



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**« Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΡΟΜΟ ΚΑΙ  
Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ »**



**ΦΟΙΤΗΤΕΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ Α.Μ. 7094  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΑΛΑΗΣ Α.Μ. 7098**

**ΕΠΟΠΤΕΥΟΝ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2021**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται ως « Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΡΟΜΟ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ».

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέπον αναπληρωτή καθηγητή Τσινόπουλο Στέφανο, ο οποίος με την κατάλληλη καθοδήγησή του βοήθησε στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουν επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές  
Παναγιώτης Καλάης

&

Χρήστος Δημητρόπουλος  
(Υπογραφή)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα της σημερινής αυτοκινητοβιομηχανίας είναι να παρέχει την ασφάλεια των επιβατών, μέσω της βέλτιστης άνεσης της οδήγησης και των κρατημάτων στο δρόμο, για μια μεγάλη ποικιλία ελιγμών των οχημάτων και με βάση τις οδικές συνθηκές. Η άνεση και η ασφάλεια του επιβάτη που ταξιδεύει σε ένα όχημα μπορεί να βελτιωθεί ελαχιστοποιώντας τη δόνηση του αμαξώματος, την ανύψωση του αμαξώματος του οχήματος μέσω της βέλτιστης οδικής επαφής για τα ελαστικά. Το σύστημα στο όχημα που παρέχει αυτές τις ενέργειες είναι η ανάρτηση του οχήματος, δηλαδή ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από διάφορους βραχίονες, ελατήρια και αποσβεστήρες που διαχωρίζουν το σώμα του οχήματος από τα ελαστικά και τους άξονες. Γενικά, τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με πλήρως παθητικά συστήματα ανάρτησης λόγω του χαμηλού κόστους και της απλής κατασκευής τους. Για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση οδήγησης, πρέπει να εισαχθεί μια «απαλή» ανάρτηση για να διατηρηθεί η επαφή μεταξύ του αμαξώματος του οχήματος και του ελαστικού. Η «απαλή» ανάρτηση απορροφά εύκολα τις οδικές διαταραχές. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύονται αυτά τα σημαντικά μέρη ενός οχήματος, τα συστήματα των αναρτήσεων.



# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>- 11 -</b>
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ .....	- 11 -
1.2 ΤΥΠΟΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 16 -
1.3 ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 17 -
1.3.1 Άξονας – δοκός .....	- 17 -
1.3.2 Ημιάκαμπτος άξονας .....	- 18 -
1.3.3 Ανάρτηση «Double Wishbone» (διπλού ψαλιδιού) .....	- 19 -
1.3.4 Ανάρτηση με κοντό/μακρύ βραχίονα .....	- 20 -
1.3.5 Ανάρτηση MacPherson Strut .....	- 22 -
1.3.6 Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων .....	- 23 -
1.3.7 Σύγκριση των αναρτήσεων .....	- 24 -
1.4 ΤΥΠΟΙ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ .....	- 25 -
1.4.1 Σπειροειδή ελατήρια .....	- 26 -
1.4.2 Ράβδοι στρέψης .....	- 27 -
1.4.3 Ελατήρια φύλλων .....	- 28 -
1.4.4 Εναλλακτικά ελατήρια .....	- 28 -
1.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ .....	- 29 -
1.6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, ΔΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΚΡΑΔΑΣΜΟΣ .....	- 32 -
<b>2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ</b> .....	<b>- 34 -</b>
2.1 ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 35 -
2.2 ΗΜΙ-ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 36 -
2.3 ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 37 -
2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ (QUARTER) .....	- 38 -
2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΜΙ-ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 40 -
2.5.1 Γεωμετρία της ανάρτησης .....	- 40 -
2.5.2 Κέντρο του άξονα και συντεταγμένες .....	- 40 -
2.5.3 Γωνία Camber .....	- 41 -
2.5.4 Σύγκλιση και Απόκλιση .....	- 43 -
2.5.5 Προφίλ του δρόμου .....	- 44 -
2.6 ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ .....	- 45 -
<b>3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ</b> .....	<b>- 47 -</b>
3.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ .....	- 47 -

3.2	ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ GAUSSIAN.....	- 48 -
3.3	ΈΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ .....	- 50 -
3.4	ΑΣΑΦΗΣ (FUZZY) ΈΛΕΓΧΟΣ .....	- 51 -
3.5	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ SKYHOOK.....	- 52 -
3.6	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ GROUNDHOOK .....	- 55 -
3.7	ΕΝΕΡΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΛΙΣΗΣ.....	- 56 -
3.7.1	Παράδειγμα στενού οχήματος και κλίση .....	- 56 -
3.7.2	Κλίση τυπικού οχήματος παραγωγής.....	- 58 -
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	- 60 -
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>- 62 -</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>- 72 -</b>
	Όροι του συστήματος ανάρτησης .....	- 72 -

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

4WAS: τετρακίνητα συστήματα ενεργού τιμονιού  
DTC: συστήματα ελέγχου άμεσης κλίσης  
ESC: ηλεκτρονικός έλεγχος σταθερότητας  
ER: ηλεκτροροεολογικά υγρά  
FLC: έλεγχος ασαφούς λογικής  
FWAS: ενεργό σύστημα τιμονιού μπροστινού τροχού  
LPV: γραμμικός έλεγχος παραμέτρων παραλλαγής  
LQG: γραμμικός τετραγωνικός Gaussian  
LQR: γραμμικός ποσοτικός ρυθμιστής  
LTIH: γραμμικός αναλλοίωτος έλεγχος H-απείρου χρόνου  
MPC: έλεγχος πρόβλεψης μοντέλου  
MR: μαγνητοροεολογικά υγρά  
RWAS: ενεργό σύστημα διεύθυνσης των πίσω τροχών  
SG: κέρδος skyhook  
SLA: ανάρτηση κοντού / μακρύ βραχίονα  
SMC: έλεγχος λειτουργίας ολίσθησης  
STC: έλεγχος κλίσης διεύθυνσης



## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1:Ανάρτηση οχήματος [1].....	- 12 -
Εικόνα 1.2: Παθητικό, ημι-ενεργό και ενεργό σύστημα ανάρτησης [2].....	- 13 -
Εικόνα 1.3: Διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ESP σε σύγχρονο αυτοκίνητο [16] .....	- 14 -
Εικόνα 1.4: Ανάρτηση άξονα δοκού [29].....	- 17 -
Εικόνα 1.5: Ημιάκαμπτος άξονας [30].....	- 19 -
Εικόνα 1.6: Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [31] .....	- 20 -
Εικόνα 1.7: Ανάρτηση με κοντό / μακρύ βραχίονα [29].....	- 21 -
Εικόνα 1.8: Ανάρτηση MacPherson [32].....	- 23 -
Εικόνα 1.9: Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων [33].....	- 24 -
Εικόνα 1.10: Ανάρτηση MacPherson και ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [34].....	- 25 -
Εικόνα 1.11: Σπειροειδή ελατήρια [35].....	- 26 -
Εικόνα 1.12: Ράβδοι στρέψης [36] .....	- 27 -
Εικόνα 1.13: Ελατήρια φύλλων [37].....	- 28 -
Εικόνα 1.14: Ελατήρια αέρα [38] .....	- 29 -
Εικόνα 1.15: Ανάλυση και προσομοίωση συστήματος ανάρτησης στο λογισμικό MATLAB [42] .....	- 31 -
Εικόνα 2.1: Ανάρτηση οχήματος [44].....	- 34 -
Εικόνα 2.2: Παθητικό σύστημα ανάρτησης [45] .....	- 35 -
Εικόνα 2.3: Ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης [49] .....	- 37 -
Εικόνα 2.4: Ενεργό σύστημα ανάρτησης [45] .....	- 38 -
Εικόνα 2.5: Μοντέλο ανάρτησης τέταρτου αυτοκινήτου [55] .....	- 39 -
Εικόνα 2.6: Σύστημα συντεταγμένων SAE [56] .....	- 40 -
Εικόνα 2.7: Κέντρο άξονα [57] .....	- 41 -
Εικόνα 2.8: Γωνία Camber: Θετική (αριστερά), Αρνητική (μέση), Μηδενική (δεξιά) [58] .....	- 42 -
Εικόνα 2.9: Αλλαγή γωνίας Camber ανάλογα με την κίνηση του τροχού [59].....	- 42 -
Εικόνα 2.10: Σύγκλιση και απόκλιση [60].....	- 43 -
Εικόνα 2.11: Κίνηση μάζας σε δρόμο [61] .....	- 44 -

Εικόνα 3.1: Σύστημα ελέγχου skyhook [95] .....	- 53 -
Εικόνα 3.2: Σύστημα ελέγχου groundhook [105] .....	- 55 -



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Το σύστημα ανάρτησης ενός οχήματος αναφέρεται στην ομάδα των μηχανικών εξαρτημάτων που συνδέουν τους τροχούς με το πλαίσιο ή το αμάξωμα. Έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη προσπάθεια της μηχανικής στο σχεδιασμό των συστημάτων ανάρτησης λόγω μιας ατελείωτης προσπάθειας για βελτίωση της οδήγησης και του χειρισμού των οχημάτων σε συνδυασμό με την ασφάλεια και την άνεση των επιβατών. Στις μέρες της χρήσης των αλόγων και του αμαξώματος ως μέσω μεταφοράς, το σύστημα ανάρτησης αποτελούσε απλώς μια δοκό (άξονα) που εκτεινόταν σε όλο το πλάτος του οχήματος. Στο μπροστινό μέρος, οι τροχοί ήταν στερεωμένοι στα άκρα του άξονα και ο άξονας περιστρεφόταν στο κέντρο για την παροχή της διεύθυνσης. Τα πρώιμα αυτοκίνητα χρησιμοποίησαν το μονοκόμματο άξονα, αλλά αντί να περιστρέφονταν στο κέντρο, στερεωνόταν στο όχημα μέσω ελατηρίων για να παρέχουν την απορρόφηση των κραδασμών από τις ανακρίβειες του δρόμου. Οι τροχοί τοποθετήθηκαν περιστρεφόμενοι στα άκρα του άξονα για την παροχή της διεύθυνσης. Οι πρώτες αναρτήσεις αποτελούνταν από λεπτές στρώσεις στενών κομματιών χάλυβα, δηλαδή λωρίδων που στοιβάζονταν μαζί σε ελλειπτικό σχήμα και ονομάζονταν φύλλα ελατηρίου. Σε μεταγενέστερες εγκαταστάσεις, οι αναρτήσεις των φύλλων αντικαταστάθηκαν από τα ελατήρια. Στα εμπρός κινητήρια οχήματα, ο μπροστινός άξονας αντικαταστάθηκε από ανεξάρτητα τοποθετημένα τιμόνια. Οι τροχοί στηρίχτηκαν με βραχίονες πάνω και κάτω (με αρθρωτούς βραχίονες) που τους κρατούσαν κάθετα στο δρόμο, όπως έκαναν και τα προηγούμενα σχέδια της δοκού ως άξονα. Ένα πηνίο ελατηρίου χρησιμοποιήθηκε για να στηρίξει είτε τον άνω είτε τον κάτω βραχίονα για να παρέχει παρόμοια λειτουργία με το αμορτισέρ. Τα αμορτισέρ άρχισαν να χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τους κραδασμούς στα φορτία και επίσης να παρέχουν αντίσταση στις ταλαντώσεις των ελατηρίων. Αργότερα, με μείωση του άνω βραχίονα, η κλίση του τροχού (θάλαμος) θα μπορούσε να ελεγχθεί για να αποφευχθεί η φόρτωση των ελαστικών κατά την στροφή. Ο κινητήριος άξονας μετάδοσης ισχύος στο πίσω μέρος χρησίμευσε ως ανάρτηση τύπου δέσμης με απόσβεση που περιείχε είτε φύλλα ή σπειροειδή ελατήρια αλλά και αμορτισέρ. Όταν εισήχθησαν τα επιβατικά αυτοκίνητα με εμπρός κινητήρα, ο άνω βραχίονας περιστράφηκε προς τα πάνω και αντικαταστάθηκε από ένα μέλος που ονομάζεται «γόνατο» που περιείχε το ομοκεντρικά τοποθετημένο ελατήριο. Αυτή η διάταξη παρείχε επιπλέον χώρο για εγκάρσιες τοποθετημένες μονάδες του κινητήρα / κιβωτίου ταχυτήτων και το μπροστινό άξονα μετάδοσης κίνησης. Αυτός ο ίδιος τύπος ανάρτησης χρησιμοποιήθηκε επίσης στο πίσω μέρος πολλών αυτοκινήτων. Τα φορτηγά συνεχίζουν να είναι οχήματα με εμπρός κινητήρα, με οπίσθια κίνηση, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούν συστήματα ανάρτησης αξόνων τύπου δοκού τόσο στο μπροστινό όσο και στο πίσω μέρος.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα της παρούσας αυτοκινητοβιομηχανίας είναι η παροχή της ασφάλειας των επιβατών, μέσω της βέλτιστης άνεσης της οδήγησης και

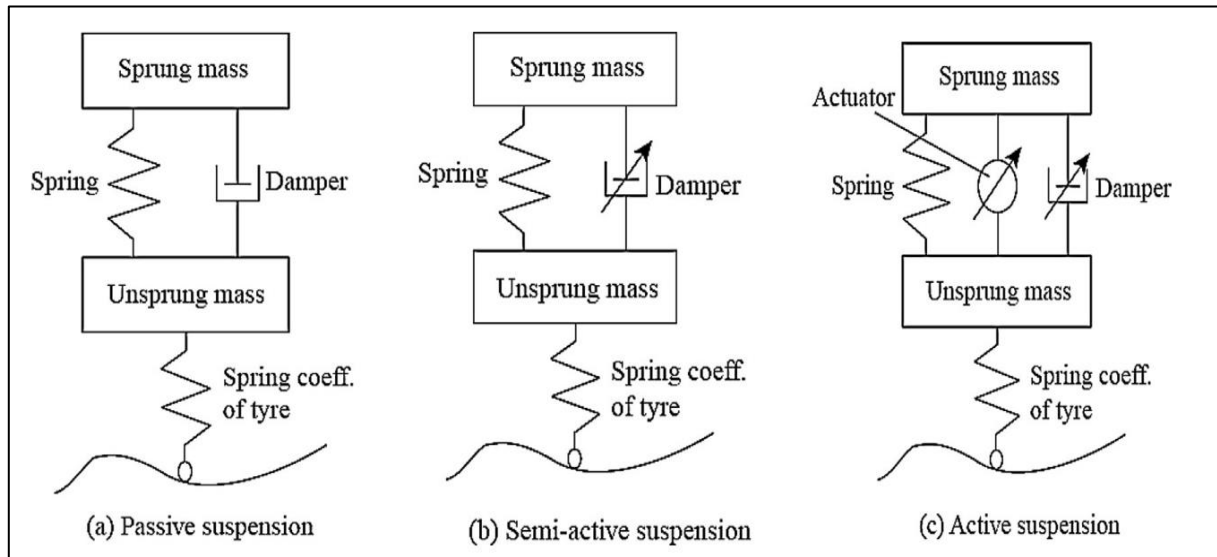
των κρατημάτων του δρόμου, για μια μεγάλη ποικιλία ελιγμών των οχημάτων και των οδικών συνθηκών. Η άνεση και η ασφάλεια του επιβάτη που ταξιδεύει σε ένα όχημα μπορεί να βελτιωθεί ελαχιστοποιώντας τη δόνηση του αμαξώματος και την ανύψωση του αμαξώματος του οχήματος μέσω της βέλτιστης οδικής επαφής για τα ελαστικά. Το σύστημα στο όχημα που παρέχει αυτές τις ενέργειες είναι η ανάρτηση του οχήματος, δηλαδή ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από διάφορους βραχίονες, ελατήρια και αποσβεστήρες που διαχωρίζουν το σώμα του οχήματος από τα ελαστικά και τους άξονες (Εικόνα 1.1:Ανάρτηση οχήματος [1]).



Εικόνα 1.1:Ανάρτηση οχήματος [1]

Γενικά, τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με πλήρως παθητικά συστήματα ανάρτησης λόγω του χαμηλού κόστους και της απλής κατασκευής τους. Η παθητική ανάρτηση αποτελείται από ελατήρια, αποσβεστήρες και αντικολλητικές ράβδους με σταθερά χαρακτηριστικά. Το κύριο μειονέκτημα του σχεδιασμού της παθητικής ανάρτησης είναι ότι δε μπορεί ταυτόχρονα να μεγιστοποιηθεί η οδήγηση και η απόδοση του οχήματος. Για να επιτευχθεί μια καλύτερη απόδοση της οδήγησης, πρέπει να εισαχθεί μια «απαλή» ανάρτηση για να διατηρηθεί η επαφή μεταξύ του αμαξώματος του οχήματος και του ελαστικού. Η «μαλακή» ανάρτηση απορροφά εύκολα τις οδικές διαταραχές. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα περισσότερα πολυτελή αυτοκίνητα χρησιμοποιούν «απαλές» αναρτήσεις για να προσφέρουν μια άνετη οδήγηση. Το δεύτερο χαρακτηριστικό της απόδοσης του οχήματος είναι ο χειρισμός του δρόμου. Αυτό αναφέρεται στην ικανότητα ενός οχήματος να διατηρεί την επαφή μεταξύ του ελαστικού και του δρόμου του οχήματος κατά τη διάρκεια των στροφών και άλλων δυναμικών ελιγμών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με «άκαμπτες» αναρτήσεις όπως φαίνεται συνήθως στα σπορ αυτοκίνητα. Η πρόκληση του συστήματος της παθητικής ανάρτησης είναι η επίτευξη του σωστού συμβιβασμού μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών της απόδοσης του οχήματος που θα ταιριάζει καλύτερα στο στοχευμένο καταναλωτή. Ωστόσο, εισάγοντας το ενεργό ή ημι-ενεργό

σύστημα ανάρτησης στο όχημα, μπορεί να επιτευχθεί ένας πιο επιθυμητός συμβιβασμός μεταξύ των πλεονεκτημάτων του συστήματος μαλακής και σκληρής ανάρτησης. Στην Εικόνα 1.2: Παθητικό, ημι-ενεργό και ενεργό σύστημα ανάρτησης παρουσιάζονται τα τρία επικρατέστερα συστήματα ανάρτησης (παθητικό, ημι-ενεργό και ενεργό). Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται περισσότερες λεπτομέρειες για το καθένα από αυτά.



Εικόνα 1.2: Παθητικό, ημι-ενεργό και ενεργό σύστημα ανάρτησης [2]

Τα ενεργά ή ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης ενσωματώνονται με τα ενεργά συστατικά, όπως ενεργοποιητές και ημι-ενεργούς αποσβεστήρες, σε συνδυασμό με διάφορες δυναμικές στρατηγικές ελέγχου. Με ενεργά εξαρτήματα, αυτά τα συστήματα μπορούν να παρέχουν ρυθμιζόμενες δυσκαμψίες του ελατηρίου και συντελεστές απόσβεσης προσαρμοσμένα σε διάφορες οδικές συνθήκες.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, πολλοί τύποι ενεργών και ημι-ενεργών συστημάτων ανάρτησης έχουν προταθεί για τον καλύτερο έλεγχο των χαρακτηριστικών της απόσβεσης. Παρόλο που το ενεργό σύστημα ανάρτησης παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, η πολυπλοκότητα και το κόστος της εφαρμογής του, το αποτρέπουν για ευρύτερες εμπορικές εφαρμογές. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης έχει μελετηθεί ευρέως για την επίτευξη υψηλών επιπέδων απόδοσης όσον αφορά το σύστημα ανάρτησης του οχήματος. Για τον έλεγχο του αποσβεστήρα του ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης, πολλές στρατηγικές ελέγχου περιλαμβάνουν τον έλεγχο λειτουργίας της ολίσθησης επιφάνειας skyhook [3], τον έλεγχο του νευρωνικού δικτύου [4], τον έλεγχο H-infinity [5], τον έλεγχο groundhook, τον υβριδικό έλεγχο [6], τον ασαφή έλεγχο λογικής [7], τον έλεγχο του ασαφούς δικτύου βάσει νευρωνικού δικτύου [8], τον νευρο-ασαφή έλεγχο [9], τον έλεγχο της ασαφούς λειτουργίας μεταβλητού χρόνου [10], το βέλτιστο έλεγχο [11] και τον προσαρμοστικό ασαφή έλεγχο λογικής [12]. Μεταξύ όλων των παραπάνω συστημάτων ελέγχου, ο έλεγχος skyhook που πρότειναν οι Karnopp et al. το 1974 [13] χρησιμοποιείται ευρέως καθώς αποδίδει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης του οχήματος και της πρακτικής εφαρμογής των ημι-ενεργών συστημάτων ανάρτησης.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ερευνητές τροποποίησαν τη βασική στρατηγική ελέγχου skyhook προσθέτοντας κάποιες παραλλαγές και τις ονόμασαν βέλτιστες,

τροποποιημένες ή προσαρμοστικές στρατηγικές ελέγχου τύπου skyhook [14]. Ωστόσο, στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες, το κέρδος skyhook (SG) της στρατηγικής ελέγχου παραμένει ως μια σταθερή τιμή και συνήθως επιλέγεται από ένα σύνολο τιμών που είναι κατάλληλες για το όχημα στο περιβάλλον προσομοίωσης.

Αυτή η στρατηγική ελέγχου έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στο πλήρες μοντέλο αυτοκινήτου για τη βελτίωση της απομόνωσης των κραδασμών και του χειρισμού της απόδοσης του οχήματος. Σήμερα, ορισμένοι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στον ενεργό έλεγχο της διεύθυνσης για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του αμαξώματος στις στροφές [15]. Έχουν προταθεί τρεις τύποι ενεργών στρατηγικών ελέγχου διεύθυνσης. Αυτά είναι τα τετρακίνητα συστήματα ενεργού τιμονιού (4WAS), το ενεργό σύστημα τιμονιού μπροστινού τροχού (FWAS) και το ενεργό σύστημα διεύθυνσης των πίσω τροχών (RWAS). Το τετρακίνητο σύστημα ενεργού τιμονιού (4WAS) είναι ο συνδυασμός του πίσω ενεργού συστήματος διεύθυνσης και του μπροστινού ενεργού συστήματος διεύθυνσης. Στο σύστημα FWAS, η γωνία διεύθυνσης του μπροστινού τιμονιού καθορίζεται από τη γωνία διεύθυνσης που δημιουργείται λόγω της άμεσης εισόδου της διεύθυνσης του οδηγού και της επακόλουθης διορθωτικής εισόδου γωνίας του τιμονιού που παράγεται από τη σχεδίαση του ενεργού μπροστινού χειριστηρίου.

Η απόδοση του οχήματος κατά τη στροφή έχει βελτιωθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρονικό έλεγχο σταθερότητας (ESC). Οι κατασκευαστές των αυτοκινήτων χρησιμοποιούν διαφορετικά εμπορικά σήματα για το ESC, όπως η Volvo το ονόμασε DSTC (Dynamic Stability and Traction Control). Η Mercedes και η Holden το ονόμασαν ESP (Ηλεκτρονικό Πρόγραμμα Σταθερότητας) και το DSC (Dynamic Stability Control) είναι ο όρος που χρησιμοποιούν οι BMW και Jaguar, αλλά παρά τον όρο που διαφοροποιείται, οι διαδικασίες είναι σχεδόν ίδιες. Για να αποφευχθεί η υπερβολή και η υποστροφή κατά τη στροφή, το ESC επεκτείνει το φρένο και τη διαφορετική ροπή σε κάθε τροχό του οχήματος. Από την άλλη όμως, το ESC μειώνει τη διάρκεια ζωής του ελαστικού καθώς το ελαστικό ολισθαίνει σε ένα τυχαίο φρενάρισμα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ένα όχημα μπορεί να γείρει προς τα μέσα, μέσω ενός ενεργού ή ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης. Το παραπάνω σύστημα μπορεί να προχωρήσει στα σύγχρονα αυτοκίνητα με το πάτημα ενός κουμπιού από το χρήστη του αυτοκινήτου (Εικόνα 1.3: Διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ESP σε σύγχρονο αυτοκίνητο).



Εικόνα 1.3: Διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης ESP σε σύγχρονο αυτοκίνητο [16]

Η έννοια της «ενεργού τεχνολογίας κλίσης» έχει γίνει αρκετά δημοφιλής στα οδικά οχήματα και στα σύγχρονα σιδηροδρομικά οχήματα. Τώρα στην Ευρώπη, τα περισσότερα νέα τρένα υψηλής ταχύτητας είναι εφοδιασμένα με ενεργά συστήματα ελέγχου κλίσης και αυτά τα τρένα χρησιμοποιούνται ως περιφερειακά τρένα εξπρές [17]. Για την κλίση της αμαξοστοιχίας προς τα μέσα κατά τη στροφή, οι ενεργοποιητές κλίσης χρησιμοποιούνται ως στοιχείο του δευτερεύοντος συστήματος ενεργού ανάρτησης. Αυτοί οι ενεργοποιητές ονομάζονται ενισχυτές. Σε ένα οδικό όχημα, οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται επίσης για να επηρεάσουν τη γωνία κύλισης του οχήματος μέσω ενός ενεργού συστήματος ανάρτησης. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, έχει γίνει εκτεταμένη εργασία για την ανάπτυξη του οχήματος κλίσης τόσο από την αυτοκινητοβιομηχανία όσο και από ακαδημαϊκούς ερευνητές [18] [19].

Αυτή η ιδιαίτερη μικρή και στενή γεωμετρική ιδιότητα του οχήματος δημιουργεί προβλήματα σταθερότητας όταν το όχημα πρέπει να στρίψει ή να αλλάξει μια λωρίδα. Υπάρχουν επίσης δύο τύποι συστημάτων ελέγχου που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση του οχήματος με στενή κλίση. Αυτά τα συστήματα ελέγχου ορίζονται ως συστήματα ελέγχου άμεσης κλίσης (DTC) και ελέγχου κλίσης διεύθυνσης (STC) [20] [21]. Ένα τυπικό αμάξωμα επιβατικού οχήματος μπορεί να έχει κλίση έως και 10 μοίρες καθώς η μέγιστη διαδρομή ανάρτησης είναι περίπου 0,25 m. Στη συνέχεια, η πλευρική επιτάχυνση του κεκλιμένου οχήματος που προκαλείται από τη βαρύτητα μπορεί να φτάσει το μέγιστο περίπου 0,17 g [22]. Δεδομένου ότι η πλευρική επιτάχυνση που παράγεται από τους κανονικούς ελιγμούς του τιμονιού είναι περίπου 0,3-0,5 g, τα ενεργά ή ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τις επιδόσεις χειρισμού του οχήματος. Τα ημι-ενεργά ή ενεργά συστήματα ανάρτησης μπορούν να δράσουν αμέσως για να γείρουν το όχημα με τη βοήθεια ημι-ενεργών αποσβεστήρων ή ενεργοποιητών. Ωστόσο, τα ενεργά συστήματα ανάρτησης πρέπει να αποφεύγουν την υπερβολικά ευαίσθητη αντίδραση στις οδηγίες διεύθυνσης του οδηγού για την ασφάλεια του οχήματος. Η Bose Corporation παρουσίασε το σύστημα ανάρτησης Bose, στο οποίο οι γραμμικοί ηλεκτρομαγνητικοί αποσβεστήρες μεγάλου εύρους ζώνης βελτίωσαν τη στροφή του οχήματος [23]. Είναι σε θέση να αντισταθμίσει το αμάξωμα του οχήματος σφίγγοντας την ανάρτηση ενώ στρίβει. Η Nissan έχει αναπτύξει επίσης ένα τετράτροχο όχημα με το όνομα Land Glider. Το



αμάξωμα του οχήματος μπορεί να κλίνει σε γωνία έως 17° για πιο ευκρινή χειρισμό, λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα, τη γωνία διεύθυνσης και το ρυθμό εκτροπής του οχήματος. Επιπλέον, στις εργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω και σε άλλες έρευνες, η επίδραση της γωνίας του δρόμου δε λαμβάνεται υπόψη ούτε στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου ούτε στο δυναμικό μοντέλο των τυποποιημένων επιβατικών οχημάτων με κλίση [24] [25]. Η μη ενσωμάτωση της γωνίας του οδοστρώματος δημιουργεί μια απαίτηση μηδενικής ροπής σταθερής κατάστασης. Επομένως, αυτό το φαινόμενο πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά το σχεδιασμό του ελέγχου της κλίσης και του δυναμικού μοντέλου του πλήρους μοντέλου του αυτοκινήτου. Για να έχει κλίση ένα όχημα που ενσωματώνει τη γωνία της όχθης του δρόμου, ο χρόνος απόκρισης του ενεργοποιητή ή του ημι-ενεργού αποσβεστήρα παίζει σημαντικό ρόλο.

Η πλειονότητα των ημι-ενεργών συστημάτων ανάρτησης χρησιμοποιούν πνευματικά ή υδραυλικά συστήματα ως ενεργοποιητή ή ημι-ενεργό αποσβεστήρα [26] [27] [28]. Αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα δύναμης και ισχύος αλλά υποφέρουν από χαμηλή απόδοση και εύρος ζώνης απόκρισης. Εμπορικά συστήματα που ενσωματώνουν ηλεκτρομαγνητικά στοιχεία (συνδυάζουν περιστροφικούς ενεργοποιητές και μηχανικά στοιχεία) απεικονίζουν τις ιδιότητες των μαγνητο-ρευολογικών ρευστών στην τεχνολογία του αποσβεστήρα για να παρέχουν ρυθμιζόμενη ακαμψία του ελατηρίου. Ωστόσο, οι γραμμικοί ηλεκτρομαγνητικοί ενεργοποιητές εμφανίζονται ως η καλύτερη λύση για ένα ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης σε σχέση με τα υπόλοιπα ανταγωνιστικά συστήματα.

## 1.2 ΤΥΠΟΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι εξαρτημάτων της ανάρτησης: σύνδεσμοι, ελατήρια και αμορτισέρ. Οι σύνδεσμοι είναι οι ράβδοι και τα στηρίγματα που υποστηρίζουν τους τροχούς, τα ελατήρια και τα αμορτισέρ. Τα ελατήρια βοηθούν το όχημα αποσβένοντας τους κραδασμούς από τα χτυπήματα και τις λακκούβες στο δρόμο. Τα αμορτισέρ χρησιμοποιούν υδραυλικά έμβολα και κυλίνδρους για να απορροφούν επίσης τους κραδασμούς στο όχημα. Χρησιμεύουν επίσης στην εξασθένιση των ταλαντώσεων των ελατηρίων, φέρνοντας έτσι το όχημα πίσω σε ουδέτερη θέση αμέσως μετά την επαφή με κάποια κλίση ή διαφορά του δρόμου.

