



# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

## Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτόματου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Χαράλαμπος Μ. Αφεντουλίδης**

**Ανάπτυξη ενός ημιαυτόματου συστήματος αλλαγής ταχυτήτων για μονοθέσιο  
υψηλών επιδόσεων τύπου Formula Student**

**Επιβλέπων:** Δρ. Δημήτριος Κουλοχέρης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα  
Οκτώβριος 2018



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλά οχήματα τύπου Formula Student χρησιμοποιούν κινητήρες από μοτοσυκλέτες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καλύπτουν τις απαιτήσεις απόδοσης των διαγωνισμών, όπως είναι οι χαμηλοί χρόνοι αλλαγής ταχυτήτων, μέσω της χρήσης σειριακών κιβωτίων ταχύτητας και ο συμπαγής σχεδιασμός. Παραδοσιακά η αλλαγή των ταχυτήτων γίνεται μηχανικά με απευθείας σύνδεση του πεντάλ με τον οδηγό, αλλά η ημι-αυτόματη προσέγγιση για τον έλεγχο των ταχυτήτων και του συμπλέκτη, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα των αλλαγών, αλλά και να βελτιώσει την άνεση του οδηγού. Αυτός ήταν και ο βασικός στόχος αυτού του project, ο οποίος επιτεύχθηκε με το σχεδιασμό ενός συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε μονοθέσιο διαθέτει τον κινητήρα KTM 500 EXC. Για το σχεδιασμό απαιτούνταν η μέτρηση της δύναμης και της διαδρομής του συστήματος μετάδοσης, και ο σχεδιασμός ενός πνευματικού συστήματος και ενός ηλεκτρο-υδραυλικού συμπλέκτη. Και τα δύο διαχειρίζονται από ένα σύστημα ελέγχου ανεπτυγμένο στην πλατφόρμα του Arduino. Οι στηρίξεις των εξαρτημάτων επιτεύχθηκε κάνοντας χρήση διάφορων υλικών και τεχνολογιών, όπως το 3D printing, ενώ κάποια βασικά εξαρτήματα μελετήθηκαν με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων για τη μείωση του βάρους τους.

Μετά τη φάση της κατασκευής, των δοκιμών και των ρυθμίσεων (βαθμονόμησης), το τελικό σύστημα εκπλήρωνε όλες τις απαιτήσεις που είχαν τεθεί, όντας ικανό να εκτελέσει ένα ανέβασμα ταχύτητας σε 170 ms, έχοντας συνολική μάζα 2,4 kg. Ακόμα αποτελεί ένα πλήρως ανεξάρτητο σύστημα, γεγονός που το διαχωρίζει από οποιοδήποτε εμπορικό προϊόν ή άλλο project Formula Student. Το concept θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω αντικαθιστώντας τον σερβοκινητήρα από έναν πνευματικό περιστροφικό επενεργητή, αλλά και τη βελτίωση των θέσεων και του βάρους των διαφόρων εξαρτημάτων μέσα στο μονοθέσιο για τη μείωση του κέντρου βάρους, ενώ το σύστημα ελέγχου μπορεί να ρυθμιστεί ακόμα καλύτερα μειώνοντας τους χρόνους αλλαγής.



## **SUMMARY**

Many Formula Student (FS) type vehicles utilize motorbike engines. This is attributed to their compatibility with the performance requirements of the competition, such as low shift times, through sequential transmission and compact design. Traditionally gear shifting occurs through a direct mechanical connection but the use of a semi-automated approach of clutch and gear control, can increase both actuation speed and driver comfort. This was the core aim of this project and was achieved by designing a complete bolt-on assembly that can be incorporated into any vehicle with a KTM 500 EXC engine. The approach required determination of the force and travel of the transmission mechanism, and design of a pneumatic shifter and electrohydraulic clutch. Both are managed by a gear control unit developed on an Arduino platform. Mounting of all components was achieved using various materials and manufacturing techniques, like 3D printing, while some core components were analyzed using finite element analysis, in order to minimize their weight.

Following construction, testing and calibration, the resulting assembly met all the design requirements, achieving a theoretical shifting time of 170 ms and mass of 2,4 kg. Further it is a completely independent unit, a feature available neither in any commercial product, nor other FS project. The concept could be developed further with a focus on implementing a rotational pneumatic actuator, instead of using a servo motor, while optimizing the position and weight of the components inside the vehicle in order to lower the vehicle's CoG. Also, the control system can be additionally calibrated to lower shift times.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου συνέβαλαν πολλοί άνθρωποι που οφείλω και θέλω να ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ όλα τα μέλη της ομάδας Prom Racing, των οποίων είχα την τιμή να είμαι αρχηγός για τη σεζόν 2017-2018, μαζί με τους οποίους κατακτήσαμε τέσσερα βραβεία και είχαμε την καλύτερη χρονιά στην ιστορία της ομάδας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Νίκο Λουβερδή, το Γιώργο Παπαγεωργίου, τον Γιάννη Αδρακτά, το Δήμο Κανναβό, τον Άγγελο Κρεμμύδα και τον Ιωακείμ Σιούτη που συντέλεσαν σημαντικά στην επιτυχία αυτού του project, αλλά και γενικότερα στην περσινή επιτυχία της ομάδας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό της Σχολής και ιδιαίτερα τον καθηγητή Δρ. Δημήτριο Κουλοχέρη που επέβλεψε αυτή τη Διπλωματική Εργασία.

Τέλος, περισσότερο απ' όλους ευχαριστώ τους γονείς μου και την αδελφή μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, από κάθε άποψη.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
SUMMARY .....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	15
1.1 Θεσμός Formula Student .....	15
1.2 Καθορισμός στόχου.....	16
1.3 Βιβλιογραφία και State of the Art.....	17
1.4 Σκοπός και στόχοι.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ – PRODUCT DESIGN SPECIFICATION (PDS).....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ .....	27
3.1 Μηχανισμός αλλαγής ταχυτήτων .....	27
3.2 Συμπλέκτης.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ.....	31
4.1 Πνευματικό Έμβολο.....	31
4.2 Πνευματική βαλβίδα ελέγχου .....	32
4.3 Παροχή αέρα.....	32
4.4 Λοιπά εξαρτήματα πνευματικού κυκλώματος.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΣΥΜΠΛΕΞΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	37
5.1 Σχεδιαστική προσέγγιση .....	37
5.2 Ηλεκτρο-υδραυλική λύση (servo) .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ .....	41
6.1 Έλεγχος συμπλέκτη .....	42
6.2 Αισθητήρας επιλεγμένης ταχύτητας (gear sensor).....	42
6.3 Μικροελεγκτής .....	43
6.4 Ηλεκτρονική Πλακέτα.....	44
6.5 Προγραμματισμός .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ.....	49

7.1 Κινητήρας .....	49
7.2 Μανέτα συμπλέκτη .....	51
7.3 Εξαρτήματα πνευματικού συστήματος.....	52
7.4 Σερβοκινητήρας.....	54
7.5 Bracket στήριξης σερβοκινητήρα και μετάδοση κίνησης.....	54
7.6 Shroud ψύξης .....	56
7.7 Πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων .....	57
7.8 Σύνδεση πνευματικού εμβόλου με πεντάλ .....	58
7.9 Ποτενσιόμετρο, μηχανισμός προσάρτησης στο κιβώτιο και στήριξη .....	58
7.10 Στήριξη πνευματικού εμβόλου .....	61
7.11 Χειριστήριο (paddle) αλλαγής ταχυτήτων .....	69
7.12 Βάση στήριξης χειριστηρίων (paddles) .....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ – ΔΟΚΙΜΕΣ - TROUBLESHOOTING.....	79
ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ.....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ .....	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΕΝΤΑΛ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	92

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1.1: Μονοθέσιο Formula Student του Πολυτεχνείου του Μονάχου .....	15
Εικόνα 1.2.1: Ντίζα push-pull για αλλαγή ταχυτήτων.....	18
Εικόνα 1.2.2: HM Quickshifter Strain Gauge .....	19
Εικόνα 1.2.3: Translogic Powershifter .....	19
Εικόνα 1.2.4: Συνδεσμολογία αλλαγής ταχυτήτων από το Πολυτεχνείο του Μιλάνου .....	20
Εικόνα 1.2.5: Επενεργητής πηνίου φωνής.....	21
Εικόνα 3.1.1: Μέτρηση απαιτούμενης δύναμης αλλαγής ταχύτητας .....	27
Εικόνα 3.2.1: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος συμπλέκτη.....	28
Εικόνα 3.2.2: Διαδρομή «μανέτας» συμπλέκτη.....	29
Εικόνα 4.4.1: Διάγραμμα πνευματικού κυκλώματος.....	35
Εικόνα 5.1.1: FTE CP1 ηλεκτρο-υδραυλικός επενεργητής .....	38
Εικόνα 5.1.2: Magneti Marelli ECA ηλεκτρο-υδραυλικός επενεργητής.....	38
Εικόνα 5.2.1: Ο σερβοκινητήρας Hitec HS-1005SGT.....	39
Εικόνα 6.1: Διάγραμμα εισόδων και εξόδων συστήματος .....	41
Εικόνα 6.1.1: Ποτενσιόμετρο PC-16 της PIHER .....	42
Εικόνα 6.2.1: Ποντενσιόμετρο P11S1V0FLSY00103KA της VISHAY SFERNICE .....	43
Εικόνα 6.3.1: Χαρακτηριστικά Arduino NANO .....	44
Εικόνα 6.4.1: Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου.....	45
Εικόνα 6.4.2: Διάγραμμα πλακέτας ελέγχου .....	46
Εικόνα 6.5.1: Διάγραμμα ροής κώδικα .....	47
Εικόνα 6.5.2: Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου .....	48
Εικόνα 7.1.1: Πλαϊνές όψεις τρισδιάστατου μοντέλου κινητήρα KTM 500 EXC .....	50
Εικόνα 7.1.2: Απλοποιημένο μοντέλο κινητήρα KTM 500 EXC.....	51
Εικόνα 7.2.1: Μανέτα συμπλέκτη με master cylinder .....	51
Εικόνα 7.3.1.1: Μοντέλο CAD πνευματικής βαλβίδας.....	52
Εικόνα 7.3.1.2: Πνευματική βαλβίδα μαζί με bracket στήριξης .....	52
Εικόνα 7.3.1.3: Μοντέλο CAD πνευματικού εμβόλου .....	53
Εικόνα 7.3.2.1: Μοντέλο CAD αεροφυλακίου μαζί με regulator.....	53
Εικόνα 7.4.1: Μοντέλο CAD σερβοκινητήρα Hitec .....	54
Εικόνα 7.5.1: Bracket στήριξης σερβοκινητήρα και μανέτας συμπλέκτη .....	55
Εικόνα 7.5.2: Τορναριστό εξάρτημα .....	55
Εικόνα 7.5.3: Φρεζαριστό εξάρτημα.....	56

Εικόνα 7.5.4: Συναρμολόγημα master cylinder .....	56
Εικόνα 7.6.1: Μοντέλο CAD shroud ψύξης .....	57
Εικόνα 7.7.1: Μοντέλο CAD πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων .....	57
Εικόνα 7.8.1: Μοντέλο CAD clevis.....	58
Εικόνα 7.9.1: Μοντέλο CAD αντάπτορα ποτενσιόμετρου .....	59
Εικόνα 7.9.2: Μοντέλο CAD custom αλουμινένιου περικοχλίου.....	59
Εικόνα 7.9.3: Μοντέλο CAD ατσάλινου στηρίγματος ποτενσιόμετρου.....	60
Εικόνα 7.9.4: Συναρμολόγημα CAD ποτενσιόμετρου θέσης μύλου ταχυτήτων.....	60
Εικόνα 7.9.5: Ποτενσιόμετρο τοποθετημένο πάνω στον κινητήρα.....	61
Εικόνα 7.10.1: Αρχικός σχεδιασμός bracket στήριξης πνευματικού εμβόλου (διακρίνεται η διαμόρφωση του μπλοκ του κινητήρα ως sketch) .....	62
Εικόνα 7.10.2: Αρχικό σχέδιο συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου .....	62
Εικόνα 7.10.3: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό συγκολλητό bracket (1 <sup>η</sup> όψη) .....	63
Εικόνα 7.10.4: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό συγκολλητό bracket (2 <sup>η</sup> όψη) .....	64
Εικόνα 7.10.5: Παραμορφώσεις στο αρχικό συγκολλητό bracket.....	64
Εικόνα 7.10.6: Ελάφρωμα ανάμεσα στα δύο συγκολλητά μέλη .....	65
Εικόνα 7.10.7: Ελαφρώματα στα συγκολλητά μέλη .....	65
Εικόνα 7.10.8: Ελαφρυμένη έκδοση συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου .....	66
Εικόνα 7.10.9: Μοντέλο FEA για ελαφρυμένο συγκολλητό bracket πνευματικού εμβόλου .	66
Εικόνα 7.10.10: Τάσεις κατά von Mises στο ελαφρωμένο bracket .....	67
Εικόνα 7.10.11: Παραμορφώσεις στο ελαφρωμένο bracket.....	67
Εικόνα 7.10.12: Μοντέλο για μελέτη λυγισμού.....	68
Εικόνα 7.10.13: Αποτελέσματα μελέτης λυγισμού.....	68
Εικόνα 7.11.1: Αρχικό σχέδιο paddle .....	69
Εικόνα 7.11.2: Μοντέλο μελέτης αντοχής paddle (αρχικό σχέδιο) .....	70
Εικόνα 7.11.3: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (αρχικό σχέδιο) – 1 <sup>η</sup> όψη .....	70
Εικόνα 7.11.3: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (αρχικό σχέδιο) – 2 <sup>η</sup> όψη .....	71
Εικόνα 7.11.4: Παραμορφώσεις paddle (αρχικό σχέδιο) .....	71
Εικόνα 7.11.5: Συντελεστής ασφαλείας paddle (αρχικό σχέδιο).....	72
Εικόνα 7.11.6: Ενισχυμένο σχέδιο paddle .....	72
Εικόνα 7.11.7: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (ενισχυμένο σχέδιο).....	73
Εικόνα 7.11.8: Παραμορφώσεις στο paddle (ενισχυμένο σχέδιο) .....	73
Εικόνα 7.11.9: Συντελεστής ασφαλείας paddle (ενισχυμένο σχέδιο) .....	74
Εικόνα 7.12.1: Αρχικό σχέδιο βάσης.....	74

Εικόνα 7.12.2: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό σχέδιο βάσης.....	75
Εικόνα 7.12.3: Παραμορφώσεις στο αρχικό σχέδιο βάσης .....	76
Εικόνα 7.12.4: Ελαφρωμένο σχέδιο βάσης.....	76
Εικόνα 7.12.5: Τάσεις κατά von Mises στο ελαφρωμένο σχέδιο βάσης .....	77
Εικόνα 7.12.6: Παραμορφώσεις στο ελαφρωμένο σχέδιο βάσης.....	77
Εικόνα 8.1.1: Δοκιμαστική διάταξη σερβοκινητήρα.....	79
Εικόνα 8.1.2: Τελική μορφή αεροφυλακίου, σωλήνα επενδυμένων με αλουμινοταινία .....	80
και ρυθμιστών πίεσης .....	80
Εικόνα 8.1.3: Διαδικασία ρύθμισης πίεσης εξόδου από το δεύτερο ρυθμιστή πίεσης με χρήση κλειδιού τύπου Allen.....	81
Εικόνα 8.1.4: Τελική μορφή assembly τιμονιού και χειριστηρίων shifter .....	81
Εικόνα 8.1.5: Τελική μορφή συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου .....	82
Εικόνα 8.1.6: Τελική μορφή assembly σερβοκινητήρα και συμπλέκτη – 1 <sup>η</sup> όψη.....	82
Εικόνα 8.1.7: Τελική μορφή assembly σερβοκινητήρα και συμπλέκτη – 2 <sup>η</sup> όψη.....	83
Εικόνα 8.1.8: Συνολικός χρόνος upshift 177 ms, χωρίς τη χρήση συμπλέκτη, αλλά με χρήση gearcut (spark/fuel cut).....	84
Εικόνα 8.1.9: Συνολικός χρόνος downshift 260 ms, με χρήση συμπλέκτη.....	84
Εικόνα Β.1: Γεωμετρία περιστροφής πεντάλ αλλαγής ταχύτητας.....	91

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.4: Βήματα ανάπτυξης συστήματος .....	21
Πίνακας 3.1: Ανάγκες περιστροφής πεντάλ αλλαγής ταχύτητας .....	28
Πίνακας 5.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών σερβοκινητήρων.....	39
Πίνακας 6.1: Χρόνοι ενεργοποίησης βαλβίδας .....	48

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Θεσμός Formula Student

Ο θεσμός του Formula Student ξεκίνησε από την Αμερική το 1980 με πρωτοβουλία της SAE (Society of Automotive Engineers), με στόχο να φέρει τους νέους εν δυνάμει μηχανικούς σε επαφή με πραγματικά προβλήματα μηχανικής προετοιμάζοντάς τους για την αγορά εργασίας, αλλά και να τους κάνει να γνωρίσουν καλύτερα το χώρο του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Πιο συγκεκριμένα, το Formula Student είναι ένας διεθνής διαγωνισμός, στον οποίο συμμετέχουν ομάδες φοιτητών προπτυχιακού και μεταπτυχιακού επιπέδου, εκπροσωπώντας η κάθε μία τα Πανεπιστήμιά τους, οι οποίες σχεδιάζουν, κατασκευάζουν και τελικά αγωνίζονται, κάθε χρόνο, με ένα πλήρως λειτουργικό μονοθέσιο στην περίπτωση που συμμετέχουν στο διαγωνισμό στο επίπεδο Class 1. Αντίστοιχα υπάρχει η κατηγορία Class 2, στην οποία οι ομάδες παρουσιάζουν τα σχέδιά τους και μερικά κατασκευασμένα εξαρτήματα, αλλά και η κατηγορία Class 3, όπου οι ομάδες παρουσιάζουν αποκλειστικά και μόνο τα σχέδιά τους για το μονοθέσιό τους.

Τα πρώτα χρόνια του διαγωνισμού οι ομάδες είχαν πολύ χαμηλό προϋπολογισμό, όμως με την πάροδο των ετών και την είσοδο του θεσμού στην Ευρώπη και την προσέλκυση χορηγών όπως μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, τα κεφάλαια των ομάδων άρχισαν να αυξάνονται ραγδαία, φτάνοντας πλέον για μεγάλες ομάδες της Ευρώπης και όχι μόνο, ποσά άνω του μισού εκατομμυρίου ευρώ. Έτσι, ειδικά τα τελευταία χρόνια, ο θεσμός συμβαδίζει με τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις που εφαρμόζονται και στις μεγαλύτερες κατηγορίες μηχανοκίνητου αθλητισμού, όπως η Formula 1, εμφανίζοντας δείγματα τεχνολογικής πρωτοπορίας όπως είναι τα πλαίσια κατασκευασμένα εξ' ολοκλήρου από CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics).



Εικόνα 1.1.1: Μονοθέσιο Formula Student του Πολυτεχνείου του Μονάχου

Διαγωνισμοί Formula Student διοργανώνονται σε όλες τις ηπείρους της Γης με κορυφαίους αυτούς της Ευρώπης και συγκεκριμένα της Γερμανίας (Formula Student Germany) και της

Αυστρίας (Formula Student Austria) που συγκεντρώνουν τους μεγαλύτερους συντελεστές ανταγωνιστικότητας (0,98-0,99 με μέγιστο το 1). Κάθε διαγωνισμός αποτελεί ξεχωριστή οντότητα, ωστόσο τα μονοθέσια που συμμετέχουν σε αυτούς πρέπει να πληρούν είτε τους κανονισμούς της SAE, είτε τους κανονισμούς του Formula Student Germany. Οι ευρωπαϊκοί διαγωνισμοί με εξαίρεση αυτούς της Ιταλίας και του Ηνωμένου Βασιλείου ακολουθούν τους γερμανικούς κανονισμούς.

Οι κανονισμοί του Formula Student είναι αρκετά εκτενείς και ορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη μορφή ενός τέτοιου μονοθεσίου. Περιλαμβάνουν από βασικές διαστάσεις ενός μονοθεσίου (π.χ. ελάχιστο μεταξόνιο 1525mm) μέχρι πρότυπα και κανονισμούς ασφαλείας που θα πρέπει να ακολουθούν (π.χ. homologation για στολές οδηγών, ζώνες ασφαλείας, χαρακτηριστικά αντοχών πλαισίου κ.α.), αφήνοντας ωστόσο άπλετο χώρο για καινοτομίες. Επίσης περιέχουν κανονισμούς ειδικούς για την κάθε κατηγορία μονοθεσίου (θερμικό, ηλεκτρικό), ενώ τα τελευταία δύο χρόνια έχει εισαχθεί μια νέα κατηγορία οχημάτων, αυτή των αυτόνομων.

Ένας τυπικός διαγωνισμός Formula Student αποτελείται τόσο από δυναμικά όσο και στατικά αγωνίσματα, τα οποία συμβάλλουν στην τελική κατάταξη της ομάδας. Στα δυναμικά αγωνίσματα το μονοθέσιο αφού περάσει τους απαραίτητους ελέγχους συμμόρφωσης με τους κανονισμούς (μηχανικός έλεγχος, έλεγχος φρένων, στάθμη θορύβου, tilt test) συμμετέχει σε αγώνες επιτάχυνσης, skidpad (στροφή σε δύο κύκλους με μέση ακτίνα 18,25m), πλήρους πίστας συνολικού μήκους περίπου ενός χιλιομέτρου αλλά και αντοχής μήκους 22 χιλιομέτρων στην οποία μετράται και η κατανάλωση καυσίμου που είχε. Αντίστοιχα τα στατικά αγωνίσματα είναι τρία. Στο πρώτο, το οποίο ονομάζεται Design Event (Αγώνας Σχεδιασμού), τα μέλη της ομάδας καλούνται να απαντήσουν σε ερωτήσεις έμπειρων μηχανικών-κριτών ώστε να αξιολογηθούν για τις αποφάσεις που πήραν κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του μονοθεσίου τους. Στο Cost Report (Αναφορά Κόστους) οι ομάδες καλούνται να σχηματίσουν έναν πλήρη Πίνακα Υλικών (Bill of Materials), να κοστολογήσουν ένα κομμάτι του ρεαλιστικά και να αποδείξουν ότι έχουν πλήρη επίγνωση των σύγχρονων μεθόδων κατεργασιών και κατασκευών. Τέλος, εξίσου σημαντικό στατικό αγώνισμα αποτελεί αυτό του Επιχειρηματικού Σχεδίου (Business Plan Presentation) όπου η ομάδα καλείται να παρουσιάσει ένα ελκυστικό πακέτο/ιδέα προς τους δυνητικούς επενδυτές.

## 1.2 Καθορισμός στόχου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι κανονισμοί των διαγωνισμών Formula Student ορίζουν διάφορα κομμάτια του μονοθεσίου ανάμεσά τους και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και των παρελκόμενων του όπως το σύστημα εισαγωγής, για το οποίο ορίζουν πως όλος ο αέρας που εισέρχεται στον κινητήρα θα πρέπει σε κάποιο σημείο της διαδρομής της εισαγωγής να περνά από μια κυκλική διατομή διαμέτρου 20mm [\[1\]](#), το λεγόμενο restrictor (περιοριστή). Για το λόγο αυτό, αλλά και για λόγους βάρους οι περισσότερες ομάδες επιλέγουν έναν κινητήρα από μηχανές μεσαίου κυβισμού (συνήθως 450 – 600cc), οι οποίες στην πλειονότητά τους διαθέτουν ενσωματωμένο σειριακό κιβώτιο ταχυτήτων 5 έως 6 σχέσεων.

Προκειμένου να πραγματοποιούνται οι αλλαγές ταχυτήτων από τον οδηγό πρέπει να γίνουν κάποιες μετατροπές στο σύστημα αλλαγής ταχυτήτων, δεδομένου του γεγονότος πως ο κινητήρας βρίσκεται στο πίσω μέρος του μονοθεσίου (στην πλάτη του οδηγού) οπότε δεν



μπορεί να κάνει χρήση του λεβιέ που υπάρχει στο πλαϊνό μέρος του κινητήρα και χρησιμοποιείται από τον αναβάτη της μηχανής μέσω του ποδιού του. Είναι εξαιρετικά σημαντικό ο στόχος που θα τεθεί για το σύστημα αυτό, να μην αφορά μόνο σε ένα απλά λειτουργικό σύστημα, αλλά και στην αύξηση της απόδοσης, μέσω της ελάττωσης των χρόνων αλλαγής ταχυτήτων [2], όπως και στη βελτίωση της εργονομίας του οδηγού, ώστε αυτός να μπορεί να πραγματοποιήσει αλλαγές ταχυτήτων χωρίς να χρειάζεται να απομακρύνει τα χέρια του από το τιμόνι, ειδικά σε περιπτώσεις που η αλλαγή ταχύτητας απαιτείται να γίνει κατά τη διάρκεια μιας στροφής. Η αλλαγή ταχυτήτων κατά τη διάρκεια μιας στροφής θα πρέπει γενικά να αποφεύγεται για να αποφευχθεί πιθανή δυναμική αστάθεια του μονοθέσιου [3], αλλά κάποιες φορές αυτό κρίνεται απαραίτητο λόγω της φύσης των πιστών τύπου Formula Student.

Έχοντας υπ' όψιν τα παραπάνω κρίνεται επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου ημι-αυτόματου συστήματος αλλαγής ταχυτήτων, το οποίο και θα εγκατασταθεί στο τρίτο μονοθέσιο της ομάδας Formula Student του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Prom Racing, τη σεζόν 2017-2018, το οποίο θα χρησιμοποιεί ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης, αυστριακής κατασκευής, μάρκας KTM και συγκεκριμένα το μοντέλο 500 EXC του έτους 2012. Ο κινητήρας αυτός είναι αρκετά δημοφιλής ανάμεσα στις ομάδες Formula Student, κυρίως λόγω του χαμηλού του βάρους. Ωστόσο το σύστημα που θα αναπτυχθεί δεν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα στον συγκεκριμένο κινητήρα, αλλά και σε πλήθος άλλων που προέρχονται από μοτοσυκλέτες, ενώ μπορεί να γίνει χρήση του και σε άλλες μορφές μηχανοκίνητου αθλητισμού πέρα από το Formula Student, όπου χρησιμοποιούνται σειριακά κιβώτια ταχυτήτων.

