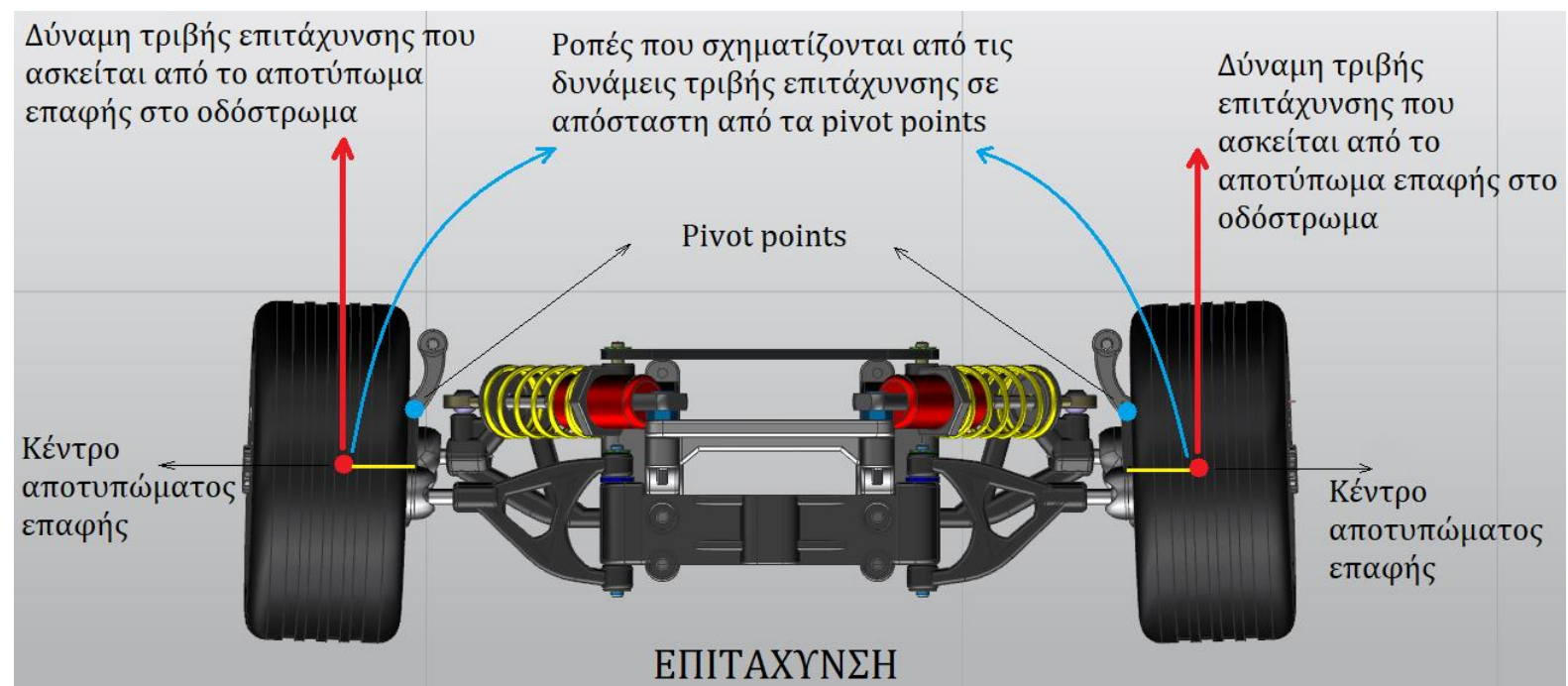
Scrub radius από την μπροστινή όψη



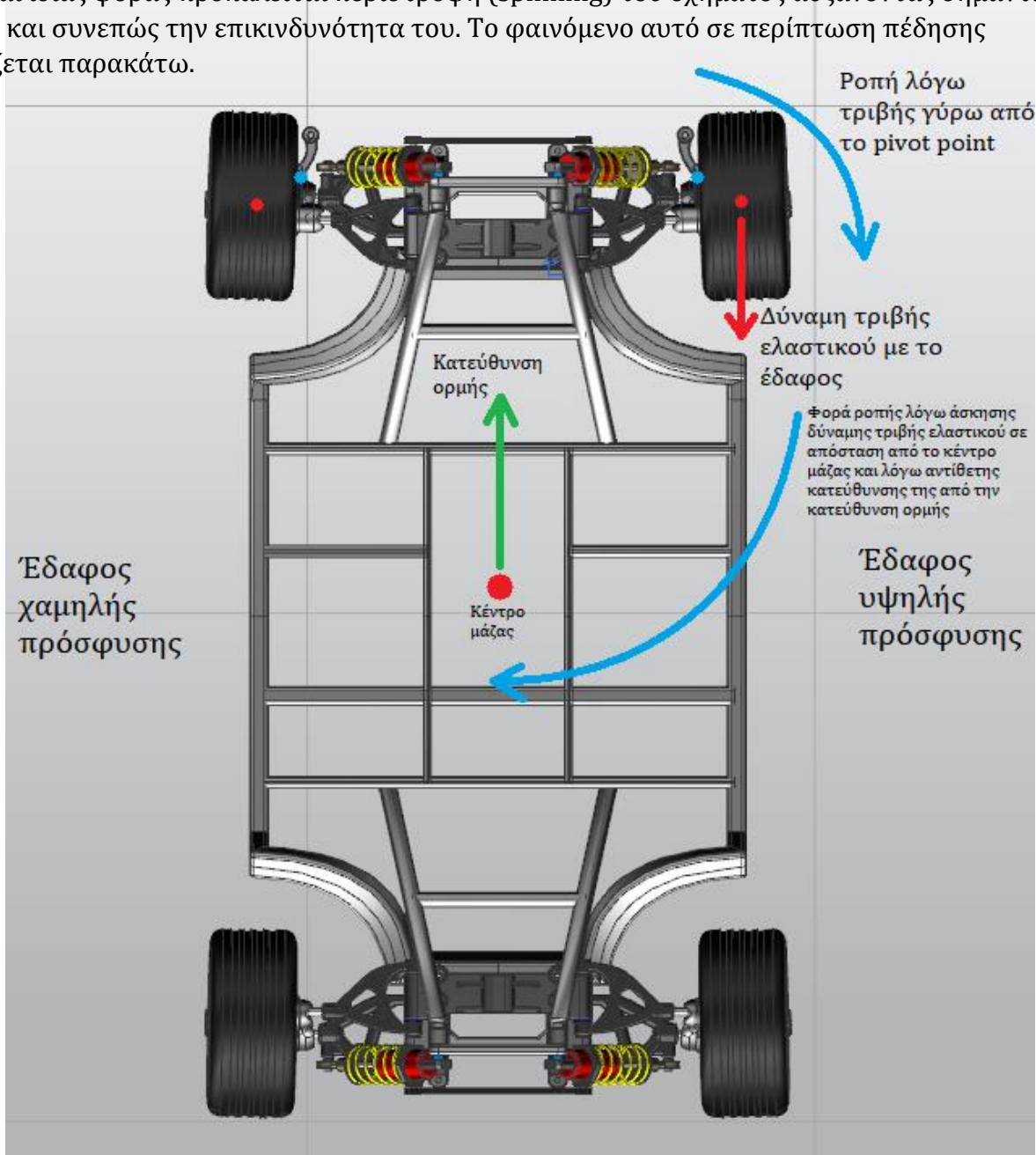
Scrub radius και ασκούμενες δυνάμεις από την άνω όψη κατά τη διάρκεια της πέδησης. Κατά την πέδηση οι τροχοί τείνουν να στραφούν προς τα έξω (toe out)



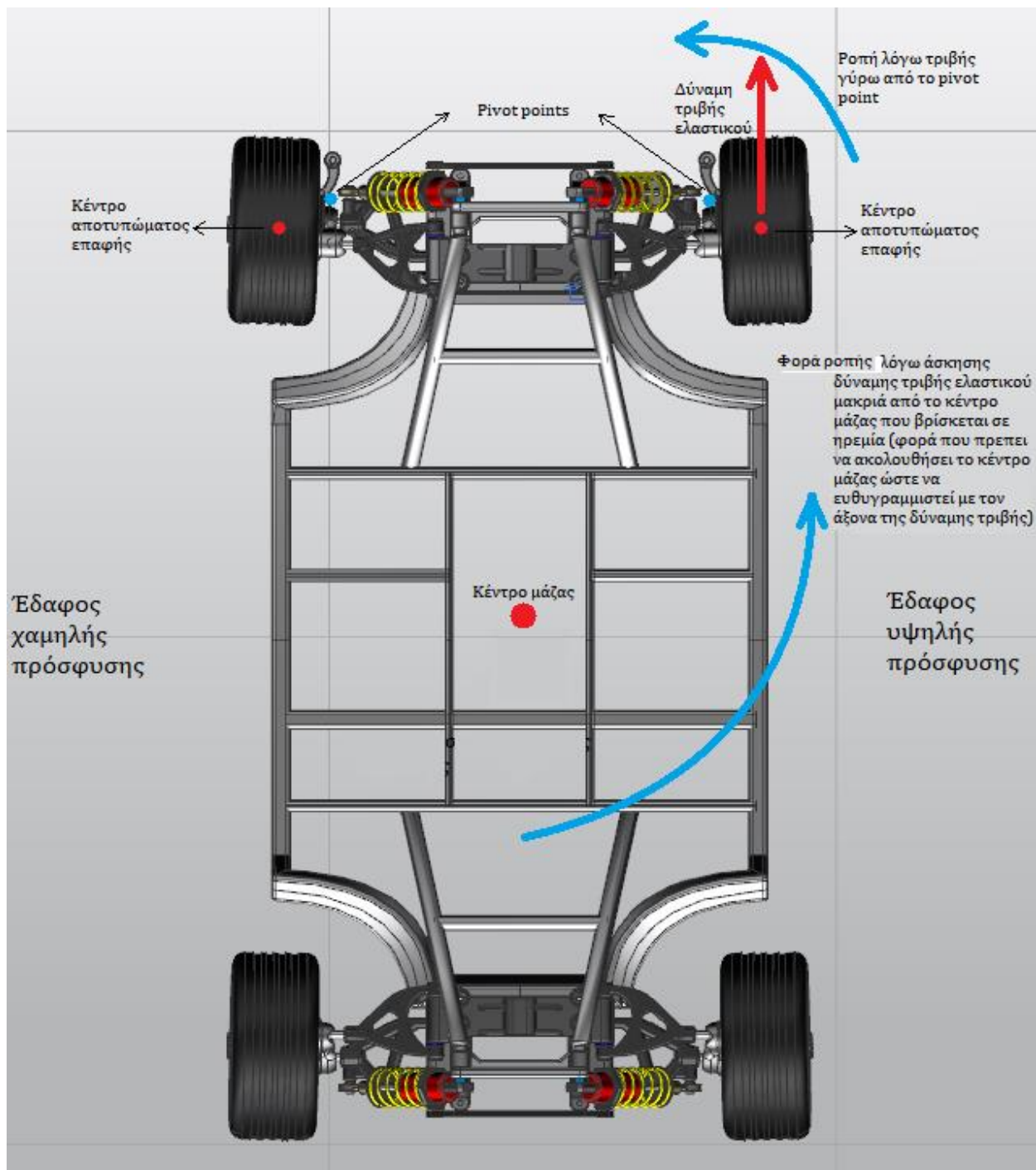
Scrub radius και ασκούμενες δυνάμεις από την άνω όψη κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης. Κατά την επιτάχυνση οι τροχοί τείνουν να στραφούν προς τα έξω (toe out)



Αυτή η ανεξέλεγκτη στρέψη των τροχών στις φάσεις πέδησης και επιτάχυνσης του οχήματος καθιστά την οδηγική συμπεριφορά του ανεξέλεγκτη και επίπονη για τον οδηγό καθώς σε αυτές τις φάσεις θα πρέπει να ασκεί συνεχώς πίεση στο πηδάλιο για να διατηρηθεί η κίνηση του οχήματος ευθεία. Ένα ακόμη μειονέκτημα της θετικής ακτίνας τριβής είναι πως σε περίπτωση που οι δύο ακριανοί τροχοί βρίσκονται σε έδαφος χαμηλής πρόσφυσης (πχ πάγος) και οι απέναντι τροχοί βρίσκονται σε έδαφος υψηλής πρόσφυσης (πχ οδόστρωμα) κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης (σε προσθιοκίνητα οχήματα) ή της πέδησης λόγω της μεταφορικής ορμής (ή της ηρεμίας) του οχήματος προκαλείται ροπή γύρω από το κέντρο μάζας εφόσον η δύναμη τριβής του ελαστικού ασκείται σε απόσταση από αυτό και σε συνδυασμό με την ροπή που προκαλείται γύρω από το pivot point λόγω της τριβής του ελαστικού με το έδαφος η οποία είναι ίδιας φοράς προκαλείται περιστροφή (spinning) του οχήματος αυξάνοντας σημαντικά την αστάθεια και συνεπώς την επικινδυνότητα του. Το φαινόμενο αυτό σε περίπτωση πέδησης απεικονίζεται παρακάτω.

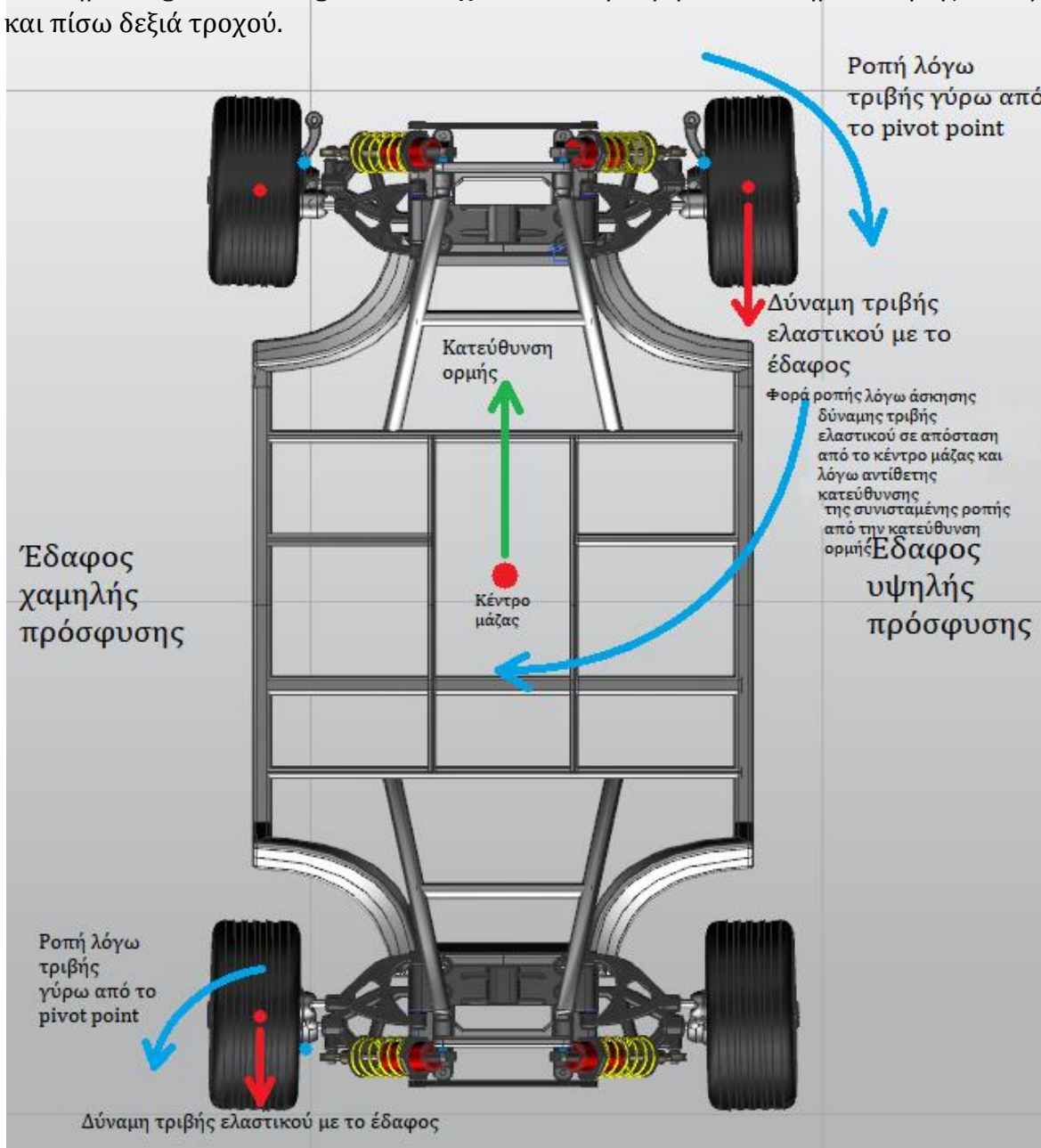


Το φαινόμενο αυτό σε περίπτωση επιτάχυνσης αντιστοίχως



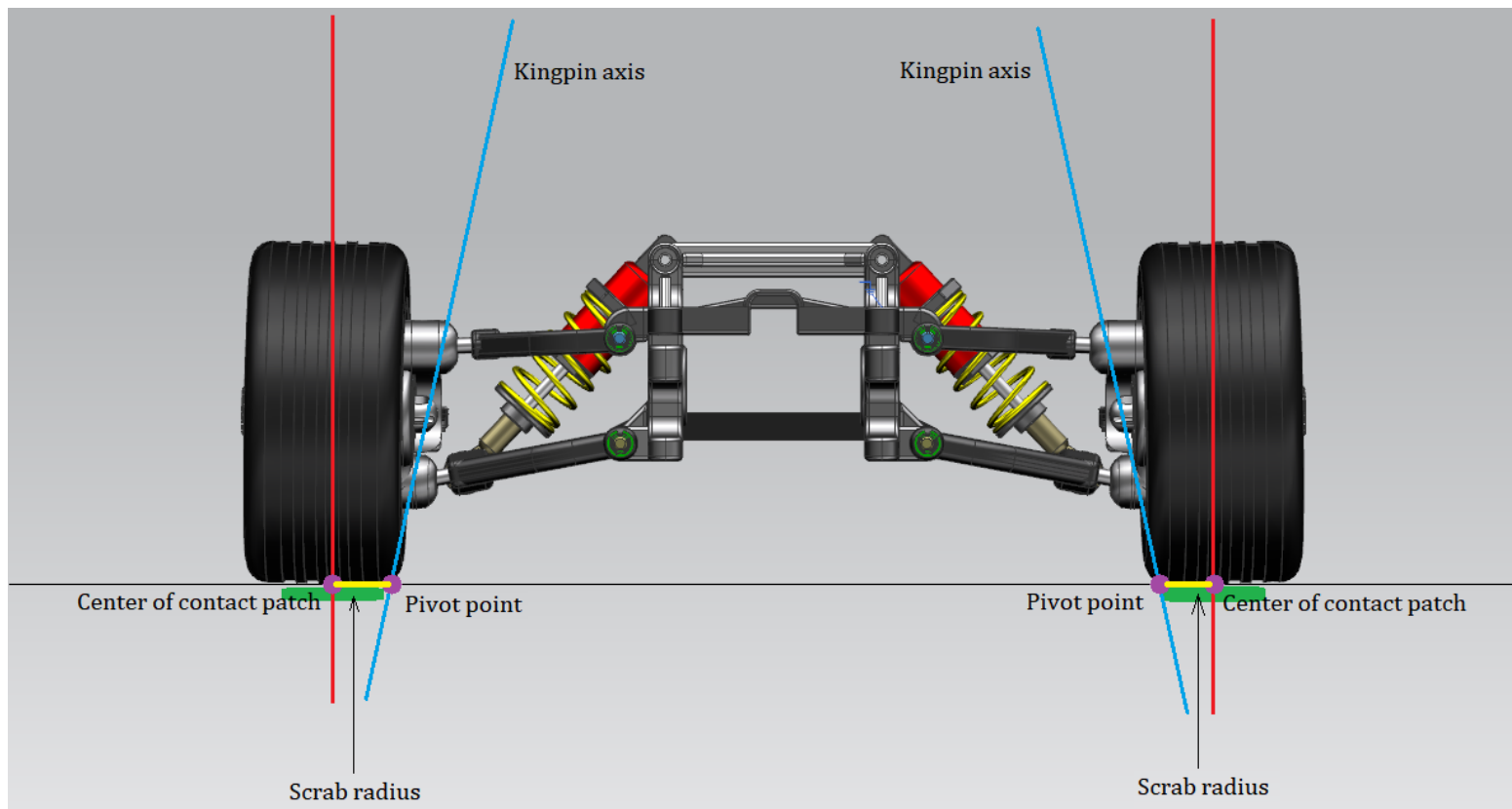
Το ίδιο πρόβλημα συναντάται και σε σύγχρονα οχήματα που διαθέτουν διαγώνια συστήματα πέδησης (diagonal braking systems) τα οποία διαθέτουν ξεχωριστά υδραυλικά συστήματα, ένα υπεύθυνο για τον εμπρός δεξιό τροχό και τον πίσω αριστερό τροχό και ένα υπεύθυνο για τον εμπρός αριστερό τροχό και τον πίσω δεξιό τροχό, Σε αυτού του είδους οχήματα σε περίπτωση που ένα από τα δύο συστήματα

υποστεί βλάβη και δε δύναται να πραγματοποιήσει πέδηση τότε λόγω της κατεύθυνσης προς τα εμπρός της ορμής του οχήματος το βάρος μεταφέρεται στο μπροστινό μέρος του αυξάνοντας τη δύναμη τριβής που ασκείται στο μπροστινό τροχό. Παρόλο λοιπόν που ο πίσω τροχός ασκεί ροπή αντίστροφης φοράς από αυτή της ροπής γύρω από το κέντρο μάζας του σώματος, η ροπή λόγω τριβής του μπροστινού τροχού υπερνικά προκαλώντας όπως και πριν αστάθεια ή ακόμη και spinning του οχήματος. Παρακάτω βλέπουμε σύστημα diagonal braking το οποίο έχει υποστεί βλάβη στο σύστημα πέδησης του εμπρός αριστερά και πίσω δεξιά τροχού.



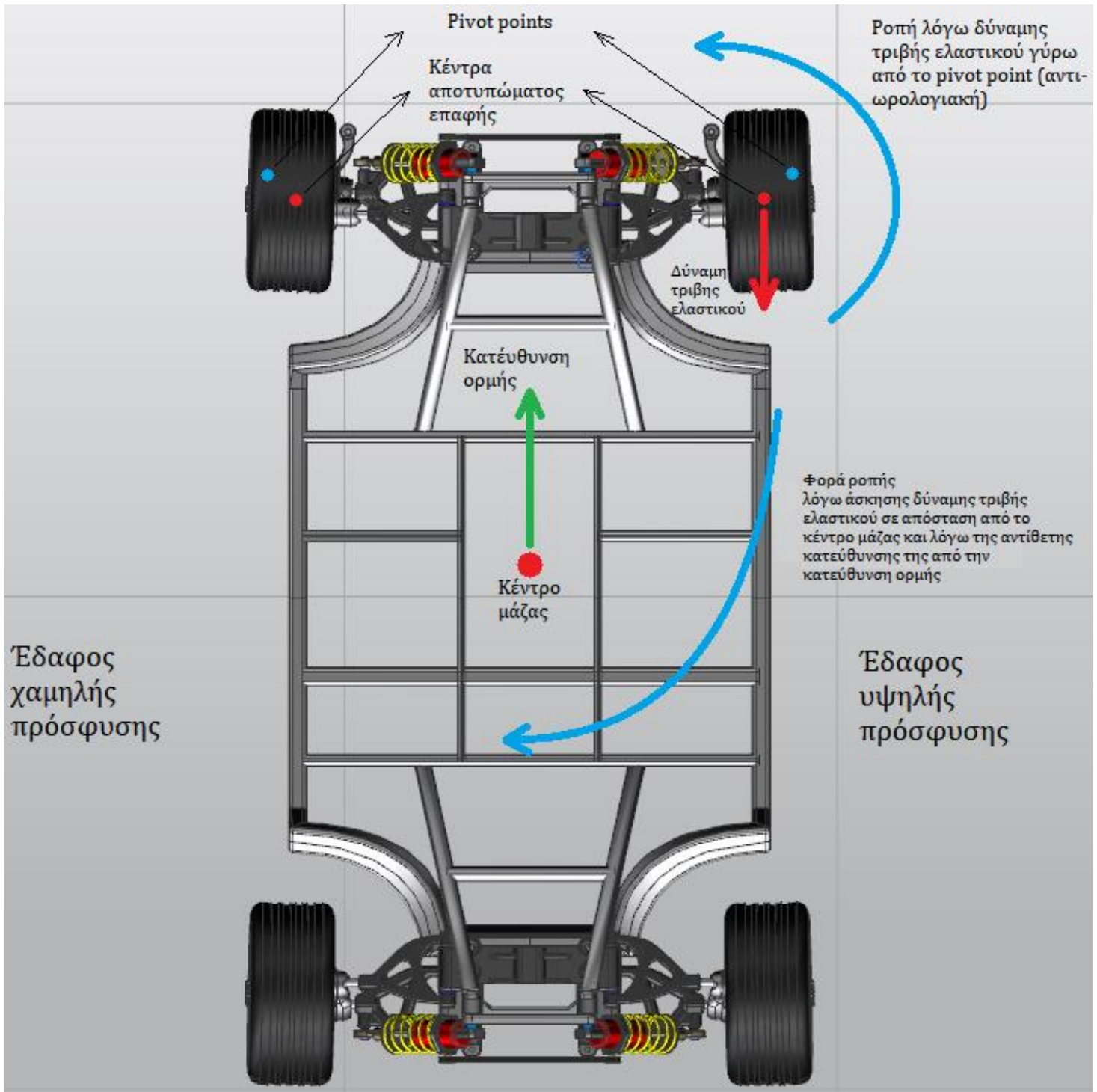
Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εισάγοντας γωνία KPI με την τοποθέτηση της άνω άρθρωσης κοντύτερα στο κέντρο του σώματος σε σχέση με την κάτω άρθρωση. Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται μείωση της απόστασης του σημείου τομής του άξονα περιστροφής με το οδόστρωμα από το κέντρο του αποτυπώματος επαφής του τροχού (scrub radius) μειώνοντας σημαντικά τις

ανεπιθύμητες ροπές που δημιουργούνται. Επίσης η μείωση του scrub radius καθιστά πιο εύκολη την πηδαλιούχηση ειδικά σε μικρές ταχύτητες λόγω της μείωσης της ροπής από την τριβή του ελαστικού που με τη σειρά του σημαίνει πως η στρέψη επηρεάζεται πολύ λιγότερο από την πέδηση. Παρακάτω βλέπουμε το σχεδιασμένο όχημα με προσθήκη γωνίας KPI.

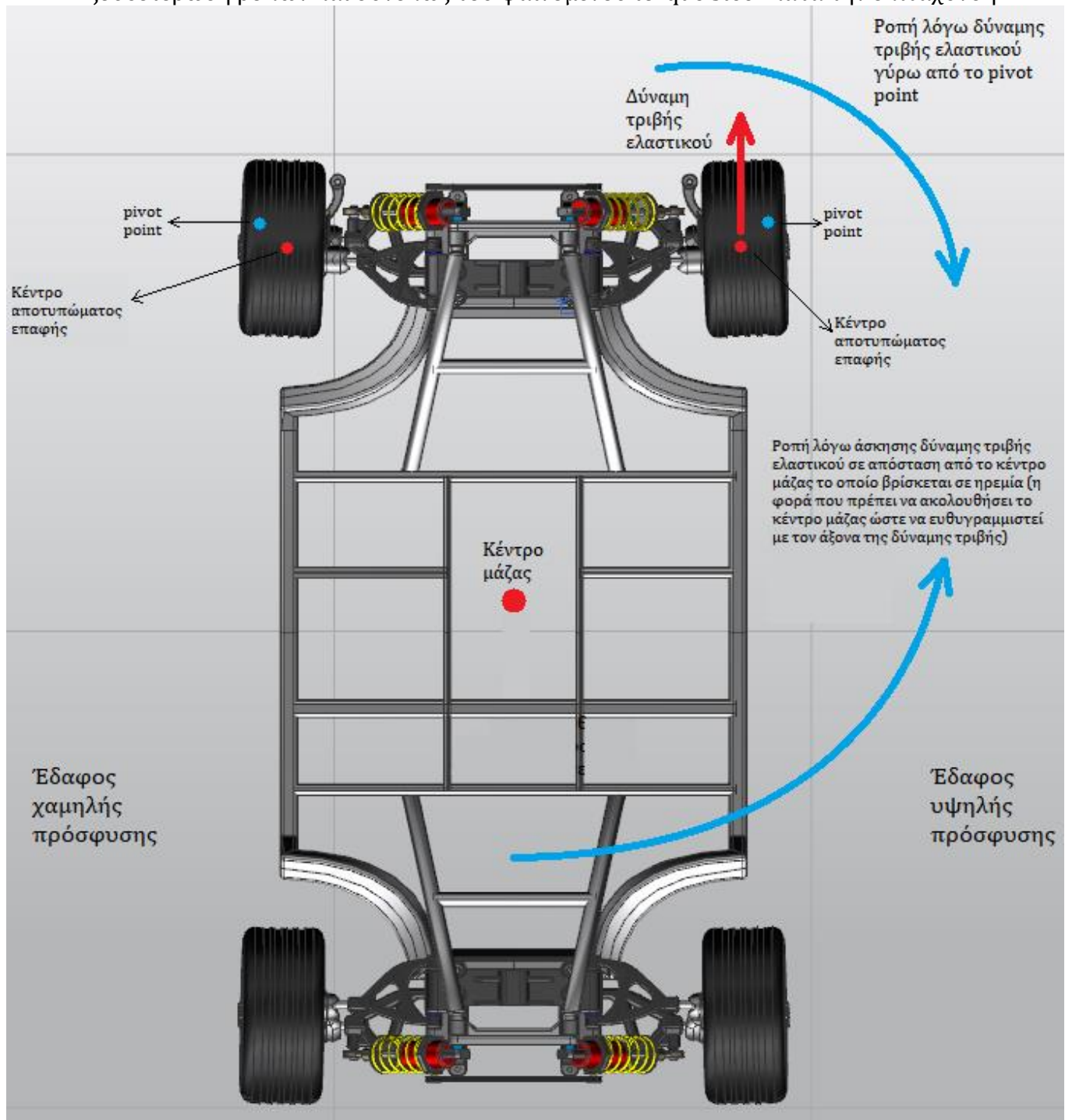


Βλέπουμε λοιπόν πως η ακτίνα τριβής μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τη μηδενική γωνία KPI. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι μηχανικοί μπορούν να ρυθμίσουν το σύστημα ανάρτησης ώστε το pivot point να προσπεράσει το κέντρο του αποτυπώματος επαφής δηλαδή το pivot point να βρίσκεται πιο εξωτερικά από αυτό και ως συνέπεια το όχημα να διαθέτει πλέον αρνητική ακτίνα τριβής (negative scrub radius). Ένα πλεονέκτημα της αρνητικής ακτίνας τριβής είναι η αναστροφή της φοράς ροπής που προκαλείται από την τριβή του ελαστικού γύρω από το pivot point (στην πέδηση από ωρολογιακή γίνεται αντι-ωρολογιακή και στην επιτάχυνση από αντι-ωρολογιακή γίνεται ωρολογιακή). Με αυτόν τον τρόπο ροπή γύρω από το κέντρο μάζας του σώματος εξουδετερώνεται από τη ροπή τριβής του ελαστικού εφόσον διαθέτει αντίστροφη φορά ροπής. Αυτή η ρύθμιση (εάν πραγματοποιηθεί καταλλήλως) στην περίπτωση ανομοιόμορφης πρόσφυσης στα δεξιά και στα αριστερά του οχήματος έχει ως αποτέλεσμα ο οδηγός να έχει πλέον τη δυνατότητα να επιταχύνει ή να ασκεί πέδηση απότομα χωρίς το όχημα να τείνει να αλλάξει πορεία ή να περιστραφεί καθιστώντας έτσι το όχημα ασφαλές και ελέγξιμο ακόμη και σε μη ευνοϊκά εδάφη ή καιρικές συνθήκες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι με τη ρύθμιση αρνητικής γωνίας KPI από τους κατασκευαστές εξαλείφεται το φαινόμενο torque steer δηλαδή η ανεπιθύμητη στρέψη του πηδαλίου και συνεπώς των τροχών κατά την επιτάχυνση, το οποίο αποτελεί σημαντική προτεραιότητα ειδικά σε спор εκδόσεις συμβατικών οχημάτων τα οποία διαθέτουν προσθιοκίνηση (front wheel drive).

Παρακάτω βλέπουμε τις ροπές που εξουδετερώνονται στην περίπτωση πέδησης σε έδαφος ανομοιόμορφης πρόσφυσης στα δεξιά και στα αριστερά.

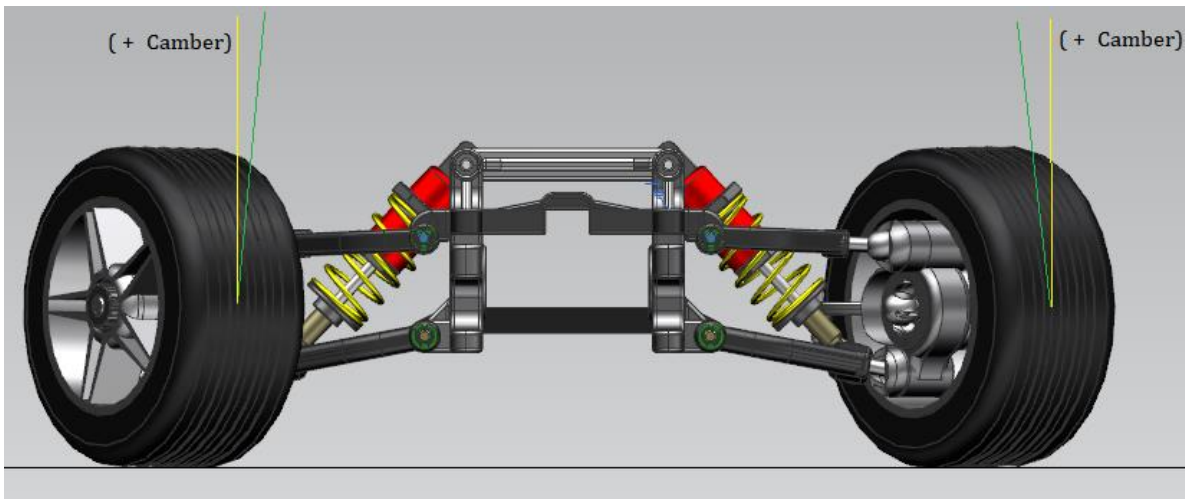


Εξουδετέρωση ροπών και συνεπώς του φαινομένου torque steer κατά την επιτάχυνση



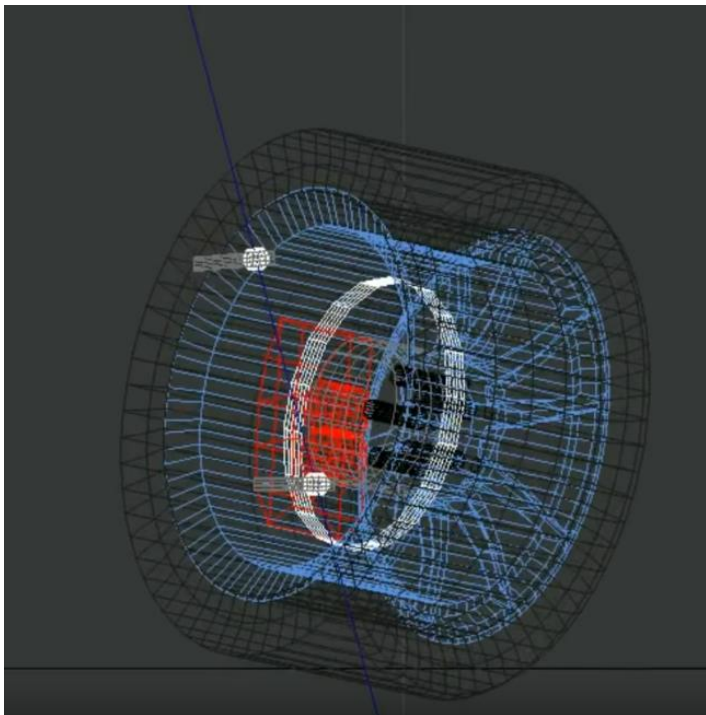
Ένα μειονέκτημα της εισαγωγής σημαντικά μεγάλης γωνίας KPI είναι πως έχει άμεσο αντίκτυπο στη γωνία camber κατά τη διάρκεια της πηδαλιούχησης. Η εισαγωγή γωνίας KPI προκαλεί αύξηση της γωνίας camber στη στρέψη των τροχών. Το γεγονός αυτό είναι συμφέρον για τον εσωτερικό τροχό ο οποίος χάνει σημαντικά γωνία camber στις στροφές παρόλα αυτά ο εξωτερικός τροχός ο οποίος είναι πιο σημαντικός στην πηδαλιούχηση καθώς καλείται να διαχειριστεί τη μεταφορά βάρους προς το μέρος του και συνεπώς την αυξημένη δύναμη τριβής με το οδόστρωμα, κερδίζει σημαντικά γωνία camber.

Πρόσθεση γωνίας camber κατά τη στρέψη των τροχών με το όχημα σε στασιμότητα

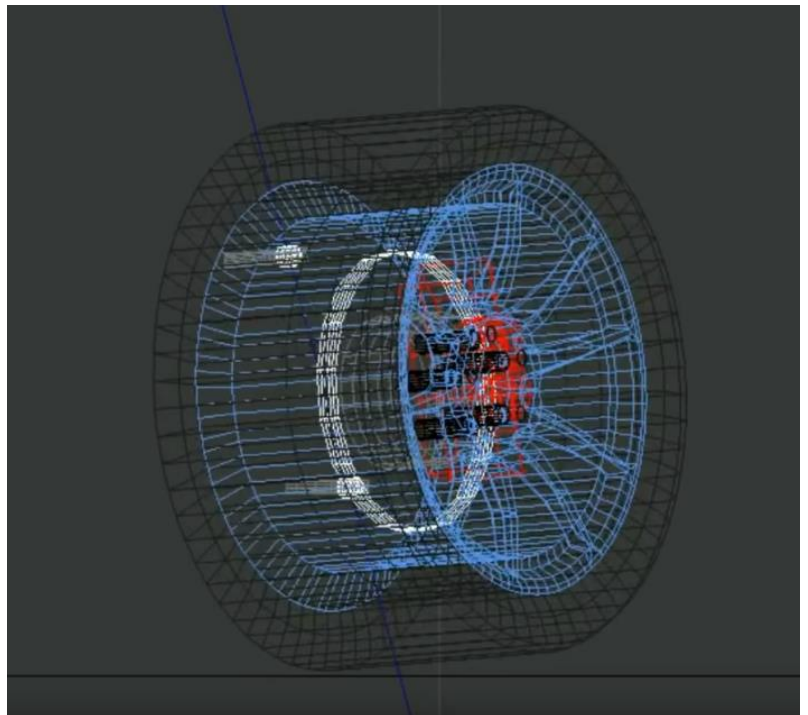


Εάν λοιπόν αναλογιστούμε πως κατά τη διάρκεια της κίνησης (και όχι στασιμότητας) του οχήματος στη στρέψη του λόγω της κύλισης του σώματος (body roll) στην θετική γωνία camber που προκαλείται από την εισαγωγή μεγάλης γωνίας KPI προστίθεται ακόμη περισσότερη γωνία camber προκαλώντας σημαντική μείωση του αποτυπώματος επαφής, υπερθέρμανση του μέρους των ελαστικών που διαχειρίζεται την αυξημένη τριβή άρα και μείωση της ζωής των ελαστικών και τέλος αυξημένη αστάθεια του οχήματος. Παρακάτω βλέπουμε τη σημαντική μεταβολή της γωνίας camber στον δεξιό τροχό του οχήματος λόγω της εισαγωγής γωνίας KPI και λόγω body roll.

Αριστερή πηδαλιούχηση



Δεξιά πηδαλιούχηση



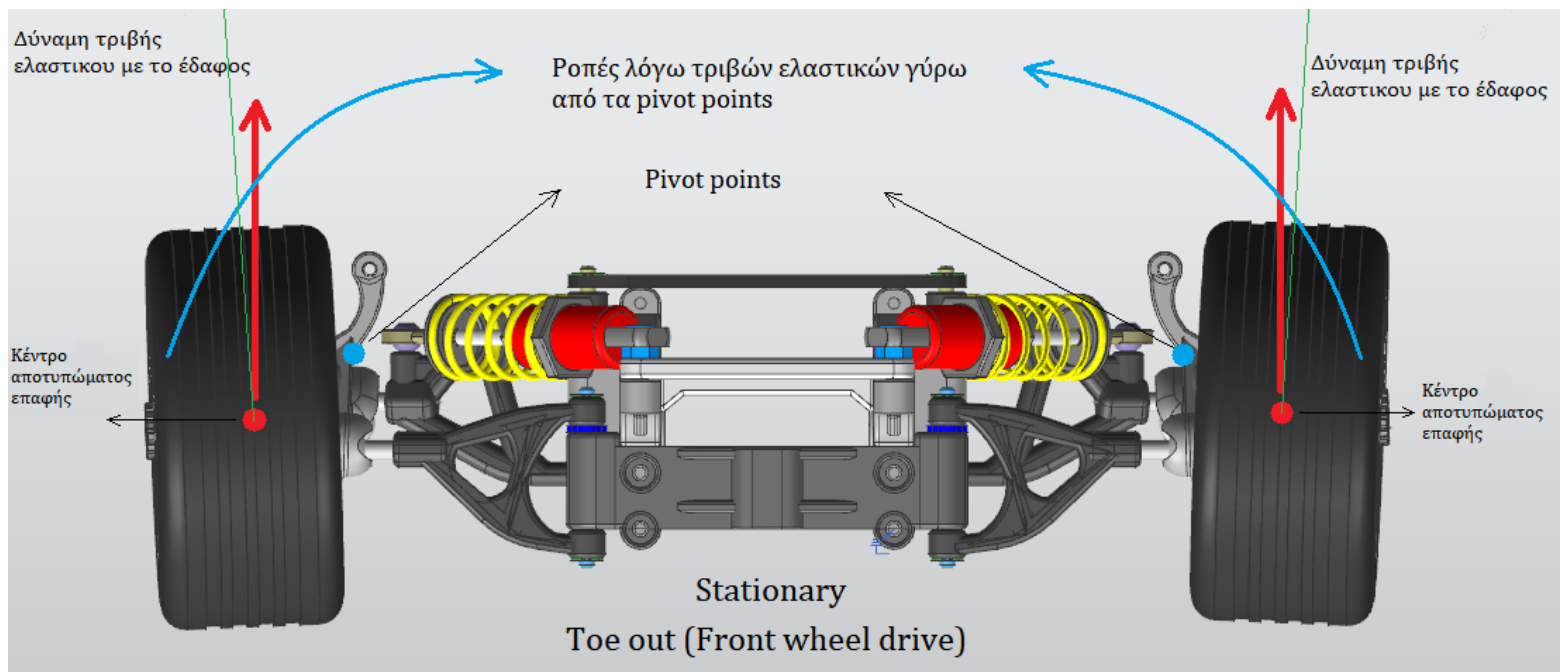
Στην περίπτωση που το κέντρο του αποτυπώματος επαφής εφάπτεται με το pivot point τότε το όχημα διαθέτει μηδενικό scrub radius. Με τον μηδενισμό της απόστασης (ως προς τον x άξονα) του κέντρου του contact patch από το pivot point και συνεπώς το μηδενισμό των ροπών τριβής του ελαστικού λόγω επιτάχυνσης ή πέδησης επιτυγχάνεται ευστάθεια του οχήματος στην ευθεία κίνηση. Εξαλείφοντας τελείως όμως τις ροπές ευθείας τριβής του ελαστικού, το φαινόμενο γνωστό ως squirm γίνεται πολύ πιο αισθητό. Στο φαινόμενο αυτό λόγω μη ύπαρξης ροπής τριβής (εφόσον η δύναμη τριβής ασκείται πάνω στο pivot point οπότε είναι απλώς μονοδιάστατη δύναμη) κατά τη διάρκεια στρέψης των τροχών το εσωτερικό των τροχών θα περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από το εξωτερικό των τροχών εφόσον το εξωτερικό πρέπει να διανύσει «κύκλο» μεγαλύτερης ακτίνας. Με την ύπαρξη scrub radius το φαινόμενο αυτό θα μειωνόταν σημαντικά εφόσον η ροπή τριβής θα έστρεφε τους τροχούς προς σε κάποια κατεύθυνση όμως στην προκειμένη εφόσον δεν υπάρχει αυτή η ροπή οι τροχοί θα είναι ασταθείς στις στροφές και θα προκαλείται υψηλή φθορά στα ελαστικά λόγω της ανομοιόμορφης περιστροφής του εσωτερικού και εξωτερικού του τροχού. Ένα άλλο μειονέκτημα μηδενικού scrub radius είναι πως κατά τη διάρκεια πηδαλιούχησης σε κατάσταση στασιμότητας του οχήματος το αποτύπωμα επαφής περιστρέφεται γύρω από το pivot point το οποίο ευρίσκεται στον ίδιο άξονα γεγονός που απαιτεί μεγαλύτερη δύναμη στο πηδάλιο από τον οδηγό και μειώνει τη ζωή του ελαστικού.

Σε γενικές γραμμές η ύπαρξη μιας μικρής απόστασης scrub radius είναι η πιο επιθυμητή λύση και εξαρτάται άμεσα από το είδος του οχήματος (συμβατικό, αγωνιστικό κλπ.), το σύστημα ανάρτησης που διαθέτει (είναι σύνηθες τα οχήματα με αναρτήσεις MacPherson να διαθέτουν αρνητικό scrub radius) καθώς και τη θέση των κινητήριων τροχών (πισωκίνηση ή προσθιοκίνηση, στην πίσω κίνηση είναι επιθυμητό θετικό scrub radius εφόσον η ροπή τριβής του ελαστικού είναι αντίθετη της στροφορμής του οχήματος γύρω από το κέντρο μάζας).

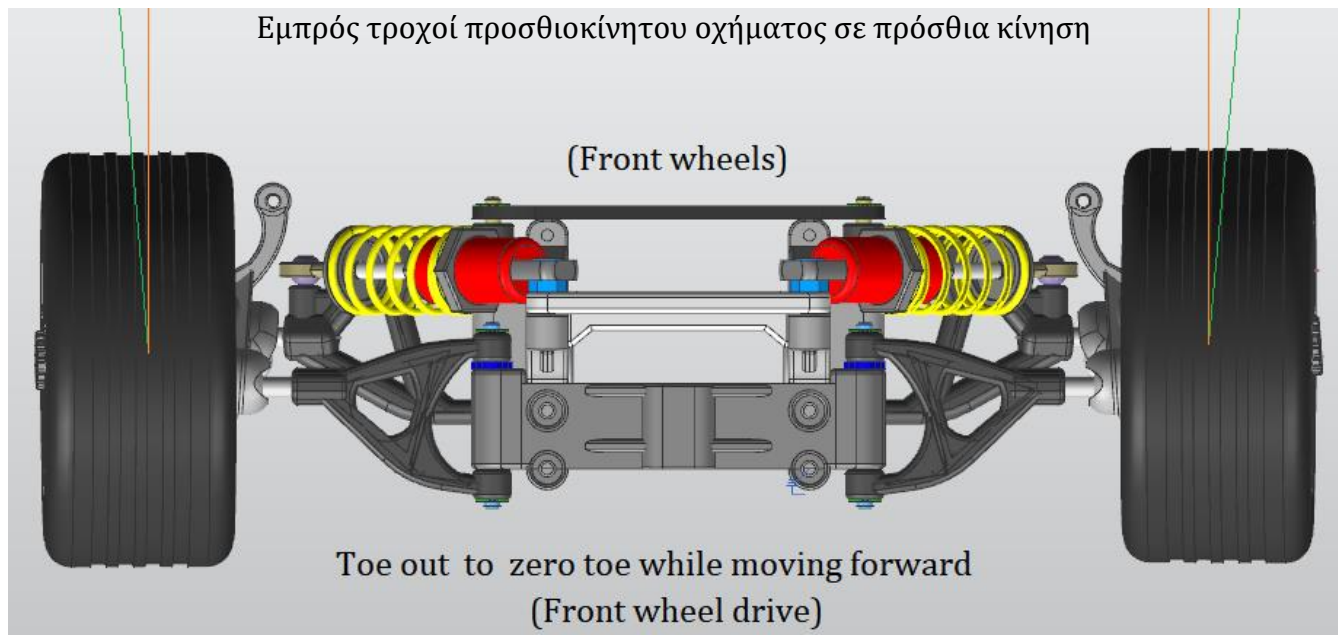
5.5 Επιρροή της γωνίας toe στην ευστάθεια του οχήματος

Η γωνία toe είναι καθοριστική για την ελεγχιμότητα του οχήματος ειδικά στις στροφές. Μεταβολή γωνίας toe εφαρμόζεται επί το πλείστον στους εμπρός τροχούς σε οχήματα παραγωγής και αγωνιστικά οχήματα ενώ εξαρτάται άμεσα από τη θέση των κινητήριων τροχών. Στα προσθιοκίνητα οχήματα (front wheel drive) εφαρμόζεται toe-out κι αυτό διότι στην επιτάχυνση του οχήματος η ροπή που προκαλείται από την τριβή των αποτυπωμάτων επαφής με το οδόστρωμα τείνουν να ευθυγραμμίσουν τους τροχούς προσφέροντας ευστάθεια στην ευθεία κίνηση και μείωση της φθοράς των ελαστικών. Παρακάτω βλέπουμε την μεταβολή της γωνίας toe των μπροστινών τροχών στην επιτάχυνση ενός προσθιοκίνητου οχήματος από ηρεμία.

