ΤΕΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών(Σ.Τ.ΕΦ.)
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
ΠΜΣ Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Κατασκευή και λειτουργία Μονοσωλήνιου αμορτισέρ με ρεζερβουάρ»

Σπουδαστής:
Διαμαντόπουλος Ηλίας
Επιβλέπων:
Δρ.Μηχ. Στυλιανός Μαρκολέφας
Ιούνιος 2018

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ»

«Master of Science in Design and Manufacturing of Sports Vehicle Systems»

«Κατασκευή και λειτουργία Μονοσωλήνιου αμορτισέρ με ρεζερβουάρ»

"Manufacturing and Operation of Monotube Coilover Shock Absorber with reservoir "

Διπλωματική εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Στερεάς Ελλάδας ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
από τον

Διαμαντόπουλο Ηλία του Ιωάννη.

Επιβλέπων:
Δρ. Μηχ. Σ. Μαρκολέφας

Δήλωση Αυθεντικότητας, ζητήματα Copyright

«Ο μεταπτυχιακός φοιτητής που εκπόνησε την παρούσα διπλωματική εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη-κερδοσκοπικός, αλλά εκπαιδευτικός-ερευνητικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήματα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες κ.λπ.), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με όλο το κείμενο υπό Copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή την γενικότερη αξία του υπό Copyright κειμένου»

Ιούνιος 2018

Σελίδα Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

«Η παρούσα διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή η οποία ορίστηκε από την Γ.Σ.Ε.Σ. του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Στερεάς Ελλάδας, σύμφωνα με τον νόμο και τον εγκεκριμένο οδηγό σπουδών του ΠΜΣ «Σχεδίαση και Κατασκευή Συστημάτων Αγωνιστικών Οχημάτων». Τα μέλη της επιτροπής ήταν:

1	*Δρ. Μηχ. Μαρκολέφας Στυλιανός*	*(Επιβλέπων)*
2	*Δρ. Μηχ. Φατσής Αντώνιος*	*(Μέλος)*
3	*Δρ. Μηχ. Κριμπένης Αγαθοκλής*	*(Μέλος)*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Στερεάς Ελλάδας, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Στυλιανό Μαρκολέφα που μου έδωσε την ευκαιρία να υλοποιήσουμε το θέμα της διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη του καθοδήγηση του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα κύριο Φατσή Αντώνιο και κύριο Κριμπένη Αγαθοκλή για τις γνώσεις που μου προσέφεραν.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Κυριάκο Τρυφωνίδη για την συνεργασία που είχαμε και τους εργαζόμενους στην εταιρεία SABO A.B.E.E που με την πολύτιμη βοήθειά τους κατασκευάστηκε ο αποσβεστήρας της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με έχει στηρίξει και μου έχει δώσει δύναμη σε ότι επιλογές έχω κάνει, και την φίλη μου που έκανε υπομονή και με στήριζε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Σύντομη Περίληψη

Η εργασία περιλαμβάνει την κατασκευή και την λειτουργία ενός μονοσωλήνιου αποσβεστήρα(αμορτισέρ) με ρεζερβουάρ. Θα παρουσιαστούν τα εξαρτήματα του αποσβεστήρα και πως κατασκευάστηκαν, από τι υλικό είναι το κάθε εξάρτημα καθώς και την λειτουργία του αποσβεστήρα.

Το πρώτο βήμα στην κατανόηση της λειτουργίας ενός αποσβεστήρα είναι να καταλάβουμε πώς τα στοιχεία αλληλοεπιδρούν για να δημιουργήσουν τη δύναμη του αποσβεστήρα. Τα χαρακτηριστικά του αποσβεστήρα παρουσιάζονται συνήθως στα διαγράμματα **Δύναμης -Ταχύτητας** και **Δύναμης – Μετατόπισης**.

Σκοπός της εργασίας είναι να κατανοηθεί η κίνηση και η λειτουργία του αποσβεστήρα και πως τα επιμέρους εξαρτήματα συνεργάζονται. Για αυτό το λόγο ο κύριος σωλήνας του αμορτισέρ καθώς και το ρεζερβουάρ είναι από υλικό Plexiglas όπου μπορεί να φανεί η κίνηση των επιμέρους εξαρτημάτων κατά την λειτουργία του.

Λέξεις κλειδιά: αποσβεστήρας, μονοσωλήνιος αποσβεστήρας με ρεζερβουάρ, διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας

Abstract

This Master thesis paper includes the manufacturing and operating process of the monotube mono shock absorber with reservoir. There will be a presentation of the parts and the materials used to manufacture the monotube shock absorber.

The first step on understanding the operation of the shock absorber is to fully understand how the elements react to produce the power of the shock absorber. The characteristics of the shock absorber are being presented at the drawings of Force-Velocity and Force- displacement.

The purpose of this paper is to understand the movement and the operation of the shock and how all the individual parts are working together. This is the main reason of using a Plexiglas tube for the main shock as well as for the reservoir. This way you can see the movement of the parts in operation mode.

Keywords: Shock absorber, monotube shock absorber with reservoir, drawing of force-displacement, drawing of force-velocity

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{Ο}…….....1

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…...…….....1

1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ….……...……...2

1.3 ΕΙΔΗ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ…….....3

1.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ MONOTUBE – TWIN TUBE ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….....8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο}..... 9

2.1 ΕΙΔΗ ΜΟΝΟΣΩΛΗΝΙΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ……...……..9

2.2 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΜΟΝΟΣΩΛΗΝΙΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….10

2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΟΣΩΛΗΝΙΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….11

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ……14

2.5 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΡΟΗ ΛΑΔΙΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ……15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο}……...20

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΑΠΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ……...20

3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΡΙΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΚΑΙ ΡΕΖΕΡΒΟΥΑΡ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ……..23

3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΑΒΔΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….24

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΜΒΟΛΟΥ ΤΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΚΑΙ ΕΜΒΟΛΟΥ ΡΕΖΕΡΒΟΥΑΡ……..…25

3.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΕΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….27

3.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΑΣΕΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ……..28

3.7 ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ……..29

3.8 ΚΑΛΥΜΠΡΑΡΙΣΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ……30

3.9 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥΣ……32

3.10 ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΑ…….33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο}……...34

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ……..34

4.2 ΔΥΝΑΜΗ – ΤΑΧΥΤΗΤΑ…….37

4.3 ΔΥΝΑΜΗ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ…….38

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ……...39

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ……40

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ…......41

Α) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 4045 ……41

Β) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ PLA ……42

Γ) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ PLEXIGLAS ……43

Δ) C.N.C OKUMA LB3000 EXII ……...44

Ε) CREALITY CR-10 3D PRINTER ……45

ΣΤ) ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ……46

Η) ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΗΣ - ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ, ΔΥΝΑΜΗΣ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ……...49

Κατάλογος εικόνων

No	Περιγραφή	Σελίδα
1.1	Αποσβεστήρας με ρεζερβουάρ	8
1.2	Twin tube –Monotube Αποσβεστήρες	9
1.3	Monotube Αποσβεστήρας	10
1.4	Twin tube Αποσβεστήρας	11
1.5	Μαγνητικός αποσβεστήρας	12
1.6	Monotube αποσβεστήρας με ρεζερβουάρ	13
1.7	Διαφορές Twin-tube με Monotube Αμορτισέρ	14
2.1	Είδη μονοσωλήνιων αποσβεστήρων	15
2.2	Εξαρτήματα Μονοσωλήνιου αποσβεστήρα	16
2.3	Συμπίεση αποσβεστήρα	18
2.4	Εκτόνωση αποσβεστήρα	19
2.5	Διάγραμμα ελευθέρου σώματος εμβόλου	20
2.6	Απλοποιημένο μοντέλο βαλβίδας κατά την συμπίεση	22
2.7	Διάγραμμα ελευθέρου σώματος της βαλβίδας	23
2.8	Διάγραμμα ελεύθερου σώματος εμβόλου αέρα	24
3.1	Άνω τάπα κύριου σωλήνα αποσβεστήρα	26
3.2	Κάτω τάπα κύριου σωλήνα	27
3.3	Άνω τάπα ρεζερβουάρ αποσβεστήρα	28
3.4	Κύριος σωλήνας και ρεζερβουάρ αποσβεστήρα	29
3.5	Ράβδος αποσβεστήρα	30
3.6	Έμβολο της ράβδου	32
3.7	Έμβολο του ρεζερβουάρ	32
3.8	Βάσεις αποσβεστήρα	33
3.9	Βάση αισθητήρα βάρους, θήκη μπαταρίας και βάση αισθητήρα επιτάχυνσης	34
3.10	Ηλεκτρικό κύκλωμα αισθητήρων	35
3.11	Αισθητήρας επιτάχυνσης	36
3.12	Αισθητήρας βάρους	37
3.13	Θραύση σωλήνα αποσβεστήρα	38
4.1	Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου	40
4.2	Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου	41
4.3	Διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου	41
4.4	Διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας	43
4.5	Διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης	44

Πίνακας Συμβόλων

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
A	Επιφάνεια	m^2
A_o	Επιφάνεια οπών εμβόλου	m^2
A_c	Επιφάνεια του εμβόλου στο θάλαμο συμπίεσης	m^2
A_{gp}	Επιφάνεια του αιωρούμενου εμβόλου	m^2
A_r	Επιφάνεια του εμβόλου στο θάλαμο εκτόνωσης	m^2
A_{rod}	Επιφάνεια της ράβδου του εμβόλου	m^2
A_{mp}	Πλάτος	m
$A_{v\ flow}$	Επιφάνεια της βαλβίδας του εμβόλου	m^2
b	Απόσταση μεταξύ της τσιμούχας του εμβόλου και του σωλήνα του αποσβεστήρα	m
C_D	Δυναμικός συντελεστής	
C_f	Συντελεστής ορμής	
D_p	Διάμετρος εμβόλου	m
D_v	Διάμετρος βαλβίδας	m
f	Συχνότητα	Hz
F	Δύναμη απόσβεσης	N
F_f	Δύναμη τριβής εμβόλου	N
F_m	Δύναμη ροπής υγρού	N
F_{sp}	Δύναμη προφόρτισης στις ροδέλες	N
k	Ακαμψία του ελατηρίου της βαλβίδας	N/m
l	Μήκος εμβόλου	m
L	Μήκος αποσβεστήρα	m
Lg	Μήκος του θαλάμου αέρα	m
m	Μάζα	kg
m_{gp}	Μάζα του εμβόλου του αέρα	kg
m_p	Μάζα του εμβόλου/ράβδου	kg
P	Πίεση	Pa
Δ_p	Διαφορά πίεσης	Pa
P_c	Πίεση στο θάλαμο συμπίεσης	Pa
P_r	Πίεση στο θάλαμο εκτόνωσης	Pa
P_g	Πίεση στο θάλαμο του αέρα	Pa
P_v	Πίεση στην βαλβίδα	Pa
Q	Ρυθμός ροής	m^3/s
Q_{lp}	Ρυθμός ροής διαρροής	m^3/s
Qv	Ρυθμός ροής στην βαλβίδα εμβόλου	m^3/s
x	Διαδρομή εμβόλου	m
x'	Ταχύτητα εμβόλου	m^2
x''	Επιτάχυνση εμβόλου	m/s^2
y	Μετατόπιση ροδέλας	m
μ	Ιξώδες υγρού	Pa-s
π	pi	
ρ	Πυκνότητα	Kg/m^3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{0}

1.1 Ιστορική αναδρομή αποσβεστήρα

Μέχρι και το 1908 οι αποσβεστήρες δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου.

Από το 1908 έως το 1925 χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ξηρά snubbers.

Από το 1925 έως το 1980 υπήρξε μια μακρά περίοδος κυριαρχίας από το απλό υδραυλικό σύστημα. Αρχικά λειτουργούσε με απλή εκτόνωση με σταθερή δύναμη, στη συνέχεια με προοδευτική ανάπτυξη σε ένα πιο αναλογικό χαρακτηριστικό, και τέλος εξελίχθηκε σε ρυθμιζόμενο, οδηγώντας σε ένα σύγχρονο προϊόν.

Από το 1980 έως το 1985 υπήρξε ενθουσιασμός σχετικά με τις δυνατότητες ενεργητικού αποσβεστήρα, οι οποίες θα μπορούσαν να εξαλείψουν αποτελεσματικά τον απλό αποσβεστήρα, όμως έφτασε ελάχιστα μέχρι σήμερα στην παραγωγή, από εμπορική άποψη, λόγω του κόστους.

Από το 1985 έγινε όλο και πιο προφανές, ότι ένα μεγάλο μέρος του οφέλους από την ενεργό ανάρτηση θα μπορούσε να επιτευχθεί πολύ πιο φτηνά, με γρήγορους αυτόματους ρυθμιζόμενους αποσβεστήρες και ο αποσβεστήρας ξαφνικά έγινε ένα ενδιαφέρον, αναπτυσσόμενο, προϊόν πάλι.

Από το 2000 έγινε εισαγωγή ελεγχόμενων ηλεκτρομαγνητικών αποσβεστήρων, τουλάχιστον σε οχήματα υψηλού κόστους και **από το 2005** μέχρι και σήμερα πολλά επιβατικά οχήματα έχουν σαν εξοπλισμό ελεγχόμενα ηλεκτρομαγνητικά αμορτισέρ.

Η σημερινή παγκόσμια παραγωγή αποσβεστήρων ταλαντώσεων ή των λεγόμενων αμορτισέρ είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια, αλλά είναι πιθανώς περίπου 50-100 εκατομμύρια μονάδες ετησίως, με λιανική αξία που υπερβαίνει κατά πολύ το ένα δισεκατομμύριο δολάρια ετησίως. Μια τυπική ευρωπαϊκή χώρα έχει ζήτηση για πάνω από 5 εκατομμύρια μονάδες ετησίως, για νέα αυτοκίνητα και πάνω από 1 εκατομμύριο μονάδες, για αντικατάσταση αμορτισέρ.

Για τον οδηγό και τους επιβάτες, τα αμορτισέρ προσφέρουν άνεση και καλύτερη συμπεριφορά του οχήματος στο δρόμο, ενώ για τους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές είναι μια πρόκληση και ικανοποίηση για την δημιουργία ενός νέου αμορτισέρ, για ένα αγωνιστικό αυτοκίνητο ή ακόμα και για ένα επιβατικό αυτοκίνητο, που θα είναι οικονομικότερο σε τιμή, αλλά και άνετο στην οδήγηση του οχήματος. [1]

1.2 Εισαγωγή

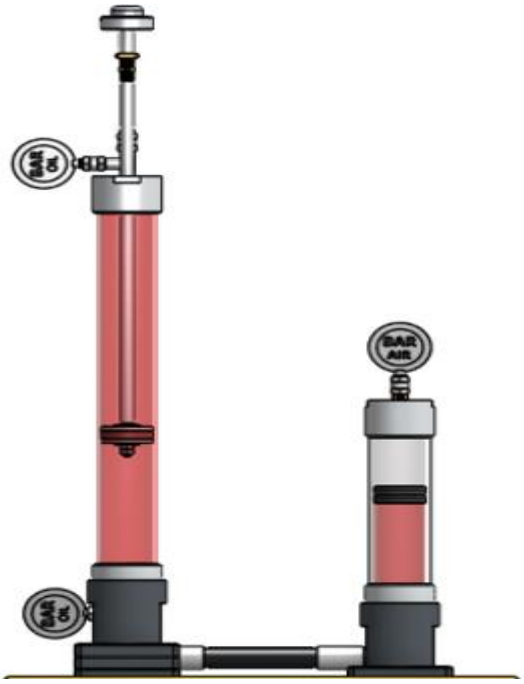
Υπάρχουν πολλοί τύποι αποσβεστήρων ανάρτησης αυτοκινήτων, οι οποίοι συνήθως αναφέρονται ως αμορτισέρ. Αυτή είναι μια εσφαλμένη ονομασία, επειδή ο αποσβεστήρας δεν απορροφά πραγματικά το "χτύπημα". Αυτή είναι η λειτουργία των ελατηρίων ανάρτησης. Όπως είναι γνωστό, ένα σύστημα ελατηρίου / μάζας χωρίς διασπορά ενέργειας παρουσιάζει διαρκή αρμονική κίνηση με το ελατήριο και το δυναμικό εναλλαγής μάζας, καθώς και την κινητική ενέργεια, αντίστοιχα.

Για τους σκοπούς της εργασίας , θα χρησιμοποιείται ο όρος αποσβεστήρας. Η λειτουργία του αποσβεστήρα είναι να αφαιρεί την κινητική ενέργεια από το σύστημα και να την μετατρέπει σε θερμική ενέργεια.