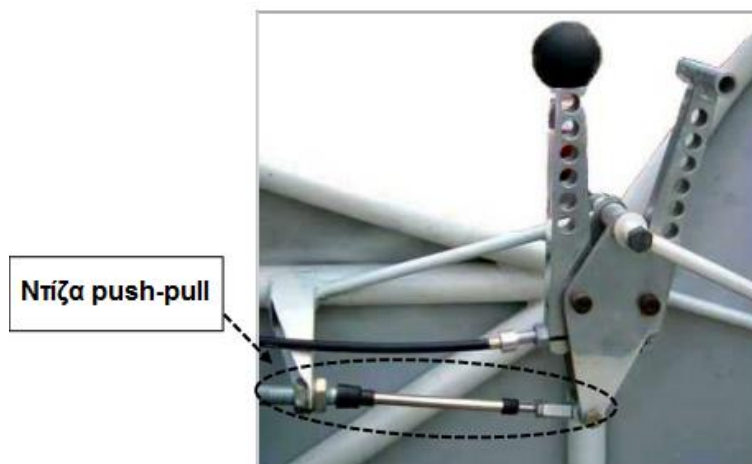
### **1.3 Βιβλιογραφία και State of the Art**

Πριν την έναρξη του σχεδιασμού του νέου μηχανισμού μια εκτενής έρευνα και ανάλυση των έτοιμων εμπορικών λύσεων αλλά και των ανεξάρτητων projects από άλλες ομάδες Formula Student πραγματοποιήθηκε, προκειμένου να προσδιοριστεί η καλύτερη δυνατή προσέγγιση στο σχεδιασμό των εξαρτημάτων του συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται μια καταγραφή των σημαντικότερων ευρημάτων της έρευνας αυτής.

#### **Αλλαγή ταχυτήτων – παραδοσιακός τρόπος και quick shifting**

Μια πολύ συχνή προσέγγιση αλλαγής ταχυτήτων είναι αυτής μέσω μιας ντίζας ναυτικού τύπου [4] (push-pull cable) λόγω της απλότητας και της αξιοπιστίας που αυτή προσφέρει (Εικόνα 1.2.1). Η ομάδα Prom Racing του ΕΜΠ έκανε χρήση ενός τέτοιου μηχανισμού στα προηγούμενα δύο μονοθέσια τα οποία διέθεταν 4-κύλινδρο μοτέρ μάρκας Yamaha μοντέλο R6, 600cc του 2003. Αντίστοιχοι μηχανισμοί χρησιμοποιούνται και σε άλλα πρωταθλήματα του μηχανοκίνητου αθλητισμού όπως το Indy Racing League [5]. Παρ' όλα αυτά η λύση αυτή δεν είναι η βέλτιστη τόσο από την πλευρά της εργονομίας του οδηγού όσο και απόδοσης-ταχύτητας των αλλαγών. Η ομάδα Formula Student από το Πανεπιστήμιο της Osaka στην Ιαπωνία, η οποία τερμάτισε 4<sup>η</sup> στη γενική κατάταξη το 2009 στο Formula Student Japan, αναφέρει πως στο μονοθέσιο του 2009 οι χρόνοι αλλαγής ταχυτήτων άγγιζαν τα 600ms [6]. Επίσης ανέφεραν πως στο επόμενο μονοθέσιό τους, όπου γινόταν χρήση ενός συστήματος

διακοπής της ανάφλεξης (ignition cut), το οποίο επέτρεπε να γίνονται αλλαγές χωρίς τη χρήση συμπλέκτη (quickshifting) έριξε τους χρόνους αλλαγής κατά το ήμισυ, ήτοι 300ms, ενώ τους επέτρεψε να κατακτήσουν την 1<sup>η</sup> θέση στη γενική κατάταξη. Αυτός ο τρόπος επιτρέπει τη στιγμιαία αποφόρτιση του κιβωτίου (chain slack) συγχρονίζοντας έτσι τις ταχύτητες περιστροφής τροχών και κινητήρα [7].



Εικόνα 1.2.1: Ντίζα push-pull για αλλαγή ταχυτήτων

Η μέθοδος αυτή του quickshifting αποτελεί τη βάση για μεγάλο αριθμό λύσεων που υπάρχουν διαθέσιμες στο εμπόριο και στοχεύουν είτε στην άνεση των αναβατών των μοτοσυκλετών είτε στη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε αγωνιστικές εφαρμογές.

Το Dynojet Quickshifter αποτελεί την απλούστερη μορφή αυτού του concept. Οι σχέσεις του κιβωτίου αλλάζουν χωρίς την παρεμβολή του συμπλέκτη στη διαδικασία ανεβάσματος (upshifting), αφού ένας αισθητήρας πίεσης αντιλαμβάνεται την πρόθεση του οδηγού να αλλάξει ταχύτητα και στέλνει ένα σήμα στην Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (ECU) του κινητήρα ώστε να διακόψει προσωρινά είτε την ανάφλεξη, είτε τον ψεκασμό, είτε και τα δύο [8]. Το HM Quickshifter (Εικόνα 1.2.2) λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τη διαφορά ότι εδώ ένας αισθητήρας παραμόρφωσης (strain gauge) αντιλαμβάνεται την αλλαγή που πρόκειται να εκτελεστεί, αντικαθιστώντας έτσι τον αισθητήρα πίεσης. Αυτό συμβάλλει στη μείωση των κινούμενων μερών και άρα και της φθοράς αλλά και στη γρηγορότερη απόκριση του συστήματος. Αντίστοιχα το σύστημα QS4 της Bazzaz επιτρέπει τη ρύθμιση του χρόνου που το σύστημα θα στέλνει σήμα στην ECU. Τέλος, το Powershifter της Translogic (Εικόνα 1.2.3) λειτουργεί όπως τα προηγούμενα, με τη διαφορά ότι πλέον η αλλαγή της σχέσης στο κιβώτιο γίνεται με έναν γραμμικό ηλεκτρομηχανικό επενεργητή. Πολλές ομάδες Formula Student κάνουν χρήση τέτοιων έτοιμων λύσεων αλλά δεν είναι λίγες οι φορές που τα αποτελέσματα δεν ήταν τα επιθυμητά. Όταν η Prom Racing χρησιμοποίησε μια τέτοια λύση της Translogic τα αποτελέσματα μετά από άφορτη δοκιμή του μηχανισμού ήταν κατώτερα των προσδοκιών μιας και η ταχύτητα μιας αλλαγής έφτανε τα 400ms, ενώ το βάρος του μηχανισμού ήταν αρκετά μεγάλο (περίπου 2kg). Άλλες ομάδες όπως αυτή του UC Berkeley [9] χρησιμοποιώντας ένα παρόμοιο προϊόν, το FlatShifter, έχουν επιτύχει αλλαγές με χρόνους κάτω από 200ms, ωστόσο ακόμα κι αυτοί οι χρόνοι δεν κρίνονται ικανοποιητικοί για τις ανάγκες της Prom Racing.



Εικόνα 1.2.2: HM Quickshifter Strain Gauge



Εικόνα 1.2.3: Translogic Powershifter

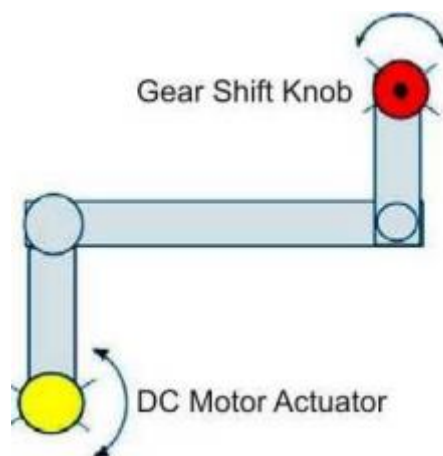
Η ομάδα του Πανεπιστημίου της Γλασκόβης [10] δημιούργησε έναν δικό της ηλεκτρομηχανικό επενεργητή ο οποίος ζύγιζε 2kg ενώ μπορούσε να παράγει μια δύναμη 50N, η οποία όμως δεν επαρκούσε για αλλαγή ταχύτητας χωρίς τη χρήση του συμπλέκτη (speed shifting), ενώ με χρήση συμπλέκτη, η αλλαγή ταχύτητας χρειαζόταν 200ms, χωρίς να υπολογίζεται ο χρόνος ενεργοποίησης του συμπλέκτη.

### **Projects ημι-αυτόματης ενεργοποίησης συμπλέκτη**

Κανένα, ωστόσο, από τα προαναφερθέντα προϊόντα δεν ασχολείται με τη μείωση του χρόνου αλλαγής κατεβάσματος ταχύτητας. Κάποιες ομάδες Formula Student έχουν ασχοληθεί με τέτοια projects, εκ των οποίων τρία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Παρ' όλα αυτά οι λύσεις που προτείνονται δεν είναι καθολικές, καθώς αφορούν στα συγκεκριμένα αυτοκίνητα των ομάδων αυτών (design specific), ενώ κάνουν χρήση πόρων που δεν είναι ευρέως διαθέσιμα (π.χ. αισθητήρας θέσης μύλου ταχυτήτων). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρόνοι που αναφέρονται εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο μέτρησης, ενώ αναφέρονται κυρίως στους χρόνους ενεργοποίησης των επενεργητών, αγνοώντας τους χρόνους του ελεγκτή, των πηνίων (solenoids), τον μεταβατικό (transient) χρόνο και φυσικά το χρόνο της ανθρώπινης αντίδρασης.

Η πρώτη προσπάθεια έγινε από κοινού από το Πανεπιστήμιο Kanazawa και την εταιρεία KADO Corporation [11], οι οποίοι έκαναν χρήση ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος DC με μειωτήρα, ώστε να ελέγξουν τόσο το συμπλέκτη όσο και το σύστημα αλλαγής ταχυτήτων στο μονοθέσιο. Αρχικά προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν ένα κιβώτιο συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (CVT), αλλά ο ξηρός ιμάντας δεν μπορούσε να μεταφέρει απρόσκοπτα την υψηλή ροπή, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην αποδίδει ικανοποιητικά. Η τελική λύση που εφάρμοσαν είχε ως αποτέλεσμα βελτιωμένες αλλαγές ταχυτήτων (210ms), ωστόσο ο χρόνος ενεργοποίησης του συμπλέκτη ήταν υπερβολικά υψηλός (1344ms). Αυτό οφειλόταν στον χαμηλών δυνατοτήτων μικροελεγκτή που χρησιμοποιούσαν (καθυστέρηση παλμοευρικής διαμόρφωσης – PWM στο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 1062ms), καθώς και στις δυσκολίες και τις απαιτήσεις βαθμονόμησης (calibration) του DC κινητήρα. Οι οδηγοί ωφελήθηκαν από τη χρήση δύο μόνο πεντάλ (γκάζι και φρένο), αλλά το σύστημα τελικά δεν χρησιμοποιήθηκε λόγω της πολύ αργής απόκρισης.

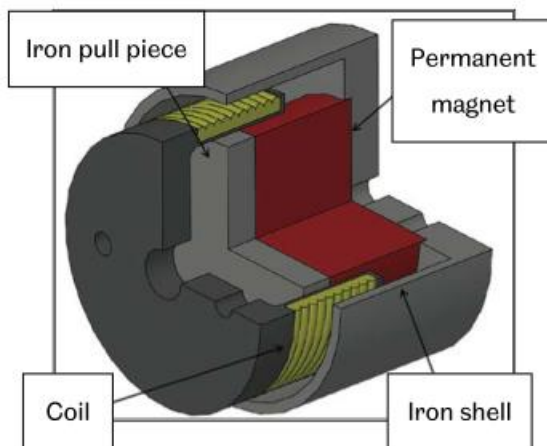
Μια άλλη λύση που εφαρμόστηκε από το Πολυτεχνείο του Μιλάνου [12], χρησιμοποιούσε πάλι κινητήρες συνεχούς ρεύματος για την εκτέλεση της αλλαγής ταχύτητας χωρίς όμως να ενεργοποιεί απευθείας το συμπλέκτη. Αντιθέτως, έκανε χρήση ενός υδραυλικού εμβόλου (master cylinder) στο συμπλέκτη, ώστε να μειώσει την απαιτούμενη δύναμη από τον DC κινητήρα. Η προσέγγισή τους αυτή μείωσε το χρόνο αλλαγής ταχυτήτων ραγδαία (20ms αγνοώντας το χρόνο ενεργοποίησης του συμπλέκτη), αλλά ο σχεδιασμός τους έκανε χρήση σύνθετων συνδέσμων και ευαίσθητης κινηματικής, τα οποία εισήγαν δυσκολίες κατασκευής. Επίσης οι δύο αυτοί μηχανισμοί απαιτούσαν ξεχωριστό χειρισμό από τον οδηγό, καθιστώντας τη χρήση του συστήματος δύσκολη. Τέλος, το σύστημα δεν είχε έλεγχο κλειστού βρόχου, οπότε με την απουσία του feedback υπήρχε μεγάλη δυσκολία εμπλοκής της νεκράς ταχύτητας, αφού αυτή απαιτεί μικρότερη διαδρομή στο λεβιέ, καθώς βρίσκεται ανάμεσα στην 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σχέση.



Εικόνα 1.2.4: Συνδεσμολογία αλλαγής ταχυτήτων από το Πολυτεχνείο του Μιλάνου

Το τρίτο concept, από το Πανεπιστήμιο της Pisa [13], εισήγαγε μια καινοτόμα λύση, αυτή των επενεργητών πηνίων φωνής. Το σύστημα είχε πολύ καλή απόδοση (40ms για αύξηση ταχύτητας), ενώ έκαναν χρήση κουμπιών για την επιλογή της νεκράς, αλλά και για την εκκίνηση (launch control), πράγματα τα οποία έκαναν το σύστημα πολύ πιο ανταγωνιστικό σε σχέση με τα δύο προαναφερθέντα. Ωστόσο, οι δύο επενεργητές του συστήματος

απαιτούσαν παροχή τάσης υψηλότερη των διαθέσιμων 12V, ενώ ο καθένας ζύγιζε 4kg, πολύ περισσότερο από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και τα παραδοσιακά χειροκίνητα συστήματα αλλαγής ταχυτήτων. Ενώ το σύστημα είχε έλεγχο κλειστού βρόχου, το feedback δινόταν μέσω ενός αισθητήρα θέσης ταχύτητας, ο οποίος δύσκολα είναι διαθέσιμος σε πολλούς κινητήρες, ανάμεσά τους και ο KTM 500 EXC.



Εικόνα 1.2.5: Επενεργητής πηνίου φωνής

#### 1.4 Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός αυτού του project αφορά στην ανάπτυξη ενός ημι-αυτόματου συστήματος αλλαγής ταχυτήτων για ένα μονοθέσιο τύπου Formula Student. Τα επιμέρους βήματα της ανάπτυξης αυτού αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα 1.4:

Κατηγορίες	Στόχοι
Αισθητήρες/Επενεργητές	1. Ανάλυση των δυνάμεων και μετατροπή τους σε απαιτήσεις για αλλαγή ταχυτήτων και χρήση του συμπλέκτη
	2. Επιλογή τύπου επενεργητή αλλαγής ταχυτήτων και δημιουργία συναρμολογήματος
	3. Επιλογή μεθόδου αποσύμπλεξης κινητήρα και σχεδιασμός του συστήματος
Σύστημα Ελέγχου	4. Συστήματα ελέγχου/ηλεκτρονική πλατφόρμα και προγραμματισμός αυτής
Σχεδιασμός στηρίξεων	5. Σχέδια CAD για όλα τα μέρη του συστήματος
	6. Σχεδιασμός στηρίξεων
Κατασκευή/Δοκιμές/Αντιμετώπιση προβλημάτων (Troubleshooting)	7. Κατασκευή, δοκιμή και βαθμονόμηση

Πίνακας 1.4: Βήματα ανάπτυξης συστήματος

Η ανάπτυξη του συστήματος αυτού συνεπώς αφορά σε μια σύνθεση ανάλυσης, σχεδιασμού, βελτιστοποίησης και δοκιμών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ – PRODUCT DESIGN SPECIFICATION (PDS)

Χρησιμοποιώντας τη βιβλιογραφία, τα διαθέσιμα εξαρτήματα, τους στόχους του project αλλά και τους εξειδικευμένους κανονισμούς του Formula Student δημιουργήθηκε η ακόλουθη λίστα PDS:

### 2.1 Επιδόσεις:

- Ανέβασμα ταχύτητας (upshift) κάτω από 300ms, κατέβασμα ταχύτητας (downshift) κάτω από 375ms
- Αξιόπιστες αλλαγές ταχυτήτων (σφάλμα 1 στις 1000 αλλαγές) με ή και χωρίς χρήση αισθητήρα θέσης μύλου ταχυτήτων

### 2.2 Περιβάλλον λειτουργίας:

- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας κινητήρα 120°C
- Πολλαπλά προφίλ δονήσεων κυρίως από τη λειτουργία του κινητήρα αλλά και από τις ανωμαλίες του δρόμου
- Αντοχή σε καιρικά φαινόμενα (βροχή, σκόνη, υγρασία)

### 2.3 Χρόνος ζωής:

- Μία αγωνιστική σεζόν Formula Student, χωρίς αλλαγές σχεδίων (6 μήνες)

### 2.4 Συντήρηση:

- Έλεγχος παρεχόμενης τάσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα (13V+) πριν τη χρήση
- Τυπικός έλεγχος και συντήρηση πνευματικού/υδραυλικού συστήματος σε κάθε μεγάλη επισκευή κινητήρα, τυπικά 1 φορά κάθε σεζόν (έλεγχος στάθμης, αλλαγή o-rings κλπ.)

### 2.5 Κόστος:

- Μέχρι 1.000 Ευρώ (βάσει του διαθέσιμου προϋπολογισμού της ομάδας)

### 2.6 Ανταγωνισμός:

- Εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα που κάνουν χρήση του συμπλέκτη δεν υπάρχουν. Συστήματα που είναι σχεδιασμένα για μονοθέσια Formula Student υπάρχουν αλλά αφορούν αποκλειστικά σε συγκεκριμένα σχέδια ομάδων [\[12\]](#) & [\[13\]](#).

### 2.7 Κατασκευασιμότητα:

- Ίδια μέσα: φρέζα CNC, συμβατικός τόρνος, τυπικός εξοπλισμός μηχανουργείου (δράπανο, γωνιοτροχός κτλ.)
- Εξωτερικοί συνεργάτες: Κοπή Laser, Υδροκοπή, 3D-Printing

### 2.8 Πατέντες:



Το τελικό σύστημα δε θα πρέπει να παραβιάζει τις ακόλουθες κατοχυρωμένες πατέντες:

- US3894442 A
- DE102012219933 A1
- US4488455 A
- CN2436351 Y

#### 2.9 Ποσότητα:

- Ένα ολοκληρωμένο σύστημα για χρήση στο μονοθέσιο P18

#### 2.10 Μέγεθος:

- Το σύστημα περιορίζεται χωρικά από το σασί, τον κινητήρα, το γρανάζι, την αλυσίδα, το προστατευτικό της αλυσίδας, τα καλώδια της ηλεκτρικής πλεξούδας και τις βάσεις του κινητήρα

#### 2.11 Βάρος:

- Προϊόν για χρήση σε εφαρμογές μηχανοκίνητου αθλητισμού: το τελικό συναρμολόγημα δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 2.5 κιλά

#### 2.12 Υλικά:

- Διαθέσιμα μέταλλα όπως διάφορα κράματα αλουμινίου (π.χ. 7075-T6) αλλά και διάφορα ατσάλια όπως DOMEX και DOCOL
- Διαθέσιμη πληθώρα πλαστικών όπως ABS, PLA, CPE κτλ για χρήση μεθόδων ταχείας προτυποποίησης όπως το 3D-Printing

#### 2.13 Κανονισμοί:

Βάσει των κανονισμών Formula Student Germany του έτους 2018 [\[1\]](#) το σύστημα θα πρέπει να είναι σύμφωνο με τους ακόλουθους κανονισμούς (μεταφρασμένους από τα Αγγλικά):

##### T 8.1.1:

Κάθε σύστημα στο όχημα το οποίο κάνει χρήση συμπιεσμένου αερίου σαν μέσο επενέργειας θα πρέπει να είναι σύμφωνο με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Το αέριο δε θα πρέπει να είναι εύφλεκτο.
- Το αεροφυλάκιο και το έμβολο θα πρέπει να είναι αγοραστά, να έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για την πίεση που χρησιμοποιείται και να φέρουν αντίστοιχη πιστοποίηση.
- Ένας ρυθμιστής πίεσης θα πρέπει να χρησιμοποιείται και να είναι απευθείας συνδεδεμένος πάνω στο αεροφυλάκιο.
- Το αεροφυλάκιο, το έμβολο και οι σωλήνες θα πρέπει να είναι προστατευμένα σε περίπτωση ανατροπής του οχήματος, σύγκρουσης από πάσα κατεύθυνση, ή ζημιά που μπορεί να προκληθεί από περιστρεφόμενα εξαρτήματα.
- Το αεροφυλάκιο, το έμβολο και ο ρυθμιστής πίεσης θα πρέπει να βρίσκονται εντός του rollover protection envelope βάσει του T 2.1.1, αλλά να μη βρίσκονται εντός του χώρου του οδηγού (κόκπιτ).



- Το αεροφυλάκιο και το έμβολο θα πρέπει να είναι ασφαλώς προσδεμένα στο σασί, τον κινητήρα ή τη μετάδοση.
- Ο άξονας του αεροφυλακίου δε θα πρέπει να είναι στραμμένος προς τον οδηγό.
- Το αεροφυλάκιο θα πρέπει να είναι μονωμένο από οποιεσδήποτε πηγές θερμότητας.
- Οι σωληνώσεις και οι σύνδεσμοι θα πρέπει να είναι κατάλληλοι για τη μέγιστη δυνατή πίεση λειτουργίας του συστήματος.

#### T 8.2.1:

Ο οδηγός και οποιοσδήποτε άλλος βρίσκεται κοντά στο όχημα θα πρέπει να είναι προστατευμένος από τυχόν υδραυλικές αντλίες και σωληνώσεις με πίεση που ξεπερνά τα 2100 kPa. Τα προστατευτικά θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ατσάλι είτε αλουμίνιο με ελάχιστο πάχος 1mm. Οι σωληνώσεις των φρένων δεν θεωρούνται σωληνώσεις υψηλής πίεσης.

#### 2.14 Εργονομία:

- Ο οδηγός θα έχει στη διάθεσή του ένα κινητό πάνω στο τιμόνι στο οποίο θα φαίνεται η επιλεγμένη ταχύτητα
- Ο οδηγός θα κάνει χρήση του συστήματος μέσω δύο paddles για upshift και downshift και ενός raddle με ενσωματωμένο ένα ποτενσιόμετρο για χρήση του συμπλέκτη στηριγμένα στο πίσω μέρος του τιμονιού.

#### 2.15 Εγκατάσταση συστήματος:

- Θα πρέπει να μπορεί να πραγματοποιηθεί από τα μέλη της ομάδας
- Η αναπλήρωση της πίεσης στο αεροφυλάκιο θα πρέπει να είναι εύκολα εκτελέσιμη λόγω της συχνής εκτέλεσής της.

#### 2.16 Χρονικός ορίζοντας:

- Ολοκλήρωση σχεδιασμού: 31 Δεκεμβρίου 2017
- Ολοκλήρωση κατασκευής: 31 Μαρτίου 2018
- Ολοκλήρωση δοκιμών: 30 Ιουνίου 2018



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Για την επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων για όλους τους επενεργητές θα πρέπει να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις σε δυνάμεις, ροπές, γωνίες και αποστάσεις.

### 3.1 Μηχανισμός αλλαγής ταχυτήτων

Για την αλλαγή των ταχυτήτων στον κινητήρα, υπό κανονικές συνθήκες χρησιμοποιείται ένα περιστροφικό πετάλι, το οποίο κινεί ο αναβάτης της μηχανής με το πόδι του. Η περιστροφική αυτή κίνηση προκαλεί την κίνηση του μύλου ταχυτήτων εσωτερικά του κινητήρα προκαλώντας έτσι τη σειριακή αλλαγή των ταχυτήτων κατά σειρά  $1 > N > 2 > 3 > 4 > 5 > 6$ , όπου N η νεκρά ταχύτητα, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στην 1<sup>η</sup> και τη 2<sup>α</sup> ταχύτητα και μπορεί να επιλεγεί με μισή από το κανονικό περιστροφή του πεταλιού.

Χρησιμοποιώντας το αυθεντικό πετάλι που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής του κινητήρα, καθώς κι ένα αναλογικό δυναμόμετρο ελατηρίου μαζί με μια κάμερα με δυνατότητα καταγραφής βίντεο υψηλής ταχύτητας, έγιναν δοκιμές αλλαγής ταχυτήτων, τόσο ανεβάσματος, όσο και κατεβάσματος. Αναλύοντας τα βίντεο, η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε κινούνταν γύρω στα 150N. Για επαλήθευση των μετρήσεων και λόγω της χαμηλής διακριτότητας που είχε το χρησιμοποιούμενο δυναμόμετρο αλλά και του σφάλματος ανάγνωσης έγινε χρήση ενός ηλεκτρονικού δυναμόμετρου Mitutoyo 940-224E (Εικόνα 3.1.1), δυνατότητας μέτρησης μέχρι 500N, με ενσωματωμένη δυνατότητα καταγραφής της μέγιστης δύναμης (peak force). Με χρήση αυτού του οργάνου η μέγιστη απαιτούμενη δύναμη βρέθηκε να είναι 130N. Οι δοκιμές αυτές έγιναν με τον κινητήρα να μη βρίσκεται σε λειτουργία, γεγονός που σημαίνει πως αν αυτός βρίσκεται σε λειτουργία ο μηχανισμός θα λιπαίνεται και η απαιτούμενη δύναμη θα είναι μικρότερη. Δυστυχώς τη χρονική στιγμή που έπρεπε να γίνουν αυτές οι μετρήσεις δεν υπήρχε η δυνατότητα ο κινητήρας να τεθεί σε λειτουργία λόγω μη ύπαρξης κάποιου κατάλληλου πάγκου δοκιμών (test bench). Σε κάθε περίπτωση οι μετρήσεις αφορούσαν το worst case scenario.



Εικόνα 3.1.1: Μέτρηση απαιτούμενης δύναμης αλλαγής ταχύτητας

Η δύναμη αυτή των 130N μετατρέπεται σε ροπή στον άξονα περιστροφής του πεταλιού (απόσταση σημείου μέτρησης δύναμης από άξονα περιστροφής ίση με  $d=0,11m$ ) ίσης με  $T=Fxd=130x0.11=14.3Nm$ .