Εμπρός τροχοί προσθιοκίνητου οχήματος σε ηρεμία



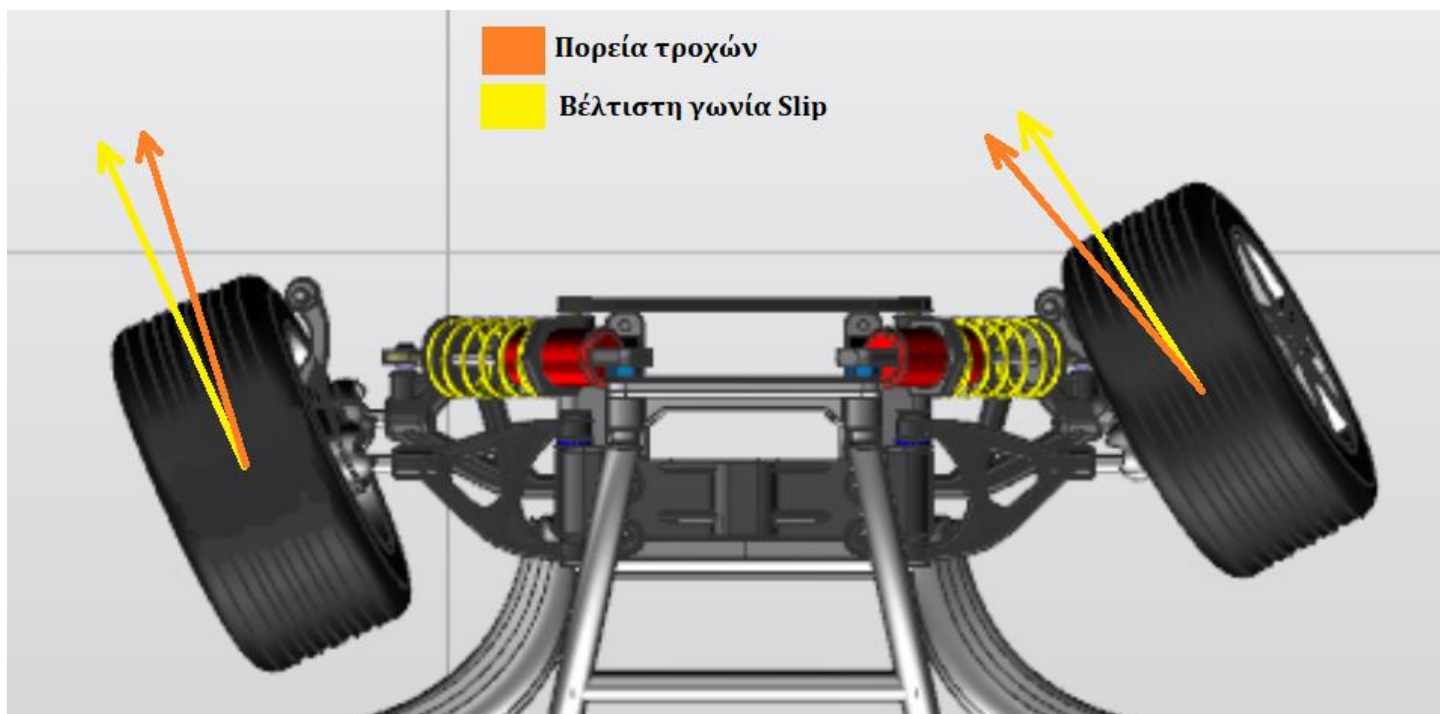
Εμπρός τροχοί προσθιοκίνητου οχήματος σε πρόσθια κίνηση



Αξίζει επίσης να επισημανθεί πως στα προσθιοκίνητα οχήματα λόγω της ανισόρροπης κατανομής βάρους που διαθέτουν (η πλειοψηφία του βάρους στα προσθιοκίνητα οχήματα βρίσκεται προς τα εμπρός εφόσον ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα ημιαξόνια και το διαφορικό βρίσκονται στο εμπρός μισό του μεταξονίου, πολλές φορές και εμπρός του άξονα των μπροστινών τροχών) τείνουν να παρουσιάζουν υποστροφή (understeer) κατά την πηδαλιούχηση. Εισάγοντας toe-out στους εμπρός τροχούς εισάγουμε κι ένα ποσοστό υπερστροφής (oversteer) των εμπρός τροχών στις στροφές (ο

εσωτερικός τροχός ο οποίος είναι ήδη στραμμένος προς τα έξω στρέφεται ακόμη περισσότερο προς την κατεύθυνση της στροφής κι ο εσωτερικός τροχός στρέφεται ελάχιστα προς την αντίθετη κατεύθυνση μειώνοντας τη ροπή τριβής λόγω θετικής γωνίας caster συμβάλλοντας στην ευκολία του οχήματος να περιστρέφεται) και ως συνέπεια εξουδετερώνεται κατά ένα ποσοστό η υποστροφή (understeer) που διαθέτουν τα προσθιοκίνητα οχήματα.

Στα οχήματα τα οποία διαθέτουν πισωκίνηση (rear wheel drive) εισάγεται γωνία toe in στους εμπρός τροχούς ώστε να αυξηθεί το ποσοστό της υποστροφής (understeer) του οχήματος στις στροφές. Αυτό επιτυγχάνεται στρέφοντας τον εσωτερικό τροχό σε αντίθετη κατεύθυνση (κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό) από την κατεύθυνση της πηδαλιούχησης με αποτέλεσμα στις στροφές ο εσωτερικός τροχός να μην ακολουθεί τον κύκλο της στροφής αλλά να παρεκτρέπεται από αυτόν μειώνοντας τη γωνία slip και συνεπώς την βέλτιστη πρόσφυση που μπορεί να προσφέρει ο τροχός. Ταυτόχρονα ο εξωτερικός τροχός στρέφεται ακόμη περισσότερο προς την κατεύθυνση της στροφής προκαλώντας αύξηση της γωνίας slip ώστε να ξεπεράσει τη βέλτιστη slip angle και ως συνέπεια να μειώσει την πρόσφυση. Η γωνία slip και η σημασία της θα αναλυθούν παρακάτω.

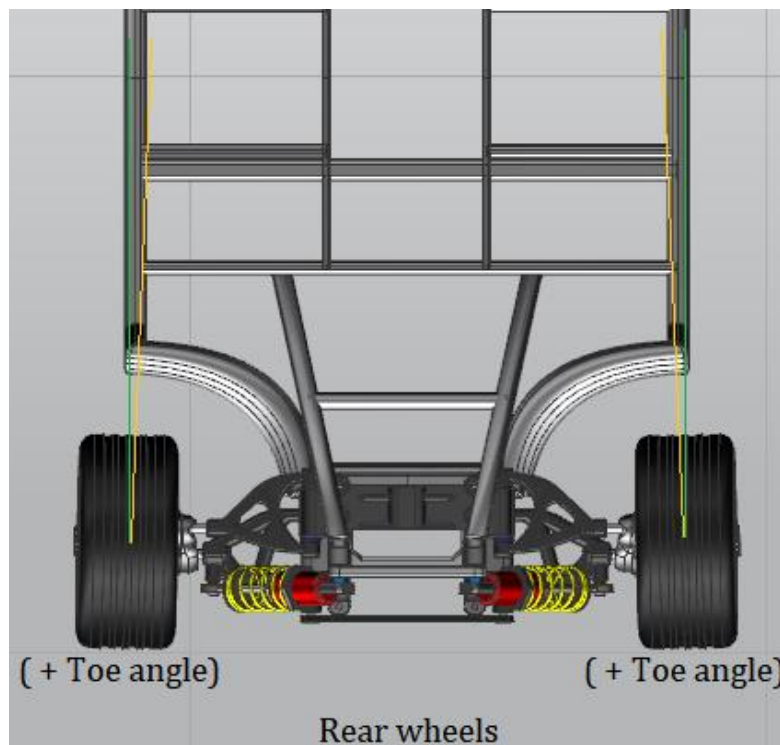


Συνεπώς η πρόσφυση που μπορεί να προσφέρει ο εξωτερικός τροχός (ο οποίος διαχειρίζεται το μεγαλύτερο φορτίο στις στροφές) θα είναι πολύ μικρότερη από αυτή που θα προσέφερε εάν οι τροχοί διέθεταν μηδενική γωνία toe.

Στους πίσω τροχούς εισάγεται μόνο θετική γωνία toe (toe in) και ιδιαίτερα σε οχήματα τα οποία διαθέτουν πίσω κίνηση για σταθερότητα ειδικά σε υψηλές ταχύτητες. Επίσης αξίζει να επισημανθεί πως εφόσον οι πίσω τροχοί δεν περιστρέφονται (μέσω πηδαλίου) και οι τροχοί (οι οποίοι δεν είναι παράλληλοι στον ευθύ άξονα αν υπάρχει γωνία toe) παράγουν ένα ποσοστό scuff δηλαδή τριβή του ελαστικού η οποία δεν αποσκοπεί σε κίνηση (πρόσφυση) αλλά αντιθέτως σε σύρσιμο του τροχού και ως συνέπεια ένα μικρό ποσοστό πέδησης. Η μικρή αυτή δύναμη πέδησης έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση τάσης στα ψαλίδια του πίσω συστήματος ανάρτησης και συνεπώς την κάμψη τους προς τα πίσω ευθυγραμμίζοντας κατά ένα μικρό ποσοστό τους πίσω τροχούς.

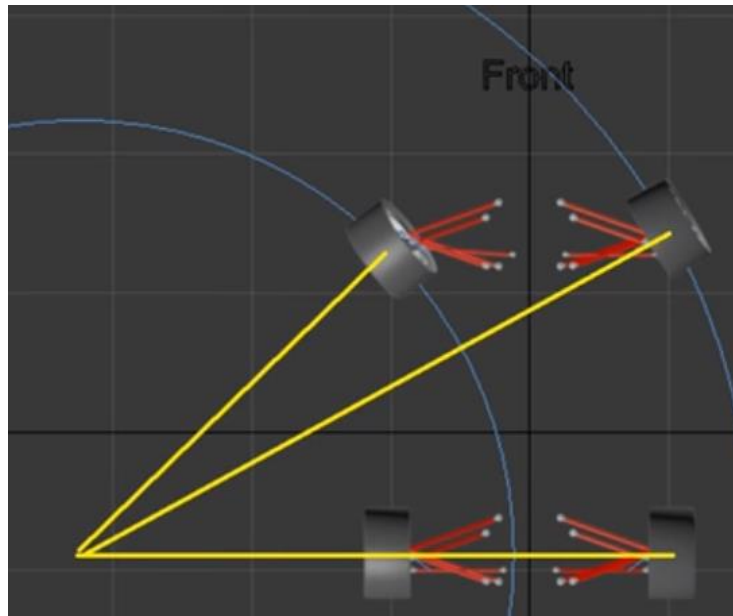
Τέλος δεν εισάγεται ποτέ από τους κατασκευαστές αρνητική γωνία toe (toe out) στους πίσω τροχούς και αυτό διότι έτσι το όχημα θα είναι πολύ ασταθές στην ευθεία κίνηση εφόσον το scuff που περιεγράφηκε πιο πάνω θα τείνει να μειώσει ακόμη περισσότερο τη γωνία toe αυξάνοντας αντιστοίχως ακόμη περισσότερο την αστάθεια του οχήματος. Επιπροσθέτως στις στροφές ο εξωτερικός πίσω τροχός ο οποίος βρίσκεται περισσότερο εξωτερικά σε σύγκριση με όλους τους υπόλοιπους θα τείνει να κατευθυνθεί ακόμη πιο εξωτερικά λόγω της κλίσης του προκαλώντας στο όχημα αυξημένη υπερστροφή (oversteer) ή ακόμη και spinning.

Οι ρυθμίσεις της γωνίας toe συνήθως είναι πολύ μικρές για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα και η υπερβολή εισαγωγή είτε θετικής είτε αρνητικής γωνίας toe έχει ως συνέπεια αυξημένη υποστροφή/υπερστροφή και σημαντική φθορά των ελαστικών.

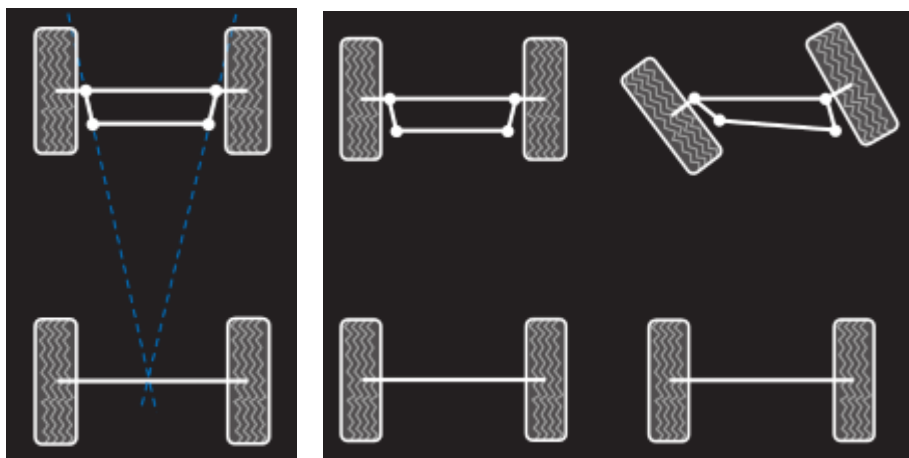


5.6 Γεωμετρία Ackermann και anti-Ackermann και η επιρροή της γωνίας slip

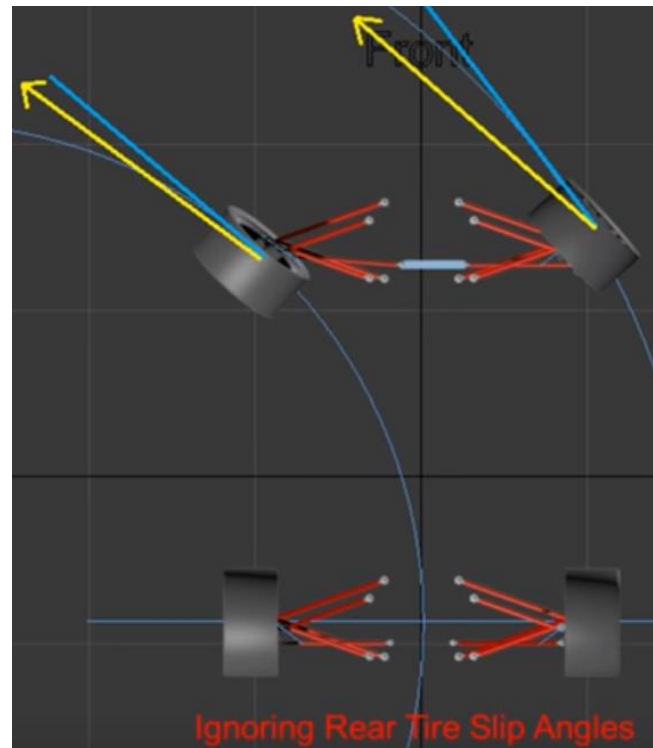
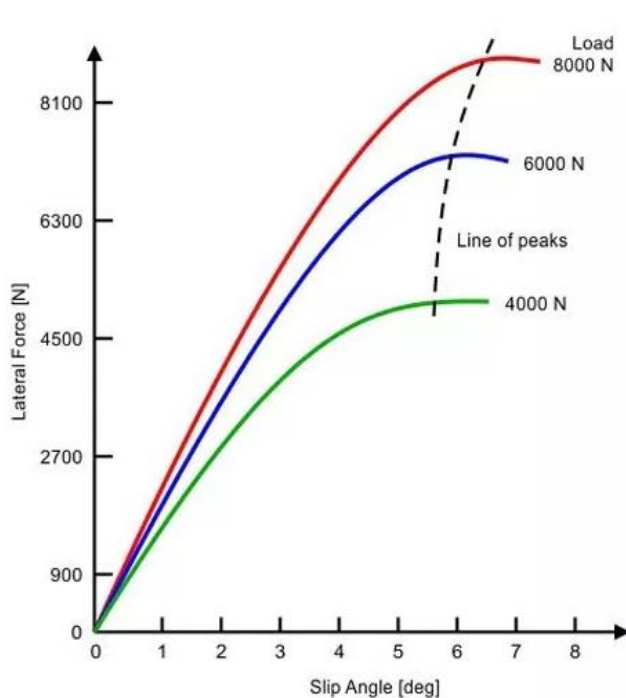
Είναι σαφές πως κατά την πηδαλιούχηση ενός τετράτροχου οχήματος οι εσωτερικοί τροχοί περιστρέφονται γύρω από την περίμετρο μικρότερου κύκλου από αυτή του κύκλου των εξωτερικών τροχών. Αυτό έχει ως συνέπεια λόγω της ανομοιομορφίας της κίνησης των παράλληλων τροχών οι τελευταίοι να ολισθαίνουν και να τρίβονται με το οδόστρωμα μειώνοντας την ασκούμενη πρόσφυση και αυξάνοντας τη φθορά του ελαστικού.



Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εισάγοντας τη γεωμετρία πηδαλιούχησης Ackermann. Για να εισάγουμε στο όχημα τη γεωμετρία αυτή μεταφέρουμε την άρθρωση ball stud πιο εσωτερικά από τις αρθρώσεις τοποθέτησης των ψαλιδιών στον τροχό. Αυτή η ρύθμιση δίνει τη δυνατότητα στον πηδαλιουχικό σύνδεσμο να περιστρέφει τον εσωτερικό τροχό (γύρω από τον άξονα kingpin του) περισσότερο από τον εξωτερικό τροχό με αποτέλεσμα οι τροχοί να εφάπτονται πάντα στους κύκλους της πορείας τους εξαλείφοντας πλήρως οποιαδήποτε ανεπιθύμητη τριβή και ολίσθηση. Συγκεκριμένα για να επιτευχθεί η ακριβής γεωμετρία Ackermann επιβάλλεται η άρθρωση ball stud με τον άξονα kingpin να σχηματίζουν ευθύγραμμα τμήματα τα οποία να τέμνονται στο κέντρο του πίσω άξονα τροχών.



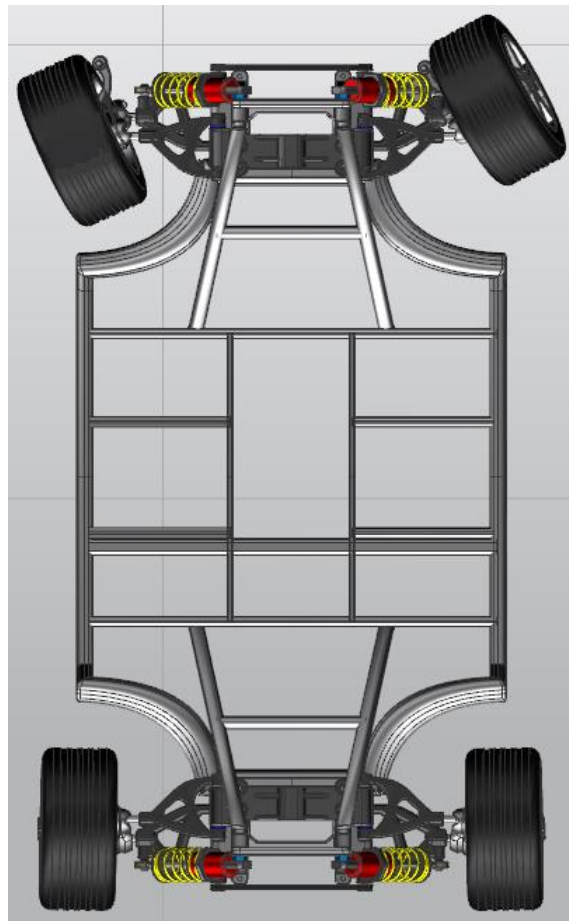
Αυτή η ρύθμιση όμως είναι ατελής εάν δεν ληφθεί υπόψιν η παραμόρφωση των ελαστικών κατά τη διάρκεια στρέψης του οχήματος που κινείται με μη μηδενική ταχύτητα. Εφόσον τα ελαστικά παραμορφώνονται στις στrofές εισάγεται ως παράμετρος στη γεωμετρία Ackermann η γωνία slip η οποία έχει άμεσο αντίκτυπο στη βέλτιστη ρύθμιση της. Όπως προαναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο το βέλτιστο είναι να υπάρχει μια μικρή γωνία slip της τάξης των 6-7 μοιρών ώστε να βελτιστοποιηθεί η πρόσφυση. Για αυτό τον λόγο οι τροχοί πρέπει να περιστρέφονται ακόμη περισσότερο στην πηδαλιούχηση ώστε να σχηματίζουν την επιθυμητή γωνία slip με την εφαπτομένη του κύκλου πορείας των τροχών. Επίσης εφόσον ο εξωτερικός τροχός καλείται να διαχειριστεί μεγαλύτερο φορτίο η βέλτιστη γωνία slip του εξωτερικού τροχού θα είναι μεγαλύτερη οπότε θα πρέπει να στραφεί ακόμη περισσότερο. Παρακάτω στη δεξιά φωτογραφία φαίνεται με μπλε βέλη η πορεία που θα έπρεπε να ακολουθήσουν οι τροχοί για να τηρήσουν τη γεωμετρία Ackermann χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η γωνία slip ενώ με κίτρινα βέλη φαίνεται η γεωμετρία αυτή έχοντας λάβει υπόψιν την παραμορφωσιμότητα των ελαστικών και συνεπώς τη slip angle. Τα κίτρινα βέλη συμβολίζουν δηλαδή την κατεύθυνση που πρέπει να έχουν οι τροχοί ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη πρόσφυση στις στrofές. Για να επιτευχθεί η «σωστή» λοιπόν γεωμετρία Ackermann τα ball stud τοποθετούνται μεν εσωτερικά αλλά όχι τόσο εσωτερικά όσο στην γεωμετρία χωρίς γωνίες slip.



Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της γεωμετρίας Ackermann είναι ότι εφόσον ο εσωτερικός τροχός είναι στραμμένος περισσότερο από τον εξωτερικό η πλευρική τριβή του εσωτερικού τροχού προκαλεί ένα μικρό ποσοστό drag και ως συνέπεια δημιουργείται ροπή στο σώμα του οχήματος στρέφοντας το προς τη φορά της στrofής γεγονός που συμβάλλει στην πηδαλιούχηση του οχήματος ειδικά στην περίπτωση των οχημάτων εκτός δρόμου (off road).

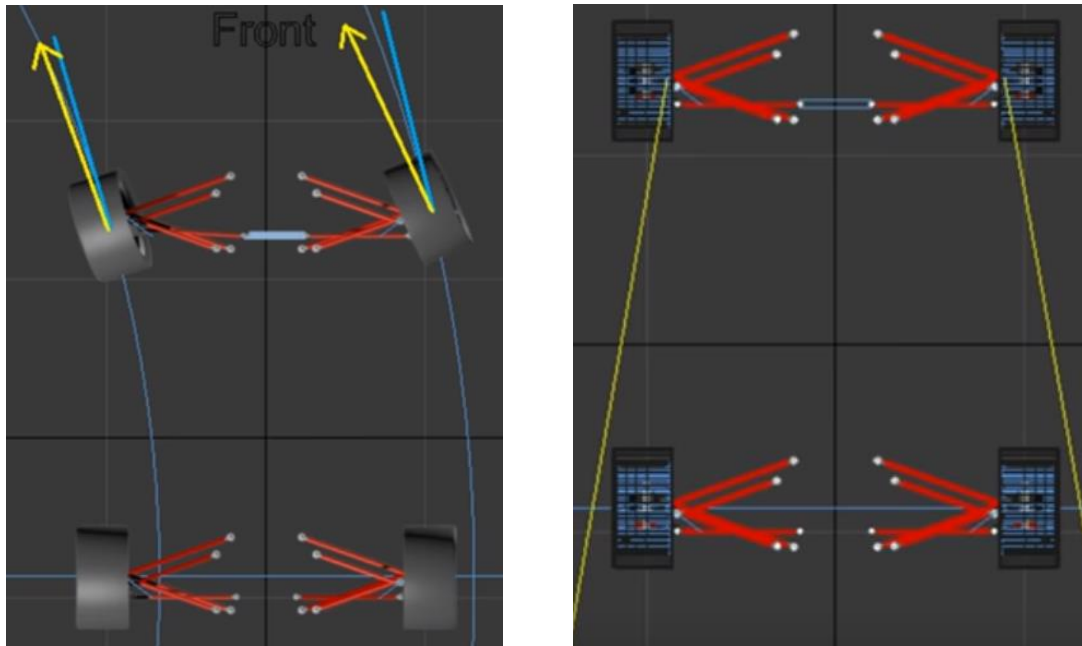
Η γεωμετρία Ackermann λειτουργεί στο βέλτιστο σε κλειστές (απότομες) κυρίως στροφές καθώς οι βέλτιστες γωνίες slip επιτυγχάνονται σε κύκλους μικρής ακτίνας. Αυτός είναι ο λόγος που η συντριπτική πλειοψηφία των επιβατικών οχημάτων που κατασκευάζονται χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη γεωμετρία καθώς προσφέρει μέγιστη πρόσφυση σε κλειστές στροφές γεγονός χρήσιμο ειδικά σε αστικό περιβάλλον. Ένα μειονέκτημα της γεωμετρίας Ackermann είναι ότι δεν προσφέρει τις βέλτιστες γωνίες slip στην περίπτωση ανοιχτής στροφής (στροφή που αποτελεί μέρος κύκλου μεγάλης ακτίνας) ειδικά εάν το όχημα ταξιδεύει με μεγάλη ταχύτητα.

Αυτό το πρόβλημα λύνει η τοποθέτηση των τροχών σε αντίθετη γεωμετρία Ackermann ή αλλιώς anti-Ackermann. Σε αυτή τη γεωμετρία κατά την πηδαλιούχηση ο εξωτερικός τροχός στρέφεται περισσότερο από τον εσωτερικό τροχό. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το κατασκευασμένο όχημα το οποίο διαθέτει γεωμετρία anti-Ackermann.



Η γεωμετρία αυτή χρησιμοποιείται επί το πλείστον σε αγώνες μηχανοκίνητου αθλητισμού και κυρίως σε πρωταθλήματα μονοθεσιών όπως formula 1, Indycar κλπ. Σε αυτού του είδους τα πρωταθλήματα οι πίστες αγώνων διαθέτουν ως επί το πλείστον μακριές και ανοιχτές στροφές. Αυτό έχει ως συνέπεια οι κύκλοι που καλύπτουν ο εσωτερικός και ο εξωτερικός τροχός αντιστοίχως να είναι εξίσου μεγάλης ακτίνας και σε συνεργασία με το γεγονός ότι ο εξωτερικός τροχός τείνει να διαχειριστεί μεγαλύτερο φορτίο λόγω των υψηλών ταχυτήτων και συνεπώς της αυξημένης μεταφοράς βάρους προς τα έξω, ο εξωτερικός τροχός θα πρέπει να περιστραφεί περισσότερο από τον εσωτερικό ώστε να επιτύχει το βέλτιστο ποσοστό slip angle και συνεπώς τη μέγιστη πρόσφυση.

Αντιθέτως με την γεωμετρία Ackermann οι άξονες που τέμνουν τα ball studs και τους άξονες kingpin θα απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο.



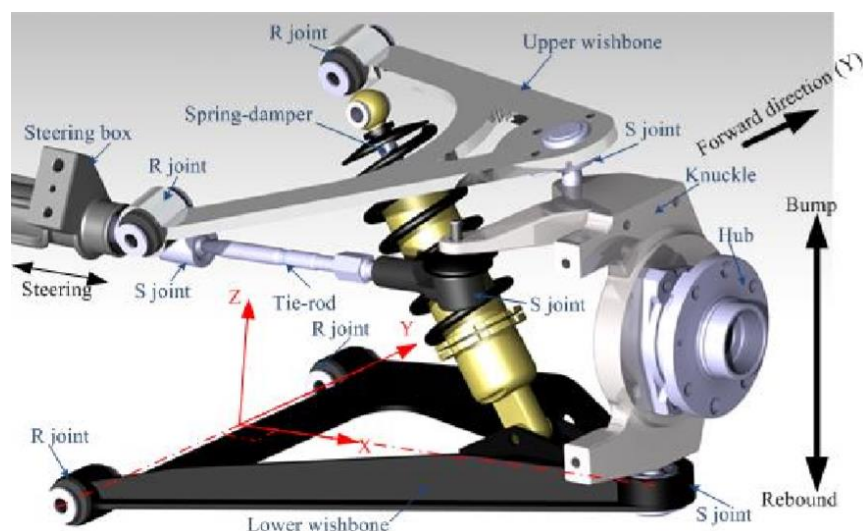
Τα μειονεκτήματα αυτής της γεωμετρίας είναι πως σε κλειστές στροφές οι γωνίες slip δεν θα είναι οι βέλτιστες και συνεπώς δε θα υπάρχει η μέγιστη πιθανή πρόσφυση ενώ ταυτόχρονα τα ελαστικά θα διαθέτουν αυξημένη φθορά εφόσον θα υπάρχει αυξημένο ποσοστό περιττής τριβής (scuff, δηλαδή πλευρική τριβή που δεν αποσκοπεί σε πρόσφυση αλλά σε αυξημένο drag). Είναι σαφές λοιπόν πως σε επιβατικά οχήματα παραγωγής δεν είναι η επιθυμητή γεωμετρία και συνεπώς δεν χρησιμοποιείται καθώς τα μειονεκτήματα που προσφέρει είναι περισσότερα από τα πλεονεκτήματα. Η γεωμετρία αυτή λοιπόν προτιμάται από κατασκευαστές αγωνιστικών οχημάτων για πρωταθλήματα μηχανοκίνητου αθλητισμού όπου τα ελαστικά αντικαθίστανται συνεχώς και οι πίστες αγώνων δικαιολογούν τη χρήση αυτής της γεωμετρίας καθώς τα οχήματα αυτά κινούνται μόνο εντός των συγκεκριμένων πιστών.

6. Μοντελοποίηση και κινηματική ανάλυση του συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού

6.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στα αρχικά κεφάλαια ο σκοπός ενός συστήματος ανάρτησης είναι η μεγιστοποίηση του αποτυπώματος επαφής του ελαστικού καθώς και η εξασφάλιση της συνεχούς επαφής του τροχού με το οδόστρωμα, τα οποία ως συνέπεια έχουν τη βέλτιστη οδηγική συμπεριφορά και ελεγχσιμότητα του οχήματος. Είναι απαραίτητο λοιπόν να γνωρίζουμε την κινηματική συμπεριφορά του συστήματος ανάρτησης καθώς είναι υπεύθυνο για τη μεγιστοποίηση και σταθερότητα της δύναμης πρόσφυσης. Ορίζουμε ως κινηματικά χαρακτηριστικά της ανάρτησης ως τη μεταβολή των θέσεων και των προσανατολισμών συγκεκριμένων σημείων του μοντέλου ανάρτησης που προκαλούνται λόγω της αναπήδησης του τροχού. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζονται από συγκεκριμένες παραμέτρους οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τον σχεδιασμό του μοντέλου. Αναλυτικά αυτές οι παραμέτροι είναι η γωνία camber, η γωνία caster, ο άξονας Kingpin, η γωνία KPI καθώς και η γωνία toe. Επίσης οι συντεταγμένες των σταθερών σημείων καθώς και τα μήκη των συνδέσμων αποτελούν τις σχεδιαστικές παραμέτρους του μοντέλου.

Για να κατασκευαστεί αρχικά το μοντέλο πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους ενός συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού καθώς και τα είδη αρθρώσεων που παρεμβάλλονται (R: περιστροφική, S: σφαιρική, P: πρισματική). Κάθε ψαλίδι αποτελείται από δύο περιστροφικές (R) αρθρώσεις οι οποίες συνδέουν το ψαλίδι με το σασί καθώς και μια σφαιρική (S) άρθρωση η οποία συνδέει το ψαλίδι με τη βάση τοποθέτησης του τροχού. Εφόσον το μοντέλο που πρόκειται να κατασκευαστεί παρακάτω είναι μοντέλο μπροστινής ανάρτησης πρέπει να συμπεριλάβουμε τον άξονα πηδαλιούχησης ο οποίος συνδέεται με το σασί αλλά και με το ball stud μέσω σφαιρικών (S) αρθρώσεων. Η μοντελοποίηση του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί εάν ληφθεί υπόψιν πως σχηματικά η ανάρτηση αποτελείται από δύο μηχανισμούς, έναν μηχανισμό τεσσάρων και ένα μηχανισμό πέντε ράβδων που εφάπτονται μεταξύ τους στον άξονα Kingpin. Καθώς ο κινηματικός σχεδιασμός του συστήματος διαθέτει υψηλό αριθμό στοιχείων και πολυπλοκότητας επιτυγχάνεται μεγαλύτερος έλεγχος στην κινηματική συμπεριφοράς της ανάρτησης. Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση της εμπρός δεξιά ανάρτησης διπλού ψαλιδιού.



Βασικοί Όροι μοντέλου

ξ : γωνία yaw

φ : γωνία anti-dive (λόγω κλίσης του άνω ψαλιδιού ώστε να αποφευχθεί καθίζηση του εμπρός μέρους του οχήματος)

θ : γωνία μεταξύ του άξονα O-X και του κάτω ψαλιδιού (οξεία γωνία)

χ : γωνιακή μετατόπιση του άνω ψαλιδιού (οξεία γωνία)

f : απόσταση της άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα Y

g : απόσταση της άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα X

p : απόσταση της άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα Z

l_1 : μάκρος κάτω ψαλιδιού (OA)

e_1 : διάνυσμα κάτω ψαλιδιού

l_u : μάκρος άνω ψαλιδιού (CB)

e_u : διάνυσμα άνω ψαλιδιού

l_k : μάκρος ράβδου που συνδέει τις αρθρώσεις των δύο ψαλιδιών (AB)

s_a : μήκος βραχίονα πηδαλιούχησης (ED)

e_a : διάνυσμα βραχίονα πηδαλιούχησης

t_r : μήκος συνδέσμου ελέγχου (FE)

l_{hub} : μήκος συνδέσμου κέντρου (GW)

e_{hub} : διάνυσμα συνδέσμου κέντρου

l_{hubt} : απόσταση κέντρου l_k από κέντρο τροχού (HW)

e_{hubt} : διάνυσμα HW

c_o : μετατόπιση (offset) caster ως προς τον άξονα Y (HG)

l_h : απόσταση κάτω άρθρωσης από το μέσο της ράβδου AB (AH)

l_a : απόσταση κάτω άρθρωσης από το σημείο τοποθέτησης του βραχίονα πηδαλιούχησης (AD)

e_k : διάνυσμα ράβδου που συνδέει τις αρθρώσεις των ψαλιδιών AB

R_w : ακτίνα τροχού, απόσταση κέντρου τροχού από το αποτύπωμα ελαστικού (WJ)

e_u : διάνυσμα ακτίνας τροχού

Το σασί θεωρείται σταθερός (fixed) στο μηχανισμό του συστήματος. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως ο σύνδεσμος F στην πραγματικότητα αποτελεί σύνδεσμο universal όμως για χάρη απλότητας αντικαθίσταται από σφαιρικό σύνδεσμο. Επίσης θεωρούμε την άρθρωση F σταθερή (fixed).

6.3 Κινηματική ανάλυση του μοντέλου

Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί τρόποι κινηματικής ανάλυσης ενός πολύπλοκου μηχανισμού. Στην προκειμένη περίπτωση γίνεται χρήση του τρόπου κινηματικής ανάλυσης με χρήση του λογισμικού τρισδιάστατης σχεδίασης σε H/Y (CAD) NX 12.0 της Siemens μέσω του οποίου θα πραγματοποιηθεί η κατασκευή του κινηματικού μοντέλου, ο ορισμός των παραμέτρων και θα μετρηθούν οι γωνίες ανάρτησης για κάθε μετατόπιση ορισμένων παραμέτρων χρησιμοποιώντας αξιωματικό σχεδιασμό (με χρήση πινάκων) καθώς και τη μέθοδο σύνθεσης δύο σημείων.

Για την πραγματοποίηση της κινηματικής ανάλυσης του συστήματος διπλού ψαλιδιού γίνεται χρήση ανεξάρτητων βρόγχων οι οποίοι εφάπτονται σε κοινούς άξονες. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο μηχανισμός αποτελείται από δύο κινηματικές αλυσίδες RSSR και SSP οι οποίες σχηματίζονται από τους βρόγχους OABCO και OADEFO αντιστοίχως.

6.3.1 Βρόγχος OABCO

Αρχικά για να ορίσουμε τις διανυσματικές εξισώσεις αντιστοιχίζουμε τον άξονα X στο i, τον άξονα Y στο j, και τον άξονα Z στο k.

Η διανυσματική εξίσωση του βρόγχου είναι $|AB|=|OB-OA|$ όπου

$$|OA| = l_1 \cdot \cos\theta \cdot i + l_1 \cdot \sin\theta \cdot k$$

$$|OB| = (g + l_u \cdot \cos\chi \cdot \cos\xi + l_u \cdot \sin\chi \cdot \sin\varphi \cdot \sin\xi) \cdot i + (f + l_u \cdot \cos\chi \cdot \sin\xi - l_u \cdot \sin\chi \cdot \sin\varphi \cdot \cos\xi) \cdot j + (p + l_u \cdot \sin\chi \cdot \cos\varphi) \cdot k$$

Το διάνυσμα θέσης της ράβδου που συνδέει τις δύο αρθρώσεις των ψαλιδιών ορίζεται ως $AB = l_k \cdot e_k$

Οπού

$$e_k = \frac{1}{l_k} \begin{bmatrix} g + l_u \cdot \cos\chi \cdot \cos\xi + l_u \cdot \sin\chi \cdot \sin\varphi \cdot \sin\xi - l_1 \cdot \cos\theta \\ f + l_u \cdot \cos\chi \cdot \sin\xi - l_u \cdot \sin\chi \cdot \sin\varphi \cdot \cos\xi \\ p + l_u \cdot \sin\chi \cdot \cos\varphi - l_1 \cdot \sin\theta \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα του κάτω ψαλιδιού ορίζεται ως

$$e_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ 0 \\ \sin\theta \end{bmatrix}$$

6.3.2 Βρόγχος OADEFO

Για να ορίσουμε τα διανύσματα του βρόγχου OADEFO χρειάζεται να έχουμε ως δεδομένο τις συντεταγμένες της άρθρωσης E και της σταθερής (fixed) άρθρωσης F.

Ορίζουμε το μήκος συνδέσμου ελέγχου ως

$$tr = |\overrightarrow{EF}|$$

και το μήκος βραχίονα πηδαλιούχησης ως

$$s_a = |\overrightarrow{EA} * \overrightarrow{EB}| / |\overrightarrow{BA}|$$

6.3.3 Περιορισμοί για την εύρεση των θέσεων των αρθρώσεων

Για τον ορισμό των περιορισμών θα συγκεντρωθούμε στον βρόγχο OADEFO εφόσον επηρεάζεται άμεσα από τις διακυμάνσεις της γωνίας θ .

- 1^{ος} περιορισμός

Εφόσον η άρθρωση F είναι σταθερό σημείο (fixed) για κάθε θέση της άρθρωσης E το μήκος συνδέσμου ελέγχου t_r παραμένει σταθερό. Από τον τύπο απόστασης σημείων στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων έχουμε:

$$t_{ri}^2 = (E_{xi} - F_{x0})^2 + (E_{yi} - F_{y0})^2 + (E_{zi} - F_{z0})^2 \quad \text{για κάθε θέση } i \in Z$$

- 2^{ος} περιορισμός

Για κάθε μετατόπιση του μηχανισμού το μήκος βραχίονα πηδαλιούχησης s_a παραμένει σταθερό. Από τον τύπο απόστασης σημείων στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων έχουμε:

$$s_{ai}^2 = (D_{xi} - E_{xi})^2 + (D_{yi} - E_{yi})^2 + (D_{zi} - E_{zi})^2 \quad \text{για κάθε θέση } i \in Z$$

- 3^{ος} περιορισμός

Για κάθε μετατόπιση του μηχανισμού ο βραχίονας πηδαλιούχησης θα παραμένει κάθετος στον άξονα (ράβδο) που συνδέει τις δύο αρθρώσεις των ψαλιδιών. Οπότε το εσωτερικό γινόμενο των κάθετων διανυσμάτων των δύο αυτών αξόνων θα ισούται με μηδέν ($\overrightarrow{ED} * \overrightarrow{AD} = 0$) και συγκεκριμένα:

$$(l_1 * \overrightarrow{e1} + l_a * \overrightarrow{ek} - (E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k})) * (l_a * \overrightarrow{ek}) = 0$$

Κάνοντας τις πράξεις του τρίτου περιορισμού καταλήγουμε στον απλοποιημένο τύπο

$$c1 * E_{xi} + c2 * E_{yi} + c3 * E_{zi} + c4 = 0 \quad \text{για κάθε θέση } i \in Z$$

με

$$c1 = -l_a * \overrightarrow{ek}_x$$

$$c2 = -l_a * \overrightarrow{ek}_y$$

$$c3 = -l_a * \overrightarrow{ek}_z$$

$$c4 = l_a^2 + l_1 * l_a * (\overrightarrow{ek}_x * \overrightarrow{e1}_x + \overrightarrow{ek}_y * \overrightarrow{e1}_y + \overrightarrow{ek}_z * \overrightarrow{e1}_z)$$

Οπού

$$\overrightarrow{OD} = l_1 * \overrightarrow{e1} + l_a * \overrightarrow{ek}$$

$$\overrightarrow{OE} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k}$$

$$l_a = \sqrt{|\overrightarrow{AE}|^2 - s a^2} \quad \text{από πυθαγόρειο θεώρημα στο τρίγωνο AED}$$

Μέσω των περιορισμών καταλήγουμε σε τρεις εξισώσεις με τρεις αγνώστους. Οι άγνωστοι παράμετροι είναι οι συντεταγμένες της άρθρωσης E του βραχίονα πηδαλιούχησης E_x , E_y , E_z για κάθε θέση $i \in Z$. Έτσι με δεδομένη μόνο τη γωνία θ δηλαδή τη γωνία μεταξύ του άξονα O-X και του κάτω ψαλιδιού μπορούμε να βρούμε τις προαναφερθείσες συντεταγμένες καθώς και τις συντεταγμένες όλων των αρθρώσεων.

6.3.4 Μοντελοποίηση για την εύρεση των γωνιών *camber*, *caster*, *KPI* και *toe* σε σχέση με τη μετατόπιση του τροχού

Εφόσον προηγουμένως έχουμε θέσει ως μεταβλητή εισαγωγής πληροφοριών (input variable, δηλαδή τη μεταβλητή η οποία θα καθορίσει τη μεταβολή όλων των υπόλοιπων μεταβλητών) τη γωνία θ για να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τις γωνίες *caster*, *kingpin* και *toe* η γωνία θ δεν αρκεί. Χρειαζόμαστε επίσης τη μετατόπιση του τροχού (wheel travel) οπότε είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε όλα τα διανύσματα ανάμεσα από το σημείο επαφής του τροχού μέχρι το κέντρο του τροχού. Συγκεκριμένα πρέπει να

γνωρίζουμε τα διανύσματα e_{hub} , e_{tr} καθώς και τη μετατόπιση c_o (offset) του άξονα της γωνίας caster ως προς τον άξονα Y.

Αξίζει να σημειωθεί πως η στατική θέση του συστήματος δηλαδή η θέση στην οποία και η μετατόπιση του τροχού και η γωνία πηδαλιούχησης είναι ίσα με μηδέν συμβολίζεται με δείκτη "0". Στη στατική θέση ο άξονας περιστροφής του κέντρου του τροχού είναι πάνω στο επίπεδο των αξόνων X και Z. Επίσης ορίζουμε ως ε_0 τη στατική (θετική) γωνία camber των τροχών.

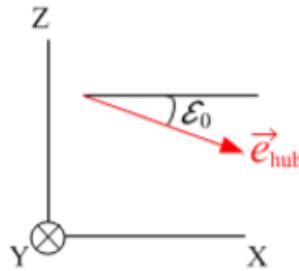
Διάνυσμα συνδέσμου κέντρου στη στατική θέση:

$$\overrightarrow{ehub0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 \\ 0 \\ -\sin\varepsilon_0 \end{bmatrix}$$

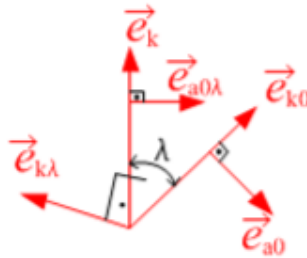
Θέση του κέντρου του τροχού στη στατική θέση:

$$\overrightarrow{lhubt0} = c_o * \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} + l_{hub} * \overrightarrow{ehub0}$$

Σχηματική απεικόνιση της στατικής γωνίας camber ε_0 :



Σχηματική απεικόνιση του άξονα περιστροφής:



οπού

\vec{e}_{k0} : διάνυσμα ράβδου που συνδέει τις αρθρώσεις των ψαλιδιών AB στη στατική θέση

\vec{e}_{a0} : διάνυσμα βραχίονα πηδαλιούχησης στη στατική θέση το οποίο είναι πάντα κάθετο στο \vec{e}_{k0}

\vec{e}_k : διάνυσμα ράβδου που συνδέει τις αρθρώσεις των ψαλιδιών AB στην τρέχουσα θέση

$\vec{e}_{a0\lambda}$: διάνυσμα βραχίονα πηδαλιούχησης στην τρέχουσα θέση το οποίο είναι πάντα κάθετο στο \vec{e}_k

$\vec{e}_{k\lambda}$: άξονας περιστροφής ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο που σχηματίζουν τα διανύσματα \vec{e}_k και \vec{e}_{k0}

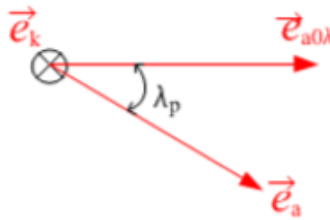
και προκύπτει από το γινόμενο των διανυσμάτων δια το εσωτερικό τους γινόμενο:

$$\vec{e}_{\kappa\lambda} = (\vec{e}_{\kappa 0} * \vec{e}_{\kappa}) / |\vec{e}_{\kappa 0} * \vec{e}_{\kappa}|$$

λ: Η γωνία περιστροφής του διανύσματος \vec{e}_{κ} που συνδέει τις αρθρώσεις των ψαλιδιών στην τρέχουσα θέση για μια δεδομένη γωνία θ και υπολογίζεται από το εσωτερικό γινόμενο των δύο επιπέδων

$$\lambda = \sin^{-1}[(\vec{e}_{\kappa 0} * \vec{e}_{\kappa}) * \vec{e}_{\kappa\lambda}]$$

Σχηματική απεικόνιση του άξονα περιστροφής (με το διάνυσμα \vec{e}_{κ} να έχει κατεύθυνση προς τα μέσα)



Η γωνία περιστροφής λ_p του βραχίονα πηδαλιούχησης γύρω από το διάνυσμα \vec{e}_{κ} ευρίσκεται ως εξής από το εσωτερικό γινόμενο των δύο επιπέδων ως εξής:

$$\lambda_p = \sin^{-1}[(\vec{e}_{a0\lambda} * \vec{e}_a) * \vec{e}_{\kappa}]$$

Η τρέχουσα θέση του διανύσματος \vec{e}_{hub} από την αρχική του θέση (στατική θέση) \vec{e}_{hub0} έχοντας ως δεδομένο τις γωνίες λ και λ_p (δύο περιστροφές γύρω από διαφορετικούς άξονες) ως εξής:

$$\vec{e}_{hub} = R(\vec{e}_{\kappa}, \lambda_p) * R(\vec{e}_{\kappa\lambda}, \lambda) * \vec{e}_{hub0}$$

Η τρέχουσα θέση του κέντρου του τροχού από την στατική του θέση έχοντας ως δεδομένο τις γωνίες λ και λ_p υπολογίζεται ως εξής:

$$\vec{e}_{hubt} = R(\vec{e}_{\kappa}, \lambda_p) * R(\vec{e}_{\kappa\lambda}, \lambda) * \vec{e}_{hub0}$$

όπου R συμβολίζει την περιστροφή των διανυσμάτων μεταξύ δυο επιπέδων

Έτσι λοιπόν η απόσταση \vec{l}_{hubt} του κέντρου της ράβδου l_k που συνδέει τις δύο αρθρώσεις από το κέντρο του τροχού υπολογίζεται με τη βοήθεια του υπολογισμένου διανύσματος \vec{e}_{hubt} ως εξής:

$$\vec{l}_{hubt} = \vec{e}_{hubt} * l_{hubt}$$

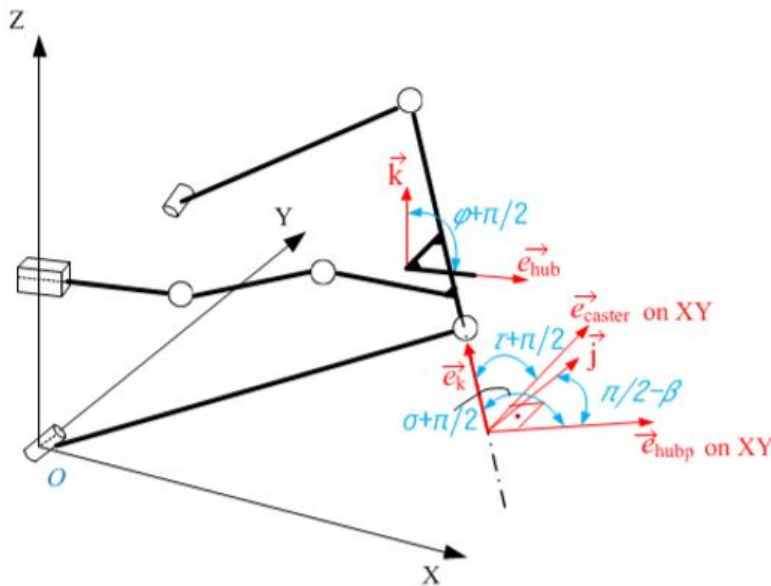
Για να υπολογιστεί το διάνυσμα ακτίνας τροχού \vec{e}_{tr} ορίζουμε ως επίπεδο υπολογισμών το επίπεδο που σχηματίζεται από τους άξονες X και Z.

Το διάνυσμα εκφράζεται ως εξής:

$$\vec{e}_{tr} = \begin{bmatrix} t_{rx} \\ 0 \\ t_{rz} \end{bmatrix}$$

Οπού t_{rx} η μετακίνηση του σημείου J (το τέλος του διανύσματος \vec{e}_{tr}) στον άξονα X και ισούται με $\sin\varphi$ με φ η μεταβολή της γωνίας camber και t_{rz} η μετακίνηση του σημείου J στον άξονα Z και ισούται με $\cos\varphi$.