Οι αποσβεστήρες αντιμετωπίζονται συνήθως ως εξαρτώμενοι αποκλειστικά από την ταχύτητα. Ωστόσο, αυτό δεν είναι αλήθεια. Οι περισσότεροι αποσβεστήρες εξαρτώνται σε κάποιο βαθμό επίσης από την θέση και την επιτάχυνση.

Η τριβή Coulumb είναι επίσης παρούσα σε αποσβεστήρες, κυρίως λόγω των τσιμουχών γύρω από τη ράβδο και το έμβολο, οι οποίες εμποδίζουν τη διαρροή λαδιού του αποσβεστήρα. Αυτές οι δυνάμεις κανονικά αντιμετωπίζονται ως σταθερές και δεν εξαρτώνται από τη θέση, την ταχύτητα ή την επιτάχυνση του αποσβεστήρα. Η μείωση των εξαρτήσεων τριβής, θέσης και επιτάχυνσης είναι ένας από τους κύριους στόχους του σχεδιασμού αποσβεστήρα.

Υπάρχουν πολλά είδη αποσβεστήρων: διπλός σωλήνας, μονοσωλήνιο με ή χωρίς δεξαμενή. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, θα εξεταστεί ένας αποσβεστήρας μονοσωλήνιος με δεξαμενή.[3]

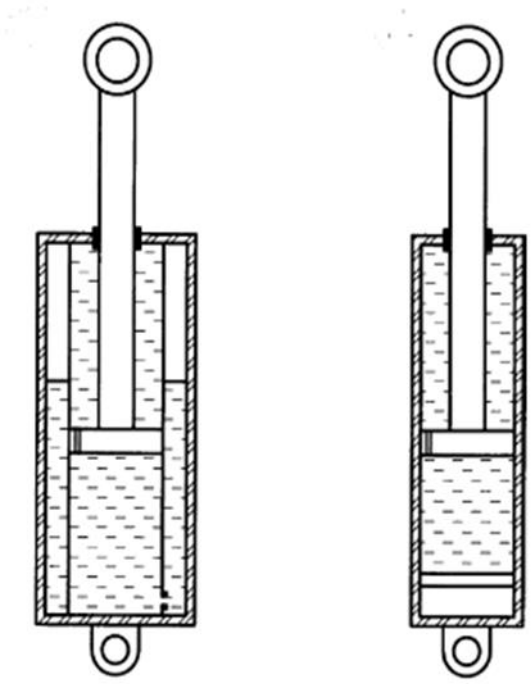


Σχήμα 1.1 Αποσβεστήρας με ρεζερβουάρ

1.3 Είδη Αποσβεστήρων

Παρόλο που έχουν κατασκευαστεί πολλοί διαφορετικοί τύποι αμορτισέρ κατά τη διάρκεια της ιστορίας της αυτοκινητοβιομηχανίας, στην πραγματικότητα δυο είναι τα βασικά είδη αμορτισέρ.

1) Διπλού σωλήνα (twin-tube)
2) Μονοσωλήνα (mono-tube)



Εικόνα 1.2 α)Twin tube β)Monotube

Σε αυτούς τους κύριους τύπους οι αυτοβιομηχανίες έχουν κάνει παραλλαγές και έχουν κατασκευάσει άλλα είδη αμορτισέρ, που χρησιμοποιούνται κυρίως σε επιβατικά οχήματα και σε αγωνιστικά οχήματα. Μερικοί τύποι αμορτισέρ είναι:

Αποσβεστήρας μονού σωλήνα (Monotube shock absorbers)

Ο αποσβεστήρας μονοσωλήνιων σωμάτων χωρίζεται σε δύο θαλάμους: του λαδιού και το αερίου. Το έμβολο και η ράβδος μετακινούνται προς τα κάτω και δημιουργούν μια εξισορρόπηση δύναμης. Στη διαδικασία συμπίεσης, το λάδι μετατοπίζεται από τον ένα θάλαμο στον άλλο. Το αέριο στο θάλαμο (συνήθως το άζωτο) συμπιέζεται και παίρνει ολόκληρο το "χτύπημα" και μόνο τότε αρχίζει να περνάει το λάδι. Η ισχύς εξισορρόπησης καθορίζεται από το σχήμα, το μέγεθος και τον αριθμό των ροδελών στο έμβολο, τη διάμετρο του εμβόλου, και την πίεση του αερίου.

Μέσα στο σωλήνα πίεσης υπάρχουν δύο έμβολα: ένα διαχωριστικό έμβολο και ένα έμβολο εργασίας. Το έμβολο και η ράβδος εργασίας είναι πολύ παρόμοια με το σχεδιασμό του διπλού σωλήνα. Μια άλλη διαφορά που μπορεί να παρατηρηθεί είναι, ότι δεν έχει βαλβίδα βάσης. Αντίθετα, όλος ο έλεγχος κατά τη συμπίεση και την εκτόνωση λαμβάνει χώρα στο έμβολο.

Πλεονεκτήματα:

- Μπορεί να τοποθετηθεί ανάποδα, μειώνοντας το μη αναστρέψιμο βάρος
- Μπορεί να ψυχτεί γρήγορα, καθώς ο σωλήνας εργασίας εκτίθεται στον αέρα
- Πρωτότυπος εξοπλισμός πολλών εισαγωγών και επιδόσεων εγχώριων επιβατικών αυτοκινήτων, SUV και ελαφρών φορτηγών εφαρμογών.

Σχήμα 1.3 Monotube αποσβεστήρας

Αποσβεστήρας Διπλού σωλήνα (Twintube shock absorbers)

Όπως υποδηλώνει το όνομα, τα αμορτισέρ αυτού του τύπου αποτελούνται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους. Ο εσωτερικός κύλινδρος γεμίζει με λάδι και τοποθετείται επίσης το έμβολο μαζί με την ράβδο. Όπως και στους μονοσωλήνιους αποσβεστήρες, η ράβδος με το έμβολο κινείται, πάνω στο οποίο τοποθετούνται οι βαλβίδες, που καθορίζουν τη διαδρομή της εκτόνωσης και της συμπίεσης.

Η πρόσθετη βαλβίδα πυθμένα κατευθύνει το λάδι στον εξωτερικό κύλινδρο (δεξαμενή) κατά τη διαδικασία συμπίεσης, αυξάνοντας την αναλογία απόσβεσης. Κατά την εργασία της εκτόνωσης, το λάδι επιστρέφει στο κύριο θάλαμο δεξαμενής μέσω της βαλβίδας ελέγχου. Ο εξωτερικός κύλινδρος είναι μερικώς γεμάτος με ένα συμπιεζόμενο αέριο, και βοηθά να διασφαλιστεί, ότι το λάδι από τον εξωτερικό κύλινδρο εισέρχεται στον εσωτερικό. Το αμορτισέρ δύο σωλήνων ρυθμίζεται προσθέτοντας ή αφαιρώντας τις ροδέλες.

Πλεονεκτήματα:

- Βελτιώνει το χειρισμό μειώνοντας τον κυματισμό
- Μειώνει τον αερισμό, προσφέροντας ένα μεγαλύτερο εύρος ελέγχου σε μια ευρύτερη ποικιλία οδικών συνθηκών σε σύγκριση με τις μονάδες χωρίς αέριο.

Σχήμα 1.4 Twintube αποσβεστήρας

Μαγνητικοί αποσβεστήρες

Οι μαγνητικοί αποσβεστήρες έχουν βαλβίδες, που είναι υπεύθυνες για την αναλογία απόσβεσης. Η κίνηση των τροχών και του σώματος του αυτοκινήτου ελέγχεται με την αλλαγή του ιξώδους του λαδιού. Σε μαγνητικούς αποσβεστήρες της νέας γενιάς χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρομαγνητικά πηνία, που βρίσκονται στο έμβολο και παράγουν τοπικό μαγνητικό πεδίο.

Το υδραυλικό υγρό μέσα στα αμορτισέρ περιέχει μικροσκοπικά σωματίδια σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία κατανέμονται με τυχαία σειρά, ενώ μέσω του μαγνητικού πηνίου δεν διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα που διέρχεται από το μαγνητικό πηνίο, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο κατανέμει τα σωματίδια. Έτσι ο προσανατολισμός των μαγνητικών σωματιδίων αλλάζει το ιξώδες του υγρού.

Όταν η πίεση εκατέρωθεν του εμβόλου είναι αρκετά ισχυρή, ώστε να καταστρέψει αυτές τις σειρές σωματιδίων, το υγρό ρέει διαμέσου των διόδων, προκαλώντας κίνηση του εμβόλου. Η δύναμη της ευθυγράμμισης των σωματιδίων είναι ανάλογη της αντοχής του μαγνητικού πεδίου, οπότε η αλλαγή ρεύματος των πηνίων οδηγεί σε αλλαγή στις δυνάμεις απόσβεσης.

Σχήμα 1.5 Μαγνητικός αποσβεστήρας

Μονοσωλήνιο αμορτισέρ με ρεζερβουάρ

Τα αμορτισέρ με ρεζερβουάρ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγωνιστικά αυτοκίνητα και σε οχήματα εκτός δρόμου π.χ. σε οχήματα που παίρνουν μέρος στο ράλλυ Dakar.

Αποτελείται από ένα μονοσωλήνιο αμορτισέρ συνδεδεμένο μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα με μία δεξαμενή. Το μονοσωλήνιο αμορτισέρ είναι γεμάτο με λάδι, το οποίο μέσω του εύκαμπτου σωλήνα περνάει στην δεξαμενή, που περιέχει ένα αιωρούμενο πιστόνι και λειτουργεί ξεχωρίζοντας το λάδι από το αέριο.

Το αιωρούμενο πιστόνι, που βρίσκεται στη δεξαμενή (ρεζερβουάρ) διαχωρίζει το λάδι από το αέριο, το οποίο βρίσκεται υπό πίεση.

Ο θάλαμος 1 αποτελείται από πιεσμένο αέριο και διαχωρίζεται από τον θάλαμο 2 με το αιωρούμενο πιστόνι. Ο θάλαμος 2 είναι ο θάλαμος όπου γίνεται η συμπίεση του αμορτισέρ, ενώ στο θάλαμο 3 γίνεται η φάση της εκτόνωσης. Οι δύο θάλαμοι χωρίζονται από το έμβολο της ράβδου του αμορτισέρ και σε αυτό βρίσκονται οπές, ώστε το λάδι να περνάει από τον ένα θάλαμο στον άλλον ανάλογα με την λειτουργία που κάνει το αμορτισέρ. [6]

Σχήμα 1.6 Monotube αποσβεστήρας με ρεζερβουάρ

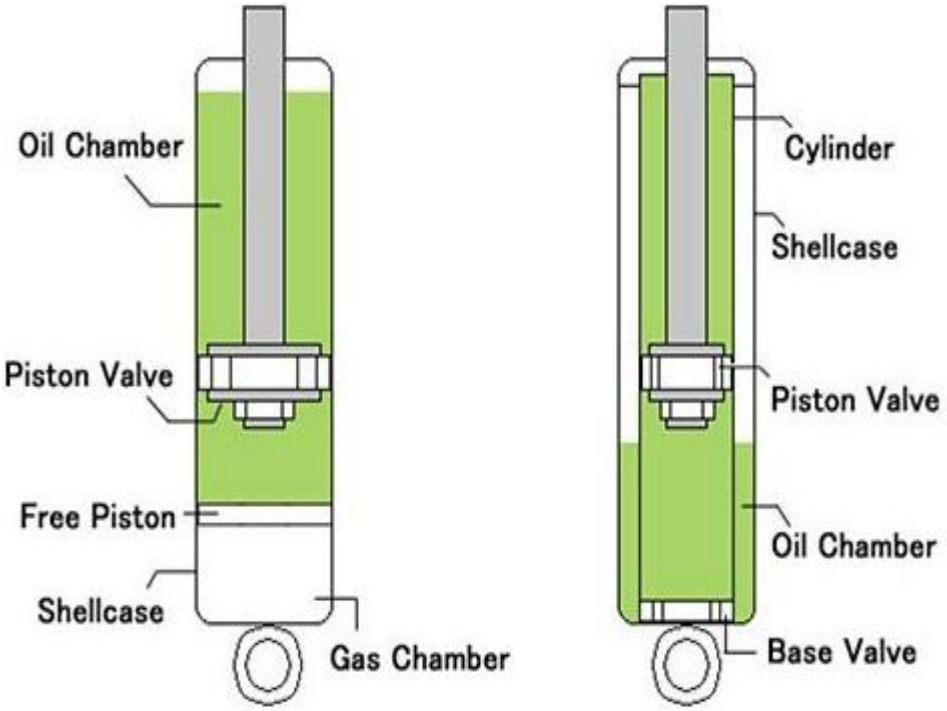
1.4 Σύγκριση Monotube – Twin tube αποσβεστήρα

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός twin-tube αποσβεστήρα είναι:

- Η πίεση αερίου είναι συγκριτικά χαμηλή (2-6 bar).
- Το κόστος κατασκευής είναι χαμηλό.
- Ο twin-tube αποσβεστήρας ανταποκρίνεται καλύτερα στην αλλαγή βάρους και στις συνθήκες του δρόμου.
- Διαθέτει αυξημένο έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης και πέδησης, καθώς και αυξημένο επίπεδο άνεσης.
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε μια μόνο κατεύθυνση.
- Η απορρόφηση θερμότητας είναι χαμηλή.

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία ενός Monotube αποσβεστήρα είναι:

- Το βάρος των μη αναρτώμενων μαζών μειώνεται, όταν το αέριο υπό πίεση καταλαμβάνει μέρος του βάρους του οχήματος.
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.
- Ψύχεται γρηγορότερα, γιατί η θερμότητα διαχέεται απευθείας στην ατμόσφαιρα, εξαιτίας του μονού σωλήνα.
- Ο σωλήνας είναι πολύ μακρύτερος, που περιορίζει τη χρήση του σε επιβατικά αυτοκίνητα.
- Η πίεση που χρησιμοποιείται είναι υψηλή (20-25 bar).
- Κακή απόδοση σε σχέση με το twin-tube αποσβεστήρα.[7]

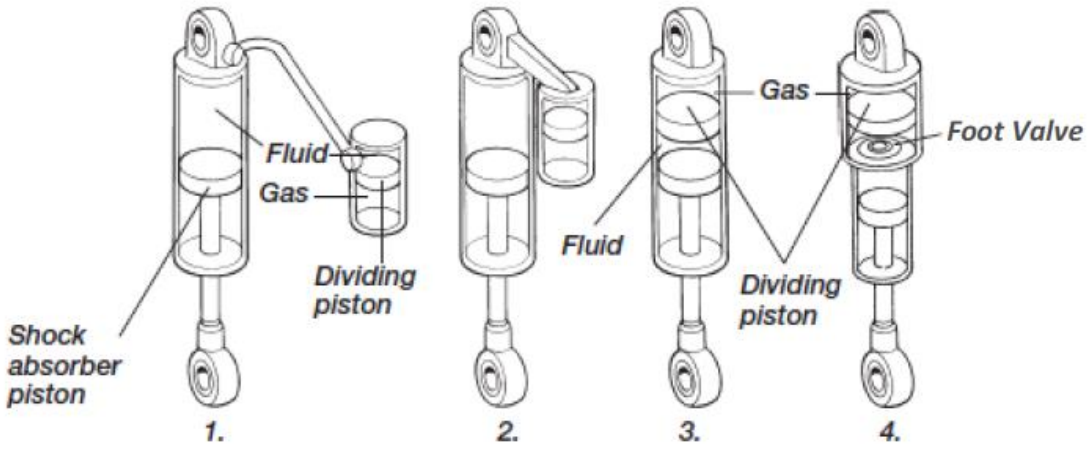


Εικόνα 1.7 Διαφορές Twin-tube με Monotube Αμορτισέρ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^0

2.1 Είδη μονοσωλήνιου αποσβεστήρα

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη μονοσωλήνιων αποσβεστήρων, αλλά όλα λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα διάφορα είδη μονοσωλήνιων αποσβεστήρων.