**Σύνδεσμοι:** Υπάρχουν διάφοροι διαμορφωμένοι σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται για τους διαφορετικούς τύπους των συστημάτων ανάρτησης. Διαφέρουν από ευθείες ράβδους έως σφυρήλατα, χυτά ή σφραγισμένα μεταλλικά σχήματα που ταιριάζουν καλύτερα στα ελατήρια, τους κραδασμούς και τους τροχούς στα πλαίσια του οχήματος ή στις δομές του αμαξώματος. Ο απλούστερος σύνδεσμος είναι μια ευθεία ράβδος που συνδέει τον ένα τροχό στον άλλο στην αντίθετη πλευρά του οχήματος. Άλλοι μπορούν να έχουν περίπλοκο σχήμα ώστε να συνδέουν τα ελατήρια, τα αμορτισέρ και τους τροχούς με τα οχήματα.

**Ελατήρια:** Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ελατηρίων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ανάρτησης: πηνίο, φύλλα και ράβδοι στρέψης. Τα σπειροειδή ελατήρια είναι απλώς ράβδοι στρέψης. Χρησιμοποιούνται συνήθως επειδή είναι συμπαγείς, εύκολα τοποθετημένες και έχουν εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής και μακρά διάρκεια ζωής. Τα ελατήρια φύλλων είναι μακριά λεπτά μέλη που φορτώνονται σε κάμψη. Χρησιμοποιούνται ως ένα συγκρότημα που αποτελείται από πολλά στρώματα λεπτού

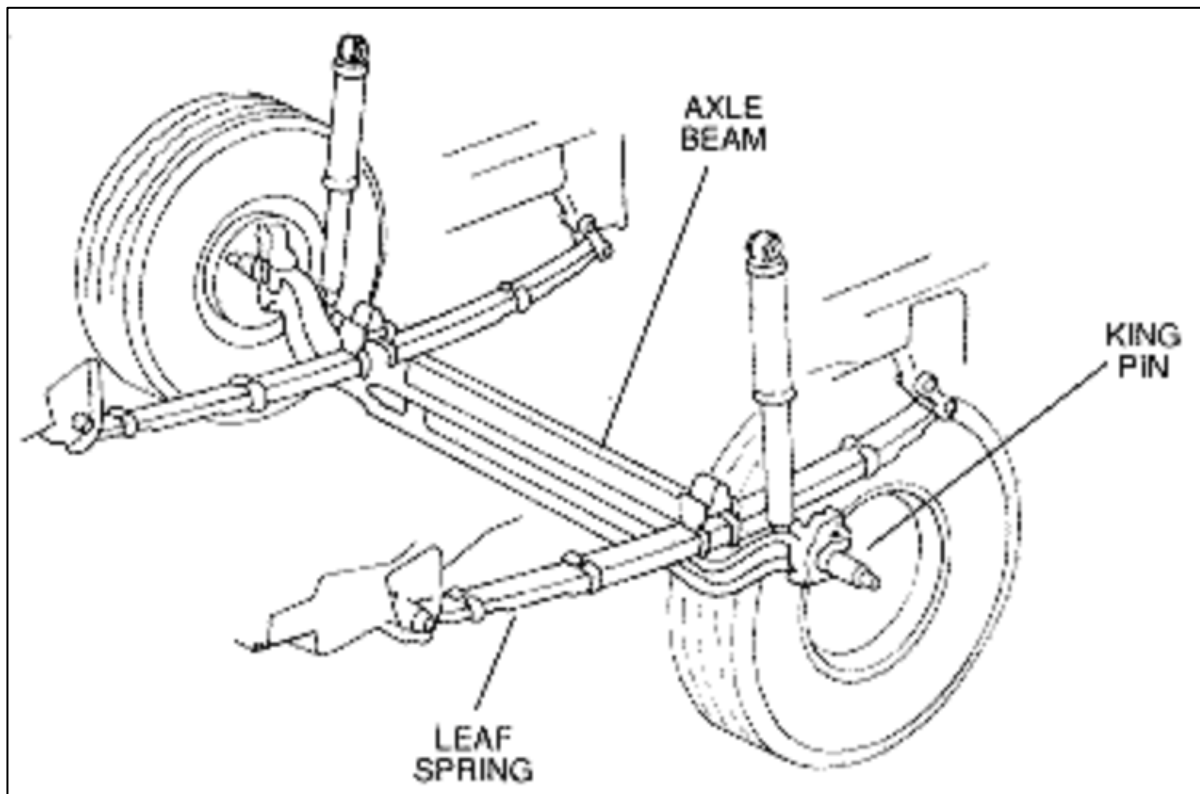
μετάλλου για να ληφθεί ο σωστός ρυθμός του ελατηρίου. Τα ελατήρια των φύλλων χρησιμεύουν τόσο ως ένα μέλος απόσβεσης όσο και ως ένας σύνδεσμος. Οι ράβδοι στρέψης βασίζονται στη συστοφή μιας μακράς ράβδου για να παρέχουν ρυθμό ελατηρίου για να μειώσουν τη φόρτωση των κραδασμών του αυτοκινήτου. Οι ράβδοι στρέψης συναρμολογούνται στο κάτω μέρος ενός οχήματος και είναι πιο δύσκολο να συσκευαστούν από άλλες.

Αμορτισέρ: Τα αμορτισέρ χρησιμοποιούν ένα έμβολο και κύλινδρο μαζί με ρυθμιζόμενες βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής του υδραυλικού υγρού για να ρυθμίσουν τη δύναμη της απόσβεσης και στις δύο θέσεις ανάσυρσης και επέκτασης (αναπήδησης). Τα αμορτισέρ ρυθμίζονται να αποσύρονται με χαμηλότερη δύναμη από ότι εκτείνονται. Αυτή η δράση απορροφά τις δυνάμεις πρόσκρουσης του δρόμου και μειώνει τις ταλαντώσεις των ελατηρίων με αποτέλεσμα καλύτερη οδήγηση και έλεγχο του οχήματος.

### **1.3 ΤΥΠΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ**

#### **1.3.1 Άξονας – δοκός**

Αρχικά, ο εμπρόσθιος άξονας των οχημάτων με πίσω κίνηση ήταν σχεδιασμένος με μια συμπαγή δοκό. Αποτελείται αποκλειστικά από ένα σταθερό συνεχές μέλος που εκτείνεται σε ολόκληρο το μπροστινό άκρο του οχήματος που συνδέει τους δύο τροχούς (Εικόνα 1.4: Ανάρτηση άξονα ). Αυτό αναφέρεται ως ένα «εξαρτώμενο» σύστημα ανάρτησης, καθώς οι δύο τροχοί συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους σε αντίθεση με ένα «ανεξάρτητο» σύστημα ανάρτησης όπου οι δύο τροχοί δε συνδέονται άμεσα μεταξύ τους. Τα αυθεντικά επιβατικά αυτοκίνητα Model T ήταν με πίσω κίνηση και είχαν ένα εξαρτώμενο σύστημα μπροστινής ανάρτησης με το οποίο ένας άξονας από συμπαγή δοκό επεκτεινόταν σε όλο το πλάτος του οχήματος που συνέδεε τους δύο τροχούς. Ο άξονας ήταν κατασκευασμένος από σφυρήλατο χάλυβα δοκού I και είχε μηχανικά άκρα που επέτρεπαν τη συναρμολόγηση κατακόρυφων συναρμολογημένων πτερυγίων, επιτρέποντας στους τροχούς να περιστρέφονται για να διευκολύνουν την οδήγηση του οχήματος. Για να επιβραδυνθεί η διαδρομή, τοποθετήθηκε ένα εγκάρσιο ημι-ελλειπτικό ανεστραμμένο ελατήριο φύλλων μεταξύ του άξονα και του αμαξώματος του αυτοκινήτου. Τα δύο καμπυλωμένα άκρα του ελατηρίου των φύλλων στερεώθηκαν σε κάθε άκρο του άξονα ενώ το ανώτερο κεντρικό τμήμα στερεώθηκε σε δύο στενές θέσεις απευθείας στο πλαίσιο του αυτοκινήτου.



Εικόνα 1.4: Ανάρτηση άξονα δοκού [29]

Οι άξονες στερεάς δέσμης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τροχούς κίνησης όπου το ίδιο το συγκρότημα του κινητήριου άξονα χρησιμεύει ως μέλος της στερεάς δέσμης που συνδέει τους δύο κινητήριους τροχούς ενός οχήματος, όπως εκείνο που χρησιμοποιείται στο Μοντέλο T. Οι άξονες της κίνησης περιέχουν έναν αριθμό μηχανικών εξαρτημάτων που παρέχουν ισχύ από τον κινητήρα, μέσω του άξονα μετάδοσης κίνησης, στον άξονα μετάδοσης κίνησης που τον εκτρέπει 90 μοίρες στους τροχούς των αυτοκινήτων. Η μικρή ράβδος σε αυτό το σύστημα ονομάζεται «ράβδος τροχιάς» και συνδέεται με το πλαίσιο του οχήματος για να χρησιμεύσει ως πλευρική στήριξη για τον κινητήριο άξονα. Ο σύνδεσμος και η «ράβδος πρόσδεσης» παρέχουν το σύστημα διεύθυνσης του οχήματος.

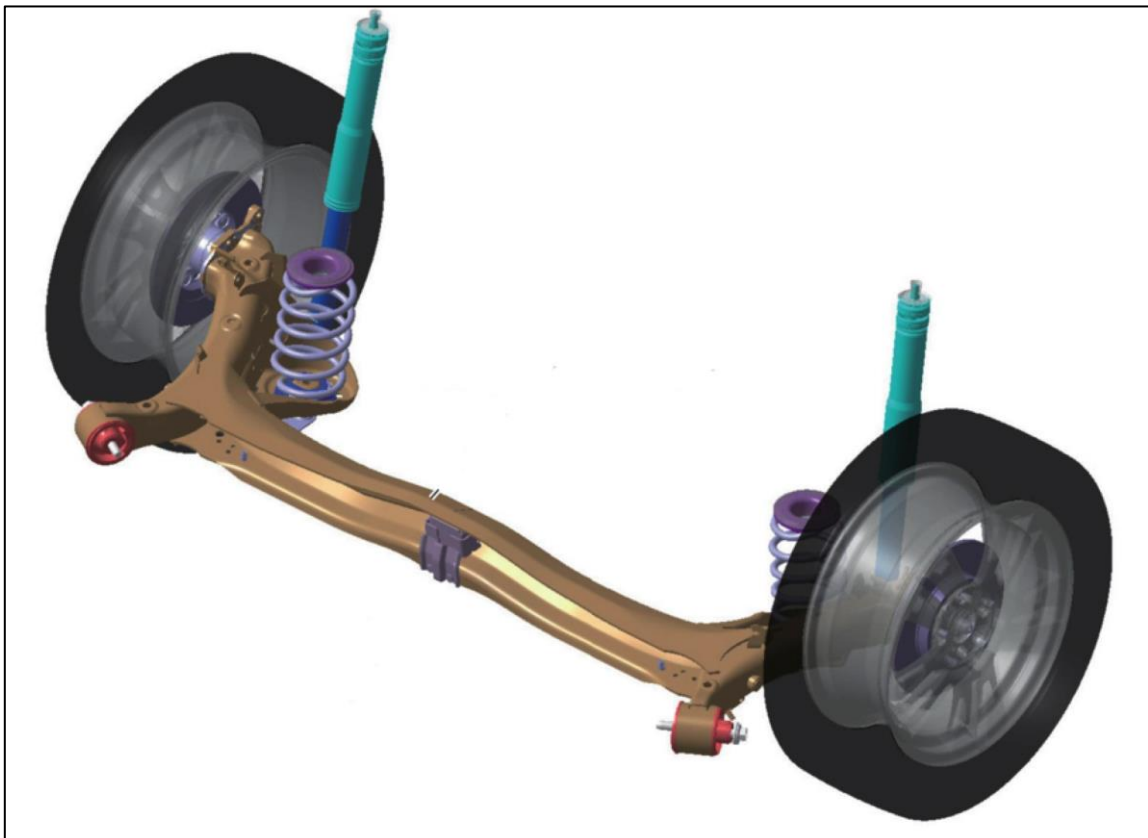
Το διαφορικό είναι μια έξυπνη συσκευή που παρέχει ισχύ σε καθέναν από τους δύο κινητήριους τροχούς ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής του καθενός, όπως όταν ένα όχημα κινείται γύρω από μια γωνία. Οι κινητήριοι άξονες χρησιμοποιήθηκαν παραδοσιακά για τους πίσω τροχούς του αυτοκινήτου και για το μπροστινό μέρος των τετρακίνητων οχημάτων. Πιο πρόσφατα, πολλά αυτοκίνητα έχουν μετακινηθεί στους μπροστινούς τροχούς, όπου η μετάδοση και ο άξονας μετάδοσης συνδυάζονται και ονομάζονται «κιβώτιο ταχυτήτων».

Τα πλεονεκτήματα των αξόνων της στερεάς δοκού είναι ότι είναι απλοί και ισχυροί. Επίσης, η γωνία Camber των τροχών ελέγχεται στενά με τον τροχό να είναι σχεδόν κάθετος προς το δρόμο κατά την κατακόρυφη κίνηση του οχήματος. Αυτό έχει ιδιαίτερο πλεονέκτημα για τα φορτηγά που μεταφέρουν βαριά φορτία, διατηρώντας τους τροχούς στις 90 μοίρες σε σχέση με το πεζοδρόμιο. Ένα μειονέκτημα των αξόνων της συμπαγούς δοκού είναι ότι δεν υπάρχει ρύθμιση της γωνίας Camber κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης στροφής για να διατηρούνται οι τροχοί από τις άκρες τους και να έρχονται σε στενή επαφή με το πεζοδρόμιο, όπως άλλες μορφές συστήματος ανάρτησης. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι (δεδομένου ότι και οι δύο τροχοί είναι

συνδεδεμένοι μεταξύ τους) ότι ένα όχημα με έναν τροχό που αντιμετωπίζει μια πρόσκρουση στο δρόμο στέλνει ένα κύμα (ταλάντωση) σε ολόκληρο το πίσω μέρος (ή μπροστά) του οχήματος που οδηγεί σε ενόχληση των επιβατών και πιθανό «κούνημα». Επίσης, οι συμπαγείς άξονες δοκού προσθέτουν υψηλό μη αναρτώμενο βάρος σε ένα όχημα που οδηγεί σε πιο σκληρή οδήγηση και δυσφορία στους επιβάτες.

### 1.3.2 Ημιάκαμπτος άξονας

Ο ημιάκαμπτος άξονας είναι γνωστός ως το πιο δημοφιλές σύστημα ανάρτησης πίσω άξονα για μικρά και μεσαία οχήματα εμπρός τροχού. Η ανάρτηση αυτή αποτελείται από δύο πίσω βραχίονες με ένα εύκαμπτο σταυρωτό μέλος μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5: Ημιάκαμπτος άξονας [30]. Ο σταυρός απορροφά όλες τις δυνάμεις και ταυτόχρονα λειτουργεί ως μια αντιολισθητική ράβδος. Η ανάρτηση είναι στην ουσία μια ημι-ανεξάρτητη ανάρτηση. Διαθέτει λίγα στοιχεία και μια απλή δομή. Επομένως, είναι ελαφριά, φθηνή, εύκολη στη συναρμολόγηση και απαιτεί λίγο χώρο. Η ελαφριά φύση του συστήματος οδηγεί σε βελτιωμένη άνεση κατά την οδήγηση, αλλά η παραμόρφωση των σταυρωτών μελών προσφέρεται για την τάση της πλευρικής δύναμης και του κακού χειρισμού. Επιπλέον, η ευελιξία των σταυρωτών μελών μειώνει τον έλεγχο της γωνίας Camber και της κύλισης του αμαξώματος.

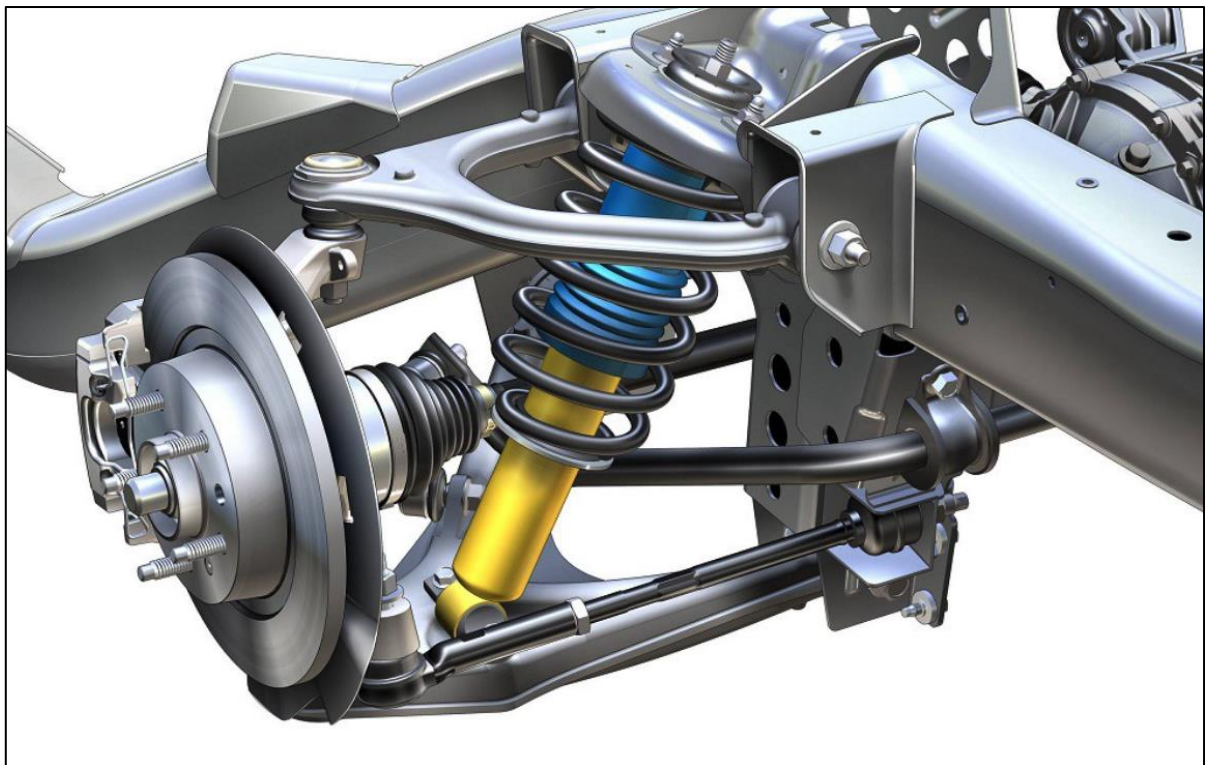


Εικόνα 1.5: Ημιάκαμπτος άξονας [30]

### 1.3.3 Ανάρτηση «Double Wishbone» (διπλού ψαλιδιού)

Η ανάρτηση double wishbone (Εικόνα 1.6: Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1930 στην Ευρώπη και στη συνέχεια το 1935 στο Ντιτρόιτ. Πολλά οχήματα τη χρησιμοποίησαν έως ότου τα αυτοκίνητα εμπρός τροχού τέθηκαν σε λειτουργία από τη δεκαετία του 1970 όταν μια μορφή της ανάρτησης διπλού ψαλιδιού που ονομάζεται γόνατο MacPherson χρησιμοποιήθηκε ευρέως. Το διπλό ψαλίδι ταξινομείται ως ένα ανεξάρτητο σύστημα ανάρτησης που έχει χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση των συστημάτων ανάρτησης που εξαρτώνται από τον τύπο δέσμης που συζητήθηκαν προηγουμένως.

Το σύστημα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού αποτελείται από δύο βραχίονες ίσου μεγέθους, τοποθετημένοι ο ένας πάνω στον άλλο. Τα κλειστά άκρα των δύο βραχιόνων ψαλιδιού είναι αρθρωτά τοποθετημένα στο πάνω και κάτω μέρος της άρθρωσης του οχήματος για την παροχή της διεύθυνσης του οχήματος. Η άρθρωση του οχήματος στηρίζει τον άξονα ή το κέντρο στο οποίο είναι τοποθετημένος ο τροχός. Τα δύο ανοιχτά άκρα κάθε μέλους του ψαλιδιού είναι αρθρωτά, τοποθετημένα στο πλαίσιο του οχήματος. Σε περίπτωση που η ανάρτηση διπλού ψαλιδιού χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του τροχού κίνησης, ένα ελατήριο κάθεται στο κεντρικό τμήμα του άνω βραχίονα και εκτείνεται προς τα πάνω όπου στηρίζεται από ένα μέλος του αμαξώματος. Σε αυτήν την περίπτωση, ο άνω βραχίονας υποστηρίζει το μεγαλύτερο μέρος του κατακόρυφου φορτίου και υπάρχει χώρος για τον άξονα μετάδοσης κίνησης.



Εικόνα 1.6: Ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [31]

Όταν η ανάρτηση του διπλού ψαλιδιού χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή τροχού χωρίς κίνηση, το ελατήριο εδράζεται στο κεντρικό τμήμα του κάτω βραχίονα και εκτείνεται και πάλι προς τα πάνω έως ένα μέλος στήριξης του αμαξώματος, με τον κάτω βραχίονα να υποστηρίζει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου του οχήματος.

Η ανάρτηση wishbone είναι ελαφρύτερη από το σύστημα ανάρτησης τύπου δέσμης αλλά είναι πιο δαπανηρή, καθώς οι δύο σύνδεσμοι wishbone έχουν πιο περίπλοκο σχήμα και έχουν έξι σημεία σύνδεσης, σε αντίθεση με τα δύο για τα

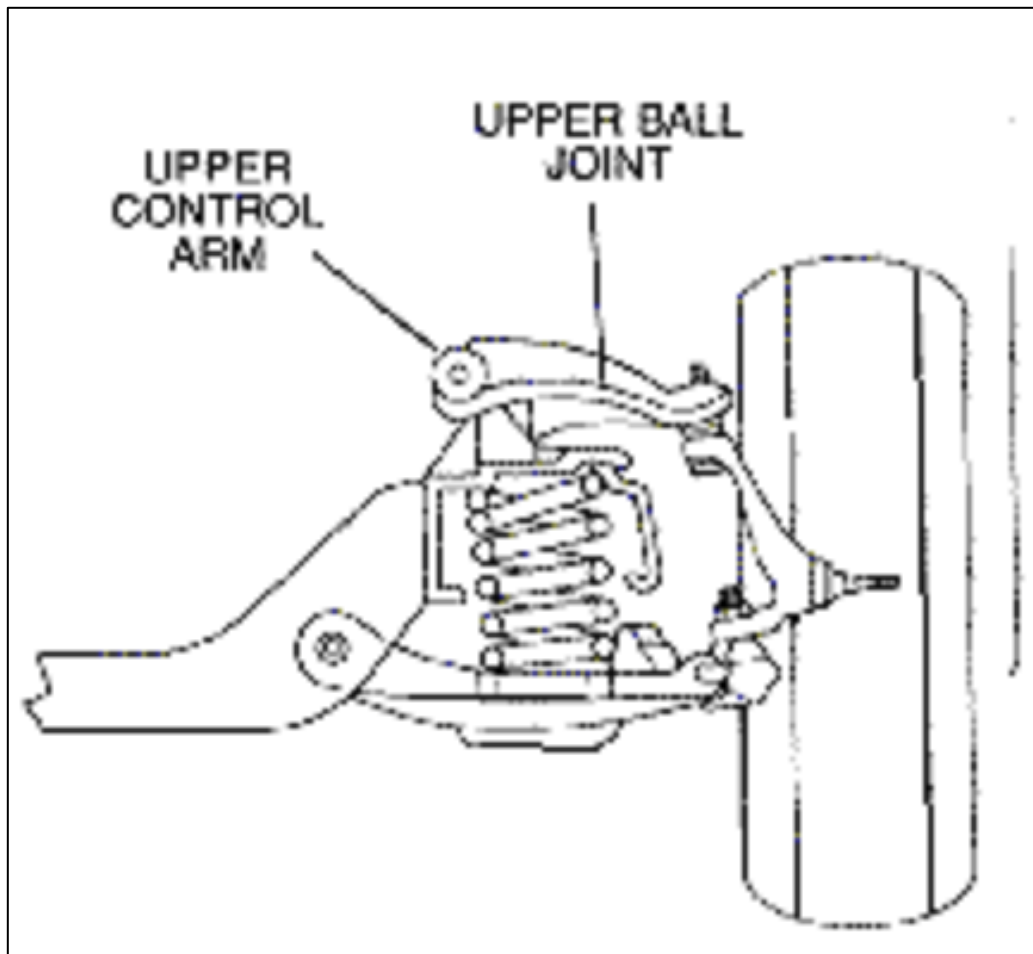
συστήματα ανάρτησης τύπου στερεάς δέσμης. Και τα δύο συστήματα υποστηρίζουν τους τροχούς σε κάθετο σχέδιο στο δρόμο, δίνοντάς τους ένα πλεονέκτημα έναντι ορισμένων άλλων συστημάτων ανάρτησης, τα οποία, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, αλλάζουν την κλίση του τροχού καθ' όλη τη διάρκεια της χρήσης της ανάρτησης, δημιουργώντας φθορά στα άκρα των ελαστικών και τρίψιμο των τροχών στην επιφάνεια του δρόμου, αν και σε ορισμένα οχήματα, η στενά ελεγχόμενη αλλαγή της κλίσης με την ανάρτηση μπορεί να είναι ένα πλεονέκτημα. Άλλες παράμετροι μπορούν να ελεγχθούν καθ' όλη τη διάρκεια της ανάρτησης με συστήματα ανάρτησης διπλού ψαλιδιού όπως τη γωνία Caber, τη γωνία Castel και τη γωνία του πέλματος.

#### **1.3.4 Ανάρτηση με κοντό/μακρύ βραχίονα**

Η ανάρτηση με κοντό / μακρύ βραχίονα (Εικόνα 1.7: Ανάρτηση με κοντό / μακρύ βραχίονα [29]) είναι μια τροποποίηση της ανάρτησης διπλού ψαλιδιού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στους εμπρός όσο και στους πίσω τροχούς των αυτοκινήτων. Στην ανάρτηση διπλού ψαλιδιού, οι δύο βραχίονες έχουν ίσο μήκος. Σε μια ανάρτηση κοντού / μακρύ βραχίονα (SLA), οι δύο βραχίονες έχουν άνισο μήκος με τον άνω βραχίονα να είναι μικρότερος από τον κάτω βραχίονα (υπάρχουν και άλλες εκδόσεις διπλών αναρτήσεων ψαλιδιού με ακόμη και διαφορετικά σχετικά μήκη του βραχίονα.) Η ανάρτηση κοντού / μακρύ βραχίονα θεωρείται ανεξάρτητη ανάρτηση, καθώς οι δύο τροχοί δεν είναι άμεσα συνδεδεμένοι καθώς βρίσκονται στον τύπο της στερεάς δέσμης.

Το κλειστό (εξωλέμβιο) άκρο των άνω και κάτω στελεχών του ψαλιδιού συνδέεται με την άρθρωση που περιέχει τον άξονα στον οποίο είναι τοποθετημένος ο τροχός. Και οι δύο συνδέσεις του βραχίονα με αρθρώσεις γίνονται χρησιμοποιώντας έναν περιστρεφόμενο σύνδεσμο που επιτρέπει την οδήγηση του οχήματος. Τα δύο εσωτερικά άκρα και των δύο βραχιόνων συνδέονται με ένα δομικό στέλεχος του οχήματος μέσω λαστιχένιων τμημάτων που επιτρέπουν στο βραχίονα να περιστρέφει τους τροχούς προς τα πάνω και προς τα κάτω.





Εικόνα 1.7: Ανάρτηση με κοντό / μακρύ βραχίονα [29]

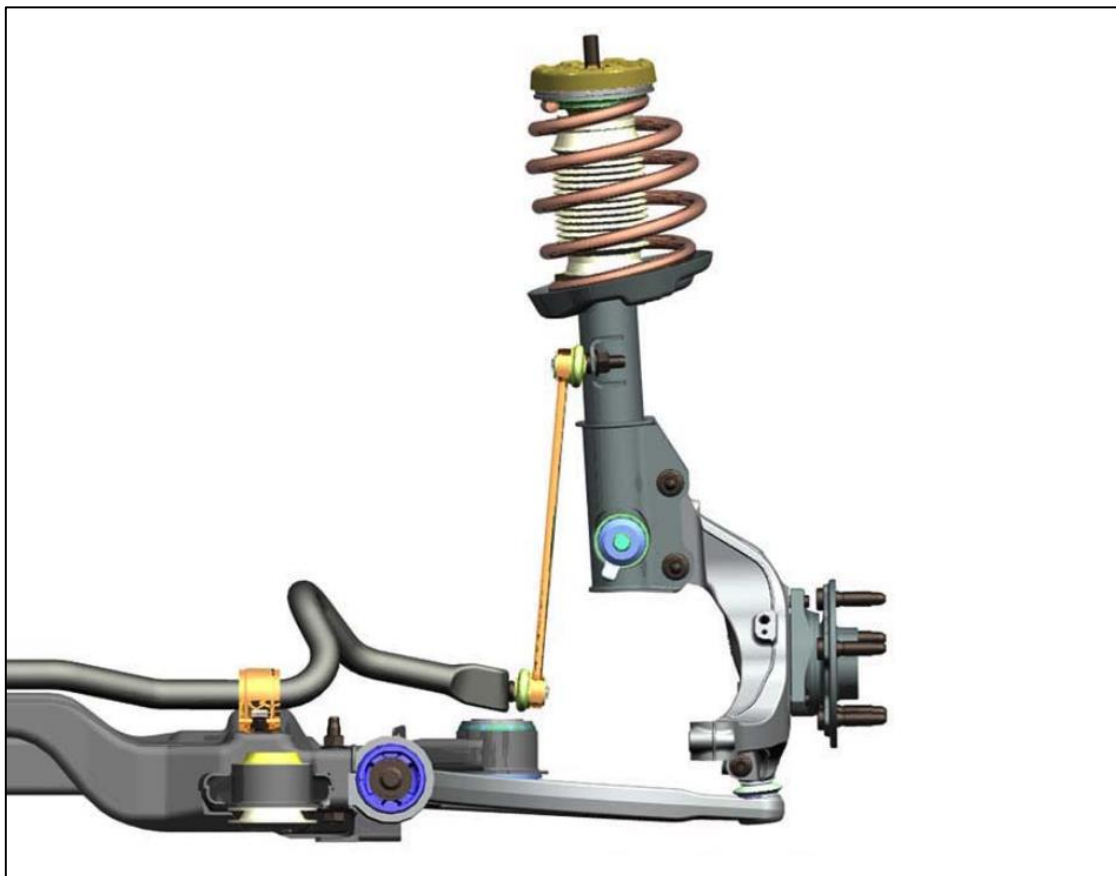
Αυτός ο σχεδιασμός βοηθά στον έλεγχο της καμπίνας και στον περιορισμό της φθοράς των άκρων των ελαστικών κατά τη στροφή του οχήματος. Το μήκος του άνω βραχίονα γίνεται μικρότερο τείνοντας να στρίψει το αυτοκίνητο, με φυγοκεντρική δύναμη που τείνει να κυλήσει το όχημα. Αυτό το σύστημα ανάρτησης ενεργεί για να μετακινήσει το μοτίβο επαφής πίσω στο κέντρο του ελαστικού και για τους δύο τροχούς. Αυτό το φαινόμενο πραγματοποιείται μέχρι το τέρμα, καθιστώντας το μια ιδανική ανάρτηση για τα οχήματα επιδόσεων. Το ομοαξονικό ελατήριο και αμορτισέρ μπορούν να τοποθετηθούν στον κάτω βραχίονα για τα συστήματα τροχών χωρίς κίνηση και στον άνω βραχίονα για τις εγκαταστάσεις του τροχού. Αυτός ο σχεδιασμός ζυγίζει και κοστίζει περίπου το ίδιο με τη δημοφιλή ανάρτηση Macpherson Strut. Καταλαμβάνει περισσότερο χρήσιμο χώρο από την ανάρτηση Macpherson Strut και επομένως, δεν επιτρέπει τόσο μεγάλο χώρο για έναν εγκάρσιο συναρμολογημένο κινητήρα και τον εμπρόσθιο άξονα κίνησης που είναι κοινά σε πολλά από τα σημερινά οικονομικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν το Macpherson. Χρησιμοποιείται καλύτερα για τους τροχούς ενός εμπρόσθιου ενσωματωμένου κινητήρα, πίσω κίνησης.