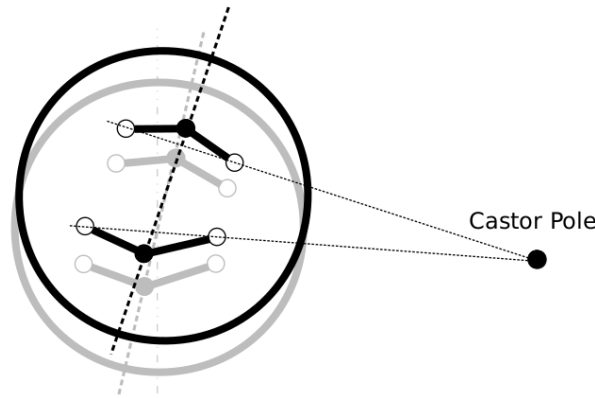
Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου για τον υπολογισμό των γωνιών camber, caster, KPI και toe



Η γωνία camber (γωνία φ) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τη γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα συνδέσμου \vec{e}_{hub} με τον άξονα Z (μεταφράζεται στον τύπο ως \vec{k}).

$$\hat{\varphi} = \cos^{-1}(\vec{e}_{hub} * \vec{k}) - \pi/2$$

Η γωνία caster (γωνία τ) μεταβάλλεται κατά την μετατόπιση των τροχών όπως στο παρακάτω σχήμα



Για να υπολογιστεί λαμβάνουμε υπόψιν το διάνυσμα \vec{e}_k της ράβδου που συνδέει τις δύο αρθρώσεις (άξονας kingpin) και το διάνυσμα \vec{e}_{caster} το οποίο είναι κάθετο στο διάνυσμα \vec{e}_{hubpro} που σχηματίζει η προβολή του διανύσματος \vec{e}_{hub} ως προς το επίπεδο των αξόνων X και Y.

$$\hat{\tau} = \cos^{-1}(\vec{e}_k * \vec{e}_{caster}) - \pi/2$$

Η γωνία toe (γωνία β) των τροχών υπολογίζεται από τη γωνία που σχηματίζει η προβολή του διανύσματος \vec{e}_{hub} στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες X και Y με τον άξονα Y. Όπως έχει αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαια θετικές τιμές γωνίας toe σημαίνει πως οι τροχοί θα στραφούν προς τα μέσα (toe in) ενώ αρνητικές τιμές σημαίνει πως θα στραφούν προς τα έξω (toe out). Η γωνία toe υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta = \pi/2 - \cos^{-1}(\vec{e}_{hubpro} * \vec{j})$$

6.3.5 Κατασκευή του κινηματικού μοντέλου στο NX 12.0

Για την κατασκευή του κινηματικού μοντέλου στο λογισμικό NX 12.0 απαιτείται πρώτα ο καθορισμός των αρχικών χαρακτηριστικών του εικονικού συστήματος ανάρτησης. Είναι δηλαδή απαραίτητο να ορίσουμε τις αρχικές διαστάσεις και τις στατικές γωνίες του συστήματος ώστε το τελευταίο να μπορεί να παρουσιαστεί στο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων του λογισμικού.

6.3.5.1 Καθορισμός αρχικών διαστάσεων του συστήματος ανάρτησης

Οι μετρήσεις των γωνιών θα πραγματοποιηθούν σύμφωνα με τις αρχικές διαστάσεις που θα τεθούν. Για το σύστημα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού που εξετάζουμε ορίζουμε:

Μάκρος κάτω ψαλιδιού $l_1 = 330 \text{ mm}$

Μάκρος άνω ψαλιδιού $l_u = 260 \text{ mm}$

Μάκρος ράβδου που συνδέει τις δύο αρθρώσεις των ψαλιδιών $l_k = 240 \text{ mm}$

Μάκρος άξονα πηδαλιούχησης (steering rack) $l_{sr} = 200 \text{ mm}$

Απόσταση της άνω άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα Z $p = 210 \text{ mm}$

Απόσταση της άνω άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα X $g = 32 \text{ mm}$

Απόσταση της άνω άρθρωσης του άνω ψαλιδιού που τοποθετείται στο σασί από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα Y $f = -12 \text{ mm}$

Απόσταση της κάτω άρθρωσης (κάτω ψαλιδιού) από το μέσο της ράβδου l_k $l_h = 120 \text{ mm}$

Μετατόπιση (offset) του άξονα kingpin (μετατόπιση caster) ως προς τον άξονα Y $c_o = 0 \text{ mm}$ (Ο άξονας kingpin τέμνει το κέντρο του τροχού)

Μήκος συνδέσμου κέντρου $l_{hub} = 60 \text{ mm}$

Στατική θέση άρθρωσης E του βραχίονα πηδαλιούχησης στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

$$E_0 = \begin{bmatrix} 260 \\ -120 \\ 173 \end{bmatrix}$$

Στατική θέση άρθρωσης F του συνδέσμου ελέγχου στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

$$F_0 = \begin{bmatrix} 16 \\ -59 \\ 150 \end{bmatrix}$$

Γωνία anti-dive (λόγω κλίσης του άνω ψαλιδιού ώστε να αποφευχθεί η καθίζηση του εμπρός μέρους του οχήματος) $\varphi = 9^\circ$ (με θετική την αντιωρολογιακή φορά)

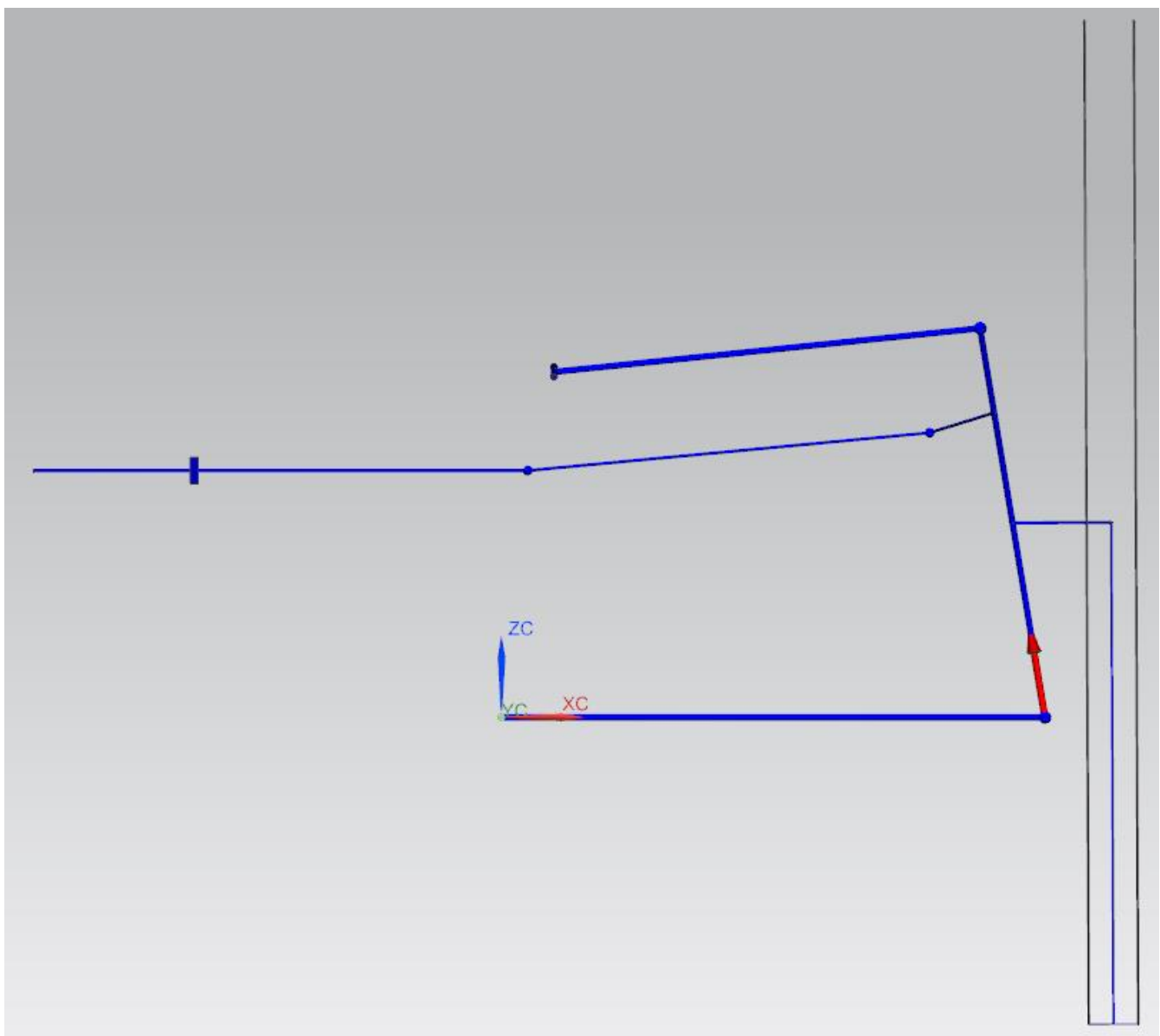
Γωνία yaw $\xi = 0^\circ$ (μηδενική γωνία yaw άρα όχημα ακίνητο ή σε ευθεία κίνηση)

Στατική γωνία camber $\epsilon_0 = -0,25^\circ$

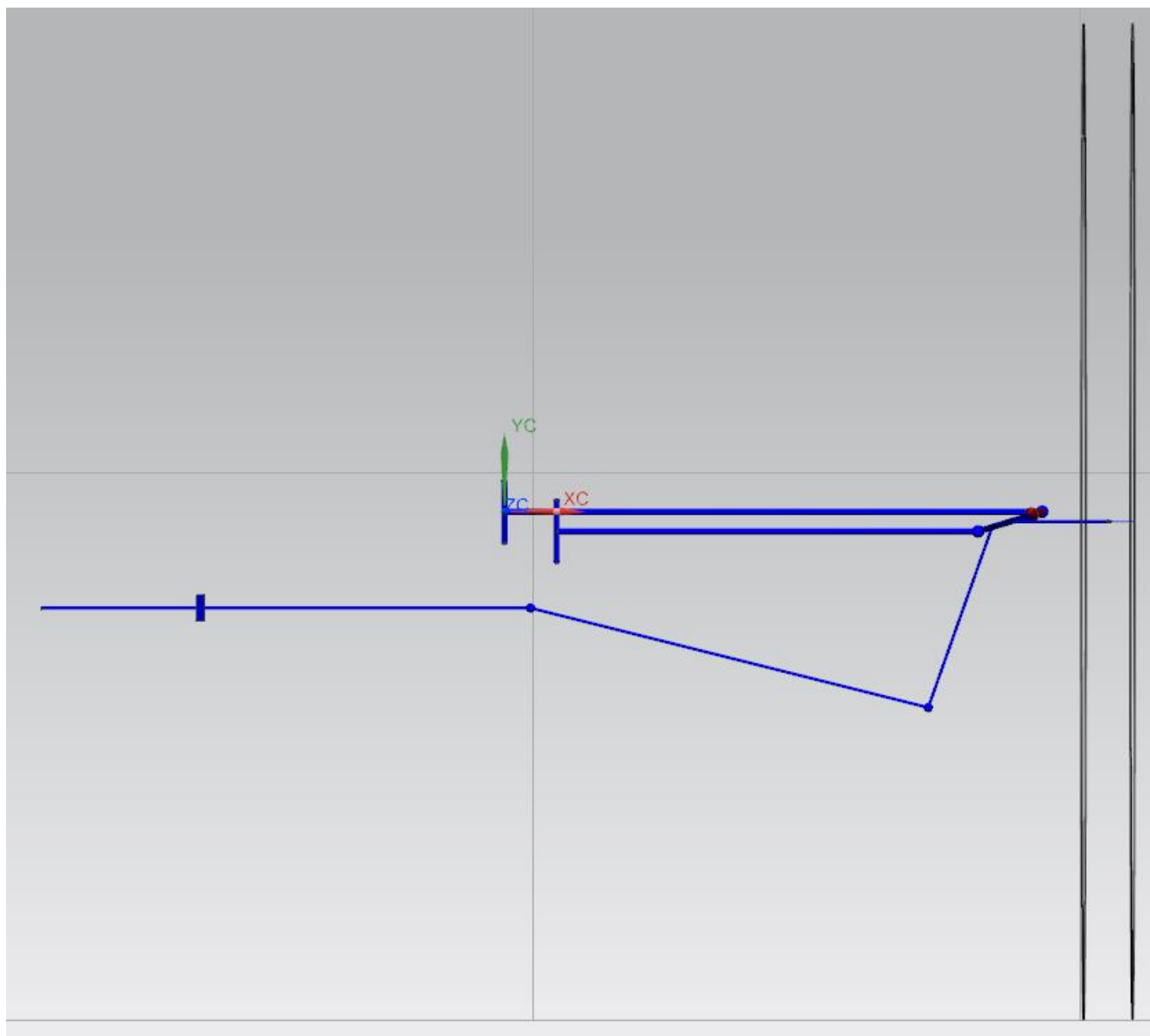
Ακτίνα τροχού (από το κέντρο μέχρι το σημείο επαφής του τροχού με το οδόστρωμα) $R_w = 305 \text{ mm}$

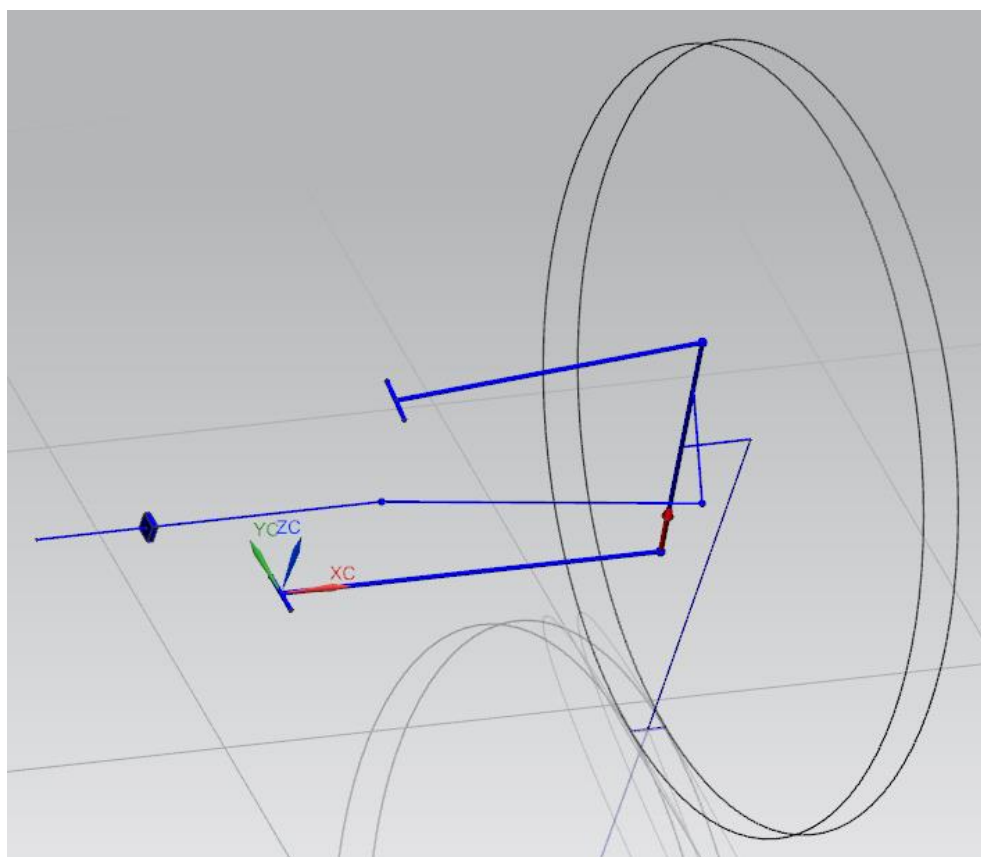
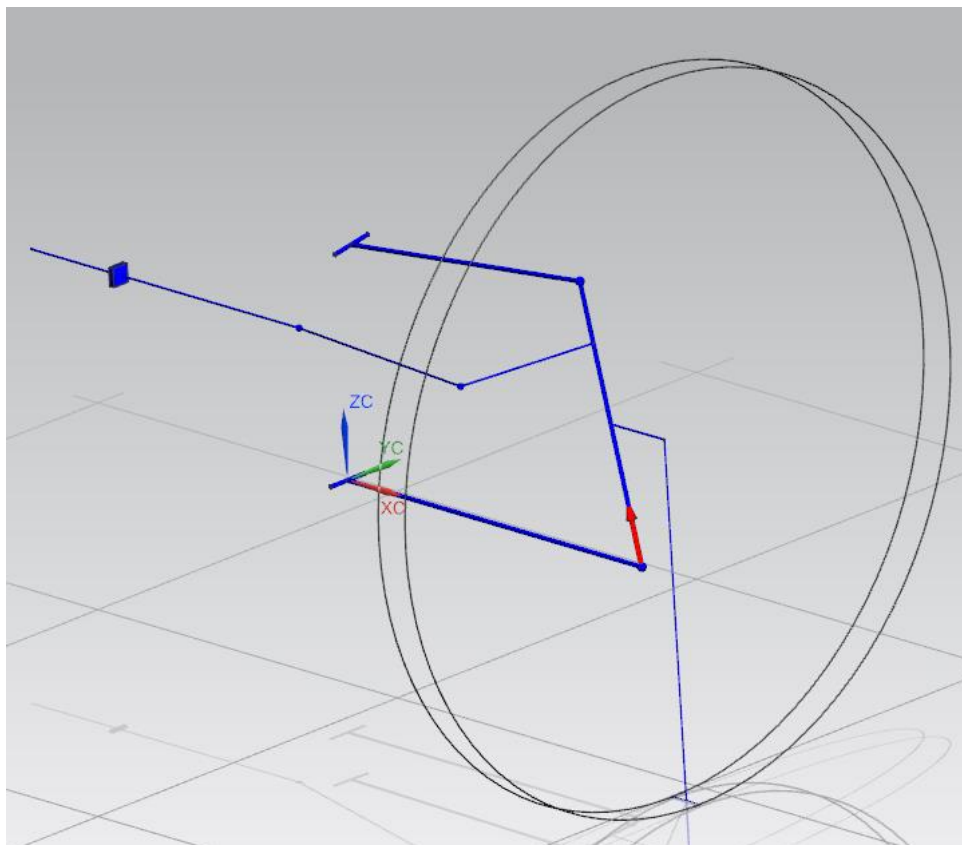
Το κινηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε σύμφωνα με αυτά τα αρχικά χαρακτηριστικά φαίνεται παρακάτω:

Επίπεδο αξόνων Z-X



Επίπεδο αξόνων X-Y





6.3.5.2 Εισαγωγή διανυσμάτων

Έπειτα είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν τα διανύσματα που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων γωνιών ανάρτησης. Παρακάτω φαίνονται οι χρωματισμοί των διανυσμάτων στο κινηματικό μοντέλο:

Διάνυσμα άνω ψαλιδιού \mathbf{e}_u



Διάνυσμα κάτω ψαλιδιού \mathbf{e}_l



Διάνυσμα ράβδου που συνδέει τις αρθρώσεις των δύο ψαλιδιών \mathbf{e}_k



Διάνυσμα βραχίονα πηδαλιούχησης \mathbf{e}_a



Διάνυσμα συνδέσμου κέντρου \mathbf{e}_{hub}

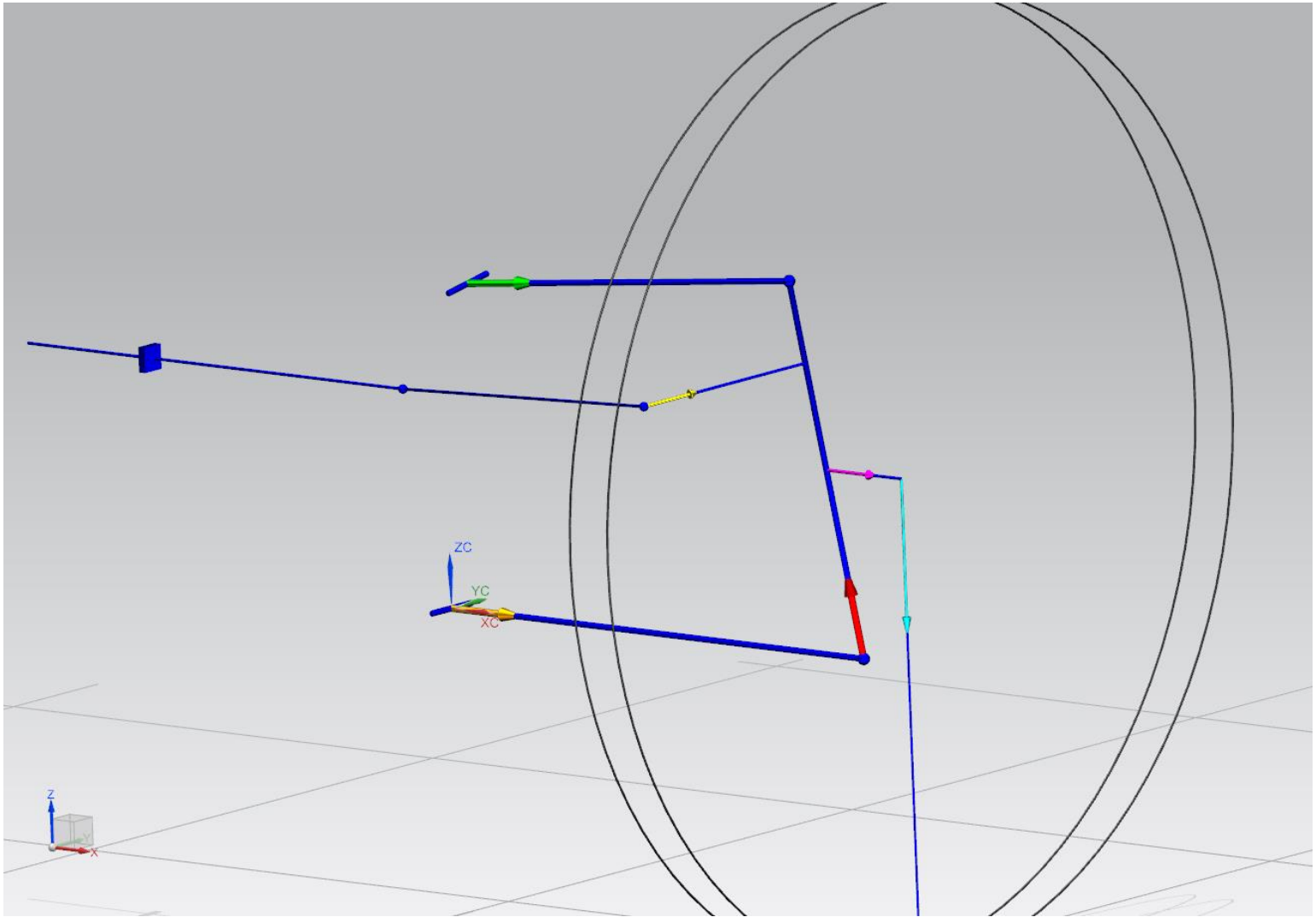


Διάνυσμα ακτίνας τροχού \mathbf{e}_{tr}



Αξίζει να σημειωθεί πως τα διανύσματα \mathbf{e}_{tr} και \mathbf{e}_{hub} είναι πάντα κάθετα μεταξύ τους.

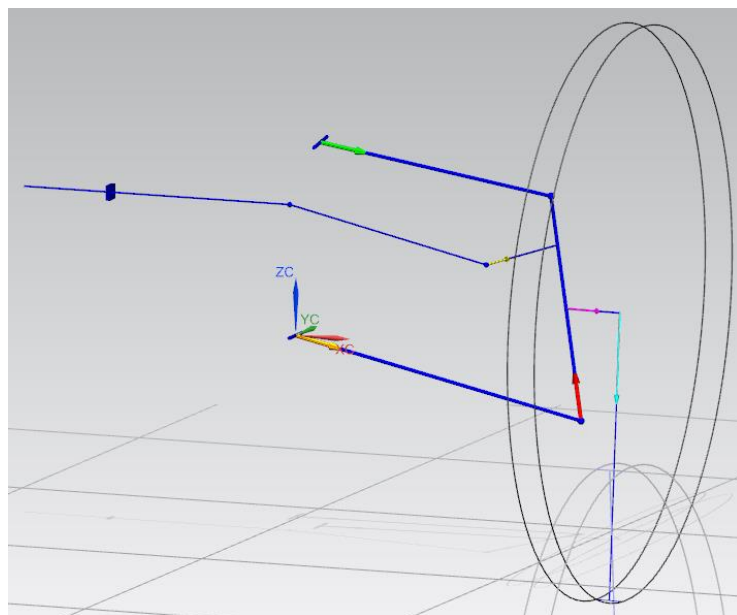
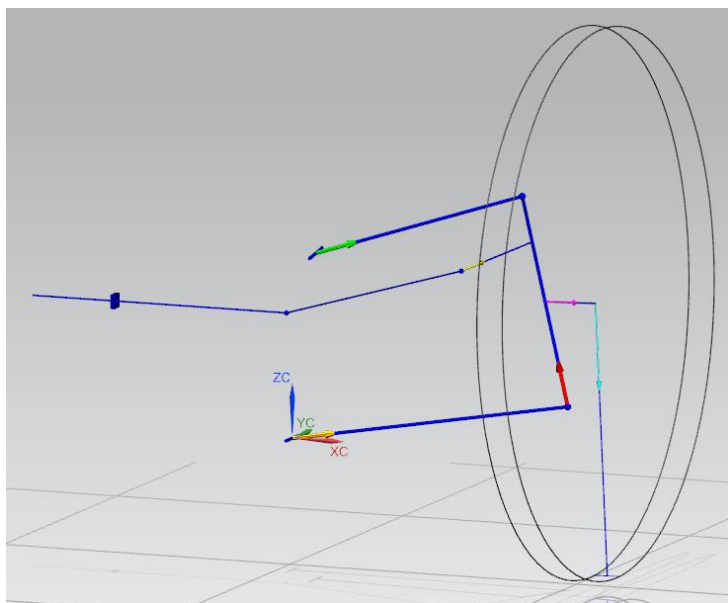
Παρακάτω φαίνεται το κινηματικό μοντέλο που εμπεριέχει τα διανύσματα:



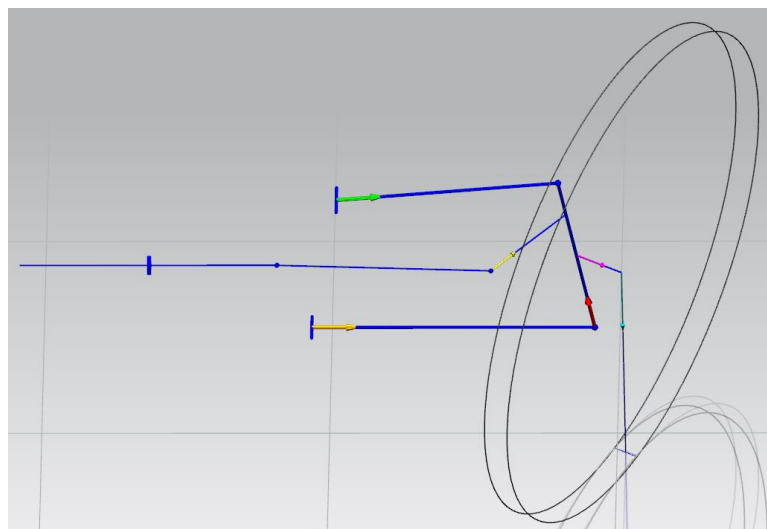
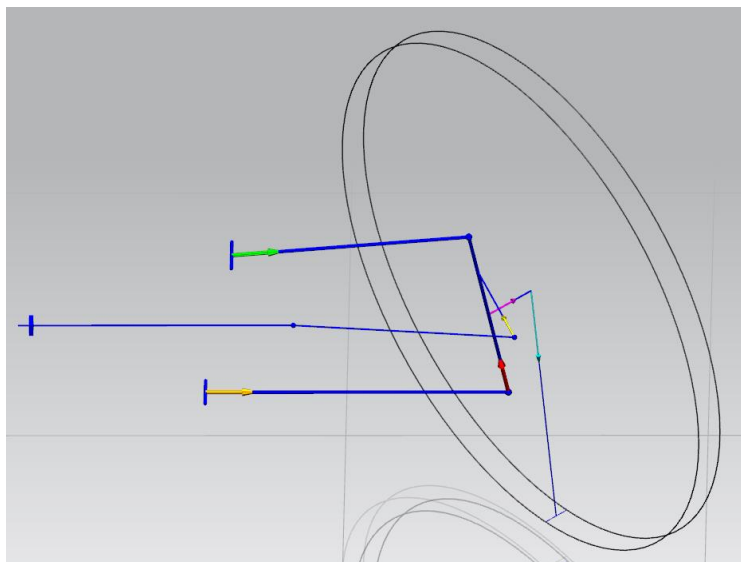
Για την πραγματοποίηση των δύο δυνατών κινήσεων του κινηματικού μοντέλου (πηδαιλιούχηση του τροχού και μετατόπιση της ανάρτησης με την κατακόρυφη μετατόπιση του τροχού) κατασκευάστηκε το animation Wheel turn το οποίο αποτυπώνει την κίνηση του τροχού γύρω από τον άξονα kingpin και το animation Wheel travel το οποίο αποτυπώνει την μεταβολή των γωνιών ανάρτησης με την κατακόρυφη κίνηση του τροχού. Τα animations δίνουν τη δυνατότητα απεικόνισης της κίνησης των διανυσμάτων και υπολογισμού της μετατόπισης των γωνιών ανάρτησης για συγκεκριμένες παραμέτρους με πολύ υψηλή ακρίβεια.

Τα προαναφερθέντα animations φαίνονται παρακάτω:

Wheel travel



Wheel turn



Θέτουμε το εύρος λειτουργίας του κάτω ψαλιδιού από -10° έως 10° εφόσον η γωνία θ δηλαδή η γωνία που σχηματίζει το κάτω ψαλίδι με τον άξονα X είναι η input variable (η μεταβλητή η οποία θα καθορίσει τη μεταβολή όλων των υπόλοιπων μεταβλητών) $-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$

Εισάγοντας τα όρια της γωνίας θ στο κινηματικό μοντέλο του NX καταλήγουμε στο δυνατό εύρος της μετατόπισης του τροχού ως προς τον άξονα Z (wheel travel) που είναι

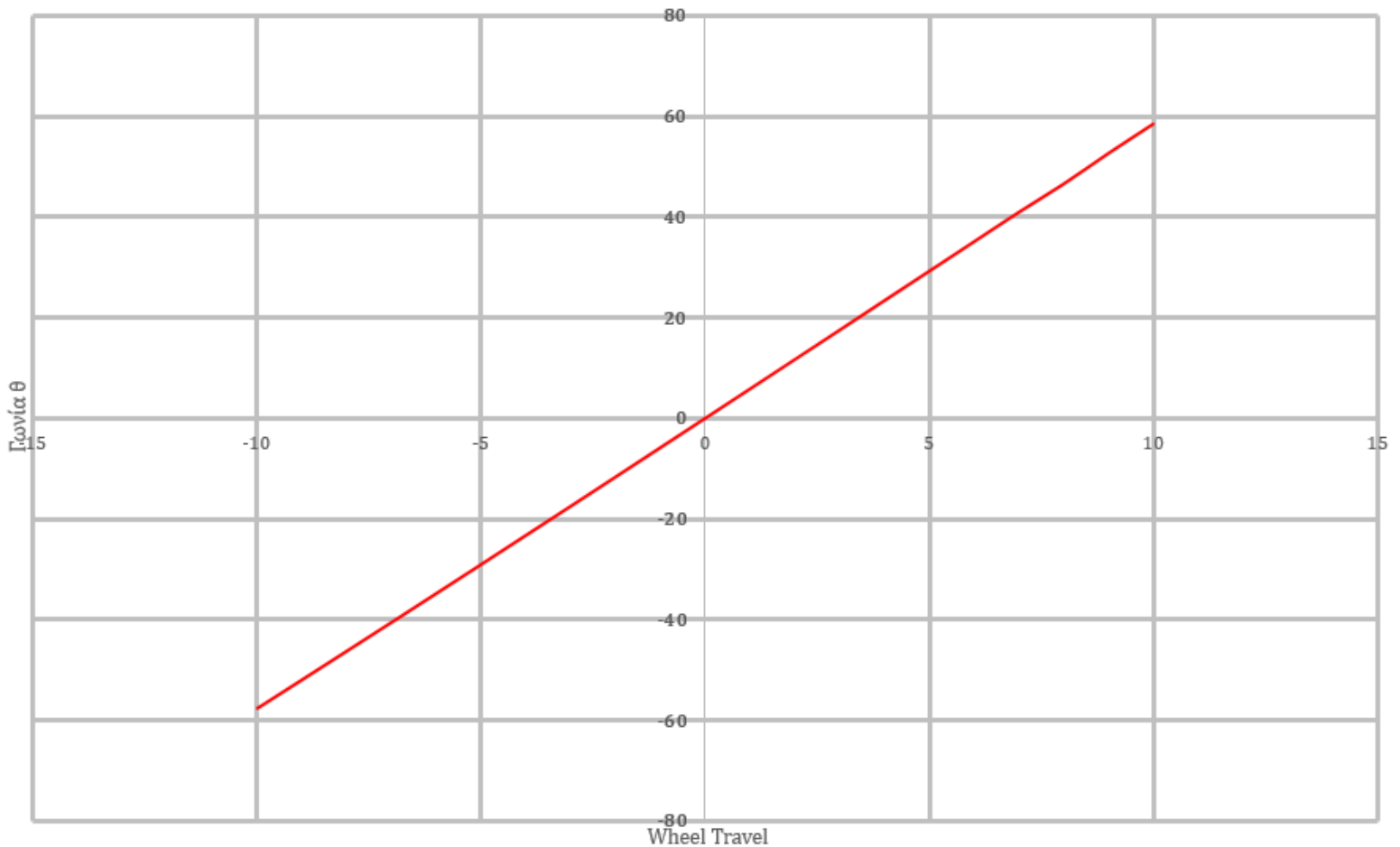
$$-57,704 \text{ mm} \leq \Delta OJ_z \leq 58,5317 \text{ mm}$$

Παρακάτω εισάγοντας όλες τις ακέραιες τιμές της γωνίας θ (σε μοίρες) θα σχηματιστούν οι πίνακες κατανομής των γωνιών camber, caster, KPI και toe καθώς και της μετατόπισης του τροχού στον άξονα X (track variation) σε σχέση με τη μετατόπιση του τροχού στον άξονα Z (wheel travel).

6.3.5.3 Πίνακες κατανομής γωνιών ανάρτησης και μετατόπισης του τροχού

Έπειτα από δοκιμή των 21 ακέραιων τιμών της γωνίας θ (εντός του εύρους -10 έως 10) η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι η input variable ο πίνακας κατανομής γωνίας θ -Wheel travel διαμορφώνεται ως εξής:

θ	Wheel Travel
10	58,5317
9	52,6877
8	46,5981
7	40,98
6	35,1185
5	29,2614
4	23,4007
3	17,5387
2	11,6917
1	5,8419
0	0
-1	-5,8313
-2	-11,6573
-3	-17,4706
-4	-23,2679
-5	-29,0556
-6	-34,8251
-7	-40,5757
-8	-46,305
-9	-52,0173
-10	-57,704

Γραφική παράσταση γωνίας θ - Wheel Travel

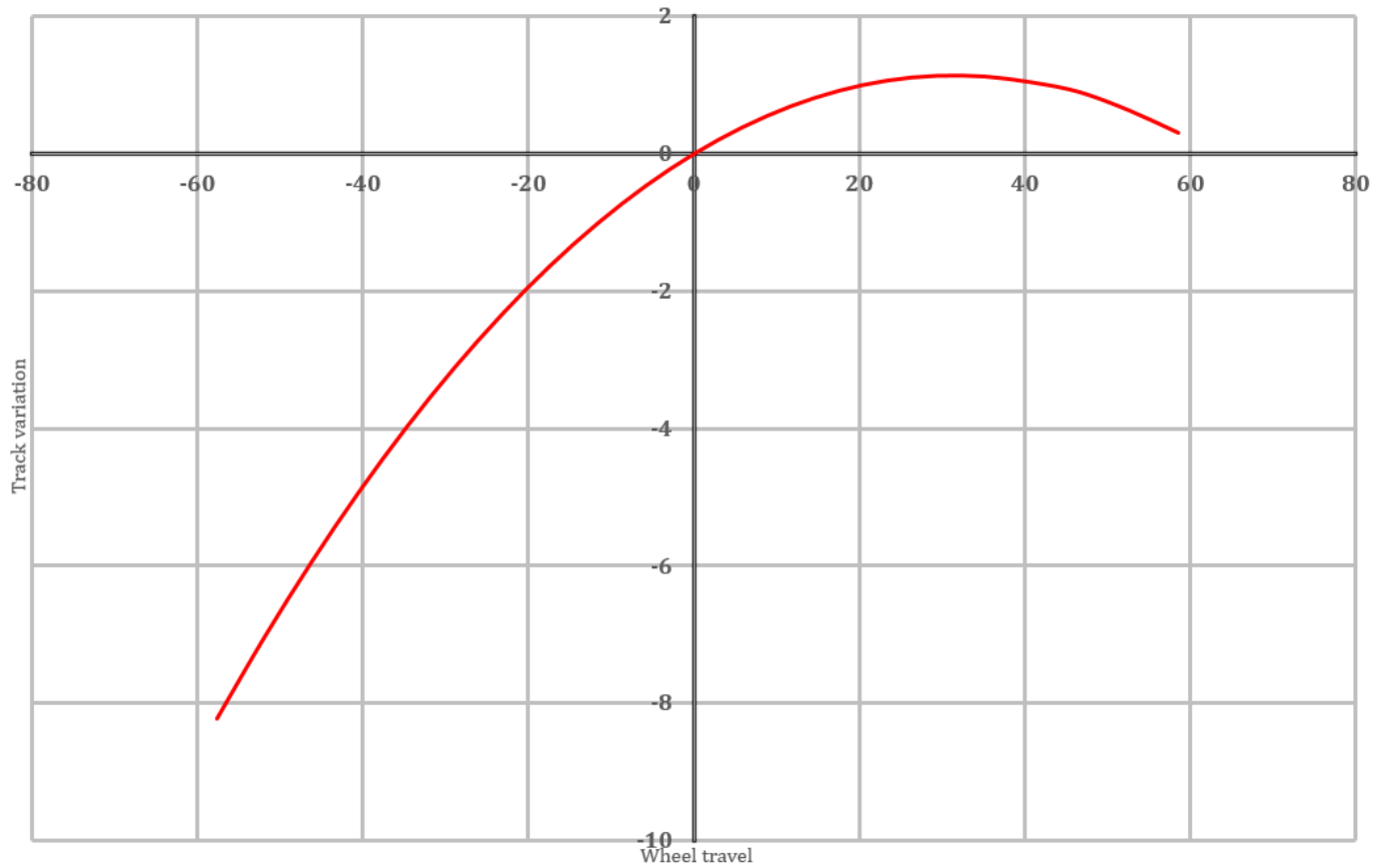
Έχοντας υπολογίσει την μετατόπιση του τροχού στον άξονα Z για κάθε πιθανή τιμή της γωνίας θ αντιστοιχούμε το wheel travel της κάθε γωνίας θ στις αντίστοιχες τιμές του track variation, γωνίας camber, γωνίας caster, γωνίας KPI και γωνίας Toe. Ο λόγος της αντιστοίχισης με τη μετατόπιση του τροχού στον κάθετο άξονα είναι ότι το wheel travel είναι η αιτία της μεταβολής των γωνιών ανάρτησης εξαρχής οπότε είναι απαραίτητο για τους μηχανικούς να μπορούν να συγκρίνουν την ακριβής μεταβολή τους για κάθε μετατόπιση του τροχού. Ο λόγος όμως που χρησιμοποιούμε τη γωνία θ ως input variable και όχι το wheel travel είναι πως η γωνία θ καθορίζει το λειτουργικό εύρος του συστήματος ανάρτησης και ως συνέπεια καθορίζει και το εύρος μετατόπισης του τροχού στον κάθετο άξονα.

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας κατανομής του wheel travel σε σχέση με τις προαναφερθείς γωνίες και μετατοπίσεις.

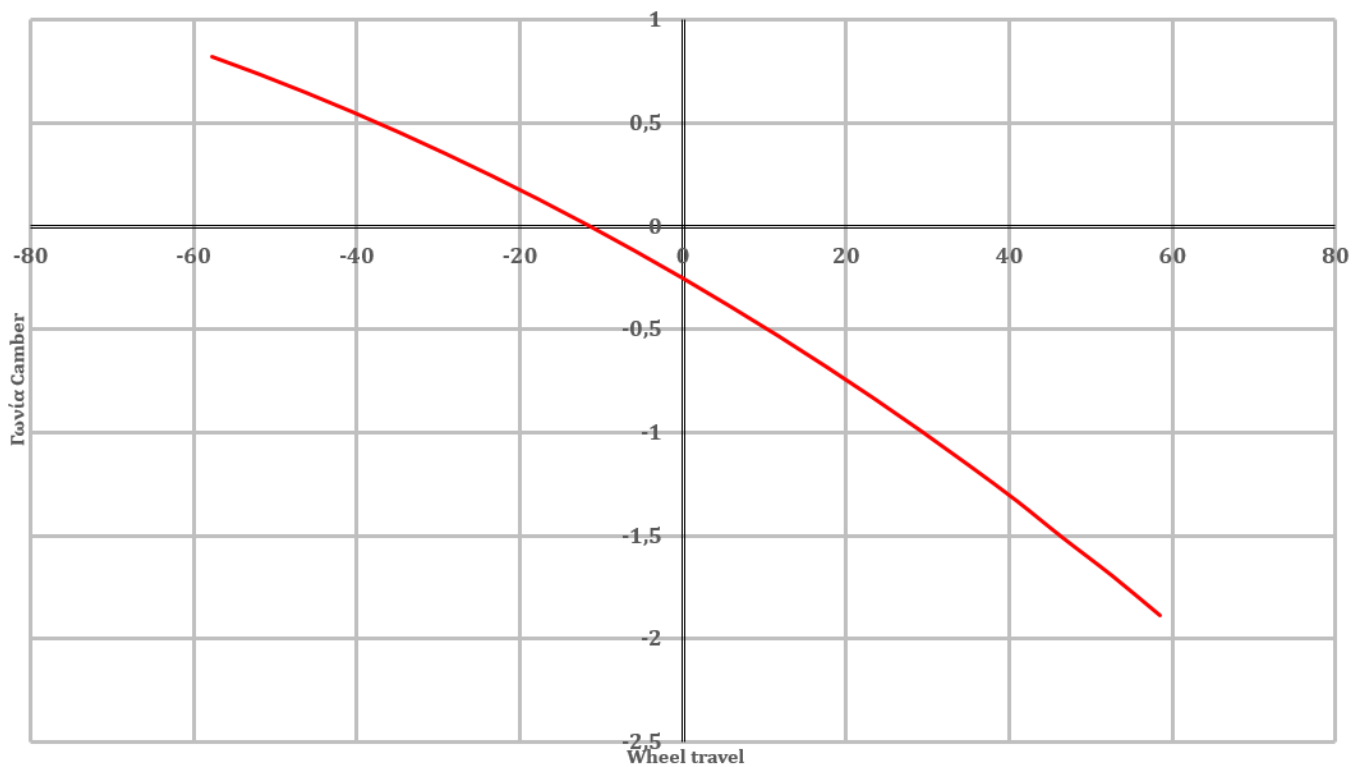
Wheel Travel	Track Variation	Γωνία Camber	Γωνία Caster	Γωνία KPI	Γωνία Toe
58,5317	0,304444	-1,886	5,0628	11,1843	-0,8796
52,6877	0,625322	-1,6944	4,8489	10,9804	-0,8075
46,5981	0,897295	-1,5092	4,6342	10,7832	-0,732
40,98	1,0362	-1,331	4,4195	10,5934	-0,653
35,1185	1,125	-1,1585	4,2037	10,4097	-0,5705
29,2614	1,1354	-0,9923	3,9878	10,2329	-0,4845
23,4007	1,0669	-0,8322	3,7716	10,0627	-0,395
17,5387	0,919242	-0,678	3,555	9,8989	-0,3018
11,6917	0,692588	-0,5297	3,3385	9,7418	-0,2049
5,8419	0,386106	-0,3873	3,1221	9,5911	-0,1044
0	0	-0,25	2,9047	9,4463	0
-5,8313	-0,465636	-0,1185	2,6878	9,3081	0,1082
-11,6573	-1,0114	0,0076	2,4707	9,176	0,2203
-17,4706	-1,6368	0,1282	2,2597	9,0503	0,3366
-23,2679	-2,3413	0,2435	2,0368	8,9308	0,4566
-29,0556	-3,1259	0,3533	1,8204	8,8178	0,581
-34,8251	-3,9893	0,4581	1,6036	8,7108	0,7095
-40,5757	-4,9314	0,5574	1,3875	8,6103	0,8422
-46,305	-5,9516	0,6514	1,1717	8,5162	0,9794
-52,0173	-7,0505	0,7403	0,956087	8,4285	1,121
-57,704	-8,2263	0,8237	0,741095	8,3473	1,2673

Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις του wheel travel με την μετατόπιση του τροχού στον άξονα X (track variation) καθώς και με την κάθε γωνία ξεχωριστά.