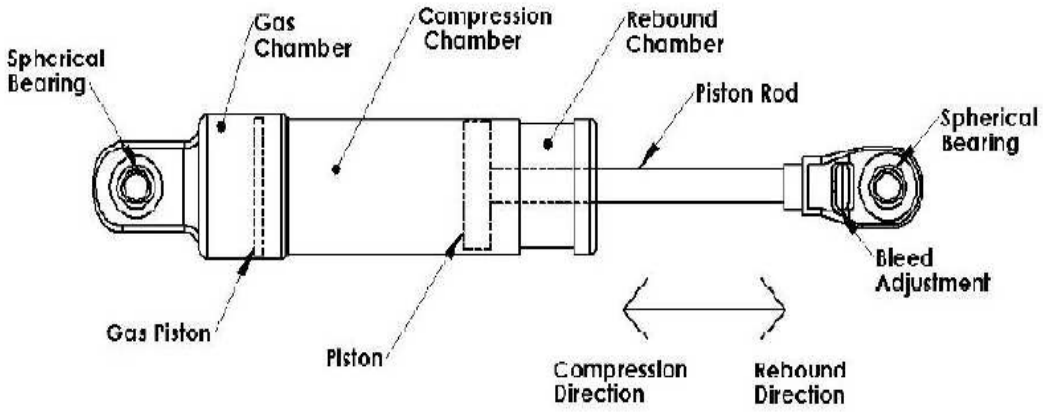
Σχήμα 2.1 Είδη μονοσωλήνιων αποσβεστήρων

Οι δύο πρώτοι αποσβεστήρες έχουν εξωτερικές δεξαμενές, για να φιλοξενήσουν το αιωρούμενο έμβολο αερίου. Ο πρωταρχικός λόγος για αυτό είναι να καταστήσει τον αμορτισέρ πιο συμπαγή. Ο τρίτος αποσβεστήρας έχει το αιωρούμενο έμβολο μέσα στον κύριο σωλήνα και ο τέταρτος αποσβεστήρας ενσωματώνει μια βαλβίδα ¨ποδιού¨ στο θάλαμο εκτόνωσης. Αυτή είναι μια σταθερή βαλβίδα, που ελαχιστοποιεί τις αλλαγές πίεσης στο θάλαμο του αέρα, και αυξάνει την πίεση στους θαλάμους συμπίεσης και εκτόνωσης κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, για την πρόληψη της σπηλαίωσης.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια για όλους τους τύπους μονοσωλήνιου αμορτισέρ.[3]

2.2 Εξαρτήματα μονοσωλήνιου αποσβεστήρα

Οι αποσβεστήρες μονού σωλήνα είναι πολύ συνηθισμένοι στα μηχανοκίνητα αθλήματα. Στο παρακάτω σχήμα 2.2 φαίνονται τα εξαρτήματα ενός μονοσωλήνιου αποσβεστήρα. Το σώμα του αποσβεστήρα συνδέεται με το πλαίσιο του οχήματος και η πλευρά της ράβδου του αποσβεστήρα συνδέεται με τα μέλη ανάρτησης, για να ελαχιστοποιηθεί η μη αναρτώμενη μάζα του οχήματος. Οι θάλαμοι συμπίεσης και εκτόνωσης είναι γεμάτοι με συνθετικό λάδι. Η εκτόνωση ή η συμπίεση του αποσβεστήρα προκαλεί τη ροή του υγρού μέσω βαλβίδων και οπών στο έμβολο και ο θάλαμος του αέρα διαχωρίζεται από το λάδι με ένα αιωρούμενο έμβολο, που πιέζεται κατά κύριο λόγο με άζωτο.



Σχήμα 2.2 Εξαρτήματα Μονοσωλήνιου αποσβεστήρα

Ένας μονοσωλήνιος αποσβεστήρας χωρίζεται σε τρεις θαλάμους πίεσης: αερίου, εκτόνωσης και συμπίεσης. Ο θάλαμος αερίου διαχωρίζεται από το θάλαμο συμπίεσης με ένα αιωρούμενο έμβολο. Αυτό το αιωρούμενο έμβολο διαχωρίζει το αέριο στο θάλαμο αερίου από το ρευστό, συνήθως λάδι, στους θαλάμους συμπίεσης και εκτόνωσης. Το αέριο, που χρησιμοποιείται για τις περισσότερες εφαρμογές αποσβεστήρα, είναι ξηρό άζωτο, επειδή δεν αντιδρά με το λάδι. Είναι σχετικά μη ευαίσθητο στη θερμοκρασία και δεν περιέχει υδρατμούς.

Ο θάλαμος συμπίεσης είναι ο όγκος μεταξύ του αιωρούμενου εμβόλου αερίου και του έμβολου προσαρτημένο στη ράβδο. Ο θάλαμος εκτόνωσης είναι ο όγκος στην πλευρά της ράβδου του εμβόλου. Οι θάλαμοι συμπίεσης και εκτόνωσης είναι πλήρως γεμισμένοι με λάδι, τυπικά λάδι βάρους 5W σχεδιασμένο για αυτή την εφαρμογή.

Το έμβολο συνδέεται με τη ράβδο εμβόλου, που εξέρχεται από το περίβλημα του αποσβεστήρα. Εκεί υπάρχει ένα ο ring, το οποίο συγκρατεί το λάδι και αποτρέπει

επίσης τη ρύπανση από σκόνες, που εισέρχονται στο θάλαμο εκτόνωσης και επηρεάζουν την εσωτερική ροή του λαδιού. Στο έμβολο της ράβδου, που χωρίζει το θάλαμο συμπίεσης και εκτόνωσης υπάρχει επίσης μια τσιμούχα για να συγκρατεί το λάδι να μην περνάει εύκολα από τους δύο θαλάμους.[3]

2.3 Λειτουργία μονοσωλήνιου αποσβεστήρα

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας σε ένα αποσβεστήρα: η συμπίεση και η εκτόνωση. Κάθε τρόπος λειτουργίας θα εξεταστεί μεμονωμένα. Ο τρόπος λειτουργίας της συμπίεσης φαίνεται στο σχήμα 2.3.

Κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης, το υγρό ρέει από το θάλαμο συμπίεσης στο θάλαμο εκτόνωσης. Εφόσον το έλαιο είναι πραγματικά ασυμπίεστο, καθώς η ράβδος εμβόλου εισέρχεται στο θάλαμο εκτόνωσης, το άθροισμα των όγκων του λαδιού και της ράβδου στους θαλάμους εκτόνωσης και συμπίεσης πρέπει να αυξηθεί. Για να γίνει αυτή η αύξηση όγκου, το έμβολο αερίου συμπιέζει το άζωτο στο θάλαμο αερίου για να μειώσει τον όγκο του αερίου κατά μία ποσότητα ίση με τον όγκο της εισαγόμενης ράβδου.

Οι μονοσωλήνιοι αποσβεστήρες έχουν επίσης το πλεονέκτημα ότι συμπιέζουν τον θάλαμο αερίου για να διατηρηθεί μια αυξημένη πίεση στο λάδι, πράγμα που βοηθά στην αποφυγή σπηλαίωσης λαδιού. Η ανάλυση μοντέλου έδειξε μόνο τέσσερις έως δέκα psi αλλαγή της πίεσης του θαλάμου αερίου για μία εκτόνωση της μετατόπισης του εμβόλου, ανάλογα με την αρχική τιμή της πίεσης του αερίου. Αυτή η μικρή αλλαγή πίεσης σημαίνει μια σχεδόν ομοιόμορφη πίεση που ασκείται στο υδραυλικό λάδι στο θάλαμο συμπίεσης. Η πίεση στον θάλαμο αερίου χαρακτηρίζεται ως Pg.

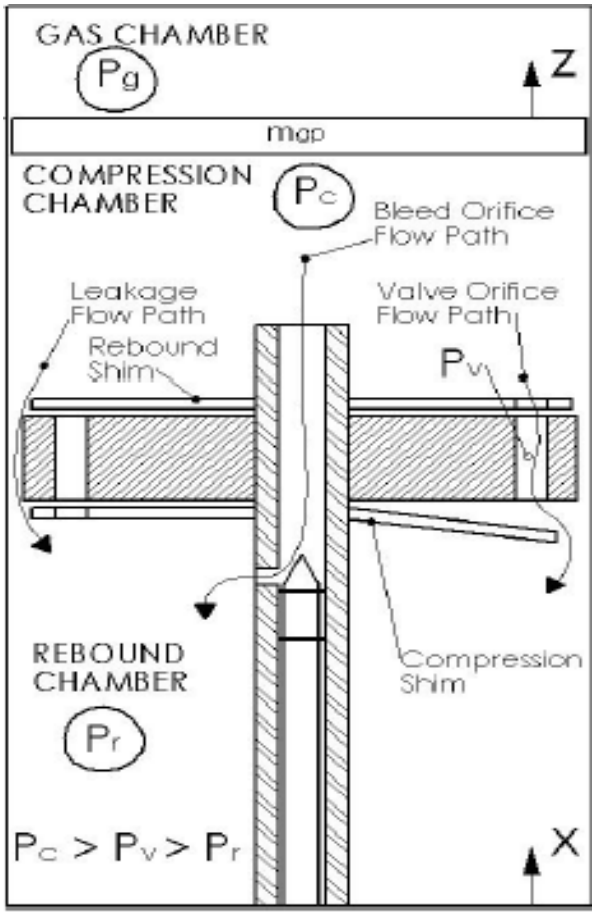
Ένα φαινόμενο ελατηρίου-αερίου υπάρχει επίσης λόγω της πίεσης στον θάλαμο αερίου. Το φαινόμενο του αερίου-ελατηρίου είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα του εμβόλου, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μετατόπιση και από την επιτάχυνση. Η δύναμη του ελατηρίου αερίου αυξάνεται κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης.

Η συνολική ροή κατά τη συμπίεση αποτελείται από τη ροή μέσω των οπών που βρίσκονται στο έμβολο της ράβδου και την διαρροή που υπάρχει ανάμεσα από το έμβολο και το τοίχωμα του αποσβεστήρα. Αυτές οι ροές σχετίζονται με τις διαφορές πίεσης στους θαλάμους πίεσης. Η πίεση στον θάλαμο εκτόνωσης χαρακτηρίζεται ως Pr και η πίεση στον θάλαμο συμπίεσης συμβολίζεται με Pc. Κατά τη συμπίεση το Pc είναι μεγαλύτερο από το Pr. Αυτή η διαφορά πίεσης οδηγεί τη ροή από το θάλαμο συμπίεσης στον θάλαμο εκτόνωσης και παράγει τη δύναμη απόσβεσης.

Το λάδι περνάει μέσω των σταθερών οπών που βρίσκονται στο έμβολο της ράβδου από τον θάλαμο συμπίεσης στο θάλαμο εκτόνωσης. Πάνω στο έμβολο βρίσκονται λεπτοί δίσκοι τύπου ροδέλας για να ρυθμίζουν την ροή του λαδιού από τον ένα θάλαμο στον άλλον. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται η ροή του λαδιού και η δύναμη απόσβεσης του αμορτισέρ.

Η αύξηση της ταχύτητας μειώνει την πίεση στο θάλαμο εκτόνωσης και αυξάνει το ρυθμό ροής. Η ροδέλα συμπίεσης, που βρίσκεται στο θάλαμο εκτόνωσης, περιορίζει την ροή ανάλογα με την ταχύτητα του εμβόλου. Με αύξηση της ταχύτητας, μεγαλώνει το άνοιγμα της ροδέλας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ροή. Pv ορίζεται η πίεση που προκαλεί η ροδέλα.

Η δεύτερη διαδρομή ροής είναι η ροή διαρροής γύρω από το στεγανοποιητικό τοίχωμα του εμβόλου-κυλίνδρου. Η ροή διαρροής είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την προηγούμενη ροή, αλλά είναι δύσκολο να εξαλειφθεί τελείως. Με παρατεταμένη χρήση του αποσβεστήρα η τσιμούχα μπορεί να μικρύνει , να αυξήσει τη ροή διαρροής και να μειώσει τη δύναμη απόσβεσης από τον αποσβεστήρα. Η τσιμούχα του εμβόλου πρέπει να αντικαθίσταται περιοδικά, έτσι ώστε η ροή διαρροής να μην είναι σημαντική.[5]



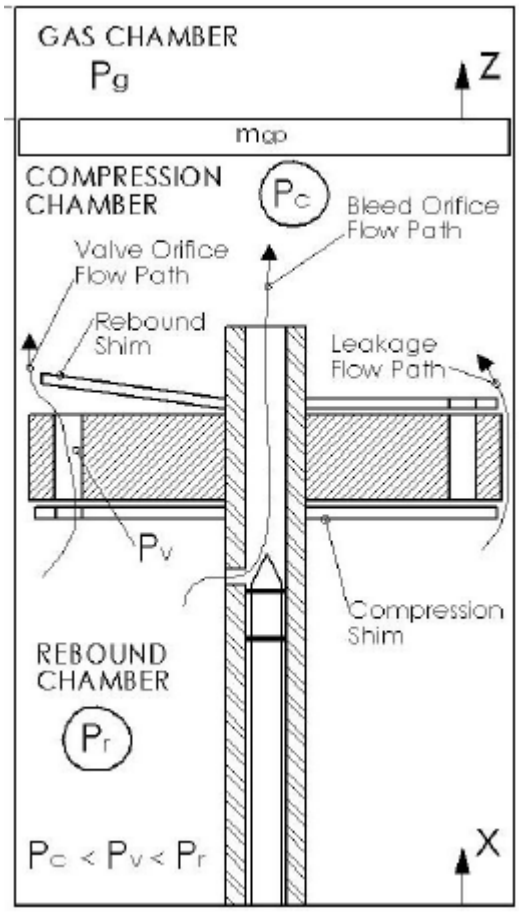
Σχήμα 2.3 Συμπίεση αποσβεστήρα

Η λειτουργία εκτόνωσης φαίνεται στο σχήμα 2.4, κατά την διάρκεια της εκτόνωσης το λάδι ρέει μέσων τον οπών του εμβόλου της ράβδου από τον θάλαμο εκτόνωσης στο θάλαμο συμπίεσης. Η πίεση στο θάλαμο εκτόνωσης αυξάνεται και το αέριο στο θάλαμο του αέρα διογκώνεται εξαιτίας της ράβδου που κινείται προς τα πάνω.

Η ροή μέσω των οπών του εμβόλου είναι ίδια όπως στην συμπίεση το μόνο που αλλάζει είναι η κατεύθυνση. Η ροή λαδιού περνάει μέσα από τις οπές και κινεί την ροδέλα που βρίσκεται στον θάλαμο συμπίεσης. Όπως και στην συμπίεση, η αύξηση της ταχύτητας εκτόνωσης θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο άνοιγμα του ελάσματος και μεγαλύτερη ροή προς τον θάλαμο συμπίεσης.

Όπως και στην συμπίεση έτσι και στην εκτόνωση θα υπάρχει διαρροή ανάμεσα στο τοίχωμα του αποσβέστηρα και στο έμβολο της ράβδου με την διαφορά ότι θα είναι στην αντίθετη κατεύθυνση.

Μετά από την εξέταση της εκτόνωσης και της συμπίεσης, η φυσική λειτουργία του αποσβεστήρα είναι πολύπλοκη. Οι αποσβεστήρες εξαρτώνται από την μετατόπιση της ράβδου , την ταχύτητα και από την επιτάχυνση. Οι εξισώσεις που σχετίζονται με τις πιέσεις, τις παραμορφώσεις, τις ροές κλπ. θα αποτελέσουν τη βάση για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός αποσβεστήρα.[5]



Σχήμα 2.4 Εκτόνωση αποσβεστήρα

2.4 Μοντελοποίηση δύναμης απόσβεσης

Αφού υπολογιστούν οι πιέσεις του θαλάμου, μπορεί να βρεθεί η δύναμη του αποσβεστήρα. Το άθροισμα των δυνάμεων στο εμβόλο της ράβδου παράγει μια σχέση για τη δύναμη απόσβεσης. Το σχήμα 2.5 δείχνει το ελεύθερο διάγραμμα σώματος του εμβόλου.