### 1.3.5 Ανάρτηση MacPherson Strut

Η ανάρτηση MacPherson εφευρέθηκε από τον Earle S. Macpherson, έναν Αμερικανό μηχανικό αυτοκινήτων το 1947. Η ανάρτηση γόνατου Macpherson αλλιώς, είναι ένα σύστημα ανάρτησης ελαφρύτερου βάρους από μια ανάρτηση δοκού και έχει

περίπου το ίδιο βάρος και κόστος με την ανάρτηση κοντού / μακρύ βραχίονα που συζητήθηκε παραπάνω. Όπως η ανάρτηση κοντού / μακρύ βραχίονα, και αυτή η ανάρτηση ταξινομείται ως μια ανεξάρτητη ανάρτηση. Έγινε αρκετά δημοφιλής τη δεκαετία του 1970 όταν τα ελαφριά, μπροστινής κίνησης αυτοκίνητα έγιναν ο κανόνας λόγω των κυβερνητικών κανονισμών που απαιτούσαν μια πιο αποδοτική λειτουργία του καυσίμου.

Η ανάρτηση γόνατου MacPherson μοιάζει με την κοντή / μακριά ανάρτηση εκτός από το ότι ο άνω βραχίονας περιστρέφεται  $90^\circ$  προς τα πάνω και προς τα έξω σε σχεδόν κάθετη θέση και αντικαθίσταται με ένα μακρύ μέλος. Αυτό το άνω μέλος, που ονομάζεται γόνατο, περιέχει ένα ομοαξονικό ελατήριο και αμορτισέρ με ρουλεμάν ώθησης κατά της τριβής στην κορυφή. Σε μια τυπική εφαρμογή, συνδέεται θετικά στην κορυφή με μια δομή αμαξώματος και επίσης προσαρμόζεται θετικά στο κάτω μέρος της άρθρωσης. Έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει κάθετα εφαρμοσμένα φορτία και περιστρέφεται στο πάνω ρουλεμάν. Βοηθά στον έλεγχο του θαλάμου κατά τη στροφή του οχήματος, όπως τα συστήματα ανάρτησης κοντού / μακρύ βραχίονα, αλλά όχι καθ' όλη την πλήρη αναπήδηση λόγω της αλλαγής στο μήκος και τη γωνία στήριξης του στηρίγματος σε σύγκριση με το βραχίονα. Περιστρέφοντας το συγκρότημα του άνω βραχίονα προς τα πάνω και προς τα έξω δημιουργείται χώρος που απαιτείται για τον εγκάρσιο συναρμολογημένο κινητήρα και τον άξονα μετάδοσης κίνησης. Ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί παρόμοιο σύνδεσμο με σχήμα κατώτερου ψαλιδιού για την παροχή πλευρικής και διαμήκους στήριξης για τον τροχό.



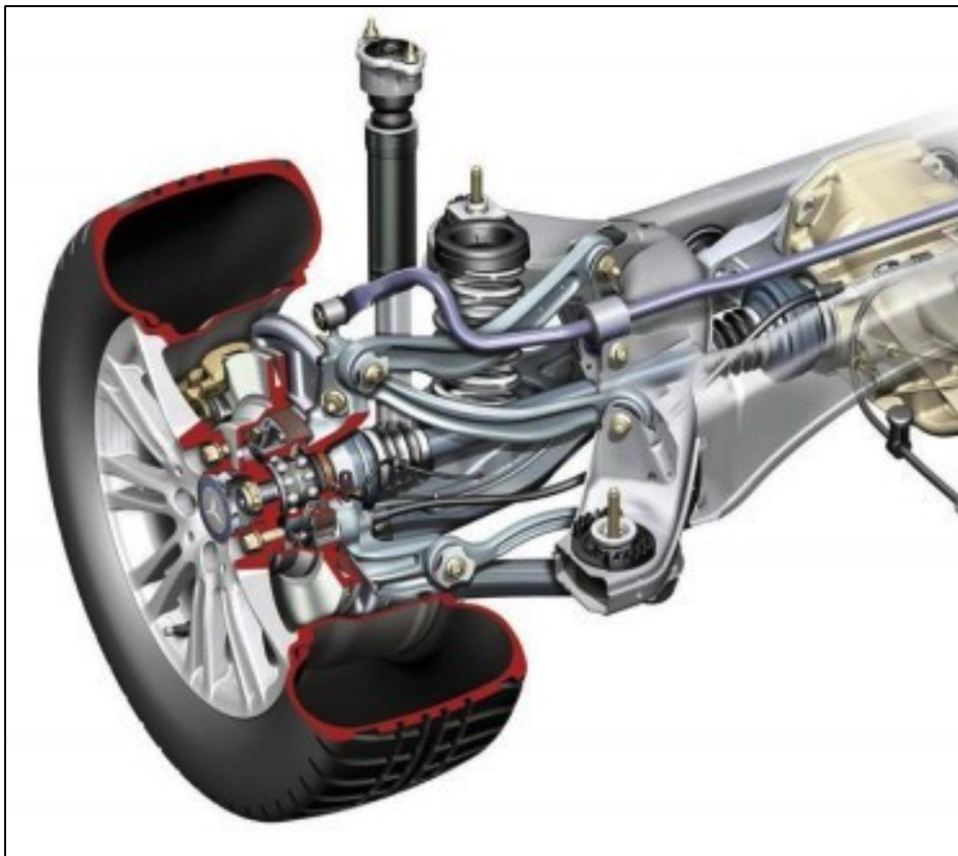
Εικόνα 1.8: Ανάρτηση MacPherson [32]

Σε μερικά από τα ίδια οχήματα, ένα γόνατο χρησιμοποιείται επίσης στο πίσω σύστημα ανάρτησης. Είναι παρόμοιο με το μπροστινό γόνατο, αλλά δεν έχει το ρουλεμάν κατά της τριβής στην κορυφή.



### 1.3.6 Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα ανάρτησης πολλαπλών συνδέσμων έχουν γίνει δημοφιλή στον πίσω άξονα των πολυτελών οχημάτων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.9: Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων, μια ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων σχηματίζεται με πέντε ή περισσότερους συνδέσμους για τη δημιουργία δομής δοκών, όπου οι περισσότεροι σύνδεσμοι βρίσκονται ακριβώς κάτω από το αξονικό φορτίο. Υπάρχουν πολλές παράμετροι σχεδίασης σε αυτήν τη διαμόρφωση, επομένως οι αναρτήσεις πολλαπλών συνδέσμων μπορούν να σχεδιαστούν για τον καλύτερο έλεγχο των γωνιών των τροχών και των κινήσεων του αμαξώματος. Επίσης, η δομή της ανάρτησης πολλαπλών συνδέσμων την καθιστά πολύ ελαφριά. Ο μεγάλος αριθμός συνδέσμων καθιστά τις αναστολές των πολλαπλών συνδέσμων περίπλοκες και ακριβές με περισσότερο αυξημένο κόστος συντήρησης.



Εικόνα 1.9: Ανάρτηση πολλαπλών συνδέσμων [33]

### 1.3.7 Σύγκριση των αναρτήσεων

#### Ανάρτηση άξονα δοκού

Πρόκειται για έναν τύπο ανάρτησης που είναι ισχυρός, ανθεκτικός και διατηρεί καλή επαφή των ελαστικών στο δρόμο υπό όλες τις συνθήκες φόρτωσης. Είναι ένας «εξαρτώμενος» τύπος που σημαίνει ότι οι τροχοί συνδέονται μηχανικά έτσι ώστε όταν

κάποιος χτυπήσει ένα εμπόδιο στο δρόμο, γίνεται αισθητό σε όλο το πλάτος του οχήματος. Αυτή η ανάρτηση είναι καλή για χρήση σε φορτηγά.

#### Διπλός άξονας δοκού

Πρόκειται για μια ισχυρή, ανθεκτική ανάρτηση που δεν διατηρεί τόσο καλή επαφή με το δρόμο όσο η ανάρτηση του άξονα δοκού. Είναι ένας «ανεξάρτητος» τύπος ανάρτησης που σημαίνει ότι οι τροχοί δεν συνδέονται μηχανικά έτσι ώστε όταν κάποιος χτυπήσει ένα εμπόδιο στο δρόμο, δεν γίνεται αισθητό σε όλο το πλάτος του οχήματος. Χρησιμοποιείται στο μπροστινό μέρος από ένα ελαφρύ φορτηγό για παράδειγμα.

#### Διπλό ψαλίδι

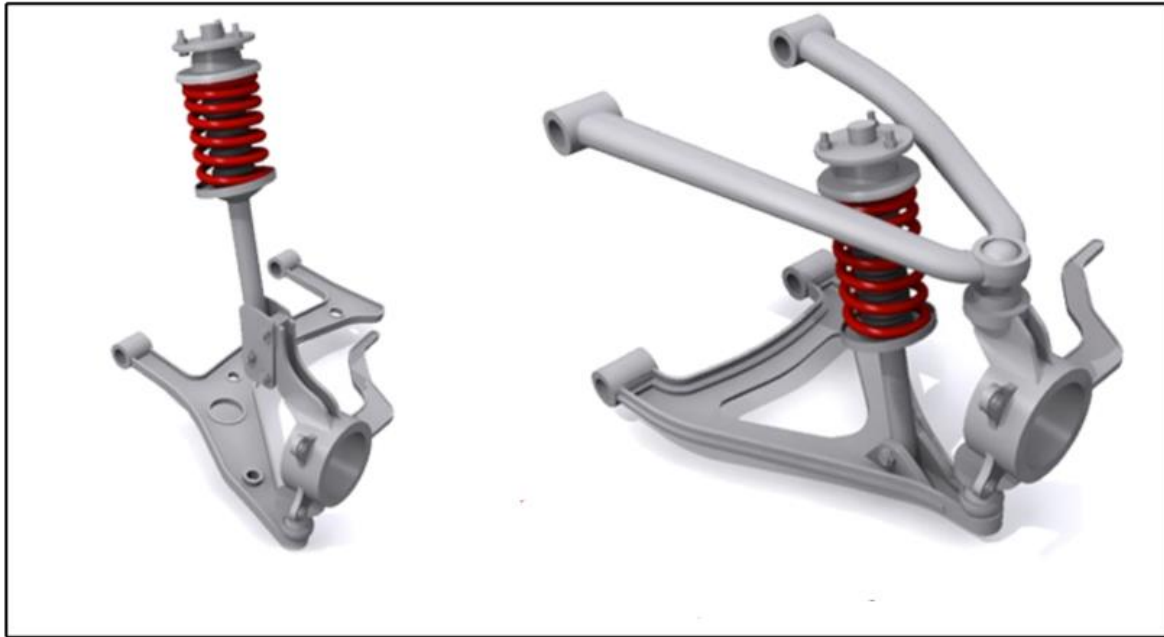
Πρόκειται για μια ελαφρύτερη, πιο δαπανηρή ανάρτηση από τον τύπο δοκού αλλά προσθέτει περισσότερο χώρο για τη συσκευασία άλλων εξαρτημάτων. Είναι ένας ανεξάρτητος τύπος ανάρτησης που διατηρεί καλή επαφή των ελαστικών με το δρόμο σε πλήρη ανάρτηση. Οι γωνίες Camber, caster και το πέλμα μπορούν να ελεγχθούν σε μεγάλο βαθμό. Αυτού του τύπου αναρτήσεις είναι καλές για επιβατικά αυτοκίνητα.

#### Κοντός / μακρύς βραχίονας

Αυτός ο τύπος ανάρτησης είναι παρόμοιος με το διπλό ψαλίδι εκτός από το ότι ο άνω βραχίονας είναι κοντύτερος από τον κάτω βραχίονα. Αυτή η σχεδίαση διατηρεί καλή επαφή των ελαστικών με το δρόμο υπό όλες τις στροφές. Αυτή η ανάρτηση είναι καλή για οχήματα απόδοσης.

#### MacPherson γόνατο (strut)

Αυτός ο τύπος ανάρτησης είναι παρόμοιος με το διπλό ψαλίδι, εκτός από το ότι ο άνω βραχίονας περιστρέφεται προς τα πάνω και αντικαθίσταται με ένα μακρύ μέλος που ονομάζεται «γόνατο». Το γόνατο ενσωματώνει το ελατήριο και την ταλάντωση σε ένα ομόκεντρο πακέτο και προσκολλάται σε υψηλές βάσεις στο όχημα. Αυτός ο σχεδιασμός προσθέτει περισσότερο χώρο για τη συσκευασία των μπροστινών κινητήρων / μονάδων κιβωτίου ταχυτήτων και παρακείμενων αξόνων κίνησης.



Εικόνα 1.10: Ανάρτηση MacPherson και ανάρτηση διπλού ψαλιδιού [34]

## 1.4 ΤΥΠΟΙ ΕΛΑΤΗΡΙΩΝ

Ένα ελατήριο είναι ένα ελαστικό αντικείμενο που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της κινηματικής ενέργειας σε δυναμική και το αντίστροφο. Το ελατήριο είναι ένα σημαντικό συστατικό του συστήματος ανάρτησης καθώς φέρει τις κανονικές δυνάμεις και είναι ζωτικής σημασίας για την ποιότητα και το χειρισμό του οχήματος. Επομένως, εφευρέθηκαν διάφοροι τύποι ελατηρίων για να βελτιωθούν οι διάφορες επιδόσεις της ανάρτησης.

### 1.4.1 Σπειροειδή ελατήρια

Τα σπειροειδή ελατήρια εμφανίστηκαν στις αρχές του 15ου αιώνα. Τα σπειροειδή ελατήρια είναι κατασκευασμένα από ελαστικά υλικά διαμορφωμένα σε έλικα. Το παραδοσιακό ελατήριο όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11: Σπειροειδή ελατήρια [35] συμμορφώνεται με το νόμο του Hooke και έχει σταθερό ρυθμό ελατηρίου. Ωστόσο, στα σύγχρονα αυτοκίνητα, θα πρέπει να εφαρμόζεται σε μεταβλητό ρυθμό ελατηρίου, καθώς το ελατήριο παρέχει στο όχημα μια μαλακή διαδρομή όταν ταξιδεύει με ελαφριά φορτία και μια πιο σταθερή διαδρομή όταν ταξιδεύει με βαρύτερα φορτία. Επίσης, αυτός ο μεταβλητός ρυθμός του ελατηρίου παρέχει ένα βελτιωμένο έλεγχο του σώματος και της γωνίας. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι δημιουργίας ενός ελατηρίου μεταβλητού ρυθμού όπως περιγράφεται παρακάτω:

- τύλιγμα μεταβλητής διαμέτρου του ελαστικού υλικού που μειώνεται προς τα άκρα του ελατηρίου
- μεταβλητή διάμετρος της ράβδου όπου η ράβδος μειώνεται κοντά σε κάθε άκρο

- εκτεταμένη στάση πρόσκρουσης του ελαστομερούς
- τύλιγμα σε σχήμα κυψέλης του ελαστικού υλικού



Εικόνα 1.11: Σπειροειδή ελατήρια [35]

#### 1.4.2 Ράβδοι στρέψης

Μια ράβδος στρέψης είναι ένα στρεπτικό ελατήριο που χρησιμοποιείται ως το κύριο ελατήριο σε ένα σύστημα ανάρτησης. Είναι κατασκευασμένο ως μια μακριά ράβδος της οποίας το ένα άκρο συνδέεται με το πλαίσιο του οχήματος και το άλλο άκρο της συνδέεται με το βραχίονα του ελέγχου της ανάρτησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12: Ράβδοι στρέψης [36]. Η κατακόρυφη κίνηση του τροχού οδηγεί σε περιστροφική κίνηση στη ράβδο γύρω από τον άξονά της, η οποία αντιστέκεται από τη στρεπτική ακαμψία της ράβδου. Οι ράβδοι στρέψης της πίσω ανάρτησης χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά ευρωπαϊκά αυτοκίνητα, ενώ ορισμένα οχήματα και φορτηγά τα έχουν στις μπροστινές τους αναρτήσεις.



Εικόνα 1.12: Ράβδοι στρέψης [36]

### 1.4.3 Ελατήρια φύλλων

Τα ελατήρια φύλλων αποτελούνται από έναν αριθμό διαμήκων λωρίδων σε σχήμα τόξου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.13: Ελατήρια φύλλων [37], όπου το κέντρο του τόξου στηρίζεται από έναν άξονα. Συνήθως, το ένα άκρο του ελατηρίου φύλλων συνδέεται απευθείας στο πλαίσιο και το άλλο άκρο συνδέεται μέσω ενός δεσμού αλυσίδας. Τα ελατήρια φύλλων χρησιμοποιούνται κυρίως σε συμπαγείς πίσω άξονες, οι οποίοι εμφανίζονται κυρίως σε φορτηγά.



Εικόνα 1.13: Ελατήρια φύλλων [37]

#### 1.4.4 Εναλλακτικά ελατήρια

Τα διάφορα εναλλακτικά ελατήρια χρησιμοποιούνται σε προηγμένα συστήματα ανάρτησης όπως τα αυτόματα συστήματα και τα υδρο-πνευματικά συστήματα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους ελατηρίου είναι η ανεξαρτησία των χαρακτηριστικών της ανάρτησης από τη μεταφορά των φορτίων. Εναλλακτικά ελατήρια περιλαμβάνουν το ελατήριο αέρα και το ελατήριο αερίου.

Ελατήριο αέρα: Ένα ελατήριο αέρα, που φαίνεται στην Εικόνα 1.14: Ελατήρια αέρα [38], είναι ένα «μαξιλάρι» που φουσκώνει μέσω μιας ηλεκτρικής αντλίας αέρα. Παρέχει άνεση οδήγησης υψηλής ποιότητας χωρίς εξάρτηση από τη μεταφορά των φορτίων. Το κόστος ενός ελατηρίου αέρα είναι υψηλό και χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολυτελή σεντάν και βαρέα οχήματα όπως λεωφορεία και φορτηγά. Τα ελατήρια παρέχουν μια «αυτοεπιπεδούμενη» δυνατότητα που είναι χρήσιμη σε πολλά οχήματα.



Εικόνα 1.14: Ελατήρια αέρα [38]

Ελατήριο αερίου: Το ελατήριο αερίου είναι ένας κύλινδρος εμβόλου, γεμάτος με συμπιεσμένο αέριο. Το σχήμα γόνατου του ελατηρίου αερίου το καθιστά πολύ πρακτικό για χρήση σε μια ποικιλία συστημάτων ανάρτησης. Τα ελατήρια αερίου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αποσβεστήρες. Ως αποσβεστήρες, μπορούν να σχεδιαστούν για εξαρτήματα που λειτουργούν αργά όπως βαριές πόρτες και παράθυρα.

## 1.5 ΓΕΝΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

Το ενεργό σύστημα ανάρτησης έχει εκμεταλλευτεί τις ανώτερες επιδόσεις από την άποψη της άνεσης της οδήγησης και της απόδοσης χειρισμού της οδήγησης σε σύγκριση με άλλα παθητικά και ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ωστόσο, δεν εμπορεύονται ευρέως ακόμη, λόγω του υψηλού κόστους, του βάρους, της πολυπλοκότητας και της κατανάλωσης της ενέργειας. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα του ενεργού συστήματος ανάρτησης είναι ότι δεν είναι ασφαλές σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης έχει μελετηθεί και εμπορευματοποιηθεί ευρέως για να επιτύχει υψηλά επίπεδα απόδοσης με άνεση στην οδήγηση και στο χειρισμό του δρόμου. Για τον έλεγχο του αποσβεστήρα του ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης, έχουν προταθεί πολλές στρατηγικές ελέγχου όπως μεταξύ όλων αυτών, ο έλεγχος skyhook που πρότειναν οι Karnopp D. et al. (1974) και χρησιμοποιείται ευρέως καθώς



αποδίδει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της απόδοσης του οχήματος και της πρακτικής εφαρμογής των ημι-ενεργών συστημάτων ανάρτησης [13]. Το σύστημα ελέγχου skyhook έχει υιοθετηθεί και εφαρμοστεί για να προσφέρει ανώτερη ποιότητα οδήγησης στα επαγγελματικά επιβατικά οχήματα. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία εξακολουθεί να είναι αναδυόμενη και απαιτείται επεξεργασία και περισσότερη ερευνητική εργασία για τις διαφορετικές θεωρητικές και πρακτικές πτυχές. Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ερευνητές τροποποίησαν τη βασική στρατηγική ελέγχου skyhook προσθέτοντας κάποιες παραλλαγές για τη βέλτιστη, τροποποιημένη ή προσαρμοσμένη στρατηγική ελέγχου τύπου skyhook [39]. Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες, το κέρδος skyhook (SG) της στρατηγικής ελέγχου παραμένει ως μια σταθερή τιμή και συνήθως επιλέγεται από ένα σύνολο τιμών που είναι κατάλληλες για το όχημα στο περιβάλλον προσομοίωσης.

Σύμφωνα με αυτήν τη στρατηγική, κάθε τροχός του αυτοκινήτου συμπεριφέρεται ανεξάρτητα. Αρχικά, η είσοδος του προφίλ του δρόμου έχει ληφθεί για κάθε τροχό από τις μετρήσεις εκτροπής των ελαστικών για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Στη συνέχεια, το μοντέλο του αυτοκινήτου προσομοιώνεται στον υπολογιστή του οχήματος. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε υπάρχει η νέα τροποποιημένη στρατηγική ελέγχου skyhook SG. Αυτή η μέθοδος καθορίζει μια συγκεκριμένη τιμή SG που εφαρμόζεται στη νέα τροποποιημένη στρατηγική ελέγχου skyhook για να υπαγορεύσει το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης του αντίστοιχου τροχού του αυτοκινήτου. Έν τω μεταξύ, το σύστημα συμπεριφέρεται σύμφωνα με τον τροποποιημένο νόμο ελέγχου skyhook με μια αρχική ή προηγούμενη τιμή του SG. Μετά από κάθε χρονική περίοδο, το SG ενημερώνεται για να ταιριάζει με την οδική διαταραχή.

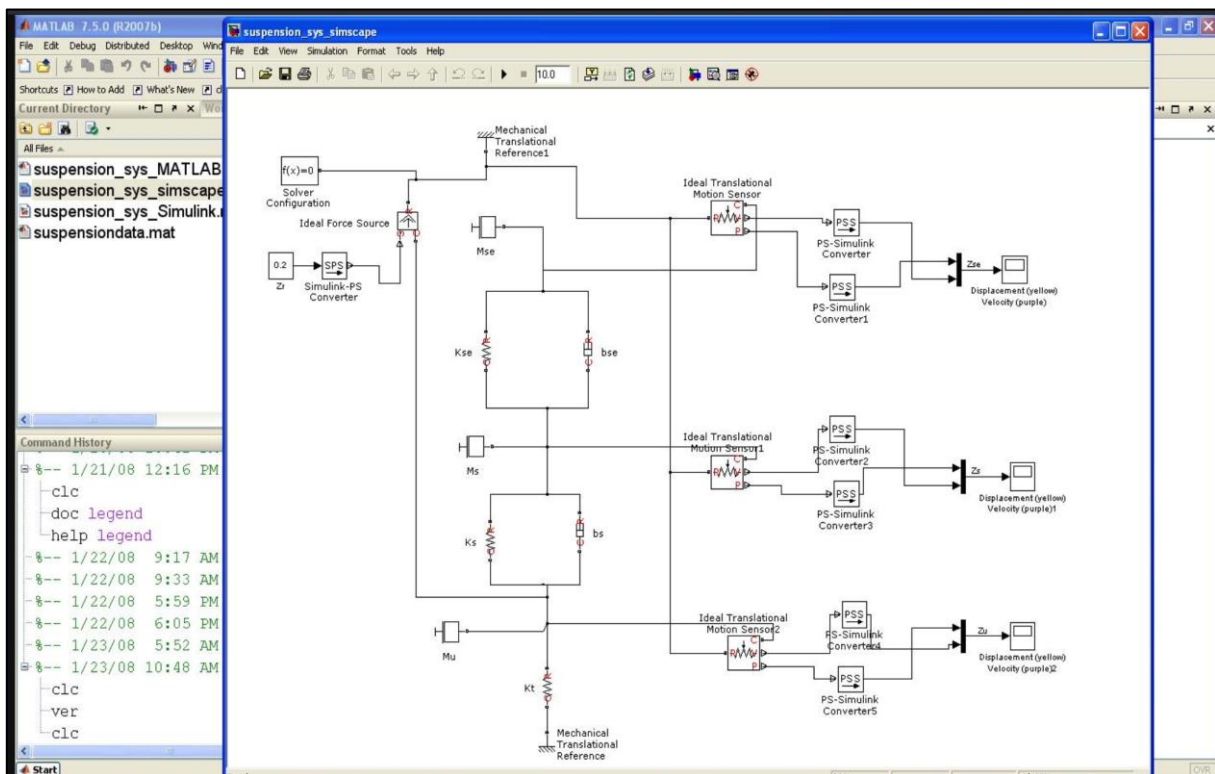
Για να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος ανατροφοδότησης κλειστού βρόχου, χρησιμοποιήθηκαν δύο βαθμοί ελευθερίας σε ένα μοντέλο αυτοκινήτου. Η απόδοση της απομόνωσης των κραδασμών και του χειρισμού του δρόμου του προτεινόμενου μοντέλου έχει αναλυθεί και συγκριθεί σε συγκεκριμένες μελέτες, με ένα παθητικό σύστημα και τρία άλλα ελεγχόμενα συστήματα skyhook που υπόκεινται σε διέγερση της βάσης που ορίζεται από το ISO ISO8608 [40]. Τα άλλα συστήματα ελέγχου είναι ο συνεχής έλεγχος skyhook των Karnopp D. et al. (1974), ο τροποποιημένος έλεγχος skyhook των Bessinger et al. (1995) και ο βέλτιστος έλεγχος skyhook των Nguyen et al. L. H. (2009) [13] [39] [14]. Μια πειραματική αξιολόγηση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου skyhook έχει γίνει επίσης από το εργοστάσιο ανάρτησης αυτοκινήτου Quanser. Στη συνέχεια, η στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιήθηκε στο πλήρες μοντέλο του αυτοκινήτου για τη βελτίωση της απομόνωσης των κραδασμών και του χειρισμού της απόδοσης του οδικού οχήματος.

Ένας σημαντικός στόχος της βιβλιογραφίας είναι η βελτίωση της απόδοσης των οχημάτων κατά τη στροφή, με μικρή ή καθόλου ολίσθηση χρησιμοποιώντας καινοτόμες προσεγγίσεις. Ένα παράδειγμα είναι, να γέρνει το κανονικό επιβατικό όχημα προς τα μέσα κατά τη στροφή ή την ξαφνική αλλαγή της λωρίδας, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία της όχθης του δρόμου, τη γωνία διεύθυνσης, την επιτάχυνση της πλευρικής θέσης, το ρυθμό εκτροπής και την ταχύτητα του οχήματος. Ένα αρκετά καινοτόμο παράδειγμα είναι το σύστημα ανάρτησης που αποτελείται από το γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό αποσβεστήρα (LEMD) παράλληλα με τη χρήση ενός συμβατικού μηχανικού ελατηρίου και αποσβεστήρα. Σε τέτοιες λειτουργίες ο αλγόριθμος ελέγχου της σταθερότητας για την κλίση των οχημάτων έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ο οδηγός να μη χρειάζεται να έχει ειδικές δεξιότητες οδήγησης για τη λειτουργία του οχήματος. Απαιτείται ο σχεδιασμός ενός δυναμικού μοντέλου οχήματος με κλίση που θα λαμβάνει υπόψη τη γωνία της όχθης του δρόμου [41]. Μετά από αυτό θα μπορεί να εξαχθεί ένα βελτιωμένο σύστημα ελέγχου άμεσης κλίσης μαζί με τον πιθανό τροποποιημένο



σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου skyhook. Αυτό το σύστημα θα λαμβάνει υπόψη τη γωνία διεύθυνσης, τη γωνία της όχθης του δρόμου, την επιτάχυνση της πλευρικής θέσης, το ρυθμό εκτροπής και την ταχύτητα του οχήματος. Ένας αισθητήρας ταχύτητας εκτροπής και ένας αισθητήρας πλευρικής επιτάχυνσης μπορούν επιπλέον να τοποθετηθούν στο όχημα. Η εργασία αυτών των αισθητήρων είναι να παρακολουθούν την κίνηση του αμαξώματος του αυτοκινήτου κατά μήκος του κάθετου άξονα. Το συνδυασμένο σύστημα ελέγχου θα κάνει μια συγκριτική ανάλυση της τιμής του στόχου που υπολογίστηκε και της πραγματικής τιμής βάσει της εισόδου του οδηγού μέσω του τιμονιού. Στη συνέχεια, το σύστημα ελέγχου θα λάβει μια απόφαση λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία της όχθης του δρόμου, την επιτάχυνση της πλευρικής θέσης, το ρυθμό εκτροπής και την ταχύτητα του οχήματος. Τη στιγμή που το αυτοκίνητο θα αρχίζει να περιστρέφεται, το σύστημα ελέγχου θα παρέμβει εφαρμόζοντας μια ακριβώς μετρημένη ηλεκτρομαγνητική δύναμη χρησιμοποιώντας τον ξεχωριστό γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό αποσβεστήρα τοποθετημένο σε κάθε τροχό. Αυτό θα ανυψώνει την πλευρά του αμαξώματος του οχήματος απέναντι από το κέντρο της στροφής και θα γυρίζει προς τα κάτω την πλευρά που βρίσκεται στην ίδια πλευρά του σημείου στροφής. Αυτό θα κάνει μια συγκεκριμένη γωνία μεταξύ του αμαξώματος του οχήματος και του δρόμου σύμφωνα με τις οδηγίες του ελεγκτή. Αυτή η γωνία, μεταξύ του δρόμου και του αμαξώματος του οχήματος, θα μετακινήσει το κέντρο βάρους του οχήματος προς το σημείο στροφής και θα βοηθήσει τον οδηγό να στρίψει ομαλά χρησιμοποιώντας λιγότερη επιφάνεια του δρόμου. Επιπλέον, θα υποστηρίξει το όχημα καθώς περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα χωρίς ολίσθηση.