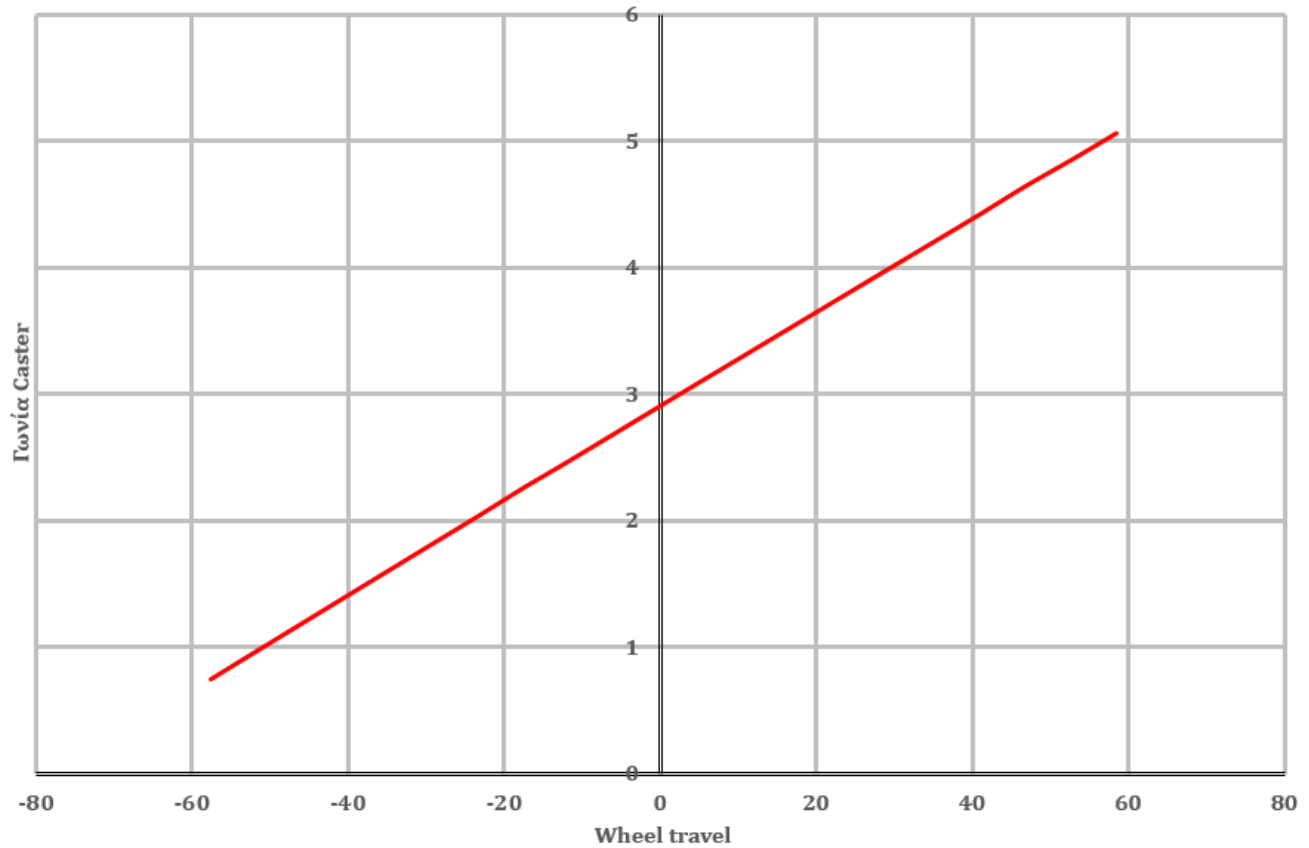
Γραφική παράσταση Wheel travel - Track Variation



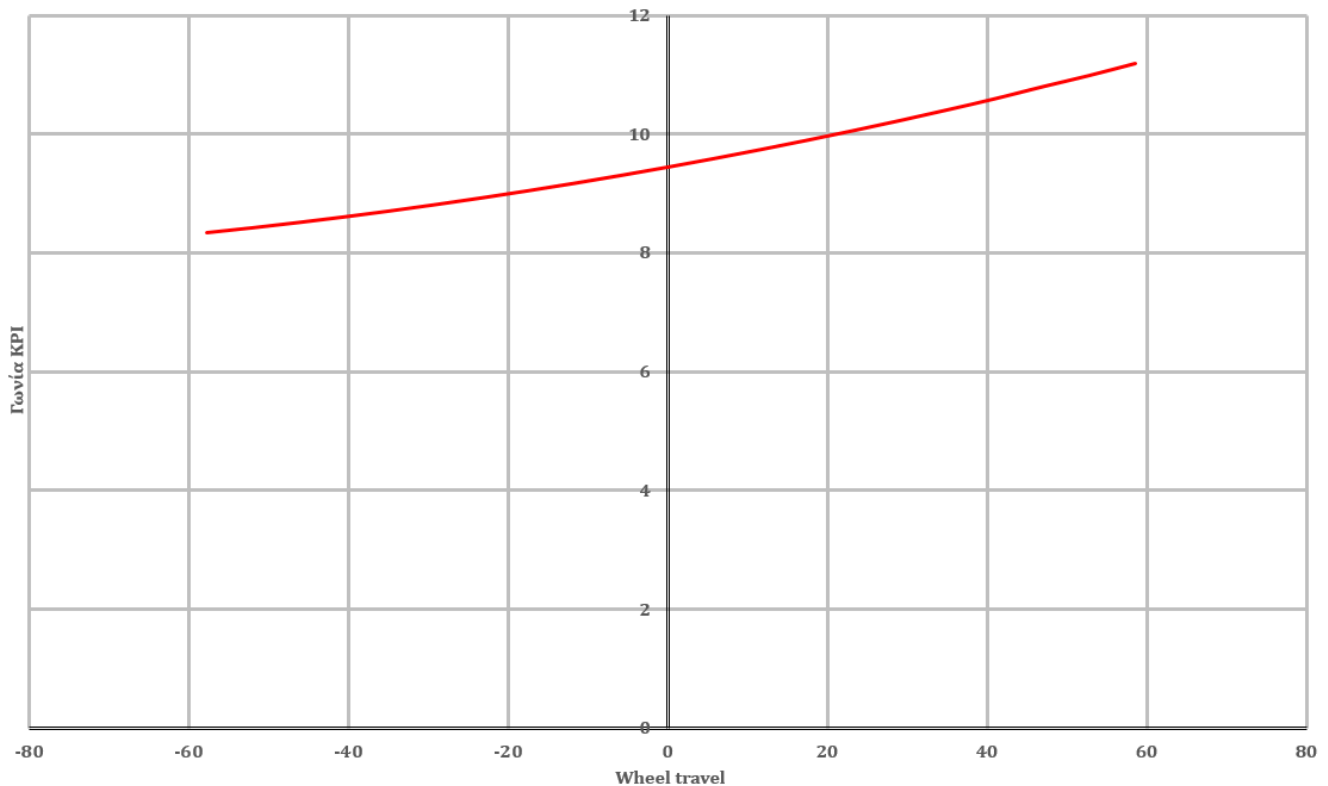
Γραφική παράσταση Wheel travel - Γωνίας Camber



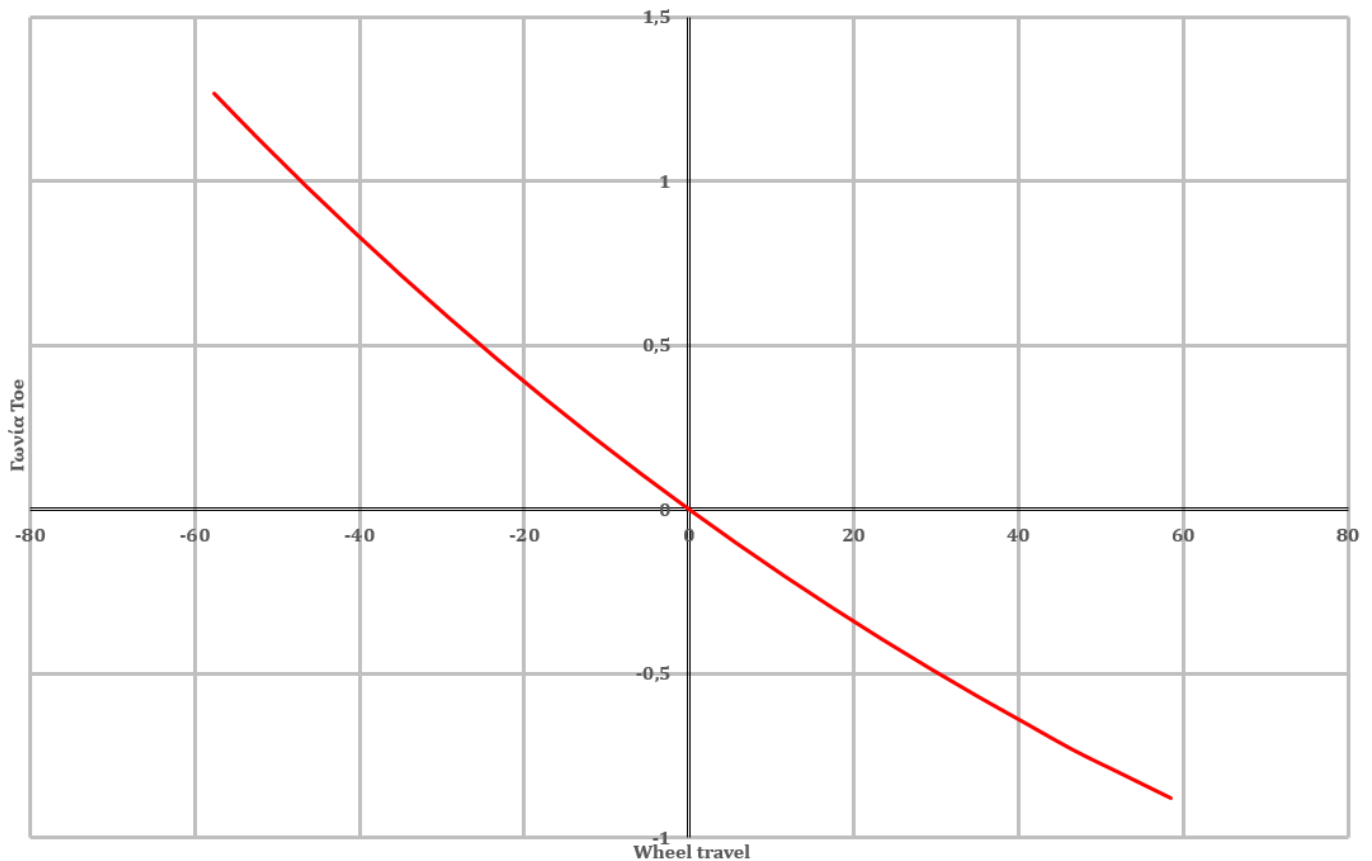
Γραφική παράσταση Wheel travel - Γωνίας Caster



Γραφική παράσταση Wheel travel - Γωνίας KPI



Γραφική παράσταση Wheel travel - Γωνίας Toe



Για μετρηθεί η μεταβολή της γωνίας camber κατά την πηδαλιούχηση του τροχού θέτουμε το λειτουργικό εύρος περιστροφής του άξονα kingpin $-60^\circ \leq \lambda_p \leq 60^\circ$. Ξεκινώντας από $\lambda_p = 0^\circ$ (μηδενική πηδαλιούχηση) και εξετάζοντας ανά 5 μοίρες τη γωνία camber και toe σχηματίζονται οι πίνακες κατανομής περιστροφής Kingpin – γωνίας camber και κατανομής περιστροφής Kingpin – γωνίας toe.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι στατικές γωνίες του κινηματικού μοντέλου διαμορφώνονται ως εξής:

Στατική γωνία Camber: -0.25°

Στατική γωνία Caster: 2.9047°

Στατική γωνία KPI: 9.4463°

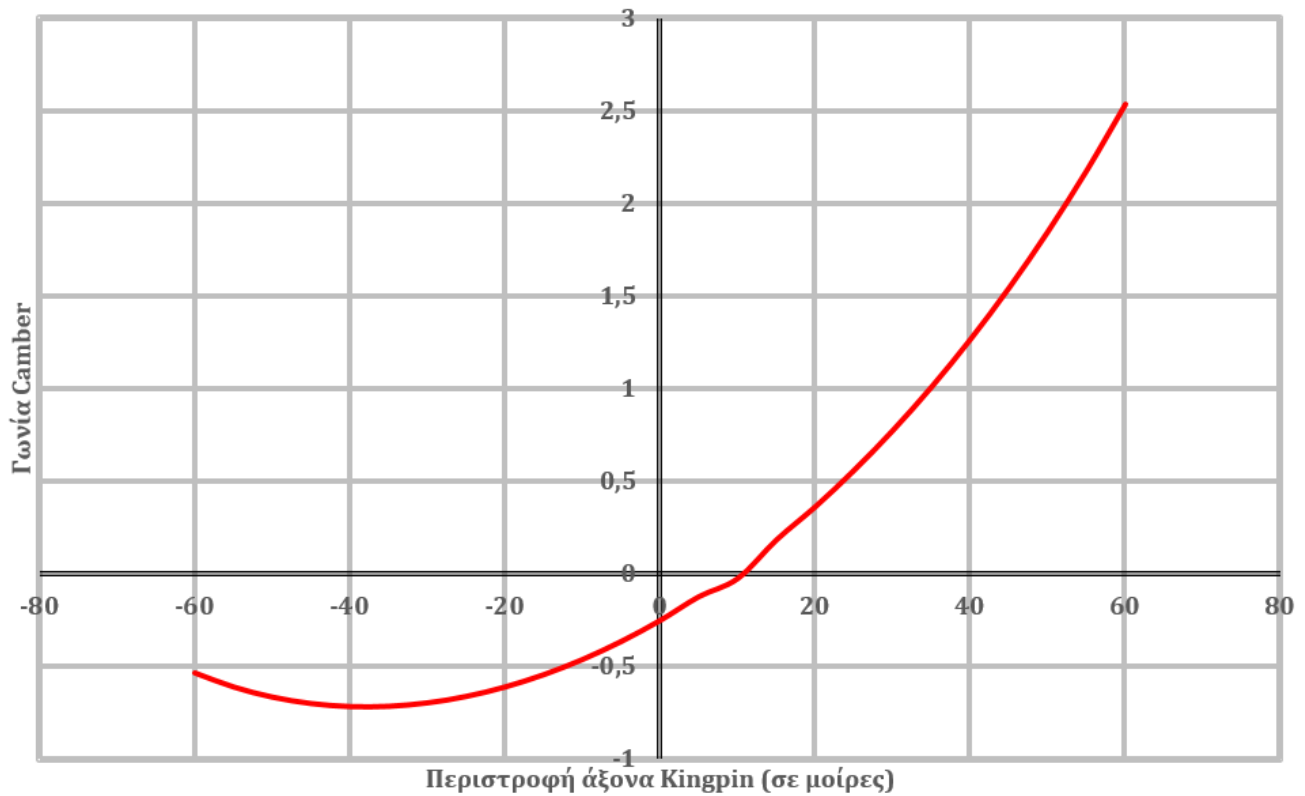
Στατική γωνία Toe: 0°

Οι πίνακες κατανομής περιστροφής Kingpin – γωνίας camber και κατανομής περιστροφής Kingpin – γωνίας toe φαίνονται παρακάτω:

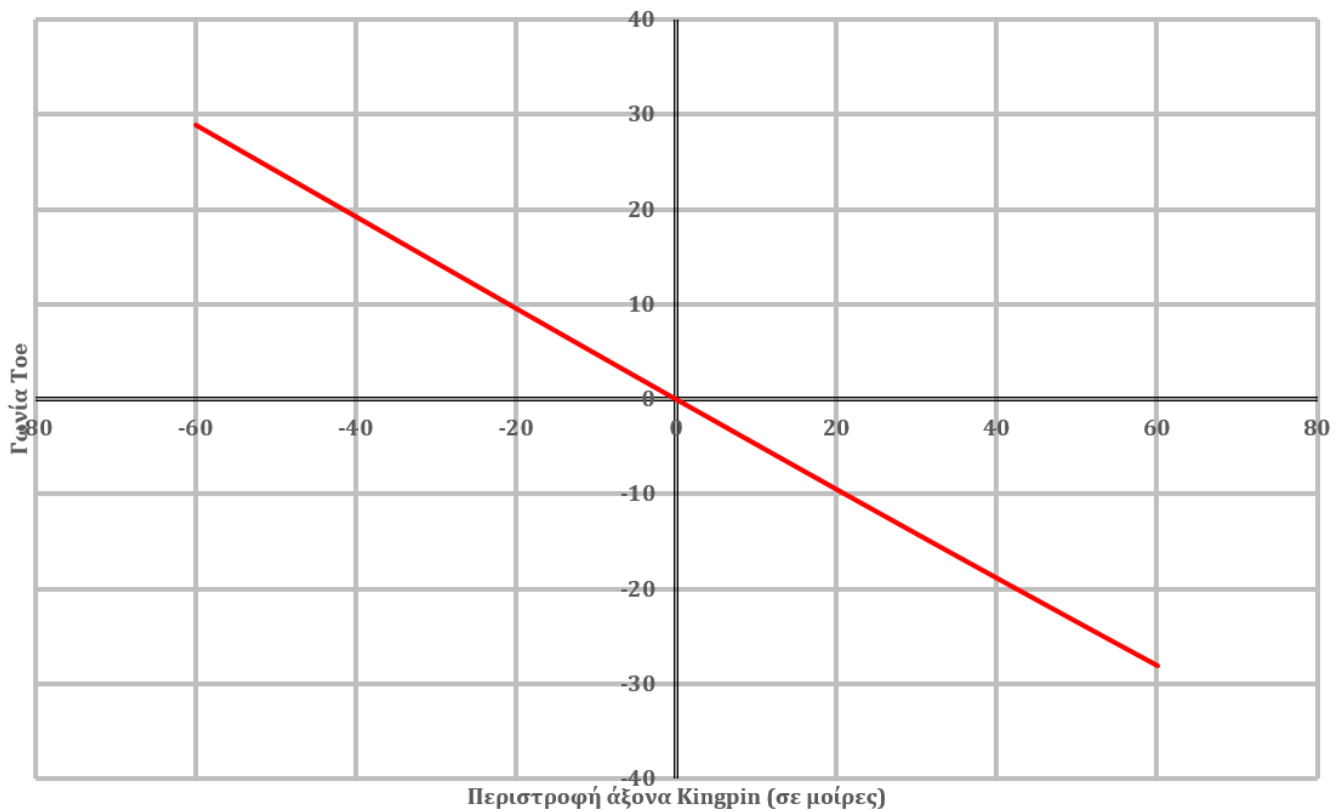
λρ	Γωνία Camber	Γωνία Toe
60	2,5374	-28,0295
55	2,1792	-25,7416
50	1,8495	-23,4433
45	1,5463	-21,1392
40	1,2674	-18,8216
35	1,011	-16,5004
30	0,775741	-14,1664
25	0,560278	-11,8259
20	0,363659	-9,4749
15	0,185049	-7,1171
10	-0,023625	-4,7528
5	-0,121495	-2,376
0	-0,25	0
-5	-0,362953	2,3841
-10	-0,460348	4,7805
-15	-0,542521	7,1809
-20	-0,609121	9,5866
-25	-0,659973	11,9984
-30	-0,694853	14,4147
-35	-0,713307	16,8325
-40	-0,714784	19,2618
-45	-0,698513	21,6714
-50	-0,663611	24,09
-55	-0,608891	26,5096
-60	-0,532819	28,9245

Παρακάτω φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις περιστροφής Kingpin – γωνίας camber και περιστροφής Kingpin – γωνίας toe.

Γραφική παράσταση περιστροφής Kingpin - γωνίας Camber



Γραφική παράσταση περιστροφής Kingpin - γωνίας Toe



6.3.6 Ανασκόπηση και συμπεράσματα

Η κινηματική ανάλυση σε λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης με χρήση H/Y (CAD) παρέχει τη δυνατότητα στους μηχανικούς της αποτελεσματικής και γρήγορης μελέτης ενός πολύπλοκου μηχανισμού καθώς και τη δοκιμή διαφόρων επιθυμητών συνθηκών στις οποίες καλείται να λειτουργήσει ένας τέτοιος μηχανισμός με απόλυτη ακρίβεια. Αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που το σύνολο των σύγχρονων βιομηχανιών που κατασκευάζουν πολύπλοκα προϊόντα μηχανολογίας (αυτοκινητοβιομηχανίες, κατασκευαστές ρομποτικών βραχιόνων, κατασκευαστές ιατρικού και νοσοκομειακού εξοπλισμού μέχρι και κατασκευαστές απλών οικιακών συσκευών) χρησιμοποιούν λογισμικά που δίνουν τη δυνατότητα της γρήγορης κατασκευής και συνεχούς δοκιμής αρχικών σχεδίων σε ένα σύστημα κινηματικής ανάλυσης και συνεπώς της βελτιστοποίησης του τελικού προϊόντος.

Όσον αφορά το παραπάνω μοντέλο κινηματικής ανάλυσης, η κατασκευή ενός συστήματος ανάρτησης διπλού ψαλιδιού που να διαθέτει συγκεκριμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά (όπως μικρή μετατόπιση γωνιάς camber ή γωνιάς toe) μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατάλληλη ρύθμιση των μηκών που αποτελούν το κινηματικό μοντέλο (μήκη ψαλιδιών, βραχίονα πηδαλιούχησης κλπ.) καθώς και των γωνιών των διανυσμάτων που αποτελούν το σύστημα.

Με αυτό τον τρόπο ο μηχανικός μπορεί να κατασκευάσει το βέλτιστο κινηματικό σύστημα ανάρτησης ανάλογα με τα ζητούμενα χαρακτηριστικά και να προχωρήσει άμεσα στη φάση σχεδιασμού και κατασκευής των φυσικών μερών του συστήματος κερδίζοντας έτσι πολύτιμο χρόνο στη διαδικασία παραγωγής μιας βιομηχανίας.

7. Πηγές

R.H Barnard, 2002, “Automotive engineering development”, Julian Happian-Smith, *An Introduction to Modern Vehicle Design*, Massachusetts, Εκδόσεις Butterworth-Heinemann

Brian Hall, 2002, “Suspension systems and components”, Julian Happian-Smith, *An Introduction to Modern Vehicle Design*, Massachusetts, Εκδόσεις Butterworth-Heinemann

Νικόλαος Μπιλάλης, Εμμανουήλ Μαραβελάκης, 2014. *Συστήματα CAD/CAM & Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση*, 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα

Αντωνιάδης Αριστομένης, 2013, *Μηχανολογικό Σχέδιο* 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα

Herb Adams, 1992, *Chassis Engineering*, Εκδόσεις Penguin

John C. Dixon, 2009, *Suspension Geometry and Computation*, Εκδόσεις Wiley

Car Engineer, 2013, “MacPherson and Pseudo MacPherson suspension”, <http://www.car-engineer.com/mac-pherson-and-pseudo-mac-pherson-suspension/> [Πρόσβαση 13/4/2019]

Moogparts, 2018, “Double wishbone suspension”, <https://www.moogparts.eu/blog/double-wishbone-suspension.html> [Πρόσβαση 15/4/2019]

Car treatments, (2019), Macpherson vs Double wishbone suspension (Pros and cons), <https://cartreatments.com/pros-and-cons-of-macpherson-vs-double-wishbone-suspension/> [Πρόσβαση 22/4/2019]

Group seven Peugeot, 2012, “Double Wishbone: Derivation and History”, <http://groupsevenpeugeot.blogspot.com/2012/10/double-wishbone-derivation-and-history.html> [Πρόσβαση 22/4/2019]

Matt Kimberley, 2019, “What Is Multi-Link Suspension And How Is It Used?”
<https://www.carthrottle.com/post/what-is-multi-link-suspension-and-how-is-it-used/> [Πρόσβαση 23/4/2019]

Everything2, 2003, “Swing axle suspension”, <https://everything2.com/title/swing+axle+suspension>
[Πρόσβαση 27/4/2019]

Stephen Mraz, 2016, “What Are the Differences Between Sprung and Unsprung Weight?”
<https://www.machinedesign.com/springs/what-are-differences-between-sprung-and-unsprung-weight>
[Πρόσβαση 27/4/2019]

Formula 1 dictionary, 2019, “Roll Center”, http://www.formula1-dictionary.net/roll_center.html
[Πρόσβαση 28/4/2019]

Jesus Delgado, 2019, “What Are Center Lock Wheels?”,
<https://www.velospinner.com/blogs/news/what-are-center-lock-wheels> [Πρόσβαση 2/5/2019]

Vector brands, 2019, “Τι είναι το ρουλεμάν και πως μπορείτε να το συντηρήσετε”
<https://vectorbrands.gr/%CF%81%CE%BF%CF%85%CE%BB%CE%B5%CE%BC%CE%AC%CE%BD/>
[Πρόσβαση 13/6/2019]

S.S.Khode, A.A. Satam, A.B.Gaikwad, 2017, “A Review on Independent Suspension System of Light Commercial Vehicle”, σελ. 14-19, <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/Conf.RDME%202017/Volume-6/4.%2014-19.pdf> [Πρόσβαση 15/6/2019]

Come and drive it, 2018, “Learn Camber, Caster, and Toe”,
<https://www.comeanddriveit.com/suspension/camber-caster-toe> [Πρόσβαση 15/6/2019]

Pedders Techstop, 2017, “DIAGNOSING AND REPAIRING BENT SUSPENSION COMPONENTS”,
https://d22enj1fxubdc2.cloudfront.net/wp-content/uploads/2017/06/PEDTechstop12_0.pdf
[Πρόσβαση 16/6/2019]

Masato Abe, 2015, "Vehicle Handling Dynamics (Second Edition)",
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/camber-change> [Πρόσβαση 17/6/2019]

AutoWare, 2009, "Reading and Analyzing Camber Curves", http://www.auto-ware.com/setup/cam_curv.htm [Πρόσβαση 20/6/2019]

Keivan Asadi, Amir Afkar, 2013, "Optimization of suspension system of offroad vehicle for vehicle performance improvement",
https://www.researchgate.net/publication/236649076_Optimization_of_suspension_system_of_offroad_vehicle_for_vehicle_performance_improvement#pf6 [Πρόσβαση 20/6/2019]

Tristan French, Alissa Roland, Maximilian Sluiter, 2013, *Camber-Car Design & Dynamics*, Διδακτορική διατριβή, Mechanical Engineering Department, California Polytechnic State University,
https://www.zonagravedad.com/images/Carrilanas/Camber_Car_Design_Dynamics.pdf [Πρόσβαση 22/6/2019]

Suspension Secrets, 2017, "CAMBER GAIN", <https://suspensionsecrets.co.uk/camber-gain/> [Πρόσβαση 22/6/2019]

Suspension Secrets, 2017, "CASTER", <https://suspensionsecrets.co.uk/caster/> [Πρόσβαση 25/6/2019]

Balance Motorsport, 2004, "SUSPENSION GEOMETRY", <https://balancemotorsport.co.uk/suspension-geometry> [Πρόσβαση 25/6/2019]

Matt Kimberley, 2019, "What Is Scrub Radius And Why Is It Important?",
<https://www.carthrottle.com/post/what-is-scrub-radius-and-why-is-it-important/> [Πρόσβαση 2/7/2019]

Roger Jackman, 2019, "Scrub Radius", <http://www.hrsprings.com/technical/scrub-radius> [Πρόσβαση 2/7/2019]

Racing Aspirations, 2017, "What is Scrub Radius", <https://www.racingaspirations.com/scrub-radius/> [Πρόσβαση 2/7/2019]

Codelink, 2019, “The evolution of wheel alignment: 1978 – Present”,
<http://www.sasreset.com/features/wheel-alignment-evolution.htm> [Πρόσβαση 3/7/2019]

Rapid Racer, 2016, “Suspension Tuning”, <http://www.rapid-racer.com/suspension-tuning.php>
[Πρόσβαση 5/7/2019]

Tire Rack, 2019, “TIRE TECH: ALIGNMENT”,
<https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=4> [Πρόσβαση 6/7/2019]

Race & Track Driving, 2017, “Track Alignment”, <http://racetrackdriving.com/car-setup/track-alignment/>
[Πρόσβαση 8/7/2019]

Vijayakumar Thulasi, 2013, “Simulated study on the effect of camber and toe on the handling characteristics of a car during cornering”,
https://www.researchgate.net/publication/297414861_Simulated_study_on_the_effect_of_camber_and_toe_on_the_handling_characteristics_of_a_car_during_cornering [Πρόσβαση 10/7/2019]

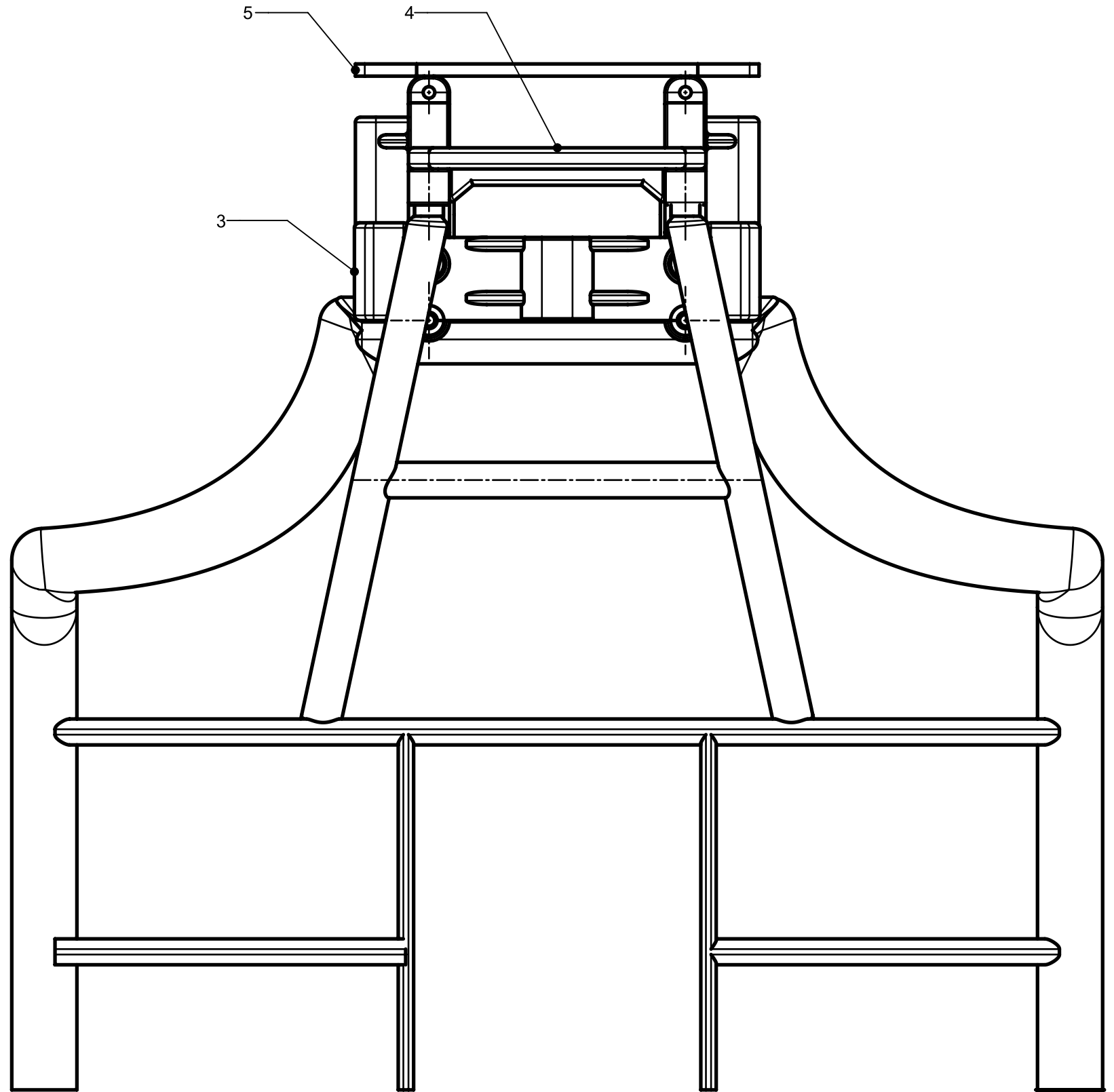
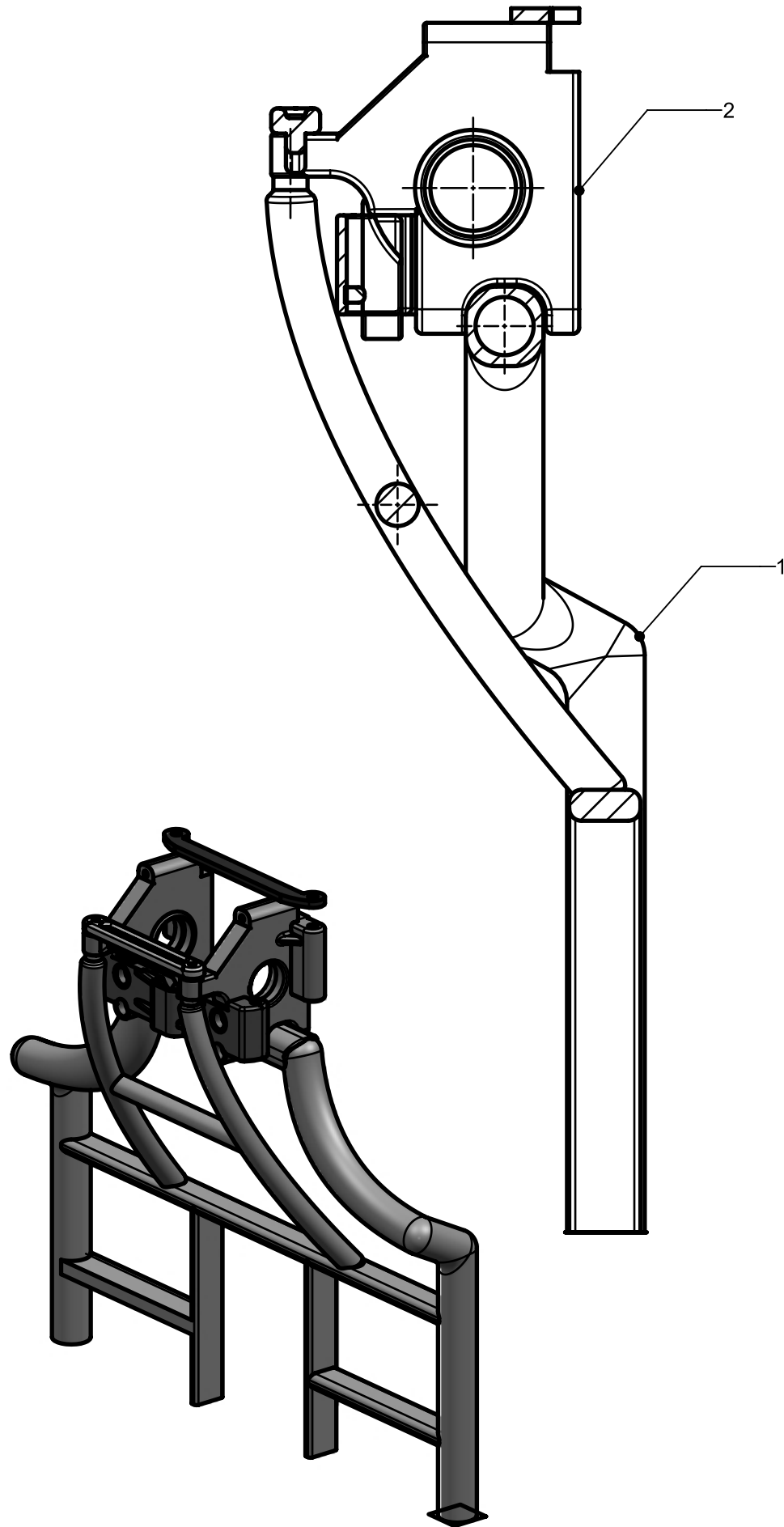
Racelogic, 2015, “Slip Angle Explained”,
http://www.racelogic.co.uk/downloads/vbox/Application_Notes/Slip%20Angle%20Explained.pdf
[Πρόσβαση 14/7/2019]

Formula 1 Dictionary, 2019, “Slip Angle”, http://www.formula1-dictionary.net/slip_angle.html
[Πρόσβαση 14/9/2019]

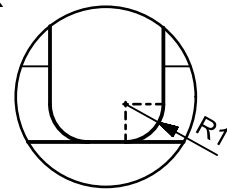
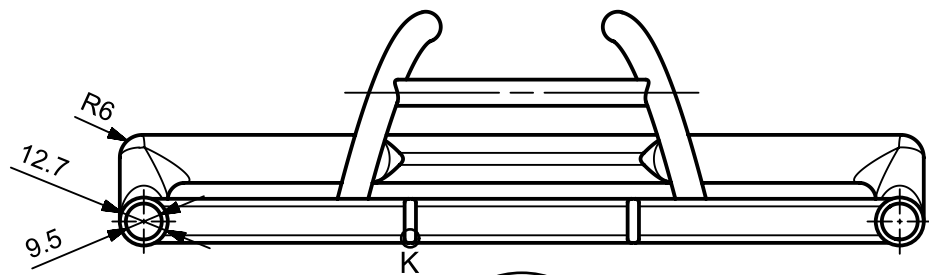
What-when-how, 2019, “The Ackermann Principle as Applied to Steering (Automobile)”, <http://what-when-how.com/automobile/the-ackermann-principle-as-applied-to-steering-automobile/> [Πρόσβαση 15/9/2019]

8. Παράρτημα μηχανολογικών σχεδίων

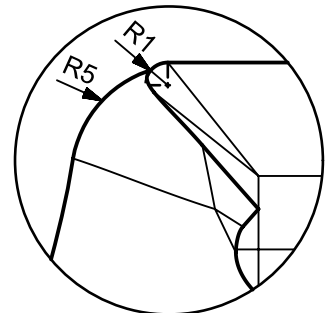
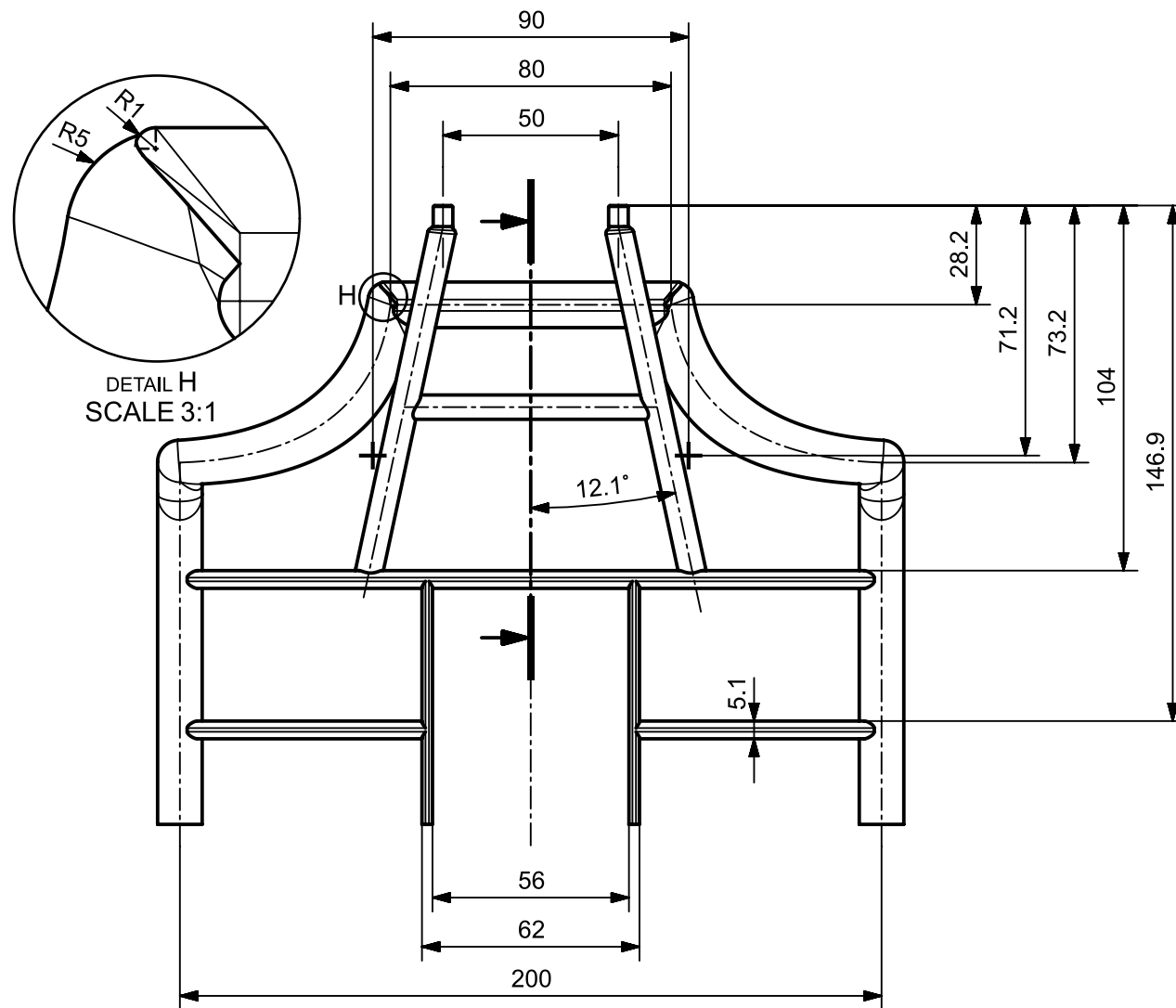
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια των 38 ξεχωριστών αποτελούμενων μερών του κατασκευασμένου οχήματος καθώς και τα σχέδια συναρμολόγησης του σασί, των ψαλιδιών, του τροχού, του συστήματος τοποθέτησης τροχού και των αμορτισέρ. Αξίζει να σημειωθεί πως για το κατασκευαστικό σχέδιο του Rear hub carrier assembly χρησιμοποιείται ως η βάση τοποθέτησης το σχέδιο 5-2 Rear hub carrier στη θέση του 5-1 Front hub carrier εφόσον το Rear hub carrier αντιστοιχεί στο σύστημα τοποθέτησης των πίσω τροχών η οποίοι δεν συνδέονται με άξονα πηδαλιούχησης. Τα υπόλοιπα μέρη του Rear hub carrier τοποθετούνται με κοινό τρόπο όπως στο Front hub carrier assembly.



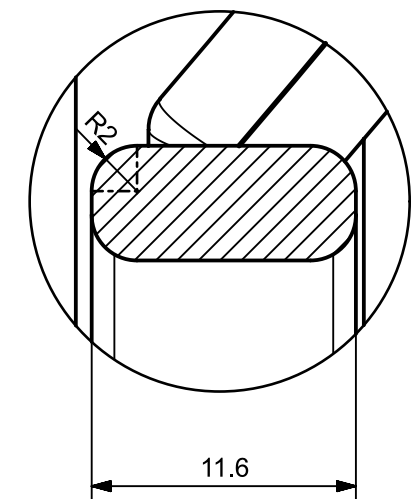
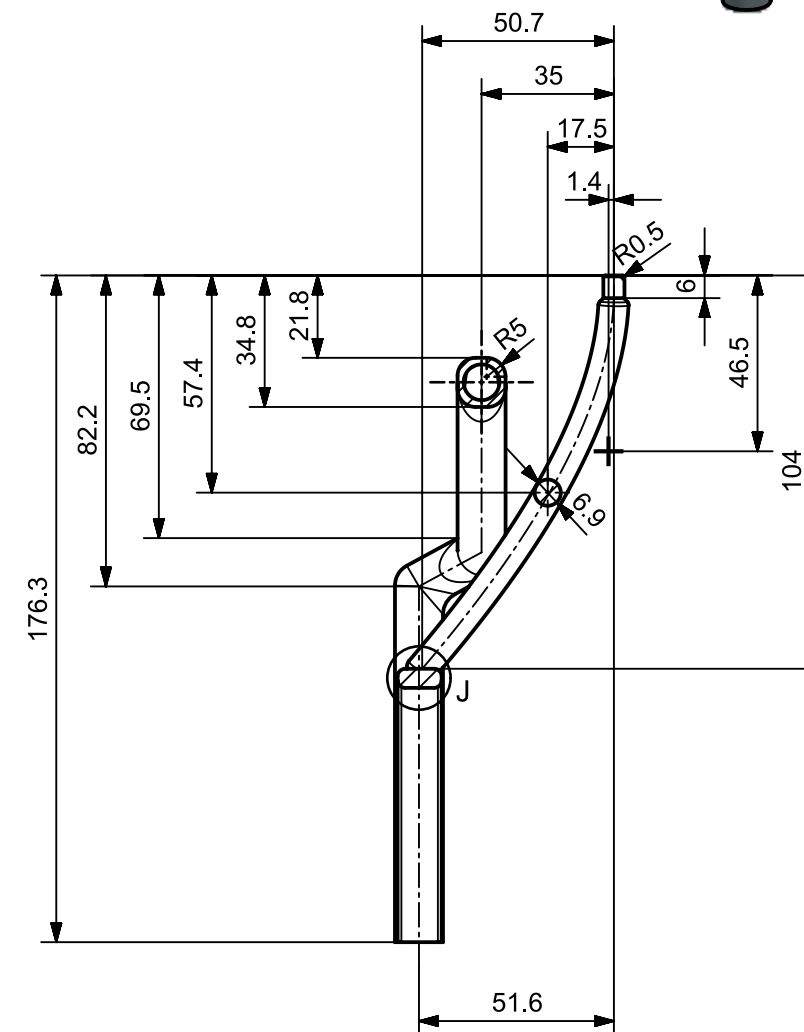
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr		Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
		Τίτλος Chassis assembly		Αριθμός cl 1-0	
		Κλίμ. 1:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1



DETAIL K
SCALE 5:1



DETAIL H
SCALE 3:1

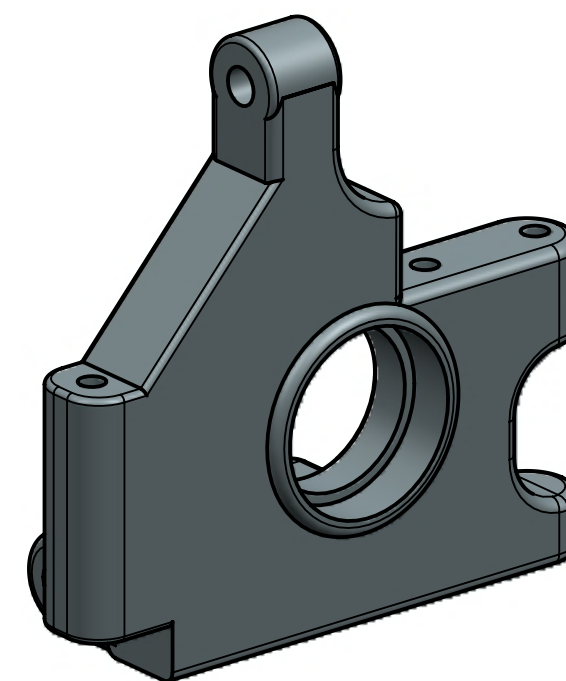
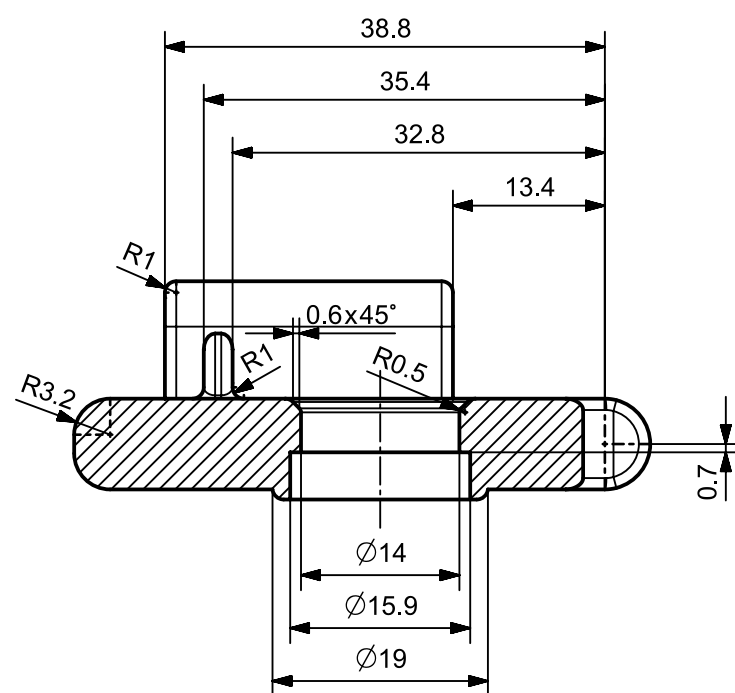
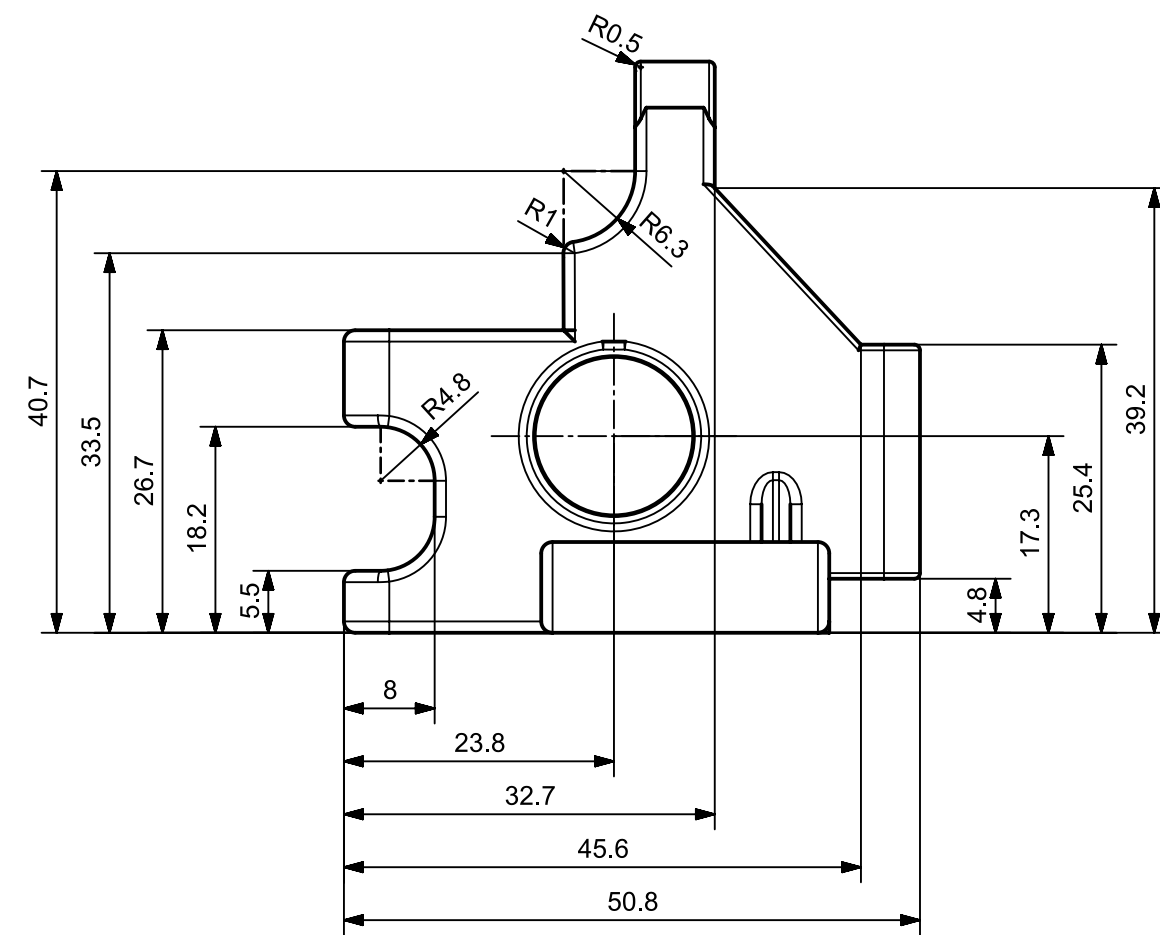
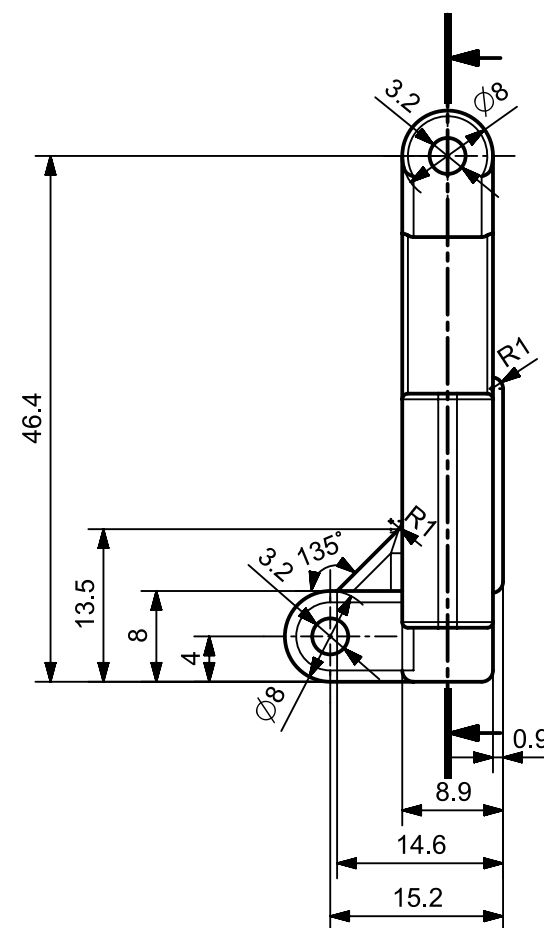
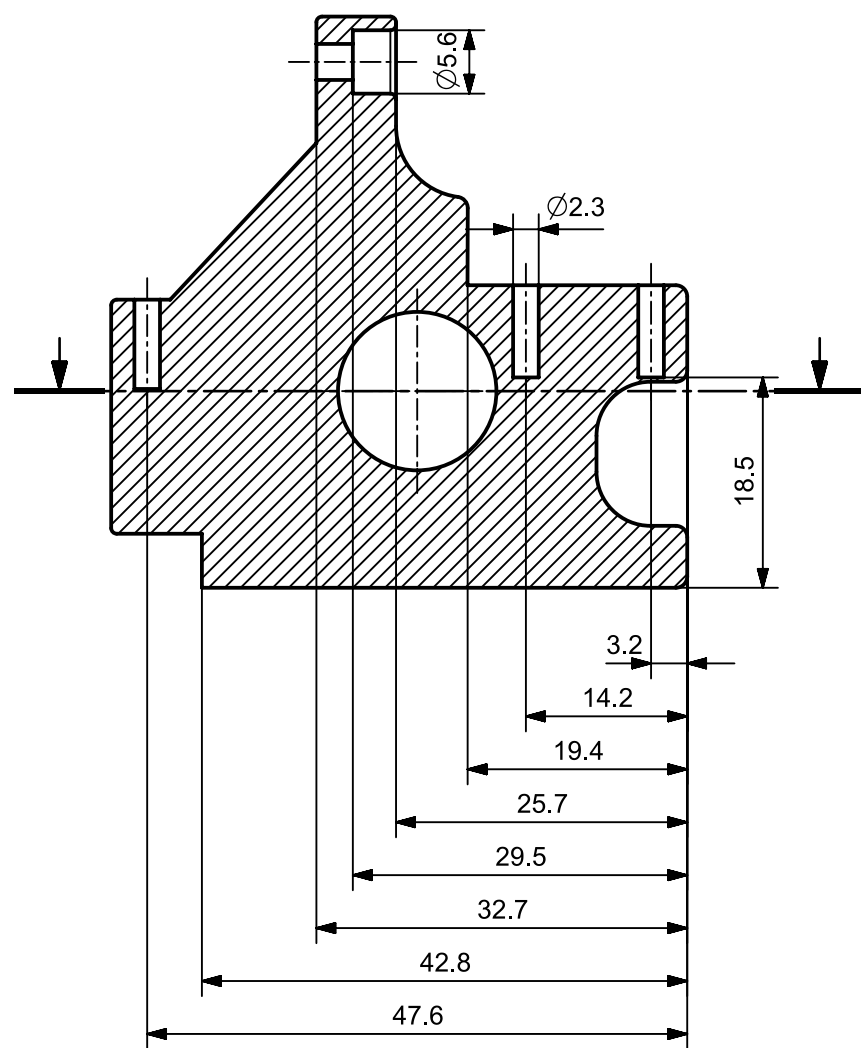