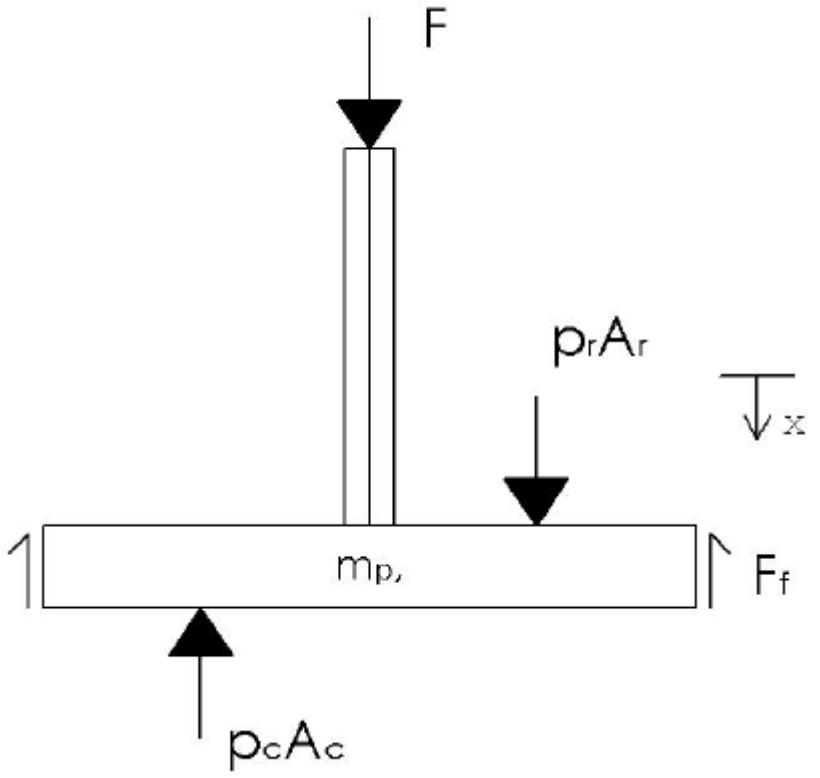
F είναι η δύναμη του άξονα του αποσβεστήρα και F_f είναι η δύναμη τριβής που επενεργεί στο έμβολο. Οι πιέσεις υπολογίζονται από τα μπαρόμετρα που έχουν τοποθετηθεί πάνω στον αποσβεστήρα και η επιτάχυνση υπολογίζεται μέσω αισθητήρα που βρίσκεται στη ράβδο του εμβόλου.

Παράμετροι: η δύναμη τριβής δεν υπολογίζεται και το έμβολο κινείται αργά έτσι ώστε η διαφορά πίεσης (p_c-p_r) να είναι αμελητέα. Η μάζα του εμβόλου και της ράβδου μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί.

Η δύναμη του άξονα αποσβεστήρα είναι τότε το μόνο άγνωστο και μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$F+ p_r \cdot Ar-p_c \cdot Ac-Ff=m_p \cdot a$$

Η δύναμη του αποσβεστήρα που υπολογίζεται χρειάζεται για τα διαγράμματα δύναμης -επιτάχυνσης και δύναμης – μετατόπισης.[2]



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος εμβόλου

2.5 Συνολική ροή λαδιού αποσβεστήρα

Οι εξισώσεις που περιγράφονται εδώ για μοντέλα αντίστασης ροής αφορούν μόνο τη διαδρομή συμπίεσης Για τη διαδρομή εκτόνωσης , οι πιέσεις είναι το αντίθετο και η ροή αντιστρέφεται η γενική λειτουργία είναι η ίδια . Το συγκρότημα του εμβόλου ωθείται στον κύλινδρο και η διαφορά πίεσης προκαλεί ροή από τον θάλαμο συμπίεσης στον θάλαμο εκτόνωσης. Σύμφωνα με τη διατήρηση της μάζας το υγρό που εξέρχεται από το θάλαμο συμπίεσης πρέπει να εισέλθει στο θάλαμο εκτόνωσης.

Ο συνολικός ρυθμός ροής στο έμβολο είναι το άθροισμα δύο διαφορετικών διαδρομών ροής, την ροή από τις οπές του εμβόλου της ράβδου και από την διαρροή ροής ανάμεσα στο τοίχωμα και στο έμβολο.

Η βασική παραδοχή για την άθροιση της ροής είναι ότι το έλαιο απόσβεσης είναι ασυμπίεστο και συνεπώς έχει σταθερή πυκνότητα. Αυτή η υπόθεση επιτρέπει να ληφθούν υπόψη ογκομετρικοί ρυθμοί ροής. Q είναι ο συνολικός ρυθμός ογκομετρικής ροής του αποσβεστήρα σε m^3 / sec. Q_v είναι ο ρυθμός ροής μέσω των βαλβίδων και Q_{lp} είναι ο ρυθμός ροής της διαρροής πέρα από το έμβολο.

$$Q=Q_v+Q_{lp}$$

Μια εξίσωση Bernoulli μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιηθεί μια ασταθής ροή μέσα από ένα πέρασμα της περιοχής A γνωρίζοντας την διαφορά πίεσης Δp= pc-pr.

$$Q=A\cdot C_D\sqrt{\frac{2*\Delta p}{\rho}}$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα και C_D είναι μια συνάρτηση αδιάστατων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένου του αριθμού επιτάχυνσης, του αριθμού Reynolds, του αριθμού Cauchy και του λόγου πάχους προς μήκος.

Ροή από τις οπές του εμβόλου Qv

Η μοντελοποίηση της ροής μέσω των βαλβίδων είναι πιο πολύπλοκη. Η πτώση πίεσης γίνεται όταν το λάδι περνάει από τις οπές και βρίσκει αντίσταση στις ροδέλες που βρίσκονται πάνω στο έμβολο της ράβδου. Επομένως $\Delta p_{valve} = P_c - P_r$.

Ο ρυθμός ροής διαμέσου των ροδελών του εμβόλου είναι:

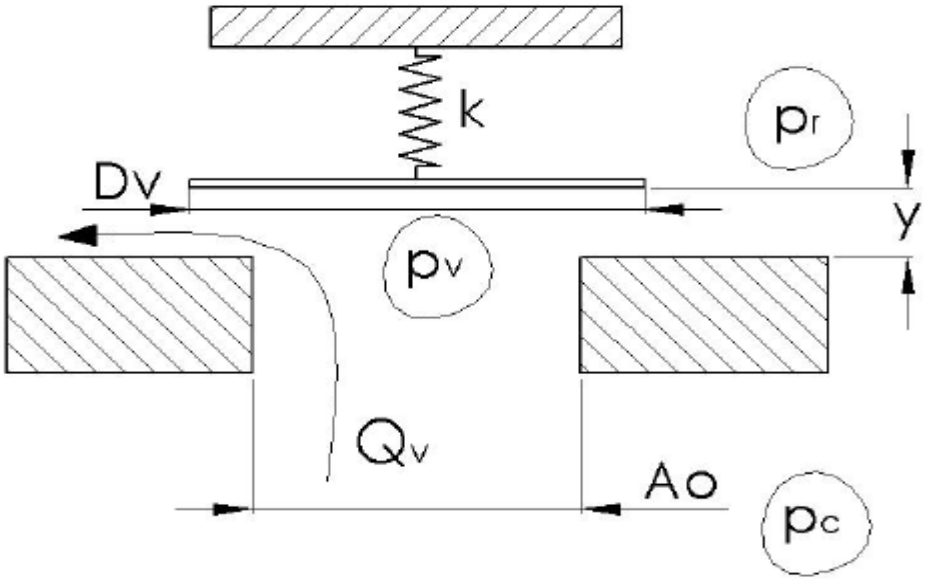
$$Q_v = A_{v\ flow} \cdot C_D \cdot \sqrt{\frac{2*\Delta pvalve}{\rho}} = \alpha \cdot \pi \cdot D_v \cdot y \cdot C_D \cdot \sqrt{\frac{2*\Delta pvalve}{\rho}}$$

Η πολυπλοκότητα εδώ είναι ότι δεν μπορεί να υπολογιστεί το $A_{v\ flow}$ το οποίο εξαρτάται από πόσες ροδέλες βρίσκονται στο έμβολο και το συνολικό ύψος της παραμόρφωσης των ροδελών.

$$A_{v\ flow} = \alpha \cdot \pi \cdot D_v \cdot y$$

Όπου D_v είναι η διάμετρος της μεγαλύτερης ροδέλας του εμβόλου. Ο όρος α είναι ο συντελεστής διόρθωσης ροής περιοχής. Ο Talbott χρησιμοποίησε μια τιμή 0,5 στο μοντέλο του για έναν αποσβεστήρα με τρεις οπές συμπίεσης και τρεις οπές επαναφοράς. Ο συντελεστής διόρθωσης ροής περιοχής ρυθμίζεται ανάλογα με τον αριθμό των οπών που χρησιμοποιούνται.

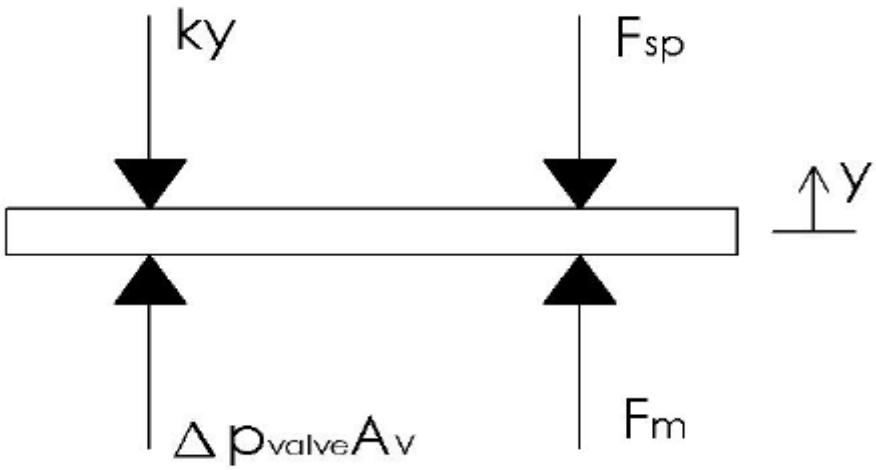
Ο όρος y είναι η παραμόρφωση των ροδελών και είναι άγνωστη στο σύστημα εξισώσεων. Μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σύστημα εξισώσεων στην βαλβίδα. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται ένα απλοποιημένο μοντέλο βαλβίδας κατά την συμπίεση.



Σχήμα 2.6 Απλοποιημένο μοντέλο βαλβίδας κατά την συμπίεση

Όπου κ είναι η δυσκαμψία της ροδέλας.

Στην ουσία, η απεικόνιση του μοντέλου στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζει τη ροδέλα ως γραμμικό ελατήριο για να υπολογίσει την παραμόρφωσή της , και τη σχέση μεταξύ παραμόρφωση και δύναμης, ky. Μια ισορροπία δύναμης στη βαλβίδα συνδέει τις δυνάμεις, αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος της βαλβίδας

Το άθροισμα των δυνάμεων στην κατεύθυνση y δίνει την εξίσωση:

$$k\,y = \Delta p_{valve} \cdot A_v + F_m - F_{sp}$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι A_v είναι η περιοχή στην οποία λειτουργεί η πίεση της βαλβίδας. Αυτό δεν είναι το ίδιο με το Avflow που χρησιμοποιήθηκε πιο πάνω και Fsp είναι η δύναμη ελατηρίου προ έντασης.

Η δύναμη ορμής, Fm, προέρχεται από τη διατήρηση της ορμής μέσω της βαλβίδας. Η εξίσωση της ορμής στην κατεύθυνση y είναι:

$$F_m = \rho \cdot v_{y\,in} \cdot Q_{in} - \rho \cdot Q \cdot v_{y\,out} \cdot Q_{out}$$

Η ταχύτητα που βγαίνει από τη βαλβίδα κατά την κατεύθυνση y υποτίθεται ότι είναι μηδέν, και η ταχύτητα σε σχέση με τη ροή διαιρείται με την περιοχή.

Άρα ισχύει ότι $Fm = \rho \cdot \frac{Qv^2}{Ao}$

Ο Lang κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η έξοδος της ταχύτητας θα έχει ένα στοιχείο στην κατεύθυνση y. Ένας παράγοντας διόρθωσης βρέθηκε πειραματικά με βάση την πραγματική έναντι της προβλεπόμενης δύναμης ορμής. Ο συντελεστής δυνάμεως ορμής, C_f, βρέθηκε να έχει τιμή 0.3.

Επομένως η τελική σχέση του αθροίσματος των δυνάμεων παίρνει την μορφή:

$$ky = \Delta p_{valve} \cdot A_v + \rho \cdot \frac{Qv^2}{Ao} \cdot C_f - Fsp$$

Ο όρος Fsp ισούνται με το μηδέν επειδή το έμβολο που χρησιμοποιείται είναι επίπεδο και δεν υπάρχει προένταση της ροδέλας του εμβόλου.

Ροή από την διαρροή του εμβόλου με τα τοιχώματα του αποσβεστήρα

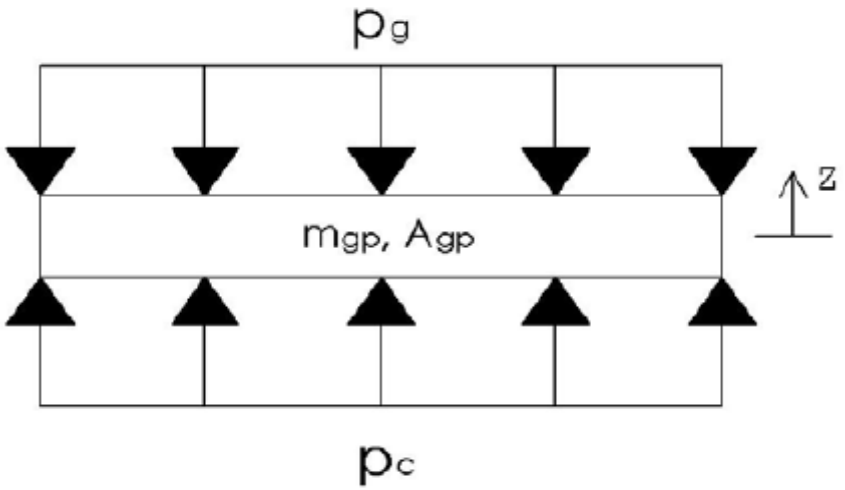
Η δεύτερη ροή του αποσβεστήρα είναι η διαρροή λαδιού μεταξύ της τσιμούχας του εμβόλου και του τοιχώματος του αποσβεστήρα . Ο Lang σχεδίασε αυτή τη ροή χρησιμοποιώντας στρωτή ροή μέσω παράλληλων πλακών. Αυτή η παραδοχή είναι έγκυρη επειδή η στεγανοποίηση μεταξύ του εμβόλου και του τοιχώματος είναι πολύ μικρή (<.004 ") σε σύγκριση με το μήκος της ροής. Η εξίσωση για αυτή τη ροή διαρροής προέρχεται από τις εξισώσεις Navier-Stokes.

$$Q_{lp} = [\frac{(Pc-\mathrm{Pr})*\mathrm{b}^3}{12*\mu*\mathrm{l}} + x * \frac{\mathrm{b}}{2}] \cdot \pi \cdot D_p$$

όπου το ύψος του εμβόλου είναι b, ενώ το Dp αν η διάμετρος του εμβόλου και το μήκος της ροής είναι το ύψος του εμβόλου.

Μοντελοποίηση στο θάλαμο αερίου

Σε έναν αποσβεστήρα μονού σωλήνα, ο θάλαμος αερίου καταγράφει την αύξηση του όγκου που προκαλείται από την εισαγωγή της ράβδου εμβόλου. Ο Talbott υποθέτει ότι το λάδι του αποσβεστήρα είναι μη συμπιεσμένο, πράγμα που καθιστά την πίεση αερίου συνάρτηση της μετατόπισης του εμβόλου. Το σχήμα 2.8 δείχνει τις δυνάμεις που δρουν στο έμβολο του αερίου.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ελεύθερου σώματος εμβόλου αέρα

Η πίεση στον θάλαμο αερίου προσδιορίζεται με την εφαρμογή του ιδανικού αερίου στο θάλαμο.

$$\frac{Pi*Vi}{Ti} = \frac{Pf*Vf}{Tf}$$

Μπορεί να υποτεθεί ότι η αρχική θερμοκρασία και η τελική θερμοκρασία είναι οι ίδιες. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο αποσβεστήρας λειτουργεί έως ότου επιτευχθεί η θερμοκρασία λειτουργίας. Η θερμοκρασία διαφέρει ελάχιστα κατά τη διάρκεια σύντομων περιόδων δοκιμών. Επομένως η παραπάνω σχέση παίρνει την εξής μορφή:

$$P_f = P_i \cdot \frac{Vi}{Vf}$$

Υποθέτοντας ότι το λάδι είναι ασυμπίεστο, μια σχέση για τον τελικό όγκο του αερίου στο θάλαμο είναι:

$$V_f = Vi + \Delta V$$

Ο θάλαμος αερίου διαμορφώνεται ως κύλινδρος και ο όγκος του αερίου εξαρτάται από την επιφάνεια του εμβόλου (A_{gp}) και το μήκος του θαλάμου (L_g). Η αλλαγή του όγκου είναι αρνητική για την συμπίεση και θετική για την εκτόνωση.

$$V_i = A_{gp} \cdot L_g$$

$$\Delta V = -A_{rod} \cdot x = -(A_c - A_r) \cdot x$$

Οπότε η εξίσωση του τελικού όγκου είναι:

$$V_f = A_{gp} \cdot L_g - A_{rod} \cdot x$$

Υποθέτοντας ότι P_{gi} είναι η αρχική πίεση αερίου και P_g είναι η πίεση του αερίου ανά πάσα στιγμή, τότε η πίεση στο θάλαμο είναι:

$$Pg = Pgi \cdot \frac{Agp*Lg}{Agp*Lg - Arod*x}$$

Χρησιμοποιώντας τώρα την ισορροπία δυνάμεων στο έμβολο αερίου από το σχήμα 2.8 μπορεί να βρεθεί πίεση θαλάμου συμπίεσης. Η τριβή του αερίου εμβόλου παραμελείται. Χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η άθροιση των δυνάμεων είναι :

$$(P_c - P_g) \cdot A_{gp} = m_{gp} \cdot \alpha$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις η πίεση στο θάλαμο συμπίεσης είναι:

$$P_c = \frac{Arod*mgp}{Agp^2} * \alpha + Pgi \cdot \frac{Agp*Lg}{Agp*Lg - Arod*x}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η πίεση του θαλάμου συμπίεσης είναι συνάρτηση της επιτάχυνση του εμβόλου, της πίεσης αερίου και μετατόπισης και ότι το P_c είναι σχεδόν ίσο με το P_g.