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της κάθε έρευνας του συγκεκριμένου πεδίου απαιτείται η αποτελεσματική χρήση διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών προσομοίωσης MATLAB / Simulink (Εικόνα 1.15: Ανάλυση και προσομοίωση συστήματος ανάρτησης στο λογισμικό MATLAB [42] και των δοκιμών και πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο, όπου απαιτείται.



Εικόνα 1.15: Ανάλυση και προσομοίωση συστήματος ανάρτησης στο λογισμικό MATLAB [42]

## 1.6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, ΔΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΚΡΑΔΑΣΜΟΣ

Ένα αυτοκίνητο έχει μάζα και ελαστικότητα, οπότε σύμφωνα με τον ορισμό των κραδασμών, μπορεί να έχει μικρές, αλλά και μεγάλες δονήσεις. Υπάρχουν πολλά περιστροφικά μέρη σε ένα όχημα όπως ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων, οι τροχοί, το διαφορικό και ούτω καθεξής. Καθένα από αυτά μπορεί να παράγει δυνάμεις που εφαρμόζονται στο σώμα του οχήματος. Όχι μόνο έχουν περιστροφική κίνηση, αλλά έχουν επίσης εγκατασταθεί ασύμμετρα στο όχημα, γεγονός που επιδεινώνει τις δονήσεις. Επιπλέον, ανεξάρτητα από το τμήμα του οχήματος, ένας οδηγός οδηγεί το αυτοκίνητο σε διαφορετικούς δρόμους και οδικές συνθήκες (τα αυτοκίνητα μπορούν να οδηγούνται σε δρόμο ή εκτός δρόμου). Επιπλέον, δημιουργείται η επαφή μεταξύ του ελαστικού και του εδάφους, η ροή του αέρα πάνω από το σώμα του οχήματος και μέσα στον κινητήρα κ.λπ. Για αυτό δημιουργούνται διαφορετικοί ήχοι που αποτελούν επίσης δονήσεις. Τέτοιες δονήσεις μπορούν να βλάψουν σημαντικά την εμπειρία της οδήγησης.

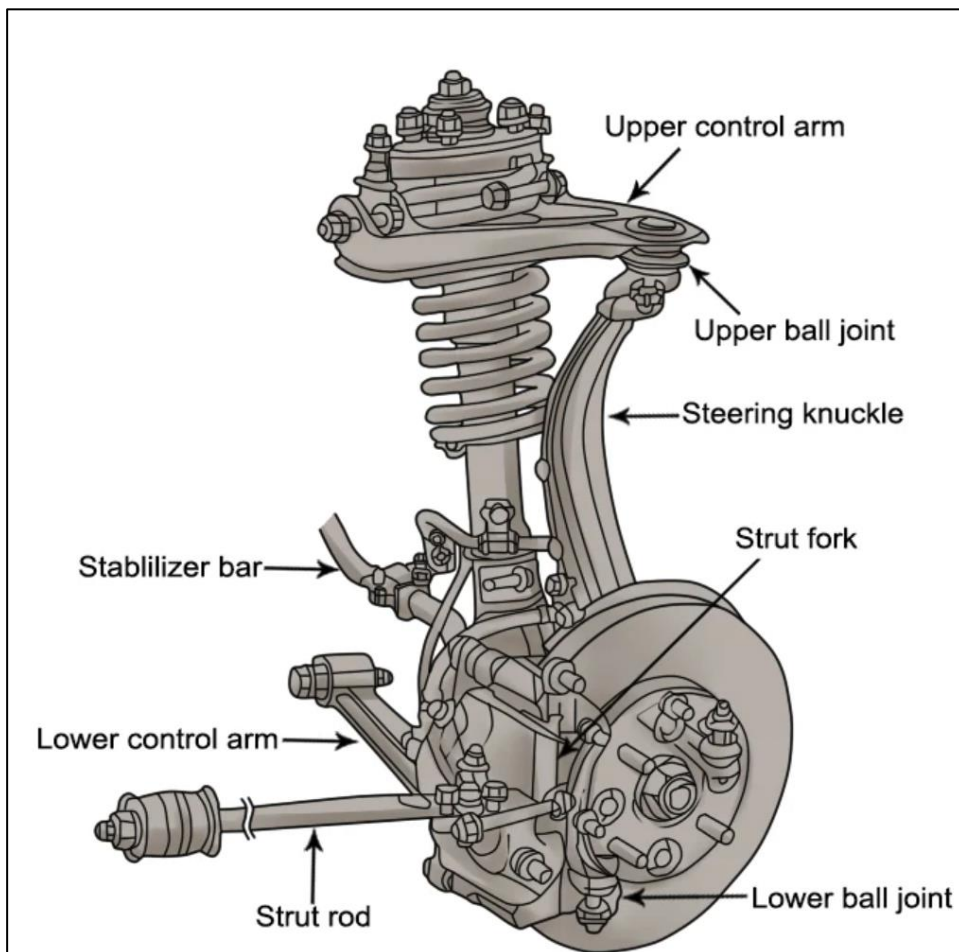
Με βάση τις προαναφερθείσες λεπτομέρειες, ένα αυτοκίνητο εκτίθεται σε ένα ευρύ φάσμα ταλαντώσεων με διαφορετικές συχνότητες. Η πηγή αυτών των δονήσεων μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική του οχήματος. Σύμφωνα με το φάσμα των κραδασμών, μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες: Θόρυβος, Δόνηση και σκληρότητα (NVH). Αυτές οι ταξινομήσεις βασίζονται στη συχνότητα των κραδασμών και κάθε όρος αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων που δημιουργεί ποικίλα αποτελέσματα στο όχημα και στους επιβάτες. Αυτοί οι όροι ορίζονται ως εξής:

- **Δόνηση:** Ταλαντώσεις με συχνότητα μικρότερη από 25 Hz είναι γνωστές ως δονήσεις που σχετίζονται με την ταλαντωτική κίνηση του αμαξώματος του οχήματος. Όχι μόνο αυτή η κίνηση μπορεί να φανεί, αλλά μπορεί επίσης να γίνει εύκολα αισθητή από τους επιβάτες. Αυτό το είδος των κραδασμών είναι απτό και οι επιβάτες κρίνουν συνήθως την οδήγηση ενός οχήματος σύμφωνα με αυτό το εύρος των κραδασμών. Έτσι, οι μηχανικοί της αυτοκινητοβιομηχανίας θα πρέπει να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο των κραδασμών ειδικά σε αυτό το εύρος. Ένα από τα κρίσιμα καθήκοντα ενός συστήματος ανάρτησης είναι ο μετριασμός των κραδασμών που προκύπτουν από την επαφή των ελαστικών με το δρόμο.
- **Σκληρότητα:** Οι ταλαντώσεις με συχνότητα μεγαλύτερη από 25 Hz και μικρότερη από 100 Hz ονομάζονται σκληρές ταλαντώσεις. Δεν είναι ορατές, αλλά οι επιβάτες μπορούν να αισθανθούν την ταλαιπωρία που προκαλείται από αυτήν την ανεπιθύμητη δόνηση. Η σκληρότητα μπορεί να γίνει αισθητή ως ένα κούνημα στα καθίσματα και το ταμπλό. Οι επιβάτες δε μπορούν να αξιολογήσουν τη σκληρότητα ενός οχήματος, αλλά κατά τη διάρκεια μεγάλων διαδρομών, αισθάνονται πιο κουρασμένοι αφού βρίσκονται σε ένα όχημα με υψηλή σκληρότητα. Η σκληρότητα μπορεί να δημιουργηθεί τόσο από εξωτερικές πηγές όπως το προφίλ του δρόμου, όσο και από εσωτερικές πηγές όπως ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων και το φρένο.
- **Θόρυβος:** Οι ταλαντώσεις με συχνότητα μεγαλύτερη από 100 Hz ταξινομούνται ως θόρυβος και αυτό αναφέρεται σε έναν ανεπιθύμητο

ήχο. Αυτές οι ταλαντώσεις δεν είναι ορατές ούτε αισθητές, αλλά μπορούν να τις ακούσουν οι επιβάτες. Οι επιβάτες μπορούν εύκολα να ακούσουν και να ενοχληθούν από τους ανεπιθύμητους ήχους. Ο θόρυβος μπορεί να παράγεται από εσωτερικά εξαρτήματα όπως ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων και τα φρένα, τα οποία ακούγονται ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες, ή μπορούν επίσης να παράγονται από εξωτερικές πηγές όπως ο άνεμος και τα ελαστικά, τα οποία μπορούν να ακουστούν μόνο σε υψηλές ταχύτητες.

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Ένα σύστημα ανάρτησης είναι ένα βασικό στοιχείο ενός οχήματος για την απομόνωση του πλαισίου του οχήματος από τις οδικές διαταραχές. Η Εικόνα 2.1: Ανάρτηση οχήματος που παρουσιάζεται εδώ είναι ένα τυπικό σύστημα ανάρτησης αυτοκινήτου. Απαιτείται να διατηρείται μια συνεχής επαφή μεταξύ των ελαστικών ενός οχήματος και του δρόμου. Το πιο σημαντικό στοιχείο ενός συστήματος ανάρτησης είναι ο αποσβεστήρας. Ο αποσβεστήρας μειώνει τις συνέπειες ενός απροσδόκητου χτυπήματος στο δρόμο εξομαλύνοντας την ταλάντωση και τον κραδασμό. Στα περισσότερα αμορτισέρ, η ενέργεια των κραδασμών μετατρέπεται σε θερμότητα και διαχέεται στο περιβάλλον. Στον έναν αποσβεστήρα ιξώδους, η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω ενός ιξώδους υγρού. Σε υδραυλικούς κυλίνδρους, το υδραυλικό υγρό θερμαίνεται. Στους κυλίνδρους αέρα, ο θερμός αέρας εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Από την άλλη πλευρά, ο ηλεκτρομαγνητικός αποσβεστήρας είναι διαφορετικός. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια της δόνησης μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό μέσω ενός ηλεκτρικού κινητήρα (επαγωγική μηχανή ή κινητήρα συνεχούς ρεύματος) και αποθηκεύεται σε πυκνωτή ή μπαταρία για περαιτέρω χρήση [43].

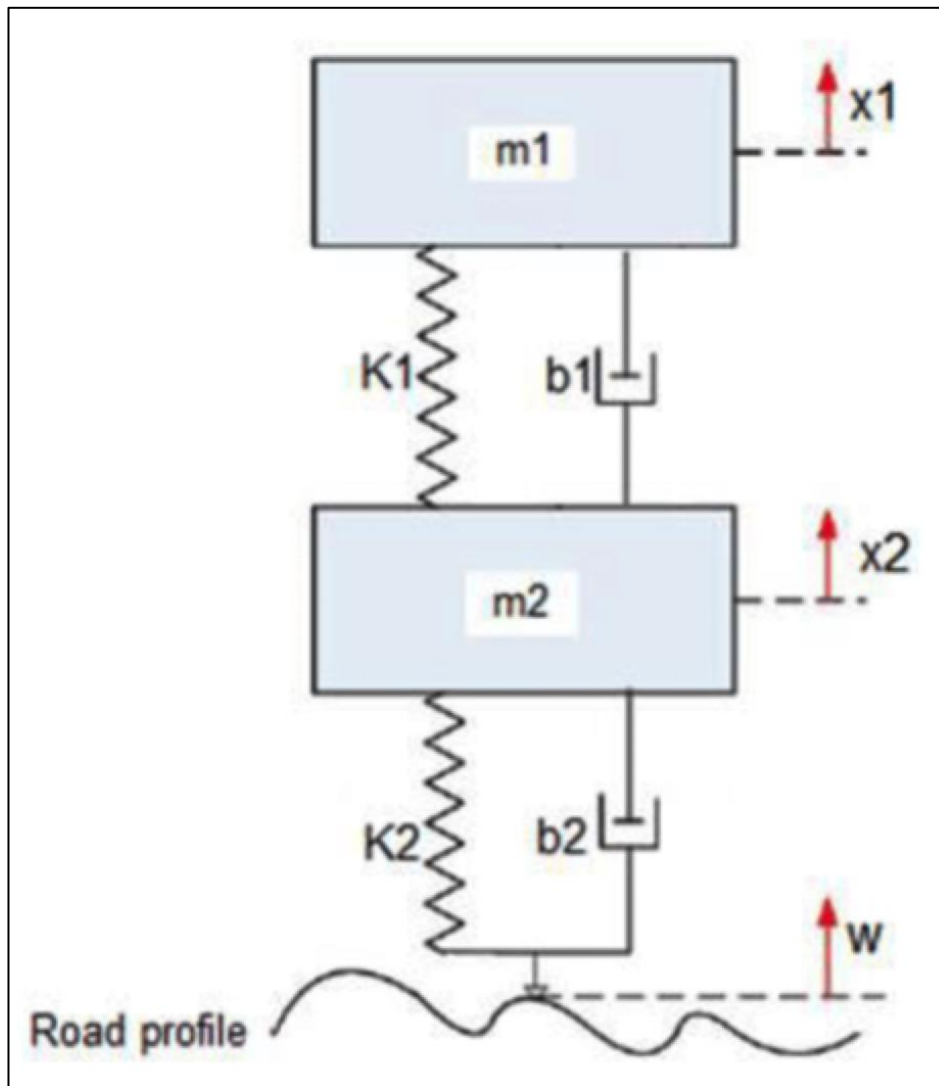


Εικόνα 2.1: Ανάρτηση οχήματος [44]

Τα συστήματα ανάρτησης κατηγοριοποιούνται ως παθητικά, ενεργά και ημι-ενεργά λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο του ελέγχου τους. Αν και όλοι οι τύποι των συστημάτων ανάρτησης έχουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όλοι τους χρησιμοποιούν τις μονάδες ελατηρίου και αποσβεστήρα.

## 2.1 ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Τα συστήματα παθητικής ανάρτησης αποτελούνται από συμβατικά ελατήρια και αποσβεστήρες λαδιού με σταθερές ιδιότητες απόσβεσης (Εικόνα 2.2: Παθητικό σύστημα ανάρτησης [45]). Σε αυτό το μοντέλο, τα  $m_2$  και  $m_1$  αντιπροσωπεύουν τη μη αναρτώμενη μάζα και τη μάζα του ελατηρίου, αντίστοιχα, το  $k_2$  είναι ο συντελεστής ακαμψίας του ελαστικού ή η σταθερά του ελατηρίου του ελαστικού και το  $k_1$  είναι η ανθεκτικότητα της ανάρτησης ή η σταθερά του ελατηρίου της ανάρτησης. Επιπλέον,  $b_1$  και  $b_2$  είναι η σταθερά της απόσβεσης της ανάρτησης και  $b_1$  η σταθερά της απόσβεσης των ελαστικών, αντίστοιχα. Επιπλέον υπάρχει το  $F_r$  το οποίο είναι η τριβή της ανάρτησης (δε φαίνεται στην εικόνα) και τα  $w$ ,  $x_2$  και  $x_1$  αντιπροσωπεύουν την είσοδο του προφίλ του δρόμου, τη μετατόπιση της μη αναρτώμενης μάζας και τη μετατόπιση της μάζας του ελατηρίου, αντίστοιχα.



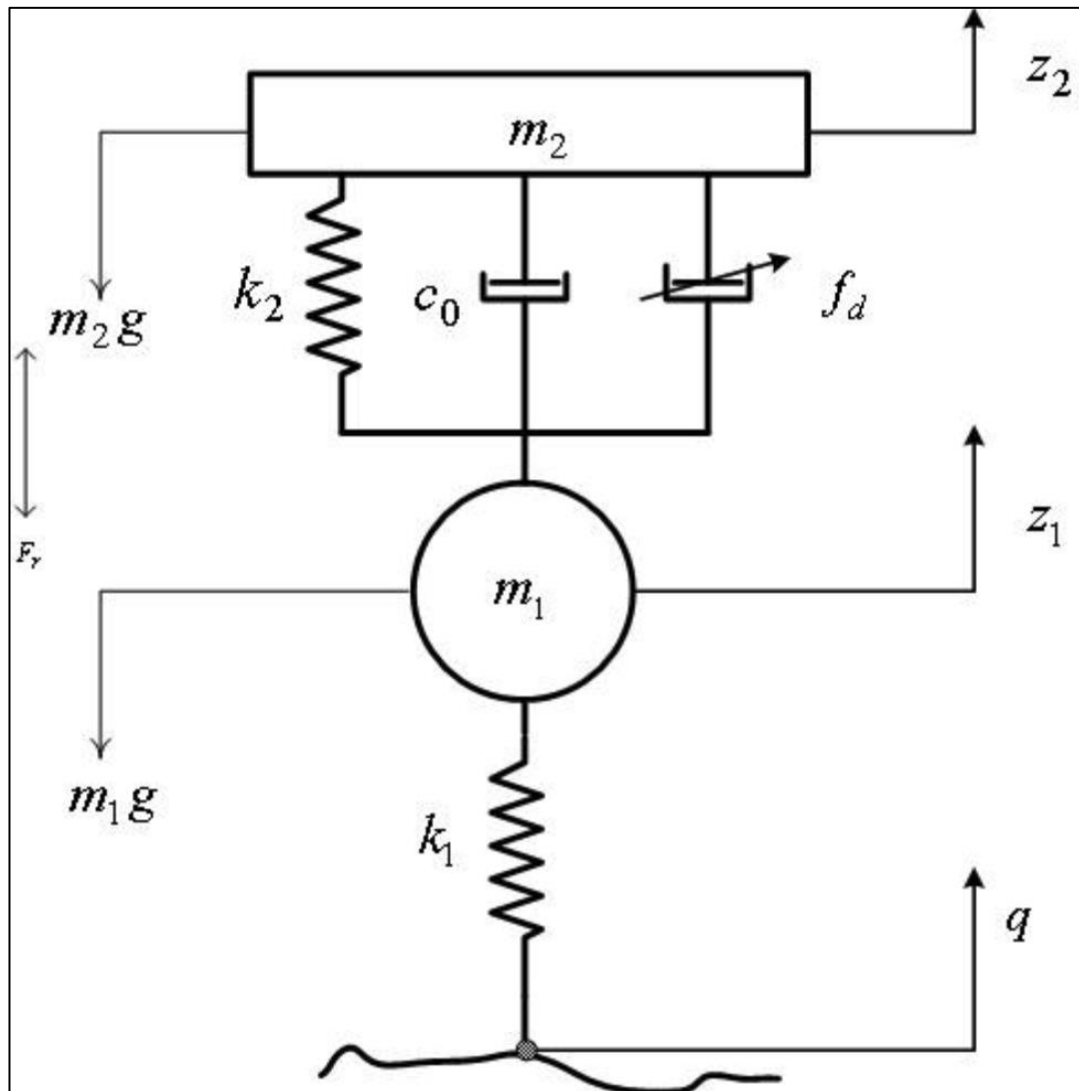
Εικόνα 2.2: Παθητικό σύστημα ανάρτησης [45]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα παθητικής ανάρτησης είναι λιγότερο περίπλοκα, πιο αξιόπιστα και λιγότερο δαπανηρά σε σύγκριση με τα ενεργά ή ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης. Το χαρακτηριστικό της σταθερής απόσβεσης είναι το κύριο μειονέκτημα των συστημάτων παθητικής ανάρτησης. Για μια παθητική ανάρτηση, απαιτείται η χρήση μαλακών ελατηρίων και μέτριας έως χαμηλής ταχύτητας απόσβεσης, αλλά απαιτείται η χρήση δύσκαμπτων ελατηρίων και υψηλών ρυθμών απόσβεσης για τη μείωση των επιδράσεων των δυναμικών δυνάμεων. Οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν μαλακά ελατήρια και αποσβεστήρα με χαμηλούς ρυθμούς απόσβεσης για εφαρμογές που χρειάζονται μια ομαλή και άνετη οδήγηση, όπως για παράδειγμα σε ένα πολυτελές αυτοκίνητο.

Από την άλλη πλευρά, τα σπορ αυτοκίνητα διαθέτουν άκαμπτα ελατήρια και αποσβεστήρα με υψηλές ταχύτητες απόσβεσης για μεγαλύτερη σταθερότητα και έλεγχο για λόγους άνεσης. Επομένως, η απόδοση σε κάθε περιοχή περιορίζεται στους δύο αντίθετους στόχους [46]. Πρέπει πάντοτε να απαιτείται αντιστάθμιση μεταξύ της άνεσης και του χειρισμού της οδήγησης στο σύστημα της παθητικής ανάρτησης, καθώς τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου και του αποσβεστήρα δε μπορούν να αλλάξουν σύμφωνα με το προφίλ του δρόμου.

## 2.2 ΗΜΙ-ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Karnopp et al. το 1973 [13]. Η Εικόνα 2.3: Ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης [49] δείχνει ένα ημι-ενεργό μοντέλο ανάρτησης. Εδώ το  $f_d$  μπορεί να δημιουργήσει μια ενεργή δύναμη ενεργοποίησης από έναν έξυπνο ελεγκτή. Έκτοτε, τα ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης συνέχισαν να αποκτούν δημοτικότητα σε εφαρμογές συστημάτων ανάρτησης των οχημάτων, λόγω της καλύτερης απόδοσης και των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών τους έναντι των συστημάτων παθητικής ανάρτησης. Στα ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης, οι ιδιότητες απόσβεσης του αποσβεστήρα μπορούν να αλλάξουν σε κάποιο βαθμό. Τα ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά της απόσβεσης σε ημι-ενεργούς αποσβεστήρες επιτυγχάνονται μέσω μιας ποικιλίας τεχνολογιών, όπως τα ηλεκτρορολογικά (ER) και μαγνητορολογικά (MR) υγρά, οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές. Έχει αναγνωριστεί ευρέως ότι ένα ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης παρέχει καλύτερη απόδοση από ένα παθητικό σύστημα. Καθώς είναι ασφαλής, οικονομική και δε χρειάζεται μεγάλη τροφοδοσία, η ημι-ενεργή ανάρτηση πρόσφατα διατέθηκε στο εμπόριο για χρήση σε αυτοκίνητα υψηλής απόδοσης [47] [48]. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για αυτή την τεχνολογία για να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές της. Η υποβάθμιση του MR με το χρόνο, τα προβλήματα στεγανοποίησης και η ευαισθησία στη θερμοκρασία είναι μερικά κρίσιμα ζητήματα των αποσβεστήρων MR που χρειάζονται ανάπτυξη.



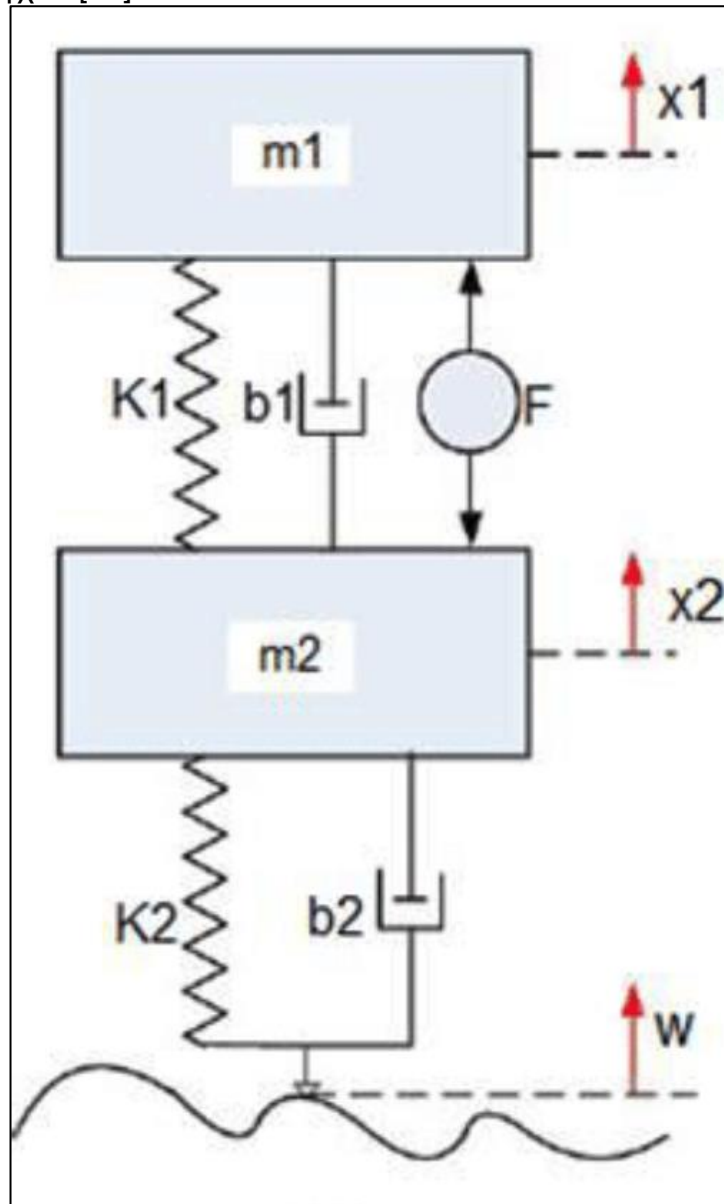
Εικόνα 2.3: Ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης [49]

### 2.3 ΕΝΕΡΓΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Το ενεργό σύστημα ανάρτησης (Εικόνα 2.4: Ενεργό σύστημα ανάρτησης [45]) ενεργοποιεί τους συνδέσμους του συστήματος ανάρτησης επεκτείνοντας ή συστέλλοντας τους μέσω μιας ενεργού πηγής ισχύος όπως απαιτείται [46]. Συμβατικά, τα σχέδια ανάρτησης των αυτοκινήτων ήταν ένας συμβιβασμός μεταξύ των τριών αντιφατικών κριτηρίων χειρισμού του δρόμου, της μετατόπισης της ανάρτησης και της άνεσης επιβατών. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση ενεργών συστημάτων ανάρτησης επέτρεψε στους κατασκευαστές των αυτοκινήτων να επιτύχουν και τα τρία επιθυμητά κριτήρια ανεξάρτητα. Μια παρόμοια προσέγγιση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε βαγόνια αμαξοστοιχιών για τη βελτίωση της καμπύλης συμπεριφοράς των αμαξοστοιχιών και τη μείωση της επιτάχυνσης που αντιλαμβάνονται οι επιβάτες. Αυτό όμως, καθιστά το σύστημα ακριβό και αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και τις απαιτήσεις ενέργειας.



Από την παραπάνω συζήτηση, είναι προφανές ότι ένα ημι-ενεργό σύστημα είναι καταλληλότερο για την εφαρμογή και αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων στρατηγικών ελέγχου [50].



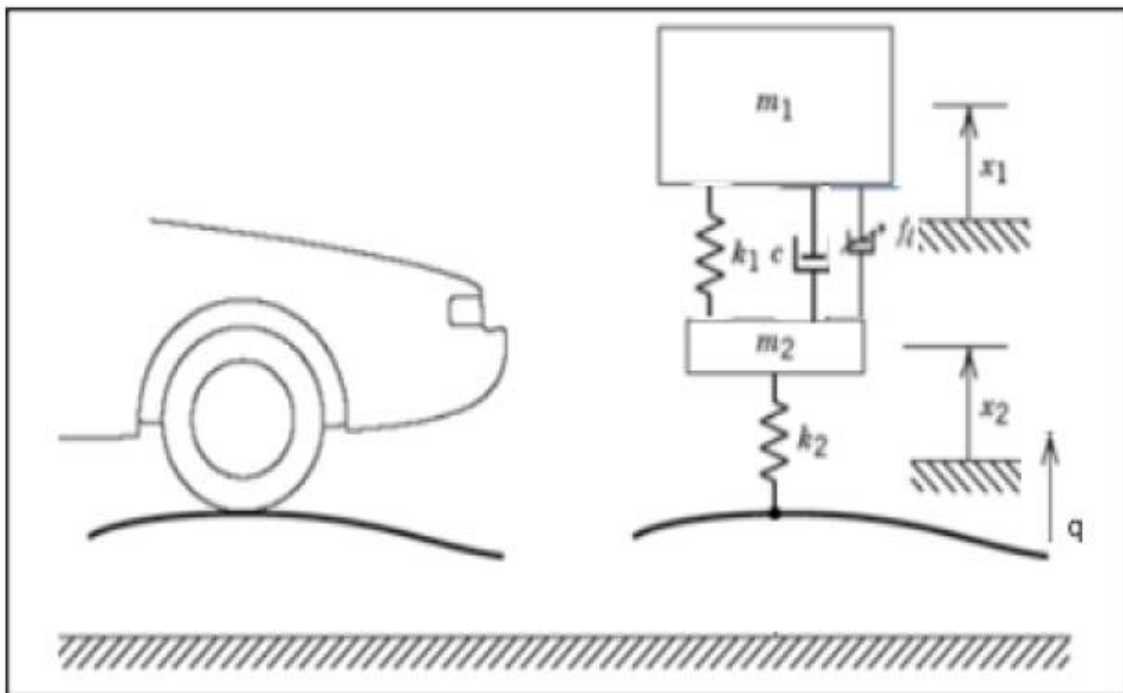
Εικόνα 2.4: Ενεργό σύστημα ανάρτησης [45]

## 2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΕΤΑΡΤΟΥ (QUARTER)

Ένα μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου μιμείται μόνο την ανύψωση ή την κάθετη κίνηση του οχήματος. Καθώς ο σχεδιαστικός στόχος για παράδειγμα του ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης είναι η μείωση της κατακόρυφης επιτάχυνσης, το μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου είναι αρκετό για την αξιολόγηση της απόδοσης των στρατηγικών ελέγχου [51]. Η μάζα των ελατηρίων, τα εξαρτήματα ανάρτησης και ένας τροχός είναι τα βασικά συστατικά ενός μοντέλου τετάρτου αυτοκινήτου (δηλαδή το ένα τέταρτο από

τους 4 τροχούς). Για ένα μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου, μάζα ελατηρίου σημαίνει το σώμα ή το πλαίσιο του αυτοκινήτου και αντιπροσωπεύει σχεδόν το ένα τέταρτο του βάρους ολόκληρου του αμαξώματος του αυτοκινήτου. Το σύστημα ανάρτησης γεφυρώνει τη σύνδεση μεταξύ του τροχού και του αμαξώματος του αυτοκινήτου και αποτελείται από πολλά μέρη. Επίσης, ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του συστήματος της ανάρτησης όπως παθητική, ημι-ενεργή ή ενεργή ανάρτηση. Η μάζα περιλαμβάνει το βάρος όλων των συστημάτων κάτω από το σύστημα ανάρτησης, όπως ένας άξονας, τροχός και ζάντα. Ο τροχός υποδηλώνει το ελαστικό, το οποίο ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου και της απόσβεσης.