DETAIL J
SCALE 3:1

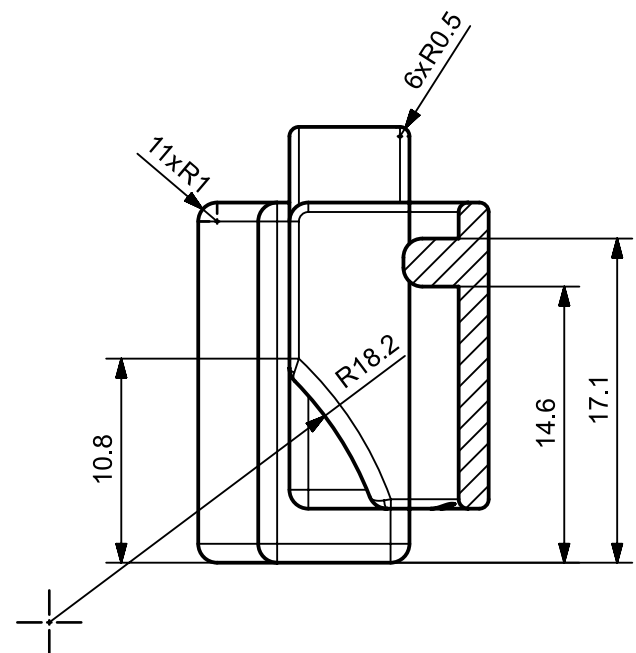
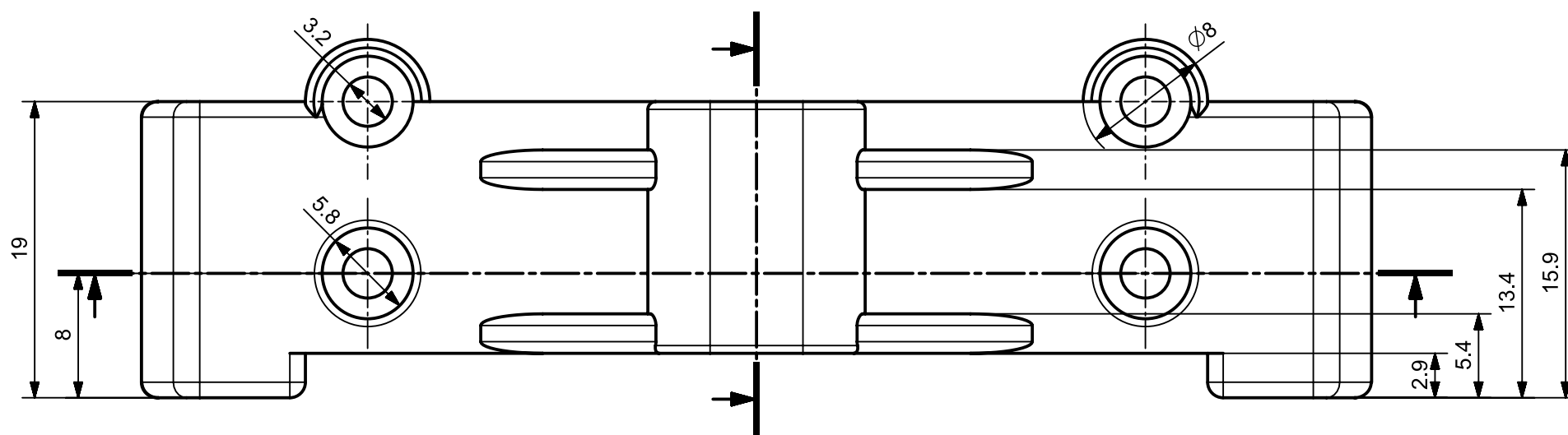
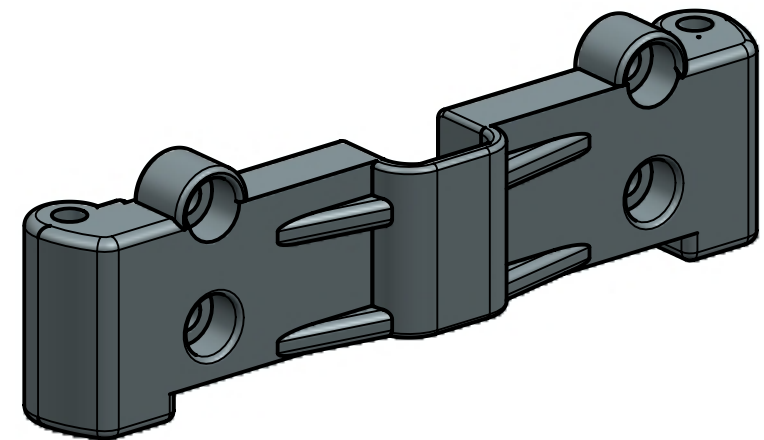
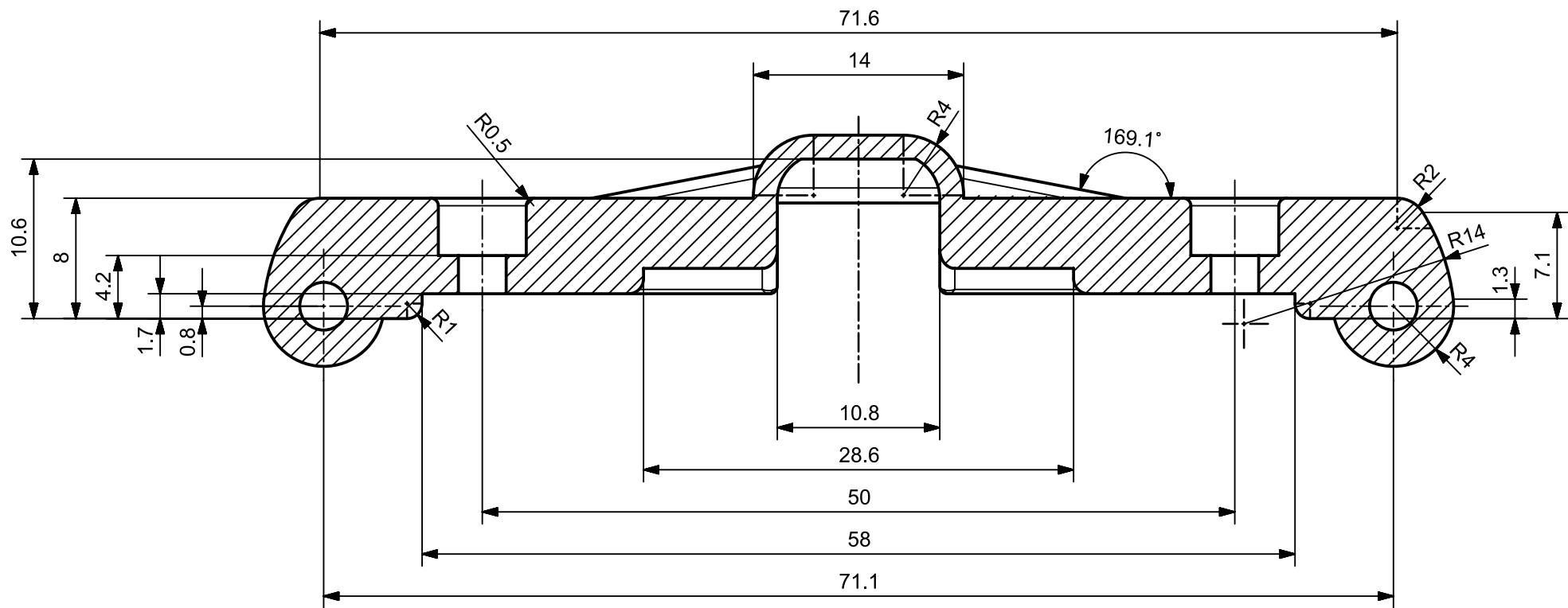
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Main chassis

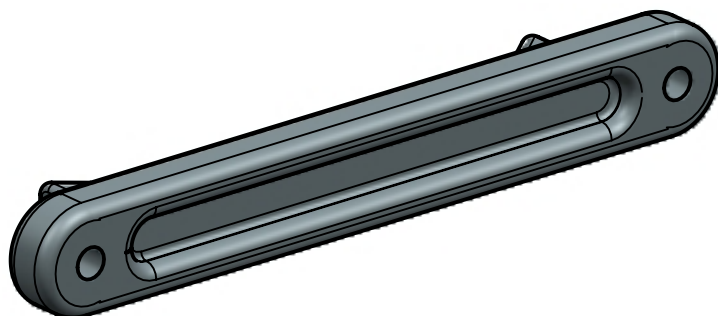
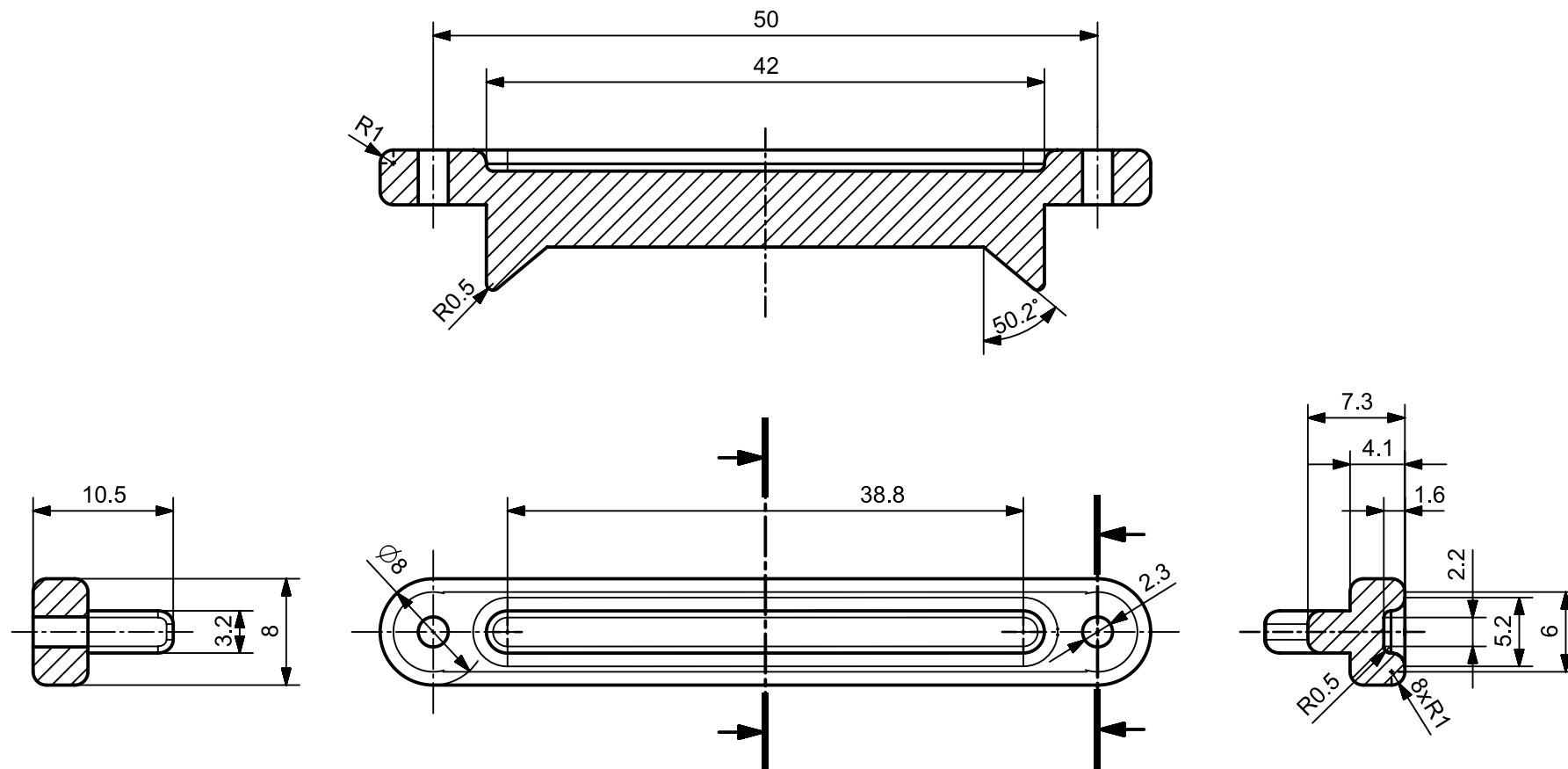
Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1
Αριθμός
cl 1-1
Κλίμ. 1:2
Ημερομηνία 8/2/2020
Γλώσσα ΕΛ
Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές			
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος	Αριθμός			
	Side plate	cl 1-2			
Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο		
1.5:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1		



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές			
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος	Αριθμός			
	Upper arm mount	cl 1-3			
		Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
		2.5:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Shock brace

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 1-4

Κλίμ.

2:1

Ημερομηνία

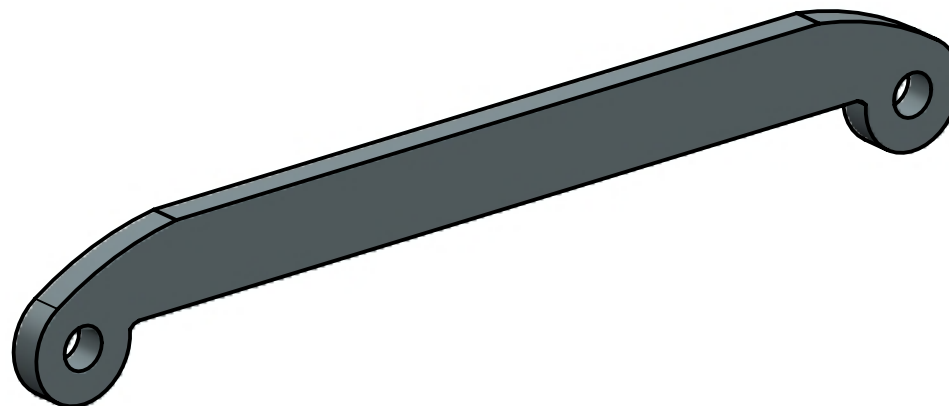
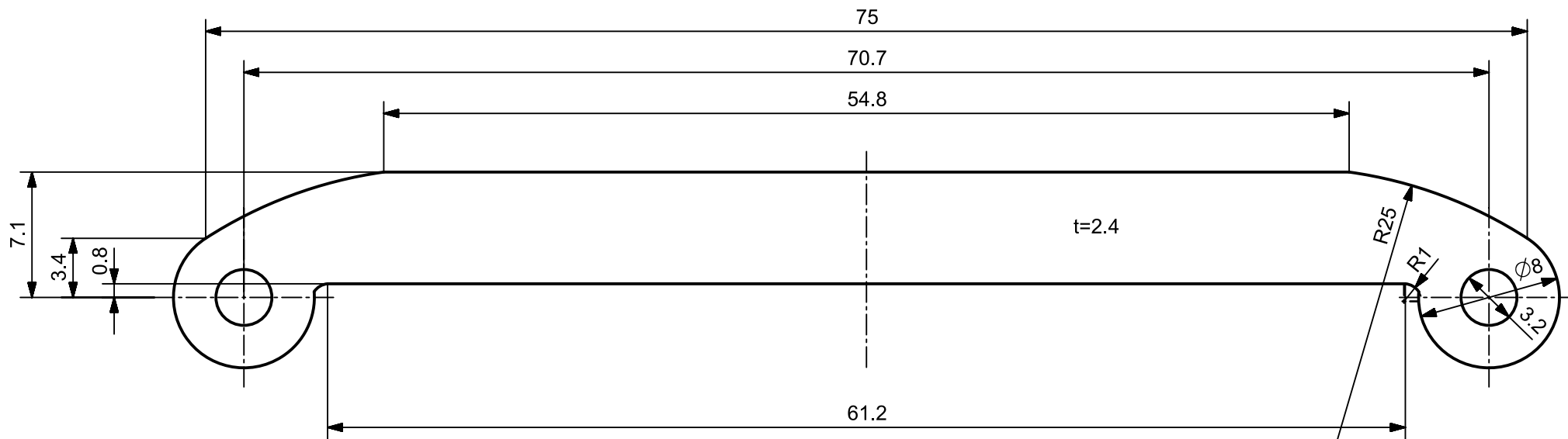
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Lower arm brace

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 1-5

Κλίμ.

3:1

Ημερομηνία

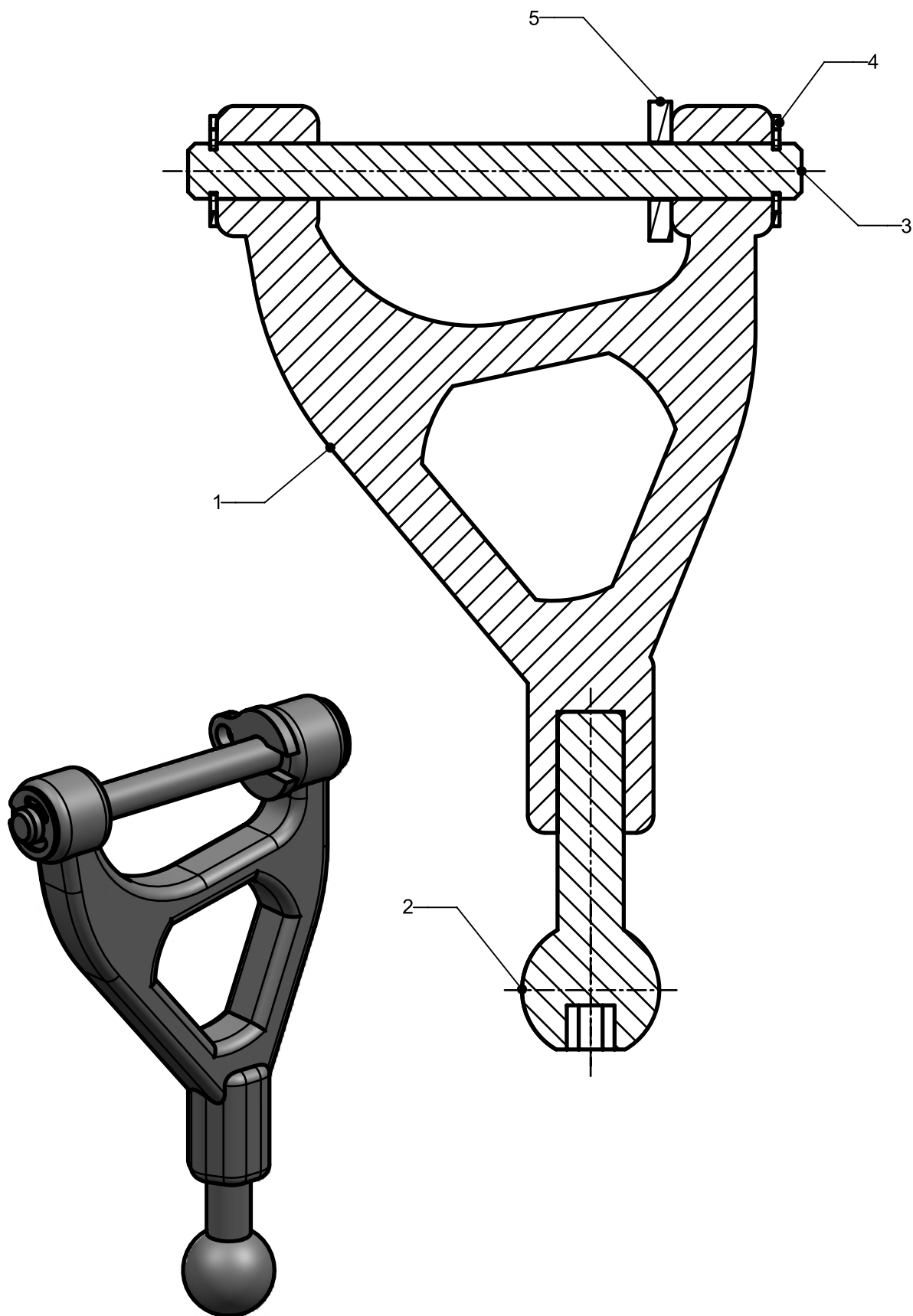
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Upper wishbone assembly

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 2-0

Κλίμ.

3:1

Ημερομηνία

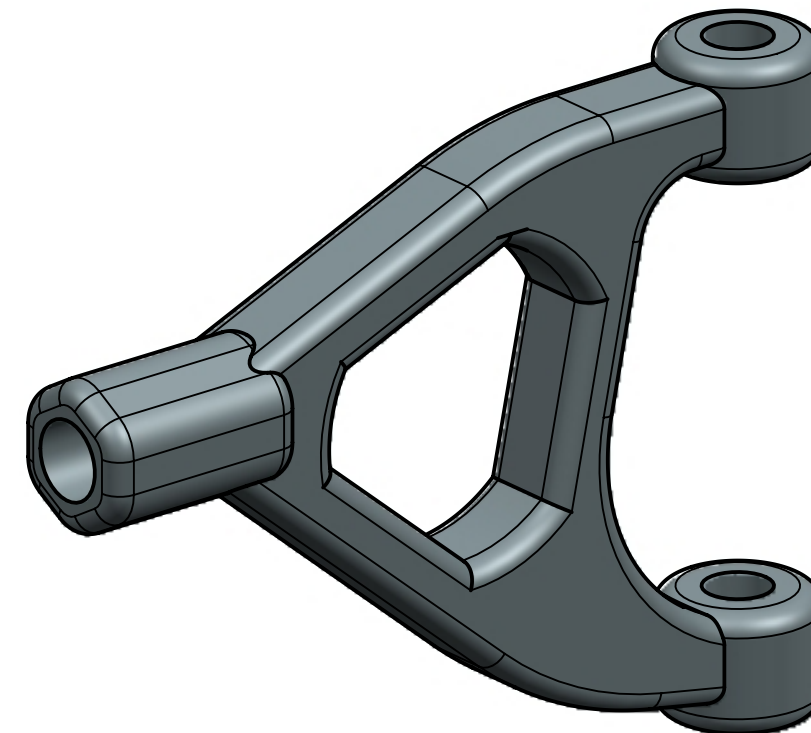
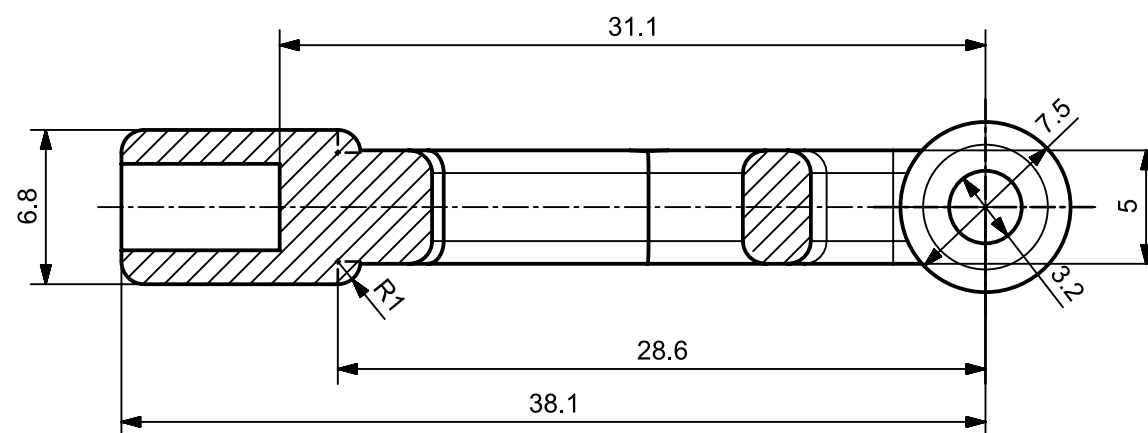
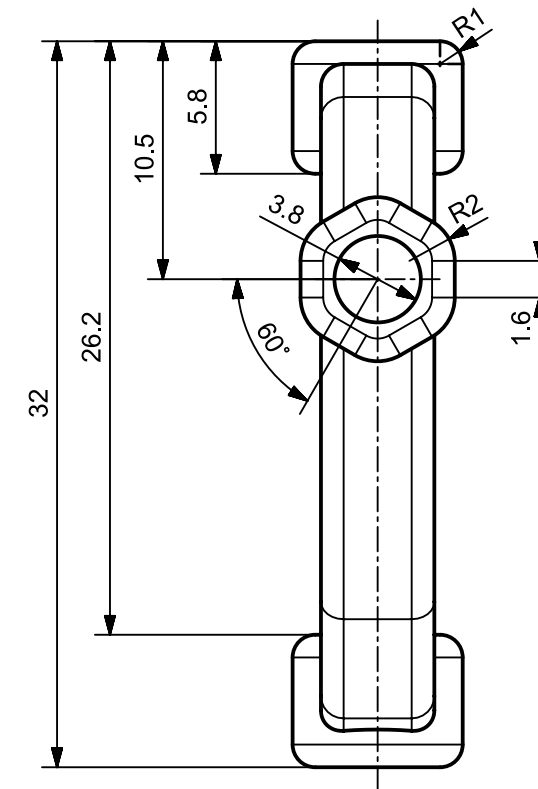
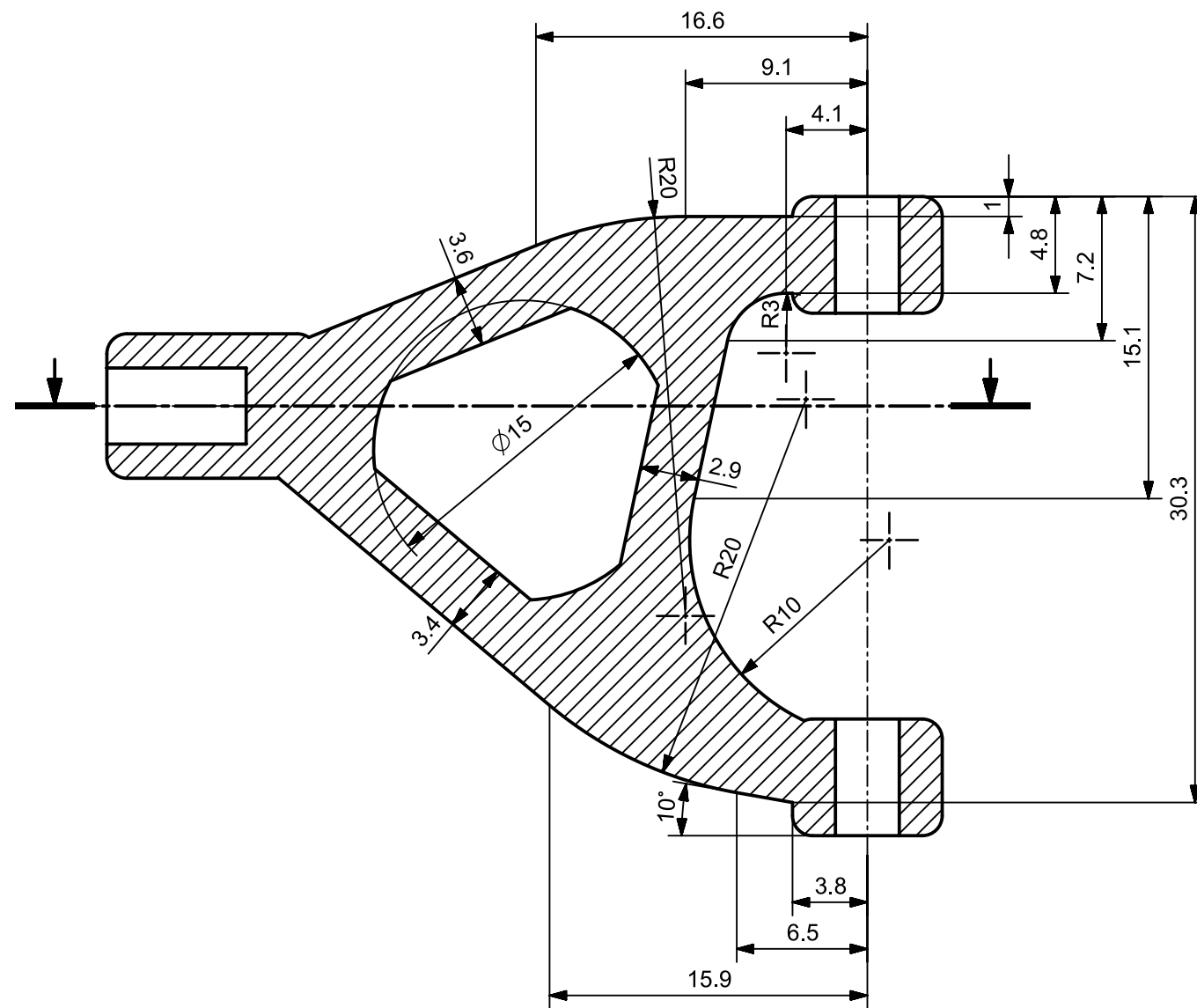
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



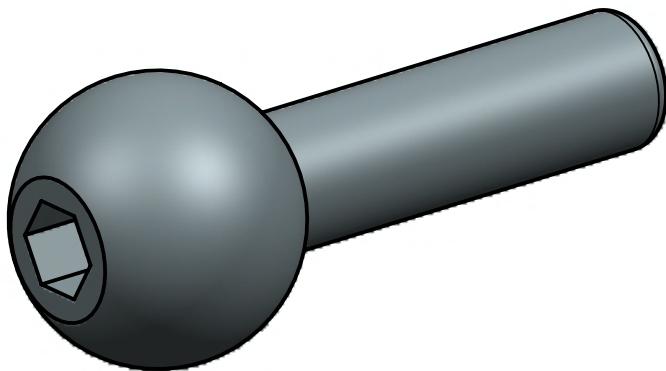
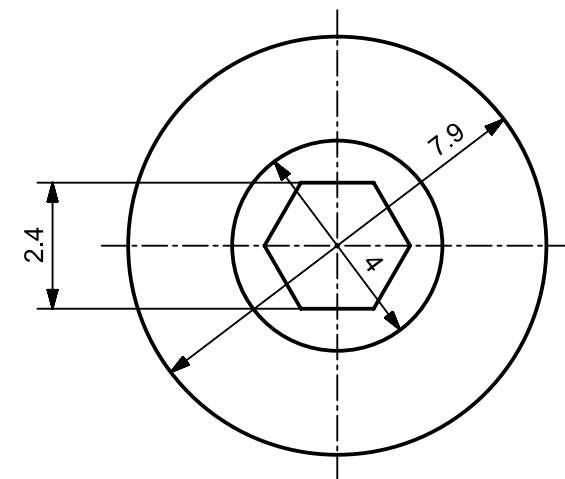
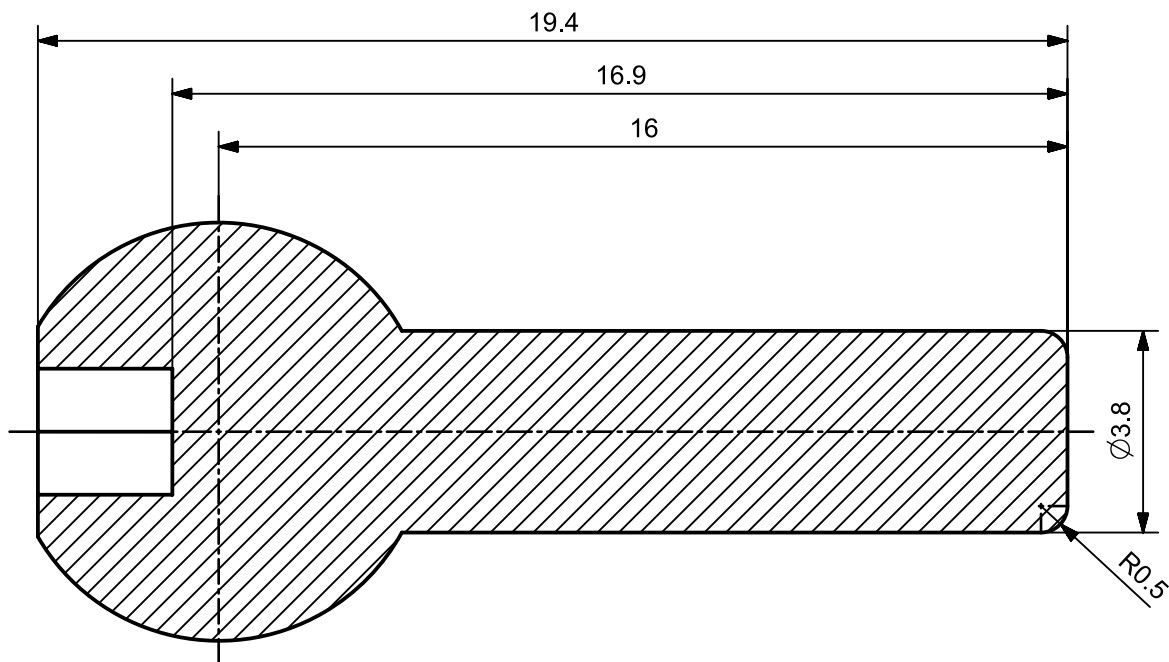
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Upper arm

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός
cl 2-1

Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
3:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Pillow ball

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 2-2

Κλίμ.

7:1

Ημερομηνία

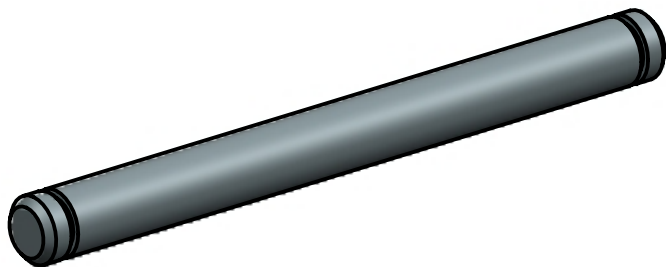
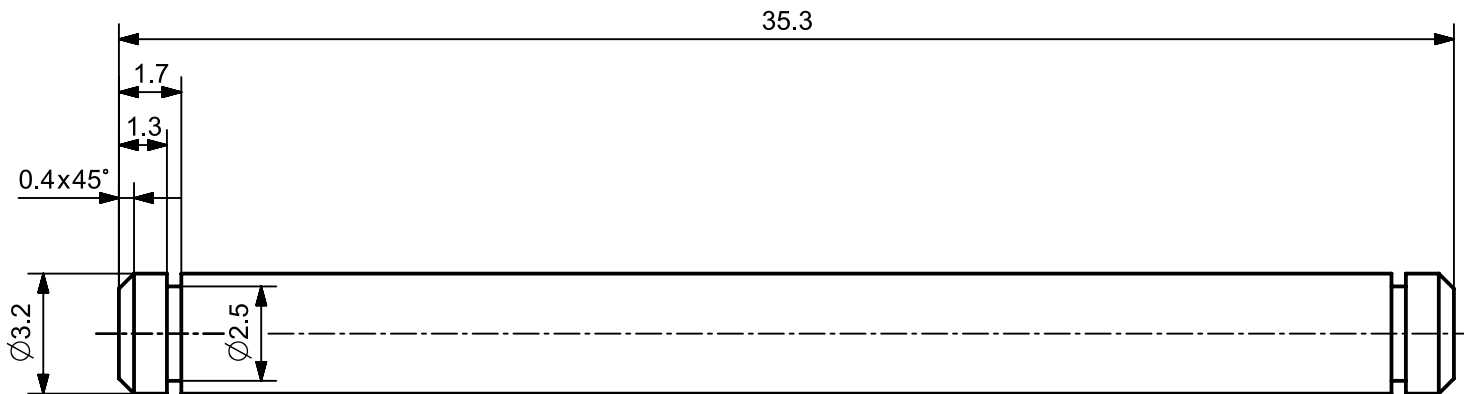
8/2/2020

Γλώσσα

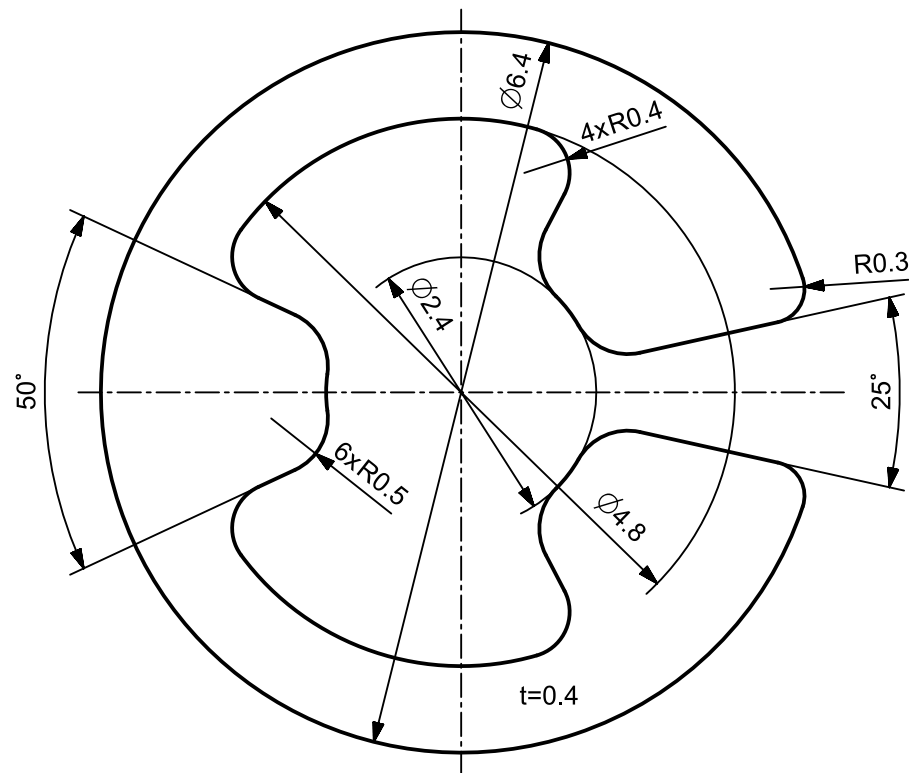
ΕΛ

Φύλλο

1/1



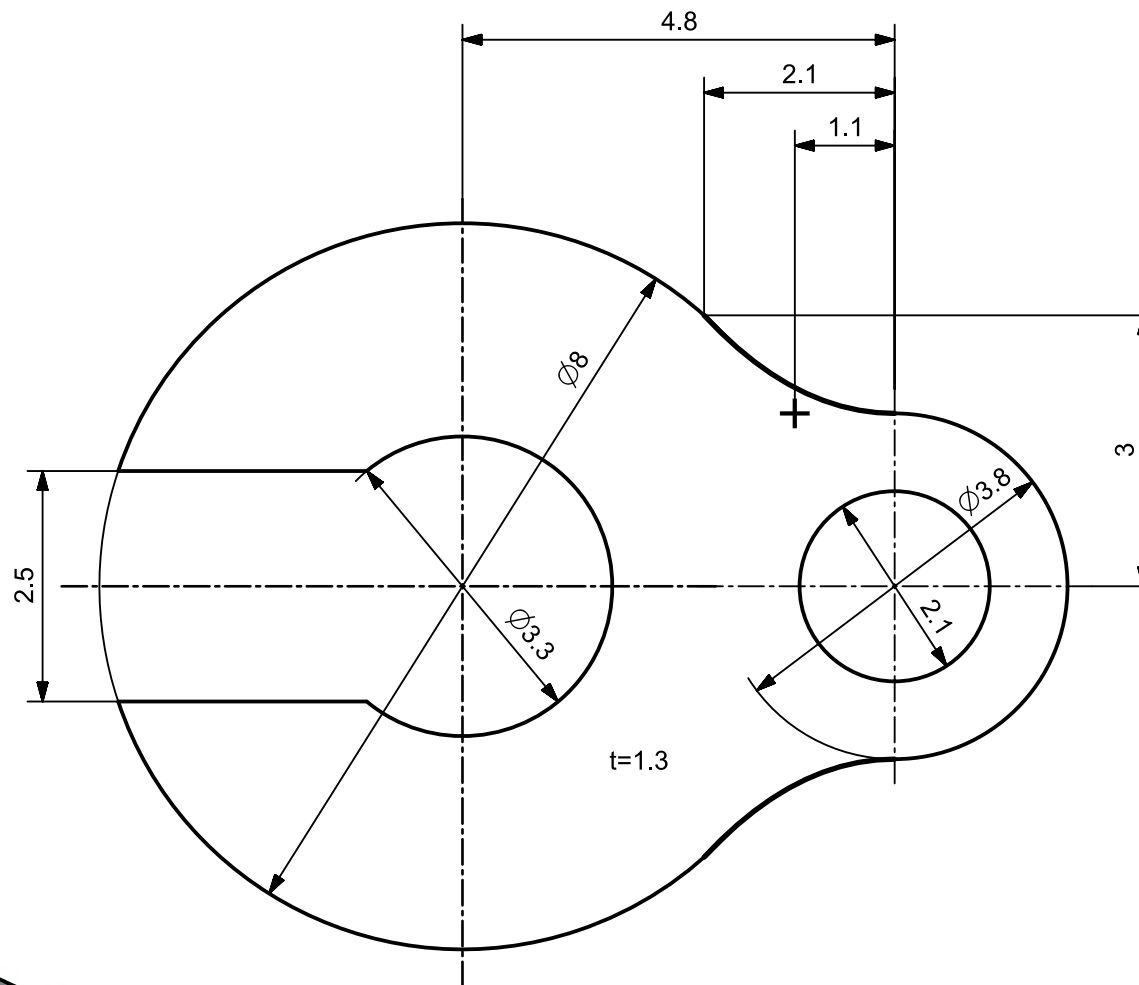
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Upper hinge pin		Αριθμός cl 2-3	
	Κλίμ. 5:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
E-clip

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1
Αριθμός
cl 2-4
Κλίμ. 15:1
Ημερομηνία 8/2/2020
Γλώσσα ΕΛ
Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Adjustment clip

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 2-5

Κλίμ.

12:1

Ημερομηνία

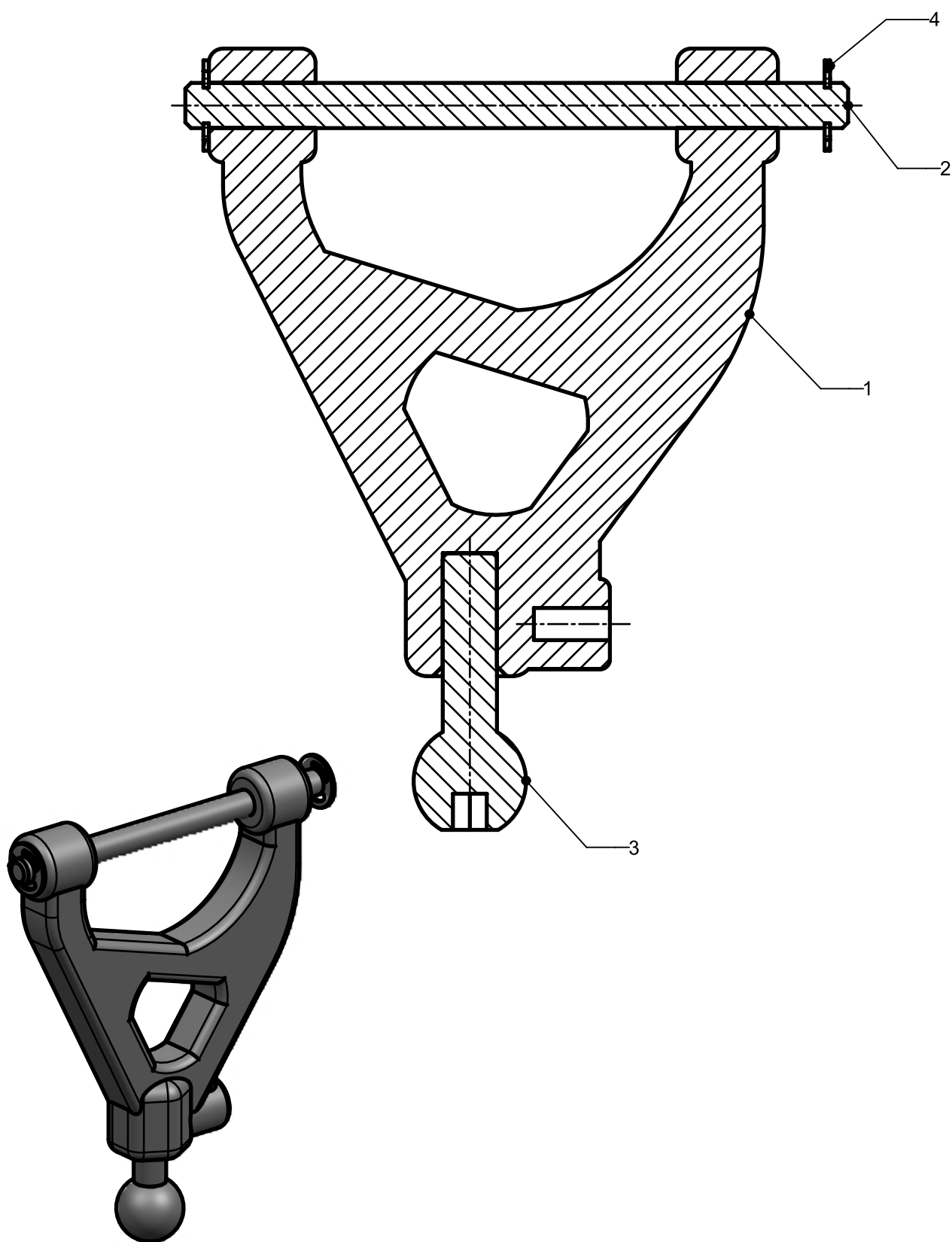
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Lower wishbone assembly

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 3-0

Κλίμ.