Ο Talbott δηλώνει ότι όλες οι εξαρτώμενες από την ταχύτητα δυνάμεις που παράγονται από το αμορτισέρ προέρχονται από διακυμάνσεις της πίεσης στον θάλαμο εκτόνωσης.[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^0

3.1 Κατασκευή ταπών αποσβεστήρα

Οι τάπες του αποσβεστήρα είναι τέσσερις: δυο βιδώνουν στο κύριο σωλήνα του αποσβεστήρα και οι άλλες δύο στο ρεζερβουάρ. Οι τάπες είναι από αλουμίνιο 4045 και έχουν κατασκευαστεί σε cnc τόρνο.

Άνω τάπα κύριου σωλήνα

Η άνω τάπα του κύριου σωλήνα κατασκευάστηκε σε cnc. Αρχικά το αλουμίνιο είχε διάμετρο εξωτερική 70 mm και με ξεχόνδρισμα έφτασε στα 63 mm με πάσο 1 mm , οι στροφές του τόρνου 1700 στροφές ανά λεπτό και πρόωση 1000 mm/min.

Στη συνέχεια ανοίχτηκε τρύπα από το κέντρο της τάπας με σκοπό να δημιουργηθεί το σπείρωμα. Αρχικά το κοπτικό εργαλείο τοποθετήθηκε στο κέντρο μέχρι να φτάσει στο τοίχωμα της τάπας. Η κατεργασία έγινε στις 1600 στροφές ανά λεπτό και πρόωση 1000 mm/min.

Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι ραβδοειδές πλακίδιο διαμέτρου 0,8 mm.

Το σπείρωμα της τάπας όπου βιδώνει ο κύριο σωλήνας είναι 2 ίντσες , το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι πλακίδιο σπειρώματος 0,4 mm στις 380 στροφές ανά λεπτό και με πρόωση 100 mm/min.

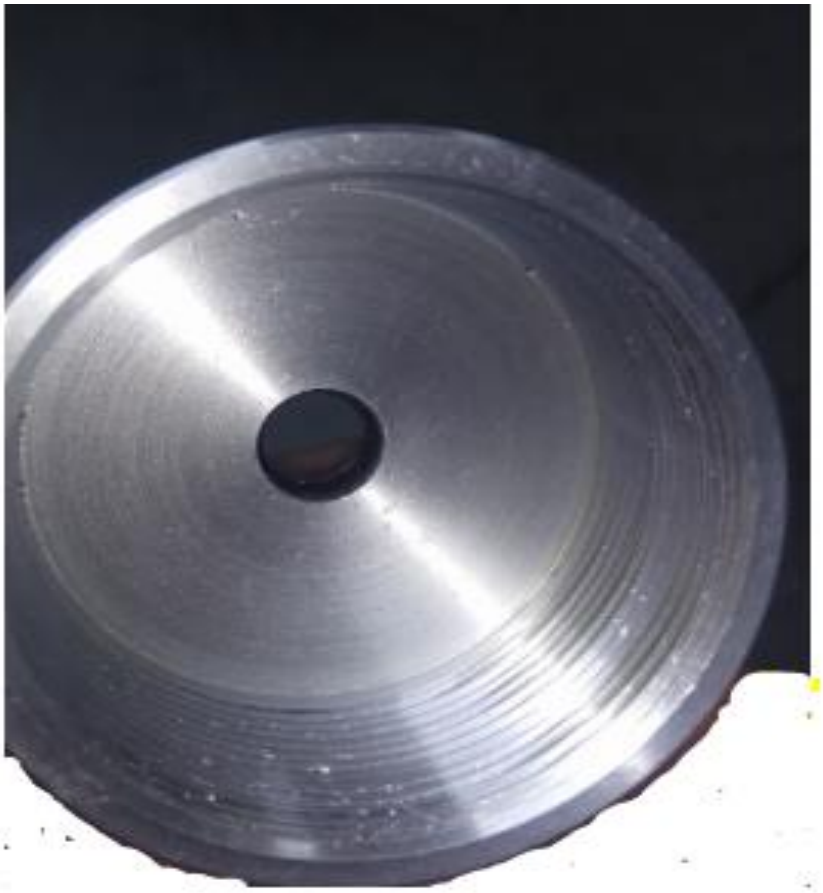
Στο πάνω μέρος της τάπας ανοίχτηκε μια οπή 12 mm για να περνάει η ράβδος του αποσβεστήρα και δίπλα άλλη μια οπή με σπείρωμα ¼ της ίντσας όπου τοποθετείται ένας σύνδεσμος τύπου ταφ από ορείχαλκο στο οποίο από την μια μεριά συνδέεται το όργανο για να μετράει την πίεση κατά την εκτόνωση και από την άλλη βρίσκεται η τάπα πλήρωσης του αποσβεστήρα με λάδι.

Σχήμα 3.1 Άνω τάπα κύριου σωλήνα αποσβεστήρα

Κάτω τάπα κύριου σωλήνα και ρεζερβουάρ

Η κατεργασία της κάτω τάπας του κύριου σωλήνα του αμορτισέρ και του ρεζερβουάρ έγινε όπως περιγράφεται πιο πάνω για την άνω τάπα του κύριου σωλήνα.

Με την διαφορά ότι υπάρχει μια οπή στο κέντρο της τάπας με ¼ της ίντσας σπείρωμα για να βιδώνει ένας ορείχαλκος σύνδεσμος τύπου ταφ , όπου από την μια μεριά συνδέεται το όργανο για να μετράει την πίεση κατά την φάση της εκτόνωσης και από την άλλη ο σωλήνας υψηλής πίεσης που συνδέεται με την τάπα του ρεζερβουάρ.



Σχήμα 3.2 Κάτω τάπα κύριου σωλήνα

Άνω τάπα ρεζερβουάρ αποσβεστήρα

Όπως και στις προηγούμενες τάπες έτσι και εδώ η κατεργασία είναι ίδια, στο πάνω μέρος της τάπας υπάρχουν 2 οπές. Στην μια οπή διαμέτρου 15 mm βρίσκεται η βαλβίδα του αέρα όπου διοχετεύεται το ρεζερβουάρ με άζωτο ή αέρα, ενώ στην άλλη οπή τοποθετείται το όργανο που μετράει την πίεση του αερίου.

Σχήμα 3.3 Άνω τάπα ρεζερβουάρ αποσβεστήρα

3.2 Κατασκευή κύριου σωλήνα και ρεζερβουάρ αποσβεστήρα

Ο κύριος σωλήνας καθώς και το ρεζερβουάρ του αποσβεστήρα είναι κατασκευασμένα από υλικό Plexiglas. Η επιλογή του υλικού έγινε με σκοπό να είναι φανερά τα κινούμενα μέρη του αποσβεστήρα.

Οι κύριος σωλήνας έχει ύψος 500 mm και διάμετρο 60 mm εξωτερική και 50 mm εσωτερική. Ο σωλήνας του ρεζερβουάρ έχει ύψος 250 mm με διάμετρο 60 mm εξωτερική και 50 mm εσωτερική.

Η κατασκευή των δυο σωλήνων έγινε σε συμβατικό τόρνο με ραβδοειδές πλακίδιο 0.4 mm από 60 mm διάμετρο σε 58,5 mm με σπείρωμα 2 ίντσες για να βιδώνουν οι αλουμινένιες τάπες, οι στροφές του συμβατικού τόρνου είναι 250 στροφές ανά λεπτό με πρόωση 35 mm/min.

Στο τέλος του σπειρώματος και των δύο σωλήνων έγινε λοξότμηση (chamfer) για να τοποθετηθούν κατάλληλα ο ring με σκοπό την στεγανότητα ανάμεσα στους σωλήνες και στις τάπες.

Σχήμα 3.4 Κύριος σωλήνας και ρεζερβουάρ αποσβεστήρα

3.3 Κατασκευή ράβδου αποσβεστήρα

Η ράβδος του αποσβεστήρα είναι από inox 304 με διάμετρο 12 mm και με ύψος 500 mm. Τα άκρα της ράβδου επεξεργάστηκαν σε συμβατικό τόρνο και η διάμετρος της από 12 mm κατέβηκε στα 8 mm με σπείρωμα M8 με ραβδοειδές πλακίδιο 0,4 διάμετρο. Ο συμβατικός τόρνος λειτουργούσε σε 320 στροφές ανά λεπτό με πρόωση 60 mm/min.

Σκοπός των σπειρωμάτων στα άκρα της ράβδου είναι ότι από την μια μεριά περνάει το έμβολο το οποίο χωρίζει το θάλαμο συμπίεσης με το θάλαμο εκτόνωσης και από την άλλη μεριά βιδώνει η βάση του αισθητήρα βάρους για να μετακινείται η ράβδος πάνω-κάτω.

Σχήμα 3.5 Ράβδος αποσβεστήρα

3.4 Κατασκευή εμβόλου της ράβδου και εμβόλου ρεζερβουάρ

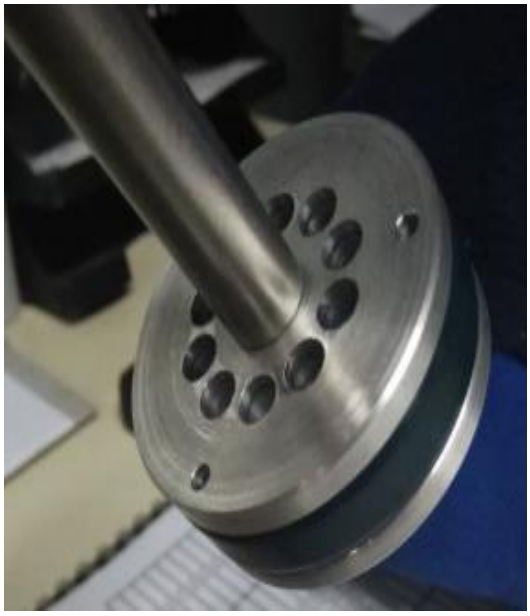
Έμβολο της ράβδου

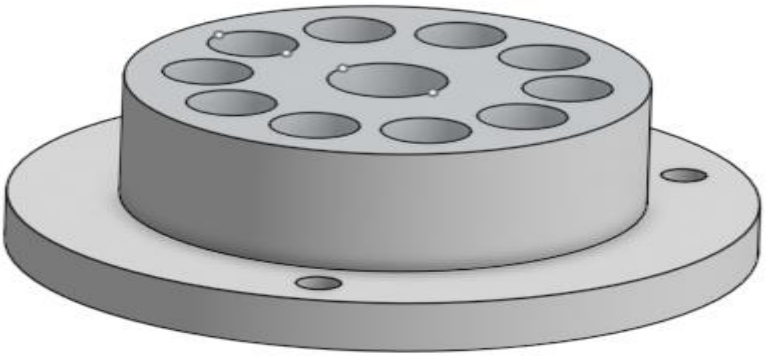
Το έμβολο της ράβδου είναι από αλουμίνιο 4045 και είναι αυτό που χωρίζει το θάλαμο συμπίεσης με τον θάλαμο εκτόνωσης, χωρίζεται σε δυο μέρη με σκοπό να περάσει η τσιμούχα του εμβόλου.

Το άνω μέρος έχει διάμετρο 50 mm και στο κάτω μέρος έχει διάμετρο 35 mm για να θυληκώνει η τσιμούχα. Επιπλεόν στο κέντρο του εμβόλου υπάρχει μια οπή 8 mm για να περνάει η ράβδος του αποσβεστήρα και γύρω από αύτην βρίσκονται 10 οπές των 6 mm ώστε να περνάει το λάδι από τον ένα θάλαμο στον άλλον.

Το κάτω μέρος έχει και αύτο 10 οπές που συνδέονται με το πάνω μέρος. Το κάτω μέρος και το πάνω σύνδέονται πάνω στην ράβδο βιδώνοντας ένα παξιμάδι. Ανάμεσα τους υπάρχει μια τσιμούχα νιτριλίου με διάμετρο 50 mm εξωτερικη και 35 mm εσωτερική.

Η κατασκευή του έγινε σε τόρνο cnc, αρχικά εγινε ξεχόνδρισμα για να πάρει εξωτερική διάμετρο 50 mm με 1500 στροφές το λεπτό και πρόωση 1000 mm/min και στη συνέχεια 35 mm για να περναει η τσιμούχα του εμβόλου. Οι τρύπες έγιναν με τρυπάνι 6 και 8 mm.





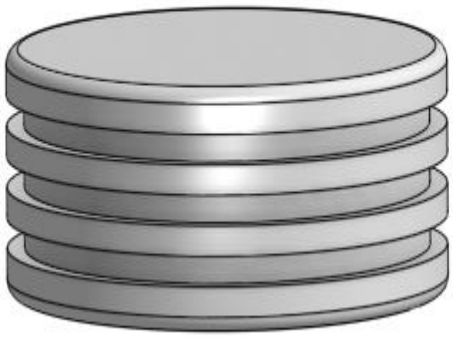
Σχήμα 3.6 Έμβολο της ράβδου

Έμβολο Ρεζερβουάρ

Το έμβολο του ρεζερβουάρ είναι αυτό που χωρίζει το αέριο από το λάδι στο ρεζερβουάρ. Έχει τρία αυλάκια στα οποία τοποθετούνται ο ring για στεγανότητα καθώς ο αέρας δεν πρέπει να αναμιγνύεται με το λάδι.

Το έμβολο έχει 50 mm διάμετρο και τα αυλάκια είναι 2.5 mm πιο μέσα από την αρχική διάμετρο. Είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο 4045 σε cnc, η κατεργασία έγινε με ραβδοειδές πλακίδιο 0,8 mm στις 1500 στροφές το λεπτό με 1000 mm/min πρόωση.

Τα ο ring που χρησιμοποιήθηκαν για την στεγανότητα είναι νιτριλίου με διάσταση 45 mm εσωτερική και 50 mm εξωτερική.



Σχήμα 3.7 Έμβολο του ρεζερβουάρ

3.5 Κατασκευή βάσεων αποσβεστήρα

Οι βάσεις είναι που κρατάνε τον αποσβεστήρα σταθερό για να μπορούν να γίνουν οι μετρήσεις, είναι κατασκευασμένες από χάλυβα (steel 37). Αρχικά το κάτω μέρος των βάσεων σχεδιάστηκε σε DXF αρχείο για να κοπεί σε παντογράφο με πλάσμα, το πάχος είναι 25 mm επίσης ανοίχτηκαν οπές διαμέτρου 8 mm για να μπορούν οι βάσεις να βιδώσουν σε μια ξύλινη βάση.

Στη συνέχεια κόπηκε ένας σωλήνας πάχους 65 mm από χάλυβα και σε φρέζα με κεφαλή 20 mm στις 1500 στροφές ανά λεπτό και 1000 mm/min με μισό χιλιοστό πάσο. Ανοίχτηκαν τρύπες πλάγια του σωλήνα με σκοπό να περνάει το μαρκούτσι από τον κύριο σωλήνα στο ρεζερβουάρ.

Έπειτα ο σωλήνας με το κάτω μέρος της βάσης κολλήθηκαν με ηλεκτροσυγκόλληση στη συνέχεια έγινε αμμοβολή και μετά βαφή με πολυουρεθάνη σε μαύρο χρώμα.