Το μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου δύο βαθμών ελευθερίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5: Μοντέλο ανάρτησης τέταρτου αυτοκινήτου [55] είναι γνωστό ως ιδανικό μοντέλο και χρησιμοποιείται από ορισμένους ερευνητές [52] [53]. Οι Faheem A. et al. (2006) παρουσίασαν μια εικόνα για τη δυναμική της ανάρτησης του μοντέλου τετάρτου αυτοκινήτου με μια πλήρη κατάσταση-χώρο [54]. Στην ιδανική περίπτωση, η μάζα του ελατηρίου και η αναρτώμενη μάζα είναι ελεύθερα μόνο στην κάθετη αναπήδηση. Οι ιδανικές δυναμικές εξισώσεις κίνησης μη αναρτώμενων μαζών που ικανοποιούν το δεύτερο νόμο κίνησης του Νεύτωνα δίδονται από την εξίσωση 2.1.



Εικόνα 2.5: Μοντέλο ανάρτησης τέταρτου αυτοκινήτου [55]

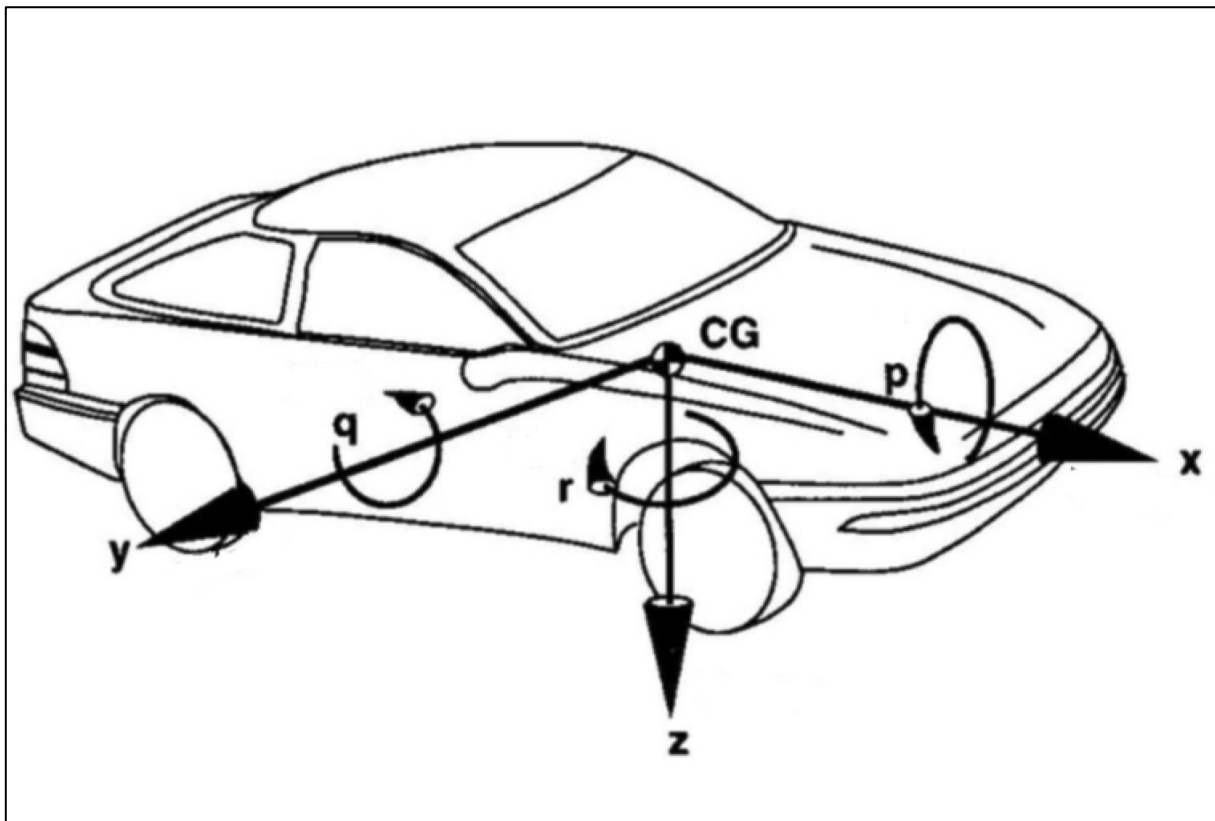
$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_2 &= -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1(x_2 - x_1) - c_t(\dot{x}_2 - \dot{q}) - k_2(x_2 - q) + f_d - F_r + m_2 g \\
 m_1 \ddot{x}_1 &= -c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - f_d + F_r + m_1 g
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Το απλοποιημένο μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί στις πιο πρόσφατες μελέτες καθώς η επίδραση του συντελεστή απόσβεσης των ελαστικών  $c_t$  είναι αμελητέα σε σύγκριση με το συντελεστή ακαμψίας των ελαστικών. Έτσι, μπορεί και να παραληφθεί η δύναμη της απόσβεσης των ελαστικών  $c_t(\dot{x}_2 - \dot{q})$ .

## 2.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΜΙ-ΕΝΕΡΓΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

### 2.5.1 Γεωμετρία της ανάρτησης

Η γεωμετρία της ανάρτησης παίζει σημαντικό ρόλο στις γωνίες και τις κινήσεις των τροχών, οι οποίες επηρεάζουν όλες τις συγκρατήσεις, το χειρισμό και την ασφάλεια του οχήματος στο δρόμο. Οι κινηματικές κινήσεις της ανάρτησης περιλαμβάνουν τις κινήσεις των τροχών κατά την κατακόρυφη κίνηση και το τιμόνι, καθώς και τις κινήσεις του αμαξώματος και του βήματος. Για να μελετήσει την κινηματική της ανάρτησης, το σύστημα συντεταγμένων του οχήματος SAE, εφαρμόζει XYZ άξονες στο κέντρο βάρους του οχήματος. Το σύστημα συντεταγμένων ορίζονται στην Εικόνα 2.6: Σύστημα συντεταγμένων SAE.

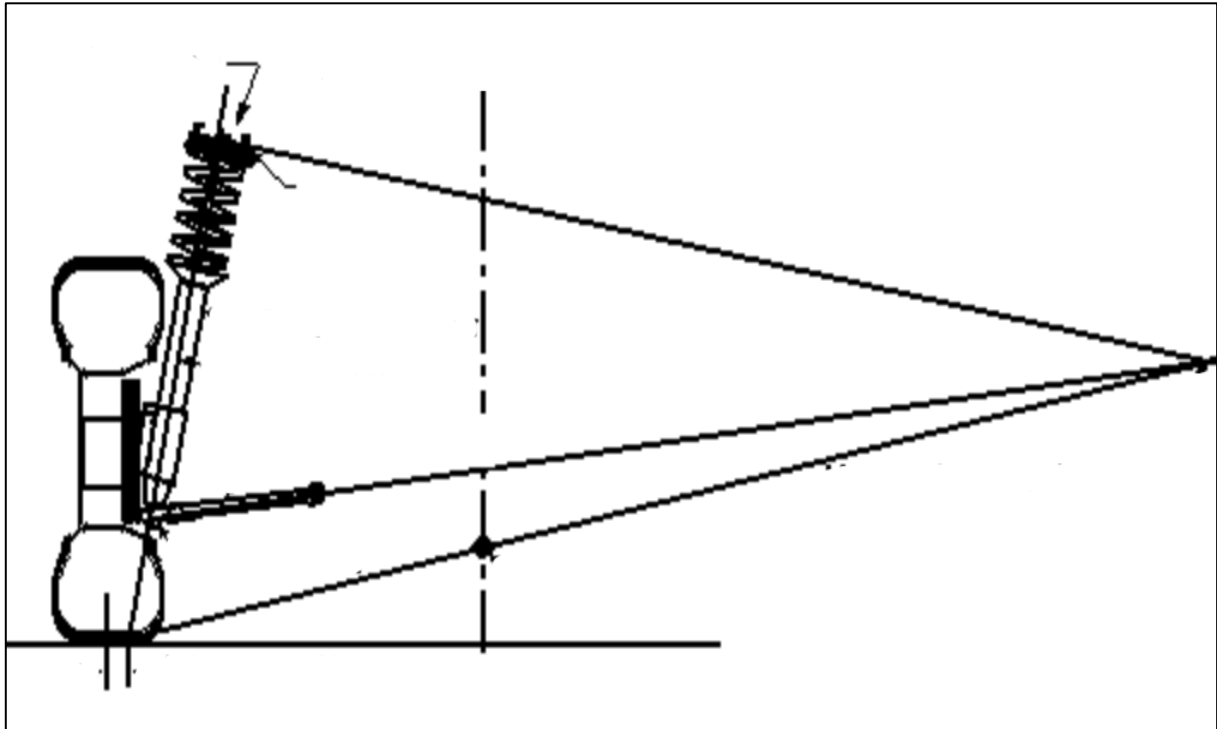


Εικόνα 2.6: Σύστημα συντεταγμένων SAE [56]

### 2.5.2 Κέντρο του άξονα και συντεταγμένες

Το κέντρο του άξονα είναι ένα σημείο στα επίπεδα Y-Z και X-Z όπου η πλευρική δύναμη εφαρμόζεται στο σώμα του οχήματος χωρίς να υπάρχει κινηματικός ρόλος. Ο άξονας στο επίπεδο X-Z που περνά από τα μπροστινά και πίσω κέντρα κύλισης ονομάζεται άξονας κύλισης και αυτός είναι ο άξονας που περιστρέφεται το σώμα. Τα ύψη των κέντρων και του άξονα παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του οχήματος, αλλά και στην ποιότητα της οδήγησης. Για τον προσδιορισμό του κυλίνδρου,

χρησιμοποιείται το θεώρημα του Arnold Kennedy. Εάν τρία σώματα έχουν κίνηση μεταξύ τους, τα στιγμιαία κέντρα τους πρέπει να βρίσκονται σε ευθεία γραμμή. Για να βρεθεί το κέντρο σε μια ανάρτηση διπλού ψαλιδιού για παράδειγμα, είναι σημαντικές μόνο οι κατευθύνσεις των βραχιόνων ελέγχου. Το εικονικό κέντρο P, επιτυγχάνεται με την επέκταση του άνω και του κάτω ελέγχου των βραχιόνων. Αμέσως, το P συνδέεται με το κέντρο του ελαστικού και επεκτείνεται για να βρει το σημείο όπου τέμνεται με το επίπεδο X-Z. Αυτό το σημείο ονομάζεται κέντρο άξονα.



Εικόνα 2.7: Κέντρο άξονα [57]

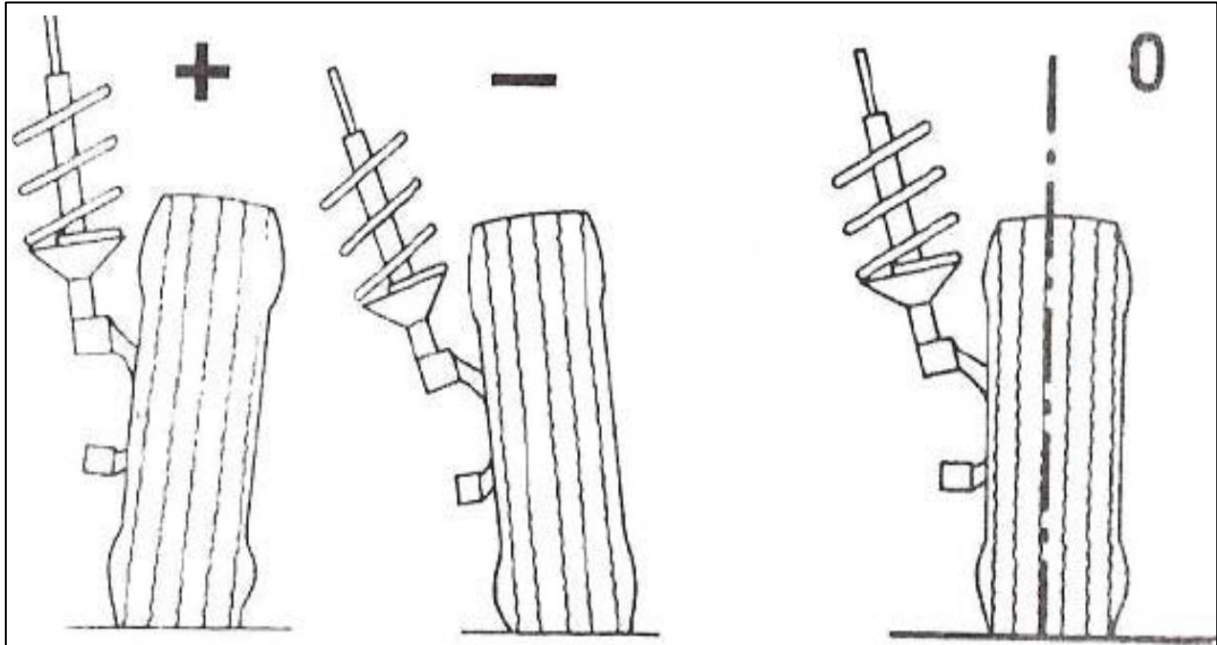
Στις αναρτήσεις Macpherson, δημιουργείται ένας κατακόρυφος άξονας στο τελικό σημείο του γονάτου όπου η τομή του και ο εκτεταμένος κάτω βραχίονας ελέγχου παρέχουν ένα εικονικό κέντρο Σ. Στον άξονα στρέψης, το σημείο έδρασης συνδέεται με το κεντρικό σημείο δέσμης στρέψης s και τέμνει το επίπεδο Y-Z.

### 2.5.3 Γωνία Camber

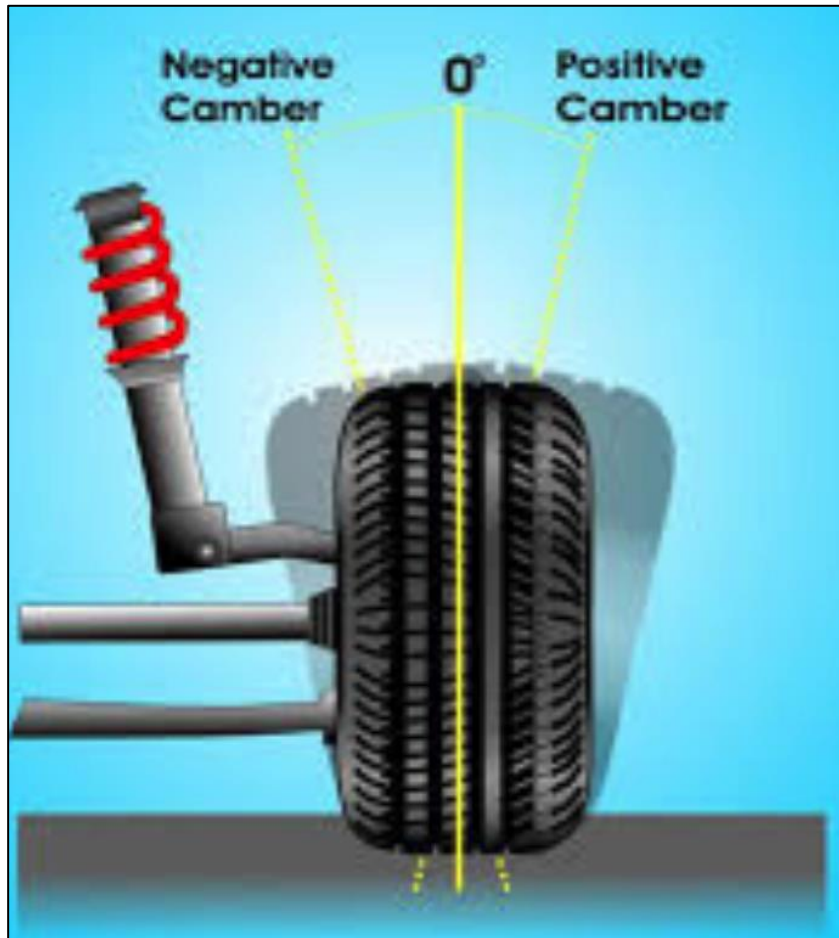
Η γωνία Camber είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου X-Z του τροχού και μιας γραμμής κάθετης προς το επίπεδο του δρόμου στο επίπεδο Y-Z του οχήματος. Αυτή η γωνία είναι αρνητική εάν ο τροχός έχει κλίση προς τα μέσα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8: Γωνία Camber: Θετική (αριστερά), Αρνητική (μέση), Μηδενική (δεξιά) [58](μέση) και θετική όταν έχει κλίση προς τα έξω, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8: Γωνία Camber: Θετική (αριστερά), Αρνητική (μέση), Μηδενική (δεξιά) [58](αριστερά). Μια θετική γωνία θα ήταν χρήσιμη για τη μείωση της φθοράς των ελαστικών λόγω του προφίλ του δρόμου. Από την άλλη πλευρά, μια αρνητική γωνία παρέχει καλύτερη πρόσφυση των ελαστικών και βελτιώνει το χειρισμό.

Η αρχική γωνία ρυθμίζεται για ένα στατικό τροχό με εργοστασιακές ρυθμίσεις όπου οι πίσω τροχοί είναι συνήθως πιο αρνητικοί σε γωνία Camber από τους εμπρός τροχούς. Η κίνηση των τροχών αλλάζει τη γωνία Camber, όπως φαίνεται στην Εικόνα

2.9: Αλλαγή γωνίας Camber ανάλογα με την κίνηση του τροχού [59]. Ο σωστός σχεδιασμός της ανάρτησης θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα μια αρνητική γωνία κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης του τροχού και θετική γωνία κατά την ανάκαμψη. Αυτός ο σχεδιασμός είναι χρήσιμος κατά τη στροφή, επειδή ο εσωτερικός τροχός που κινείται κατά τη διάρκεια μιας πρόσκρουσης υποστηρίζει μεγαλύτερα φορτία από τον εξωτερικό τροχό σε ανάκαμψη.



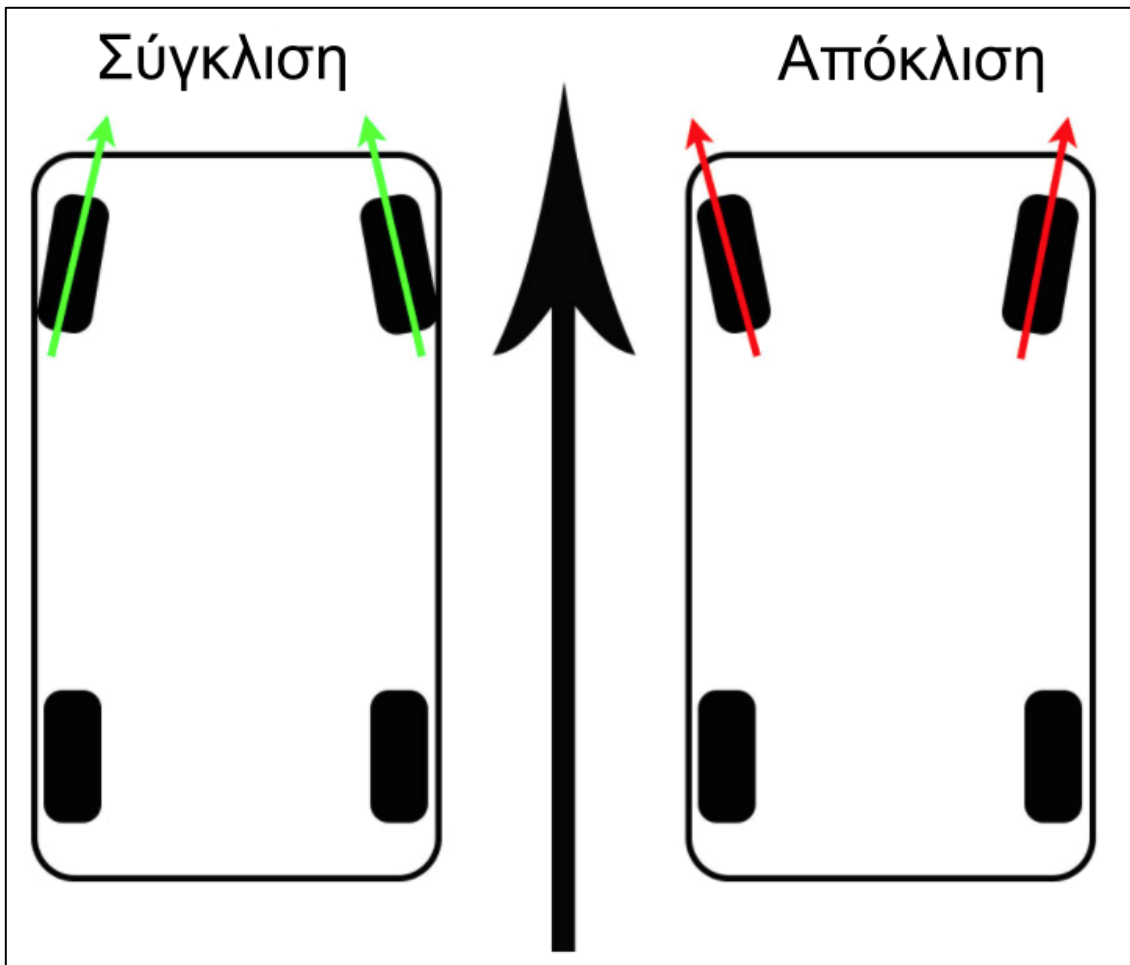
Εικόνα 2.8: Γωνία Camber: Θετική (αριστερά), Αρνητική (μέση), Μηδενική (δεξιά) [58]



Εικόνα 2.9: Αλλαγή γωνίας Camber ανάλογα με την κίνηση του τροχού [59]

#### 2.5.4 Σύγκλιση και Απόκλιση

Η σύγκλιση είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου X-Z του τροχού και του επιπέδου X-Z του οχήματος. Η σύγκλιση εμφανίζεται όταν το μπροστινό μέρος του τροχού περιστρέφεται προς τα μέσα, και η απόκλιση εμφανίζεται όταν ο τροχός περιστρέφεται προς τα έξω, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10: Σύγκλιση και απόκλιση [60]. Η αντίσταση της κύλισης και οι δυνάμεις του φρεναρίσματος σπρώχνουν τον τροχό ελαφρώς προς τα πίσω, οδηγώντας σε καταστάσεις απόκλισης και όταν η έλξη τραβά τον τροχό προς τα εμπρός, οδηγεί σε κατάσταση σύγκλισης. Η γωνία πρέπει ιδανικά να είναι μηδενική για τη μικρότερη φθορά και αντίσταση στην κύλιση των ελαστικών. Ως εκ τούτου, οι κατασκευαστές τείνουν να ορίζουν μια γωνία σε ένα στατικό τροχό που πηγαίνει στο μηδέν υπό συνθήκες. Συνήθως, για να αντισταθμιστούν οι δυνάμεις πέδησης στον μπροστινό άξονα, οι κατασκευαστές ρυθμίζουν το μπροστινό άξονα με γωνίες σύγκλισης. Αυτό γίνεται επειδή το όχημα μπορεί να είναι ασταθές εάν η απόλυτη τιμή της γωνίας εμφανίζεται ως απόκλιση. Ένας πίσω άξονας μετάδοσης κίνησης έχει ρυθμιστεί λόγω της δύναμης έλξης του προσαρμόζεται για να αντισταθμίσει την αντίσταση της κύλισης.



Εικόνα 2.10: Σύγκλιση και απόκλιση [60]

### 2.5.5 Προφίλ του δρόμου

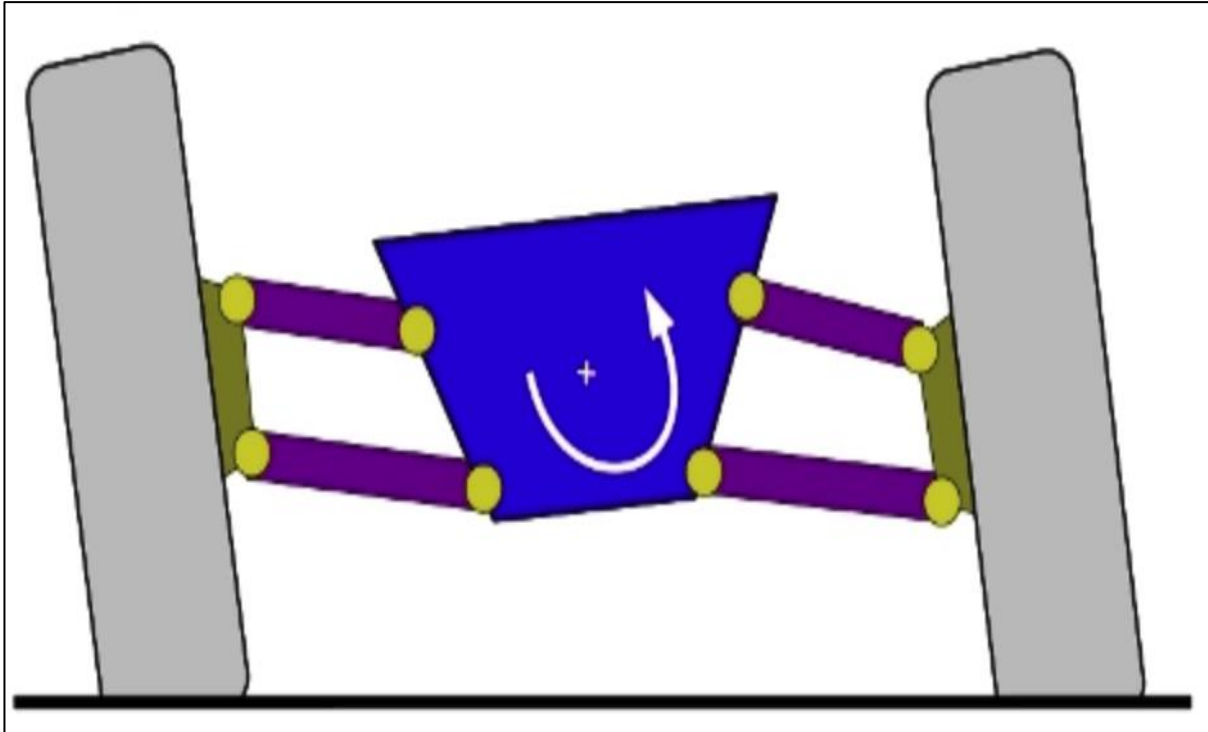
Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, ένα από τα κρίσιμα καθήκοντα της ανάρτησης είναι η αντιμετώπιση των δονήσεων που προκύπτουν από την επαφή μεταξύ του ελαστικού και του δρόμου. Για να σχεδιαστεί μια αποτελεσματική ανάρτηση, πρέπει να υπάρχει διεξοδική γνώση του δρόμου. Επομένως, θα πρέπει να εξεταστεί το ημιτονοειδές προφίλ του δρόμου, το οποίο είναι η απλούστερη μορφή ενός δρόμου και στη συνέχεια θα πρέπει να ακολουθήσει μια μελέτη του πραγματικού προφίλ του δρόμου. Στο παρόν υποκεφάλαιο αναφέρεται ενδεικτικά η απλούστερη μορφή.

#### Ημιτονοειδές προφίλ δρόμου

Η τραχύτητα του δρόμου είναι η κύρια πηγή κραδασμών σε ένα όχημα. Με άλλα λόγια, τα ελαττώματα του δρόμου μπορούν να προκαλέσουν κινήσεις ταλάντωσης, αναπήδησης και κύλισης σε μια μάζα που αναδύεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11: Κίνηση μάζας σε δρόμο. Η απλούστερη μορφή της τραχύτητας του δρόμου είναι σε ημιτονοειδές σχήμα. Οι δονήσεις μεταδίδονται απευθείας στο όχημα και επηρεάζουν αρνητικά την άνεση της οδήγησης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη



κόπωση και δυσφορία των επιβατών και των οδηγών. Επιπλέον, η μη αναρτώμενη μάζα, ή ο τροχός του οχήματος επηρεάζονται επίσης από το δρόμο, ο οποίος επηρεάζει τις δυνάμεις συγκράτησης των ελαστικών και μπορεί τελικά να διαταράξει τη συμπεριφορά, την πρόσφυση και την απόδοση της πέδησης του οχήματος.



Εικόνα 2.11: Κίνηση μάζας σε δρόμο [61]

## 2.6 ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ

Ένα σύστημα ανάρτησης πρέπει να πληροί ορισμένες απαιτήσεις για χρήση σε οχήματα. Τα κύρια επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- **Ανεξαρτησία:** Είναι επιθυμητό να υπάρχει κίνηση του ενός τροχού στη μία πλευρά του άξονα και να είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του τροχού στην άλλη πλευρά του άξονα. Σε υψηλότερες ταχύτητες, ο τροχός μπορεί να αντιμετωπίσει το χτύπημα χωρίς να διαταράξει τον άλλο τροχό. Αυτό είναι δυνατό μόνο όταν ο κάθε τροχός έχει ανεξάρτητη ανάρτηση. Η ανεξαρτησία της κίνησης των τροχών βελτιώνει την άνεση στην οδήγηση, τη συγκράτηση και το χειρισμό του οχήματος.
- **Καλός έλεγχος της γωνίας camber:** Η γωνία camber είναι η γωνία του τροχού γύρω από το διαμήκη άξονά του. Μια αρνητική γωνία είναι επιθυμητή αφού οδηγεί σε βελτιωμένο χειρισμό, ωστόσο, το κυρτό σχήμα των δρόμων τείνει προς μια θετική γωνία για μείωση της φθοράς των ελαστικών. Λόγω της πρόσκρουσης του δρόμου και του κυλίνδρου του αμαξώματος, η γωνία τελικά θα αλλάξει. Χρησιμοποιώντας μια καλά



σχεδιασμένη γεωμετρία της ανάρτησης, μπορεί να ελεγχθεί η γωνία camber.