Για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης διαδρομής του πεταλιού έγιναν μετρήσεις έχοντας ως σημείο αναφοράς ένα οριζόντιο τραπέζι στο οποίο βρισκόταν ο κινητήρας, μετρώντας κάθε φορά την κάθετη απόσταση του άκρου του πεταλιού από το τραπέζι. Έτσι καταλήξαμε στις ακόλουθες μετρήσεις, οι οποίες μετατρέπονται σε γωνίες περιστροφής του άξονα όπως φαίνεται στο [Παράρτημα Β](#):

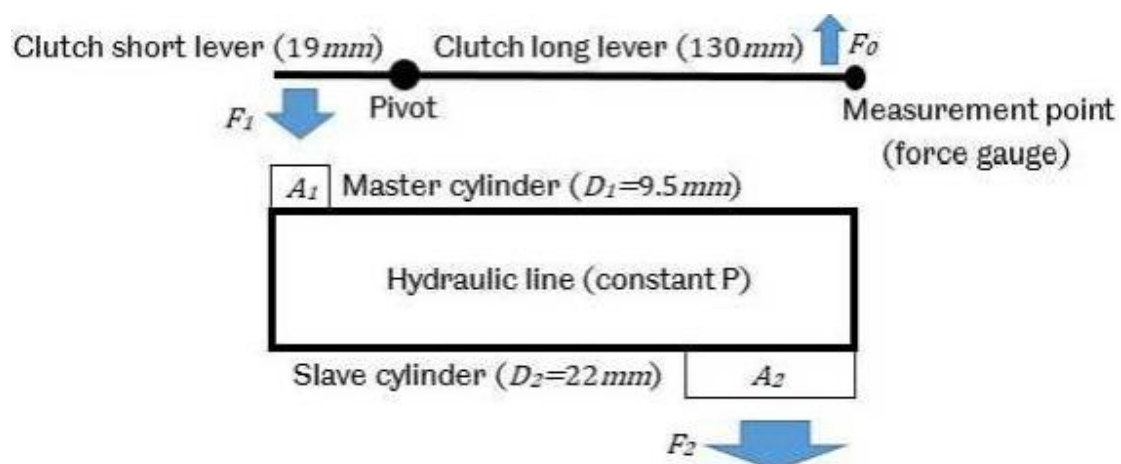
Τύπος αλλαγής	Κάθετο μήκος (mm)	Γωνία περιστροφής (μοίρες) ως προς το οριζόντιο τραπέζι
Ανέβασμα ταχύτητας	100	1,9
Πρώτη σε νεκρά	85	9,8
Ακίνητο πετάλι	66	20
Κατέβασμα ταχύτητας	35	38,6

Πίνακας 3.1: Ανάγκες περιστροφής πεντάλ αλλαγής ταχύτητας

Συνεπώς προς κάθε κατεύθυνση η γωνία μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν γύρω στις 18 μοίρες για αλλαγή ταχύτητας (upshift ή downshift), ωρολογιακά για upshift και αντι-ωρολογιακά για downshift, και 10 μοίρες ωρολογιακά για μετάβαση σε νεκρά.

### 3.2 Συμπλέκτης

Ο κινητήρας είναι εφοδιασμένος από τον κατασκευαστή με υδραυλικό σύστημα συμπλέκτη (Εικόνα 3.2.1), όπου γίνεται χρήση ενός slave cylinder μεγάλης διατομής – μεγάλης δύναμης (large bore – large force  $A_2 - F_2$ ), ο οποίος απομακρύνει τους δίσκους του συμπλέκτη όταν αυτός ενεργοποιηθεί από τον master cylinder μικρής διατομής – μικρής δύναμης (small bore – small force  $A_1 - F_1$ ). Όταν αυτός ο μηχανισμός χρησιμοποιείται στη μοτοσυκλέτα, ο master cylinder βρίσκεται πάνω στη λαβή του τιμονιού κι ενεργοποιείται μέσω ενός μοχλικού μηχανισμού τύπου «μανέτας» με σημείο pivot. Η συμπεριφορά του συστήματος ως προς τις απαιτήσεις της δύναμης είναι γραμμική, αντίθετα με το μηχανισμό αλλαγής ταχυτήτων, οπότε η μέτρηση της δύναμης μπορεί να γίνει με τα ίδια μέσα και τρόπο.



Εικόνα 3.2.1: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος συμπλέκτη

Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε ήταν 35N ( $F_{0max}$ ). Οπότε η  $F_{2max} = 1,3kN$  είναι η απαιτούμενη δύναμη που αποσυμπλέκει πλήρως τον συμπλέκτη.

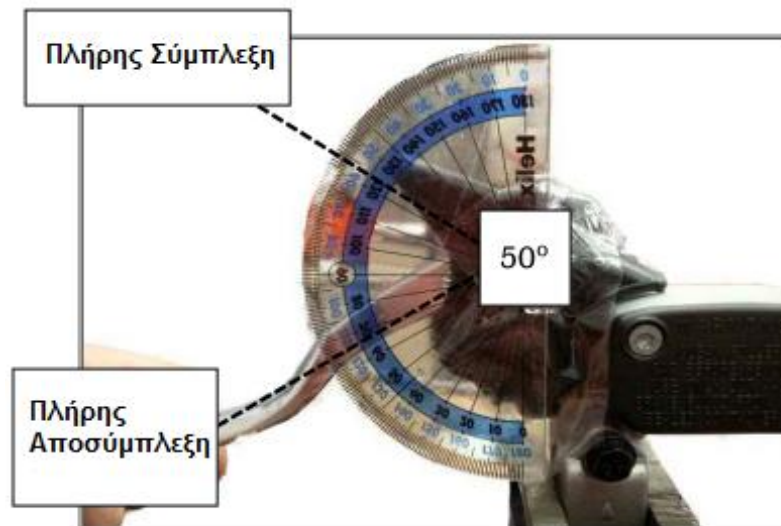
$$T_{pivot} = \text{σταθερή} = F_0 * 0,13 = F_1 * 0,019$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} * F_1 = \frac{\pi * 0,011^2}{\pi * 0,00475^2} * 35 * \frac{0,13}{0,019} = 1287N$$

Η γωνία περιστροφής του λεβιέ μετρήθηκε με μοιρογνωμόνιο και είναι ίση με 50 μοίρες για πλήρη αποσύμπλεξη. Συνεπώς για πλήρη αποσύμπλεξη οι δίσκοι του συμπλέκτη θα πρέπει να μετακινηθούν 3,1mm σύμφωνα με τους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$l_1 = 2 * \pi * 0,019 * \frac{50}{360} = 0,01657m$$

$$l_2 = 0,01657 * \frac{240}{1287} = 0,0031m$$



Εικόνα 3.2.2: Διαδρομή «μανέτας» συμπλέκτη



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Η βασική απαίτηση για το σύστημα αυτό είναι η υψηλή ταχύτητα επενέργειας και η δυνατότητα απόδοσης μιας μέσης δύναμης στον άξονα του μύλου του κιβωτίου ταχυτήτων. Μια ηλεκτρονική λύση θα ήταν προτιμότερη, λόγω κυρίως του ευκολότερου ελέγχου, αλλά δυστυχώς οι διαθέσιμες λύσεις δεν είναι αρκετά γρήγορες. Για παράδειγμα, το μοντέλο HDA2-2 της Servocity έχει περίοδο 950ms (διαδρομή αλλαγής και επαναφοράς στην ουδέτερη θέση), ενώ κοστίζει περί τα 150€, ενώ το Powershifter της Translogic, το οποίο έχει αναφερθεί παραπάνω έχει περίοδο 380ms αλλά κοστίζει περί τα 800€. Μια υδραυλική λύση δεν είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μιας και συνήθως αφορούν σε εφαρμογές με μεγάλα φορτία, ενώ το βάρος θα ήταν πολύ μεγάλο. Συνεπώς η λύση ενός πνευματικού συστήματος είναι η καταλληλότερη, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά αντίστοιχα προϊόντα όπως το Racegadgets Bundle, το οποίο όμως ζυγίζει 7 κιλά, καθιστώντας το εκτός προδιαγραφών. Επίσης το υπό σχεδιασμό σύστημα θα πρέπει να χρησιμοποιεί πεπιεσμένο αέρα, αντί κάποιου άλλου αερίου, όπως το CO<sub>2</sub>, λόγω της ευκολότερης διαθεσιμότητάς του στην ελληνική αγορά. Το εν λόγω σύστημα αναλύεται παρακάτω.

### 4.1 Πνευματικό Έμβολο

Για μείωση των προς κατασκευή κομματιών επιλέχθηκε η χρήση του πεταλιού αλλαγής ταχυτήτων μαζί με ένα πνευματικό έμβολο. Αξίζει να σημειωθεί πως ο άξονας του μύλου αλλαγής ταχυτήτων καταλήγει σε κωνικό πολύσφηνο (conical spline), το οποίο σημαίνει πως σε περίπτωση κατασκευής νέου μοχλού θα πρέπει να δημιουργηθεί το ίδιο πολύσφηνο, για τη δημιουργία του οποίου δεν διατίθεται ο κατάλληλος εξοπλισμός στο εργαστήριο της ομάδας. Επίσης λόγω της πολύ χαμηλής τοποθέτησης του κινητήρα στο σασί για λόγους μείωσης του κέντρου βάρους του συνόλου του μονοθεσίου, δεν υπήρχε διαθέσιμος χώρος ώστε το έμβολο να τοποθετηθεί οριζόντια, πράγμα που θα σήμαινε και την κατασκευή ενός νέου μοχλού αλλαγής ταχυτήτων. Για τη στήριξη του εμβόλου επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν οι δύο υπάρχουσες βίδες του εντατήρα της αλυσίδας του εκκεντροφόρου που βρίσκονται στην ίδια πλευρά με την έξοδο του άξονα του μύλου, ενώ για τη μέγιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης δύναμης του εμβόλου επιλέχθηκε η όσο το δυνατόν καθετότερη τοποθέτησή του. Αυτά οδήγησαν στην επιλογή σύνδεσης του εμβόλου με τον μοχλό αλλαγής ταχυτήτων σε μια απόσταση  $d = 70\text{mm}$  από τον άξονα του μύλου. Με δεδομένη αυτή την απόσταση και την υπολογισμένη από πριν απαιτούμενη ροπή αλλαγής ταχυτήτων μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη δύναμη του εμβόλου ως εξής:

$$F = \frac{T}{d} = \frac{14,3}{0,07} = 204\text{N}$$

Η δύναμη αυτή του εμβόλου συνδέεται άμεσα με τις βασικές διαστάσεις του εμβόλου μέσω της σχέσης  $F=P \times A$ , και δεδομένου ότι η παρεχόμενη τάση ρεύματος στο κύκλωμα του μονοθεσίου είναι 12V DC, οι ηλεκτροβαλβίδες που λειτουργούν με αυτή την τάση κατά την πλειοψηφία τους λειτουργούν στο εύρος πιέσεων 1-10bar (0,1-1MPa), επιλέγεται μια μέση

πίεση ίση με 5 bar ή αλλιώς 0,5MPa. Έτσι μπορεί να εκλεγεί η ελάχιστη διάμετρος του εμβόλου ως εξής:

$$D_{min} = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 * \sqrt{\frac{F}{P * \pi}} = 22,8mm$$

Η αμέσως μεγαλύτερη διαθέσιμη διάμετρος εμβόλου στο εμπόριο είναι 25mm. Για γωνία περιστροφής του άξονα του μύλου ίση με  $\Delta\theta=2*18=36$  μοίρες, η απαιτούμενη διαδρομή εμβόλου υπολογίζεται ίση με:

$$\Delta S = 2 * 70mm * \sin(18^\circ) = 43mm$$

Η αμέσως μεγαλύτερη διαθέσιμη διαδρομή εμβόλου στο εμπόριο είναι 50mm. Συνεπώς εκλέχθηκε από τον κατάλογο της FESTO το έμβολο με κωδικό DSNU-25-50-PPS-A. Το κόστος του εξαρτήματος δεν είναι γνωστό, καθώς αποτέλεσε χορηγία της εταιρείας FESTO προς την ομάδα Prom Racing.

#### 4.2 Πνευματική βαλβίδα ελέγχου

Ο ρόλος της πνευματικής βαλβίδας ελέγχου (pneumatic control valve) είναι να κατευθύνει τη ροή του αέρα σε μία από τις δύο διαθέσιμες εισόδους του εμβόλου. Θα πρέπει να έχει τρεις θέσεις, μία για upshift, μια για downshift και μία για τη θέση ηρεμίας του εμβόλου. Είναι προφανές πως θα πρέπει να έχει και το ρόλο της εκτόνωσης του αέρα στη μέση θέση (naturally exhausted) αφού το ελατήριο επαναφοράς του μύλου ταχυτήτων θα τείνει να επαναφέρει το έμβολο στη θέση ισορροπίας του. Δεδομένου ότι οι βαλβίδες 4/3 (4 πόρτες, 3 θέσεις) δεν είναι ευρέως διαθέσιμες για εφαρμογές με τάση 12V, επιλέγεται βαλβίδα 5/3 (με διπλή εκτόνωση). Η βαλβίδα ενεργοποιείται όταν εφαρμοστεί τάση σε ένα πηνίο στο ένα άκρο της, το οποίο στη συνέχεια μετακινεί ένα έμβολο ελευθερώνοντας έτσι την οδό του αέρα, ενώ όταν πάψει να εφαρμόζεται τάση, το έμβολο επιστρέφει στην αρχική θέση μέσω ενός ελατηρίου. Από τον κατάλογο της FESTO εκλέχθηκε η βαλβίδα με κωδικό VUVS-L20-P53E-MD-G18-F7-5C1. Το κόστος του εξαρτήματος δεν είναι γνωστό, καθώς αποτέλεσε χορηγία της εταιρείας FESTO προς την ομάδα Prom Racing.

#### 4.3 Παροχή αέρα

Το βασικό ζητούμενο είναι ο παρεχόμενος αέρας να βρίσκεται σε πίεση 1 bar, η οποία είναι και η μέγιστη επιτρεπτή από τα υπόλοιπα πνευματικά εξαρτήματα (βαλβίδα και έμβολο). Επίσης ζητείται η λύση που θα δοθεί να μην είναι πολύπλοκη και να χρειάζεται ελάχιστη συντήρηση.

Μια εναλλακτική θα ήταν να γίνει χρήση ενός μικρού συμπιεστή αέρα που λειτουργεί με τάση 12V, μαζί με ένα μικρό αεροφυλάκιο για την ενδιάμεση αποθήκευση του πεπιεσμένου αέρα, μιας και τέτοιοι συμπιεστές όπως ο VIAIR 100C έχουν χαμηλή παροχή όγκου, ενώ παρέχει αέρα πίεσης μέχρι 9 bar. Παρ' όλα αυτά ζυγίζει 1,65kg που σε συνδυασμό με ένα αεροφυλάκιο θα έφτανε να ζυγίζει γύρω στα 2kg. Αυτό θα ήταν αποδεκτό αν ο σκοπός του συστήματος ήταν μόνο η διευκόλυνση του οδηγού και όχι οι επιδόσεις. Συνεπώς μια τέτοια



λύση δεσμεύει πολύ μεγάλο μέρος από το στόχο του βάρους που είχε τεθεί στις προδιαγραφές του συστήματος.

Η άλλη εναλλακτική αφορά σε αεροφυλάκιο το οποίο θα μπορεί να παρέχει όσο αέρα χρειάζεται ο οδηγός για να κάνει τις απαιτούμενες αλλαγές χωρίς την ανάγκη αναπλήρωσης.

Στους διαγωνισμούς Formula Student ο αγώνας δεν είναι ενιαίος αλλά χωρίζεται σε μικρότερες δοκιμασίες, συνεπώς μπορεί να γίνεται αναπλήρωση του συστήματος ανάμεσα στα αγωνίσματα. Η μεγαλύτερη δοκιμασία είναι αυτή της αντοχής (endurance) η οποία αφορά σε διαδρομή 22km. Οι πίστες διαφέρουν μεταξύ τους στη διαγράμμιση, όπως ο αριθμός στροφών, το πόσο «κλειστές» ή «ανοιχτές» είναι. Ευτυχώς η ομάδα Prom Racing διαθέτει χάρτες από γνωστές πίστες Formula Student της Ευρώπης, στις οποίες και διαγωνίζεται. Έτσι εισάγοντας το μοντέλο του μονοθεσίου και το σχέδιο της πίστας σε λογισμικά όπως το IPG CarMaker, μπορεί να γίνει μια καλή εκτίμηση για τον απαιτούμενο αριθμό αλλαγών στη διάρκεια ενός endurance. Έχοντας λοιπόν ως δεδομένο από την ομάδα της Δυναμικής Οχήματος που κάνει χρήση αυτών των λογισμικών πως ο μέγιστος αριθμός αλλαγών που θα χρειαστεί να εκτελέσει ένας οδηγός με επιθετικό στυλ (aggressive) σε μια πίστα όπως αυτή του Formula Student Germany είναι 600 και με συντελεστή ασφαλείας 1,5 θέτουμε το στόχο των αλλαγών στις 900.

Ο αριθμός των απαιτούμενων αλλαγών δεν είναι ίδιος για όλους, γι' αυτό η εκτίμηση δεν μπορεί να γίνει από ανάλυση βίντεο άλλων ομάδων (on-board video), μιας και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον κινητήρα, την κλιμάκωση του κιβωτίου αλλά και την τελική σχέση μετάδοσης (final drive ratio), τα οποία ποικίλουν από ομάδα σε ομάδα. Για παράδειγμα, πολλές ομάδες κάνουν χρήση τροποποιημένων κιβωτίων ταχυτήτων με τρεις ή τέσσερις σχέσεις μετάδοσης αντί για έξι (ειδικά σε μονοκύλινδρους κινητήρες). Η ομάδα Prom Racing επέλεξε για τη σεζόν 2017-2018 να κάνει χρήση του κιβωτίου ταχυτήτων του KTM 500 EXC με μόνη παρέμβαση την αφαίρεση της έκτης ταχύτητας για εξοικονόμηση βάρους, μιας και οι μελέτες έδειξαν πως αυτή δε θα χρησιμοποιούνταν ποτέ λόγω της φύσης των πιστών στις οποίες θα συμμετείχε το μονοθέσιο (χαμηλή τελική ταχύτητα).

Για την κάλυψη λοιπόν της ανάγκης για 900 αλλαγές ταχυτήτων επιλέχθηκε ένα αεροφυλάκιο που κανονικά χρησιμοποιείται σε εφαρμογές paintball, καθώς είναι ελαφρύ και κατασκευασμένο για να αντέχει υψηλές πιέσεις. Συγκεκριμένα, τα αεροφυλάκια αυτά χωρίζονται σε δύο κυρίως κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στα πιο φθηνά τα οποία είναι κατασκευασμένα για λειτουργία μέχρι 200bar, ενώ η δεύτερη και πιο ακριβή επιτρέπει τη λειτουργία τους μέχρι και στα 310bar (4500psi). Για την επιλογή του όγκου του αεροφυλακίου γίνονται κάποιες παραδοχές όπως ότι το σύστημα θεωρείται κλειστό όταν πραγματοποιείται μια αλλαγή, ότι εφαρμόζεται ο νόμος των ιδανικών αερίων, ότι η θερμοκρασία δεν αλλάζει (σταθερό γ) και ότι τα φαινόμενα τριβών και συμπίεσης είναι μηδαμινά.

Οι διαθέσιμες μπουκάλες paintball έρχονται σε τυποποιημένα μεγέθη τα οποία είναι 45, 50, 68 και 90 κυβικές ίντσες. Κάνοντας έλεγχο αν το μέγεθος της μπουκάλας είναι ικανό να προσφέρει τον απαιτούμενο αριθμό αλλαγών προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$m_{shift} = \rho_{shift} * V_{shift} = \frac{P_{shift}}{R * T_{shift}} * V_{shift} \quad (1)$$

$$\frac{T_{shift}}{T_{vol}} = \left( \frac{P_{shift}}{P_{vol}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

Όπου τα μεγέθη με δείκτη shift αφορούν τη μάζα, την πίεση και τον όγκο που απαιτούνται για την πραγματοποίηση μιας αλλαγής, ενώ τα μεγέθη με δείκτη vol αφορούν στις συνθήκες που επικρατούν στο αεροφυλάκιο.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει πως η μάζα που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας αλλαγής είναι:

$$m_{shift} = \frac{P_{shift} * V_{shift}}{R * T_{vol} * \left( \frac{P_{shift}}{P_{vol}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = V_{shift} * P_{vol}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} * \frac{P_{shift}^{\frac{1}{\gamma}}}{R * T_{vol}}$$

Η αρχική μάζα αέρα που υπάρχει στο αεροφυλάκιο είναι:

$$m_{vol_0} = P_{vol_0} * \frac{V_{vol}}{R * T_{vol}}$$

Μετά την πρώτη αλλαγή ταχύτητας η μάζα του αέρα του αεροφυλακίου θα είναι:

$$m_{vol_1} = m_{vol_0} - m_{shift} = m_{vol_0} - \frac{P_{vol_0}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} * P_{shift}^{\frac{1}{\gamma}}}{R * T_{vol}} * V_{shift}$$

Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί μια επαναληπτική διαδικασία όπου σε κάθε i αλλαγή η μάζα του αέρα του αεροφυλακίου θα μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$m_{vol_i} = m_{vol_{i-1}} - \frac{P_{vol_{i-1}}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} * P_{shift}^{\frac{1}{\gamma}}}{R * T_{vol}} * V_{shift}$$

Ενώ η νέα πίεση του αεροφυλακίου ως εξής:

$$P_{vol_i} = m_{vol_i} * R * \frac{T_{vol}}{V_{vol}}$$

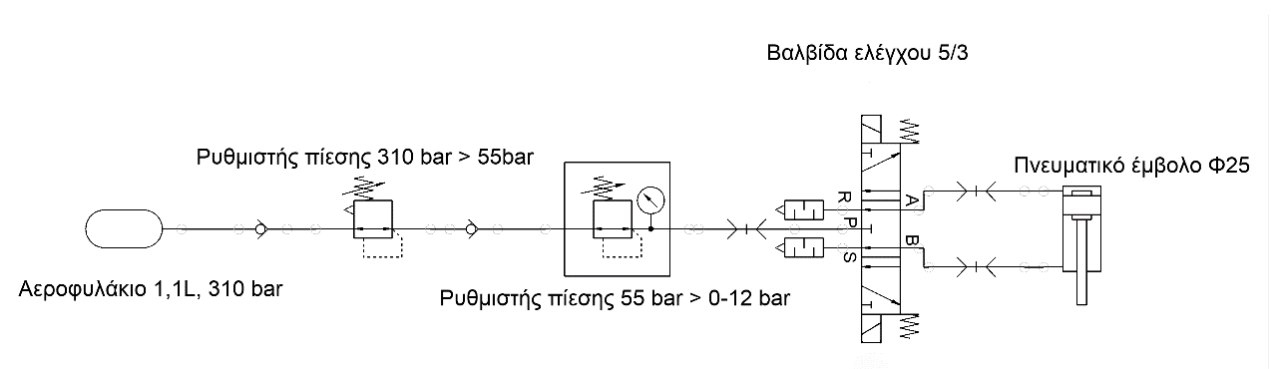
Περνώντας τους τύπους αυτούς σε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel ή σε ένα script MATLAB και θέτοντας αρχικές τιμές για τα μεγέθη όπως θερμοκρασία, πίεση και όγκος αεροφυλακίου προκύπτουν πολλαπλοί συνδυασμοί, όμως ο μικρότερος όγκος μπουκάλας που καλύπτει τον απαιτούμενο αριθμό αλλαγών είναι αυτός των 68 κυβικών ιντσών (1,1 λίτρα). Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η πίεση που επικρατεί στο αεροφυλάκιο πέσει κάτω από την τιμή που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας αλλαγής (5 bar). Από τον υπολογισμό προκύπτει πως με τη χρήση της συγκεκριμένης αρχικής πίεσης και όγκου μπουκάλας ο διαθέσιμος αριθμός αλλαγών ταχυτήτων είναι 928.

Κάνοντας έρευνα αγοράς προκύπτουν πως οι ελαφρύτερες μπουκάλες paintball είναι αυτές της αμερικάνικης εταιρείας Ninja Paintball, η οποία τις κατασκευάζει από ανθρακονήματα. Συνεπώς επιλέγεται το μοντέλο 68/4500 LITE, το οποίο και ζυγίζει 919 γραμμάρια, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμιστή πίεσης (regulator) που ρίχνει την πίεση από τα 310 στα 55 bar και είναι ενσωματωμένος σε αυτή, ενώ διαθέτει μανόμετρο για την παρακολούθηση της πίεσης που έχει. Επιπροσθέτως θα πρέπει να αγοραστεί regulator ο οποίος να ρίχνει την πίεση από τα 55 bar στα 5, που θα είναι και η πίεση λειτουργίας της βαλβίδας και του εμβόλου. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε ο ρυθμιστής πίεσης της εταιρείας Ninja Paintball LRP v2 ο οποίος είναι ο ελαφρύτερος της αγοράς, συνεργάζεται με τον υπάρχοντα αρχικό ρυθμιστή πίεσης, ενώ επιτρέπει τη ρύθμιση της πίεσης εξόδου από 0 bar (απομόνωση μπουκάλας) μέχρι 12 bar, μέσω της περιστροφής του ρυθμιστή με ένα κλειδί τύπου Allen.

#### 4.4 Λοιπά εξαρτήματα πνευματικού κυκλώματος

Για τη σύνδεση των εξαρτημάτων μεταξύ τους επιλέχθηκε σωλήνας από υλικό nylon με εξωτερική διάμετρο 8mm και εσωτερική 6mm, λόγω της αντοχής του στις υψηλές θερμοκρασίες που θα επικρατούν στο χώρο του κινητήρα. Αντίστοιχα επιλέχθηκαν fittings τύπου push-fit και σπειρώματος G1/8. Στις εξόδους της βαλβίδας ελέγχου όπου εκτονώνεται ο αέρας κατά την επαναφορά του εμβόλου επιλέχθηκαν δύο σιγαστήρες (silencers) με σπείρωμα και πάλι G1/8.