Σχήμα 3.8 Βάσεις αποσβεστήρα

3.6 Κατασκευή βάσεων αισθητήρων επιτάχυνσης και βάρους

Η βάση του αισθητήρα επιτάχυνσης κατασκευάστηκε σε τριαξονική φρέζα και έχει διαστάσεις 50X20X11 mm με μια οπή στην άκρη 8 mm για να τοποθετείται πάνω στην ράβδο του αποσβεστήρα ώστε να μετράει την επιτάχυνσή της. Το υλικό κατασκευής είναι από αλουμίνιο 5052. Η κατεργασία έγινε αρχικά με κονδύλι καρβιδίου διαμέτρου 6 χιλιοστά με πρόωση 2000 mm/min και 4000 στροφές ανά λεπτό με πάσο 1 mm και στην συνέχεια έγινε φινίρισμα με κονδύλι καρβιδίου διαμέτρου 2.5 mm στις 4000 στροφές ανά λεπτό με πρόωση 1200 mm/min με πάσο 0,2 mm. Στη συνέχεια η τρύπα έγινε με τρυπάνι M8.

Επίσης σε 3d printer (crio criality) κατασκευάστηκε η βάση της οθόνης που δείχνει την επιτάχυνση και το βάρος καθώς και μία βάση μπαταρίας για να λειτουργήσει το ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι διαστάσεις για την θήκη μπαταρίας είναι 55X20X30 mm και για την οθόνη 100X50X30 mm ,το υλικό κατασκευής είναι από PLA στο χρώμα του ξύλου.

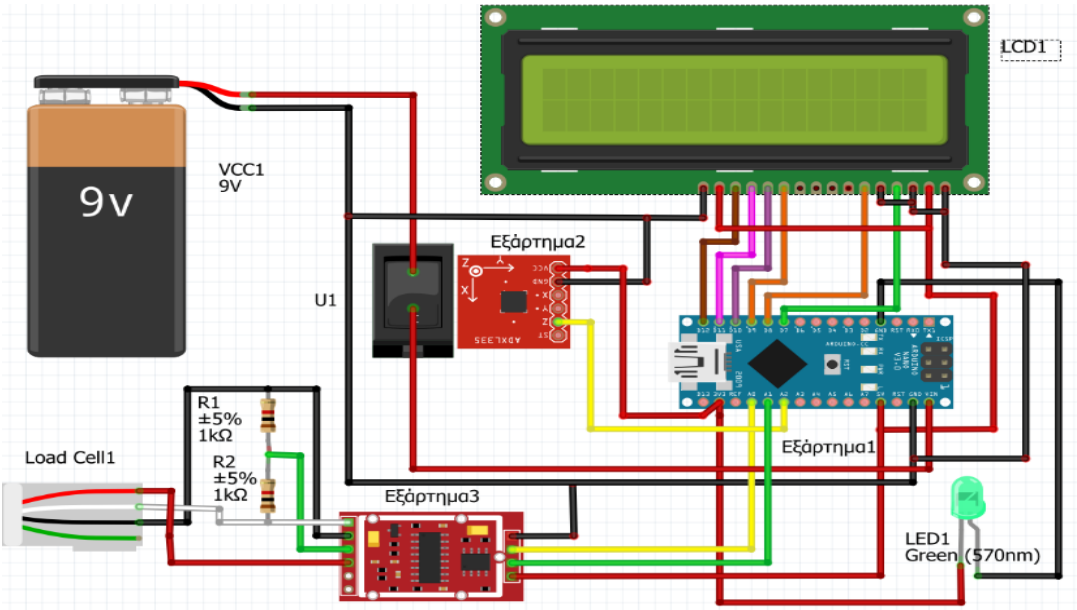
Η συνθήκες κατεργασίας για την κατασκευή των τριών αυτών κομματιών είναι: θερμοκρασία τραπεζιού 50 ^{o}C, θερμοκρασία μπέκ 195 ^{o}C, ταχύτητα εκτύπωσης 50 mm/min και πάχος γραμμής εκτύπωσης 0,2 mm. Στο τέλος έγινε καθαρισμός με γυαλόχαρτο.

Η βάση του αισθητήρα βάρους είναι από αλουμίνιο 4045 και βιδώνει με σπείρωμα M8 πάνω στη ράβδο του αποσβεστήρα με σκοπό να μετράει την δύναμη όταν το αμορτισέρ συμπιέζεται και εκτονώνεται.

Η κατασκευή της βάσης έγινε σε τόρνο cnc, αρχικά έγινε ξεχόνδρισμα με ραβδοειδές πλακίδιο 0.4 mm σε 1500 στροφές ανά λεπτό με 1000 mm/min πρόωση από 65 mm διάμετρο στα 60 mm τελική διάμετρο. Στην συνέχεια έγινε ξεχόνδρισμα πιο κάτω στα 20 mm για να βιδώσει στη ράβδο του αποσβεστήρα.

Σχήμα 3.9 Βάση αισθητήρα βάρους, θήκη μπαταρίας και βάση αισθητήρα επιτάχυνσης

3.7 Συνδεσμολογία ηλεκτρικού κυκλώματος



Σχήμα 3.10 Ηλεκτρικό κύκλωμα αισθητήρων

Η συνδεσμολογία δείχνει τις μετρήσεις από τον αισθητήρα επιτάχυνσης (Εξάρτημα 2) και βάρους (load cell 1) στην οθόνη(LCD1). Η τάση του κυκλώματος τροφοδοτείται από μια μπαταρία 9 Volt και ενεργοποιείται μέσω ενός διακόπτη (U1) για να τεθεί σε λειτουργία. Επιπλέον υπάρχει ένα λαμπάκι που όταν είναι αναμμένο δηλώνει ότι το κύκλωμα είναι σε λειτουργία(LED 1).

Για να λειτουργήσει ο αισθητήρας βάρους χρειάζεται να συνδεθούν 2 αντιστάσεις των 1 ΚΩ και μέσω ενός ενισχυτή σήματος (εξάρτημα 3) στέλνει τα αποτελέσματα στην πλακέτα Arduino Nano (εξάρτημα 1) που τα επεξεργάζεται και τα στέλνει στην οθόνη. Ο αισθητήρας επιτάχυνσης λειτουργεί με 3.3 Volt ενώ ο αισθητήρας βάρους με 5 Volt, αυτή η μετατροπή τάσης γίνεται από την πλακέτα Arduino Nano.

Το κόκκινο καλώδιο είναι το ρεύμα του κυκλώματος που τροφοδοτεί τους αισθητήρες και την οθόνη για να λειτουργήσουν, το μαύρο καλώδιο είναι η γείωση των εξαρτημάτων , τα κίτρινα καλώδια στέλνουν τα σήματα από τους αισθητήρες στην πλακέτα και η πλακέτα τα στέλνει στην οθόνη από τους ακροδέκτες D7 έως D12.

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης δίνει μετρήσει προς τον άξονα Z όπως δείχνει το σχήμα του σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η ράβδος του αποσβεστήρα. Το σήμα του αισθητήρα βάρους εισέρχεται στον ενισχυτή μέσω του άσπρου καλωδίου, το πράσινο καλώδιο είναι η τιμή από τις αντιστάσεις, ο ενισχυτής βρίσκει την διαφορά και την στέλνει στην πλακέτα μέσω του κίτρινου καλωδίου ενώ το πράσινο καλώδιο είναι ο ρυθμός που διαβάζει η πλακέτα το σήμα.

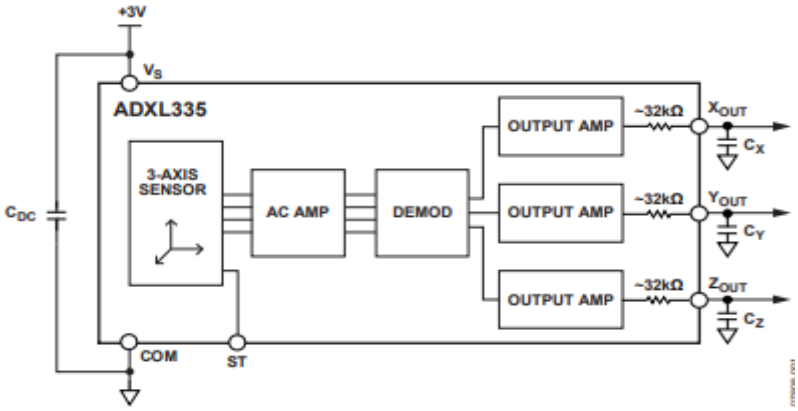
3.8 Καλυμπράρισμα αισθητήρων βάρους και επιτάχυνσης

Αισθητήρας επιτάχυνσης

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης είναι συνδεδεμένος στο πάνω άκρο της ράβδου και μετράει την επιτάχυνση της ράβδου κατά την κίνηση της. Ο αισθητήρας επιτάχυνσης έχει εύρος μέτρησης ± 3 g ελάχιστο, περιέχει έναν αισθητήρα επιφανειακής μικροσκοπικής επιφάνειας πολυπυριτίου και το κύκλωμα ρύθμισης σήματος για την υλοποίηση ενός ανοιχτού βρόχου επιτάχυνσης. Τα σήματα εξόδου έχουν αναλογικές τάσεις που είναι ανάλογες με την επιτάχυνση. Το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να μετρήσει τη στατική επιτάχυνση της βαρύτητας σε εφαρμογές ανίχνευσης κλίσης καθώς και δυναμική επιτάχυνση που οφείλεται σε κίνηση.

Ο αισθητήρας είναι μια δομή πολυσιλικόντος επιφανείας-μικρού μηχανήματος που είναι χτισμένο στην κορυφή ενός δίσκου πυριτίου. Τα πολυαξονικά ελατήρια αναστέλλουν την δομή πάνω από την επιφάνεια του δίσκου και παρέχει αντίσταση έναντι δυνάμεων επιτάχυνσης. Η εκτροπή της δομής μετράτε χρησιμοποιώντας ένα διαφορικό πυκνωτή που αποτελείται από ανεξάρτητα σταθερές πλάκες και πλάκες προσαρτημένες στην κινούμενη μάζα. Οι πλάκες κινούνται με τετραγωνικά κύματα φάσεως 180°. Η επιτάχυνση εκτρέπει την κινούμενη μάζα και εξισορροπεί τον διαφορικό πυκνωτή με αποτέλεσμα μια τιμή στην έξοδο αισθητήρα του οποίου το πλάτος είναι ανάλογο προς την επιτάχυνση.

Ο αισθητήρας επιτάχυνσης μπορεί να μετρήσει την επιτάχυνση και στους τρεις άξονες X, Y,Z όμως οι μετρήσεις που χρειάστηκαν είναι στον άξονα Z για αυτό καταργήθηκαν οι υπόλοιποι άξονες, στα 0 g ο αισθητήρας μας δίνει μια τάση 417 mV.



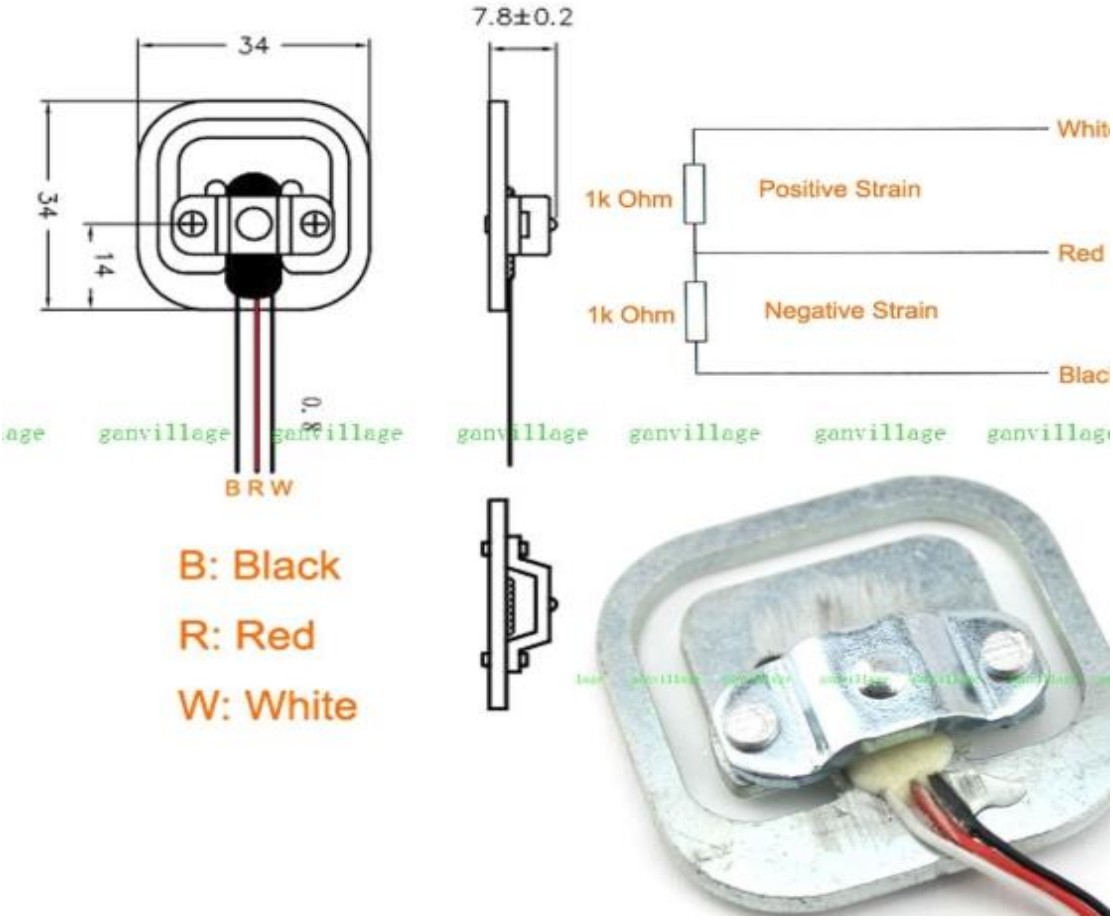
Εικόνα 3.11 Αισθητήρας επιτάχυνσης

Αισθητήρας βάρους

Με τον αισθητήρα βάρους μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη που ασκείται στην ράβδο του αποσβεστήρα, είναι τοποθετημένος στο πάνω άκρο της ράβδου μέσα σε μια θήκη από αλουμίνιο για προστασία.

Αποτελείται από μία βάση και πάνω σε αυτή έχει ένα έλασμα με μια αντίσταση και ανάλογα από ποια μεριά ασκείται η δύναμη το έλασμα πιέζεται προς τα κάτω ή προς τα πάνω και βγάζει μια τάση σε mV από την αντίσταση που βρίσκεται στο έλασμα.

Ο αισθητήρας έχει εύρος τιμής έως 500 N = 50 kg και στα μηδέν γραμμάρια έχει τάση 250 mV , για να γίνει η ρύθμιση του αισθητήρα τοποθετήθηκε ένα βαρίδιο βάρους 105 gr βγάζοντας τάση 125 mV. Στη συνέχεια ο αισθητήρας μέσω ενός υποπρογράμματος ρυθμίστηκε και στο ανάλογο βάρος έδειχνε την κατάλληλη τάση. Επιπλέον ρυθμίστηκε να γίνεται η μετατροπή από γραμμάρια σε Newton.



Εικόνα 3.12 Αισθητήρας βάρους

3.9 Προβλήματα κατασκευής του αποσβεστήρα και αντιμετώπισή τους

Κατά την συναρμολόγηση του αποσβεστήρα παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα επειδή το εξάρτημα κατασκευάστηκε πρώτη φόρα και δεν γνωρίζαμε εάν θα λειτουργούσε σωστά.

Το πρώτο βασικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν οι διαρροές λαδιού και αέρα από τις τάπες του κύριου σωλήνα του αποσβεστήρα και από το ρεζερβουάρ. Επειδή οι τάπες του αποσβεστήρα είναι από αλουμίνιο και ο κύριος σωλήνας και το ρεζερβουάρ είναι από Plexiglas ήταν δύσκολη η συναρμογή τους χωρίς να υπάρξουν διαρροές.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αρχικά χρησιμοποιήθηκε μια κόλλα τεφλόν για στεγανοποίηση αλλά δεν είχε αποτέλεσμα και υπήρξαν πάλι διαρροές και επιπλέον η τάπα κόλλησε στον σωλήνα και κατά το λύσιμό ο σωλήνας ράγισε και έσπασε.

Αφού με την κόλλα τεφλόν δεν υπήρξε αποτέλεσμα ανοίχτηκε ένα λούκι στον τόρνο στο τέλος του σπειρώματος της τάπας και τοποθετήθηκε ένα ο-ρινγκ με σκοπό κατά το σφίξιμο της τάπας ο σωλήνας να πατήσει πάνω του και να στεγανοποιήσει τον αποσβεστήρα από τις διαρροές.

Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν ότι το λάδι αναμιγνυόταν με τον αέρα στο ρεζερβουάρ, αυτό γινόταν επειδή ήταν μεγάλη η ανοχή ανάμεσα στο έμβολο και στα τοιχώματα του ρεζερβουάρ, για αυτό το λόγο κατασκευάστηκε ένα άλλο έμβολο με τρία αυλάκια και τοποθετήθηκαν τρία ο ρινγκ για πιο σφικτή συναρμογή.

Εικόνα 3.13 Θραύση σωλήνα αποσβεστήρα

3.10 Κόστος κατασκευής αποσβεστήρα

Κόστος υλικών

Ρολόγια πίεσης (3)	45 €
Σωλήνα Plexiglas	30 €
Αλουμίνιο 4045 (200 mm)	25 €
Ορειχάλκινοι σύνδεσμοι	10 €
Σωλήνας υψηλής πίεσης	20 €
Ράβδος inox	10 €
Ξύλινη βάση	8 €
Αισθητήρας επιτάχυνσης	3 €
Αισθητήρας βάρους	3.5 €
Οθόνη με πλακέτα και καλώδια	15 €
Υλικό PLA	5 €
Λάδι (2 λίτρα)	16 €
Σύνολο	**190,5 €**

Κόστος εργατικών

Το κόστος της εργατοώρας στο μηχανουργείο που κατασκευάστηκαν τα εξαρτήματα του αποσβεστήρα είναι 40 € η ώρα. Ενώ για τα εξαρτήματα του 3d printer είναι 5 € η ώρα.

Περιγραφή	Χρόνος	Κόστος
Τάπες αποσβεστήρα	80 λεπτά	53,3 €
Έμβολο της ράβδου	60 λεπτά	40 €
Έμβολο του ρεζερβουάρ	30 λεπτά	20 €
Σωλήνες αποσβεστήρα	120 λεπτά	80 €
Βάσεις αποσβεστήρα	80 λεπτά	53,3 €
Βάση αισθητήρα επιτάχυνσης	150 λεπτά	12,5 €
Βάση οθόνης και μπαταρίας	450 λεπτά	37,5€
Σύνολο		**296,6 €**

Το συνολικό κόστος του αποσβεστήρα είναι 487,1 € + Φ.Π.Α

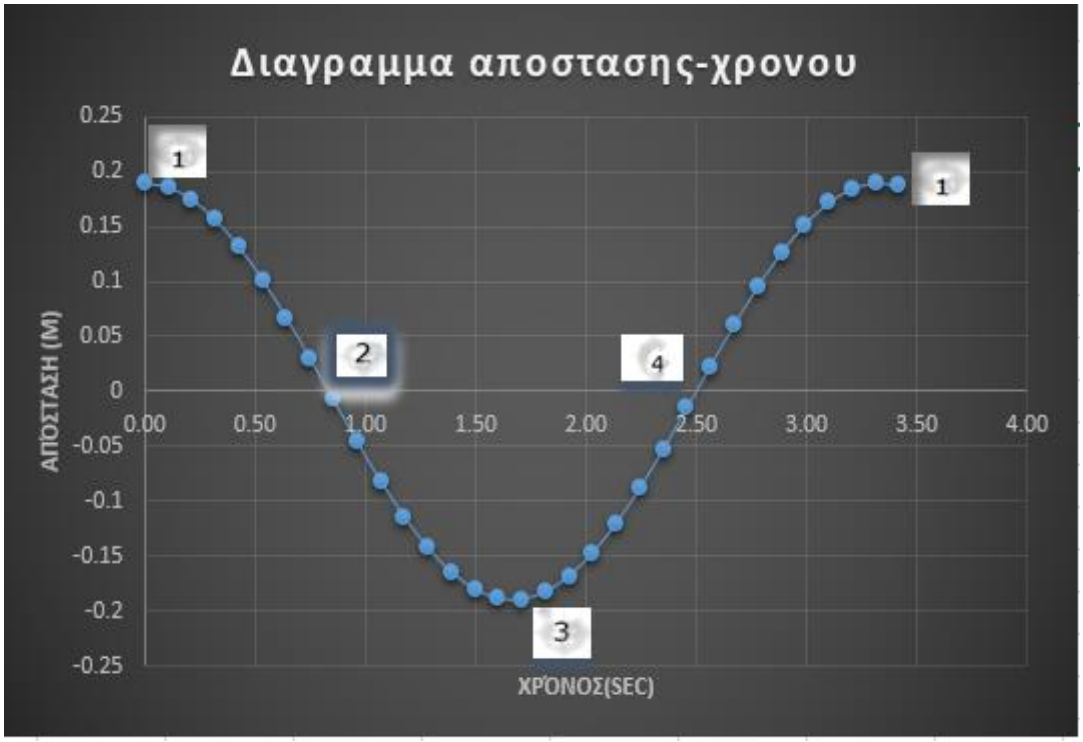
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{ο}

4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων

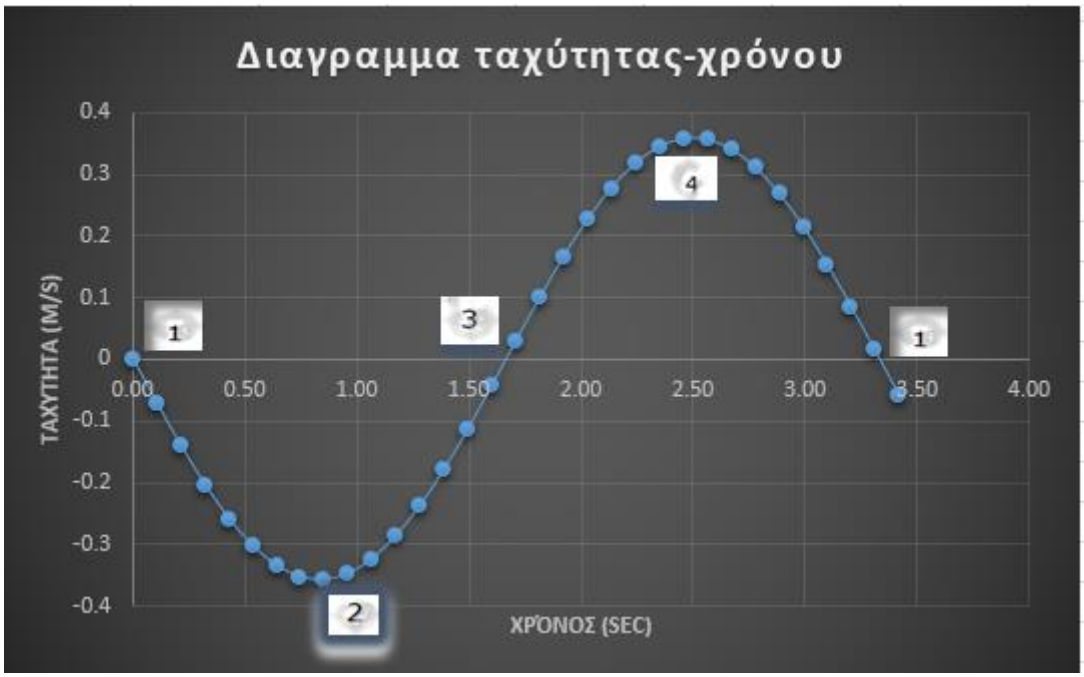
Η διαδρομή που διανύει το έμβολο της ράβδου από το άνω σημείο στο κάτω σημείο του αποσβεστήρα είναι 0,38 m και ο χρόνος που κάνει για ένα πλήρη κύκλο είναι 3,42 second. Για την αξιολόγηση ενός αποσβεστήρα χρειάζεται να γίνουν τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης και δύναμης-ταχύτητας.

Στην ουσία ο αποσβεστήρας κάνει μια παλινδρομική κίνηση επομένως η απόσταση υπολογίζεται από το ημιτονοειδές διάγραμμα απόστασης με το χρόνο, στη συνέχεια από την πρώτη παράγωγο υπολογίζεται η ταχύτητα και από την παράγωγο της ταχύτητας βρίσκεται η επιτάχυνση για ένα πλήρης κύκλο σε σχέση με το χρόνο.

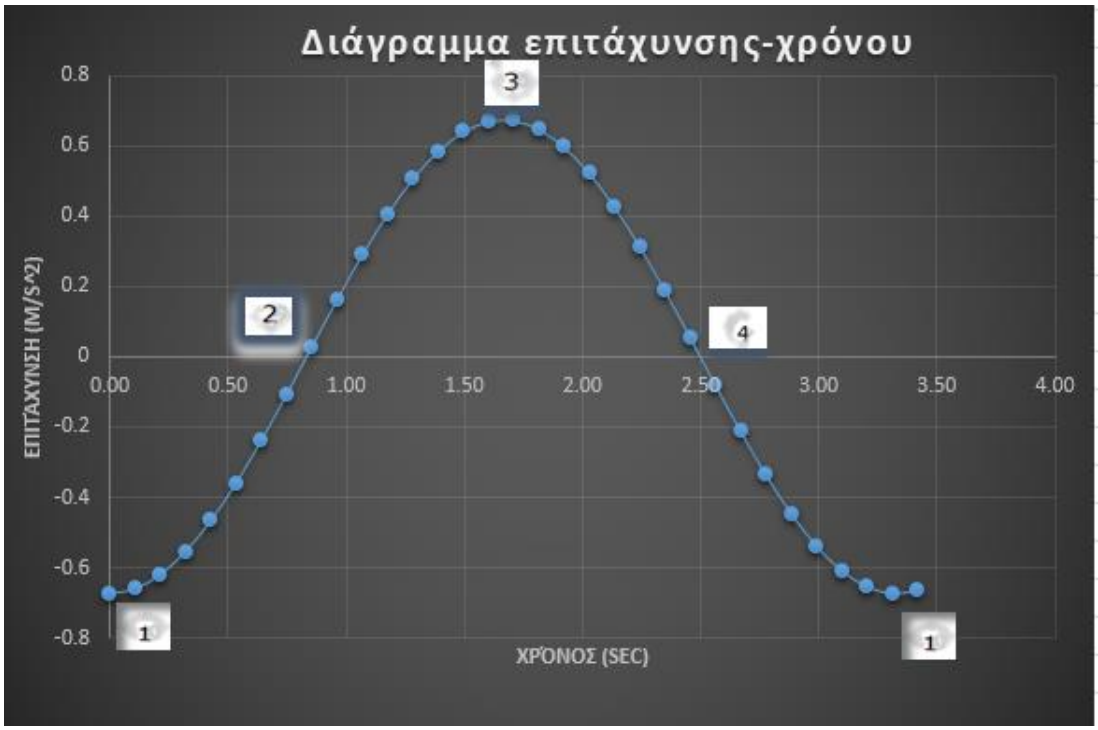
Η μετατόπιση, η ταχύτητα καθώς και η επιτάχυνση ορίζεται από το πλάτος και την συχνότητα της ταλάντωσης, το πλάτος είναι A=0,19 m και η συχνότητα είναι f=0,3 Hz.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα μετατόπισης-χρόνου



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου

Η εξίσωση μετατόπισης του εμβόλου αποσβεστήρα καθορίζεται από το πλάτος (το ήμισυ της διαδρομής), τη συχνότητα και τη φάση.

$$x(t) = -A_{mp} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t - \pi/2)$$

Το A είναι η μισή διαδρομή (πλάτος) και το f είναι η συχνότητα. Η μετατόπιση φάσης π / 2 απαιτείται επειδή το έμβολο της ράβδου βρίσκεται στη θέση που αντιστοιχεί στην πλήρη εκτόνωση του αποσβεστήρα. Κατά την εκκίνηση ο αποσβεστήρας κάνει μια πλήρη διαδρομή συμπίεσης και εκτόνωσης αντίστοιχα. Η μηδενική μετατόπιση αντιστοιχεί στη μισή διαδρομή συμπίεσης του αποσβεστήρα. Η ταχύτητα προσδιορίζεται από το πρώτο παράγωγο της μετατόπισης και η επιτάχυνση από το δεύτερο παράγωγο.

$$x'(t) = -A_{mp} \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \pi/2)$$

$$x''(t) = A_{mp} \cdot (2\pi \cdot f)^2 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t - \pi/2)$$

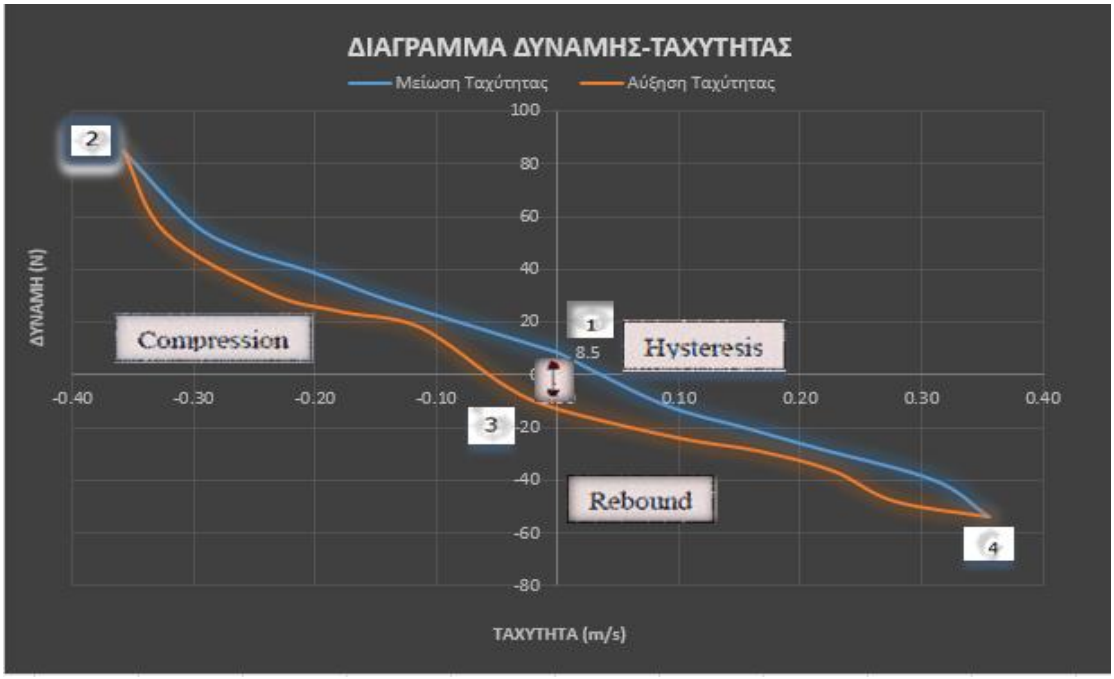
Στο σημείο 1 το έμβολο βρίσκεται στο πάνω μέρος του αποσβεστήρα και μετακινείται προς τα κάτω, σε αυτό το σημείο η ταχύτητα είναι μηδενική ενώ η επιτάχυνση είναι η μέγιστη 0,67 m/s^2.

Στο σημείο 2 η μετατόπιση θεωρείται μηδενική (στη μέση της διαδρομής συμπίεσης) όπως και η επιτάχυνση ενώ η ταχύτητα είναι η μέγιστη 0,35 m/s.

Στο σημείο 3 το έμβολο βρίσκεται στο κάτω μέρος του αποσβεστήρα έχει ολοκληρωθεί η διαδρομή συμπίεσης και αρχίζει η διαδρομή της εκτόνωσης. Η ταχύτητα σε αυτό το σημείο είναι μηδενική και η επιτάχυνση η μέγιστη.

Στο σημείο 4 το έμβολο βρίσκεται στη μέση διαδρομή της εκτόνωσης με την μετατόπιση να θεωρείται μηδενική όπως και η επιτάχυνση με την ταχύτητα να είναι μέγιστη. Το έμβολο ολοκληρώνοντας την διαδρομή εκτόνωσης επιστρέφει στο πάνω μέρος του αποσβεστήρα (σημείο 1).

4.2 Δύναμη – ταχύτητα



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας

Από το διάγραμμα δύναμης-ταχύτητας μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση του αποσβεστήρα. Στο διάγραμμα διακρίνεται η μέγιστη δύναμη και η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αποσβέσει το αμορτισέρ.

Στον αποσβεστήρα που κατασκευάστηκε η μέγιστη δύναμη είναι 85 N κατά την φάση της συμπίεσης και η μέγιστη ταχύτητα 0,36 m/s. Στο σχήμα 4.4 απεικονίζεται ένας πλήρης κύκλος συμπίεσης και εκτόνωσης, η ταχύτητα στο διάγραμμα έχει αρνητικές τιμές κατά την συμπίεση ενώ κατά την εκτόνωση είναι θετική. Αυτό δεν είναι απόλυτο ορίζεται από τον κατασκευαστεί και μπορεί να ισχύει το αντίθετο.