2.5:1

Ημερομηνία

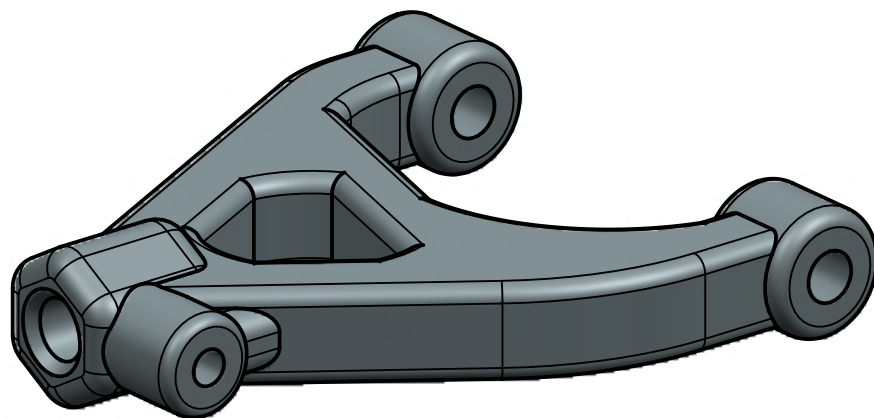
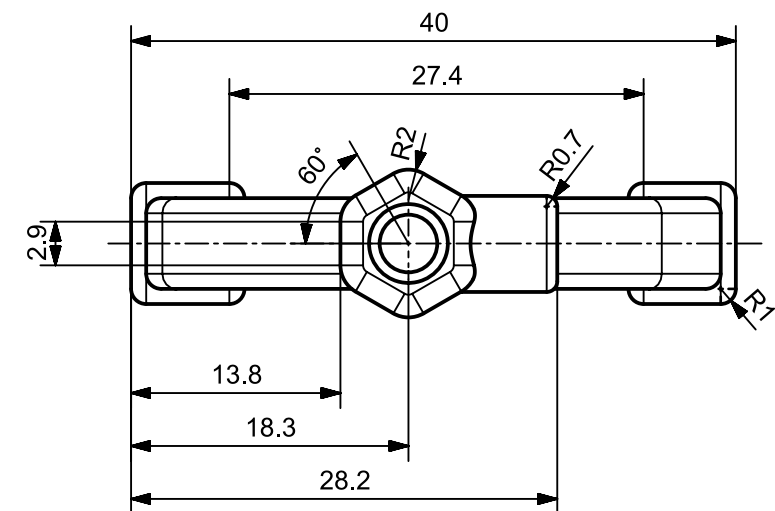
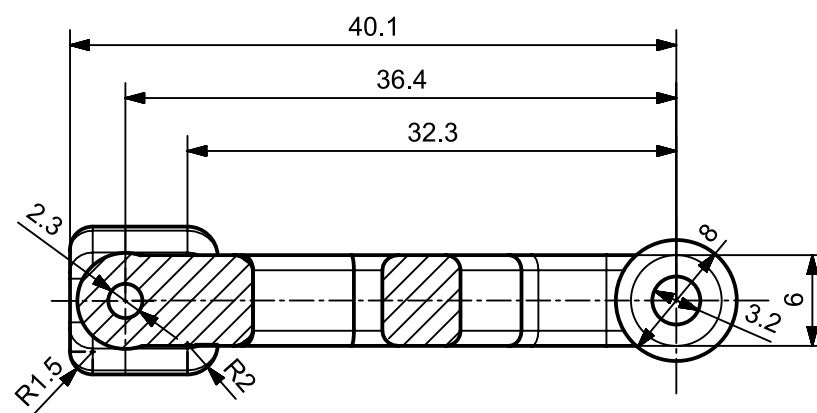
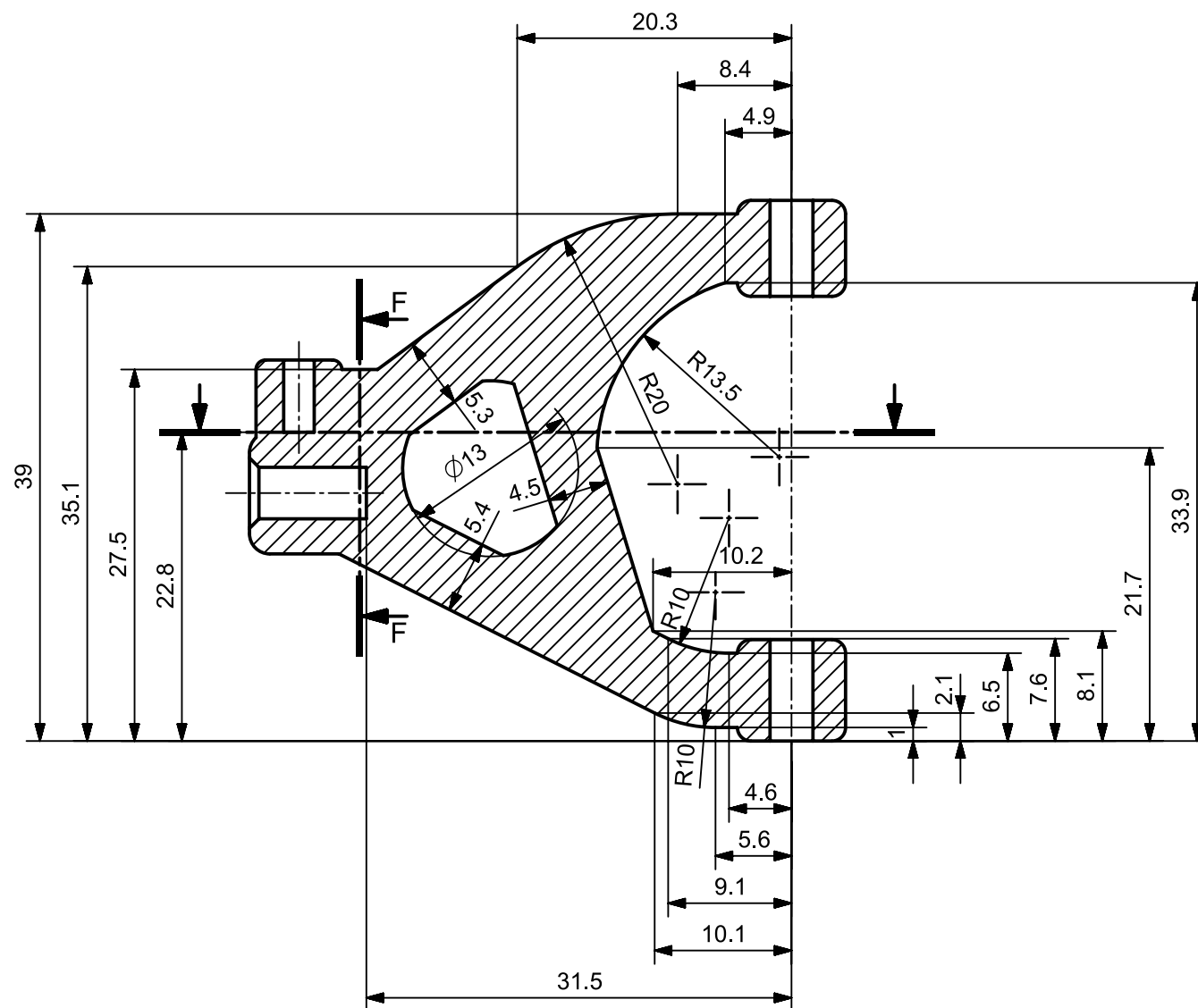
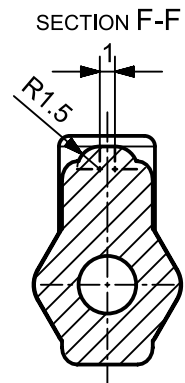
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



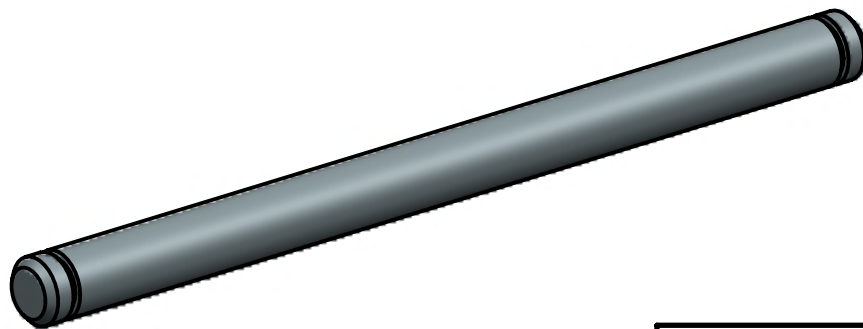
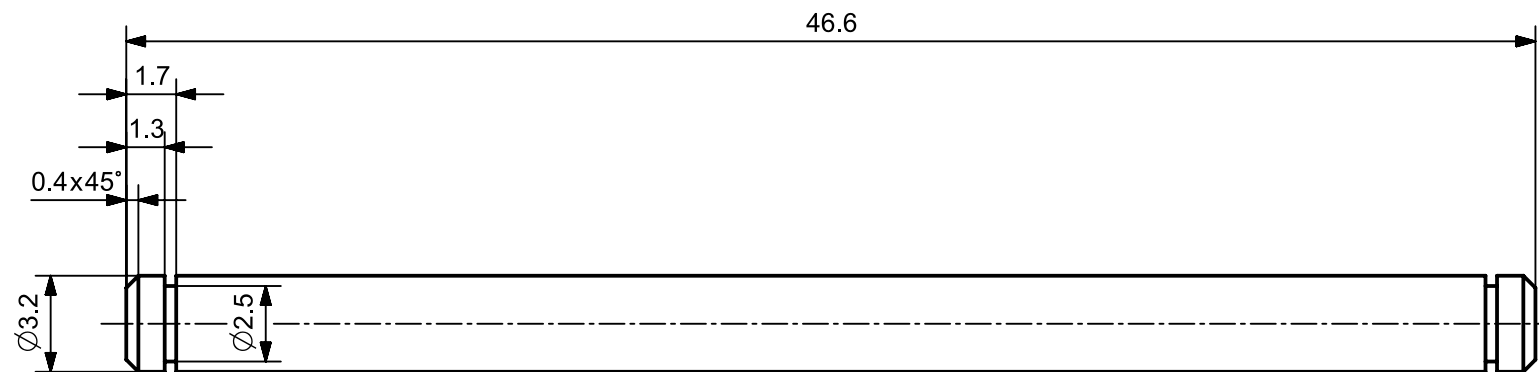
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Lower arm

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

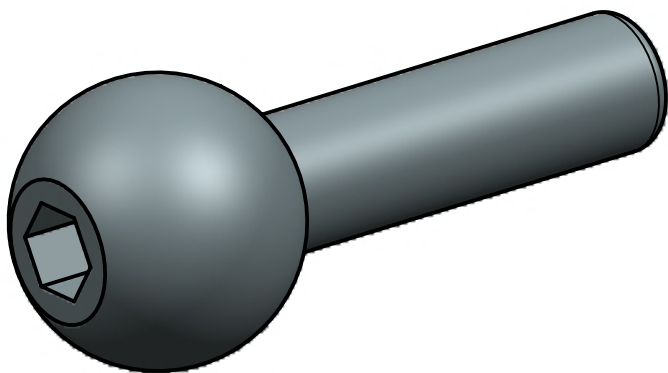
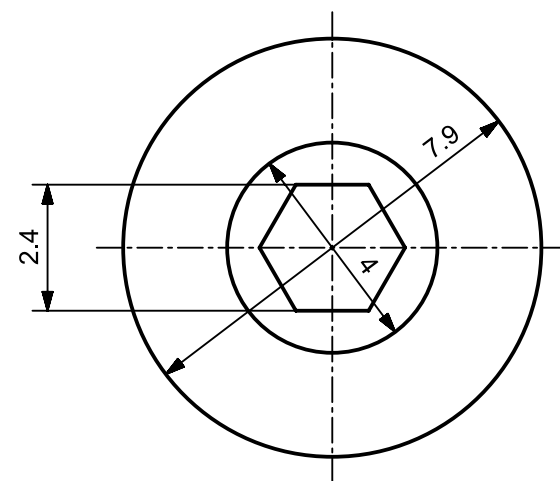
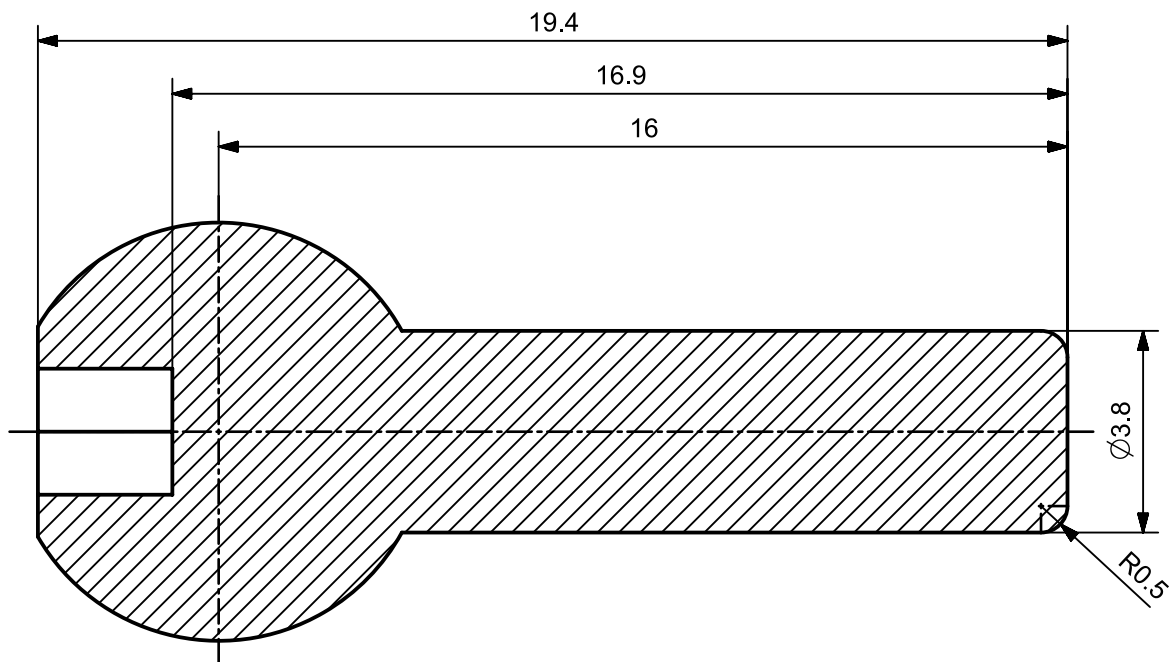
Αριθμός
cl 3-1

Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
2:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
Τίτλος Lower hinge pin		Αριθμός cl 3-2	
Κλίμ. 4:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Pillow ball

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 3-3

Κλίμ.

7:1

Ημερομηνία

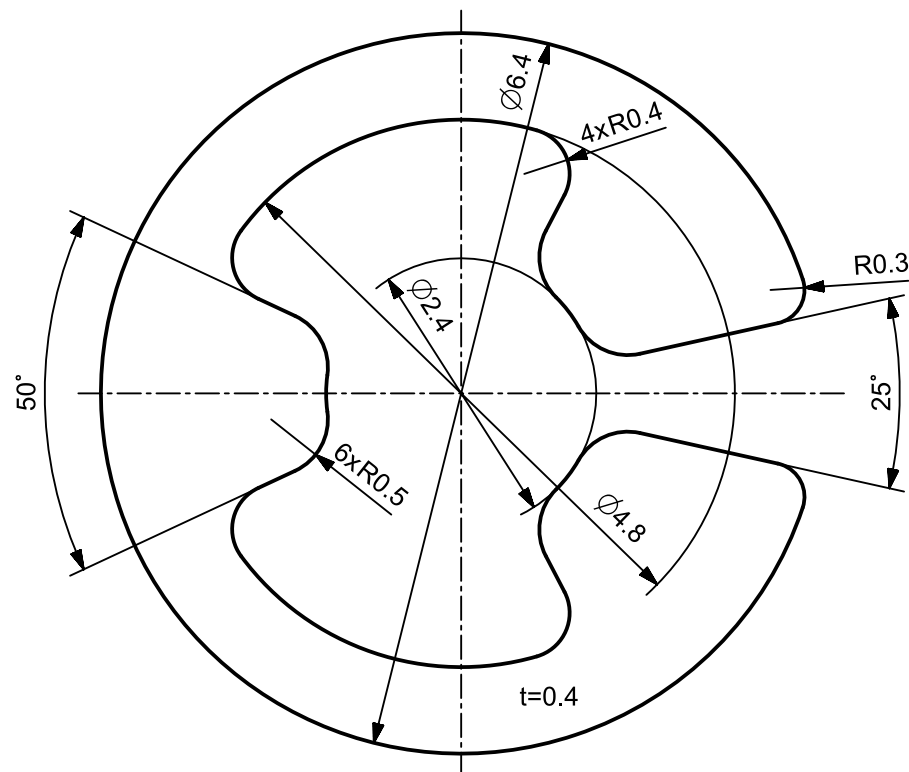
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

E-clip

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 3-3

Κλίμ.

15:1

Ημερομηνία

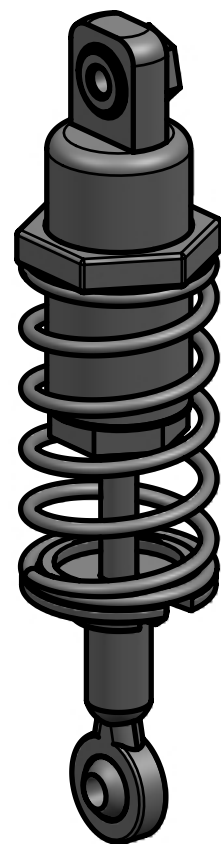
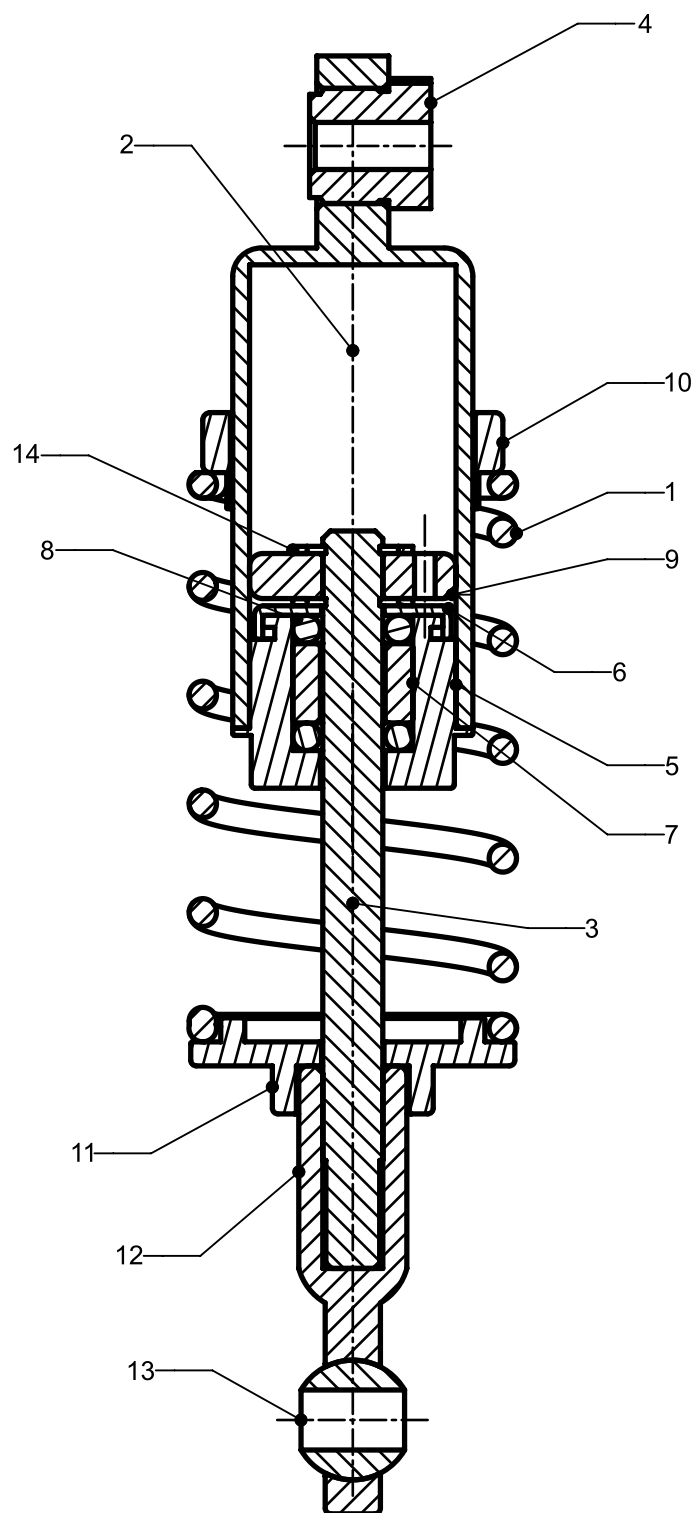
8/2/2020

Γλώσσα

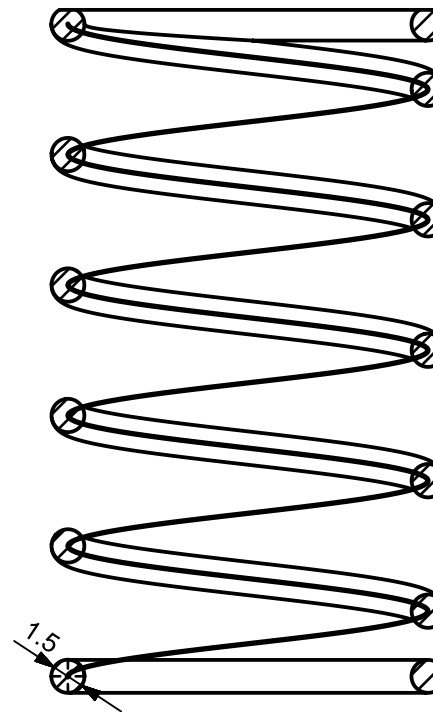
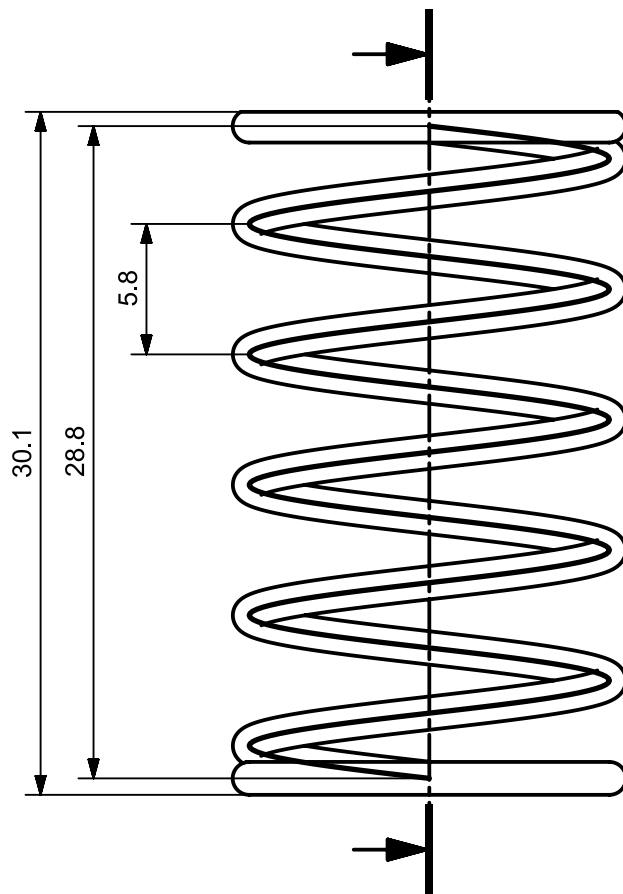
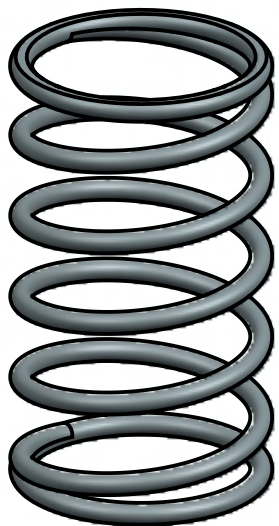
ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές		
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1		
	Τίτλος	Αριθμός		
	Shock absorber assembly	cl 4-0		
	Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	2.5:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Spring

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-1

Κλίμ.

3:1

Ημερομηνία

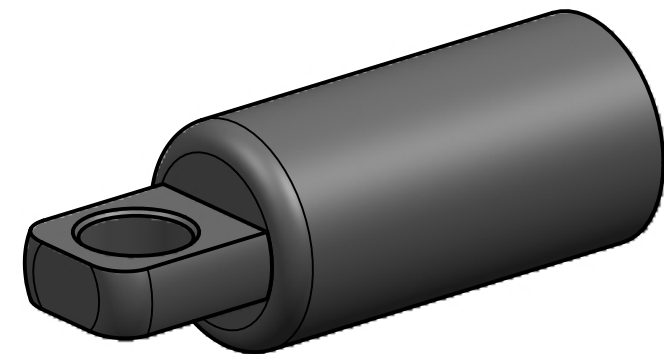
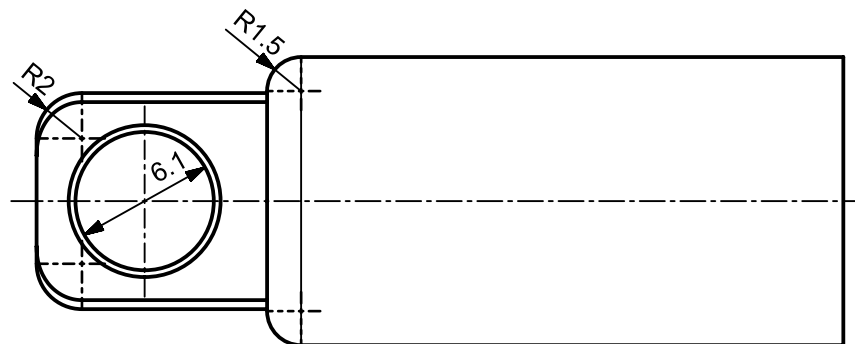
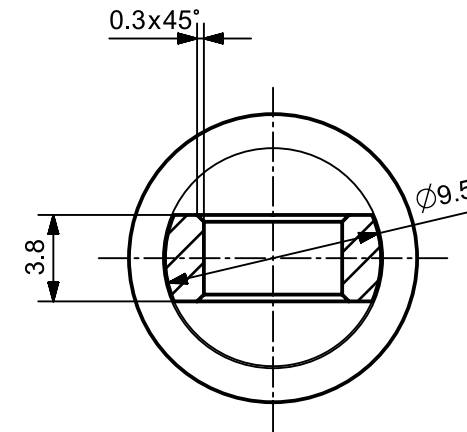
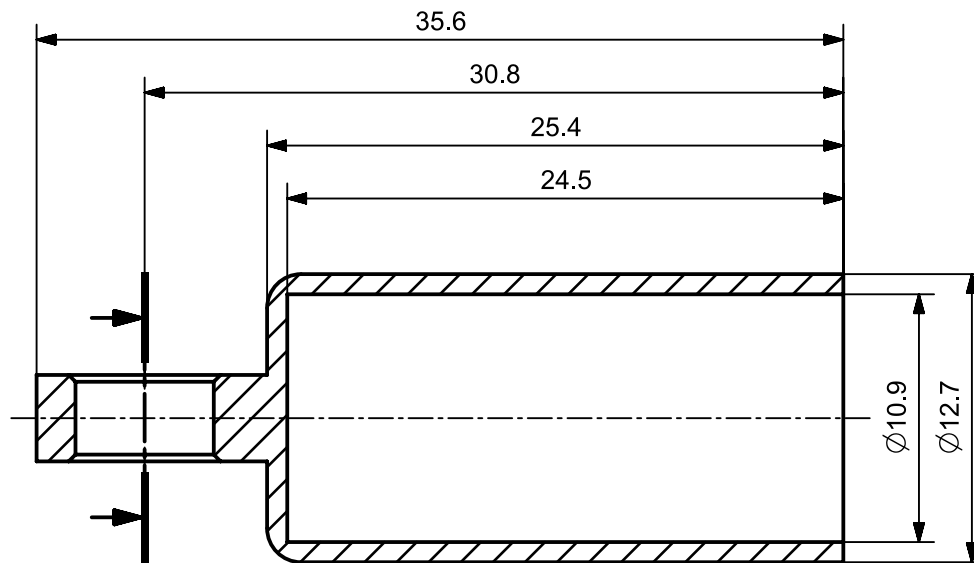
8/2/2020

Γλώσσα

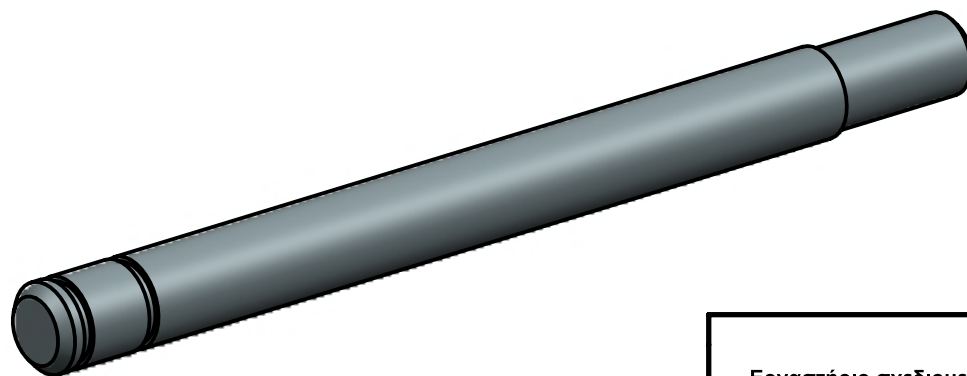
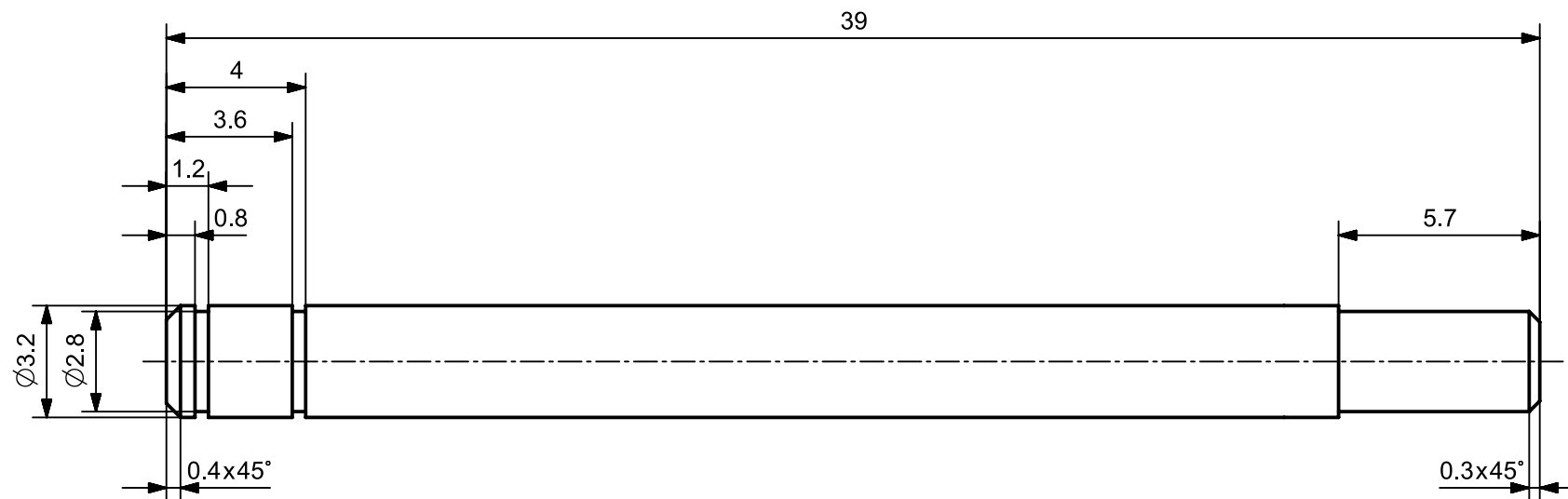
ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Shock body		Αριθμός cl 4-2	
	Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	3:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Shock shaft

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-3

Κλίμ.

5:1

Ημερομηνία

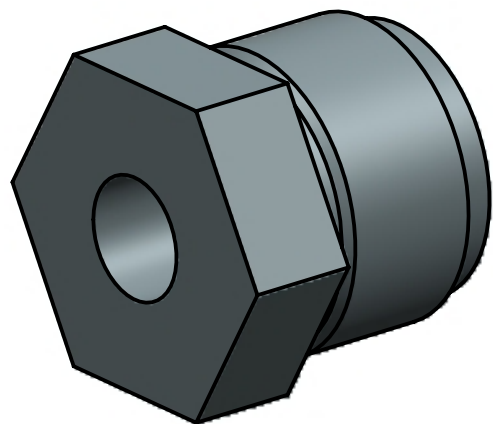
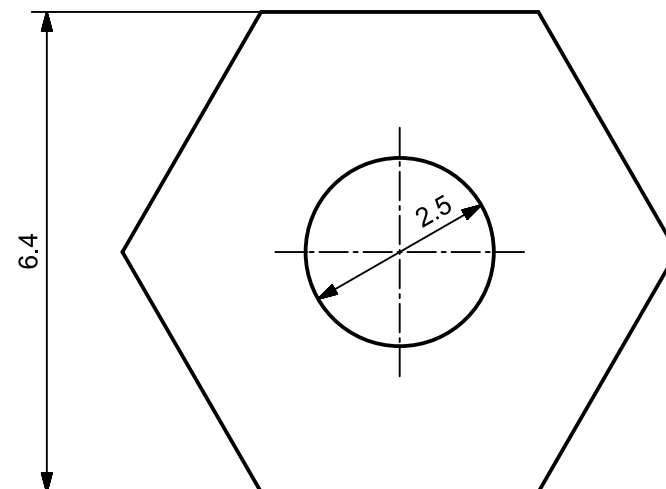
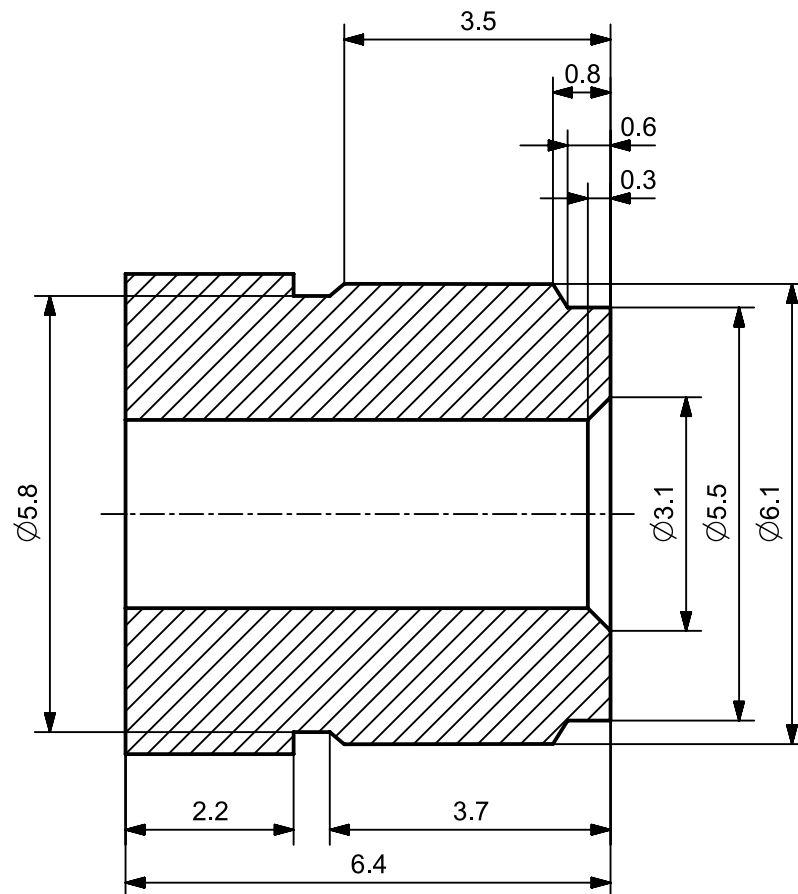
8/2/2020

Γλώσσα

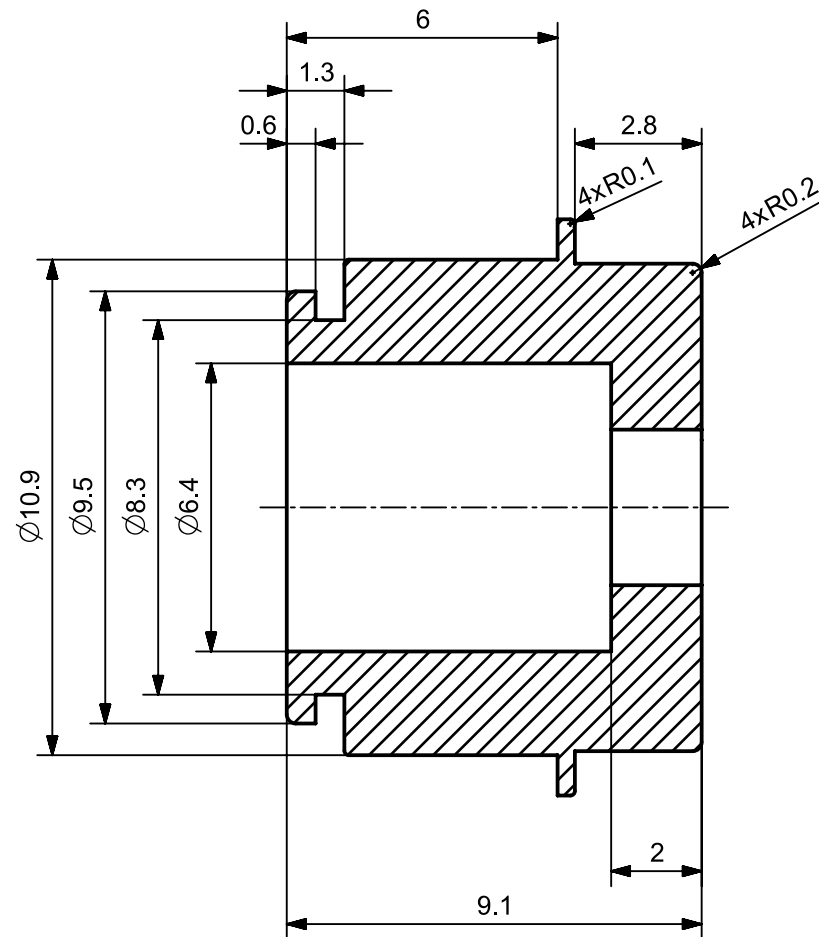
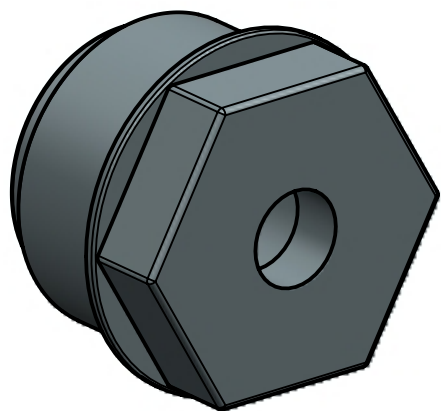
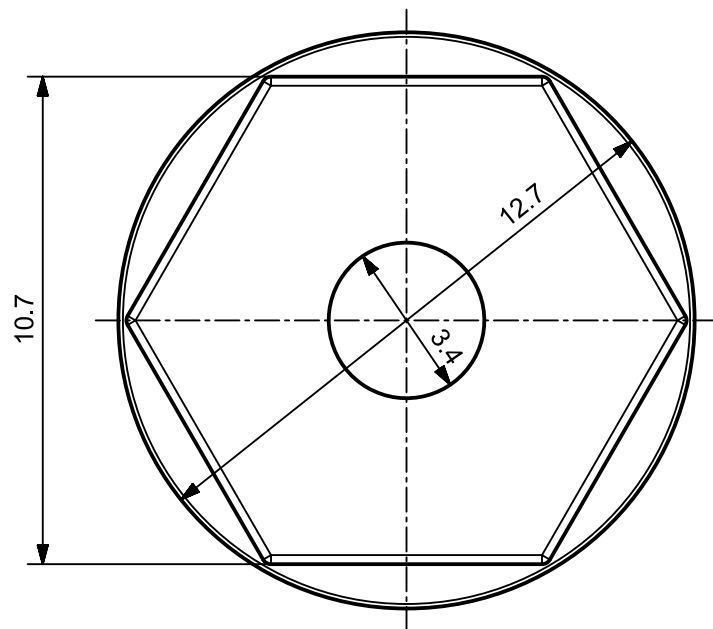
ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Shock bushing		Αριθμός cl 4-4	
	Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	10:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Shock cartridge

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-5

Κλίμ.

6:1

Ημερομηνία

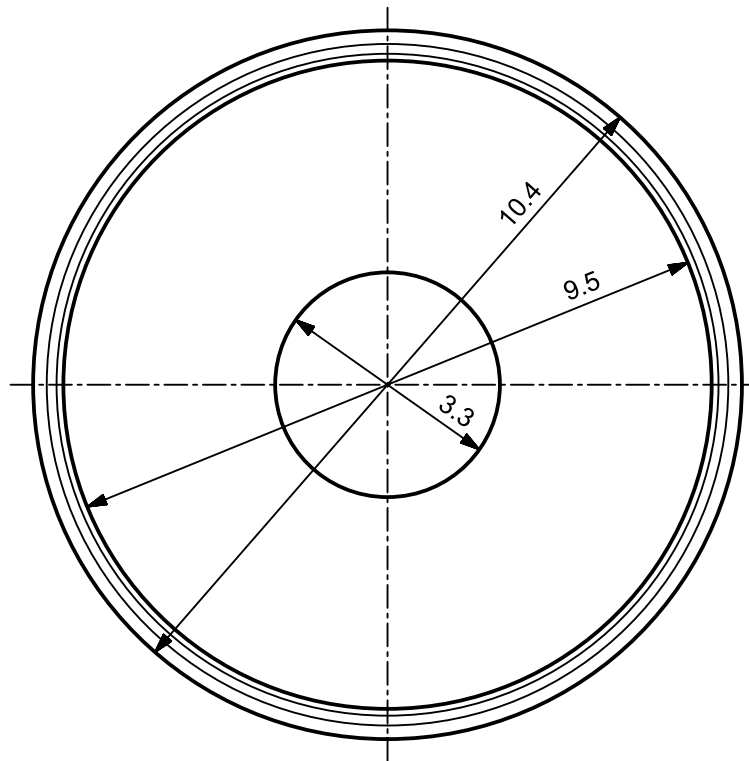
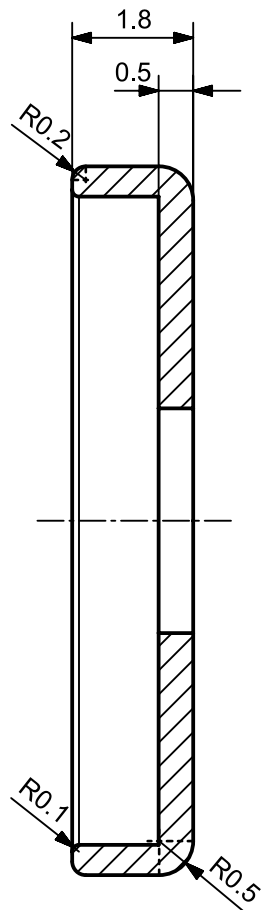
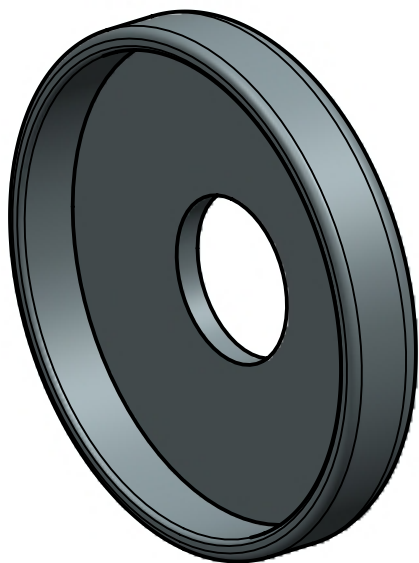
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Shock cartridge cover

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-6

Κλίμ.

9:1

Ημερομηνία

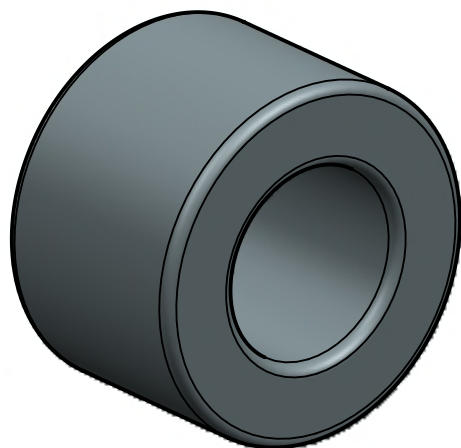
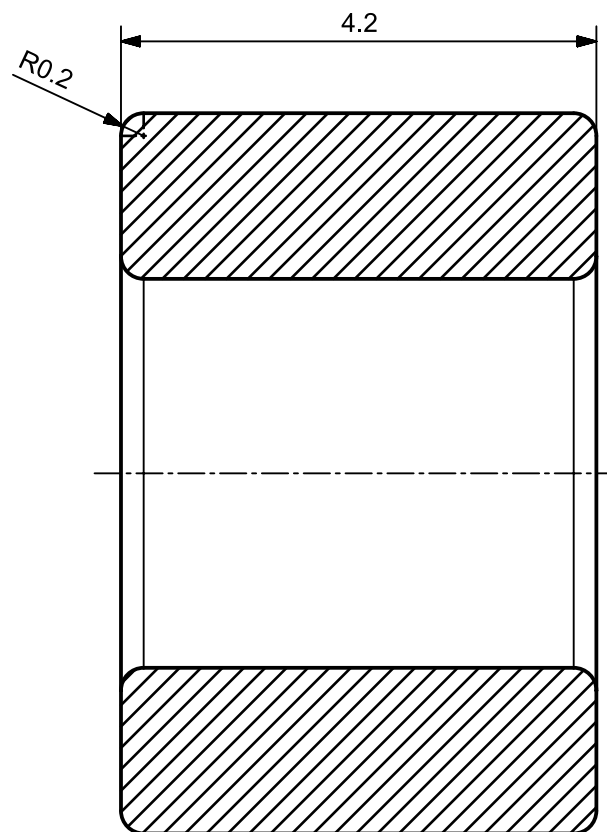
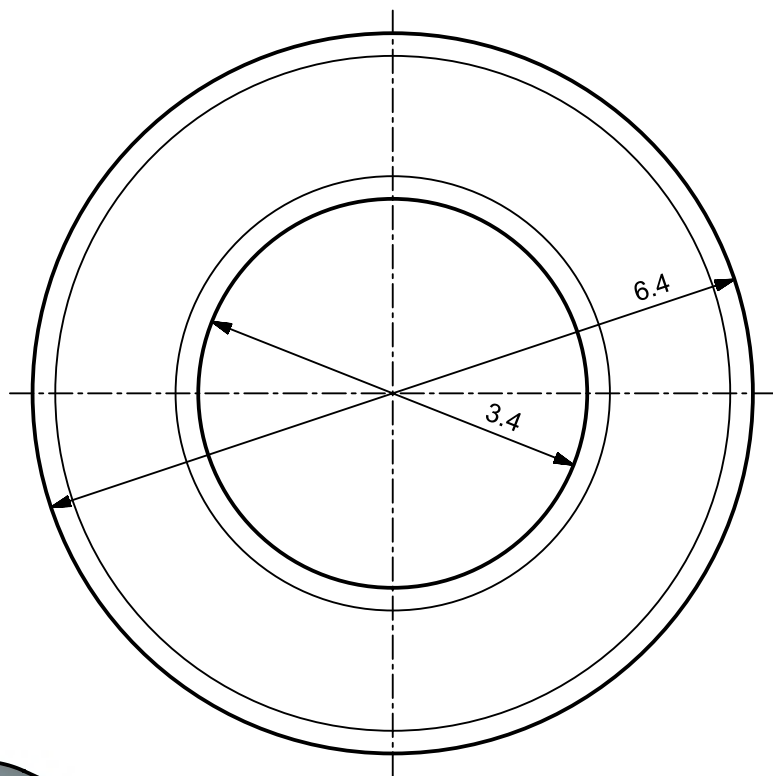
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Shock cartridge spacer

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-7

Κλίμ.

15:1

Ημερομηνία

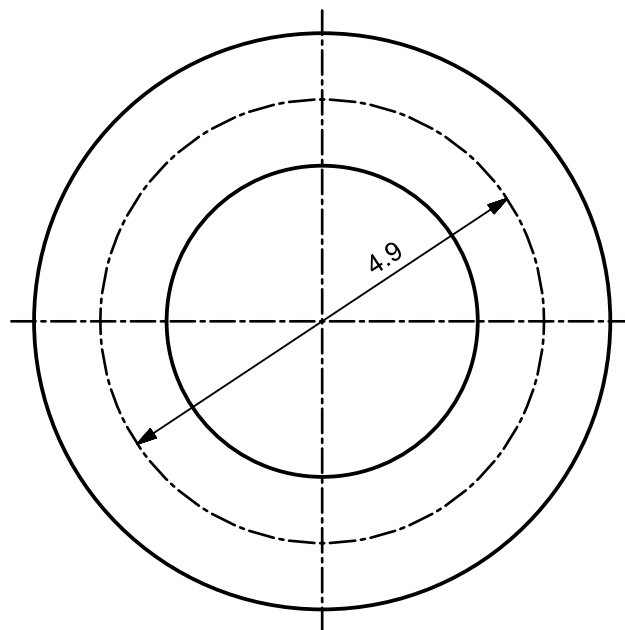
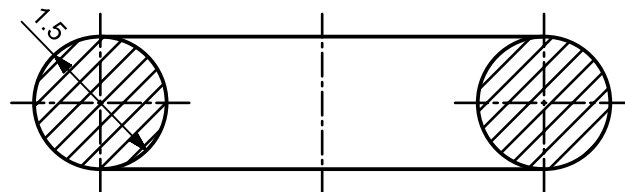
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

O-ring

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

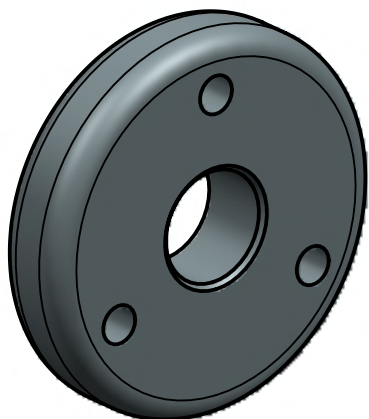
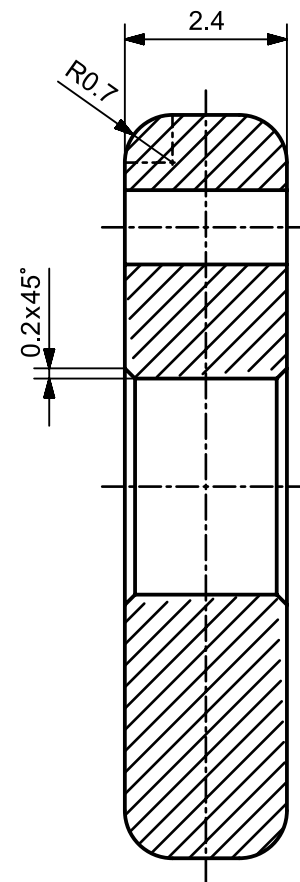
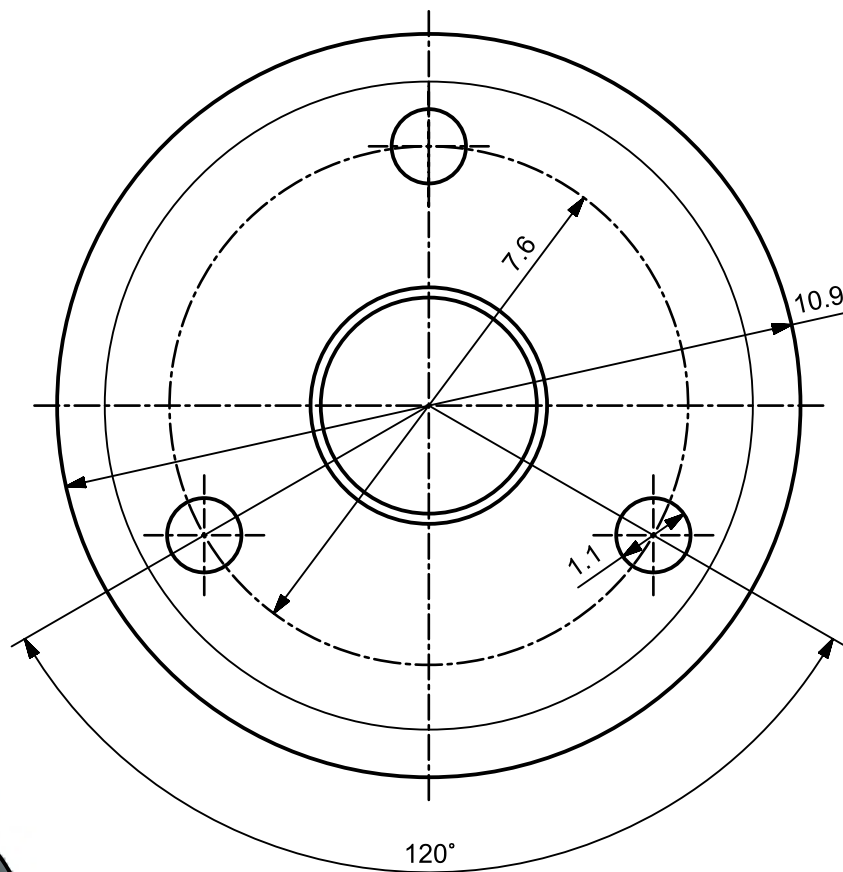
cl 4-8

Κλιμ.
12:1

Ημερομηνία
8/2/2020

Γλώσσα
ΕΛ

Φύλλο
1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Piston

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-9

Κλίμ.