Το τελικό διάγραμμα του πνευματικού κυκλώματος, το οποίο έχει δημιουργηθεί με τη βοήθεια του λογισμικού Festo FluidDraw, φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.4.1: Διάγραμμα πνευματικού κυκλώματος



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΣΥΜΠΛΕΞΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

### 5.1 Σχεδιαστική προσέγγιση

Για να επιτευχθούν οι αλλαγές ταχυτήτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μηχανισμού αποσύμπλεξης του φορτίου του κινητήρα, καθώς κατά την αλλαγή οι στροφές του κινητήρα αλλάζουν απότομα, αλλά η ταχύτητα των τροχών παραμένει σταθερή. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει να γίνεται ομαλά για να αποφευχθούν φθορές ή ζημιές στο κιβώτιο ταχυτήτων καθώς και να διατηρηθεί η ευστάθεια του μονοθεσίου και η πρόσφυσή του στην άσφαλο. Ο μηχανισμός που επιτρέπει αυτή τη λειτουργία είναι ο συμπλέκτης, ο οποίος αποσυνπλέκει τον κινητήρα από τους τροχούς όσο συμβαίνει η αλλαγή ταχυτήτων και στη συνέχεια επανασυνπλέκει μέσω τριβής στους δίσκους του, οι οποίοι είναι ικανοί να μεταφέρουν τη ροπή όντας πλήρως συνδεδεμένοι. Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή, υπάρχουν διάφορα προϊόντα στην αγορά που επιτρέπουν τη γρήγορη αλλαγή ταχυτήτων (quickshifting) τα οποία μπορούν να βελτιώσουν το χρόνο αλλαγής ταχυτήτων κατά το upshift.

Το βασικό ζήτημα κατά το σχεδιασμό αυτού του κομματιού του συστήματος είναι η λειτουργία του κατά το κατέβασμα ταχύτητας (downshift), καθώς κατά το ανέβασμα επιλέχθηκε η λύση χωρίς τη χρήση του συμπλέκτη, αλλά με διακοπή της ανάφλεξης (τόσο του σπινθήρα, όσο και του καυσίμου για οικονομία). Η λύση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί τις προηγούμενες χρονιές της ομάδας, κατά τις οποίες γινόταν χρήση ενός λεβιέ αλλαγής ταχυτήτων χωρίς τη διακοπή της ανάφλεξης. Έτσι οι οδηγοί της ομάδας έχουν οικειοποιηθεί και γνωρίζουν το πότε να πραγματοποιούν τις αλλαγές (κατάλληλες στροφές κινητήρα) ώστε αυτές να γίνονται ομαλά και να μη χάνεται πολύτιμος χρόνος κατά τη διάρκεια του αγώνα.

Όπως έχει υπολογιστεί, η απαιτούμενη δύναμη για την ενεργοποίηση του συμπλέκτη (αποσύμπλεξη) είναι 1,3kN, η οποία όντας αρκετά μεγάλη καθιστά αδύνατη τη χρήση κάποιου ελαφριού ηλεκτρομηχανικού ή πνευματικού επενεργητή. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η χρήση μιας ηλεκτρονικά ελεγχόμενης υδραυλικής λύσης, η οποία αν παρεχόταν σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα, θα ενίσχυε την απλότητα και την ευκολία ελέγχου. Το CP1 της FTE (Εικόνα 5.1.1), το οποίο είναι ένας ηλεκτρουδραυλικός επενεργητής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υδραυλικός master cylinder και να συνδεθεί απευθείας με τον slave cylinder του κινητήρα, είναι μια υποψήφια λύση, η οποία όμως έχει πολύ αργή απόκριση (μεγαλύτερη των 300ms) καθώς προορίζεται για χρήση σε εμπορικά οχήματα. Το ECA της Magneti Marelli (Εικόνα 5.1.2) είναι σχεδιασμένο για χρήση σε μηχανοκίνητο αθλητισμό και ικανοποιεί τις προδιαγραφές απόδοσης που έχουν τεθεί, ωστόσο το βάρος του είναι αρκετά μεγάλο, ζυγίζοντας 2,9 kg.



Εικόνα 5.1.1: FTE CP1 ηλεκτρο-υδραυλικός επενεργητής



Εικόνα 5.1.2: Magneti Marelli ECA ηλεκτρο-υδραυλικός επενεργητής

## 5.2 Ηλεκτρο-υδραυλική λύση (servo)

Παρατηρώντας πως κανένα προϊόν της αγοράς δεν καλύπτει τις ανάγκες του συστήματος, κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός νέου συστήματος για τη λειτουργία του συμπλέκτη. Στην απλούστερη μορφή του αυτό μπορεί να αποτελείται από ένα master cylinder κι ένα ηλεκτρικό μοτέρ το οποίο θα τον ενεργοποιεί. Ως προς τον master cylinder επιλέχθηκε η λύση που έρχεται μαζί με τον κινητήρα από τον κατασκευαστή του (κατασκευής Brembo), καθώς αυτός έχει μελετηθεί και ταιριάζει απόλυτα με το slave cylinder (δύναμη, δοχείο υδραυλικού υγρού, συμβατότητα). Το ηλεκτρικό μοτέρ απαιτείται να κάνει μια διαδρομή 50 μοιρών για την πλήρη ενεργοποίηση του συμπλέκτη (αποσύνπλεξη), ενώ θα πρέπει να μπορεί να αποδώσει μια σχετικά μεγάλη ροπή 4,5Nm, το οποίο είναι δύσκολο χωρίς τη χρήση κάποιου μειωτήρα. Ένας σερβοκινητήρας (servomotor) είναι ουσιαστικά ένας κινητήρας σταθερού ρεύματος (DC) μαζί με ένα ενσωματωμένο κιβώτιο ταχυτήτων (μειωτήρα), έναν αισθητήρα θέσης, καθώς και ενσωματωμένη οδήγηση (σύστημα ελέγχου – control system). Συνεπώς, ο συνδυασμός αυτός είναι ταυτόχρονα ελαφρύς, απλός και με την κατάλληλη επιλογή σερβοκινητήρα και αρκετά γρήγορος.

Οι ταχύτητες των σερβοκινητήρων δίνονται συνήθως για διαδρομή 60 μοιρών και θα πρέπει να είναι κάτω των 120ms υπό φορτίο, καθώς η επιστροφή στην αρχική θέση – σύμπλεξη, θα είναι γρηγορότερη, για να είναι το σύστημα σύμφωνο με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Οι ροπές που δίνονται από τους κατασκευαστές των σερβοκινητήρων συνήθως αφορούν τη ροπή λειτουργίας και όχι τη μέγιστη που μπορεί να αποδώσουν (stall torque). Ακολούθως έγινε μια έρευνα αγοράς για τους διαθέσιμους σερβοκινητήρες της αγοράς, των οποίων οι ταχύτητες και οι ροπές φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Μοντέλο	Ταχύτητα (ms/60deg)	Ροπή (Nm)
KingMax BLS04S	105	5,5
S9010HV	110	4,7
Volz	120	4,9
ProTek 170T	110	4,5
MKS HLB380	80	4,1
ProTek 170S	70	3,9
Savox	100	4
Hitec HS- 1005SGT	190	10,8

Πίνακας 5.1: Σύγκριση χαρακτηριστικών σερβοκινητήρων

Δεδομένων των δύσκολων συνθηκών που επικρατούν στο χώρο του κινητήρα, του σφάλματος που περιέχει ο υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής, της ανάγκης επαναληψιμότητας της διαδικασίας σύμπλεξης-αποσύμπλεξης αλλά και της ανάγκης συγκράτησης του συμπλέκτη στη θέση αποσύμπλεξης για μεγάλο χρονικό διάστημα, π.χ. κατά την εκκίνηση του μονοθεσίου ή την αναμονή του στην ουρά πριν τον αγώνα, επιλέγεται ο σερβοκινητήρας Hitec HS-1005SGT (Εικόνα 5.2.1) (κόστος 450€), ο οποίος ζυγίζει 363 γραμμάρια, ενώ λειτουργεί με τάση 14,4V, πράγμα που σημαίνει πως μπορεί να συνδεθεί απευθείας στην ηλεκτρική καλωδίωση του μονοθεσίου χωρίς την ανάγκη πρόσθετου εξοπλισμού-κυκλώματος για τη μείωση της παρεχόμενης τάσης. Έτσι εξασφαλίζεται μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας, καθώς αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι του μηχανισμού. Τέλος, το κόστος των 450 Ευρώ, μπορεί να καλυφθεί από τον προϋπολογισμό του project.



Εικόνα 5.2.1: Ο σερβοκινητήρας Hitec HS-1005SGT

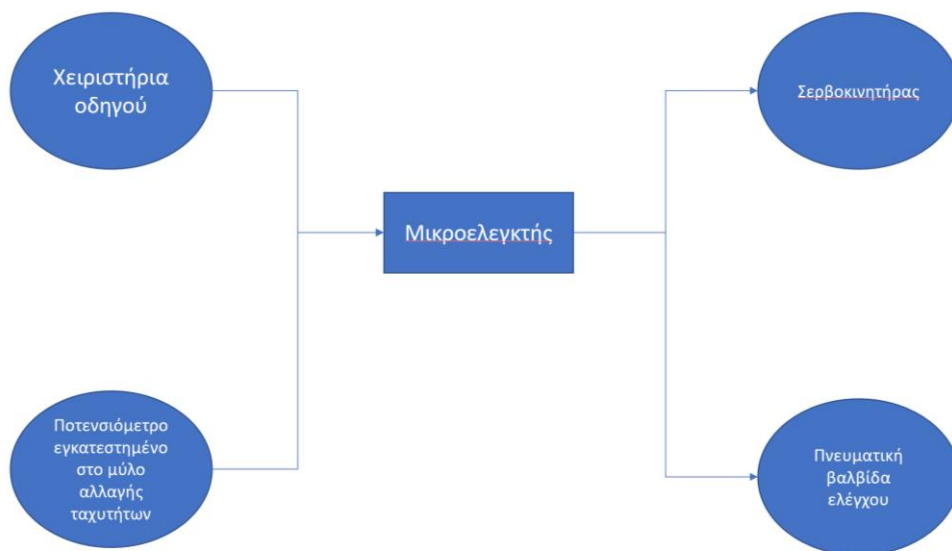




## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ – ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο σκοπός αυτής της ενότητας είναι ο έλεγχος όλων των εξαρτημάτων που απαιτούν ηλεκτρικά σήματα για να λειτουργήσουν και αποτελεί την ημι-αυτόματη πλευρά του συστήματος. Τα σήματα αυτά μπορούν να είναι τόσο για την εκτέλεση μιας αλλαγής όσο και για την ανάδραση του συστήματος (feedback) μέσω αισθητήρων που διασφαλίζουν την απρόσκοπτη λειτουργία του. Αποτελείται τόσο από υλικό (hardware), όσο και λογισμικό (software).

Το σύνολο του πνευματικού συστήματος που αναλύθηκε παραπάνω ελέγχεται μέσω ενός μικροελεγκτή ώστε ο οδηγός να έχει πλήρη έλεγχο του συστήματος. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, ο οδηγός θα πρέπει να είναι ικανός να εκτελέσει κάθε ενέργεια αλλαγής ταχύτητας χωρίς να χρειάζεται να απομακρύνει τα χέρια του από το τιμόνι. Γι' αυτό το λόγο ο σχεδιασμός του τιμονιού έχει γίνει έχοντας στο νου την ανάγκη αυτή. Συγκεκριμένα, ο οδηγός μπορεί να ανεβάσει ή να κατεβάσει ταχύτητα μέσω δύο paddles ή να χρησιμοποιήσει το συμπλέκτη μέσω ενός τρίτου paddle. Και τα τρία αυτά paddles τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος του τιμονιού ώστε να είναι εύκολο για τον οδηγό να τα χρησιμοποιήσει την ώρα της οδήγησης. Όλα τα βοηθήματα του οδηγού (ένδειξη νεκράς, επιλεγμένη ταχύτητα) ελέγχονται από την μονάδα ελέγχου του κινητήρα (ECU), χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εξόδους της, οπότε δεν υπάρχει η ανάγκη προβολής τους μέσω του μικροελεγκτή του μηχανισμού μας. Ένα απλό διάγραμμα με τις βασικές εισόδους και εξόδους του συστήματος φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα εισόδων και εξόδων συστήματος

## 6.1 Έλεγχος συμπλέκτη

Για να μπορεί ο οδηγός να έχει πλήρη έλεγχο του συμπλέκτη, πράγμα ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εκκίνηση του μονοθεσίου, αφού η σύμπλεξη θα πρέπει να γίνεται με τρόπο ομαλό και όχι με μια λειτουργία τύπου on-off, προς αποφυγή άσκοπης ολίσθησης (σπινάρισμα) των ελαστικών, επίτευξη μεγαλύτερου ελέγχου και ασφάλειας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός τρόπου μέτρησης του πόσο ο οδηγός θέλει να συμπλέκει ο συμπλέκτης. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η χρήση ενός ποτενσιόμετρου στον άξονα του raddle που ελέγχει ο οδηγός για το συμπλέκτη, το οποίο θα μεταφράζει την περιστροφική κίνηση του raddle σε μοίρες και συνεπώς σε ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ο μικροελεγκτής θα μετατρέπει σε περιστροφή του σερβοκινητήρα.

Το ποτενσιόμετρο αυτό θα πρέπει να έχει τουλάχιστον 50 μοίρες διαδρομή, να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο, αξιόπιστο και να έχει χαμηλό κόστος. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στην αγορά ηλεκτρονικών για περιστροφικά ποτενσιόμετρα, τα οποία ικανοποιούν τα κριτήρια που έχουμε θέσει. Έτσι επιλέχθηκε το ποτενσιόμετρο PC-16, της ισπανικής PIHER (Εικόνα 6.1.1), με αντίσταση 10 kΩ και βάρος μόλις 6,6 γραμμάρια.



Εικόνα 6.1.1: Ποτενσιόμετρο PC-16 της PIHER

## 6.2 Αισθητήρας επιλεγμένης ταχύτητας (gear sensor)

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της πιστότητας του συστήματος αλλαγής ταχυτήτων κρίθηκε αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού μέσω του οποίου θα γίνεται αντιληπτή η επιλεγμένη ταχύτητα στο κιβώτιο. Σε διαφορετική περίπτωση το σύστημα του μικροελεγκτή δε θα ήταν σε θέση να «γνωρίζει» αν η αλλαγή που πραγματοποιήθηκε ήταν επιτυχής, ρίχνοντας έτσι την ευθύνη στον οδηγό, ο οποίος θα έπρεπε να αντιληφθεί αν επετεύχθη η αλλαγή, χάνοντας πολύτιμο χρόνο.

Η πρώτη υποψήφια λύση αφορούσε στην τοποθέτηση ενός γραμμικού ποτενσιόμετρου παράλληλα με το πνευματικό έμβολο, ώστε να γίνεται αντιληπτό από το σύστημα αν το έμβολο έχει πραγματοποιήσει πλήρως την απαιτούμενη κίνηση-διαδρομή, διασφαλίζοντας έτσι ότι η αλλαγή ταχύτητας έχει γίνει επιτυχώς. Ωστόσο μια τέτοια λύση θα απαιτούσε περισσότερο χώρο στο σημείο που βρίσκεται το έμβολο, στον ήδη περιορισμένο χώρο του κινητήρα, ενώ θα προσέθετε 100-150 γραμμάρια στο τελικό σύστημα και θα απαιτούσε ένα ποσό 200€ περίπου.

Η δεύτερη λύση, η οποία και τελικά επιλέχθηκε, αφορούσε στη μόνιμη εγκατάσταση ενός περιστροφικού ποτενσιόμετρου στο μύλο αλλαγής ταχυτήτων του κινητήρα. Έχοντας ως δεδομένο την απουσία από τον κατασκευαστή ενός τέτοιου αισθητήρα, η λύση αυτή οδήγησε στη δημιουργία μιας οπής στο μπλοκ του κινητήρα, χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη φρέζα CNC του εργαστηρίου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως τρόπο μηδενισμού του τρυπανιού τον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν που υποστηρίζει το μύλο, έγινε διάνοιξη της οπής. Στη συνέχεια το επιλεγμένο ποτενσιόμετρο συνδέθηκε με το μύλο με μια σειρά εξαρτημάτων που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν ειδικά γι' αυτό, ενώ το εξωτερικό του κομμάτι υποστηρίχθηκε με ένα ασάλινο στρατζαριστό bracket. Το ποτενσιόμετρο που θα χρησιμοποιούνταν, θα έπρεπε να έχει διαδρομή 300 μοιρών, να μπορεί να λειτουργήσει στο ζεστό περιβάλλον του κινητήρα (120 βαθμοί Κελσίου), να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος και να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερο. Συνεπώς επιλέχθηκε το P11S1V0FLSY00103KA της VISHAY SFERNICE (Εικόνα 6.2.1), το οποίο ζυγίζει 9 γραμμάρια και είναι μεταλλικό.



Εικόνα 6.2.1: Ποτενσιόμετρο P11S1V0FLSY00103KA της VISHAY SFERNICE

### 6.3 Μικροελεγκτής

Η επιλογή του μικροελεγκτή έχει τη μεγαλύτερη σημασία, μιας και αποτελεί την καρδιά του όλου συστήματος. Ο μικροελεγκτής θα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Τουλάχιστον δέκα (10) ψηφιακές εισόδους (PWM)
- Τουλάχιστον δύο (2) αναλογικές εισόδους με ανάλυση 10bit
- Εύκολος προγραμματισμός μέσω συμβατού λογισμικού
- Χαμηλό κόστος
- Μικρό μέγεθος
- Χαμηλό βάρος

Έχοντας τις προδιαγραφές αυτές υπ' όψιν, η καλύτερη εναλλακτική της αγοράς αποτελεί η πλατφόρμα Arduino και συγκεκριμένα η μικρότερη υλοποίησή της, αυτή του Arduino NANO 16MHz. Οι μικρές του διαστάσεις (18x45mm) και το μικρό του βάρος (7 γραμμάρια), σε συνδυασμό με την ύπαρξη όλων των απαραίτητων αναμονών και επεξεργαστικής ισχύος, το καθιστούν την ιδανική επιλογή. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στην Εικόνα 6.3.1.

Microcontroller	ATmega328
Architecture	AVR
Operating Voltage	5 V
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
Clock Speed	16 MHz
Analog IN Pins	8
EEPROM	1 KB
DC Current per I/O Pins	40 mA (I/O Pins)
Input Voltage	7-12 V
Digital I/O Pins	22 (6 of which are PWM)
PWM Output	6
Power Consumption	19 mA
PCB Size	18 x 45 mm
Weight	7 g
Product Code	A000005

Εικόνα 6.3.1: Χαρακτηριστικά Arduino NANO

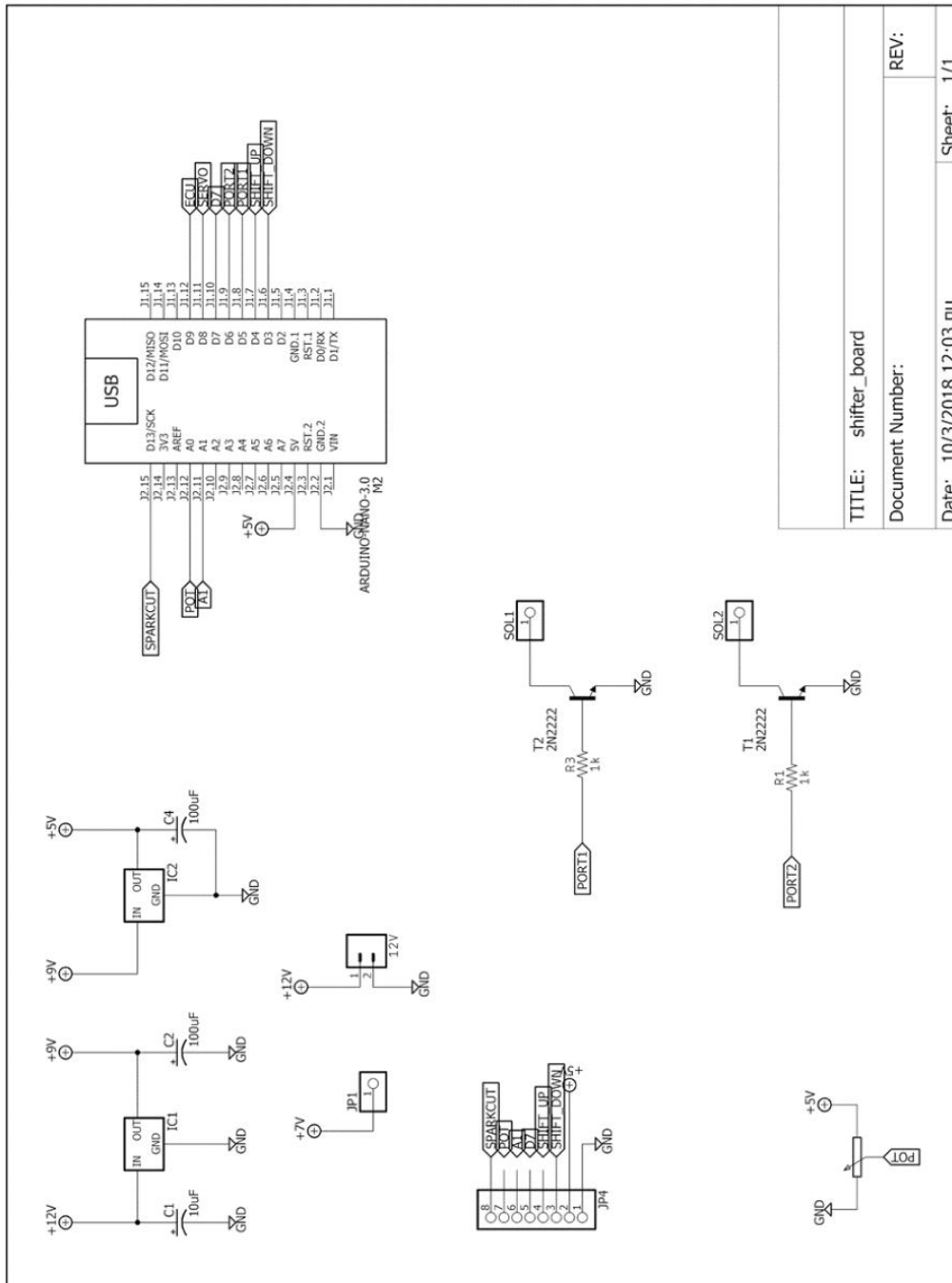
#### 6.4 Ηλεκτρονική Πλακέτα

Για τη σωστή οδήγηση της βαλβίδας ελέγχου του πνευματικού συστήματος αλλά και της επιτυχούς λήψης όλων των εισερχόμενων σημάτων θα πρέπει να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια πλακέτα η οποία θα εγγυάται την ασφαλή λειτουργία του μικροελεγκτή αλλά και την αξιόπιστη σύνδεση της πλατφόρμας με τα υπόλοιπα εξαρτήματα.

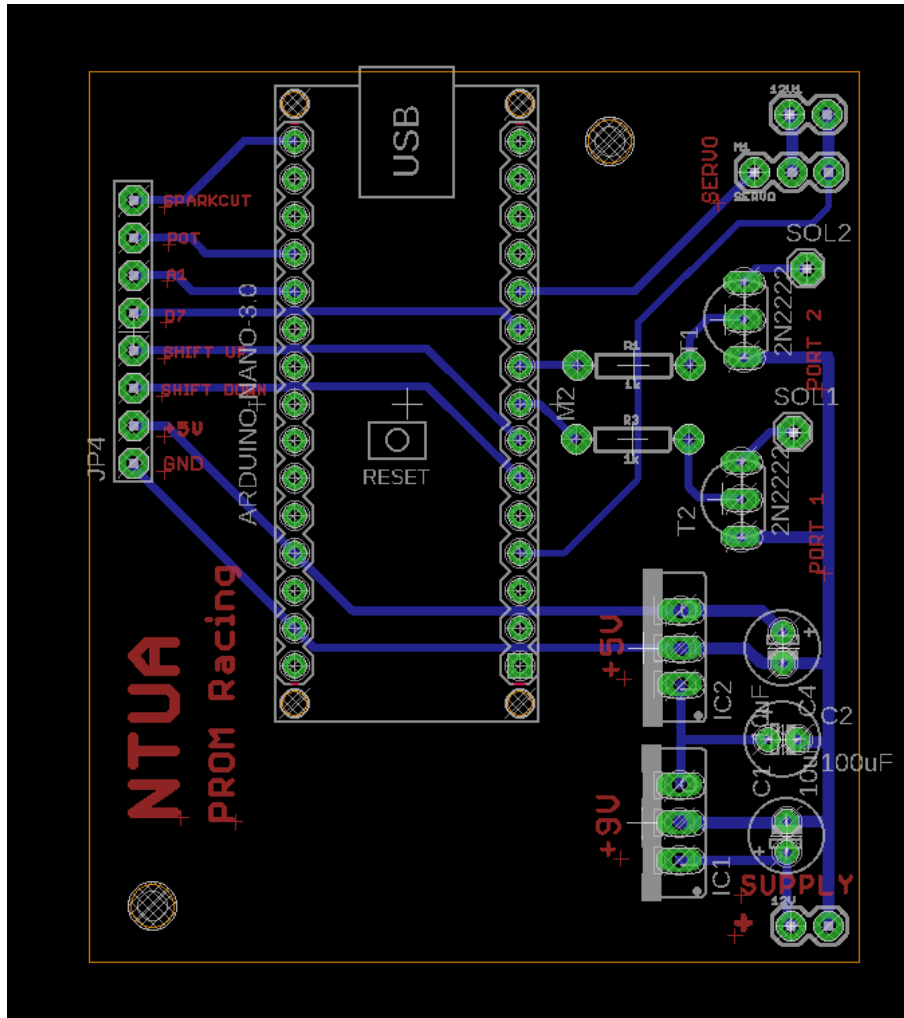
Αρχικά, για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή, ο οποίος λειτουργεί στα 5V, θα πρέπει να γίνει υποβιβασμός της παρεχόμενης τάσης. Η μέγιστη τάση που επικρατεί στο τροφοδοτικό κύκλωμα, από τον ανορθωτή του κινητήρα είναι 15V. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση ενός γραμμικού ρυθμιστή τάσης (L7809) με τάση εξόδου 9V και στη συνέχεια ενός δεύτερου ρυθμιστή τάσης (L7805) με τάση εξόδου 5V. Γίνεται δηλαδή υποβιβασμός τάσης (voltage step down) 2 σταδίων για τη μείωση του θορύβου στο κύκλωμα και της τροφοδοσίας του μικροελεγκτή με όσο το δυνατόν σταθερότερη τάση. Επίσης γίνεται χρήση τριών πυκνωτών στους ρυθμιστές τάσης για την ακόμα μεγαλύτερη σταθεροποίηση της τάσης.

Το Arduino NANO λειτουργεί στα 5V και έχει όριο 40mA για κάθε είσοδο και έξοδο του. Τα πηνία της βαλβίδας ελέγχου του πνευματικού συστήματος (FESTO MSSD-EB) έχουν πολλαπλάσιο ρεύμα λειτουργίας (120mA). Για την επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται χρήση ενός διπολικού τρανζίστορ ζεύξης (2N2222), το οποίο είναι ικανό να διαχειριστεί τόσο την ένταση του ρεύματος λειτουργίας όσο και την τάση λειτουργίας των πηνίων.