Η υστέρηση που φαίνεται στο Σχήμα 4.4 είναι η διαφορά στη δύναμη σε δεδομένη ταχύτητα όταν η ταχύτητα αυξάνεται και όταν η ταχύτητα μειώνεται. Με άλλα λόγια, ο αποσβεστήρας παράγει μια διαφορετική δύναμη όταν επιταχύνεται παρά όταν επιβραδύνεται.

Το σημείο 1 είναι η αρχή του κύκλου, ο αποσβεστήρας είναι σε πλήρη επέκταση και έχει σχεδόν μηδενική ταχύτητα έναρξης. Από το πρώτο έως το δεύτερο σημείο, ο αποσβεστήρας ξεκινά τη διαδρομή συμπίεσης με αυξανόμενη ταχύτητα, στο σημείο 2 επιτυγχάνεται η μέγιστη αρνητική ταχύτητα. Αυτό συνήθως αντιστοιχεί στην μέγιστη δύναμη της συμπίεσης, η μετατόπιση είναι μηδέν, δηλαδή το ήμισυ της πλήρους διαδρομής συμπίεσης στον αποσβεστήρα. Από το δεύτερο έως το τρίτο σημείο, η ταχύτητα αρχίζει να μειώνεται όπου στο σημείο τελειώνει η διαδρομή της συμπίεσης.

Αμέσως μετά στο τρίτο σημείο, η διαδρομή εκτόνωσης αρχίζει με την ταχύτητα να αυξάνεται και πάλι. Στο σημείο τέσσερα, επιτυγχάνεται η μέγιστη δύναμη της διαδρομής της εκτόνωσης 54 N, η μετατόπιση είναι μηδενική και το έμβολο βρίσκεται

στην μέση της διαδρομής εκτόνωσης. Το έμβολο μετακινείται από το σημείο 4 πίσω στο σημείο 1 όπου η εκτόνωση συνεχίζεται και η ταχύτητα μειώνεται. Στο σημείο 1 το έμβολο επιστρέφει στο αρχικό σημείο με μηδενική ταχύτητα.

4.3 Δύναμη – μετατόπιση

Σχήμα 4.5 Διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης

Ένα άλλο εξίσου σημαντικό διάγραμμα για την αξιολόγηση της απόδοσης του αποσβεστήρα είναι το διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης. Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η δύναμη σε κάθε σημείο του αποσβεστήρα, θετικές θεωρούνται οι δυνάμεις κατά την διαδρομή της συμπίεσης και αρνητικές κατά την διαδρομή της εκτόνωσης.

Σε αυτό το σχήμα φαίνεται ότι το έμβολο της ράβδου ξεκινάει από το σημείο 1 σε πλήρη προέκταση, στη συνέχεια στο σημείο 2 βρίσκεται στην μέση της διαδρομής της συμπίεσης με την μέγιστη δύναμη και μηδενική μετατόπιση. Στο σημείο 3 το έμβολο έχει ολοκληρώσει το κύκλο συμπίεσης και αρχίζει την εκτόνωση όπου στο σημείο 4 βρίσκεται στην μέση του αποσβεστήρα με την μέγιστη δύναμη εκτόνωσης και μηδενική μετατόπιση. Τέλος το έμβολο επιστρέφει στην αρχική του θέση (σημείο 1) ολοκληρώνοντας ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας.

Κατά την φάση της συμπίεσης η μέγιστη πίεση του αποσβεστήρα είναι 6 bar και κατά την εκτόνωση η μέγιστη πίεση είναι 5,4 bar, ενώ η μέγιστη πίεση του αερίου στο ρεζερβουάρ είναι 3 bar και δημιουργήθηκε κατά την συμπίεση του εμβόλου.

4.4 Συμπεράσματα

Στην διπλωματική εργασία έγινε αναφορά στη λειτουργία και την κατασκευή ενός μονοσωλήνιου αποσβεστήρα με ρεζερβουάρ, αναφέρθηκαν περιληπτικά τα εξαρτήματα που το αποτελούν καθώς και πως κατασκευάστηκαν.

Στη συνέχεια έγιναν τα διαγράμματα μετατόπισης-δύναμης και ταχύτητα δύναμης, τα οποία χρειάζονται για την απόδοση και την αξιολόγηση του αποσβεστήρα.

Ο αποσβεστήρας που κατασκευάστηκε έχει μέγιστη δύναμη συμπίεσης 85 N και μέγιστη δύναμη εκτόνωσης 54 N, με μέγιστες πιέσεις στο θάλαμο συμπίεσης 6 bar ενώ στο θάλαμο εκτόνωσης 5,4 bar. Σε κατάσταση ηρεμίας ο θάλαμος του αέρα έχει πίεση 2 bar με την μέγιστη πίεση να είναι 3,5 όταν ο αποσβεστήρας συμπιέζεται.

Ο συγκεκριμένος τύπος αποσβεστήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορα είδη οχημάτων ανάλογα τον τύπο του οχήματος και τις συνθήκες που το όχημα κινείται. Η ρύθμιση του αποσβεστήρα μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, ο ένας τρόπος είναι να αυξηθεί η πίεση του αέρα και ο δεύτερος τρόπος είναι να προσδεθούν περισσότερες ρυθμιστικές ροδέλες στο έμβολο της ράβδου.

Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η δύναμη συμπίεσης και εκτόνωσης και ο αποσβεστήρας γίνεται πιο ¨σκληρός¨. Αυτό γίνεται κατά κύριο λόγο σε αγωνιστικά οχήματα που παίρνουν μέρος σε αγώνες εκτός δρόμου. Σε επιβατικά οχήματα η πίεση του αέρα είναι μικρότερη και δεν χρειάζονται πολλές ρυθμιστικές ροδέλες για να είναι ο αποσβεστήρας πιο ¨μαλακός¨ με αποτέλεσμα ο οδηγός να έχει άνεση κατά την διάρκεια της διαδρομής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) Dixon, J.C. The Shock Absorber Handbook, 2nd Edition, John Wiley and Sons, England, 2007.
2) Development and experimental verification of a parametric model of an automotive damper by Kirk Shawn Rhoades
3) Development and validation of a physical model for a modern twin tube damper by Christopher Ryan Meissen
4) Lang H.H., A Study of the Characteristics of Automotive Hydraulic Dampers at High Stroking Frequencies, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1997.
5) Talbott M.S., An Experimentally Validated Physical Model of a High Performance Automotive Damper, M.S. Thesis, Purdue University, Lafayette, IN, 2002
6) https://automanana.com/different-types-shock-absorbers-pros-cons
7) https://www.tein.co.jp/e/special/ni_toryu
8) Farah, Shady, et al. "Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review." Advanced Drug Delivery Reviews, vol. 107, Dec. 2016,
9) https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8686
10) http://www.plexiglas.de/product/plexiglas/en/about/faq/Pages/properties.aspx
11) https://www.okuma.com/lb3000-exii
12) https://www.creality3d.cn/creality-cr-10-3d-printer-p00096p1.html

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α) Ιδιότητες υλικού αλουμίνιο 4045

Chemical Composition

The following table shows the chemical composition of aluminium / aluminum 4045 alloy.

Element	Content (%)
Aluminum, Al	87.3 - 91
Silicon, Si	9-11
Iron, Fe	≤ 0.80
Copper, Cu	≤ 0.30
Titanium, Ti	≤ 0.20
Zinc, Zn	≤ 0.10
Magnesium, Mg	≤ 0.050
Manganese, Mn	≤ 0.050
Remainder (each)	≤ 0.050
Remainder (total)	≤ 0.15

Physical Properties

The physical properties of aluminium / aluminum 4045 alloy are outlined in the following table.

Properties	Metric	Imperial
Density	2.67 g/cm^3	0.0965 lb/in^3
Melting point	574-599°C	1065-1110°F

Thermal Properties

The thermal properties of aluminium / aluminum 4045 alloy are tabulated below.

Properties	Metric	Imperial
Thermal expansion co-efficient (@20-100°C/68-212°F)	21.1 µm/m°C	11.7 µin/in°F
Thermal conductivity	171 W/mK	1190 BTU in/hr.ft^2.°F

Εικόνα Α: Ιδιότητες αλουμινίου 4045

Β) Ιδιότητες υλικού PLA

Characteristics	Unit	Amount
Physical:		
Mw	g/mol	66,000
Specific gravity	–	1.27
Solid density	g/cm^3	1.252
Melt density	g/cm^3	1.073
T_g	°C	55
T_m	°C	165
Specific heat (Cp)	J/kg °C	
190 °C		2060
100 °C		1955
55 °C		1590
Thermal conductivity	W/m °C	
190 °C		0.195
109 °C		0.197
48 °C		0.111
Mechanical:		
Tensile strength	Mpa	59
Elongation at break	%	7
Elastic modulus	MPa	3500
Shear modulus	MPa	1287
Poisson's ratio	–	0.36
Yield strength	MPa	70
Flexural strength	MPa	106
Unnotched izod	J/m	195
Notch izod impact	J/m	26
Rockwell hardness	HR	88
Heat deflection temp	°C	55
Vicat penetration	°C	59
Ultimate tensile strength	MPa	73
Percent of elongation	%	11.3
Young's modulus	MPa	1280

Εικόνα Β: Ιδιότητες PLA

Γ) Ιδιότητες υλικού Plexiglas

Mechanical properties / Standard / Value

Density / ISO 1183 / 1.19 g/cm3
Tensile strength / ISO 527-2/1B/5 / 80 MPa
Elongation at break / ISO 527-2/1B/5 / 5.5%
Modulus of elasticity / ISO 527-2/1B/1 / 3300 MPa
Flexural strength / ISO 178 / 115 MPa
Compressive yield stress / ISO 604 / 110 MPa
Shear modulus / ISO 537 / 1700 MPa
Impact strength / ISO 179/1fu / 15 kJ/m^2
Notched impact strength / ISO 180/1 A / 1.6 kJ/m^2
Admissible material stress / - / 5 - 10 MPa
Poisson's ratio / ISO 527-1 / 0.37
Ball indentation hardness / ISO 2039-1 / 175 MPa
Scratch resistance / ISO 9352 / 20 - 30% haze
Minimum cold-bending radius / - / 330 x sheet thickness

Even at extreme temperatures of - 40 degrees Celsius (°C), PLEXIGLAS® shows no self-destruction. The tensile strength increases from 80 megapascals (MPa) at 23°C to 110 MPa at - 40°C, which suggests an increase in brittleness.

PLEXIGLAS® is permeable to gas. The permeation coefficient (g cm / cm2 h Pa) for the following media is:

Water vapor 2.3 x 10^{-10}
Nitrogen (N2) 4.5 x 10^{-15}
Oxygen (O2) 2.0 x 10^{-14}
Carbon dioxide (CO2) 1.1 x 10^{-13}
Air 8.3 x 10^{-15}

Εικόνα Γ: Ιδιότητες Plexiglas

Δ) C.N.C Okuma LB3000 exii

HIGHLIGHTED SPECS

MAX MACHINING DIAMETER	mm (in)	410 (16.14)
MAX MACHINING LENGTH	mm (in)	500 (19.69)
SPINDLE NOSE TYPE		JIS A2-6
SPEED RANGE	min^{-1}	45~5,000
RAPID TRAVERSE X-Z	m/min (ipm)	25/30 (984/1,181)
STANDARD POWER	kW (hp)	22/15 (30/20)

Εικόνα Δ: C.N.C OKUMA LB3000 EXII

E) Creality CR-10 3d printer

Machine type	CR-10
Machine color	Orange, blue and black (optional)
Forming technology	FDM(melt manufacturing)
Print size	300×300×400mm
Machine net weight	8.7Kg
Packing weight	13.5kg
Nozzle diameter	Standard 0.4mm
Control system	Win、xp、mac、vista、Linux
Software	Cura、Simplify3D、Repetier-host
File format	STL、OBJ、G-Code
Print speed	Normal 60mm/s. Max 100mm/s
Filament diameter	1.75mm
Support filament	PLA/ABS/TPU/wood/carbon fiber/Copper
Power requirement	Input:110V-220V, Output 12V, Power 270W

Εικόνα E: Creality CR-10 3d printer

ΣΤ) Κώδικας Arduino ηλεκτρικού κυκλώματος

```
#include "HX711.h"
#include <math.h>
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11 , 12);
int potPin2 = A2; // g sensor voltage read pin
//HX711.DOUT  - pin #A1
//HX711.PD_SCK - pin #A0
HX711 scale(A1, A0);
float read_ADC, read_load , read_average, force, temp, gVar;
long readnum;
void setUpPrint() {
  Serial.print("read: \t\t");
  Serial.println(scale.read());  // print a raw reading from the ADC
  Serial.print("read average: \t\t");
  Serial.println(scale.read_average(20));  // print the average of 20 readings from the
ADC
Serial.print("get units: \t\t");
Serial.println(scale.get_units(5), 1);    // print the average of 5 readings from the ADC
minus tare weight, divided by the SCALE parameter set with set_scale
  Serial.println("Readings:");
void resetDisplay() {
  lcd.setCursor(0, 0); // Sets the cursor to col 0 and row 0
  lcd.print("FORCE: "); // Prints Sensor Val: to LCD
  lcd.print("       ");
  lcd.setCursor(14, 0); // Sets the cursor to col 0 and row 0
  lcd.print(" N");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("ACELL: ");
  lcd.print("       ");
```

```
  lcd.setCursor(14, 1);
  lcd.print(" G");
void readAndPrint() {
  read_ADC   =   scale.read();
  Serial.print("read: \t");
  Serial.println(read_ADC);
  read_load   =    scale.get_units();
  if (read_load < 0.0) {
    read_load = abs(read_load);
  Serial.print("One reading:\t");
  Serial.print(read_load, 1);
  Serial.println("  Kilogram");
  read_average   =    scale.get_units(10);
  Serial.print("Average:\t");
  Serial.print(read_average, 1);
  Serial.println("  Kilogram");
  Serial.print("ACELL: ");
  Serial.print(gVar);
  Serial.println(" G");
void calculateForce() {
  force = read_load · 9.8066500286389;
void calculateAcceleration() {
  temp = analogRead(potPin2);
  gVar = (temp - 450 ) / -120;
  if (temp > 450) {
    gVar = 0;
void displayForce() {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("FORCE: ");
  lcd.print(force);
```

```
  lcd.setCursor(14, 0);
  lcd.print(" N");
void displayAcceleration(){
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("ACELL: ");
  lcd.print(gVar);
  lcd.setCursor(14, 1);
  lcd.print(" G");
////////////-----------------------------------------------------
>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>//////////////
void setup() {
  Serial.begin(38400);
  scale.set_scale(40915.4285f); // this value is obtained by calibrating the scale with known weights; see the README for details
  scale.tare();               // reset the scale to 0
 void setUpPrint();
   lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
pinMode(potPin2, INPUT);
void loop() {
  scale.tare();               // reset the scale to 0
 readAndPrint();
  calculateForce();
  calculateAcceleration();
  resetDisplay();
  displayForce();
  displayAcceleration();
```

Η) Μετρήσεις δύναμης - ταχύτητας, δύναμης - μετατόπισης

A/A	U(m/s)	F (N)
1	0.00	8.5
2	-0.07	18.7
3	-0.14	28.5
4	-0.20	39.2
5	-0.26	47
6	-0.30	58.3
7	-0.36	85
8	-0.32	54
9	-0.24	31
10	-0.18	24
11	-0.11	18
12	-0.04	-4.25
13	0.00	-13
14	0.10	-24
15	0.17	-29
16	0.23	-36.4
17	0.28	-48
18	0.36	-54
19	0.31	-40
20	0.22	-28
21	0.15	-20
22	0.09	-11
23	0.00	8.5

Εικόνα H_1) Μετρήσεις δύναμης-ταχύτητας

A/A	X(m)	F(N)
1	0.1900	8.5
2	0.1861	15
3	0.1747	22
4	0.1563	35
5	0.1315	45
6	0.1014	58
7	0.0673	72
8	0.0304	84
9	-0.0078	85
10	-0.0456	83
11	-0.0815	72
12	-0.1142	58
13	-0.1423	45
14	-0.1646	35
15	-0.1802	24
16	-0.1886	15
17	-0.1894	8.5
18	-0.1894	-6.5
19	-0.1682	-18
20	-0.1472	-28
21	-0.1201	-38
22	-0.0883	-47
23	-0.0528	-50
24	-0.0153	-53
25	0.0229	-54
26	0.0602	-50
27	0.0950	-47
28	0.1260	-39
29	0.1519	-26
30	0.1716	-18
31	0.1900	-6.5
32	0.1900	8.5

Εικόνα H_2) Μετρήσεις δύναμης-μετατόπισης