- Καλός έλεγχος του χώρου της ανάρτησης: Δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι ο χώρος που χρησιμοποιείται από ένα σύστημα ανάρτησης μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες για την εγκατάσταση άλλων εξαρτημάτων του οχήματος. Κάτω από το καπό, το σύστημα ανάρτησης πρέπει να αφήνει αρκετό χώρο για έναν κινητήρα και άλλα εξαρτήματα. Επίσης, η ανάρτηση του πίσω άξονα δεν πρέπει να παρεμβαίνει στον κορμό του οχήματος και αντίθετα, να καταλαμβάνει μόνο τον εσωτερικό του χώρο.
- Καλή δομική απόδοση: Το σύστημα της ανάρτησης πρέπει να μπορεί να χειρίζεται το βάρος του οχήματος και όλες τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στην περιοχή της επαφής μεταξύ του τροχού και του δρόμου. Ο μηχανισμός ανάρτησης πρέπει να τροφοδοτεί φορτία στο σώμα με καλά κατανεμημένο τρόπο και να αποτρέπει τη μεταφορά συμπυκνωμένων δυνάμεων στο σώμα του οχήματος.
- Καλή απομόνωση: Η βελτίωση της ποιότητας της οδήγησης και η απομόνωση της τραχύτητας του δρόμου είναι μια από τις πιο σημαντικές εργασίες ενός συστήματος ανάρτησης.
- Χαμηλό βάρος: Λόγω των ανωμαλιών του δρόμου, η κινηματική ενέργεια ενός συστήματος ανάρτησης είναι ανάλογη της μάζας του. Η υψηλότερη κινηματική ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα ισχυρότερες μεταδιδόμενες ταλαντώσεις και κραδασμούς στο σώμα του οχήματος. Αυτό μειώνει σαφώς την ποιότητα της οδήγησης. Για να ελαχιστοποιηθεί αυτό το αρνητικό αποτέλεσμα, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η μάζα της ανάρτησης χρησιμοποιώντας βελτιστοποιημένα σχέδια και / ή ελαφρύ υλικό. Τα ελαφριά υλικά μπορεί να αυξήσουν το κόστος και επομένως, απαιτείται ισορροπημένος σχεδιασμός για οποιοδήποτε σύστημα ανάρτησης.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής: Κανείς δεν απολαμβάνει να χρειάζεται να επισκευάζει συχνά το αυτοκίνητό του, επομένως η ανάρτηση πρέπει να είναι τόσο ανθεκτική όσο οποιοδήποτε άλλο μέρος του αυτοκινήτου. Ένα ανθεκτικό σύστημα είναι ικανό να αντιστέκεται στη φθορά, την πίεση, ή τη ζημιά, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχία ενός προϊόντος.
- Χαμηλό κόστος: Ενώ, ο ορισμός ενός αρκετά χαμηλού κόστους είναι υποκειμενικό θέμα, η ανάρτηση ως υποσύστημα του οχήματος πρέπει να είναι προσιτή. Τα συστήματα ανάρτησης υψηλής απόδοσης είναι πιο ακριβά και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ακριβά οχήματα. Η χρήση ενός μεγάλου αριθμού ελαφρών υλικών βελτιώνει σίγουρα την ποιότητα της οδήγησης, την απομόνωση του θορύβου και την απόδοση του συστήματος, αλλά αυξάνουν επίσης το κόστος του προϊόντος.
- Άλλα: Άλλα χαρακτηριστικά της ανάρτησης μπορεί να περιλαμβάνουν μια ποικιλία καταστάσεων. Όταν ένα όχημα φρενάρει, το μπροστινό

μέρος του οχήματος κατεβαίνει προς τα κάτω και το πίσω μέρος ανεβαίνει προς τα πάνω. Μια παρόμοια αλλά αντίθετη δράση συμβαίνει κατά την επιτάχυνση. Αυτή η περιστροφική κίνηση είναι μικρή, αλλά επειδή το ανθρώπινο σώμα είναι πολύ ευαίσθητο στην κίνηση του βήματος, ο μετριασμός αυτής της κίνησης στην καμπύνα των επιβατών επιτρέπει τη μεγαλύτερη ποιότητα της οδήγησης.

### 3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, βρέθηκαν πολλές προσεγγίσεις ελέγχου ή αλγόριθμοι στο σχεδιασμό συστημάτων ανάρτησης των αυτοκινήτων. Σε αυτή την υποενότητα, αναφέρονται κάποιες από αυτές, όπως ο γραμμικός αναλλοίωτος έλεγχος Η-απείρου χρόνου (LTIH), ο γραμμικός έλεγχος παραμέτρων παραλλαγής (LPV) και οι έλεγχοι πρόβλεψης μοντέλου (MPC). Πέντε ευρέως γνωστές προσεγγίσεις ελέγχου, δηλαδή, ο γραμμικός ποσοτικός ρυθμιστής (LQR) και ο γραμμικός τετραγωνικός Gaussian (LQG), ο έλεγχος λειτουργίας της ολίσθησης (SMC), οι ασαφείς και νευρο-ασαφείς έλεγχοι, οι προσεγγίσεις skyhook και groundhook, εξετάζονται σε βάθος. Δεδομένου ότι ο αποσβεστήρας παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης, συζητούνται διάφοροι τύποι τεχνολογιών αποσβεστήρα.

#### 3.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Γενικά, ένα ελεγχόμενο σύστημα αποτελείται από μια εγκατάσταση με αισθητήρες και ενεργοποιητές. Μια μέθοδος ελέγχου ονομάζεται ημι-ενεργή στρατηγική ελέγχου. Ένα ημι-ενεργό σύστημα είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ των ενεργών και των παθητικών συστημάτων. Προσφέρει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ενεργά συστήματα ανάρτησης. Το ενεργό σύστημα ελέγχου εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από μια εξωτερική πηγή ισχύος για τον έλεγχο των ενεργοποιητών και την τροφοδοσία των δυνάμεων ελέγχου. Σε πολλές ενεργές εφαρμογές αναστολής, αυτή η προσέγγιση ελέγχου χρειάζεται μια μεγάλη πηγή ισχύος. Από την άλλη πλευρά, οι ημι-ενεργές συσκευές χρειάζονται πολύ λιγότερη ενέργεια από τις ενεργές. Ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα του ενεργού συστήματος ελέγχου είναι το πρόβλημα της ανθεκτικότητας και της σταθερότητας σε σχέση με τους αισθητήρες ή ολόκληρη την αστοχία του συστήματος. Σε αυτό το ζήτημα υπάρχει μεγάλη ανησυχία όταν χρησιμοποιούνται κεντρικοί ελεγκτές στη σχεδίαση της ανάρτησης των οχημάτων. Η ημι-ενεργή συσκευή ελέγχου είναι παρόμοια με τις παθητικές συσκευές στις οποίες οι ιδιότητες του αποσβεστήρα μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε η δυσκαμψία του ελατηρίου και ο συντελεστής απόσβεσης του αποσβεστήρα να μπορούν να αλλάξουν. Για αυτόν το λόγο το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Από την ανάπτυξη της στρατηγικής ελέγχου skyhook μέχρι και σήμερα έχει εκτελεστεί εκτενής έρευνα σε ημι-ενεργές στρατηγικές ελέγχου. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της έρευνας έχει γίνει για την εύρεση πρακτικών και εύκολων μεθόδων εφαρμογής ή για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου απομόνωσης των κραδασμών ή και των δύο. Η προσαρμοστική παθητική και ημι-ενεργή απομόνωση των δονήσεων μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητες του συστήματος ανάρτησης, όπως η ακαμψία του ελατηρίου και ο ρυθμός απόσβεσης του αποσβεστήρα ή του ενεργοποιητή ως συνάρτηση του χρόνου. Οι ιδιότητες ωστόσο, αλλάζουν σχετικά αργά σε ένα

προσαρμοστικό-παθητικό σύστημα ανάρτησης. Ωστόσο, στο ημι-ενεργό σύστημα, οι ιδιότητες ανάρτησης μπορούν να αλλάξουν εντός ενός κύκλου δόνησης. Ο γραμμικός τετραγωνικός έλεγχος είναι σε θέση να επιτύχει βελτιώσεις στην άνεση και στη συγκράτηση του δρόμου μέσω του ημι-ενεργού ή ενεργού συστήματος ανάρτησης. Από την άλλη πλευρά, απαιτεί τη μέτρηση ή την εκτίμηση της πλήρους κατάστασης που είναι δύσκολο να επιτευχθεί [62]. Ο γραμμικός αμετάβλητος έλεγχος H-infinity (LTIH) είναι σε θέση να παρέχει καλύτερα αποτελέσματα, βελτιώνοντας τόσο την άνεση της οδήγησης όσο και το χειρισμό του δρόμου, διασφαλίζοντας μια προκαθορισμένη συμπεριφορά συχνότητας. Λόγω των σταθερών βαρών, αυτό το σύστημα ελέγχου περιορίζεται στην παροχή σταθερών επιδόσεων [63]. Οι Giorgetti N. et al. (2006) σύγκριναν διαφορετικές ημι-ενεργές στρατηγικές ελέγχου βάσει του βέλτιστου ελέγχου [64]. Πρότειναν ένα υβριδικό μοντέλο με προβλέψιμο βέλτιστο ελεγκτή. Αυτός ο νόμος ελέγχου εφαρμόζεται μέσω ενός υβριδικού ελεγκτή, ο οποίος μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ ενός μεγάλου αριθμού ελεγκτών που εξαρτώνται από τη λειτουργία του ορίζοντα πρόβλεψης. Απαιτεί επίσης μια μέτρηση της πλήρους κατάστασης που είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Πρόσφατα, οι χρήσεις των προσεγγίσεων της γραμμικής παραμέτρου (LPV) έγιναν αρκετά δημοφιλείς [65] [66]. Ένας ελεγκτής LPV μπορεί είτε να βελτιώσει την αντοχή λαμβάνοντας υπόψη τις μη γραμμικότητες του συστήματος είτε να προσαρμόσει τις επιδόσεις σύμφωνα με τα μετρούμενα σήματα μετατόπισης του δρόμου και της εκτροπής της ανάρτησης [67]. Ένα άλλο παρόμοιο σύστημα «MPC» έχει προταθεί από τους Canale et al. το 2006 [68]. Ο ελεγκτής MPC είναι σε θέση να προσφέρει καλές επιδόσεις, αλλά απαιτεί διαδικτυακή διαδικασία γρήγορης βελτιστοποίησης. Καθώς συνεπάγεται τη βέλτιστη προσέγγιση του ελέγχου, απαιτείται καλή γνώση των παραμέτρων του μοντέλου και των μετρήσεων της πλήρους κατάστασης για το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου [69]. Οι Choudhury et al. S. F. (2012) συνέκριναν τις ενεργές και τις παθητικές στρατηγικές ελέγχου με βάση τον ελεγκτή PID [70]. Υπάρχουν πολλά ημι-ενεργά συστήματα ελέγχου που έχουν σχεδιαστεί, υλοποιηθεί και δοκιμαστεί από πολλούς ερευνητές. Μερικά από αυτά περιγράφονται εν συντομία στις ακόλουθες υπο-ενότητες.

### **3.2 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ GAUSSIAN**

Στον τομέα των συστημάτων ελέγχου ανάρτησης των οχημάτων, η προσέγγιση LQR είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο και μελετημένο σύστημα ελέγχου. Έχει μελετηθεί και παράγεται για ένα απλό μοντέλο του ενός τετάρτου του αυτοκινήτου [71], ή μοντέλο μισού αυτοκινήτου [72] και επίσης μοντέλο πλήρους αυτοκινήτου [73]. Ένα βέλτιστο αποτέλεσμα είναι δυνατό να επιτευχθεί όταν οι παράγοντες του δείκτη απόδοσης, όπως η επιτάχυνση του αμαξώματος και η δυναμική διακύμανση του φορτίου των ελαστικών λαμβάνονται υπόψη. Στην προσέγγιση LQR, πρέπει να χρησιμοποιείται ένας εκτιμητής κατάστασης εάν όλες οι καταστάσεις δεν είναι διαθέσιμες στο σύστημα, όπως είναι δύσκολο να μετρηθούν οι εκτροπές των ελαστικών σε ένα κινούμενο όχημα. Ένας εκτιμητής μπορεί να περιορίσει το περιθώριο φάσης του συστήματος ανάρτησης LQR σε μεγάλο βαθμό, αλλά αυξάνει τα προβλήματα σταθερότητας του οχήματος, ειδικά εάν το σύστημα ανάρτησης είναι ένα πλήρως ενεργό σύστημα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, οι Doyle και Stein πρότειναν να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες κέρδους και φάσης με τη σωστή επιλογή των εκτιμητών των κερδών [74]. Κατά την εφαρμογή του συστήματος LQR σε ένα πλήρες όχημα, προκύπτει ένα άλλο πρόβλημα. Η εξίσωση Riccati του συστήματος

LQR πρέπει να επιλυθεί αριθμητικά για ένα μοντέλο πλήρους οχήματος. Η εξίσωση γίνεται πολύ περίπλοκη παρόλο που το όχημα θεωρείται συμμετρικό και δεν περιλαμβάνονται όλα τα μη γραμμικά αποτελέσματα που δημιουργούνται από τις αδρανειακές επιπτώσεις και τις κινηματικές ιδιότητες του συστήματος της ανάρτησης. Προτείνονται διαφορετικοί τύποι αριθμητικών αλγορίθμων για την επίλυση αυτού του ζητήματος, αλλά κανένας από αυτούς δε θα μπορούσε να εγγυηθεί τη σύγκλιση και τη σταθερότητα της λύσης. Η δυνατότητα επίτευξης της συγκλίνουσας λύσης μειώνεται σημαντικά όταν μειώνεται ο αριθμός του ενεργοποιητή ή αυξάνεται η σειρά του συστήματος ελέγχου, ή και τα δύο στο ίδιο σύστημα [75].

Η προσέγγιση LQR έχει επίσης την αδυναμία να λάβει υπόψη τις αλλαγές σε σταθερή κατάσταση. Αυτές οι αλλαγές προκαλούνται από την αλλαγή του ωφέλιμου φορτίου στις στρόφες του οχήματος σε σταθερή κατάσταση. Οι Elmadany M. M. και Abduljabbar Z. S. (1999) συζήτησαν μια μέθοδο για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Αυτή η μέθοδος είναι ο ολοκληρωμένος έλεγχος [71]. Το καθήκον του ολοκληρωμένου ελέγχου είναι να διασφαλίσει τη μηδενική μετατόπιση της σταθερής κατάστασης που θα εφαρμοζόταν σε ένα μοντέλο τετάρτου αυτοκινήτου. Για ένα μοντέλο πλήρους οχήματος, ο ίδιος ο ενσωματωτής μπορεί να επιδεινώσει την απόδοση του ελεγκτή. Η σωστή επιλογή του όρου ολοκλήρωσης και το κέρδος του χρόνου ολοκλήρωσης είναι ένα δύσκολο πρόβλημα σε αυτήν την προσέγγιση λόγω των εξωτερικών δυνάμεων που προκαλούνται από τη μη μηδενική μετατόπιση που ποικίλλει ευρέως.

Η βέλτιστη μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτευχθεί καλύτερη άνεση ή χειρισμός της απόδοσης ενός οχήματος. Ο Hrovat D. (1993) έχει πραγματοποιήσει εκτενή έρευνα με μοντέλα στο μισό του αυτοκινήτου, σε μοντέλα πλήρους αυτοκινήτου και σε μοντέλα ελευθερίας ενός βαθμού και μοντέλα ελευθερίας δύο βαθμών [76]. Ελαχιστοποίησε τις λειτουργίες του κόστους του συστήματος, συνδυάζοντας την υπερβολική διαδρομή της ανάρτησης, την ανάρτηση με τη μάζα του ελατηρίου και την επιτάχυνση της μάζας του ελατηρίου μαζί, χρησιμοποιώντας τον βέλτιστο έλεγχο γραμμικού τετραγωνικού (LQ).

Οι Shisheie R. et al. παρουσίασαν ένα νέο αλγόριθμο βασισμένο στην προσέγγιση LQR [77]. Είναι σε θέση να συντονίσει σε βέλτιστο βαθμό τα κέρδη του ελεγκτή PI από ένα σύστημα. Σε αυτήν την προσέγγιση, οι πίνακες στάθμισης της συνάρτησης του κόστους προσαρμόζονται με αναλογία απόσβεσης και τη φυσική συχνότητα του συστήματος κλειστού βρόχου. Το 1995, οι Prokop G. και Sharp R. χρησιμοποίησαν τις βέλτιστες θεωρίες ελέγχου LQR και LQG χρησιμοποιώντας δεδομένα ή πληροφορίες προεπισκόπησης του δρόμου για την καλύτερη ποιότητα οδήγησης [78]. Το γεγονός είναι ότι, όσον αφορά τα σφάλματα μοντελοποίησης του συστήματος, ο ελεγκτής LQG είναι λιγότερο στιβαρός και ακόμα και σήμερα, ο καθορισμός των συντελεστών στάθμισης για το LQG είναι μια πολύ δύσκολη εργασία. Σύμφωνα με τον Shen Y., οι περισσότεροι συντελεστές στάθμισης για τον έλεγχο LQG / LQR έχουν συναφθεί με δοκιμή και σφάλμα [79]. Ο Shen αποκάλυψε επίσης ότι η διάσημη στρατηγική ανατροφοδότησης skyhook παρέχει τις καλύτερες αποδόσεις για το βέλτιστο κέρδος ανάδρασης που μειώνει τη μέση τετραγωνική προσπάθεια του ελέγχου και τη συνάρτηση του κόστους της μέσης τετραγωνικής ταχύτητας της μάζας.

### 3.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Τα τελευταία 20 χρόνια, το SMC έχει γίνει ένα από τα πιο ενεργά μέρη της εξερεύνησης της θεωρίας ελέγχου. Αυτή η εξερεύνηση έχει καθιερώσει επιτυχημένες εφαρμογές σε μια ποικιλία συστημάτων ελέγχου μηχανικής, όπως για παράδειγμα, στα αεροσκάφη, στους κινητήρες των αυτοκινήτων, στις αναρτήσεις, στους ηλεκτρικούς κινητήρες και στους χειριστές ρομπότ [80] [81]. Ο Shiri A. (2012) έχει σχεδιάσει ένα ρυθμιστή της ολίσθησης που είναι ανθεκτικός στις αλλαγές της ηλεκτρικής αντίστασης και στην οριακή μάζα και μπορεί επίσης να απορρίψει τις εξωτερικές διαταραχές [82]. Η απλότητα του συστήματος το καθιστά προσαρμόσιμο σε ένα σύστημα ηλεκτρομαγνητικής ανάρτησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την ανθεκτικότητα και την ικανοποιητική απόδοση του σχεδιασμένου ελεγκτή έναντι των αβεβαιοτήτων και των διαταραχών. Επίσης έχει εξαχθεί σημαντική έρευνα για την ανάπτυξη της θεωρίας των προβλημάτων SMC για τους διαφορετικούς τύπους συστημάτων, όπως τα ασαφή συστήματα [83], τα στοχαστικά συστήματα [84] και τα αβέβαια συστήματα [85].

Σε ένα πραγματικό δυναμικό σύστημα, είναι αδύνατο να αποφευχθούν οι αβεβαιότητες λόγω των εξωτερικών διαταραχών και της μοντελοποίησης του συστήματος. Αυτό που είναι κρίσιμο είναι μια λύση στο ισχυρό πρόβλημα του ελέγχου για τα αβέβαια συστήματα. Το SMC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Είναι σε θέση να συνεργαστεί με επιτυχία, αμφότερα στα αβέβαια γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο. Ο σχεδιασμός του SMC δίνει μια συστηματική προσέγγιση στο πρόβλημα της διατήρησης της σταθερής απόδοσης και της σταθερότητας ενόψει της ανακρίβειας της μοντελοποίησης του συστήματος. Δεδομένου ότι η μεταβλητή δομή με λειτουργία ολίσθησης (VSM) διαθέτει την εγγενή φύση της ευρωστίας, το VSM βρίσκεται ως μια αποτελεσματική τεχνική για τον έλεγχο των συστημάτων με αβεβαιότητες. Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι όταν φτάσει στην κατάσταση λειτουργίας ολίσθησης, το σύστημα με μεταβλητό έλεγχο δομής καθίσταται αδιάφορο στις παραλλαγές των παραμέτρων της εγκατάστασης. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές τεχνικές για το σχεδιασμό των ρυθμιστών της λειτουργίας της ολίσθησης, αλλά οι βασικές γραμμές όλων των τεχνικών είναι πολύ παρόμοιες και μπορούν να χωριστούν σε δύο κύρια βήματα.

Πρώτον, ο σχεδιασμός του νόμου του ελέγχου του SMC πρέπει να επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι τροχιές της κίνησης του κλειστού βρόχου του συστήματος να κατευθύνονται προς την ολισθαίνουσα επιφάνεια SMC και να γίνεται προσπάθεια της διατήρησης της κίνησης στην επιφάνεια μετά με άλλες μέθοδους.

Δεύτερον, η ανάπτυξη της ολισθαίνουσας επιφάνειας πρέπει να επιτευχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η ολισθαίνουσα κίνηση να μπορεί να ικανοποιεί τις προδιαγραφές που καθορίζονται από τους σχεδιαστές.

Οι Chan M. L. et al. (2000) εισήγαγαν ένα νέο PID τύπου SMC στο οποίο η λειτουργία της ολίσθησης ξεκινά από την αρχική στιγμή [86]. Ως αποτέλεσμα, σε όλη τη διαδικασία, μπορεί να διασφαλιστεί η ευρωστία του συστήματος. Αυτό το σύστημα ονομάζεται επίσης ενσωματωμένος έλεγχος λειτουργίας ολίσθησης (ISMC). Οι Yagiz N. et al. (2000) πρότειναν και ανέπτυξαν ένα ρυθμιστή της λειτουργίας της ολίσθησης για ένα μη γραμμικό μοντέλο οχήματος για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της διάγνωσης των σφαλμάτων και της ανοχής [87]. Ένα τροποποιημένο SMC σχεδιάστηκε και από τους Chamseddine A. et al. (2006) για ένα γραμμικό σύστημα ενεργού ανάρτησης πλήρους οχήματος με μερική γνώση των καταστάσεων του συστήματος [88]. Για τη

συμβατική στρατηγική SMC, η επιθυμητή δυναμική κατάσταση μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν εμφανιστεί η λειτουργία της ολίσθησης.

### 3.4 ΑΣΑΦΗΣ (FUZZY) ΈΛΕΓΧΟΣ

Ένα σύστημα ανάρτησης οχήματος είναι εξαιρετικά μη γραμμικό και πολύ περίπλοκο. Η δύναμη της ενεργοποίησης της ανάρτησης αλλάζει όταν ένα όχημα οδηγείται σε διαφορετικές συνθήκες του δρόμου. Οι συμβατικές στρατηγικές έλεγχου δεν είναι σε θέση να προσαρμοστούν σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι ασαφείς και νευρο-ασαφείς στρατηγικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ελεγχόμενα συστήματα ανάρτησης με πολλούς τρόπους. Ο έλεγχος ασαφούς λογικής (FLC) είναι κατάλληλος για μη γραμμικά συστήματα. Μπορεί να λειτουργήσει με ένα πολύπλοκο σύστημα χωρίς να υπάρχει ένα ακριβές μαθηματικό μοντέλο. Για αυτό το λόγο το FLC χρησιμοποιείται σε ημι-ενεργά και ενεργά συστήματα ανάρτησης για τον έλεγχο της απόρριψης της ταλάντωσης ή διαταραχής. Το FLC μπορεί να μην είναι ευαίσθητο σε ανακρίβειες των μοντέλων και των παραμέτρων με σωστές λειτουργίες και βάσεις κανόνων.

Για τον υπολογισμό των επιθυμητών συντελεστών απόσβεσης για τα ημι-ενεργά συστήματα, το FLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σύμφωνα με τους Al-Holou et al. (1994) [89]. Οι Al-Holou N. et al. (1994) συνέκριναν το FLC με παθητικούς και skyhook ελεγκτές. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν FLC στον ημι-ενεργό ενεργοποιητή για να υπολογίσουν τον επιθυμητό συντελεστή απόσβεσης. Σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύ φάσμα ημι-ενεργών ενεργοποιητών. Ένα σημαντικό εύρημα της έρευνάς τους ήταν ότι τα περισσότερα από τα συστήματα FLC δείχνουν παρόμοια αποτελέσματα με το σύστημα έλεγχου skyhook. Έχει βρεθεί ότι σε σύγκριση με το σύστημα έλεγχου skyhook, ένα ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης ελεγχόμενο με ασαφή ελεγκτή παρουσίασε ελαφρώς μικρότερες τιμές RMS της επιτάχυνσης του αμαξώματος. Οι Al-Holou et al. (1994) έδειξαν επίσης ότι το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης με FLC αύξησε τη διακύμανση της δυναμικής της δύναμης της επαφής των ελαστικών σε σύγκριση με το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης που ελέγχεται από το skyhook.

Το FLC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απαιτούμενης δύναμης για το ενεργό σύστημα ανάρτησης [90]. Οι Barr A. J. και Ray J. (1996) συνέκριναν το ασαφές ελεγχόμενο ενεργό σύστημα με το σύστημα παθητικής ανάρτησης και το ενεργό σύστημα ανάρτησης LQR. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι το χαρακτηριστικό του χειρισμού της οδήγησης (η διακύμανση του δυναμικού φορτίου των ελαστικών) του FLC είναι καλύτερο από το LQR, αλλά και το σύστημα παθητικής ανάρτησης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αξιοσημείωτο, τουλάχιστον στην περίπτωση του συστήματος της ενεργού ανάρτησης LQR. Η συνάρτηση του κόστους LQR-ρυθμιστή δεν παρουσιάστηκε στη μελέτη τους.

Από την άλλη πλευρά, τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από μια ποικιλία εναλλακτικών χαρακτηριστικών όπως υπολογισμός, κατανομημένη αναπαράσταση, μαζικός παραλληλισμός, προσαρμοστικότητα, ικανότητα γενίκευσης και εγγενής επεξεργασία των πληροφοριών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση διαφορετικών τύπων ασάφειας και αβεβαιότητας, που συχνά αντιμετωπίζονται στην πραγματική ζωή. Οι Yan B. et al. (2012) παρουσίασαν ένα μοντέλο δυναμικής των οχημάτων πολλαπλών αμαξωμάτων χρησιμοποιώντας ADAMS και ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο τροφοδοσίας μιας παράλληλης δομής [91]. Τα

βάρη και το όριο των νευρωνικών δικτύων έχουν βελτιστοποιηθεί στη συγκεκριμένη έρευνα. Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης προσομοίωσης των MATLAB και ADAMS έδειξε ότι η σύγκλιση του δικτύου πραγματοποιήθηκε γρήγορα και το μέγιστο σφάλμα αναγνώρισης ήταν  $<0,05\%$ . Οι συγγραφείς ισχυρίστηκαν ότι το σχεδιασμένο νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αποφύγει τη δυσκολία της δημιουργίας ενός ακριβούς μαθηματικού μοντέλου για το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης του οχήματος.

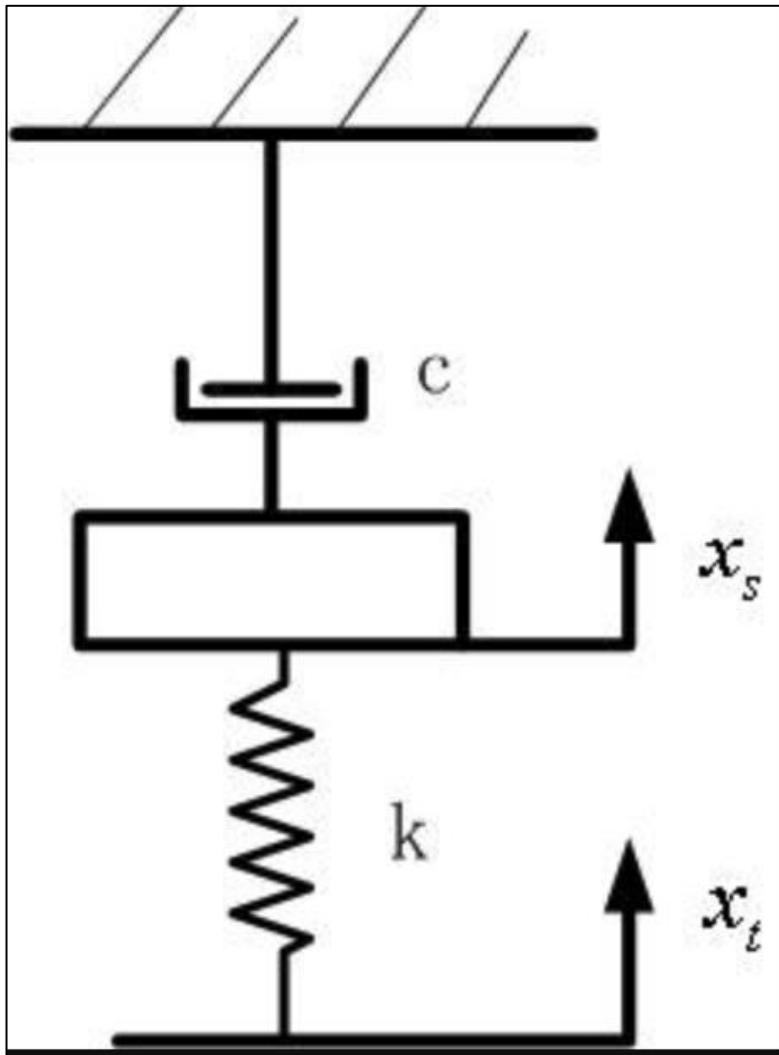
Ο κύριος στόχος της υβριδοποίησης των συστημάτων ελέγχου (χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα και ασαφή λογική) είναι να ξεπεραστούν οι αδυναμίες σε μια τεχνολογία, χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα της άλλης κατά την εφαρμογή της με την κατάλληλη ολοκλήρωση.

Στην πλειονότητα των μελετών που αφορούν τα νευρωνικά δίκτυα και την ασαφή λογική, η δύναμη του ενεργοποιητή του ενεργού συστήματος ανάρτησης ή ο συντελεστής απόσβεσης του ημι-ενεργού συστήματος ανάρτησης δεν ελέγχονται άμεσα. Οι Choi S. et al. (2001) πρότειναν ένα συνδυασμό της προσέγγισης του νευρο-ασαφούς ελέγχου για να υπαγορεύσουν ένα ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης ενός στρατιωτικού οχήματος [9]. Η ασαφής φάση του παρουσιαζόμενου ελεγκτή τροποποιήθηκε στη συνέχεια μέσω ενός νευρωνικού δικτύου. Σε αυτήν τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα πραγματικών υπάρχοντων ηλεκτρο-ενεργών και ημι-ενεργών μονάδων ενεργοποίησης και ένα μοντέλο οχήματος ελευθερίας 16 μοιρών. Για τον έλεγχο της ταχύτητας οι Youssef K. H. et al. (2009) πρότειναν μια προσαρμοστική μέθοδο βελτιστοποίησης για την προσαρμογή των βαρών των ασαφών νευρωνικών δικτύων [92]. Ένας προσαρμοστικός νευρο-ασαφής έλεγχος εισήχθη από τους Khalid H. et al. (2010) με βάση την αφαιρετική ομαδοποίηση με βελτιστοποίηση για την παροχή κρίσιμων πληροφοριών σχετικά με την παρουσία ή την απουσία βλάβης σε μια διαδικασία [93]. Οι Kashani R και Strelow J. E. (1999) δημιούργησαν ένα σύστημα ελέγχου που αποτελείται από πολλαπλούς ελεγκτές LQG γύρω από διαφορετικά σημεία λειτουργίας του συστήματος ανάρτησης και συνδύασαν τις επιθυμητές ενέργειες ελέγχου κάθε ελεγκτή με έναν ασαφή λογικό αλγόριθμο [94]. Το FLC χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν τη μελέτη. Οι Kashani και Strelow ισχυρίστηκαν ότι αυτός ο τύπος ανάμειξης των διαφορετικών ελεγκτών είναι μια καλή ιδέα και είναι σε θέση να βελτιώσει το σύστημα ανάρτησης του οχήματος. Όμως, οι περιορισμοί της πρακτικής εφαρμογής, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη με τη λογική της απόφασης του FLC.