Το διάγραμμα του κυκλώματος και το σχέδιο της πλακέτας έγινε με χρήση του λογισμικού AUTODESK EAGL (Εικόνες 6.4.1 και 6.4.2).



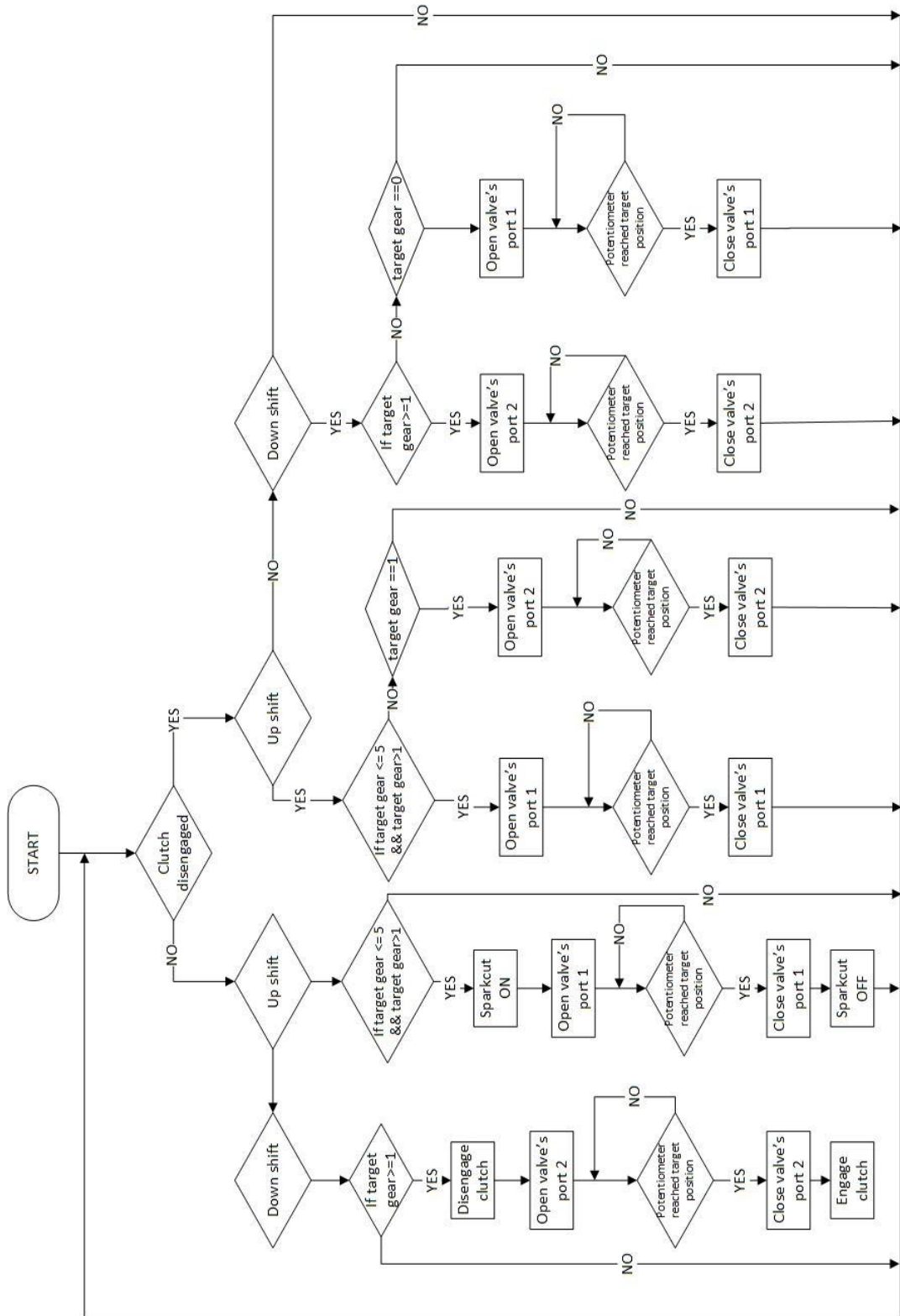
Εικόνα 6.4.1: Διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου



Εικόνα 6.4.2: Διάγραμμα πλακέτας ελέγχου

## 6.5 Προγραμματισμός

Το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση του ηλεκτρονικού μέρους του συστήματος είναι ο προγραμματισμός του. Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να ελέγξει όλα τα πιθανά σενάρια κατάστασης που μπορεί να βρεθεί αλλά και να μπορεί να προλαμβάνει πιθανά λάθη του οδηγού. Το διάγραμμα ροής του κώδικα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 6.5.1). Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε με τη χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα Arduino IDE, αφού διαθέτει όλους τους απαραίτητους drivers για την επικοινωνία του υπολογιστή με το μικροελεγκτή, ενώ απλοποιεί κατά πολύ τη διαδικασία του compiling και της μεταφοράς του κώδικα στον μικροελεγκτή. Ο πλήρης κώδικας βρίσκεται στο [Παράρτημα Α](#).



Εικόνα 6.5.1: Διάγραμμα ροής κώδικα

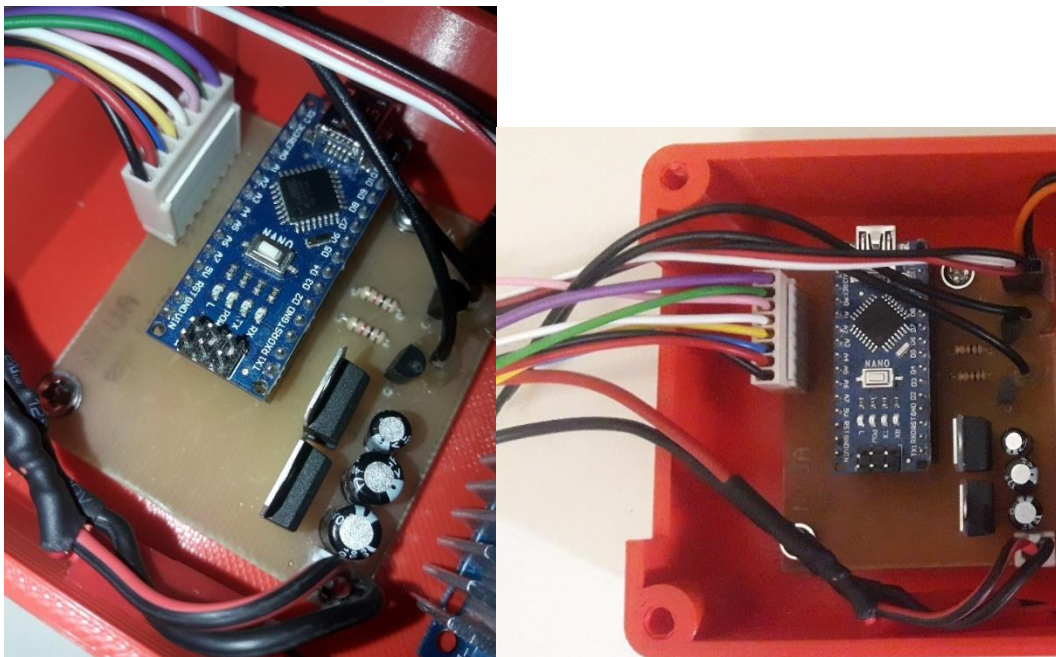


Καθώς ο κώδικας θα πρέπει να έχει μια καθυστέρηση (delay) πριν προχωρήσει στο επόμενο βήμα, είναι αναγκαία η μέτρηση του χρόνου που απαιτείται από την βαλβίδα ελέγχου ώστε να εκτελέσει την κάθε ενέργεια. Οι μετρήσεις φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.1.

Λειτουργία	Χρόνος (ms)
Κλείσιμο βαλβίδας	44
Άνοιγμα βαλβίδας	13
Αλλαγή πολικότητας πηνίου	24

Πίνακας 6.1: Χρόνοι ενεργοποίησης βαλβίδας

Ο χρόνος ανεβάσματος ταχύτητας εκτιμάται στα 177ms, λόγω μη χρήσης του συμπλέκτη, αλλά της ειδικής λειτουργίας της ECU που επιτρέπει τη διακοπή του ψεκασμού καυσίμου και του ανάματος του μπουζί όταν λάβει το κατάλληλο σήμα από τον μικροελεγκτή. Κατά το κατέβασμα ο χρόνος αλλαγής εκτιμάται στα 244ms, λόγω της χρήσης του σερβοκινητήρα, ο οποίος χρειάζεται συνολικά 67ms για τη διαδικασία αποσύμπλεξης και κατόπιν σύμπλεξης του φορτίου του κινητήρα.



Εικόνα 6.5.2: Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου



## ΚΕΦΑΛΙΟ 7 – ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

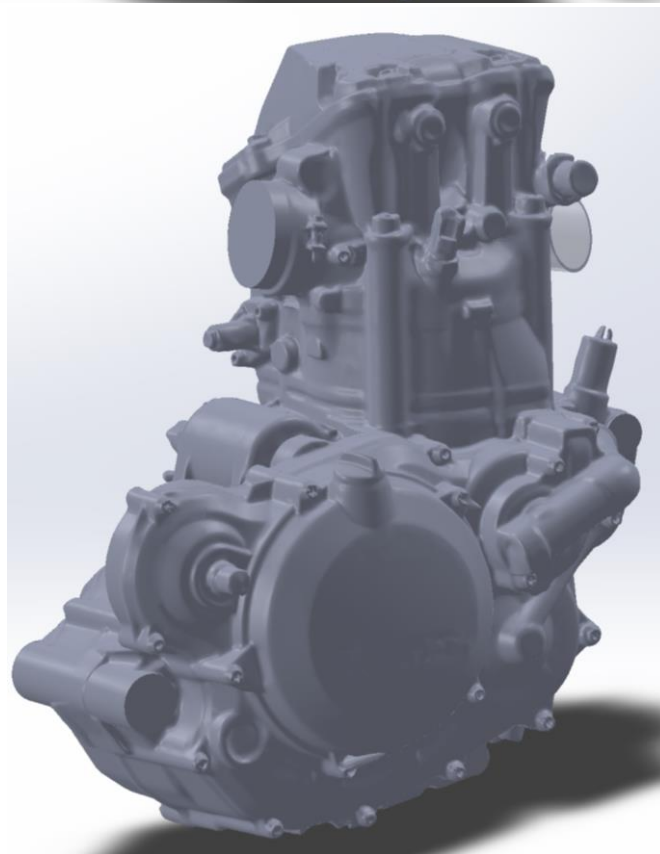
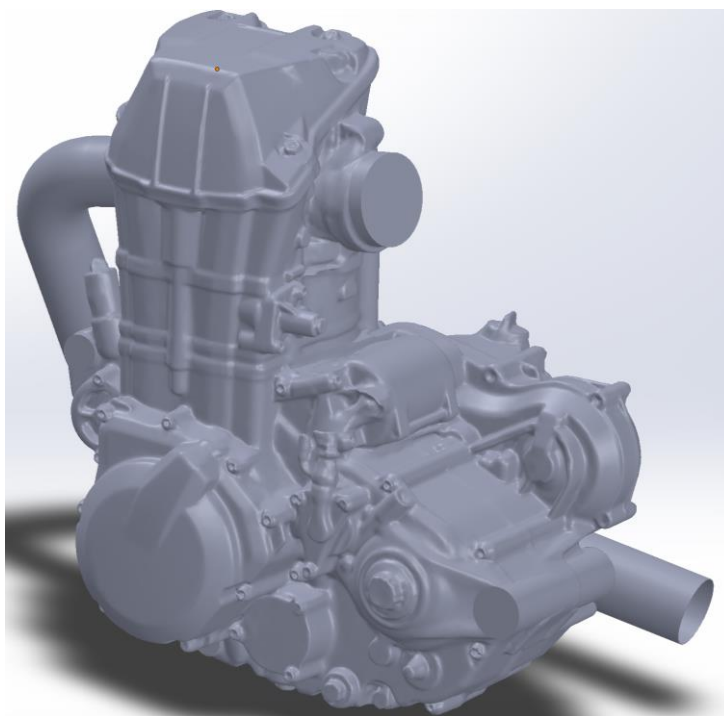
Για την επιλογή των σημείων που θα τοποθετηθούν τα διάφορα κομμάτια του συστήματος μέσα στο μονοθέσιο είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός σε λογισμικό CAD όσο το δυνατόν περισσότερων εξαρτημάτων.

Για το σχεδιασμό των εξαρτημάτων και των στηρίξεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CAD της εταιρείας Dassault, το Solidworks 2018.

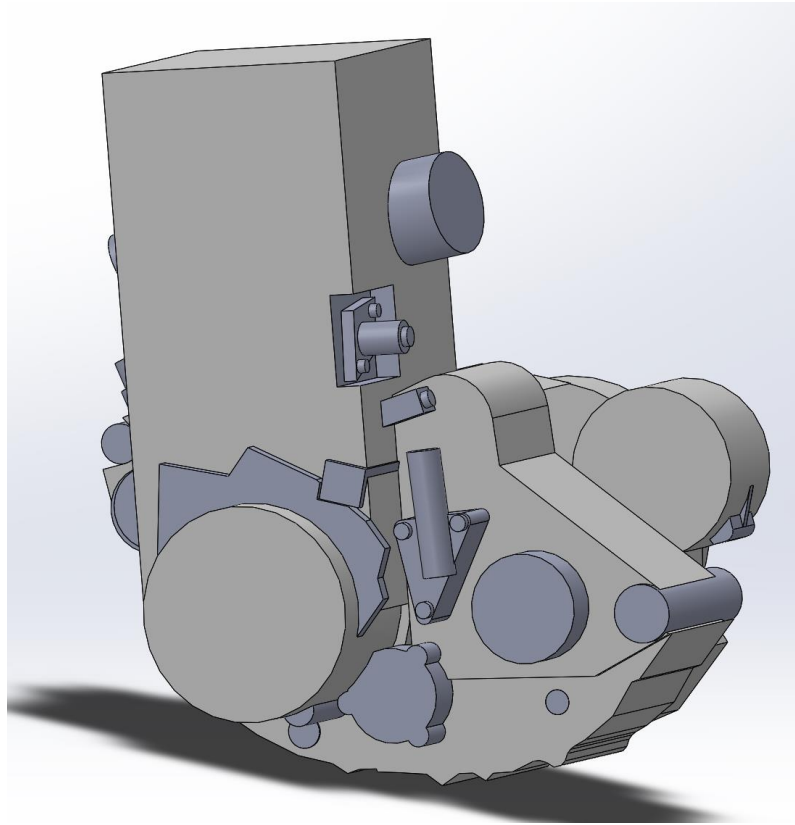
### 7.1 Κινητήρας

Αρχικά είναι απαραίτητη η εύρεση ενός αρκετά λεπτομερούς μοντέλου 3D του κινητήρα KTM 500 EXC (2012), μιας και η κατασκευάστρια εταιρεία δεν παρέχει κάτι τέτοιο. Μία επιλογή θα ήταν να γίνει σάρωση του κινητήρα που έχουμε στη διάθεσή μας με laser (3D laser scan), ωστόσο η ακρίβεια θα ήταν σχετικά μικρή λόγω της πολύπλοκης μορφής του σώματος του κινητήρα, αφού περιέχει πολλές πτυχώσεις αλλά και εξογκώματα όντας ένα χυτό αλουμινένιο κομμάτι, ενώ θα απαιτούσε και αρκετό χρόνο μετέπειτα επεξεργασίας σε κάποιο λογισμικό όπως το Geomagic. Η δεύτερη επιλογή, η οποία και τελικά επιλέχθηκε ήταν η εύρεση 3D μοντέλων του κινητήρα από άλλες ομάδες Formula Student οι οποίες χρησιμοποιούν ή έχουν χρησιμοποιήσει στο παρελθόν τον κινητήρα αυτό και στη συνέχεια τη μέτρηση κάποιων κρίσιμων διαστάσεων με χρήση μιας μετρητικής μηχανής CMM που υπάρχει διαθέσιμη τόσο στο Μετροτεχνικό Εργαστήριο της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, όσο και στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτόματου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Έπειτα από έρευνα για ομάδες που χρησιμοποιούσαν τον κινητήρα αυτό και την αποστολή των σχετικών αιτημάτων, η ομάδα Formula Student “Team HARE”, του Πανεπιστημίου του Huddersfield, ανταποκρίθηκε θετικά και απέστειλε το δικό τους λειτουργικό μοντέλο 3D του κινητήρα (Εικόνα 7.1.1), καθώς εκείνοι το χρησιμοποίησαν τις σεζόν 2012-2015. Ταυτόχρονα μετρήθηκαν στη CMM του Μετροτεχνικού Εργαστηρίου κρίσιμα σημεία του κινητήρα όπως τα σημεία των στηρίξεών του, η θέση του μοχλού αλλαγής ταχυτήτων και η θέση του γραναζιού τα οποία στη συνέχεια συνενώθηκαν στο μοντέλο που απέστειλε η Team HARE.

Το μοντέλο που απεστάλη από την ομάδα Team HARE έφερε πάρα πολλά surfaces και features καθιστώντας το μοντέλο μη διαχειρίσιμο από τους διαθέσιμους Η/Υ, ειδικά σε πολύπλοκα assemblies. Γι’ αυτό το λόγο επιλέχθηκε να δημιουργηθεί ένα νέο απλοποιημένο μοντέλο, το οποίο θα χρησιμοποιούσε μετρήσεις τόσο από το μοντέλο της Team HARE όσο και από τις μετρήσεις στη CMM αλλά ο κύριος όγκος του κινητήρα θα παριστανόταν με απλά κουτιά. Το μοντέλο αυτό (Εικόνα 7.1.2) φέρει με ακρίβεια όλα τα κρίσιμα σημεία του κινητήρα, τα οποία είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό όλων των επιμέρους υποσυστημάτων (Ψύξη, Εισαγωγή, Εξαγωγή, Σύστημα Αλλαγής Ταχυτήτων, Βάσεις στήριξης), ενώ το μέγεθος του αρχείου μειώθηκε από τα 53 MB στα 1,2 MB, καθιστώντας το πολύ πιο «ελαφρύ» και εύκολα διαχειρίσιμο στο περιβάλλον του Solidworks.



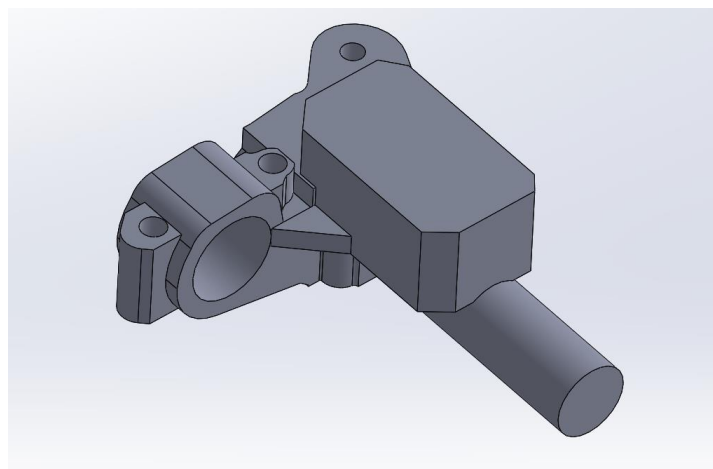
Εικόνα 7.1.1: Πλαινές όψεις τρισδιάστατου μοντέλου κινητήρα KTM 500 EXC



Εικόνα 7.1.2: Απλοποιημένο μοντέλο κινητήρα KTM 500 EXC

## 7.2 Μανέτα συμπλέκτη

Για το σχεδιασμό της μανέτας του συμπλέκτη επιλέχθηκε η μέθοδος της φωτογράφισής της από διάφορες όψεις και στη συνέχεια της εισαγωγής τους στο σχεδιαστικό περιβάλλον του Solidworks μέσω της δυνατότητας Sketch Picture που προσφέρει, απλοποιώντας το σχεδιασμό του εξαρτήματος, απαιτώντας μόνο την αντιστοίχιση μιας διάστασής του που έχει μετρηθεί με παχύμετρο, με μια διάσταση στο sketch, ώστε να βρεθεί η σωστή κλίμακα (Εικόνα 7.2.1).

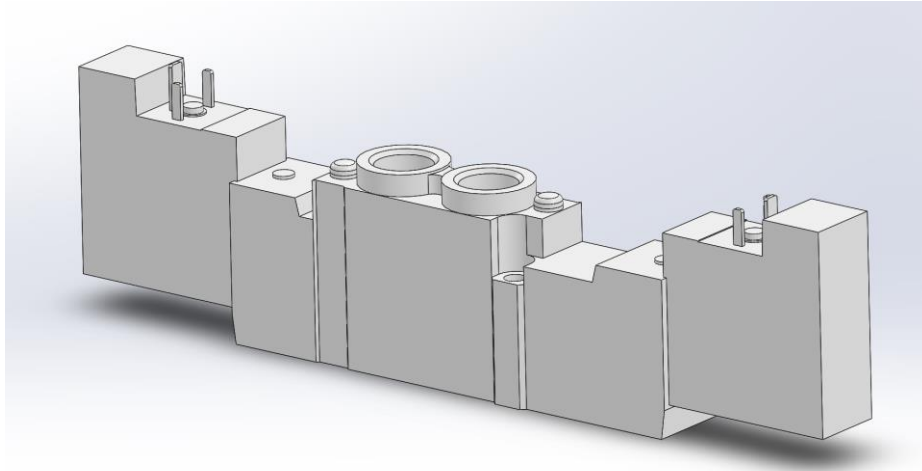


Εικόνα 7.2.1: Μανέτα συμπλέκτη με master cylinder

## 7.3 Εξαρτήματα πνευματικού συστήματος

### 7.3.1 Πνευματικό έμβολο και βαλβίδα

Η εταιρεία FESTO, της οποίας τα εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκαν στο πνευματικό σύστημα, προσφέρει τη δυνατότητα μέσω της ιστοσελίδας της για λήψη των 3D μοντέλων των εξαρτημάτων και μάλιστα απευθείας σε μορφή Solidworks Part.

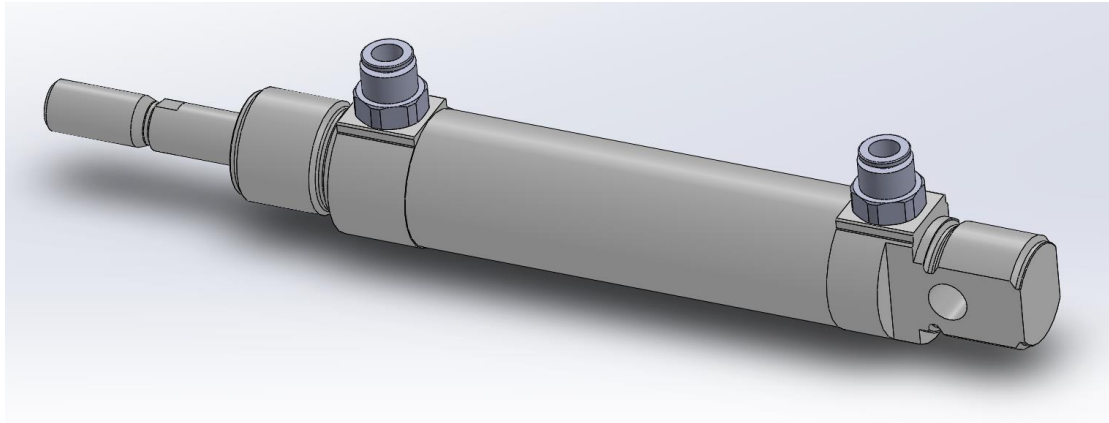


Εικόνα 7.3.1.1: Μοντέλο CAD πνευματικής βαλβίδας

Η στήριξη της βαλβίδας γίνεται με 2 περαστούς κοχλίες και στερεώνεται πάνω στο σασί μέσω ενός συγκολλητού bracket όπως φαίνεται στην ακόλουθη φωτογραφία (Εικόνα 7.3.1.2).



Εικόνα 7.3.1.2: Πνευματική βαλβίδα μαζί με bracket στήριξης



Εικόνα 7.3.1.3: Μοντέλο CAD πνευματικού εμβόλου

Η στήριξη του εμβόλου (Εικόνα 7.3.1.3) γίνεται μέσω ενός συγκολλητού bracket του οποίου ο σχεδιασμός αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Η σύνδεση bracket-εμβόλου επιτυγχάνεται με ένα τορναριστό εξάρτημα τύπου tor-hat το οποίο στη μία άκρη έχει εγκοπή για ασφάλεια και από την άλλη κεφαλή-πατούρα.

### 7.3.2 Αεροφυλάκιο

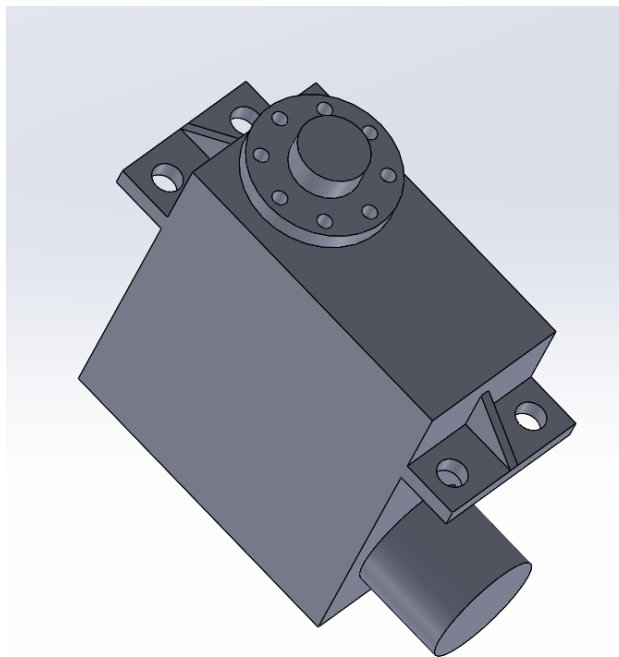
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το αεροφυλάκιο (Εικόνα 7.3.2.1) που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Ninja Paintball, ενώ και οι ρυθμιστές πίεσης είναι της ίδιας εταιρείας. Καθώς ο κατασκευαστής αρνήθηκε την αποστολή 3D μοντέλων, ο σχεδιασμός έγινε απλοποιητικά και με μέτρηση των πραγματικών τεμαχίων με τη χρήση παχυμέτρου. Η στήριξή της γίνεται στο πλαϊνό μέρος του σασί, με απλό κολάρο το οποίο στερεώνεται με 2 περαστούς κοχλίες και με τη χρήση tor-hats για αποφυγή τοπικής συμπίεσης (κρασαρίσματος) του σασί, λόγω του ότι αποτελεί σύνθετο υλικό με skin ανθρακονημάτων εσωτερικά, αλουμινίου 6082-T6 εξωτερικά και πυρήνα αλουμινένιου honeycomb.