9:1

Ημερομηνία

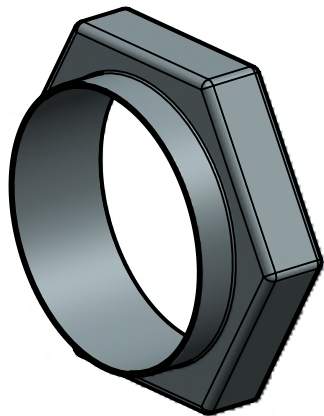
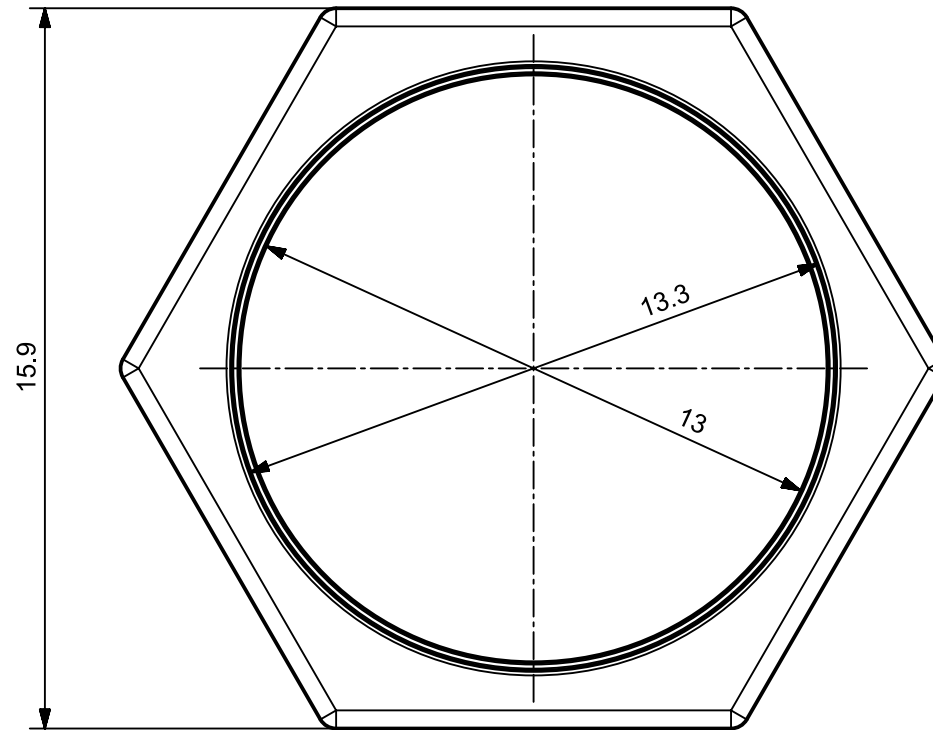
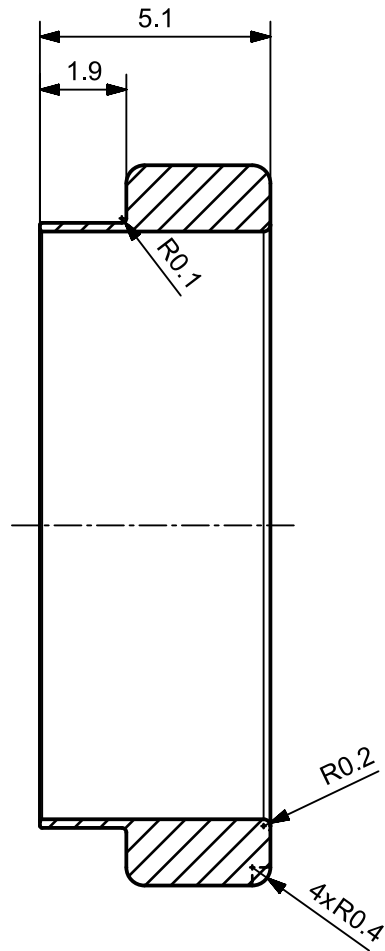
8/2/2020

Γλώσσα

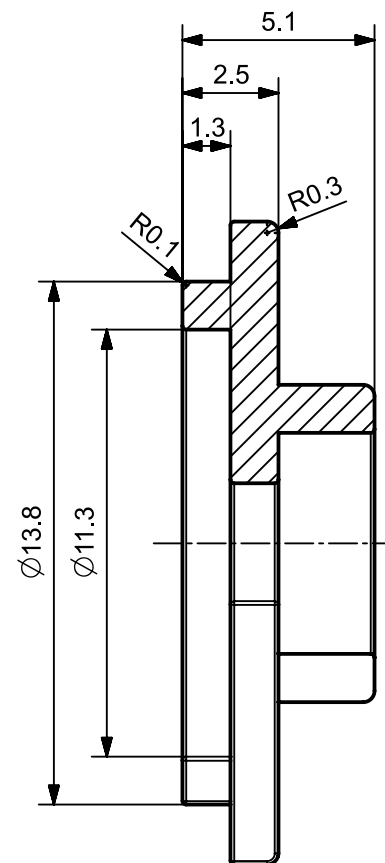
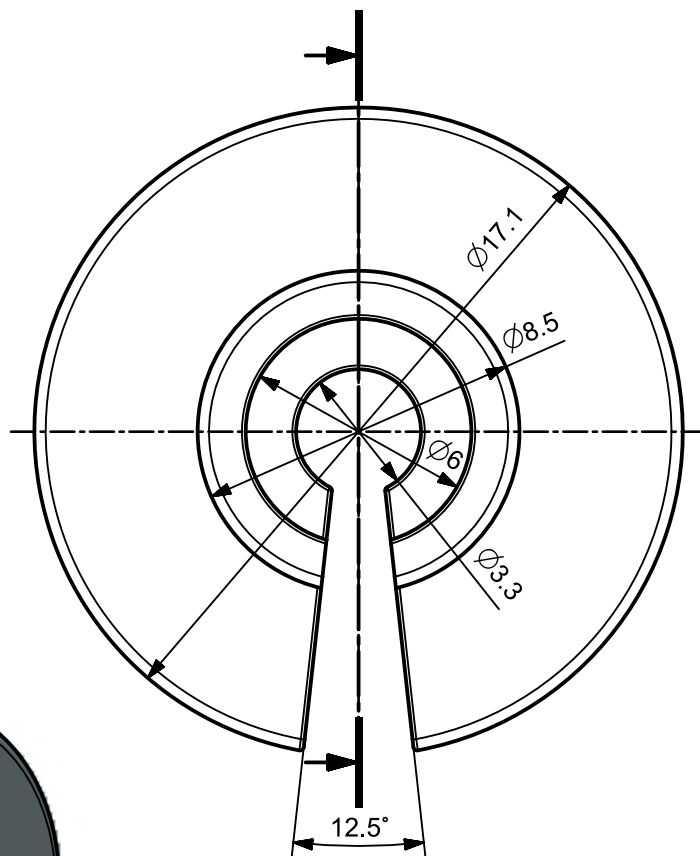
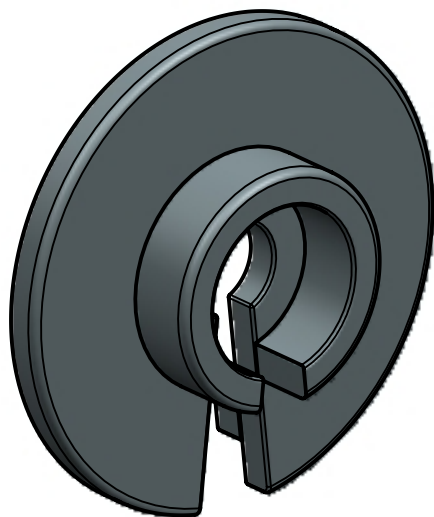
ΕΛ

Φύλλο

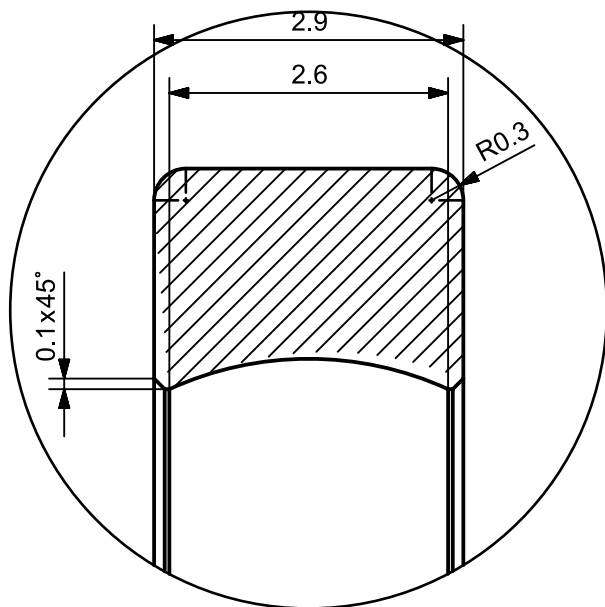
1/1



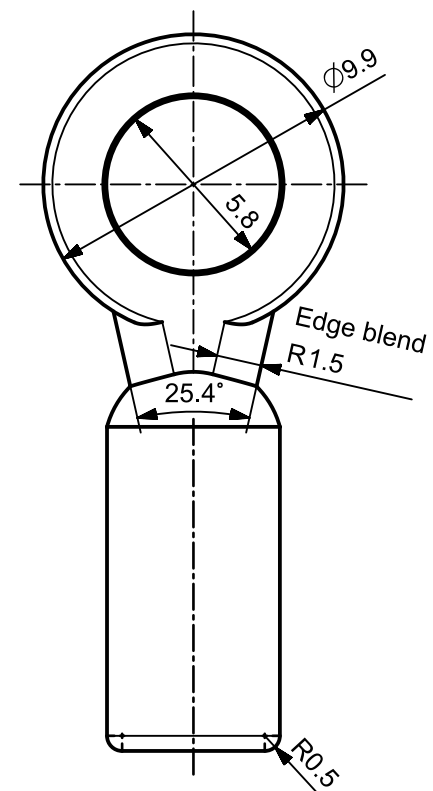
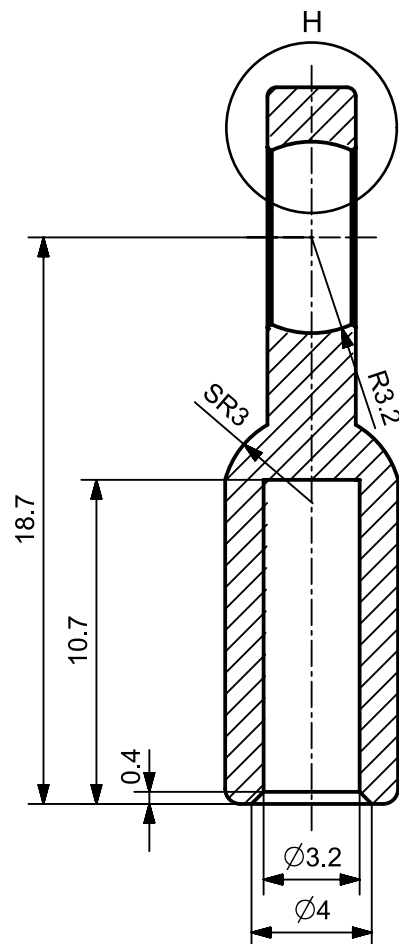
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Shock spring adjustment nut		Αριθμός cl 4-10	
	Κλιμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	6:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Spring cup		Αριθμός cl 4-11	
	Κλιμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	6:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



DETAIL H
SCALE 14:1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Ball end

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-12

Κλίμ.

4:1

Ημερομηνία

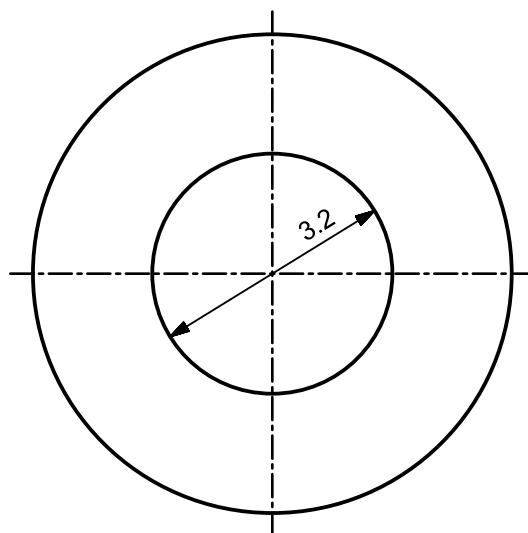
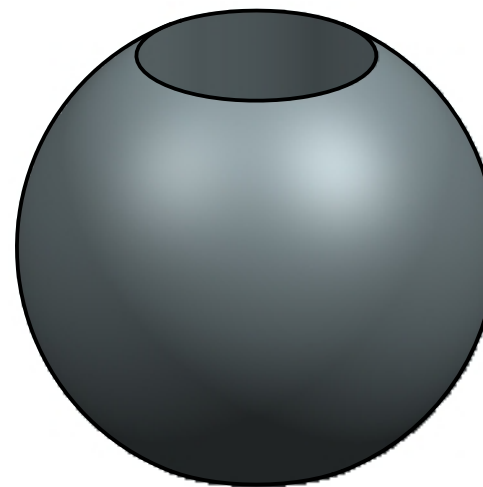
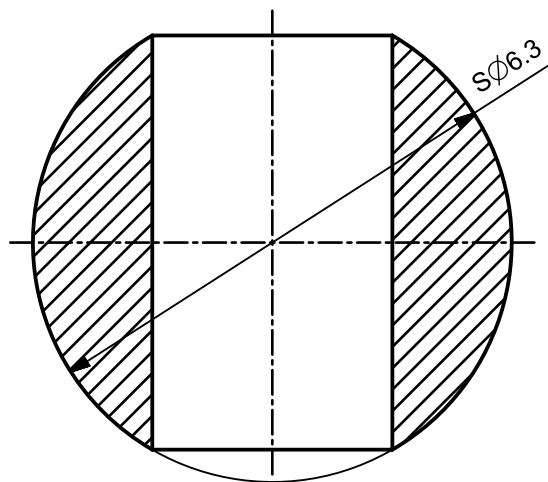
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Misc ball

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-13

Κλίμ.

10:1

Ημερομηνία

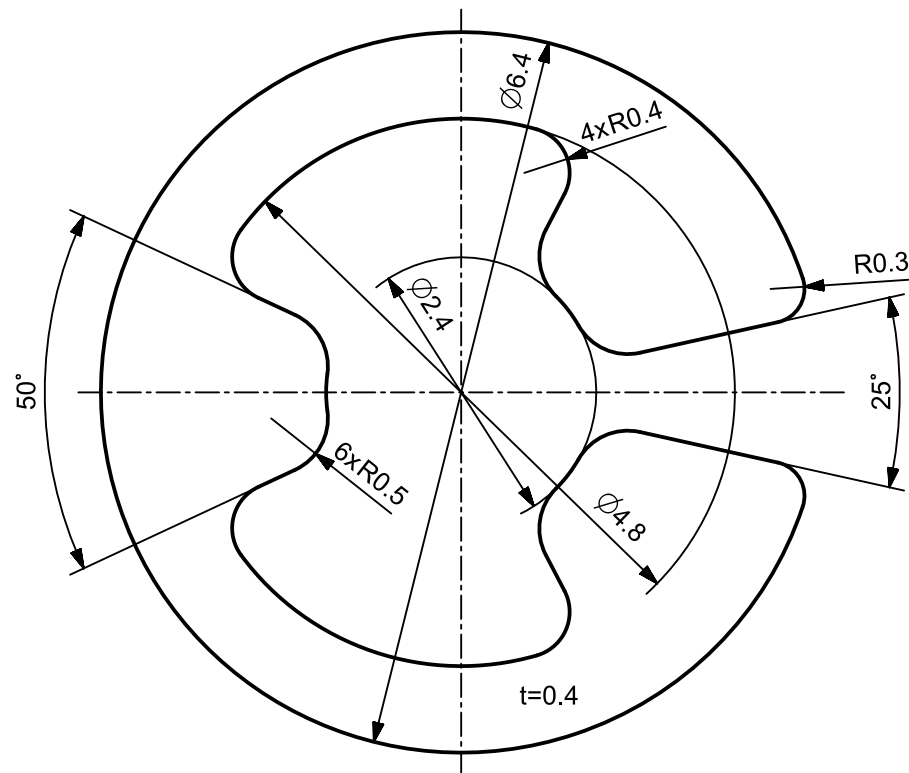
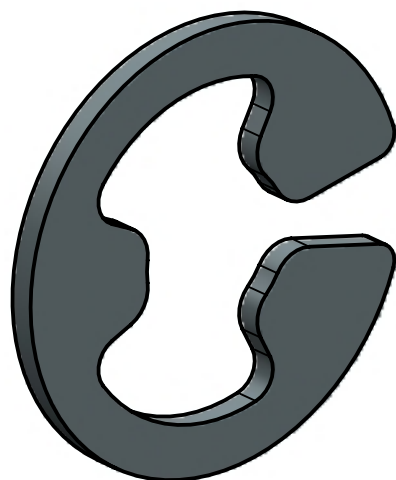
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

E-clip

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 4-14

Κλίμ.

15:1

Ημερομηνία

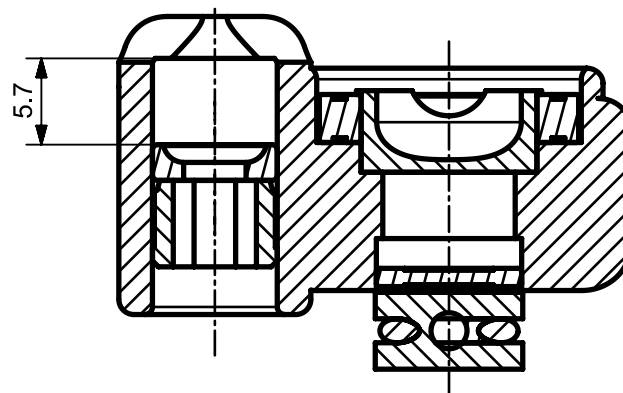
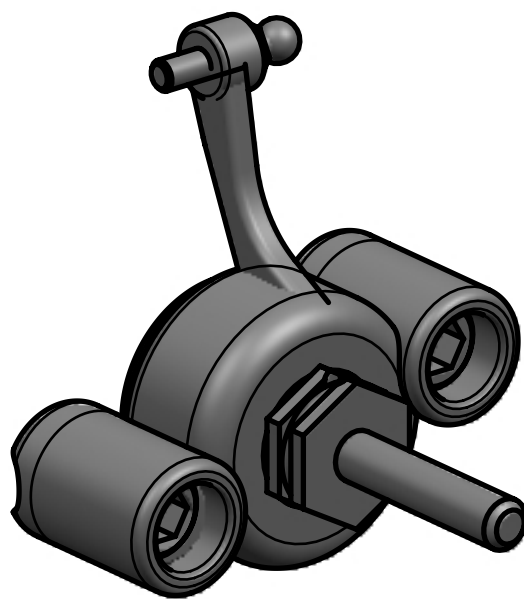
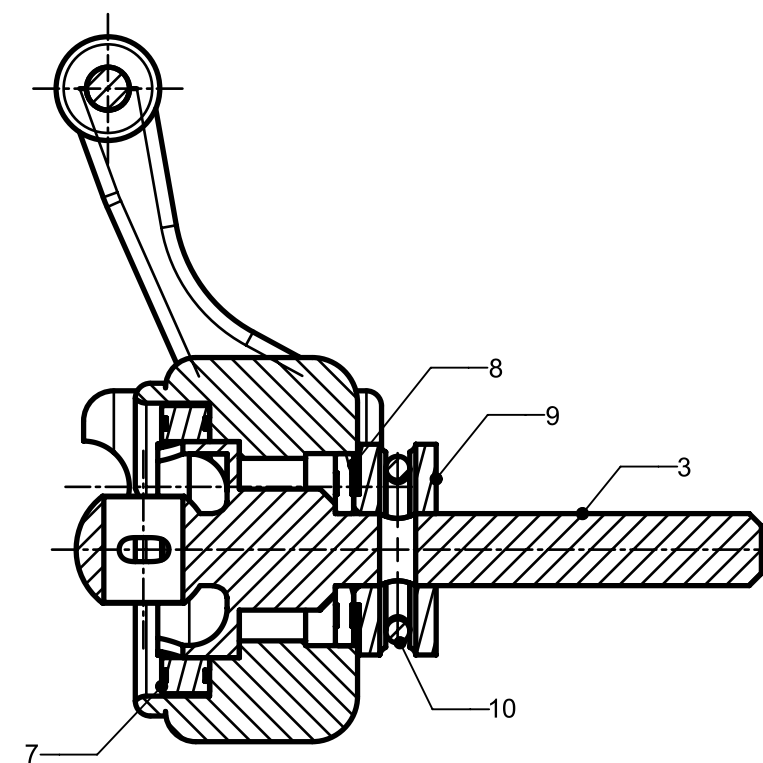
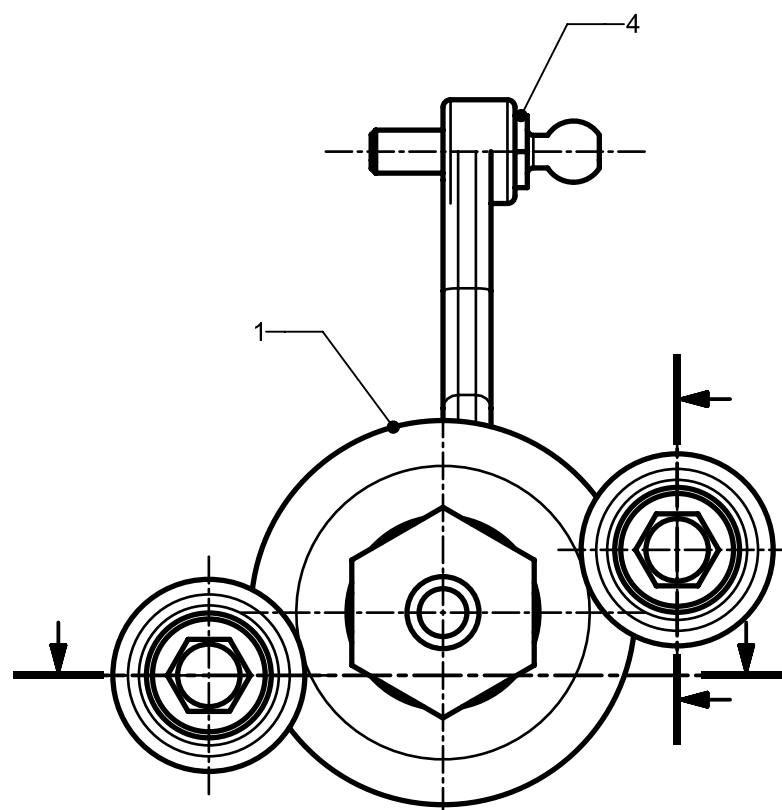
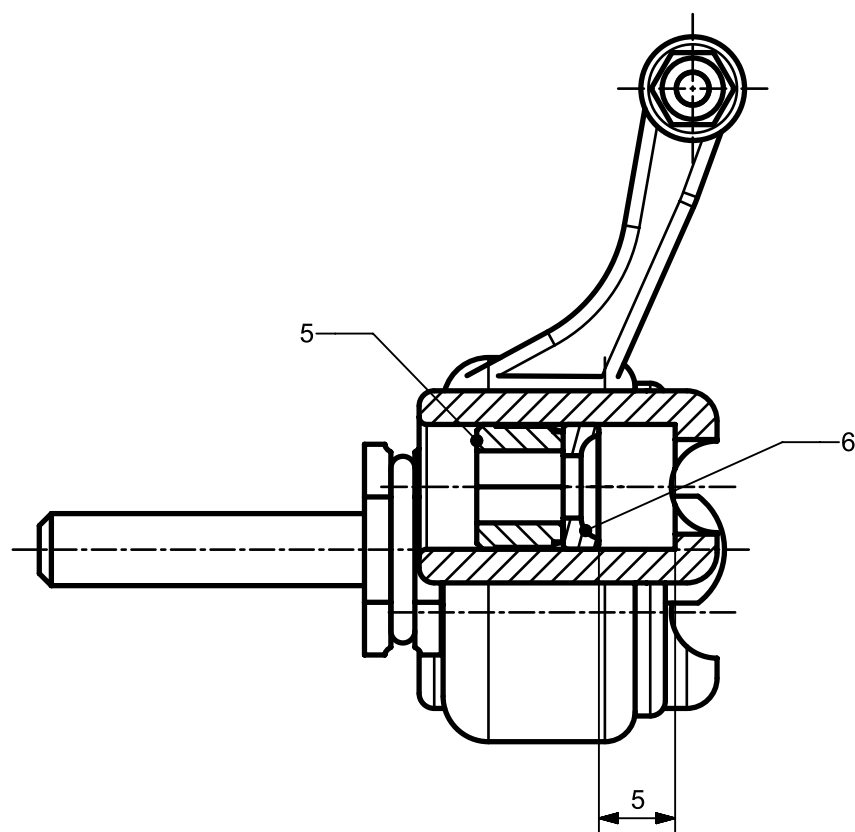
8/2/2020

Γλώσσα

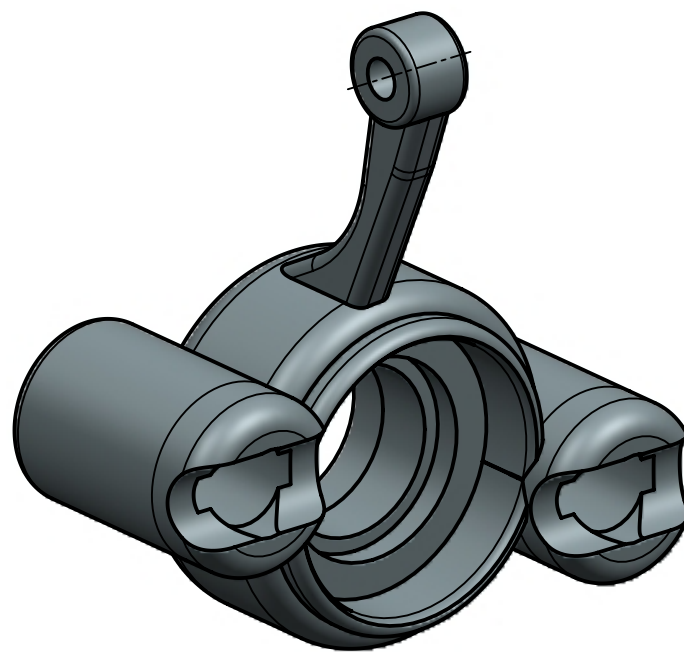
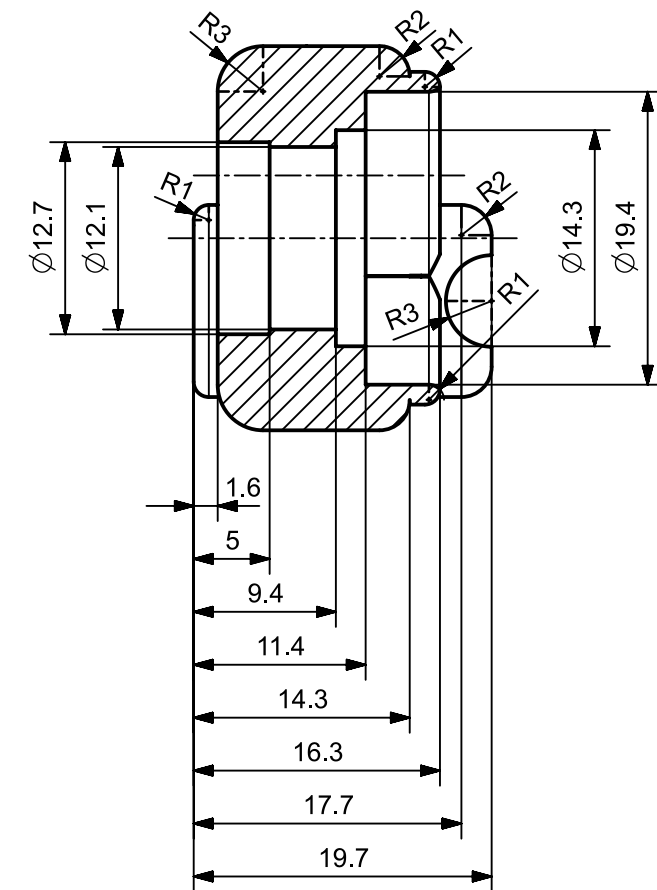
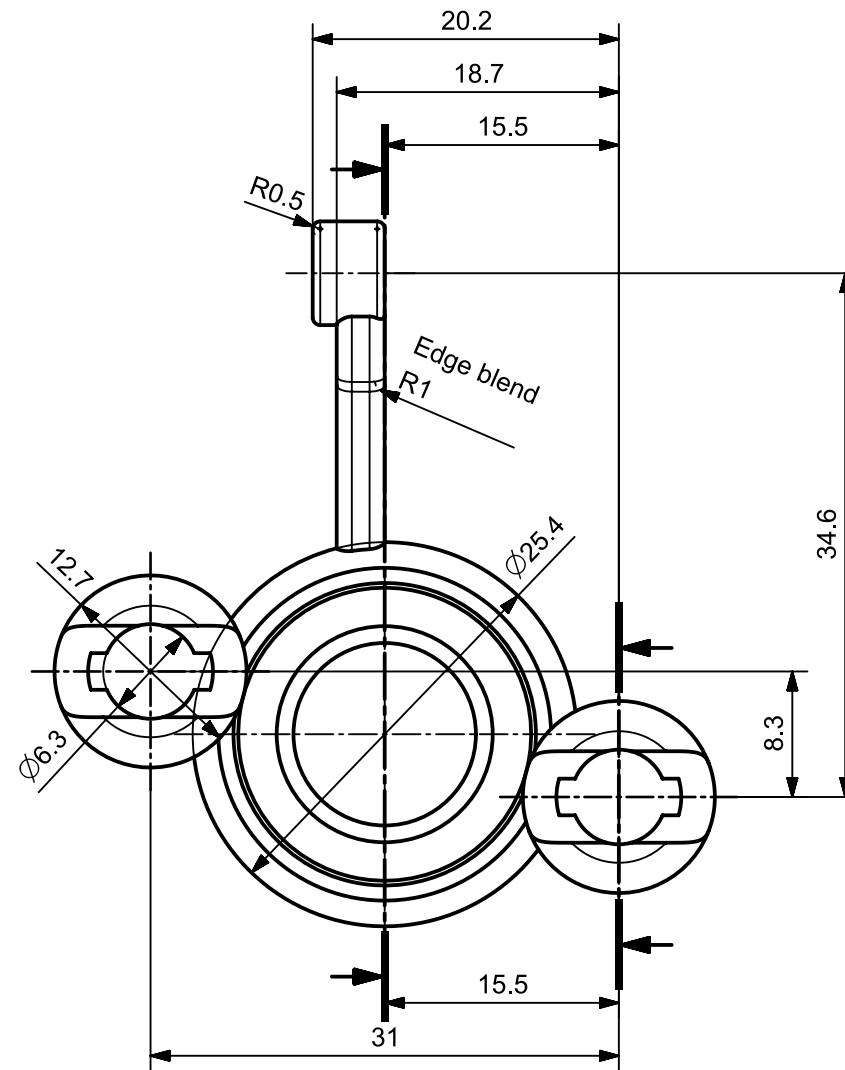
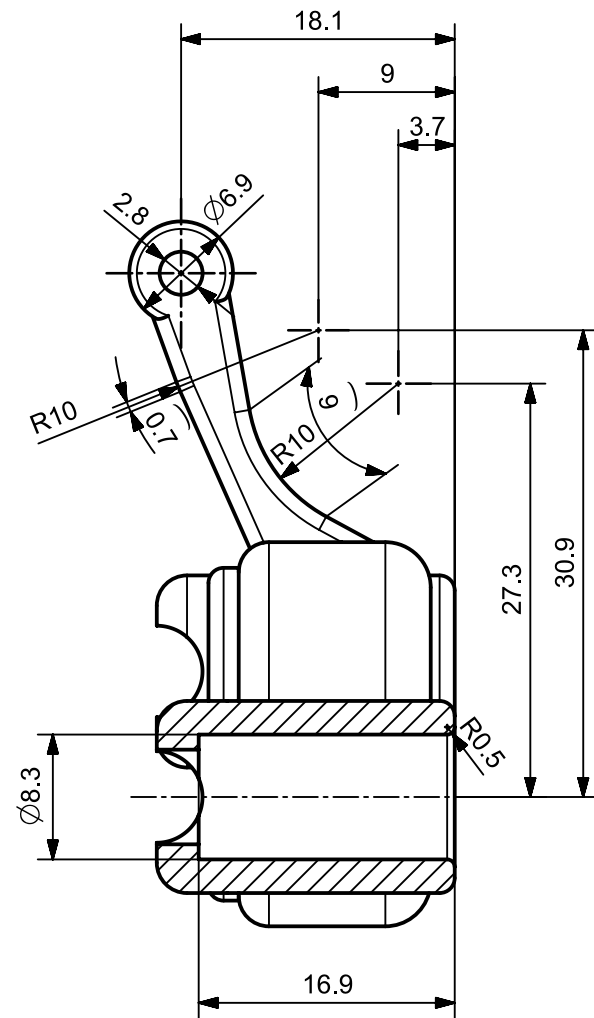
ΕΛ

Φύλλο

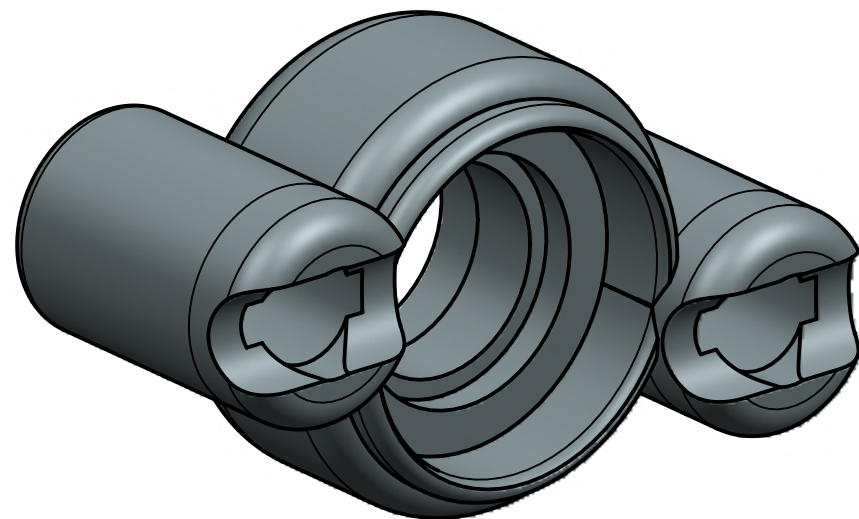
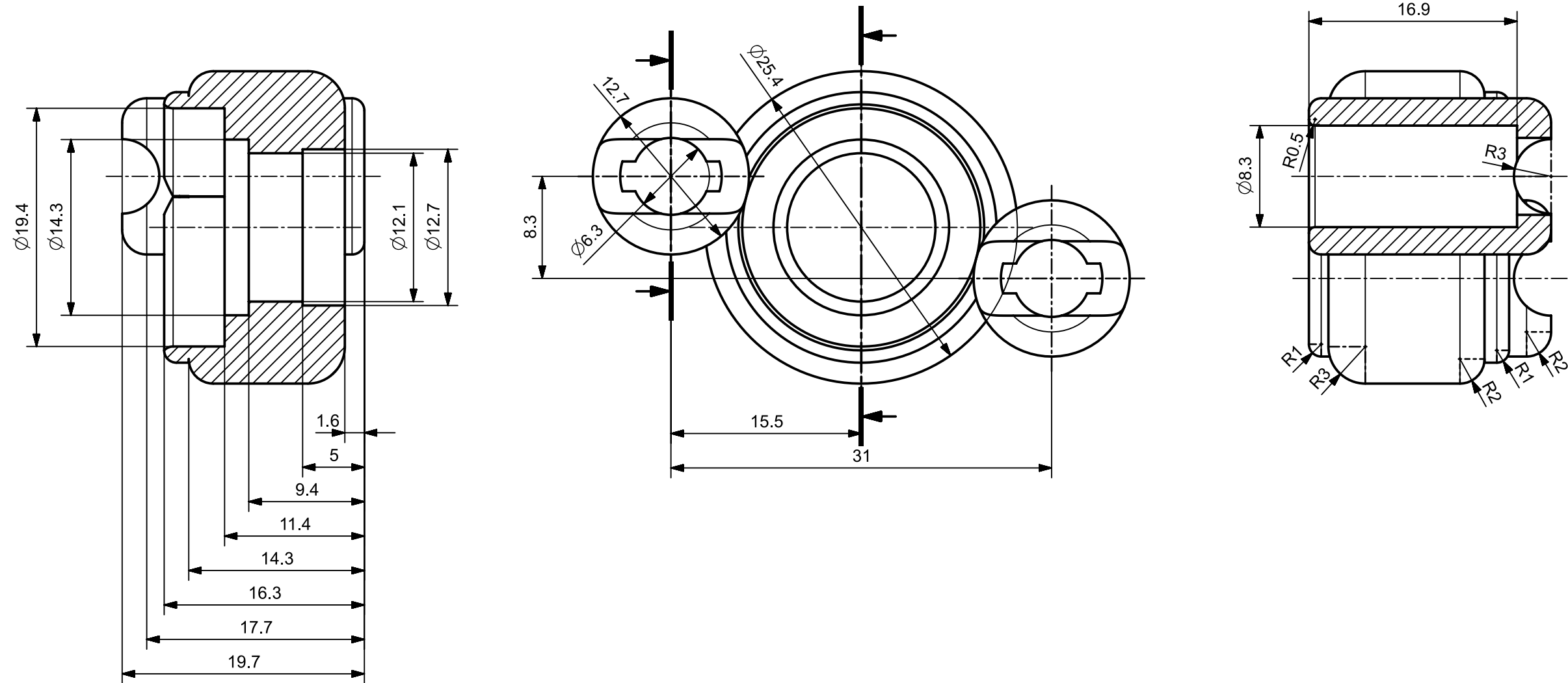
1/1



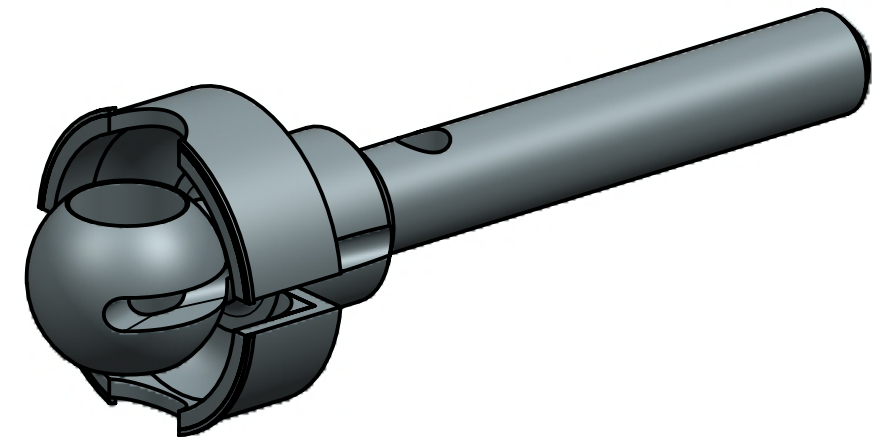
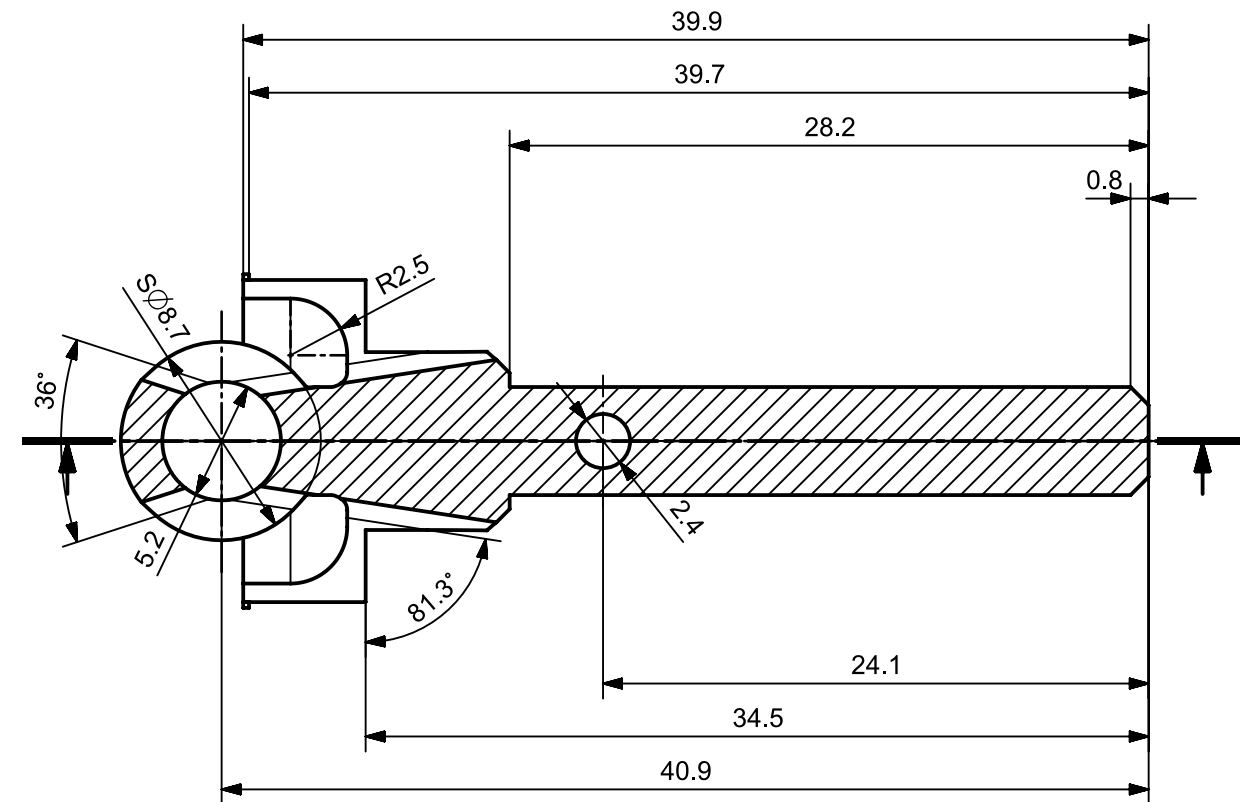
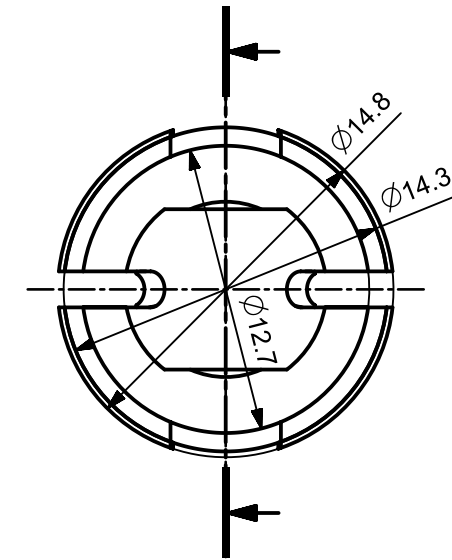
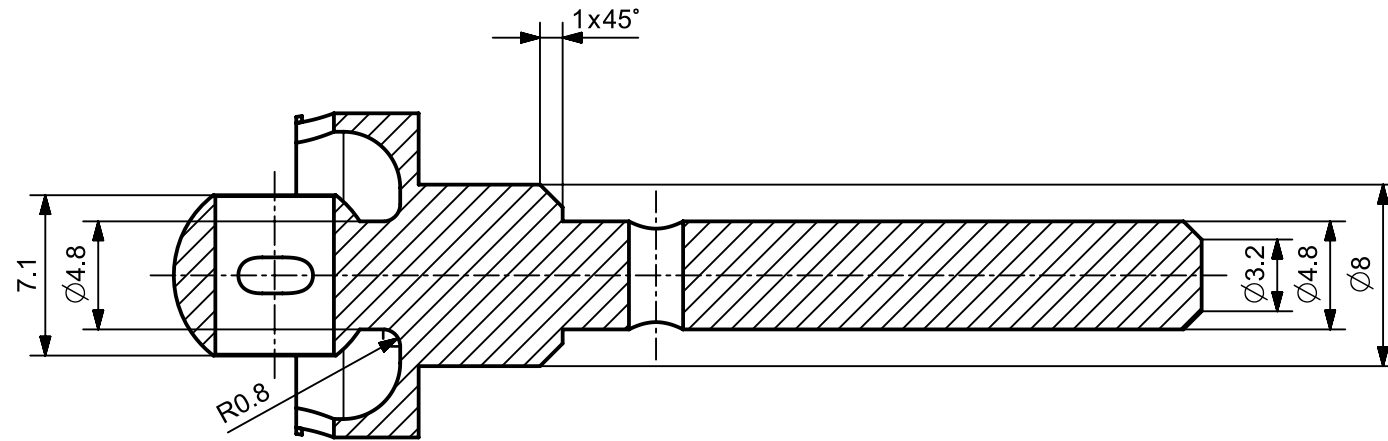
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές			
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος	Αριθμός			
	Hub carrier assembly	cI 5-0			
Κλιμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο		
2:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1		



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές			
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος	Αριθμός			
	Front hub carrier	cI 5-1			
Κλιμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο		
2:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1		



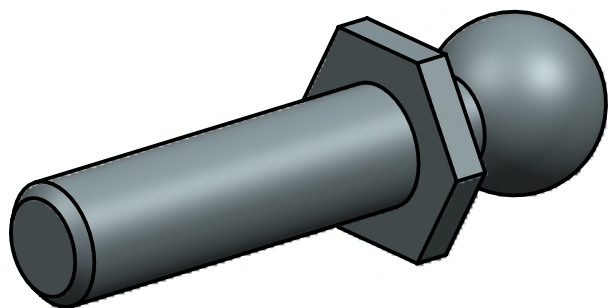
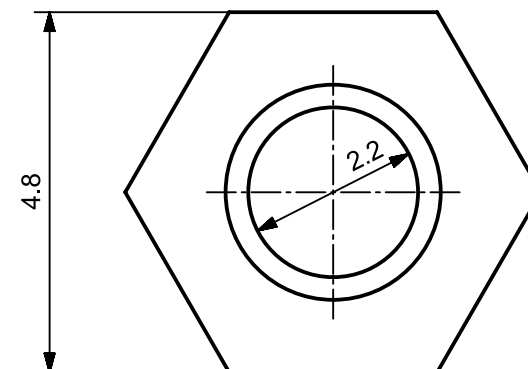
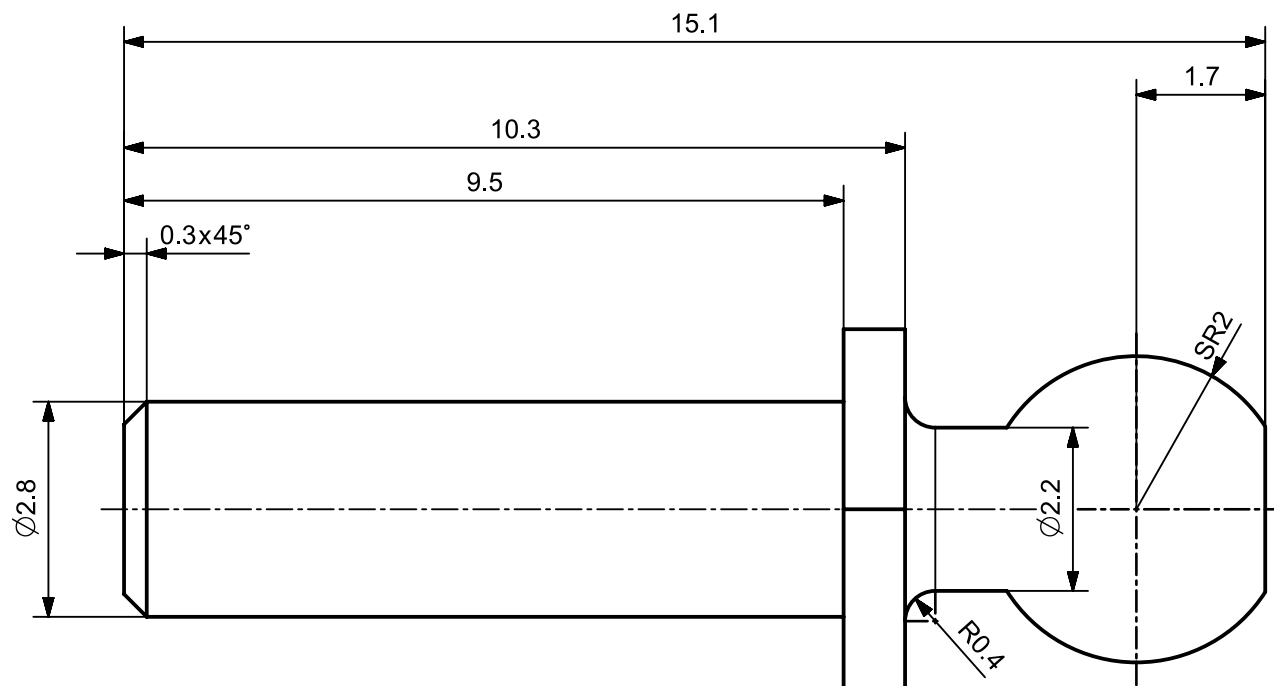
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr		Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
		Τίτλος Rear hub carrier		Αριθμός cl 5-2	
		Κλίμ. 2.5:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Wheel axle

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1
Αριθμός
cI 5-3
Κλίμ.
3:1
Ημερομηνία
8/2/2020
Γλώσσα
ΕΛ
Φύλλο
1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Ball stud

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 5-4

Κλίμ.

10:1

Ημερομηνία

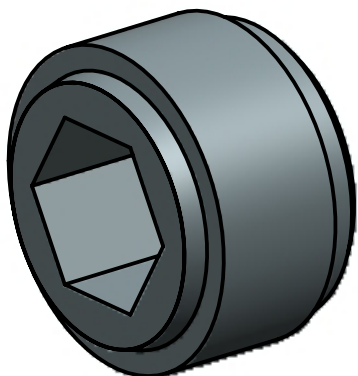
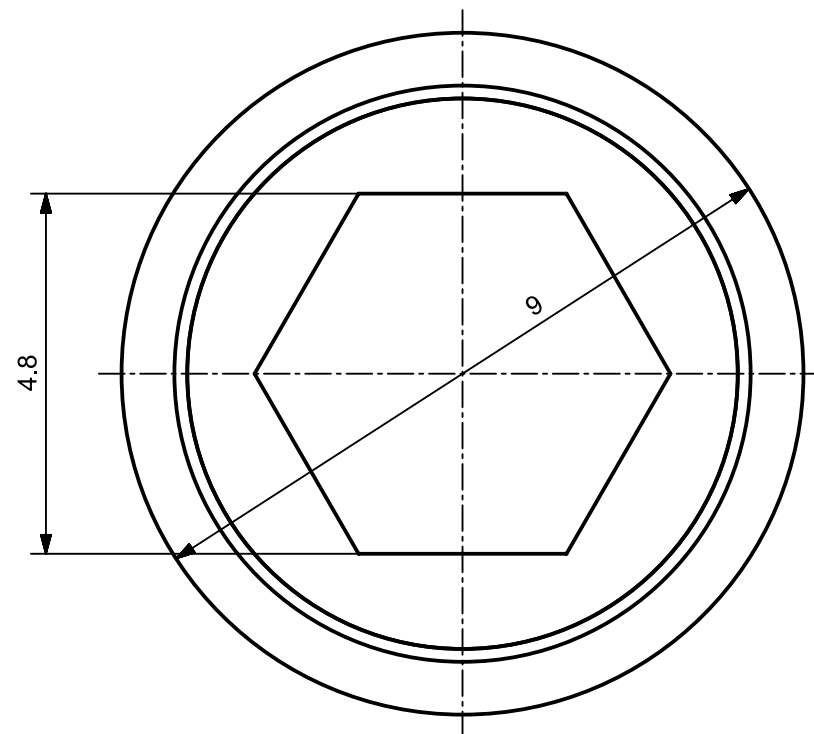
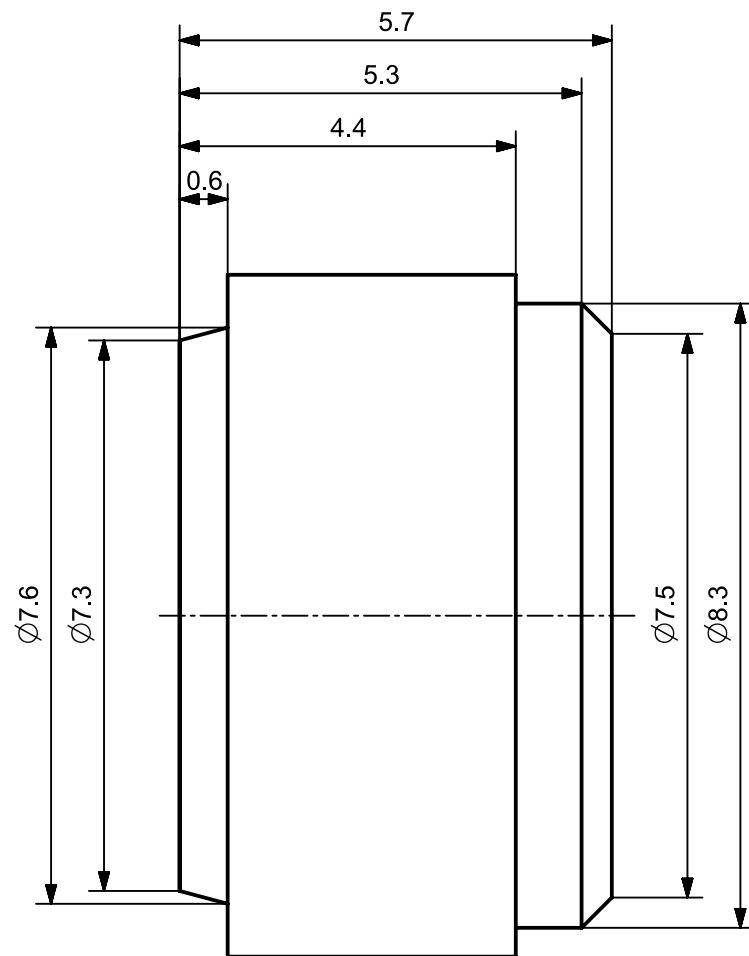
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Pillow ball retainer

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 5-5

Κλίμ.