### 3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ SKYHOOK

Ο έλεγχος skyhook είναι ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος ελέγχου της δόνησης που μπορεί να μειώσει την ενέργεια του συστήματος με υψηλό ρυθμό. Για περισσότερες από τρεις δεκαετίες έχει ερευνηθεί ευρέως η στρατηγική ελέγχου skyhook. Το όνομα "skyhook" προέρχεται από την ιδέα όπου ένας παθητικός αποσβεστήρας αγκιστρώνεται από ένα φανταστικό αδρανειακό σημείο αναφοράς ή τον ουρανό. Η απόσβεση skyhook είναι μια δύναμη απόσβεσης που βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση προς την απόλυτη ταχύτητα της μάζας του ελατηρίου και είναι ανάλογη με την απόλυτη ταχύτητα της μάζας του ελατηρίου (Εικόνα 3.1: Σύστημα ελέγχου skyhook [95]).





Εικόνα 3.1: Σύστημα ελέγχου skyhook [95]

Η Εικόνα 3.1: Σύστημα ελέγχου skyhook [95] δείχνει μια ιδανική διαμόρφωση του ημι-ενεργού χειριστή skyhook που έχει μια μάζα ελατηρίου που είναι αγκιστρωμένη από έναν αποσβεστήρα με skyhook απόσβεση σταθερού  $c$  (sky) από ένα φανταστικό ουρανό (σταθερή οροφή), εξ' ου και το όνομα "skyhook" που χρησιμοποιήθηκε. Εάν η δύναμη απόσβεσης του αμορτισέρ skyhook είναι  $F_{damp}$ , τότε ο ιδανικός νόμος ελέγχου skyhook μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_{damp} = -c_{sky}\dot{x}_s \quad (3.1)$$

Στην εξίσωση 3.1, το  $x_s$  είναι η μετατόπιση. Το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης που ελέγχεται από το skyhook (αποσβεστήρας) χρησιμοποιεί μια μικρή ποσότητα ενέργειας για τη λειτουργία μιας βαλβίδας, η οποία ρυθμίζει τη δύναμη της απόσβεσης. Η βαλβίδα του αποσβεστήρα μπορεί να είναι μια βαλβίδα ρευστού ή ένα μηχανικό στοιχείο εάν υπάρχει ένας μηχανικά ρυθμιζόμενος αποσβεστήρας. Σε ένα μαγνητορεολογικό αποσβεστήρα (MR), η συμπεριφορά του ρεολογικού υγρού αλλάζει σύμφωνα με το σχεδιασμένο σύστημα ελέγχου.

Η ενεργή διαδικασία ελέγχου συνεχούς skyhook μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί ιδανικά χρησιμοποιώντας έναν ενεργοποιητή ή μια γεννήτρια μιας ενεργού δύναμης. Γενικότερα, έχει προταθεί το skyhook να έχει ένα σύστημα ελέγχου

δύο καταστάσεων που ονομάζεται σύστημα ελέγχου ON-OFF. Αυτή η στρατηγική ελέγχου εναλλάσσεται μεταξύ των καταστάσεων υψηλής και χαμηλής απόσβεσης προκειμένου να επιτευχθούν οι προδιαγραφές άνεσης του αμαξώματος. Όμως, αυτή η διαδικασία ελέγχου προσφέρει τη δύναμη απόσβεσης ίση με το μηδέν όταν η κατεύθυνση της ταχύτητας της μάζας του ελατηρίου και η σχετική ταχύτητα της μάζας του ελατηρίου σε σχέση με τη μάζα ή το έδαφος είναι αντίθετη. Στην πράξη, η δύναμη της μηδενικής απόσβεσης δεν είναι πρακτική για οποιοδήποτε ημι-ενεργό αποσβεστήρα. Λόγω της απλότητας και της πρακτικής εφαρμογής της στρατηγικής ελέγχου ON-OFF του skyhook, χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο της ανάρτησης των οχημάτων [96]. Ο Karnopp D. (1983) πρότεινε επίσης μια νέα προσέγγιση για ένα ημι-ενεργό σύστημα ελέγχου που αποτελείται από μια μέθοδο μεταβλητής δυσκαμψίας. Σε αυτό το σχήμα ελέγχου, ο αποσβεστήρας συνδέεται σε σειρά με ένα ελατήριο υψηλής ακαμψίας. Επίσης, προτάθηκε η αλλαγή της ακαμψίας του ελατηρίου σύμφωνα με την αλλαγή στον συντελεστή απόσβεσης του αποσβεστήρα [97].

Οι Ahmadian M. και ο Vahdati N. (2006) αποκάλυψαν ότι έχουν γίνει πολλές έρευνες για άλλες παραλλαγές της στρατηγικής ελέγχου skyhook τις τελευταίες δύο δεκαετίες, όπως ο ON-OFF έλεγχος skyhook, ο βέλτιστος έλεγχος skyhook, ο συνεχής έλεγχος skyhook και οι τροποποιημένες εκδόσεις του [6]. Οι Li H. και Goodall R. M. (1999) εισήγαγαν διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζουν τη στρατηγική ελέγχου απόσβεσης skyhook για το ενεργό σύστημα ανάρτησης ενός σιδηροδρομικού οχήματος [98].

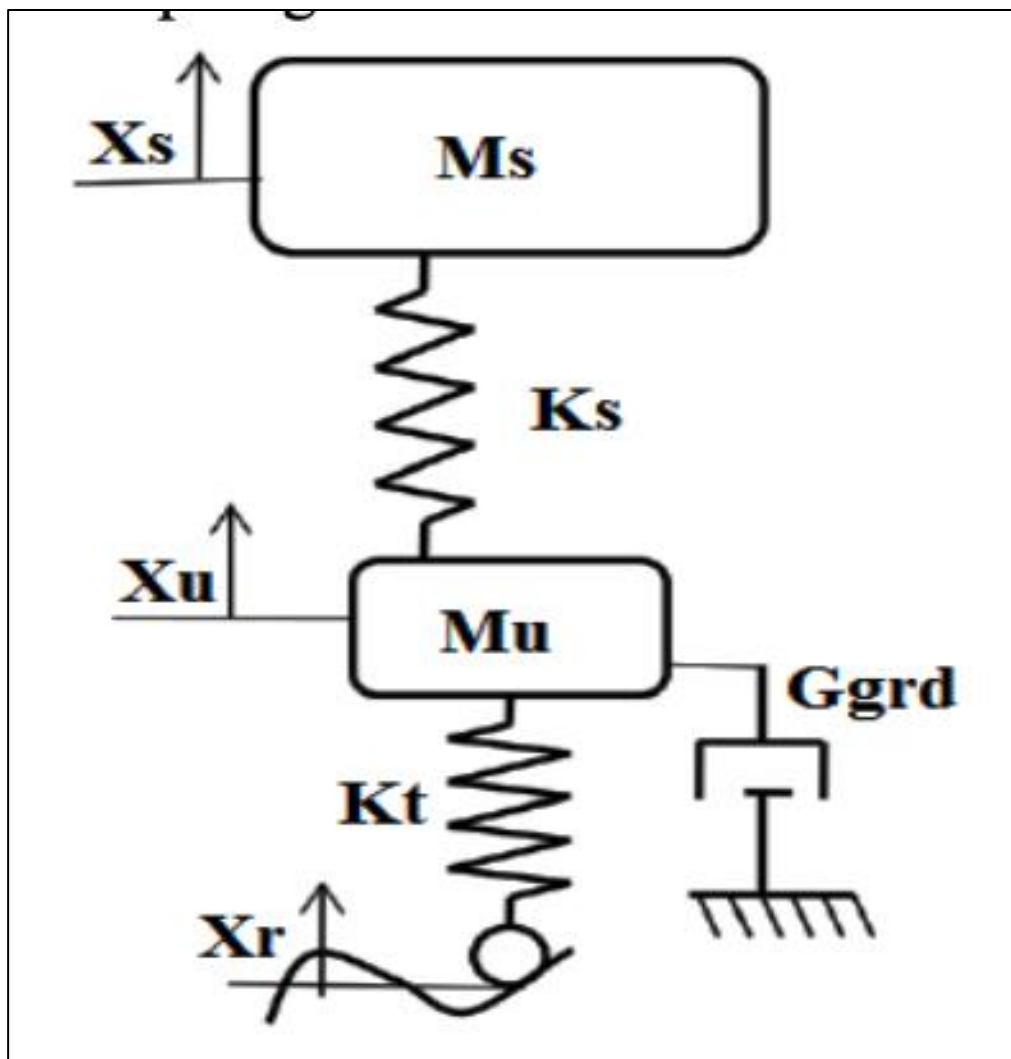
Η Margolis D. L. (1983) πρότεινε μια άλλη μέθοδο ελέγχου ON-OFF, η οποία απλώς απενεργοποιεί τον αποσβεστήρα όταν οι μη αναρτώμενες μάζες και η μάζα του ελατηρίου κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση και η μάζα αναρρόφησης έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από τη μάζα του ελατηρίου [99]. Οι Savaresi S. M. et al. (2007) πρότειναν ένα μικτό skyhook και την προσέγγιση ελέγχου ADD που είναι μια στρατηγική ελέγχου προσανατολισμένη στην άνεση [50]. Πολλοί ερευνητές έχουν διερευνήσει τις προσεγγίσεις που οδηγούν σε απρόβλεπτες συμπεριφορές. Οι Bessinger F. et al. (1995) παρουσίασαν μια τροποποιημένη στρατηγική ελέγχου skyhook. Τροποποίησαν στην ουσία την αρχική στρατηγική ελέγχου skyhook. Οι Bakar S. et al. (2008) έχουν επίσης ερευνήσει την ίδια στρατηγική στην έρευνά τους [100]. Σύμφωνα με αυτόν τον τροποποιημένο αλγόριθμο ελέγχου skyhook, τόσο ο παθητικός αποσβεστήρας όσο και τα αμορτισέρ skyhook περιλαμβάνονται για να ξεπεραστεί το πρόβλημα που προκαλείται από την εφαρμογή του αρχικού ελεγκτή skyhook [101]. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται στον ανεπιθύμητο ηχητικό θόρυβο και στους σκληρούς τραυματισμούς που παράγονται από τις ασυνεχείς δυνάμεις όπου αντιμετωπίζουν οι επιβάτες του οχήματος. Οι Nguyen L. H. et al. (2009) πρότειναν μια νέα ημι-ενεργή στρατηγική ελέγχου που ονομάζεται «βέλτιστη προσέγγιση ελέγχου skyhook» [14].

Οι Soliman A. et al. (2012) πρότειναν έναν ενεργό ελεγκτή του συστήματος αναστολής που χρησιμοποιεί τη στρατηγική ελέγχου fuzzy-skyhook [102]. Αυτό το σύστημα ελέγχου προσέφερε μια νέα ευκαιρία για βελτίωση της απόδοσης του οχήματος. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στη μελέτη δείχνει τη βελτίωση της ποιότητας της οδήγησης του οχήματος από το προτεινόμενο σύστημα ενεργής ανάρτησης με τη στρατηγική ελέγχου fuzzy-skyhook. Σε σύγκριση με το σύστημα παθητικής ανάρτησης, μειώθηκε η επιτάχυνση του αμαξώματος του προτεινόμενου συστήματος. Ο χώρος εργασίας της ανάρτησης και το δυναμικό φορτίο των ελαστικών του μοντέλου δείχνουν επίσης καλύτερες επιδόσεις. Οι Islam A. et al. (2005) χρησιμοποίησαν τον έλεγχο skyhook για να συγκρίνουν την απόδοση των μαγνητορολογικών, γραμμικών παθητικών και ασύμμετρων μη γραμμικών αποσβεστήρων [103]. Οι Saad Kashem S. et al. (2012) πρότειναν μια νέα

τροποποιημένη συνεχή στρατηγική ελέγχου skyhook με προσαρμοστικό κέρδος που υπαγορεύει το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης του οχήματος. Το προτεινόμενο σύστημα ανατροφοδότησης κλειστού βρόχου καταγράφει πρώτα την είσοδο του προφίλ του δρόμου για μια συγκεκριμένη περίοδο [104]. Στη συνέχεια, υπολογίζει την καλύτερη δυνατή τιμή του κέρδους skyhook για την επόμενη διαδικασία. Εν τω μεταξύ, το σύστημα ελέγχεται σύμφωνα με το νέο τροποποιημένο νόμο ελέγχου skyhook, χρησιμοποιώντας μια αρχική ή προηγούμενη τιμή του κέρδους skyhook.

### 3.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ GROUNDHOOK

Η προσέγγιση ελέγχου groundhook είναι σχεδόν παρόμοια με τη μέθοδο ελέγχου ON-OFF skyhook, εκτός από το ότι το σύστημα ελέγχου βασίζεται στον έλεγχο απόσβεσης της μη αναρτώμενης μάζας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2: Σύστημα ελέγχου groundhook [105].



Εικόνα 3.2: Σύστημα ελέγχου groundhook [105]

Το ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης groundhook είναι ένα σύστημα ελέγχου μετατόπισης των ελαστικών ενός παθητικού αποσβεστήρα όπου το ένα άκρο είναι

αγκιστρωμένο στην επιφάνεια του εδάφους ή του δρόμου και το άλλο άκρο είναι αγκιστρωμένο στο ελαστικό. Η κύρια ιδέα της στρατηγικής ελέγχου groundhook είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της δύναμης επαφής των ελαστικών. Αυτές οι δυνάμεις δόνησης έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην ευελιξία του οχήματος και στην απόδοσή του στο δρόμο [106]. Οι Valasek M. et al. (1997) έχουν ασχοληθεί με την ιδέα ελέγχου groundhook για ενεργό και ημι-ενεργό σύστημα ανάρτησης οχημάτων [107]. Απώτερος στόχος τους είναι να μειώσουν τις οδικές δυνάμεις των ελαστικών του συστήματος ανάρτησης. Έχουν επεκτείνει τη βασική ιδέα ελέγχου groundhook σε διάφορες παραλλαγές που επιτρέπουν στον ελεγκτή να αυξήσει την άνεση του οδηγού και να μειώσει τα κριτήρια ζημιάς στο δρόμο για ένα ευρύ φάσμα οδικών διαταραχών. Η διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του σχήματος ελέγχου για το γενικά μη γραμμικό μοντέλο. Η επίδραση και η αλληλεπίδραση των χρονικών σταθερών και των ορίων του ρυθμού απόσβεσης των μεταβλητών του αμορτισέρ αντιμετωπίζονται επίσης σε αυτήν την προσέγγιση ελέγχου.

### **3.7 ΕΝΕΡΓΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΛΙΣΗΣ**

Η έννοια της «ενεργού τεχνολογίας κλίσης» έχει γίνει αρκετά δημοφιλής στα οδικά οχήματα και στα σύγχρονα σιδηροδρομικά οχήματα. Στην Ευρώπη, τα περισσότερα νέα τρένα υψηλής ταχύτητας είναι εξοπλισμένα με ενεργά συστήματα ελέγχου της κλίσης και αυτά τα τρένα χρησιμοποιούνται ως περιφερειακά τρένα ταχείας κυκλοφορίας [108].

#### **3.7.1 Παράδειγμα στενού οχήματος και κλίση**

Τα στενά οχήματα χαρακτηρίζονται από υψηλό κέντρο βάρους και σχετικά στενό πλάτος τροχιάς σε σύγκριση με ένα τυπικό όχημα παραγωγής. Αυτά τα οχήματα θα ήταν πιο αποτελεσματικά και ρεαλιστικά λαμβάνοντας υπόψη τα προβλήματα στάθμευσης και την κυκλοφοριακή συμφόρηση στις αστικές περιοχές. Θα μπορούσαν να μειώσουν επίσης την κατανάλωση της ενέργειας. Αυτά τα αυτοκίνητα είναι μικρά, περίπου το μισό του πλάτους ενός συμβατικού αυτοκινήτου (μήκους <2,5 m, πλάτους 1 m και ύψους 1,5 m). Σε όλο τον κόσμο, η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι ένα αυξανόμενο πρόβλημα. Επιπλέον, ο μέσος αριθμός επιβατών συμπεριλαμβανομένου του οδηγού ενός οχήματος στις ΗΠΑ είναι 1,57 άτομα.

Το στενό όχημα μετακίνησης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο τύπους ανάλογα με τους μηχανισμούς τους. Το πρώτο, χρησιμοποιεί ένα ενεργό σύστημα ανάρτησης για να γείρει ολόκληρο το όχημα και το δεύτερο έχει μια ενεργά ελεγχόμενη καμπίνα επιβατών με κλίση και ένα πλαίσιο που δεν έχει κλίση ή πίσω συγκρότημα. Ένας ενεργοποιητής τοποθετημένος στο πίσω συγκρότημα ελέγχει τη δράση της κλίσης της καμπίνας των επιβατών σύμφωνα με τα κριτήρια σχεδιασμού. Το μη ανατρεπόμενο συγκρότημα του οχήματος αποτελείται συνήθως από πολλά εξαρτήματα του κινητήρα, επομένως συμβάλλει σημαντικά στη μάζα και την αδράνεια του οχήματος. Επιπλέον, το πλαίσιο χωρίς κλίση πρέπει να υποστηρίξει τη ροπή που έχει εφαρμοστεί για την κλίση της καμπίνας των επιβατών από τον ενεργοποιητή. Ως αποτέλεσμα, η ανάρτηση του τροχού του οχήματος πρέπει να είναι αρκετά σκληρή,

γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την άνεση της οδήγησης. Επιπλέον, η κατανάλωση της ενέργειας αυτού του μηχανισμού της κλίσης είναι επίσης πολύ υψηλή.

Αυτή η συγκεκριμένη μικρή και στενή γεωμετρική ιδιότητα του οχήματος δημιουργεί προβλήματα σταθερότητας κατά τη στροφή ή στη λωρίδα. Υπάρχουν επίσης δύο τύποι συστημάτων ελέγχου που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση του οχήματος με στενή κλίση [20]. Αυτά τα συστήματα ελέγχου ορίζονται ως συστήματα άμεσης κλίσης (DTC) και συστήματα ελέγχου κλίσης τιμονιού (STC) όπως περιγράφεται λεπτομερώς σε μελέτες [109] [110]. Στο σύστημα DTC, η είσοδος του τιμονιού του οδηγού συνδέεται απευθείας με το μηχανισμό διεύθυνσης του μπροστινού τροχού. Σε ένα σύστημα DTC, οι ειδικοί ενεργοποιητές ελέγχουν την κλίση του οχήματος (όπως η ενεργή ανάρτηση). Σε αυτό το σύστημα, η σύνδεση μεταξύ των τροχών και του τιμονιού δεν είναι πλέον μηχανική. Σε ένα σύστημα STC από την άλλη, δε χρησιμοποιείται πρόσθετος ενεργοποιητής και η κλίση του οχήματος ελέγχεται από την είσοδο της γωνίας του τιμονιού από τον οδηγό. Η είσοδος της διεύθυνσης χρησιμοποιείται για να ακολουθήσει την επιθυμητή τροχιά καθώς και για τη σταθεροποίηση της λειτουργίας της κλίσης του οχήματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα ένα σύστημα «steer-by-wire» [20]. Σε αυτό το σύστημα, το σήμα εισόδου του συστήματος διεύθυνσης διαβάζεται από τον ελεγκτή και ο ελεγκτής καθορίζει τη γωνία κλίσης. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, έχει γίνει εκτενής έρευνα και στους δύο τύπους συστημάτων ελέγχου από την αυτοκινητοβιομηχανία και τους ερευνητές.

Τα μηχανοκίνητα οχήματα με κλίση έχουν μελετηθεί και αναπτύχθει από το πρωτοποριακό πρωτότυπο που πρότειναν οι Amati N. et al. (2012) [111]. Η Ford Motor Company ανέπτυξε ένα δίτροχο μικρό όχημα στα μέσα της δεκαετίας του 1950 [43]. Σταθεροποιήθηκε γυροσκοπικά με αναδιπλούμενους βραχίονες των τροχών για στάθμευση. Στη δεκαετία του 1960, το MIT παρουσίασε ένα ανατρεπόμενο όχημα το οποίο ήταν εξοπλισμένο με ένα ενεργό σύστημα ελέγχου. Ο σχεδιασμός ήταν παρόμοιος με μια μοτοσικλέτα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, η General Motors ανέπτυξε ένα ανατρεπόμενο όχημα που ονομάζεται «Lean Machine». Είχε σταθερό πίσω σκελετό και ανατροπή αμαξώματος που ελέγχονταν από τον αναβάτη. Ο αναβάτης έπρεπε να ισορροπήσει γέρνοντας το σώμα, χρησιμοποιώντας πεντάλ των ποδιών.

Πιο πρόσφατα, η Brink Dynamics ανέπτυξε ένα τρίτροχο αυτοκίνητο με το όνομα Carver με περιστρεφόμενο αμάξωμα. Η BMW και τα Πανεπιστήμια του Bath και του Βερολίνου παρουσίασαν το Clever το 2003. Αποτελείται από ένα δίτροχο άξονα, πίσω άξονα και ένα μπροστινό τροχό που γέρνει με το κύριο σώμα. Το πίσω αμάξωμα παραμένει σε επαφή με το έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως ένας συμβατικός πίσω άξονας αυτοκινήτου, αλλά το κύριο αμάξωμα συνδέεται με το πίσω πλαίσιο με διάταξη ανάρτησης που του επιτρέπει να κλίνει σαν μοτοσικλέτα.

Ο κατασκευαστής Lumeneo παρουσίασε τα Smera και Piaggio MP3. Στην έκθεση αυτοκινήτου του Τόκιο 2009, η Nissan αποκάλυψε το Land Glider, το οποίο είναι ένα τετράτροχο στενό όχημα. Από όλα τα παραπάνω, το Carver One πωλήθηκε εμπορικά από το 2006 έως τα μέσα του 2009 και το MP3 κυκλοφορεί στην αγορά από το 2006.

Από ακαδημαϊκή άποψη, οι ερευνητές έχουν κάνει εκτεταμένη δουλειά σε αυτά τα αυτοκίνητα. Οι Karnopp D. et al. (1992) πρότειναν ότι το στενό όχημα με κλίση θα έπρεπε να κλίνει σε μια γωνία και εξήγησε επίσης τη βέλτιστη επιθυμητή γωνία κλίσης στην έρευνά του [19]. Επιπλέον, πραγματοποίησαν σημαντική έρευνα για τη δυναμική μοντελοποίηση των οχημάτων με κλίση [112]. Ένας ενεργοποιητής της κλίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κλίση ενός στενού οχήματος σε μια συγκεκριμένη επιθυμητή γωνία κλίσης με τη βοήθεια της στρατηγικής άμεσου ελέγχου της κλίσης. Είναι

προφανές ότι η έρευνά τους καθορίζει τις βασικές ιδέες για το σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου άμεσης κλίσης. Ωστόσο, σε ορισμένες από τις έρευνές τους, δεν είναι σε θέση να λάβουν υπόψη την επιτάχυνση της πλευρικής θέσης του οχήματος, ενώ υπολογίζουν τον επιθυμητό υπολογισμό της γωνίας κλίσης. Αυτό προκάλεσε τον ελεγκτή να απαιτεί υψηλή παροδική ροπή.

Υπάρχουν μερικές δημοσιεύσεις που έχουν παρουσιάσει την ιδέα ενός εικονικού οδηγού σε ένα στενό όχημα με κλίση. Αυτά τα εικονικά προγράμματα οδήγησης μπορούν να ακολουθήσουν ένα μονοπάτι χωρίς να πέσουν στη μία πλευρά. Οι Saccon A. et al. (2008) ανέπτυξαν μια δυναμική αντιστροφή ενός απλουστευμένου μοντέλου μοτοσικλέτας. Αυτό το μοντέλο είναι σε θέση να λάβει μια σταθεροποιητική ανατροφοδότηση μέσω του τυπικού συστήματος γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστικού ελέγχου [113]. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει στον ελεγκτή να υπολογίσει την κατάσταση και τις τροχιές εισόδου σύμφωνα με την επιθυμητή τροχιά εξόδου του ανακλινόμενου οχήματος. Για να αποφευχθεί η άμεση αντιμετώπιση της ασταθούς πορείας, οι Frezza R. και Beghi A. (2003) πήραν τη γωνία κύλισης ως είσοδο του ελέγχου αντί για την είσοδο της γωνίας τιμονιού από τον οδηγό [114]. Έχουν ορίσει την παρακολούθηση της διαδρομής ως πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του ελεγκτή.

Ο Snell A. (1998) πρότεινε να ξεκινήσει η κλίση με το σύστημα STC και μετά να μεταβεί στο σύστημα DTC για να διατηρήσει τη θέση της κλίσης [115]. Ένα τρίτροχο πρωτότυπο ενός στενού κεκλιμένου οχήματος αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Bath, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Χρησιμοποίησε υδραυλικούς ενεργοποιητές για να γείρει την καμπίνα με τη βοήθεια της τεχνολογίας DTC που απαιτεί υψηλή ισχύ. Σε άλλη μελέτη εφαρμόστηκαν υβριδικά σχήματα ελέγχου με STC και DTC [20]. Αυτή η εργασία χρησιμοποίησε έναν ελεγκτή «feedforward plus» PID για τη σταθεροποίηση της κλίσης του οχήματος και χρησιμοποιήθηκε ως έλεγχος για το σφάλμα του μοντέλου της τροχιάς. Ο Chiu J. (2009) πρότεινε ένα PID διπλού βρόχου για τον έλεγχο και τη διατήρηση της κλίσης και του ρυθμού του οχήματος [116].

Οι Defoort M. et al. (2009) [117] και Nenner U. et al. (2008) [118] συνεργάστηκαν για την ανίχνευση της τροχιάς και τα ισχυρά προβλήματα σταθεροποίησης ενός ποδηλάτου χωρίς οδηγό. Ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο που εξετάζει τους μηχανισμούς γεωμετρικής σταθεροποίησης. Παρήγαγαν επίσης ένα συνδυασμένο σύστημα ελέγχου που αποτελείται από έναν ελεγκτή λειτουργίας της ολίσθησης δεύτερης τάξης και έναν παρατηρητή των διαταραχών. Στην έρευνά τους, υιοθέτησαν ένα απλοποιημένο τρίκυκλο μοντέλο ως το δυναμικό μοντέλο ενός ποδηλάτου. Επιπλέον, στα ερευνητικά έργα που αναφέρθηκαν παραπάνω και σε άλλες έρευνες συγγραφέων, η επίδραση της γωνίας της οδικής οδού δε λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου και στη μοντελοποίηση του δυναμικού μοντέλου των οχημάτων στενής κλίσης. Το αποτέλεσμα της μη ενσωμάτωσης της γωνίας της οδού είναι μια απαίτηση μη-μηδενικής ροπής σταθερής κατάστασης. Αυξάνει επίσης σημαντικά τις παροδικές απαιτήσεις της ροπής.

### **3.7.2 Κλίση τυπικού οχήματος παραγωγής**

Για τη βελτίωση της απόδοσης του οχήματος κατά τη στροφή, ή την ξαφνική αλλαγή της λωρίδας χρησιμοποιούνται προηγμένα ηλεκτρομηχανικά και ηλεκτρονικά συστήματα, όπως για παράδειγμα, τα συστήματα αντιμπλοκαρίσματος της πέδησης, η ηλεκτρονική διανομή της δύναμης των φρένων, το ενεργό σύστημα διεύθυνσης και ηλεκτρονικής σταθερότητας. Σήμερα, ορισμένοι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στον ενεργό έλεγχο της διεύθυνσης για τη βελτίωση της στροφής. Η Bose Corporation έχει

παρουσιάσει ένα σύστημα ανάρτησης (Bose). Αυτό το σύστημα αποτελείται από έναν ενισχυτή της ισχύος και ένα γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό κινητήρα σε κάθε τροχό που ελέγχεται από ένα σύνολο αλγορίθμων ελέγχου. Οι γραμμικοί ηλεκτρομαγνητικοί αποσβεστήρες μεγάλου εύρους ζώνης αυτού του συστήματος ανταποκρίνονται αρκετά γρήγορα για να επιτύχουν καλύτερη απόδοση της οδήγησης. Μέχρι σήμερα, το πρωτότυπο του συστήματος της ανάρτησης Bose είναι εγκατεστημένο σε σπάντα οχήματα παραγωγής και μπορεί να επιτύχει ταυτόχρονα ανώτερη ποιότητα άνεσης και ελέγχου. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το σύστημα ανάρτησης Bose μπορεί να αντισταθμίσει την κλίση του αμαξώματος του οχήματος σφίγγοντας την ανάρτηση ενώ στρίβει. Μπορεί επίσης να αλλάξει το ύψος της διαδρομής δυναμικά και είναι ικανό να εκτελεί τις τέσσερις λειτουργίες τεταρτημορίων και τη λειτουργία υψηλού εύρους ζώνης. Χρησιμοποιεί λιγότερο από το ένα τρίτο της ισχύος του συστήματος κλιματισμού ενός τυπικού οχήματος. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν εμπορικές δοκιμές ή λεπτομέρειες του σχεδιασμού στον κόσμο από την Bose Corporation, οι οποίες θα επέτρεπαν μια ακριβή και αμερόληπτη σύγκριση με άλλα ανταγωνιστικά συστήματα. Η απόδοση του οχήματος κατά τη στροφή έχει βελτιωθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό έλεγχο σταθερότητας (ESC), όπως έχει ήδη αναφερθεί.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όταν οι άνθρωποι σκέφτονται να αγοράσουν ένα νέο όχημα, συνήθως σκέφτονται την ιπποδύναμη, τη ροπή, την επιτάχυνση και την οικονομία καυσίμου. Ωστόσο, είναι πιθανό να αγνοούν ένα σημαντικό παράγοντα, αφού η ισχύς του κινητήρα ή η ταχύτητα του οχήματος είναι απολύτως άχρηστα εάν ο οδηγός δε μπορεί τελικά να ελέγξει το όχημα. Σίγουρα, πολλοί άνθρωποι μπορεί να αναγνωρίσουν τη σημασία της ανάρτησης για την άνεση στην οδήγηση, αλλά δε γνωρίζουν καθόλου το πλήρες φάσμα των καθηκόντων της ανάρτησης του οχήματος. Στην πραγματικότητα, εκτός από την άνεση στην οδήγηση, το σύστημα ανάρτησης παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση, τη σταθερότητα και την ασφάλεια του οχήματος. Κατά συνέπεια, οι μηχανικοί της αυτοκινητοβιομηχανίας στρέφουν την προσοχή τους στο σύστημα ανάρτησης, μια περιοχή που συνήθως αγνοείται από τους πελάτες που εξετάζουν μια αγορά.