Εικόνα 7.3.2.1: Μοντέλο CAD αεροφυλακίου μαζί με regulator

## 7.4 Σερβοκινητήρας

Η εταιρεία HiTEC που κατασκευάζει το σερβοκινητήρα που επιλέχθηκε δεν παρέχει μοντέλο 3D, ωστόσο παρέχει όλες τις βασικές διαστάσεις του για το σχεδιασμό του στο Solidworks. Η στήριξή του γίνεται με ένα bracket συγκολλητό το οποίο αναλύεται στην επόμενη ενότητα, ενώ διαθέτει και 3D-Printed shroud με ενσωματωμένο ανεμιστήρα για την αποφυγή υπερθέρμανσής του.



Εικόνα 7.4.1: Μοντέλο CAD σερβοκινητήρα Hitec

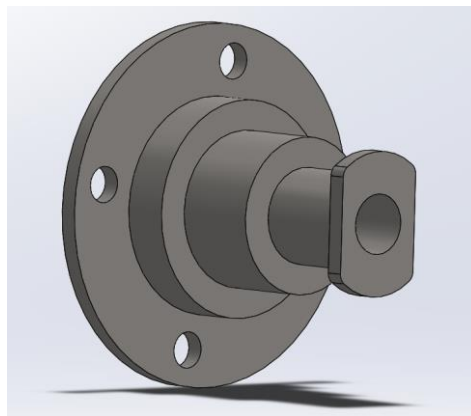
## 7.5 Bracket στήριξης σερβοκινητήρα και μετάδοση κίνησης

Ο σερβοκινητήρας στηρίζεται στο πίσω μέρος του σασί, στο χώρο του κινητήρα, μέσω ενός στρατζαριστού και συγκολλητού bracket φτιαγμένο από ατσάλι (Εικόνα 7.5.1). Ο σωλήνας επιλέχθηκε ώστε να στηρίζεται πάνω του η μανέτα του συμπλέκτη που φέρει και το master cylinder. Η σύνδεση γίνεται μέσω 4 περαστών κοχλιών M5.

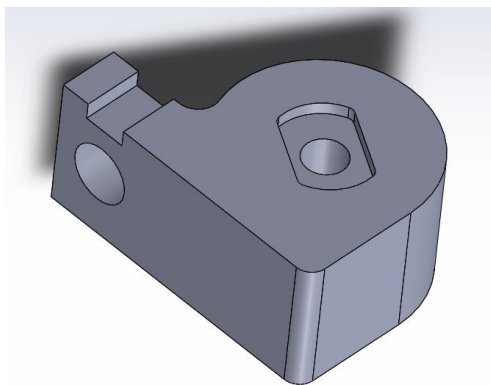


Εικόνα 7.5.1: Bracket στήριξης σερβοκινητήρα και μανέτας συμπλέκτη

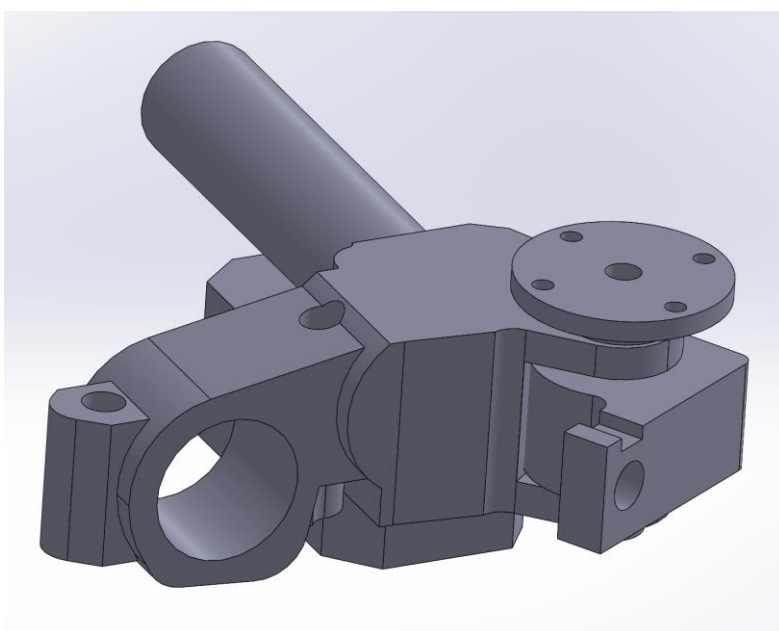
Η σύνδεση του σερβοκινητήρα με τη μανέτα και το master cylinder γίνεται μέσω 2 εξαρτημάτων, ένα που προσαρτάται στον άξονα περιστροφής του κινητήρα, φτιαγμένο από αλουμίνιο, τورναριστό και στη συνέχεια φρεζαριστό (Εικόνα 7.5.2) κι ένα φρεζαριστό αλουμινένιο που προσαρτάται στη μανέτα (Εικόνα 7.5.3). Η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω ενός διπλού D-shaft. Το φρεζαριστό κομμάτι της μανέτας περιστρέφεται γύρω από τον ίδιο άξονα περιστροφής και του OEM κομματιού κι ενεργοποιεί έτσι τον master cylinder (Εικόνα 7.5.4).



Εικόνα 7.5.2: Τورναριστό εξάρτημα



Εικόνα 7.5.3: Φρεζαριστό εξάρτημα

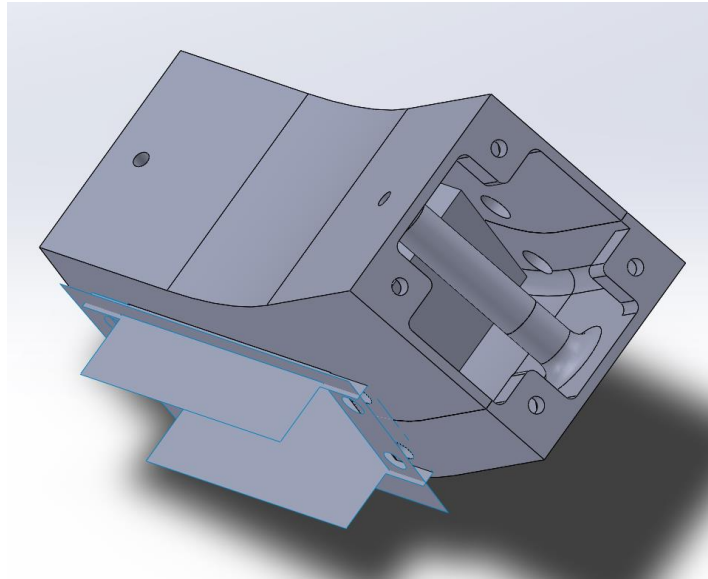


Εικόνα 7.5.4: Συναρμολόγημα master cylinder

## 7.6 Shroud ψύξης

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στο χώρο του κινητήρα και δεδομένου ότι οι δοκιμές του μονοθεσίου λαμβάνουν χώρα κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες στην Ελλάδα κρίθηκε απαραίτητη η πρόσθετη ψύξη του σερβοκινητήρα, πέρα από το ήδη ενσωματωμένο σε αυτό σύστημα παθητικής ψύξης. Έτσι για λόγους εξοικονόμησης βάρους σχεδιάστηκε ένα shroud (Εικόνα 7.6.1) στο οποίο προσαρτάται ανεμιστήρας 80mm φτιαγμένο από πλαστικό ABS σε 3d Printer. Το shroud αυτό ουσιαστικά «αγκαλιάζει» το κυρίως σώμα του σερβοκινητήρα όπου βρίσκονται και οι ψύκτρες του, ενώ ο ανεμιστήρας δημιουργεί μια ροή αέρα μέσα στο κανάλι του 3d-printed κομματιού. Είναι διαιρετό και η σύνδεση των δύο κομματιών που το αποτελούν γίνεται με δύο περαστούς κοχλίες M4.

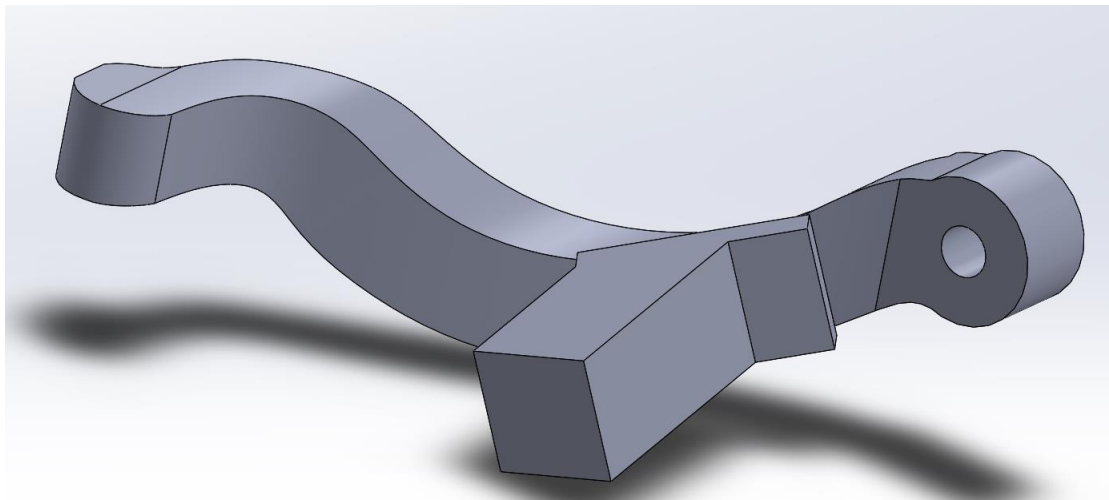




Εικόνα 7.6.1: Μοντέλο CAD shroud ψύξης

### 7.7 Πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων

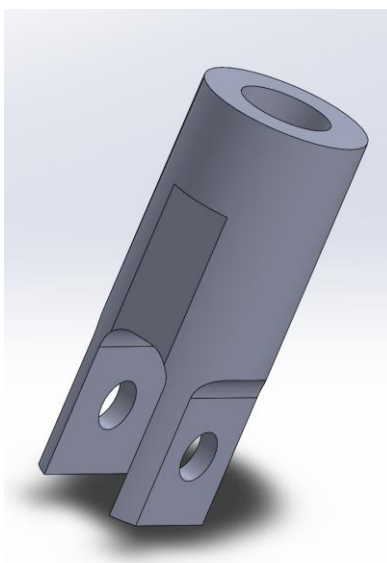
Η δημιουργία του 3D μοντέλου του πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων (Εικόνα 7.7.1) έγινε με μέτρηση των διαστάσεων με παχύμετρο. Ο σχεδιασμός του εξαρτήματος ήταν απαραίτητος για τον προσδιορισμό του τρόπου σύνδεσης του πνευματικού εμβόλου με αυτό, αλλά και τον καθορισμό του ελεύθερου χώρου που θα έχει το έμβολο κατά την κίνησή του, καθώς αυτό εκτελεί κίνηση κατά μήκος ενός τόξου. Το πεντάλ είναι κατασκευασμένο από χυτό αλουμίνιο και στην άκρη του συνδέεται με τον άξονα του μύλου αλλαγής ταχυτήτων μέσω ενός κωνικού πολύσφηνου.



Εικόνα 7.7.1: Μοντέλο CAD πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων

## 7.8 Σύνδεση πνευματικού εμβόλου με πεντάλ

Για τη σύνδεση του πνευματικού εμβόλου με το πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων επιλέχθηκε ο σχεδιασμός ενός αλουμινένιου εξαρτήματος, τύπου clevis (Εικόνα 7.8.1). Αυτό συνδέεται με το πνευματικό έμβολο με σπειρώμα M10x1.25 αφού τέτοιο διαθέτει εκ κατασκευής στο άκρο του το έμβολο, ενώ συνδέεται με το πεντάλ μέσω ενός κοχλίου M5 κι ενός rod-end Aurora M5. Η κατασκευή γίνεται αρχικά στον τόρνο όπου торνάρεται η εξωτερική διάμετρος  $\Phi 16$ . Στη συνέχεια μεταφέρεται στη φρέζα, όπου γίνεται διάνοιξη όλων των οπών, μαζί με την τρύπα  $\Phi 8.4$  για τη μετέπειτα διάνοιξη του σπειρώματος M10 με το χέρι με χρήση του αντίστοιχου κολαούζου. Επίσης γίνονται οι απαραίτητες πτυχώσεις στο κυλινδρικό μέρος ώστε να μπορεί να σφικτεί πάνω στο έμβολο με χρήση γερμανικού κλειδιού νούμερο 15.



Εικόνα 7.8.1: Μοντέλο CAD clevis

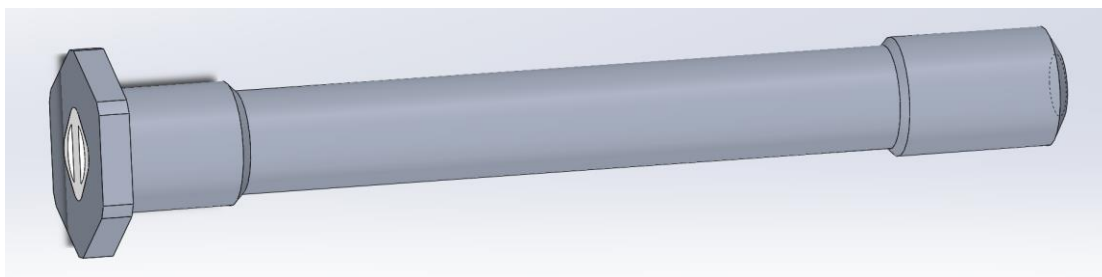
## 7.9 Ποτενσιόμετρο, μηχανισμός προσάρτησης στο κιβώτιο και στήριξη

Το ποτενσιόμετρο στο μύλο αλλαγής ταχυτήτων είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του συστήματος, αφού αποτελεί τον τρόπο γνώσης της ταχύτητας που είναι την κάθε στιγμή επιλεγμένη στο κιβώτιο. Όπως έχει προαναφερθεί, ο κινητήρας δε διαθέτει κάποιον αντίστοιχο αισθητήρα. Η λύση που επιλέχθηκε ήταν η προσάρτηση ενός ποτενσιόμετρου στο μύλο αλλαγής ταχυτήτων, έτσι ώστε γνωρίζοντας ποια γωνία του μύλου αντιστοιχεί στην κάθε ταχύτητα, να καθίσταται γνωστή στο πρόγραμμα και ποια σχέση είναι επιλεγμένη.

Για να γίνει δυνατή η εγκατάσταση του ποτενσιόμετρου έγινε μία οπή στο σώμα του κινητήρα ομοαξονικά με το μύλο αλλαγής ταχυτήτων. Η οπή επιλέχθηκε να είναι διαμέτρου  $\Phi 16$  ώστε να συνεργάζεται με την τσιμούχα άξονα (radial shaft seal) που χρησιμοποιήθηκε για τη στεγάνωση της τρύπας. Η διάνοιξη της οπής αυτής επιλέχθηκε να γίνει, για λόγους ακρίβειας, με χρήση της CNC Φρέζας που υπάρχει διαθέσιμη. Αρχικά φτιάχτηκε μια ιδιοσυσκευή συγκράτησης (jig) του σώματος του κινητήρα, ώστε το επίπεδο της οπής να είναι παράλληλο με το επίπεδο που ορίζουν οι άξονες x-y της φρέζας. Στη συνέχεια με χρήση του probe έγινε μηδενισμός του τοπικού συστήματος συντεταγμένων στο κέντρο του κύκλου που ορίζει το

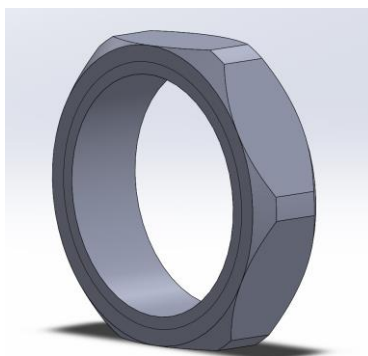
ρουλεμάν στο οποίο εδράζεται ο μύλος. Έπειτα έγινε διαδοχική διάνοιξη της τρύπας με χρήση τρυπανιών με αύξουσα διάμετρο κατά σειρά  $\Phi 4$ - $\Phi 6$ - $\Phi 8$ - $\Phi 12$ - $\Phi 16$ , με παράλληλη χρήση ψυκτικού υγρού.

Το βασικό εξάρτημα του συναρμολογήματος αποτελεί ο αντάπτορας του ποτενσιόμετρου (Εικόνα 7.9.1), ο οποίος αποτελεί ένα τορναριστό και στη συνέχεια φρεζαριστό εξάρτημα, φτιαγμένο από αλουμίνιο. Στη μία άκρη του έχει υποδοχή για το ποτενσιόμετρο, ενώ στην άλλη του άκρη έχει σπείρωμα M6 έτσι ώστε να στερεώνεται στην ήδη υπάρχουσα τρύπα του μύλου. Ο αντάπτορας αυτός δηλαδή συνδέει το ποτενσιόμετρο με το μύλο, εξέχοντας από τη μία άκρη από το σώμα του κινητήρα και περνώντας αξονικά μέσα από το μύλο.



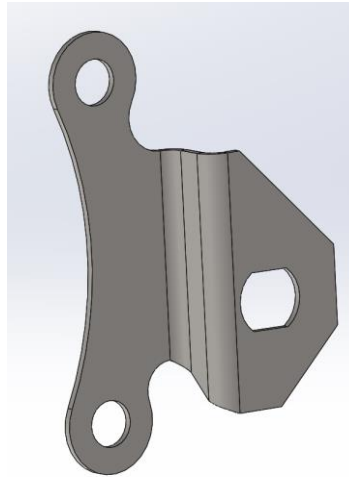
Εικόνα 7.9.1: Μοντέλο CAD αντάπτορα ποτενσιόμετρου

Ακόμα κατασκευάστηκε ένα custom αλουμινένιο περικόχλιο M16x1.5 (Εικόνα 7.9.2) ώστε να συσφίγγει τον αντάπτορα με την τσιμούχα και το σώμα του κινητήρα. Η κατασκευή έγινε αρχικά στον τόρνο όπου διαμορφώθηκε η εξωτερική διάμετρος, στη συνέχεια μεταφέρθηκε στη φρέζα ώστε να γίνει η εξωτερική διαμόρφωση ώστε να συνεργάζεται με κλειδί, και στη συνέχεια αποπερατώθηκε στον τόρνο όπου έγινε η εσωτερική οπή και το σπείρωμα.



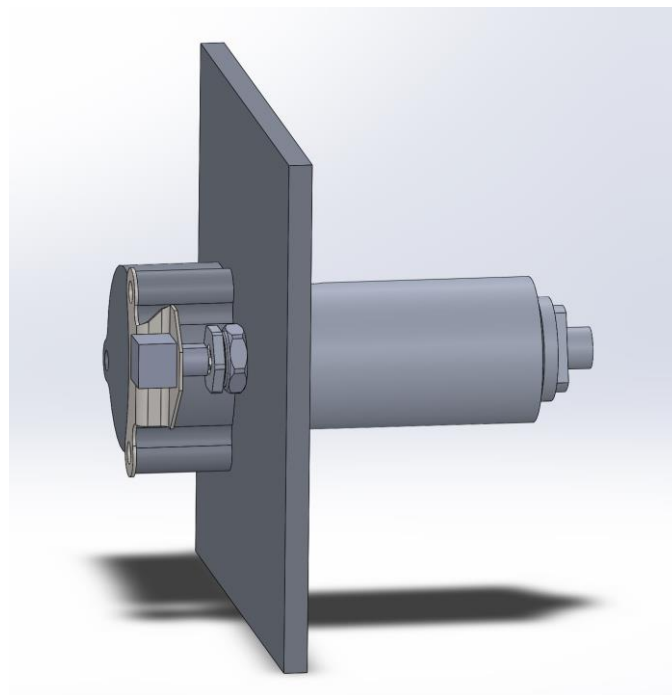
Εικόνα 7.9.2: Μοντέλο CAD custom αλουμινένιου περικοχλίου

Τέλος σχεδιάστηκε μια εξωτερική στήριξη για το ποτενσιόμετρο από ασάλι (Εικόνα 7.9.3), η οποία είναι κομμένη σε laser cutter από λαμαρίνα 1mm και στη συνέχεια διαμορφωμένη σε στράντζα. Η στήριξη κρατά στη θέση του τον άξονα του ποτενσιόμετρου ενώ χρησιμοποιεί δύο υπάρχοντες κοχλίες M6 από το καπάκι της αντλίας πίεσεως λαδιού, που βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο τοποθέτησης του ποτενσιόμετρου.

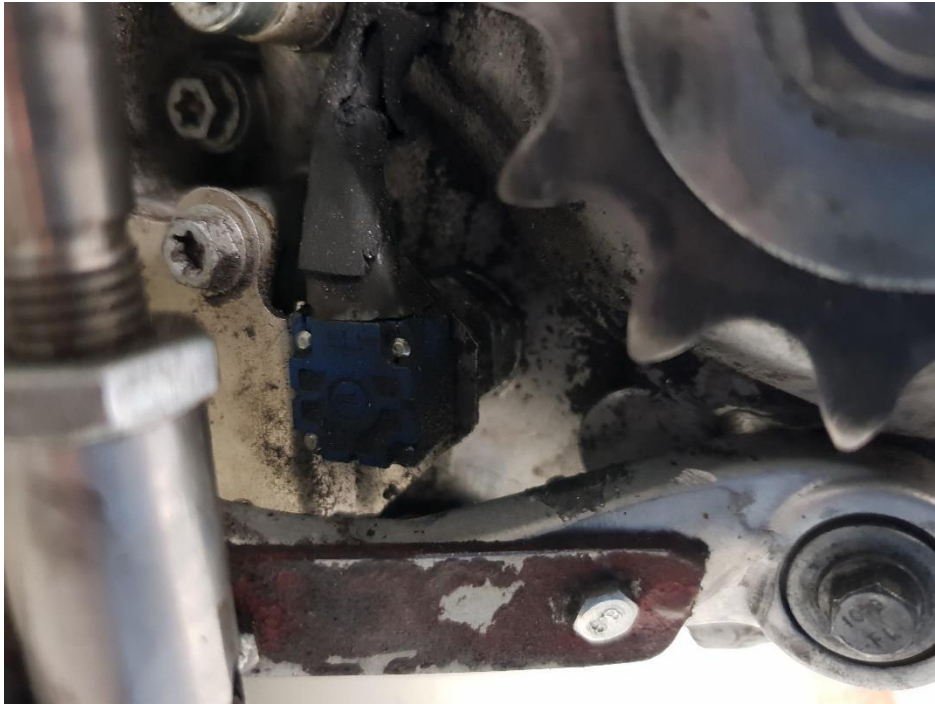


**Εικόνα 7.9.3: Μοντέλο CAD ατσάλινου στηρίγματος ποτενσιόμετρου**

Το πλήρες συναρμολόγημα φαίνεται στις ακόλουθες Εικόνες 7.9.4 και 7.9.5.



**Εικόνα 7.9.4: Συναρμολόγημα CAD ποτενσιόμετρου θέσης μύλου ταχυτήτων**

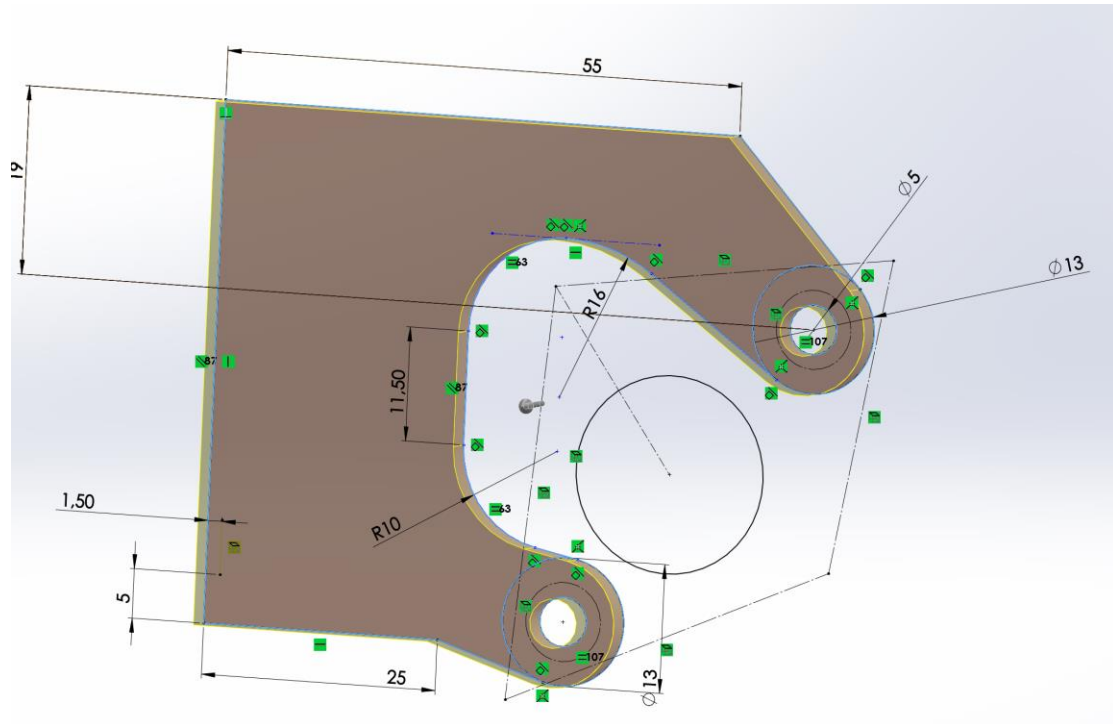


Εικόνα 7.9.5: Ποτενσιόμετρο τοποθετημένο πάνω στον κινητήρα

### 7.10 Στήριξη πνευματικού εμβόλου

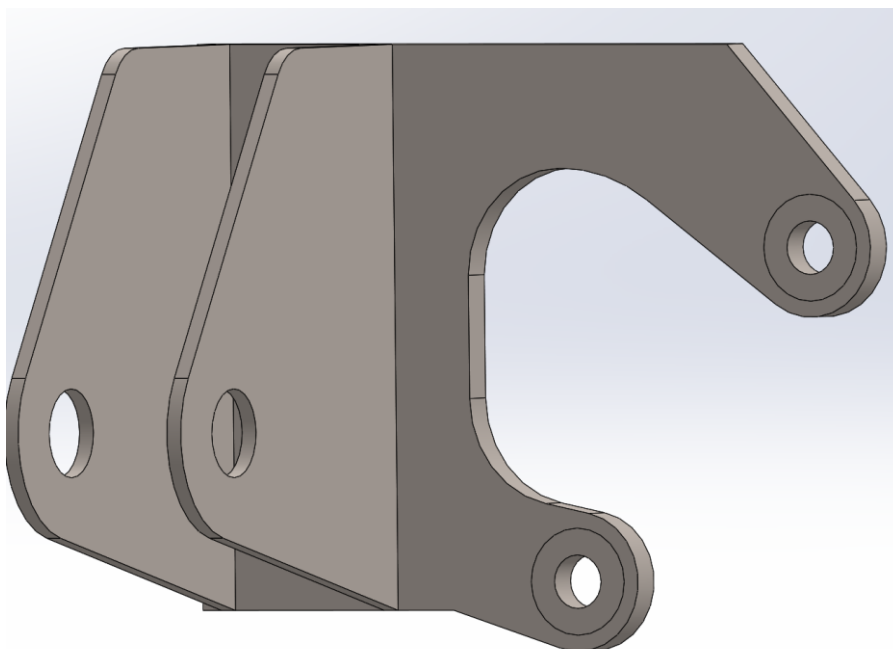
Για τη στήριξη του πνευματικού εμβόλου, όπως προαναφέρθηκε, έχει επιλεγεί η θέση κοντά στον εντατήρα της καδένας του εκκεντροφόρου, καθώς αποτελεί την πλησιέστερη κατάλληλη θέση στήριξης πάνω στον κινητήρα, δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος στο σασί για την οριζόντια στήριξή του. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ένα bracket το οποίο συγκρατεί το έμβολο σε κάθετη θέση ως προς το μοχλό αλλαγής ταχυτήτων, ενώ στηρίζεται στους δύο υπάρχοντες κοχλίες.