10:1

Ημερομηνία

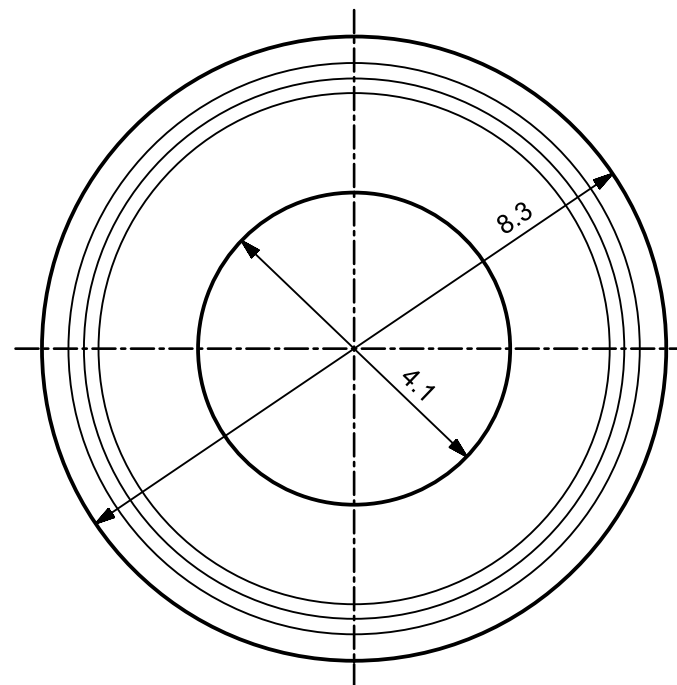
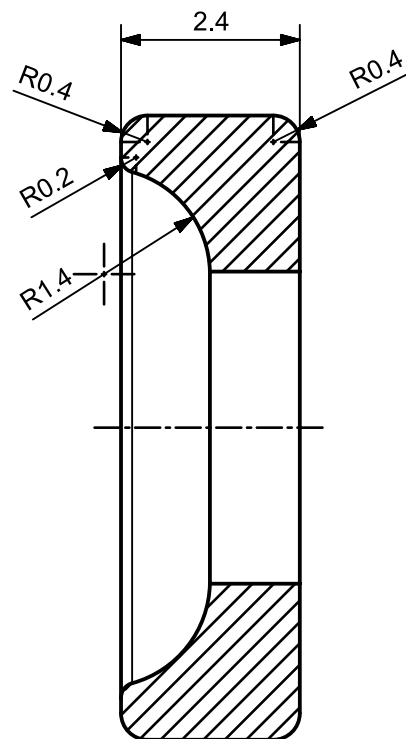
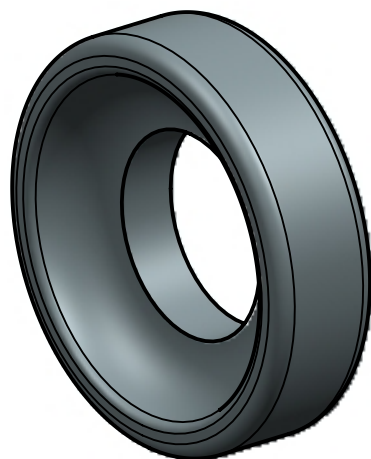
8/2/2020

Γλώσσα

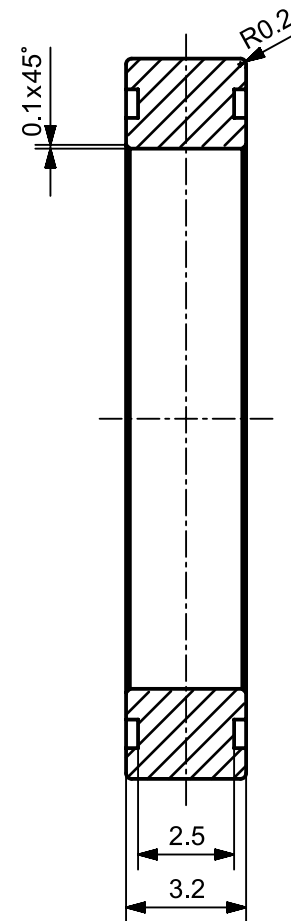
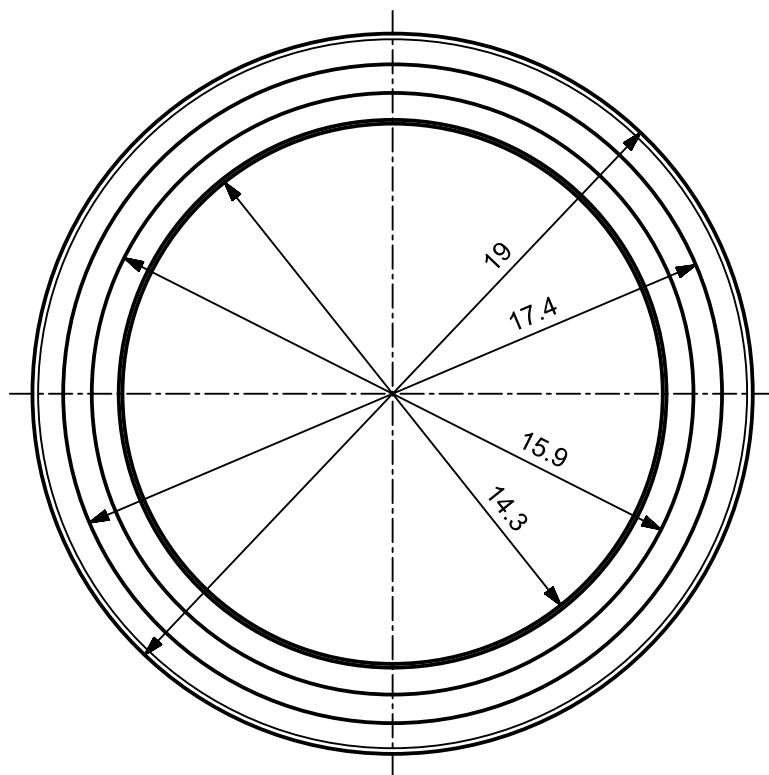
ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
	Τίτλος Pillow ball bushing		Αριθμός cl 5-6	
	Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
	10:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Front hub bearing

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 5-7

Κλίμ.

5:1

Ημερομηνία

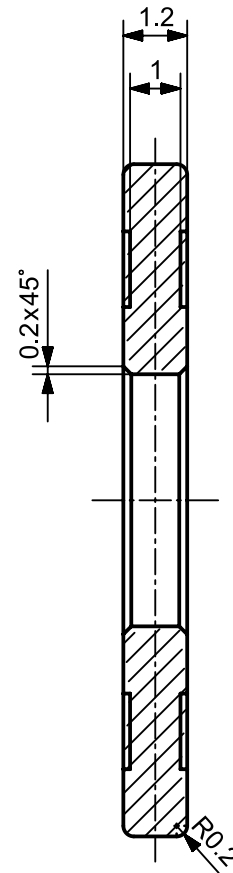
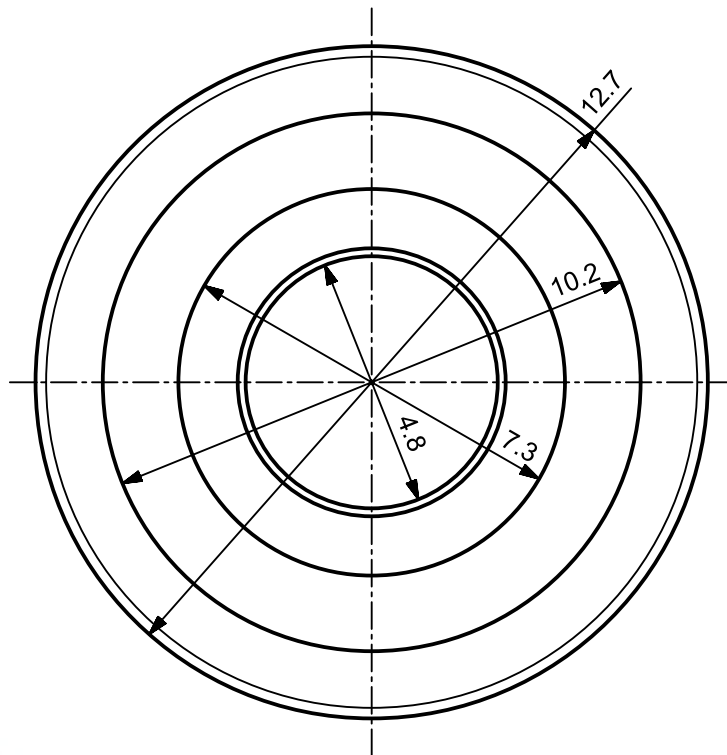
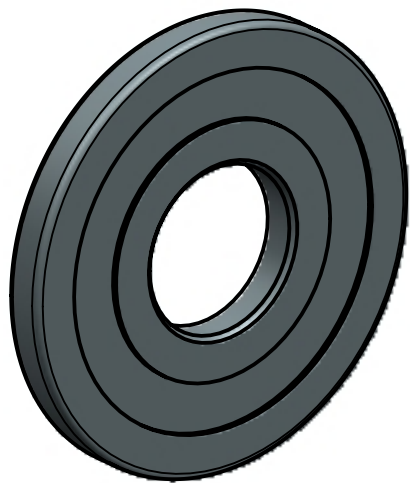
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

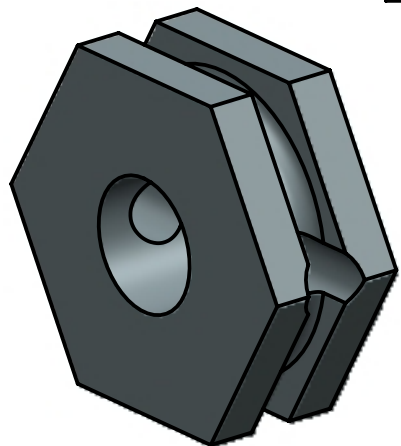
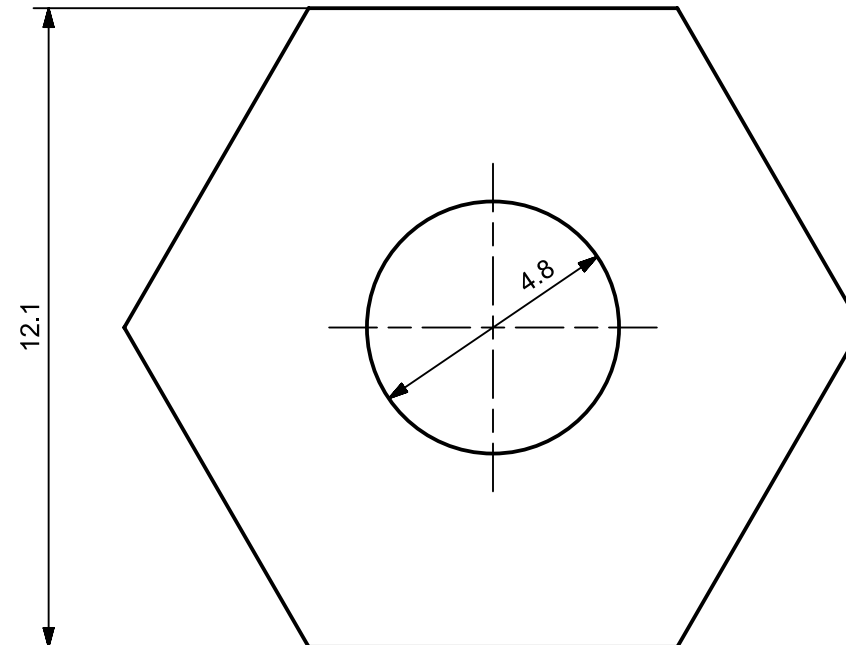
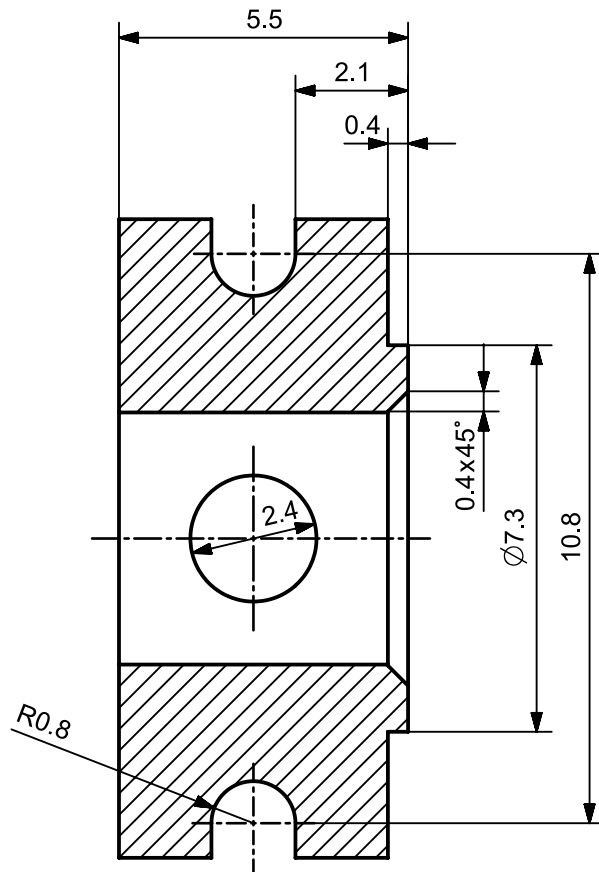
1/1



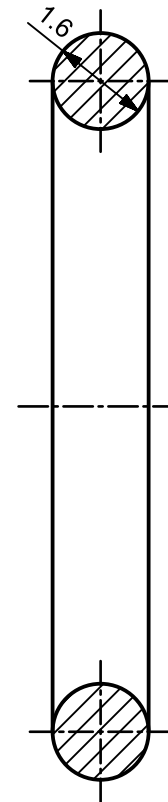
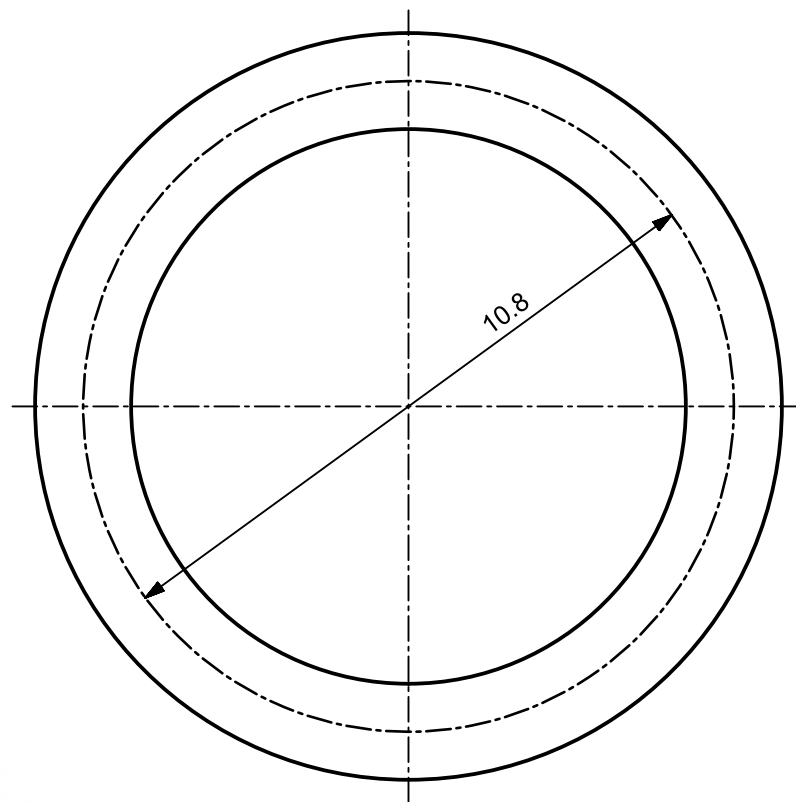
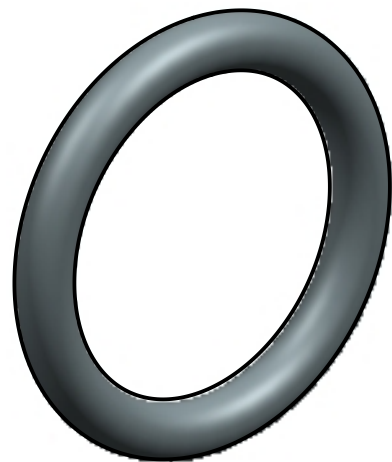
Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Rear hub bearing

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1
Αριθμός
cl 5-8
Κλίμ. 7:1
Ημερομηνία 8/2/2020
Γλώσσα ΕΛ
Φύλλο 1/1

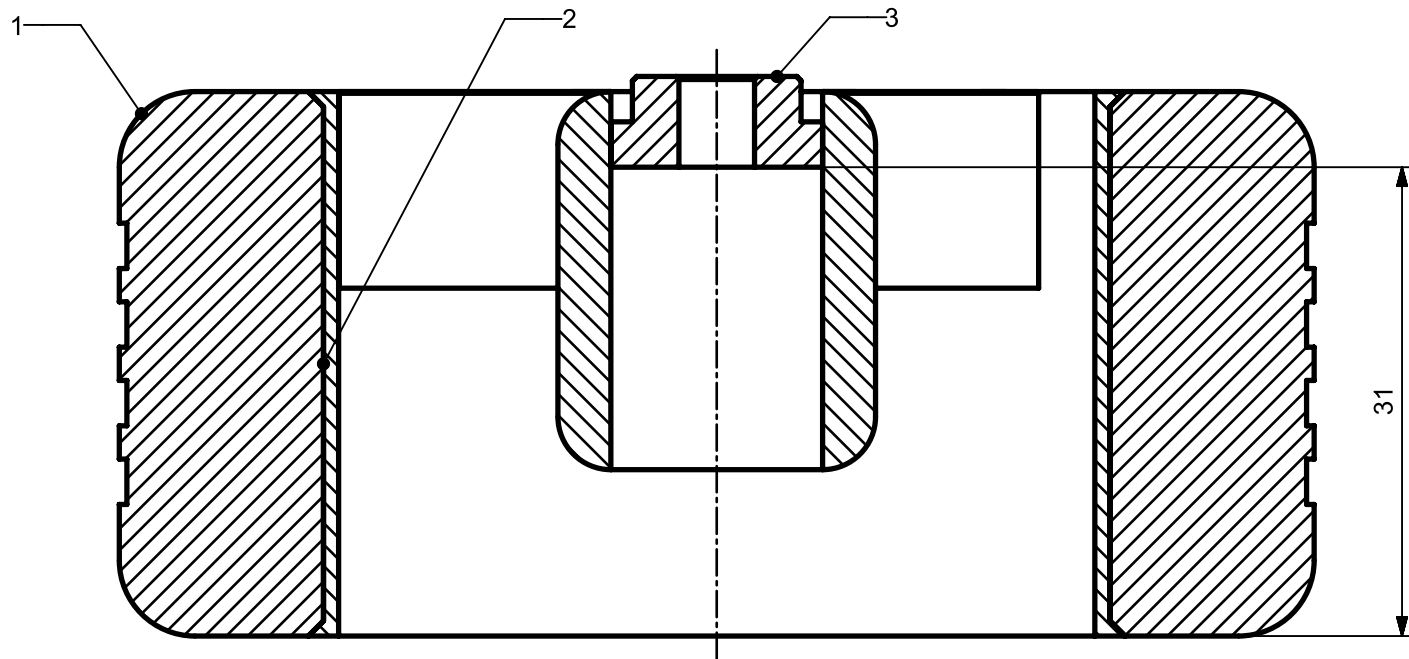


Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση	Ανοχές			
	Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος	Αριθμός			
	Hex drive	cl 5-9			
	Κλιμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο	
	7:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1	



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση		Ανοχές	
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ		Γενικές ανοχές f - ISO2768-1	
Τίτλος		Αριθμός	
Hex retaining o-ring		cl 5-10	
Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
8:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Wheel assembly

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 6-0

Κλίμ.

2:1

Ημερομηνία

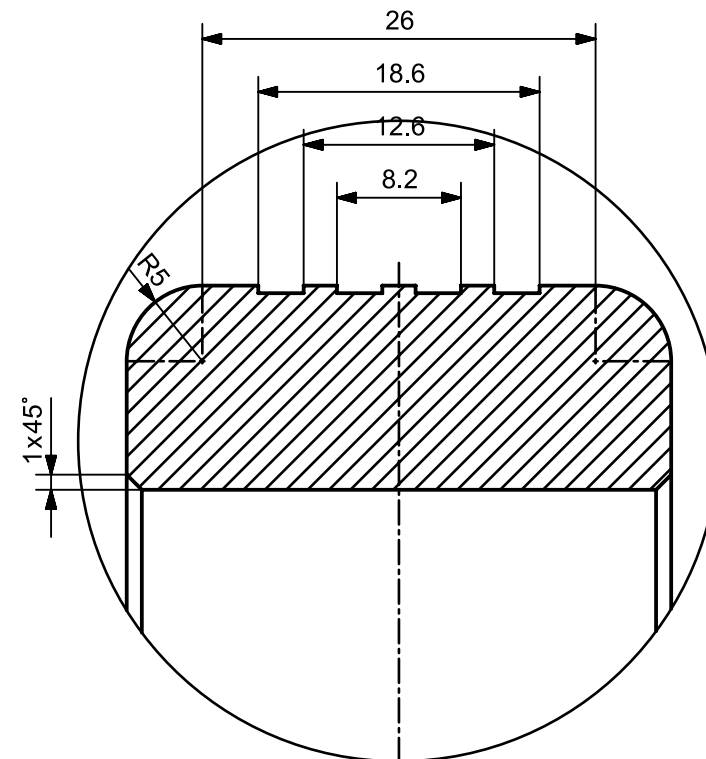
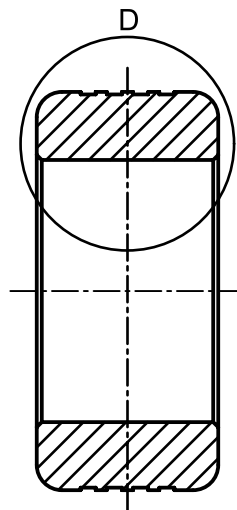
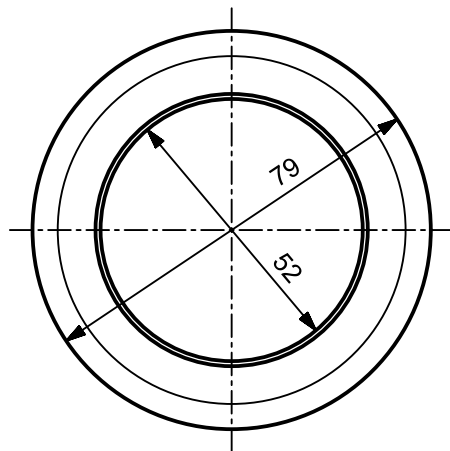
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

Φύλλο

1/1



DETAIL D
SCALE 2:1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Tyre

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 6-1

Κλίμ.

1:1.5

Ημερομηνία

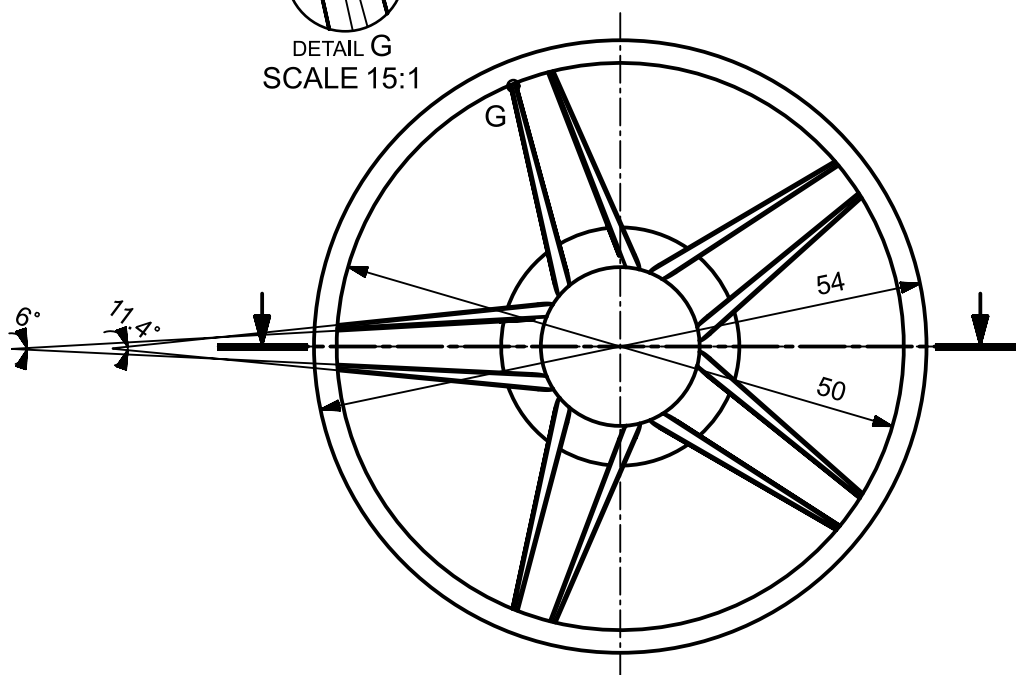
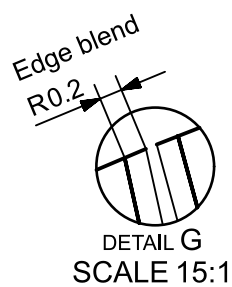
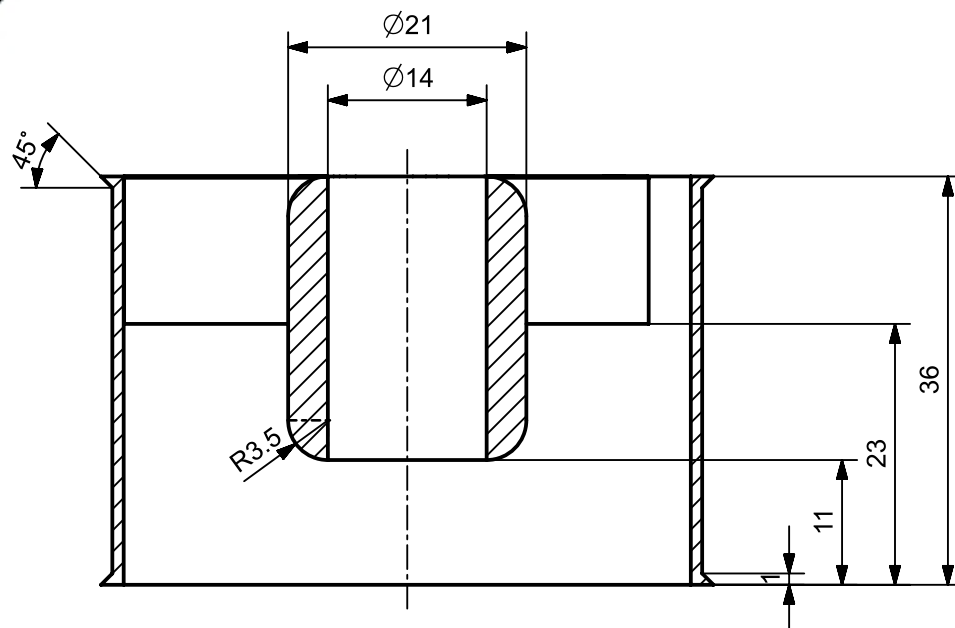
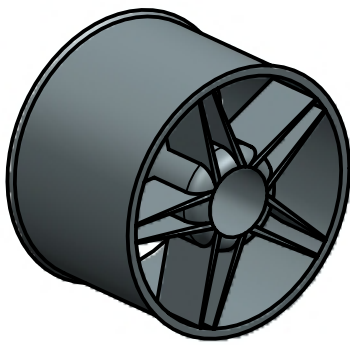
8/2/2020

Γλώσσα

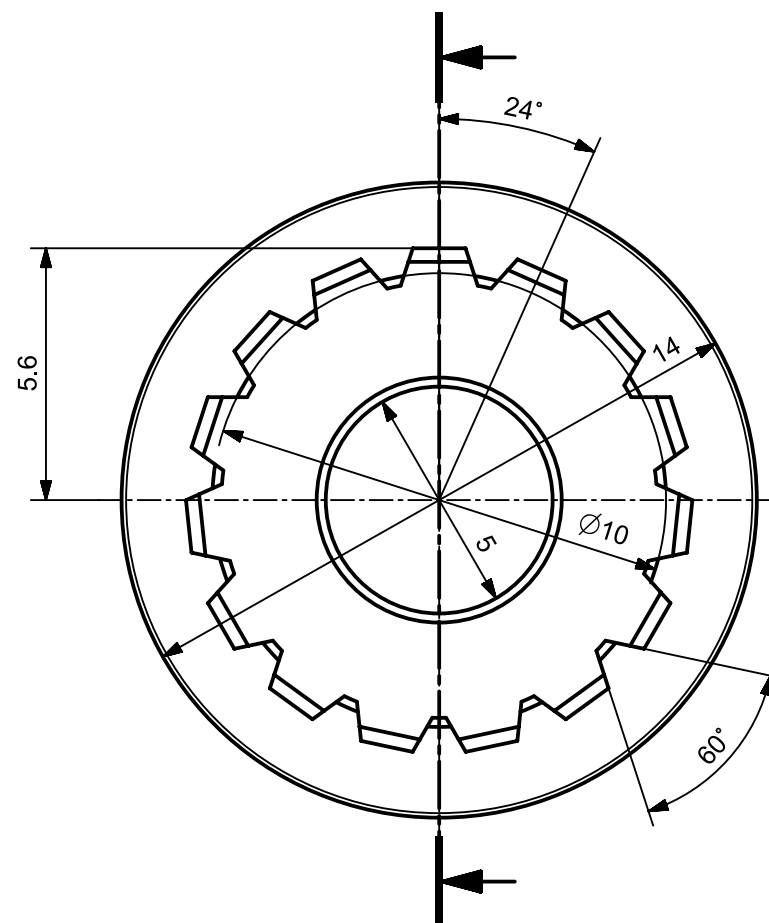
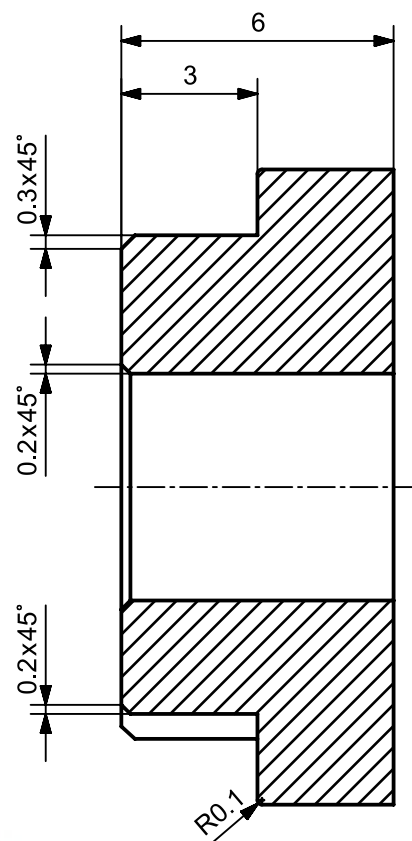
ΕΛ

Φύλλο

1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος Rim	Αριθμός cl 6-2			
		Κλίμ. 1.5:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Center lock wheel nut

Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός

cl 6-3

Κλίμ.

6:1

Ημερομηνία

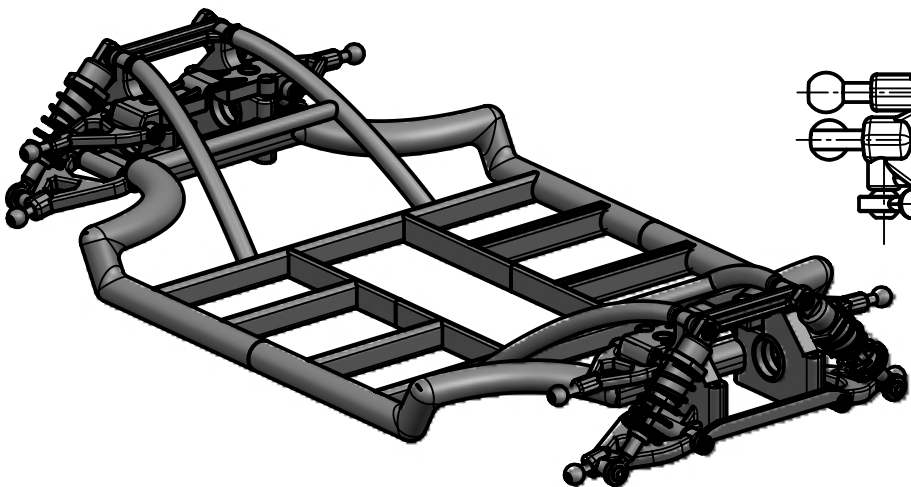
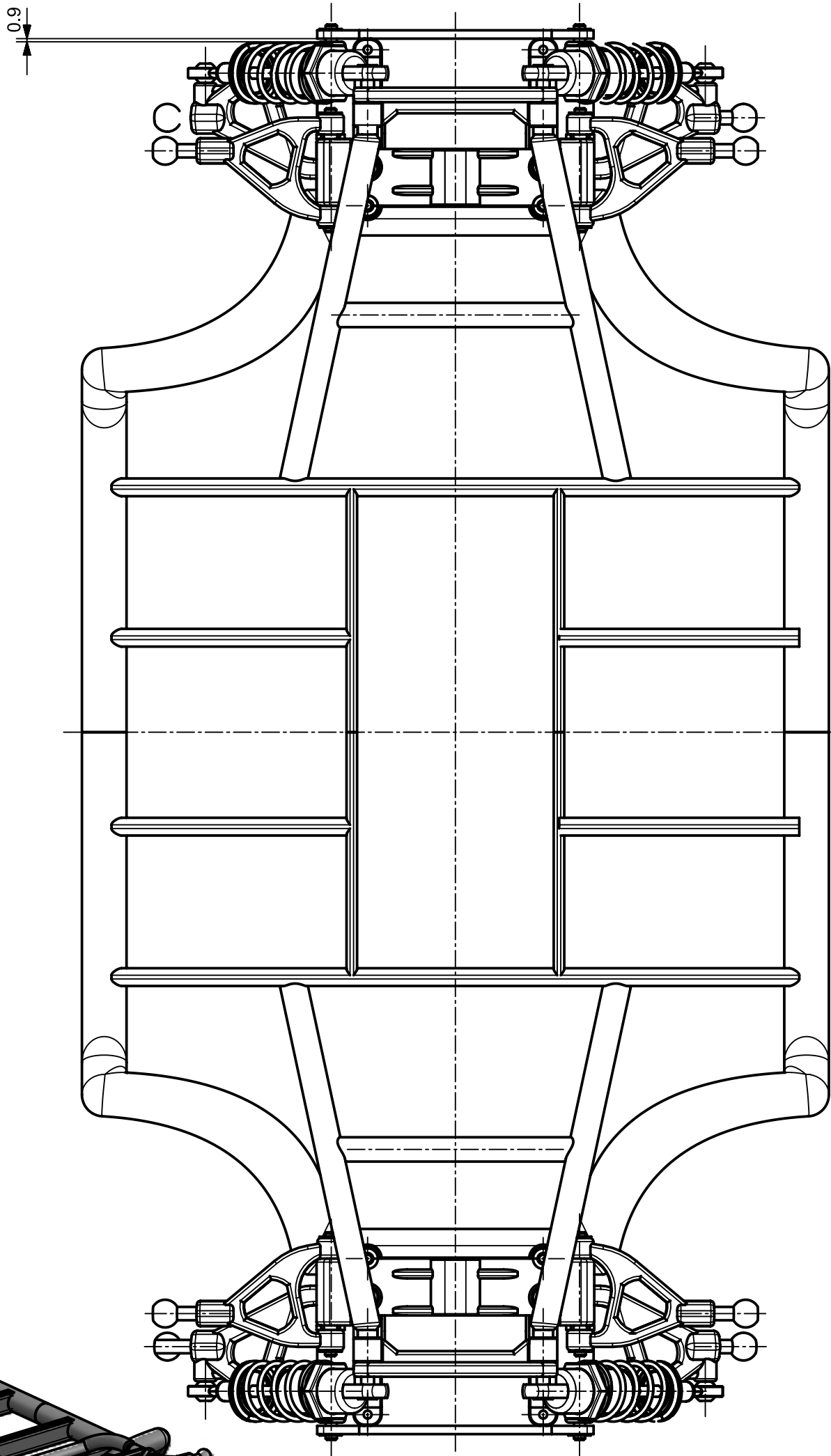
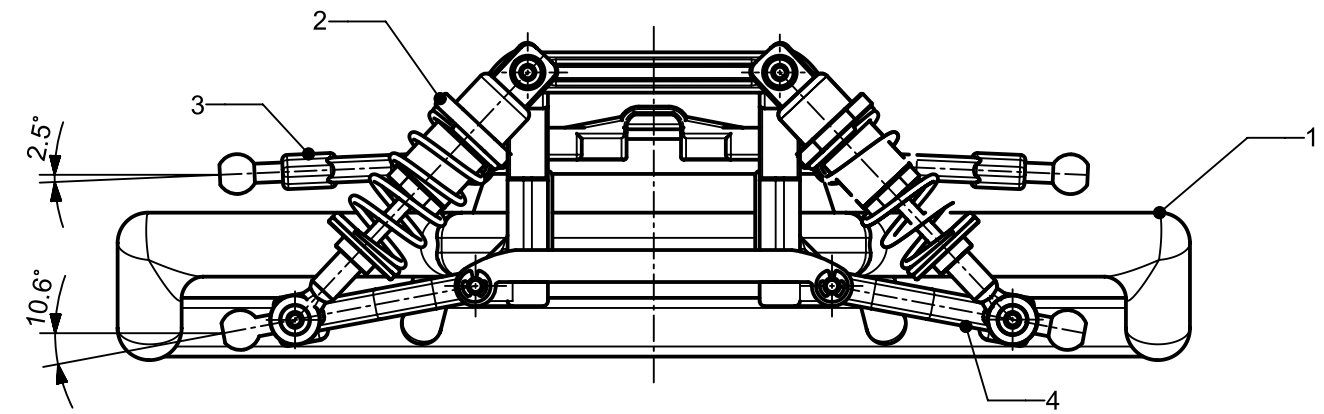
8/2/2020

Γλώσσα

ΕΛ

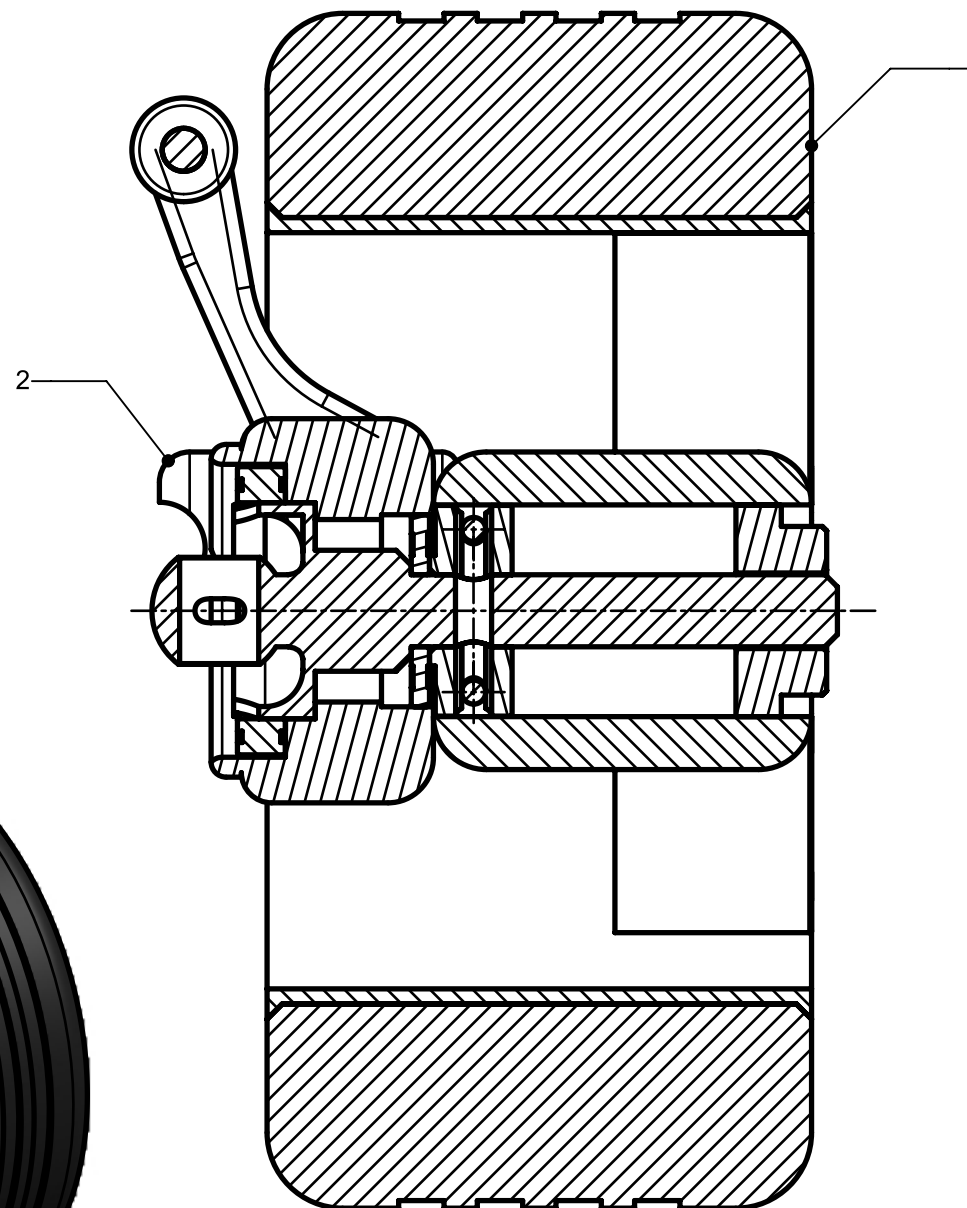
Φύλλο

1/1



Αρ.	Τίτλος	Ποσ.
1	Chassis assembly	2
2	Shock absorber assembly	4
3	Upper wishbone assembly	4
4	Lower wishbone assembly	4

Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD) Πολυτεχνείο Κρήτης www.cadlab.tuc.gr	Σχεδίαση Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ	Ανοχές Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
	Τίτλος Chassis-wishbones-shock absorbers assembly	Αριθμός cl 7-0			
	Κλίμ. 1:1	Ημερομηνία 8/2/2020	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1	



Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης

www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση

Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ

Τίτλος

Wheel-hub carrier assembly

Αρ.	Τίτλος	Ποσ.
1	Wheel assembly	1
2	Hub carrier assembly	1

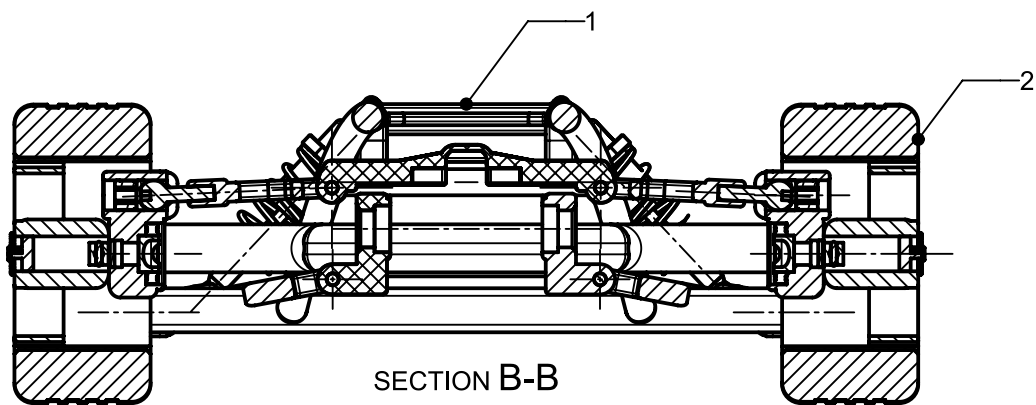
Ανοχές

Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

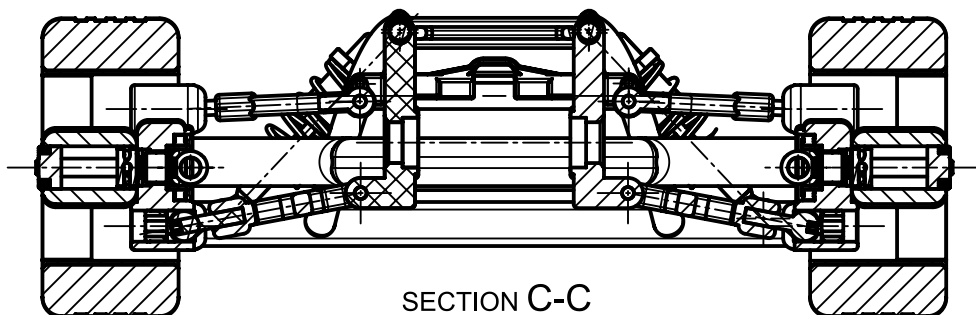
Αριθμός

cl 8-0

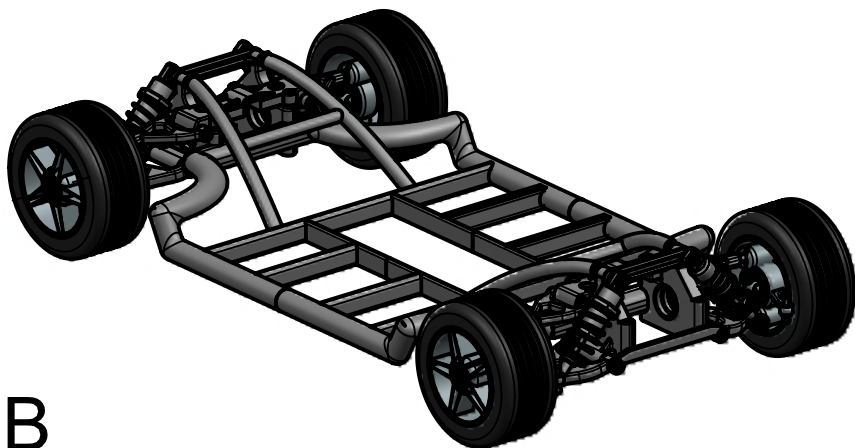
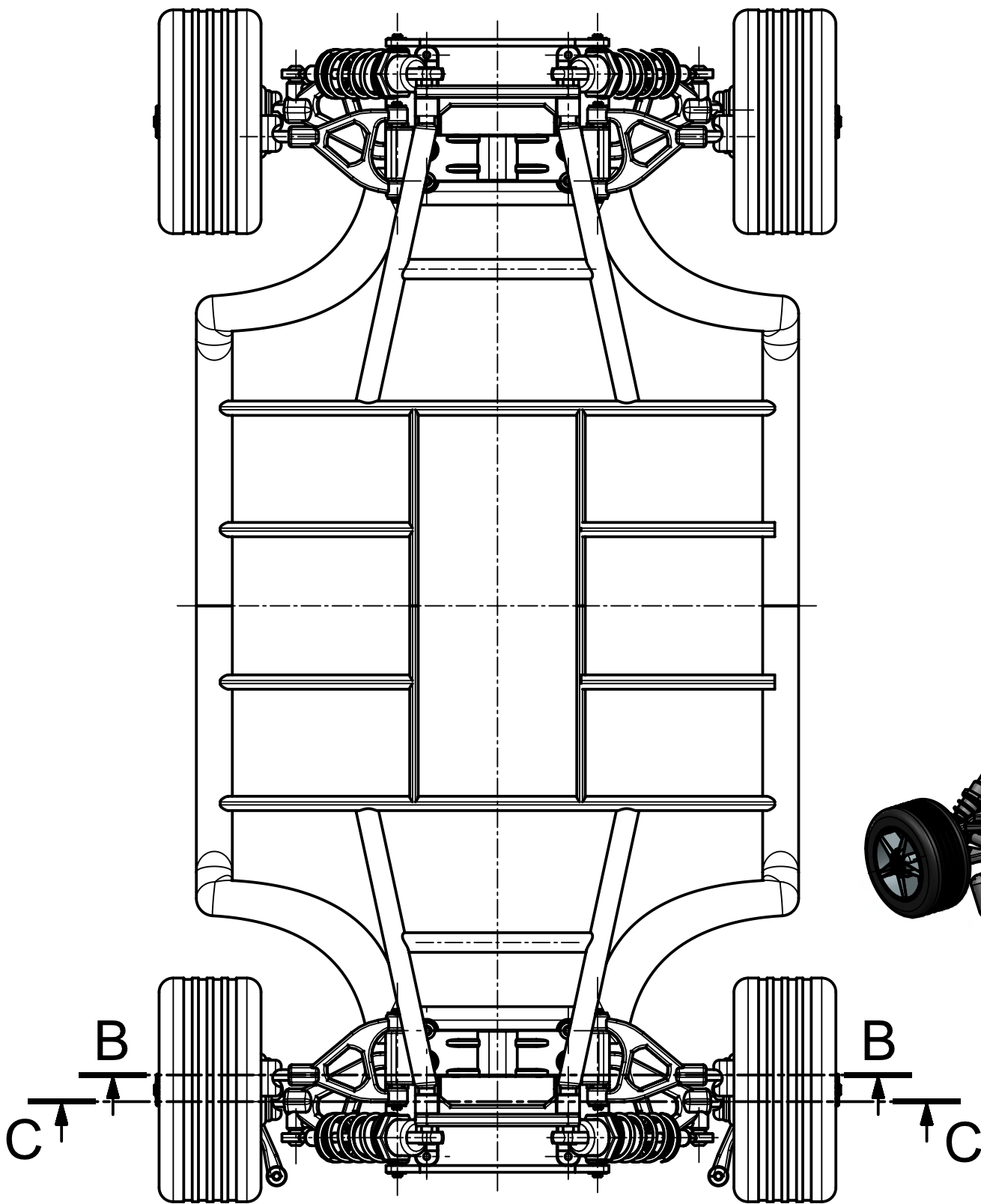
Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
2:1	8/2/2020	ΕΛ	1/1



SECTION B-B



SECTION C-C



Αρ.	Τίτλος	Ποσ.
1	Chassis-wishbones-shock absorbers assembly	1
2	Wheels-hub carriers assembly	4

Ανοχές			
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1			
Αριθμός			
cl 9-0			
Κλίμ.	Ημερομηνία	Γλώσσα	Φύλλο
1:2	8/2/2020	ΕΛ	1/1

Εργαστήριο σχεδιομελέτης με χρήση Η/Υ (CAD)
Πολυτεχνείο Κρήτης
www.cadlab.tuc.gr

Σχεδίαση
Βαρδής Άγγελος-Μιχαήλ
Τίτλος
Vehicle assembly

Ανοχές
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός
cl 9-0

Κλίμ. 1:2
Ημερομηνία 8/2/2020
Γλώσσα ΕΛ
Φύλλο 1/1