Για πολλούς που εστιάζουν στην άνεση της οδήγησης, φαίνεται ότι το σύστημα της ανάρτησης είναι απλώς ένα σύνολο ελατηρίων και αμορτισέρ που συνδέουν τους τροχούς με το σώμα του οχήματος. Ωστόσο, αυτή είναι μια πολύ απλοϊκή άποψη του συστήματος ανάρτησης. Ένα σύστημα ανάρτησης οχημάτων παρέχει ομαλή οδήγηση σε δύσκολους δρόμους, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι τροχοί παραμένουν σε επαφή με το έδαφος και ο ρόλος του οχήματος ελαχιστοποιείται. Το σύστημα της ανάρτησης περιέχει τρία βασικά μέρη: μια δομή που υποστηρίζει το βάρος του οχήματος και καθορίζει τη γεωμετρία της ανάρτησης, ένα ελατήριο που μετατρέπει την κινηματική ενέργεια σε δυναμική ενέργεια ή το αντίστροφο, και ένα αμορτισέρ που είναι μια μηχανική συσκευή σχεδιασμένη να μειώνει την κινητική ενέργεια.

Μια ανάρτηση αυτοκινήτου συνδέει τους τροχούς ενός οχήματος με το σώμα του ενώ υποστηρίζει το βάρος του οχήματος. Επιτρέπει τη σχετική κίνηση μεταξύ του τροχού και του αμαξώματος του οχήματος. Θεωρητικά, ένα σύστημα ανάρτησης πρέπει να μειώσει το βαθμό ελευθερίας ενός τροχού (DOF) από 6 σε 2 στον πίσω άξονα και σε 3 στον μπροστινό άξονα, παρόλο που το σύστημα ανάρτησης πρέπει να υποστηρίζει την πρόωση, το τιμόνι, τα φρένα και τις αντίστοιχες δυνάμεις τους. Οι σχετικές κινήσεις των τροχών είναι η κάθετη κίνηση, η περιστροφική κίνηση γύρω από τους πλευρικούς άξονες και η περιστροφική κίνηση γύρω από τους κατακόρυφους άξονες λόγω της γωνίας διεύθυνσης.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα λοιπόν της σημερινής αυτοκινητοβιομηχανίας είναι να παρέχει την ασφάλεια των επιβατών, μέσω της βέλτιστης άνεσης της οδήγησης και των κρατημάτων στο δρόμο, για μια μεγάλη ποικιλία ελιγμών των οχημάτων και με βάση τις οδικές συνθήκες. Η άνεση και η ασφάλεια του επιβάτη που ταξιδεύει σε ένα όχημα μπορεί να βελτιωθεί ελαχιστοποιώντας τη δόνηση του αμαξώματος, την ανύψωση του αμαξώματος του οχήματος μέσω της βέλτιστης οδικής επαφής για τα ελαστικά. Το σύστημα στο όχημα που παρέχει αυτές τις ενέργειες είναι η ανάρτηση του οχήματος, δηλαδή ένα πολύπλοκο σύστημα που αποτελείται από διάφορους βραχίονες, ελατήρια και αποσβεστήρες που διαχωρίζουν το σώμα του οχήματος από τα ελαστικά και τους άξονες. Γενικά, τα οχήματα είναι εξοπλισμένα με πλήρως παθητικά συστήματα ανάρτησης λόγω του χαμηλού κόστους και της απλής κατασκευής τους. Για να



επιτευχθεί καλύτερη απόδοση οδήγησης, πρέπει να εισαχθεί μια «απαλή» ανάρτηση για να διατηρηθεί η επαφή μεταξύ του αμαξώματος του οχήματος και του ελαστικού. Η «απαλή» ανάρτηση απορροφά εύκολα τις οδικές διαταραχές.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχουν χρησιμοποιηθεί τα ενεργά και τα ημι-ενεργά συστήματα ανάρτησης ως πρακτική εφαρμογή της σύγχρονης θεωρίας ελέγχου. Σε αυτήν την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, έχουν αναφερθεί πολλές και βέλτιστες προσεγγίσεις, ή αλγόριθμοι ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων των γραμμικών αναλλοίωτων χρονικών ελέγχων H-infinity (LTIH), του ελέγχου γραμμικής παραλλαγής παραμέτρων (LPV) και του MPC. Πέντε ευρέως γνωστές προσεγγίσεις ελέγχου ξετάζονται πιο βαθιά, δηλαδή, οι LQR και LQG, SMC, fuzzy και neuro-fuzzy control και οι προσεγγίσεις skyhook και groundhook. Η στρατηγική ελέγχου skyhook χρησιμοποιείται ευρύτερα λόγω της απλότητας της για πρακτική εφαρμογή. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη μεγάλο εύρος εργασίας που πρέπει να γίνει για την τροποποίηση της στρατηγικής ελέγχου skyhook για την επίτευξη καλύτερης απόδοσης. Επιπλέον, στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία αναλύονται αυτά τα σημαντικά μέρη ενός οχήματος, τα συστήματα των αναρτήσεων και οι ιδιότητές τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hawley D., "jdpower," 15 2 2021. [Online]. Available: <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/what-is-the-suspension-in-a-car>.
- [2] Omar M., El-kassaby M. M., Abdelghaffar W. , "A universal suspension test rig for electrohydraulic active and passive automotive suspension system," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 56, no. 4, p. 359–370, 2017.
- [3] Chen Y., "Skyhook surface sliding mode control on semi-active vehicle suspension systems for ride comfort enhancement," *Engineering*, vol. 1, p. 23–32, 2009.
- [4] Gao W., Zhang N., Dai J. , "A stochastic quarter-car model for dynamic analysis of vehicles with uncertain parameters," *Veh Syst Dyn Int J Veh Mech Mobil* , vol. 46, p. 1159–1169, 2008.
- [5] Choi S.B., Lee H.S., Park Y.P. , "H-infinity control performance of a full-vehicle suspension featuring magnetorheological dampers," *Veh Syst Dyn* , vol. 38, no. 5, p. 341–360, 2002.
- [6] Ahmadian M. & Vahdati N., "Transient dynamics of semiactive suspensions with hybrid control," *J Intell Mater Syst Struct* , vol. 17, p. 145–153, 2006.
- [7] Yu M., Liao C., Chen W., Huang S., "Study on MR semi-active suspension system and its road testing," *J Intell Mater Syst Struct* , vol. 17, p. 801–806, 2006.
- [8] Eslaminasab N., Biglarbegian M., Melek W.W., Golnaraghi M.F., "A neural network based fuzzy control approach to improve ride comfort and road handling of heavy vehicles using semi-active dampers," *Int J Heavy Veh Syst* , vol. 14, p. 135–157, 2007.
- [9] Choi S., Lee S., Park Y., "A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magnetorheological damper," *J Sound Vib* , p. 245:375, 2001.
- [10] Sung K.G., Han Y.M., Lim K.H., Choi S.B., "Discrete-time fuzzy sliding mode control for a vehicle suspension system featuring an electrorheological fluid damper," *Smart Mater Struct* , vol. 16, p. 798, 2007.
- [11] Fang X. & Chen W. , "Fuzzy control technology and the application to vehicle semi-active suspension," *Chin J Mech Eng* , vol. 35, p. 98–100, 1999.

- [12] Dong X., Yu M., Liao C., Chen W., Zhang H., Huang S., "Adaptive fuzzy neural network control for transient dynamics of magneto-rheological suspension with time-delay," *Adv Neural Netw* , p. ISSN 1046–1051, 2006.
- [13] Karnopp D., Crosby M., Harwood R. , "Vibration control using semi-active force generators," *J Eng Ind* , vol. 96, p. 619–626, 1974.
- [14] Nguyen L.H., Park S., Turnip A., Hong K.S., "Modified skyhook control of a suspension system with hydraulic strut mount," in *ICCAS-SICE 2009 – ICROS-SICE International joint conference 2009*, 2009.
- [15] Du F., Li J., Li L., Si D., "Robust control study for four-wheel active steering vehicle," in *International conference on electrical and control engineering (ICECE)*, 2010.
- [16] The Ride base, "What Is ESP In Cars? How Does ESP Work And Is It Important?," [Online]. Available: <https://www.theriderbase.com/what-is-esp-in-cars/>. [Accessed 2 5 2021].
- [17] Goodall R., "Tilting trains and beyond-the future for active railway suspensions. 1. Improving passenger comfort.," *Comput Control Eng J* , vol. 10, p. 153–160, 1999.
- [18] Hibbard R. & Karnopp D. , "Twenty first century transportation system solutions—a new type of small, relatively tall and narrow active tilting commuter vehicle," *Veh Syst Dyn* , vol. 25, p. 321–347, 1996.
- [19] Karnopp D. & Hibbard R., "Optimum roll angle behavior for tilting ground vehicles," *ASME Dyn Syst Control Div Publ DSC, ASME*, vol. 44, p. 29–37, 1992.
- [20] Kidane S., Alexander L., Rajamani R., Starr P., Donath M., "Road bank angle considerations in modeling and tilt stability controller design for narrow commuter vehicles," in *Proceedings of the American control conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [21] Piyabongkarn D., Keviczky T., Rajamani R., "Active direct tilt control for stability enhancement of a narrow commuter vehicle," *Int J Automot Technol* , vol. 5, p. 77–88, 2004.
- [22] Wang J. & Shen S., "Integrated vehicle ride and roll control via active suspensions," *Veh Syst Dyn* , vol. 46, p. 495–508, 2008.
- [23] Jones W. , "Easy ride: Bose Corp. uses speaker technology to give cars adaptive suspension," *IEEE Spectr* , vol. 42, p. 12–14, 2005.
- [24] Gohl J.B. , "Narrow tilting vehicles: modeling and steering based, tilt control," *University of Minnesota, Minnesota*, 2003.

- [25] Rajamani R., Gohl J., Alexander L., Starr P., "Dynamics of narrow tilting vehicles," *Math Comput Model Dyn Syst* , vol. 9, p. 209–231, 2003.
- [26] Jiang X., Wang J., Hu H. , "Semi-active control of a vehicle suspension using magneto- rheological damper," *J Cent South Univ* , vol. 19, p. 1839–1845, 2012.
- [27] Chen S.Z., Feng Z.Z., Yang L., Zhao Y.T., "Magnetorheological semi-active suspension demonstration for off-road vehicles," *Adv Sci Lett* , vol. 12, p. 1–6, 2012.
- [28] Sun P., Wang J.F., Feng F., "A new kind of semi-active suspension magnetorheological fluid shock absorber damping force model," *Adv Mater Res* , vol. 549, p. 856–860, 2012.
- [29] monroe, "monroe," [Online]. Available: <https://www.monroe.com.au/trade-corner/tech-info/suspension-systems/front-suspensions.html>. [Accessed 12 5 2021].
- [30] "pinimg," [Online]. Available: <https://i.pinimg.com/originals/1f/63/f4/1f63f47077be32f1c4417a5e8ee48ce1.jpg>. [Accessed 16 5 2021].
- [31] Youwheel, "medium," 21 1 2015. [Online]. Available: [https://medium.com/@you\\_wheel/automobile-suspension-design-101-part-iii-double-wishbone-suspension-1edbcbe29232](https://medium.com/@you_wheel/automobile-suspension-design-101-part-iii-double-wishbone-suspension-1edbcbe29232). [Accessed 12 5 2021].
- [32] "thinglink," [Online]. Available: <https://www.thinglink.com/scene/986564104455979009>. [Accessed 12 5 2021].
- [33] "avtotachki," [Online]. Available: <https://avtotachki.com/en/pochemu-stala-propadat-mnogorychazhnaya-podveska/>. [Accessed 16 5 2021].
- [34] "car treatments," [Online]. Available: <https://cartreatments.com/pros-and-cons-of-macpherson-vs-double-wishbone-suspension/>. [Accessed 12 5 2021].
- [35] "ebay," [Online]. Available: <https://www.ebay.com/itm/2-Coil-Springs-MOOG-Front-Constant-Rate-REPLACE-GMC-OEM-4911053F70/233534110669>. [Accessed 15 5 2021].
- [36] "mckenzie's," [Online]. Available: <https://www.mckenzie's.com/products/sway-away-race-torsion-bar-set-300m-vw-rear-suspension-26-9-16-long>. [Accessed 16 5 2021].
- [37] "dobinsonsdirect," [Online]. Available: <https://www.dobinsonsdirect.com/products/dobinsons-rear-leaf-springs-pair-for-toyota-hilux-revo-2015-to-2019-l59-178-rp>. [Accessed 17 5 2021].

- [38] "sampa," [Online]. Available: <https://www.sampa.com/en/products/sampa-showroom/sampa-air-springs>. [Accessed 16 5 2021].
- [39] Besinger F., Cebon D., Cole D., "Force control of a semi-active damper," *Veh Syst Dyn* , vol. 24, p. 695–723, 1995.
- [40] ISO, *Mechanical vibration-road surface profiles-reporting of measured data*,, 1995.
- [41] Jones W., "Easy ride: Bose Corp. uses speaker technology to give cars adaptive suspension," *Spectrum, IEEE*, vol. 42, pp. 12-14, 2005.
- [42] Kiran J., "Analysis of suspension system using MATLAB, SIMULINK and Simscape," MATLAB, 2021. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/18410/versions/1/screenshot.JPG>. [Accessed 3 5 2021].
- [43] Suda Y., Shiiba T., Hio K., Kawamoto Y., Kondo T., Yamagata H., "Study on electromagnetic damper for automobiles with nonlinear damping force characteristics: (road test and theoretical analysis)," *Veh Syst Dyn* , vol. 41, p. 637–646, 2004.
- [44] "yourmechanic," [Online]. Available: <https://www.yourmechanic.com/article/how-to-inspect-your-suspension-system>. [Accessed 18 5 2021].
- [45] Abdussalam A. A. & Özkan B., "Analysis of effect of in-wheel electric motors mass on passive and active suspension systems," *European Academic Research* , vol. 10, 2015.
- [46] Gillespie T. , "Development of semi-active damper for heavy off-road military vehicles," *University of Waterloo*, 2006.
- [47] Konik D., Bauer W., Huber K., Jordan B., Kolbel S., Scharf J., "Electronic damping control with continuously working damping valves (EDCC) – system description and functional requirements," in *International symposium on advanced vehicle control*, Aachen, Germany, 1996.
- [48] Sankaranarayanan V., Emekli M.E., Gilvenc B., Guvenc L., Ozturk E., Ersolmaz E., "Semiactive suspension control of a light commercial vehicle," *IEEE/ASME Trans Mechatron* , vol. 13, p. 598–604, 2008.
- [49] Chen L., "Mathworks," [Online]. Available: [https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/11119-fuzzy-controller-of-semi-active-control-for-1-4-suspension-system?s\\_tid=FX\\_rc2\\_behav](https://ww2.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/11119-fuzzy-controller-of-semi-active-control-for-1-4-suspension-system?s_tid=FX_rc2_behav). [Accessed 17 5 2021].

- [50] Savaresi S. M. & Spelta C. , "Mixed sky-hook and ADD: approaching the filtering limits of a semi-active suspension," *J Dyn Syst Meas Control* , p. 129:382, 2007.
- [51] Hrovat D. , "Survey of advanced suspension developments and related optimal control applications," *Automatica*, vol. 33, p. 1781–1817, 1997.
- [52] Zhang H., Winner H., Li W. , "Comparison between skyhook and minimax control strategies for semi-active suspension system," *World Acad Sci Eng Technol* , p. 624–627, 2009.
- [53] Abdalla M., Al Shabatat N., Al Qaisi M. , "Linear matrix inequality based control of vehicle active suspension system," *Veh Syst Dyn Int J Veh Mech Mobil* , vol. 47, p. 121–134, 2009.
- [54] Faheem A., Alam F., Thomas V., "The suspension dynamic analysis for a quarter car model and half car model," in *Presented at the 3rd BSME-ASME International conference on thermal engineering*, Dhaka, 2006.
- [55] "Chegg study," [Online]. Available: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/consider-two-degree-freedom-quarter-car-model-shown-diagram--vehicle-quarter-car-model-mi--q47795420>. [Accessed 15 5 2021].
- [56] Tsirogiannis G. E., "Design of an efficient and lightweight chassis, suitable for an electric car," *University of Bradford*, 2015.
- [57] "liveforspeed," [Online]. Available: <https://www.lfs.net/forum/thread/62537-roll-center-and-CG>. [Accessed 15 5 2021].
- [58] Esfahani M. I. M., "Optimization of double wishbone suspension system with variable camber angle by hydraulic mechanism," *Engineering and Technology*, vol. 61, pp. 299-306, 2010.
- [59] "rapid-share," [Online]. Available: <http://www.rapid-racer.com/suspension-tuning.php>. [Accessed 16 5 2021].
- [60] "summitracing," [Online]. Available: [https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a\\_id/5257/~/~what-is-toe%3F](https://help.summitracing.com/app/answers/detail/a_id/5257/~/~what-is-toe%3F). [Accessed 6 5 2021].
- [61] "farnorthracing," [Online]. Available: [http://farnorthracing.com/autocross\\_secrets5.html](http://farnorthracing.com/autocross_secrets5.html). [Accessed 16 5 2021].
- [62] Poussot-Vassal C., Sename O., Dugard L., Gaspar P., Szabo Z., Bokor J. , "A new semi- active suspension control strategy through LPV technique," *Control Eng Pract* , vol. 16, p. 1519–1534, 2008.

- [63] Zin A., Sename O., Dugard L., "Switched H1 control strategy of automotive active suspensions," in *Proceedings of the 16th IFAC world congress (WC)*, Praha, Czech Republic, 2005.
- [64] Giorgetti N., Bemporad A., Tseng H.E., Hrovat D., "Hybrid model predictive control application towards optimal semi-active suspension," *Int J Control* , vol. 79, p. 521–533, 2006.
- [65] Poussot-Vassal C., Drivet A., Sename O., Dugard L., Ramirez-Mendoza R., "A self tuning LPV/H1 suspension controller for a multi-body quarter vehicle model," in *Proceedings of the 10th mini-conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies (VSDIA)*, Budapest, Hungary, 2007.
- [66] Gaspar P., Szaszi I., Bokor J., "Active suspension design using LPV control," in *Proceedings of the 1st IFAC symposium on advances in automotive control (AAC)*, Salerno, Italy, 2004.
- [67] Zin A., Sename O., Gaspar P., Dugard L., Bokor J., "Robust LPV–H1 control for active suspensions with performance adaptation in view of global chassis control," *Veh Syst Dyn* , vol. 46, p. 889–912, 2008.
- [68] Canale M., Milanese M., Novara C., "Semi-active suspension control using ‘fast’ model- predictive techniques," *IEEE Trans Control Syst Technol*, vol. 14, p. 1034–1046, 2006.
- [69] Giua A., Melas M., Seatzu C., Usai G., "Design of a predictive semiactive suspension system," *Veh Syst Dyn* , vol. 41, p. 277–300, 2004.
- [70] Choudhury S.F., Sarkar DMAR , "An approach on performance comparison between automotive passive suspension and active suspension system (pid controller) using matlab/ simulink," *J Theor Appl Inf Technol* , vol. 43, p. 295–300, 2012.
- [71] ElMadany M.M. & Abduljabbar Z.S., "Linear quadratic Gaussian control of a quarter-car suspension," *Veh Syst Dyn*, vol. 32, p. 479–497, 1999.
- [72] Krtolica R. & Hrovat D. , "Optimal active suspension control based on a half-car model: an analytical solution," *IEEE Trans Autom Control* , vol. 37, p. 528–532, 1992.
- [73] Hrovat D., "Optimal active suspensions for 3D vehicle models," in *Proceedings of American control conference*, 1991.
- [74] Doyle J. & Stein G. , "Multivariable feedback design: concepts for a classical/modern synthesis," *IEEE Trans Autom Control* , vol. 26, p. 4–16, 1981.
- [75] Fuller C.R., Elliott S.J., Nelson P.A. , "Active control of vibration," *Academic Press*, 1977.

- [76] Hrovat D., "Applications of optimal control to advanced automotive suspension design," *J Dyn Syst Meas Control* , p. 115:328, 1993.
- [77] Shisheie R., Shafieenejad I., Moallemi N., Novinzadeh A., "Linear quadratic regulator time-delay controller for hydraulic actuator," *J Basic Appl Sci Res*, vol. 2, no. 3, p. 2607–2618, 2012.
- [78] Prokop G. & Sharp R. , "Performance enhancement of limited-bandwidth active automotive suspensions by road preview," *IEEE Proc Control Theory Appl* , p. 140–148, 1995.
- [79] Shen Y. , "Vehicle suspension vibration control with magnetorheological dampers," *Ph.D. Thesis, University of Waterloo*, 2005.
- [80] Foo G. & Rahman M., "Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection," *IEEE Trans Ind Electron* , vol. 57, p. 1270–1278, 2010.
- [81] Gupta R., Ghosh A., Joshi A., "Multiband hysteresis modulation and switching characterization for sliding-mode-controlled cascaded multilevel inverter," *IEEE Trans Ind Electron* , vol. 57, p. 2344–2353, 2010.
- [82] Shiri A., "Robust sliding mode control of electromagnetic suspension system with parameter uncertainty," *J Appl Sci Eng Technol* , vol. 10, p. 1677–1683, 2012.
- [83] Orowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K., "Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint," *IEEE Trans Ind Electron*, vol. 57, p. 1309–1317, 2010.
- [84] Wu L., Ho D.W.C. , "Sliding mode control of singular stochastic hybrid systems," *Automatica* , vol. 46, p. 779–783, 2010.
- [85] Choi H.H. , "LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems," *IEEE Trans Autom Control* , vol. 52, p. 736–742, 2007.
- [86] Chan M.L., Tao C., Lee T.T. , "Sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varying uncertainties," *J Franklin Inst* , vol. 337, p. 105–115, 2000.
- [87] Yagiz N., Yuksek I., Sivrioglu S. , "Robust control of active suspensions for a full vehicle model using sliding mode control," *JSME Int J Ser C Mech Syst Mach Elem Manuf* , vol. 43, p. 253– 258, 2000.
- [88] Chamseddine A., Noura H., Raharijaona T. , "Control of linear full vehicle active suspension system using sliding mode techniques," p. 1306–1311, 2006.



- [89] Al-Holou N., Joo D.S., Shaout A., "The development of fuzzy logic based controller for semi-active suspension system," in *Proceedings of the 37th Midwest symposium on IEEE*, 1994.
- [90] Barr A.J., Ray J., "Control of an active suspension using fuzzy logic," in *Proceedings of the Fifth IEEE International conference on fuzzy systems*, 1996.
- [91] Yan B., Zhang X., Niu H., "Design and test of a novel isolator with negative resistance electromagnetic shunt damping," *Smart Mater Struct* 21:035003, 2012.
- [92] Youssef K.H., Yousef H.A., Sebakhy O.A., Wahba M.A. , "Adaptive fuzzy APSO based inverse tracking-controller with an application to DC motors.," *Expert Syst Appl* , vol. 36, p. 3454– 3458, 2009.
- [93] Khalid H., Rizvi S., Cheded L., Doraiswami R., Khoukhi A., "A PSO-trained adaptive neuro-fuzzy inference system for fault classification," in *International conference on neural computation*, ICNC Valencia, Spain, 2010.
- [94] Kashani R. & Strelow J.E. , "Fuzzy logic active and semi-active control of off-road vehicle suspensions," *Veh Syst Dyn* , vol. 32, p. 409–420, 1999.
- [95] Mathworks, "Semi-active Control of Skyhook for 1/4 Suspension System," Mathworks, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11118-semi-active-control-of-skyhook-for-1-4-suspension-system>. [Accessed 6 5 2021].
- [96] Shen Y., Golnaraghi M., Heppler G., "Semi-active vibration control schemes for suspension systems using magnetorheological dampers," *J Vib Control* , vol. 12, p. 3–24, 2006.
- [97] Karnopp D., "Active damping in road vehicle suspension systems," *Veh Syst Dyn* , vol. 12, p. 291–311, 1983.
- [98] Li H. & Goodall R. M. , "Linear and non-linear skyhook damping control laws for active railway suspensions," *Control Eng Pract* , vol. 7, p. 843–850, 1999.
- [99] Margolis D. L., "Semi-active control of wheel hop in ground vehicles," *Veh Syst Dyn* , vol. 12, p. 317–330, 1983.
- [100] Bakar S., Jamaluddin H., Rahman R.A., Samin P.M., Hudha K. , "Vehicle ride performance with semi-active suspension system using modified skyhook algorithm and current generator model," *Int J Veh Auton Syst* , vol. 6, p. 197–221, 2008.
- [101] Tong R.T., "Ride control: a two-state design for heavy vehicle suspension," *University of Illinois at Chicago*, 2001.

- [102] Soliman A., Kaldas M., Barton D.C., Brooks P.C., "Fuzzy-skyhook control for active suspension systems applied to a full vehicle model," *Int J Eng Technol* , vol. 2, p. 01–12, 2012.
- [103] Islam A. & Ahmed A., "Comparative performance study of magneto-rheological fluid based damper for vehicle suspension," in *Proceedings of the International conference on mechanical engineering 2005*, Dhaka, Bangladesh, 2005.
- [104] Kashem S., Ektesabi M., Nagarajah R., "Comparison between different sets of suspension parameters and introduction of new modified skyhook control strategy incorporating varying road condition," *Veh Syst Dyn* , vol. 50, p. 1173–1190, 2012.
- [105] Mulla A., Jalwadi S., Unaune D., "Performance Analysis of Skyhook, Groundhook and Hybrid Control Strategies on Semiactive Suspension System," *International Journal of Current Engineering and Technology* , no. 3, 2014.
- [106] Valasek M., Kortum W., Sika Z., Magdolen L., "Development of semi-active road-friendly truck suspensions," *Control Eng Pract* , vol. 6, p. 735–744, 1998.
- [107] Valasek M., Novak M., Åika Z., Vaculin O., "Extended ground-hook-new concept of semi-active control of truck's suspension," *Veh Syst Dyn* , vol. 27, p. 289–303, 1997.
- [108] Goodall R., "Tilting trains and beyond. The future for active railway suspensions. 2. Improving stability and guidance.," *Comput Control Eng J*, vol. 10, p. 221–230, 1999.
- [109] Piyabongkarn D., Keviczky T., Rajamani R., "Active direct tilt control for stability enhancement of a narrow commuter vehicle," *Int J Automot Technol*, vol. 5, p. 77–88, 2004.
- [110] Rajamani R., *Vehicle dynamics and control*, New York: Springer, 2006.
- [111] Amati N., Festini A., Pelizza L., Tonoli A. , "Dynamic modelling and experimental validation of three wheeled tilting vehicles," *Veh Syst Dyn* , vol. 49, p. 889–914, 2012.
- [112] Kidane S., Alexander L., Rajamani R., Starr P., Donath M., "Road bank angle considerations in modeling and tilt stability controller design for narrow commuter vehicles," in *Proceedings of the American control conference*, Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [113] Saccon A., Hauser J., Beghi A. , "A virtual rider for motorcycles: an approach based on optimal control and maneuver regulation," p. 243–248, 2008.
- [114] Frezza R. & Beghi A., "Simulating a motorcycle driver," in *New trends in nonlinear dynamics and control and their applications*, 2003.

- [115] Snell A. , "An active roll-moment control strategy for narrow tilting commuter vehicles," *Veh Syst Dyn*, vol. 29, p. 277–307, 1998.
- [116] Chiou J., Lin C.Y., Chen C.L., Chien C.P., "Tilting motion control in narrow tilting vehicle using double-loop PID controller," in *Proceedings of the 7th Asian control conference*, 2009.
- [117] Defoort M. & Murakami T., "Sliding-mode control scheme for an intelligent bicycle," *IEEE Trans Ind Electron* , vol. 56, p. 3357–3368, 2009.
- [118] Nenner U., Linker R., Gutman P.O., "Robust stabilization of an unmanned motorcycle," in *Robotics, automation and mechatronics, IEEE conference*, Chengdu, China, 2008.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Όροι του συστήματος ανάρτησης

- Γωνία Camber: Κοιτώντας απευθείας στο μπροστινό μέρος του οχήματος, η καμπυλότητα αναφέρεται στην κλίση (+) ή έξω (-) του κάτω μισού του ελαστικού.
- Γωνία Caster: Κοιτώντας απευθείας στο πλάι του οχήματος, η γωνία Caster αναφέρεται στην κλίση προς τα πίσω (+) του κάτω μισού του ελαστικού.
- Πέλμα: Κοιτώντας απευθείας στο πάνω μέρος του οχήματος, το πέλμα αναφέρεται στην κλίση (+) ή έξω (-) του μπροστινού μισού του ελαστικού.
- Τίναγμα: Το τίναγμα αναφέρεται στην αναπήδηση ή την κάθετη κίνηση της ανάρτησης του οχήματος προς τα πάνω όταν έρχεται σε επαφή με ένα χτύπημα στο δρόμο.
- Αναπήδηση: Η αναπήδηση αναφέρεται στην κίνηση της ανάρτησης του οχήματος στην αντίθετη κατεύθυνση του τινάγματος.
- Κούνημα: Το κούνημα είναι μια ανεξέλεγκτη ταλάντωση του συστήματος διεύθυνσης που βιώνουν δύο αντίθετοι τροχοί.
- Άρθρωση: Το ακραξόνιο είναι το εξάρτημα ανάρτησης που ενσωματώνει τον άξονα στον οποίο στερεώνονται τα ρουλεμάν και οι τροχοί.
- Πείρος: Ο πείρος είναι το κατακόρυφο εξάρτημα στην άρθρωση που ενεργοποιούνται οι τροχοί όταν οδηγείται το όχημα.
- Άξονας: Ο άξονας είναι το μακρύ κωνικό κομμάτι σε σχήμα ράβδου που είναι τοποθετημένο στην άρθρωση στην οποία είναι τοποθετημένα τα ρουλεμάν και οι τροχοί.
- Πλήμνη: Η πλήμνη είναι το κοίλο τμήμα του σφιγκτήρα που αντικαθιστά τον άξονα στην τοποθέτηση των ρουλεμάν που στηρίζουν τον τροχό.
- Σύνδεση μπάλας: Ένας σύνδεσμος μπάλας είναι ένας σύνδεσμος που επιτρέπει την κίνηση σε όλες τις κατευθύνσεις.
- Ακρόμπαρο: Η ράβδος πρόσδεσης είναι ένα εξάρτημα που συνδέει σταθερά έναν τροχό του οχήματος με τον τροχό στο αντίθετο άκρο για την παροχή διεύθυνσης.

- Ράβδος τροχιάς: Η ράβδος τροχιάς είναι μια ράβδος που συνδέει μια δοκό ανάρτησης με το πλαίσιο για να παρέχει πλευρική στήριξη.
- Μη αναρτώμενο βάρος: Το μη αναρτώμενο βάρος είναι το συνολικό βάρος όλων των εξαρτημάτων σε ένα όχημα που δεν έχουν ταλάντωση από τα ελατήρια και τους κραδασμούς όπως οι τροχοί και λοιπός στενά συνδεδεμένος εξοπλισμός.
- Scrub: Το Scrub είναι η πλευρική κίνηση ενός ελαστικού στο πεζοδρόμιο λόγω αλλαγών στο θάλαμο ανάρτησης κατά την αναπήδηση και την ανάκαμψη.