Επιλέχθηκε η λύση του συγκολλητού bracket για λόγους ευκολίας κατασκευής, δεδομένης και της υπάρχουσας χορηγίας της ομάδας σε υπηρεσίες laser cut, ενώ επιλέχθηκε ως υλικό κατασκευής το ατσάλι, καθώς υπάρχει διαθέσιμος σταθμός συγκόλλησης MIG για ατσάλι, καθώς και εμπειρία σε αντίστοιχες συγκολλήσεις από μέλη της ομάδας.



Εικόνα 7.10.1: Αρχικός σχεδιασμός bracket στήριξης πνευματικού εμβόλου (διακρίνεται η διαμόρφωση του μπλοκ του κινητήρα ως sketch)

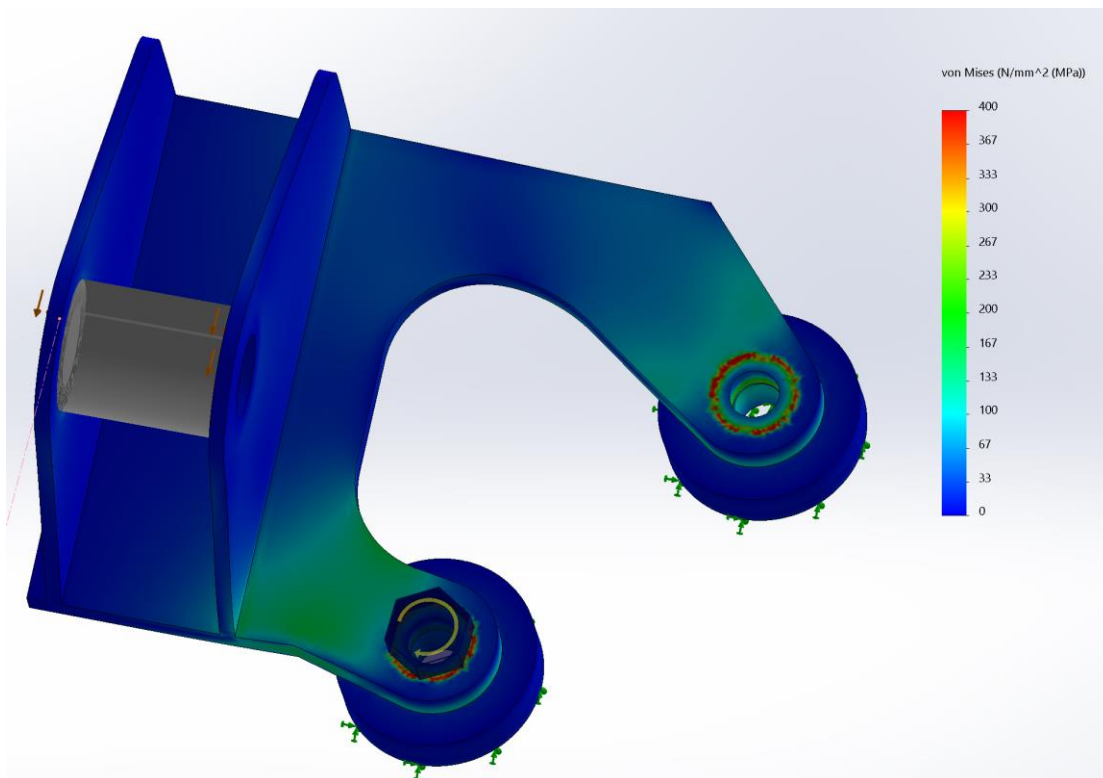
Για τη μείωση του βάρους του τεμαχίου επιλέχθηκε ατσάλι DOMEX 700, ώστε να μειωθεί το πάχος της λαμαρίνας που θα χρησιμοποιηθεί, ενώ το μοντέλο βελτιώθηκε σχεδιαστικά ως προς το βάρος και την αντοχή του, χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων σε περιβάλλον Solidworks, καθώς όπως έχει προαναφερθεί το βάρος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού για τα εξαρτήματα του μονοθεσίου (Εικόνα 7.10.1).



Εικόνα 7.10.2: Αρχικό σχέδιο συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου

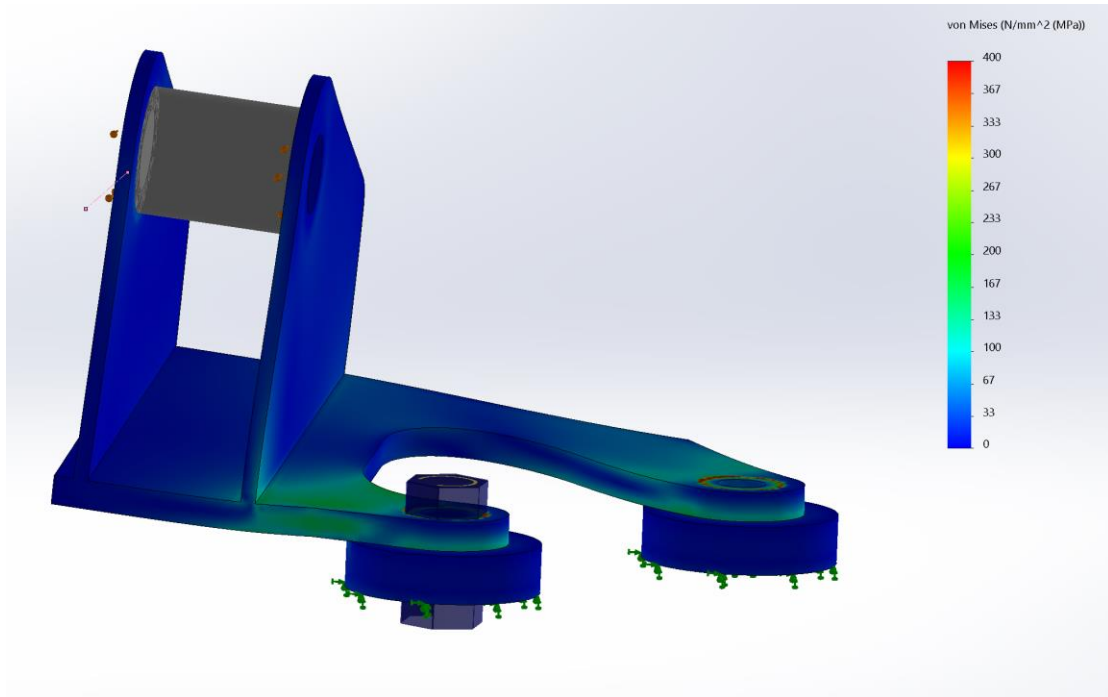
Το αρχικό σχέδιο είχε θεωρητικό βάρος, χωρίς συνυπολογισμό της συγκόλλησης, 90,33 γραμμάρια (Εικόνα 7.10.2).

Στη συνέχεια στήθηκε το μοντέλο για τα πεπερασμένα στοιχεία στο Solidworks, κάνοντας χρήση του bolt connection για τις στηρίξεις στους κοχλίες του εντατήρα της καδένας, με fixed geometry και no penetration προφίλ επαφής τις πατούρες που προσμοιάζουν το σώμα του κινητήρα, ενώ τοποθετήθηκε ένας rigid κύλινδρος ανάμεσα στα δύο συγκολλητά μέλη του bracket, με bonded προφίλ επαφής, ώστε να προσμοιάζει την παρουσία του πνευματικού εμβόλου και να εμποδίζουν την παραμόρφωση του bracket κατά εκείνη την κατεύθυνση. Η δύναμη θεωρήθηκε πως ισομοιάζεται στα δύο συγκολλητά μέλη, ήτοι 115N έκαστο, ενώ η ανάλυση έγινε τόσο προς την κατεύθυνση που προσμοιάζει upshift, όσο και σε αυτή που προσμοιάζει downshift, πάνω στο εσωτερικό face της οπής κάθε συγκολλητού μέλους. Με χρήση split lines γίνεται επιλογή μερών του εξαρτήματος για περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος, ειδικά κοντά στις στηρίξεις, καθώς με αραιότερο πλέγμα και απλή πάκτωση στις οπές στήριξης υπήρχαν κάποια artifacts, τα οποία λύθηκαν με την πύκνωση του πλέγματος αλλά και τη χρήση του bolt connection όπως προαναφέρθηκε. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες για stress κατά von Mises. Η μέγιστη τάση που εμφανίζεται είναι 400MPa (Εικόνες 7.10.3 και 7.10.4) κι αυτό μόνο στα σημεία περιφερειακά των κοχλιών, ενώ στο υπόλοιπο εξάρτημα οι τάσεις κυμαίνονται από 30 έως 200MPa.



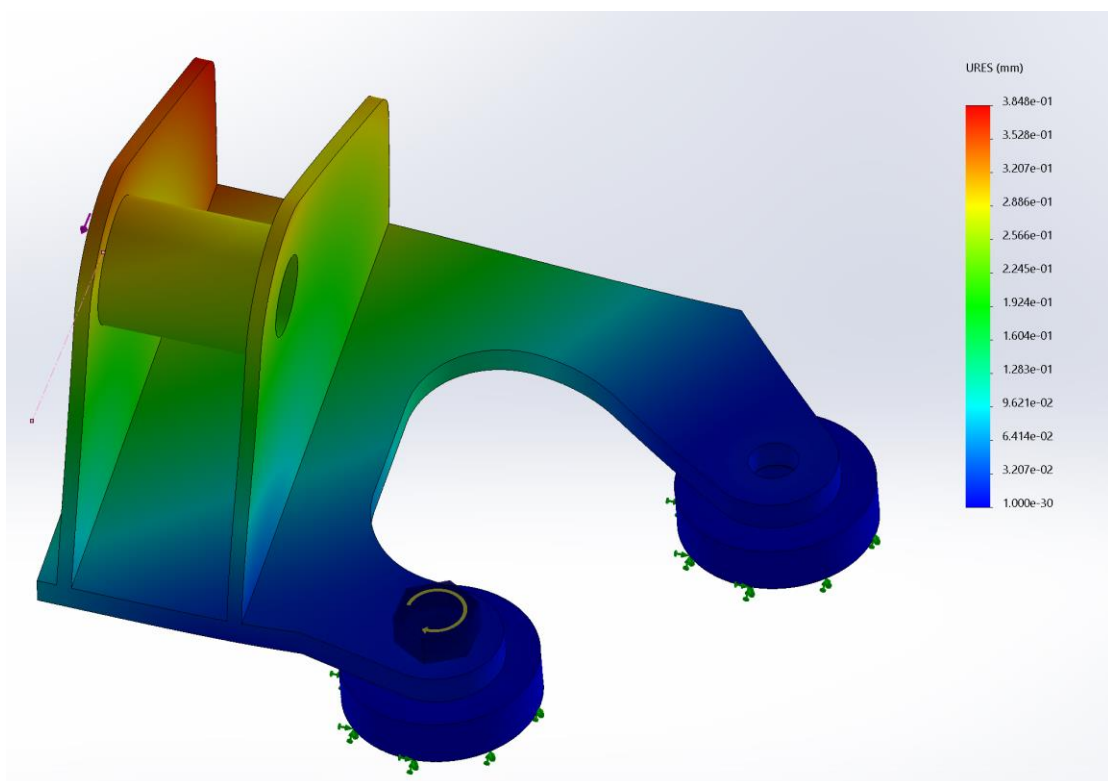
Εικόνα 7.10.3: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό συγκολλητό bracket (1<sup>η</sup> όψη)





Εικόνα 7.10.4: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό συγκολλητό bracket (2<sup>η</sup> όψη)

Αντίστοιχα, οι παραμορφώσεις φαίνονται στην ακόλουθη Εικόνα 7.10.5, όπου παρατηρούμε ότι είναι μικρότερες από 1mm.

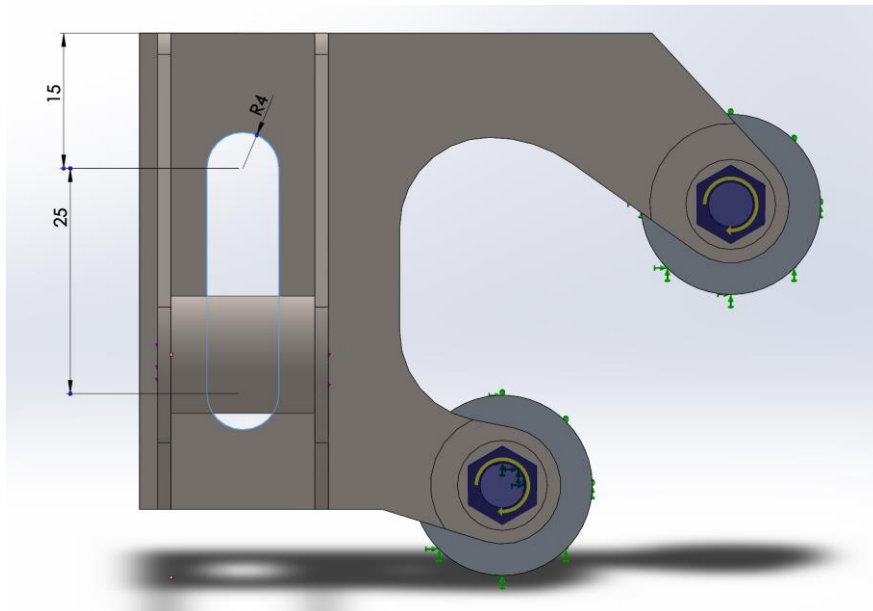


Εικόνα 7.10.5: Παραμορφώσεις στο αρχικό συγκολλητό bracket

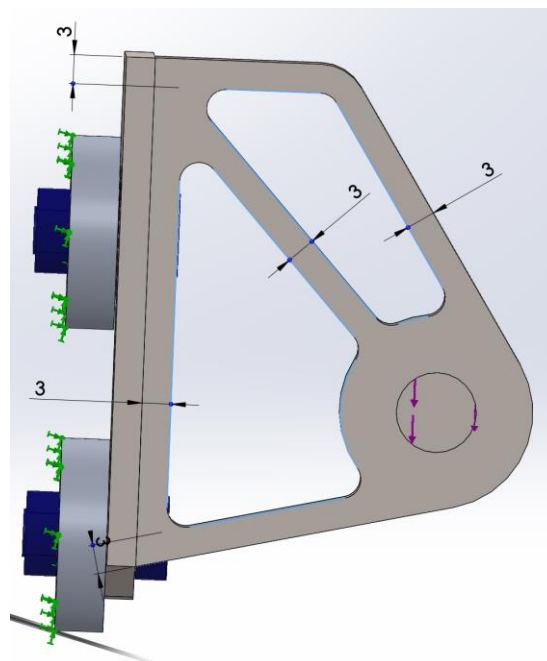


Ο στόχος βάρους του εξαρτήματος κατά την έναρξη του σχεδιασμού αποτελούσε τα 70 γραμμάρια. Συνεπώς παρ' ότι το εξάρτημα αντέχει το φορτίο που θα παραλαμβάνει, το βάρος του δεν ικανοποιεί το στόχο που τέθηκε.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, παρατηρούμε ότι οι τάσεις στο χώρο ανάμεσα στα δύο συγκολλητά μέλη, όπως και στα ίδια τα μέλη είναι πολύ μικρές, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυνατότητα για ελάφρυνση του εξαρτήματος με αφαίρεση υλικού στα σημεία αυτά. Για το λόγο αυτό έγιναν τα ακόλουθα ελαφρώματα όπως φαίνονται στις Εικόνες 7.10.6 και 7.10.7 που ακολουθούν.

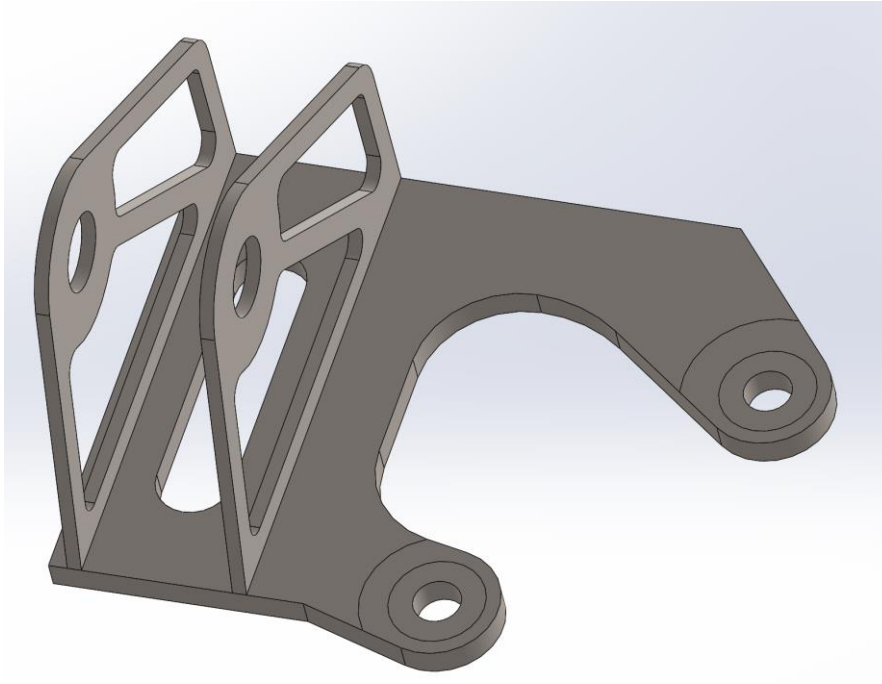


Εικόνα 7.10.6: Ελάφρωμα ανάμεσα στα δύο συγκολλητά μέλη



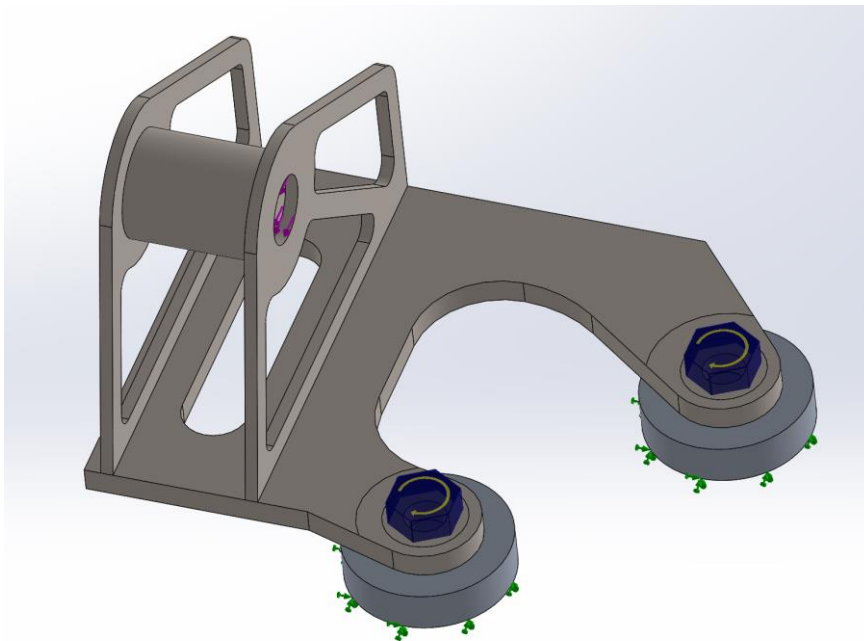
Εικόνα 7.10.7: Ελαφρώματα στα συγκολλητά μέλη

Έτσι πλέον το εξάρτημα έχει την ακόλουθη μορφή (Εικόνα 7.10.8), έχοντας πλέον θεωρητικό βάρος 65,91 γραμμάρια, χωρίς τον υπολογισμό του βάρους της συγκόλλησης.



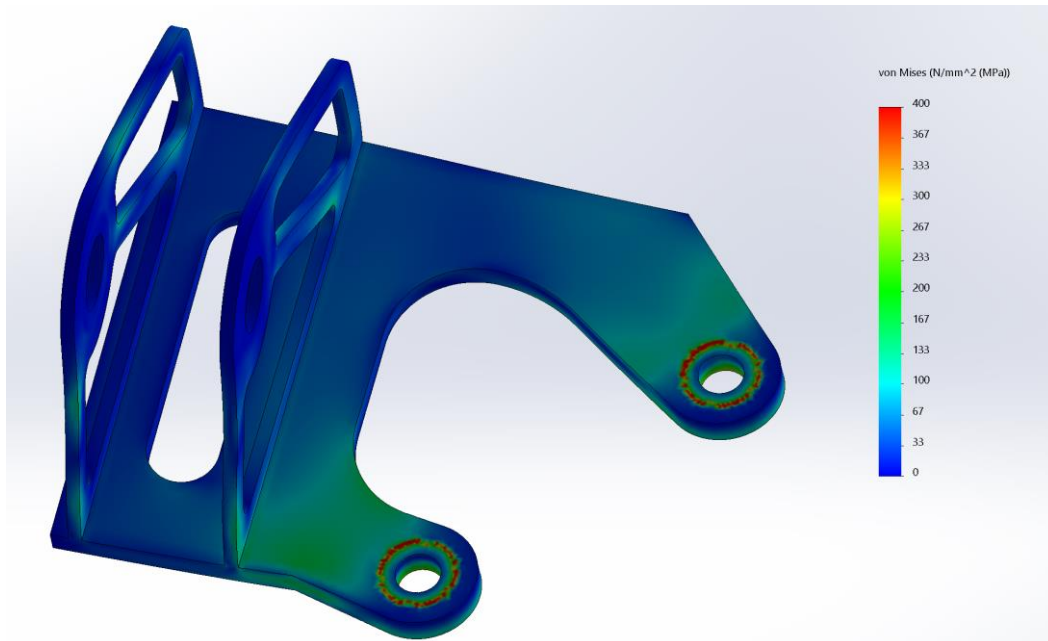
**Εικόνα 7.10.8: Ελαφρυμένη έκδοση συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου**

Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων παραμένει ίδιο από άποψη στηρίξεων και δυνάμεων (Εικόνα 7.10.9). Συνεπώς γίνεται εκ νέου η ανάλυση για να εξεταστούν οι νέες τάσεις που προκύπτουν όπως και οι παραμορφώσεις.



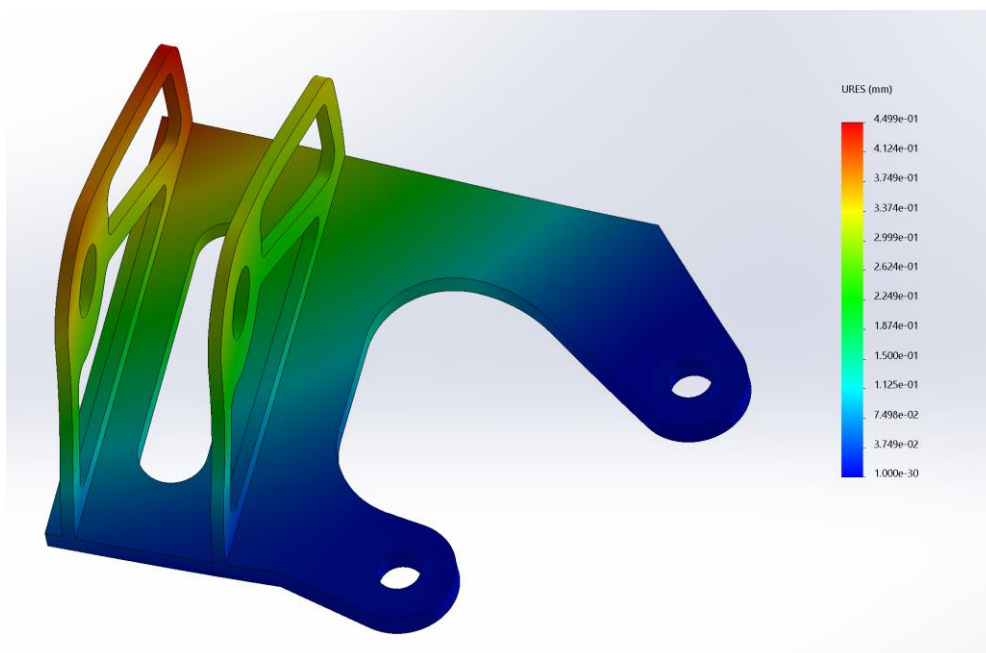
**Εικόνα 7.10.9: Μοντέλο FEA για ελαφρυμένο συγκολλητό bracket πνευματικού εμβόλου**

Από τα αποτελέσματα της νέας ανάλυσης παρατηρούμε πως το εξάρτημα μπορεί να αντέξει την απαραίτητη δύναμη, ενώ η μέγιστη τάση παραμένει 400MPa στα σημεία κοντά στις στηρίξεις (Εικόνα 7.10.10). Στο υπόλοιπο εξάρτημα οι τάσεις κυμαίνονται από 20 έως 250MPa περίπου, ενώ έχει συντελεστή ασφαλείας 7,5.



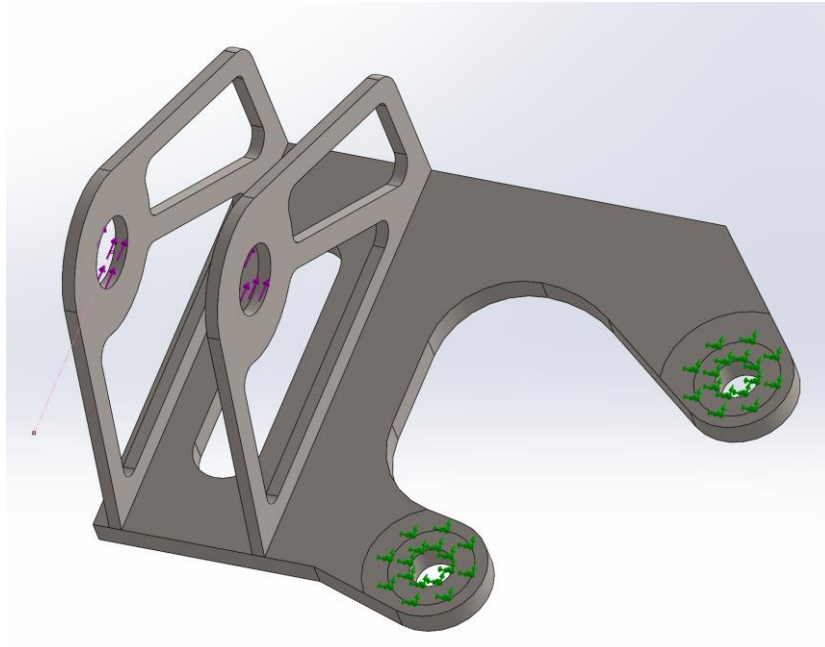
Εικόνα 7.10.10: Τάσεις κατά von Mises στο ελαφρωμένο bracket

Αντίστοιχα οι παραμορφώσεις φαίνονται στην ακόλουθη Εικόνα 7.10.11. Η μεγαλύτερη παραμόρφωση εμφανίζεται στο ακραίο μέλος και είναι 0,5mm.



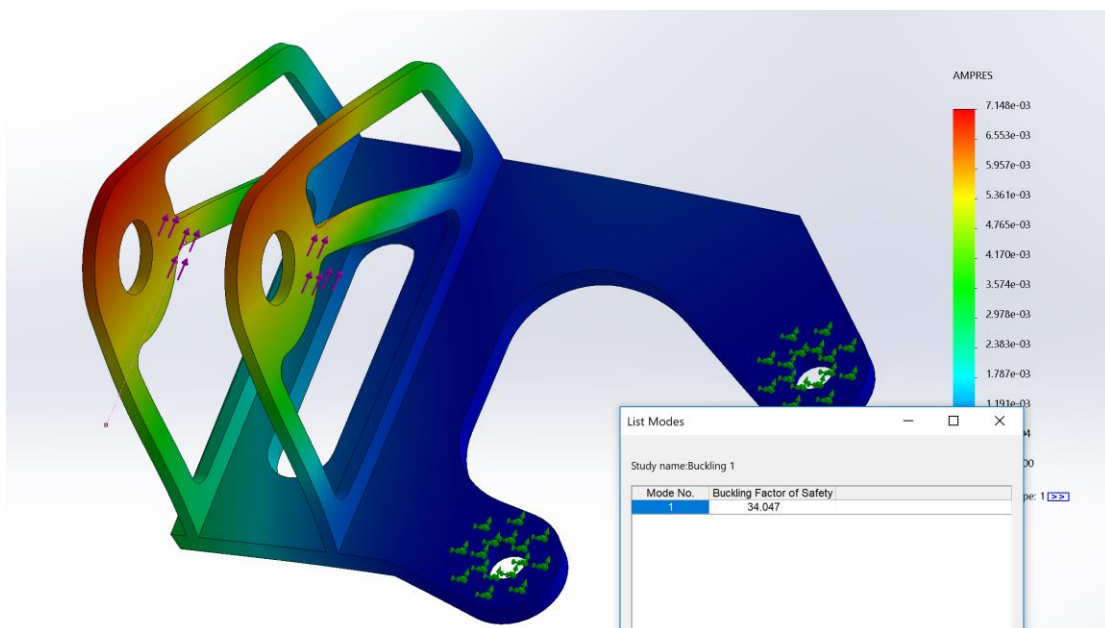
Εικόνα 7.10.11: Παραμορφώσεις στο ελαφρωμένο bracket

Αφού το κομμάτι αποτελεί λεπτότοιχη διατομή θα πρέπει να ελεγχθεί και σε λυγισμό. Για το λόγο αυτό στήνεται μοντέλο για μελέτη buckling στο περιβάλλον του Solidworks (Εικόνα 7.10.12). Αυτή τη φορά γίνεται απλή χρήση πάκτωσης στις στηρίξεις, ενώ η δύναμη των 230N παραμένει ίδια.



Εικόνα 7.10.12: Μοντέλο για μελέτη λυγισμού

Τα αποτελέσματα της μελέτης λυγισμού (Εικόνα 7.10.13) δείχνουν συντελεστή ασφαλείας λυγισμού (buckling factor of safety) 34,047, ο οποίος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος του 1, συνεπώς το εξάρτημα δεν κινδυνεύει από λυγισμό.



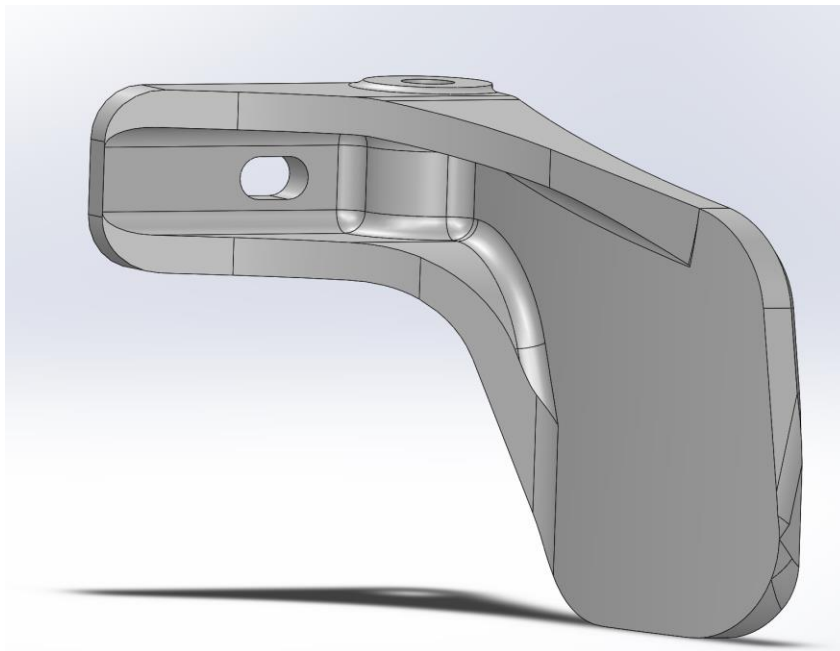
Εικόνα 7.10.13: Αποτελέσματα μελέτης λυγισμού

### 7.11 Χειριστήριο (paddle) αλλαγής ταχυτήτων

Για το χειρισμό του συστήματος από τον οδηγό, δηλαδή την πραγματοποίηση αλλαγών ταχυτήτων, καθώς και τη χρήση του συμπλέκτη είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός της διεπαφής του οδηγού, του τρόπου δηλαδή επικοινωνίας του οδηγού με το σύστημα. Η επικοινωνία αυτή επιλέχθηκε να γίνεται με χρήση δύο paddles για τις αλλαγές ταχυτήτων, τοποθετημένα δεξιά (upshift) και αριστερά (downshift) του τιμονιού στο πίσω μέρος, καθώς και ενός ακόμα στο κάτω αριστερό μέρος του τιμονιού για το χειρισμό του συμπλέκτη. Τα paddles ενεργοποιούν κατά την περιστροφή τους έναν διακόπτη τύπου button (normally open).

Για τα εξαρτήματα αυτά θεωρήθηκε πως ο οδηγός μπορεί να ασκήσει με τα δάχτυλά του στη χειρότερη περίπτωση μια δύναμη 30N, δηλαδή 3kg περίπου σε μια περιοχή που καλύπτουν τα δύο δάχτυλά του. Ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας ορίζεται στο 5, καθώς είναι μεν ένα κρίσιμο εξάρτημα, από την άλλη είναι πολύ εύκολο να αλλαχθεί σε λίγα μόλις λεπτά, ενώ η κατασκευή του παίρνει μερικές ώρες σε έναν 3D εκτυπωτή με πολύ μικρό κόστος. Το ανώτατο βάρος γι' αυτό το εξάρτημα τέθηκε στα 20 γραμμάρια, μιας και θα χρησιμοποιηθούν 3 όμοια (δύο αριστερά κι ένα δεξί mirror part).

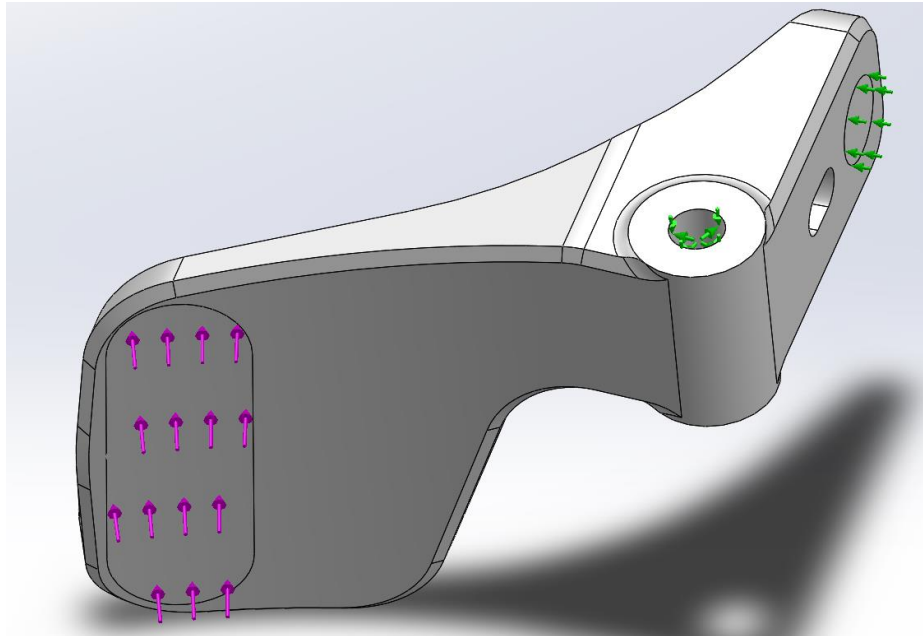
Το αρχικό σχέδιο έγινε για κατασκευή σε 3D-printer από υλικό ABS. Τυπικές τιμές για interlaminar αντοχή του πλαστικού ABS είναι όριο διαρροής 25MPa και θραύσης 30MPa. Το σχέδιο φαίνεται στην Εικόνα 7.11.1.



Εικόνα 7.11.1: Αρχικό σχέδιο paddle

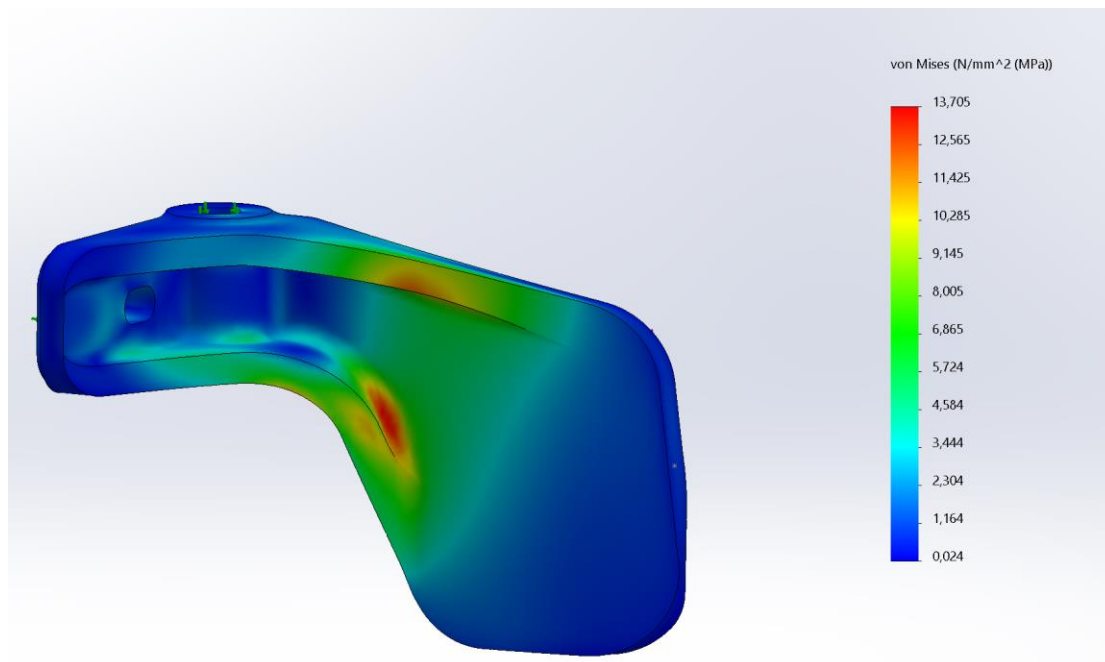
Στη συνέχεια το σχέδιο αναλύθηκε ως προς την αντοχή του στη δύναμη με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο περιβάλλον του λογισμικού Solidworks. Με χρήση split lines ορίστηκε η περιοχή που δέχεται τη δύναμη από τα δάχτυλα του οδηγού, καθώς και η περιοχή όπου βρίσκεται την αντίσταση του διακόπτη (button) όταν τον έχει ενεργοποιήσει πλήρως, δηλαδή έχει τερματίσει τη διαδρομή του. Η στήριξη στον άξονα

περιστροφής του ορίστηκε ως hinge, κατά τον οποίο δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας πλην της περιστροφής, ενώ ο τερματισμός της διαδρομής του διακόπτη μοντελοποιήθηκε με μία κύλιση στο σημείο επαφής με το εξάρτημα. Το μοντέλο φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 7.11.2.



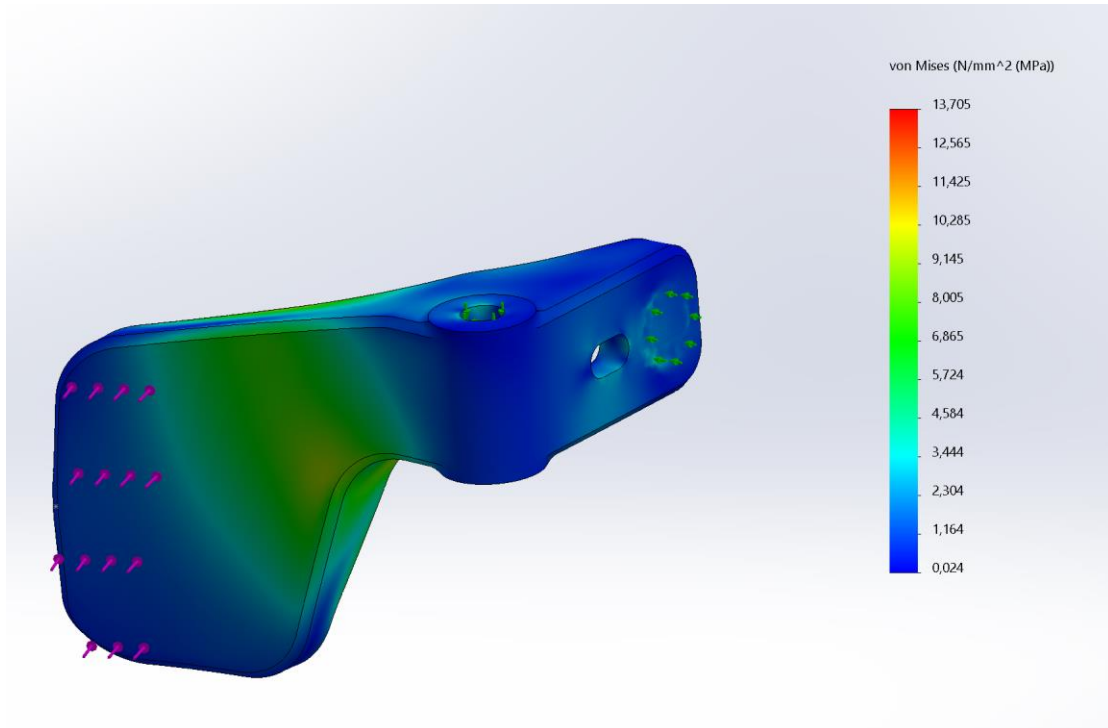
Εικόνα 7.11.2: Μοντέλο μελέτης αντοχής paddle (αρχικό σχέδιο)

Οι τάσεις που εμφανίζονται στο εξάρτημα μετά την επίλυση του μοντέλου φαίνονται στις ακόλουθες Εικόνες 7.11.3 και 7.11.4. Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο άκρο του κάτω νεύρου και είναι 13,7MPa.



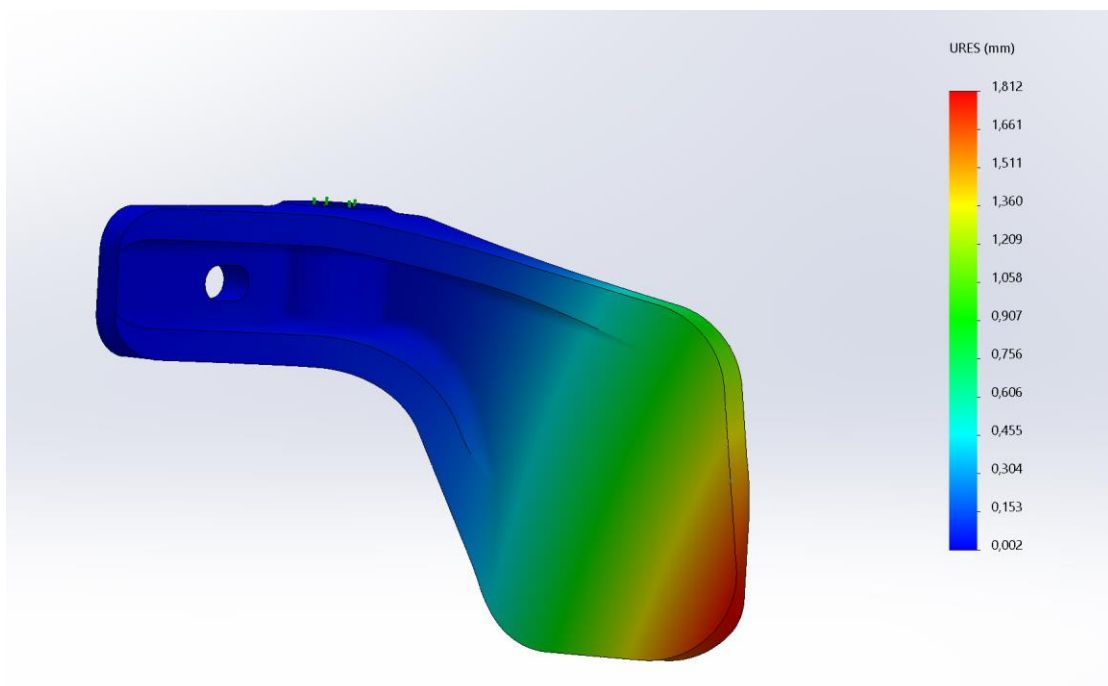
Εικόνα 7.11.3: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (αρχικό σχέδιο) – 1<sup>η</sup> όψη





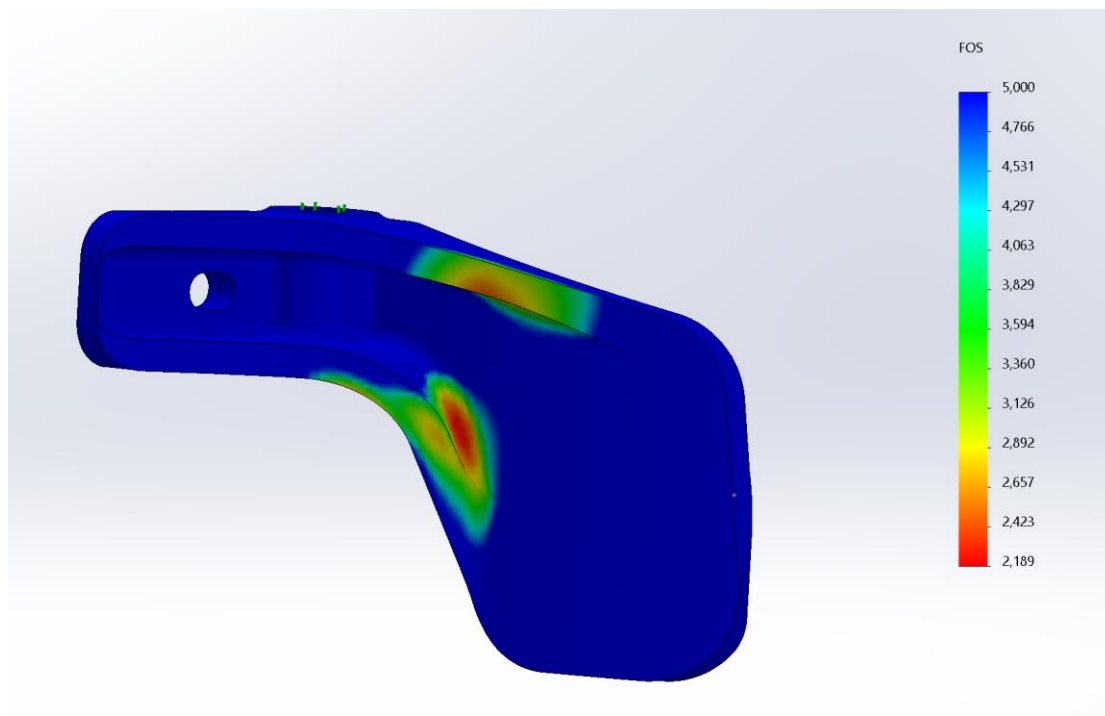
Εικόνα 7.11.3: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (αρχικό σχέδιο) – 2<sup>η</sup> όψη

Οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται φαίνονται στην ακόλουθη Εικόνα 7.11.4. Η μέγιστη παραμόρφωση που εμφανίζεται είναι 1,8mm.



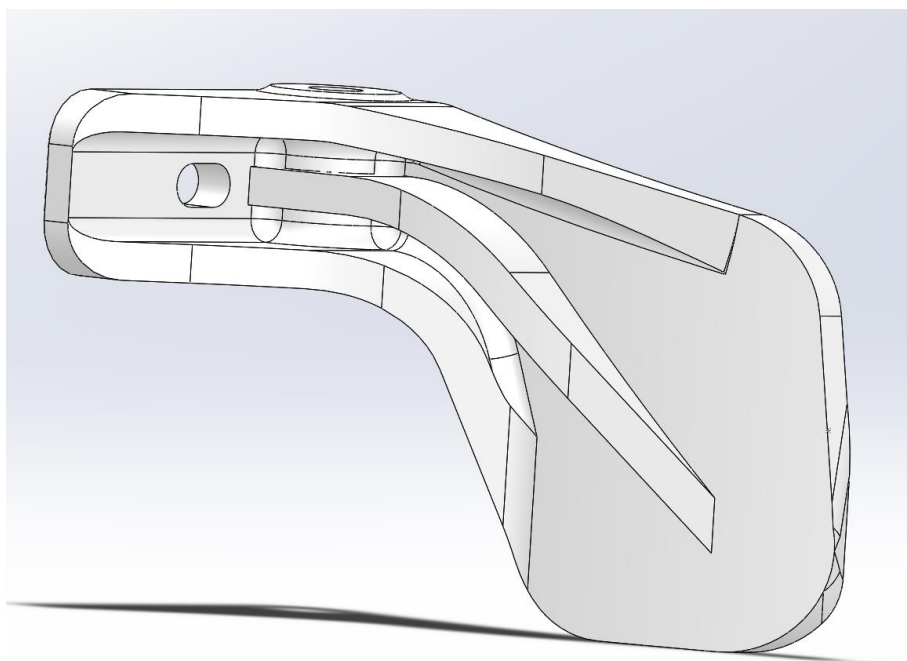
Εικόνα 7.11.4: Παραμορφώσεις paddle (αρχικό σχέδιο)

Ο συντελεστής ασφαλείας στο εξάρτημα φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 7.11.5. Ο ελάχιστος είναι 2 και εμφανίζεται όπως αναμενόταν στο σημείο μέγιστων τάσεων.



Εικόνα 7.11.5: Συντελεστής ασφαλείας paddle (αρχικό σχέδιο)

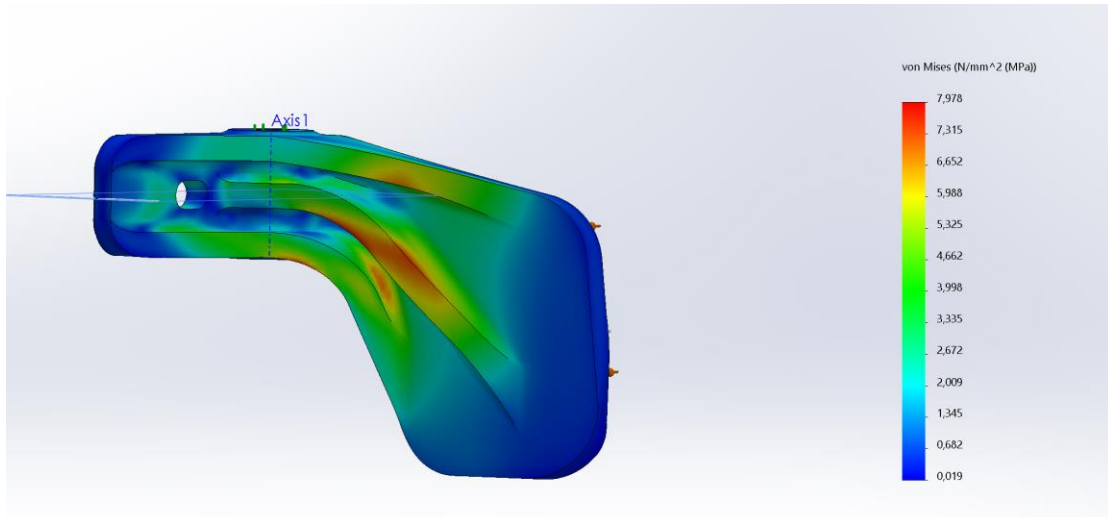
Για τη βελτίωση των παραμορφώσεων και του συντελεστή ασφαλείας έγινε προσθήκη ενός πρόσθετου νεύρου που διατρέχει το paddle ξεκινώντας από τον άξονα περιστροφής και καταλήγοντας στο άκρο του, όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 7.11.6.



Εικόνα 7.11.6: Ενισχυμένο σχέδιο paddle

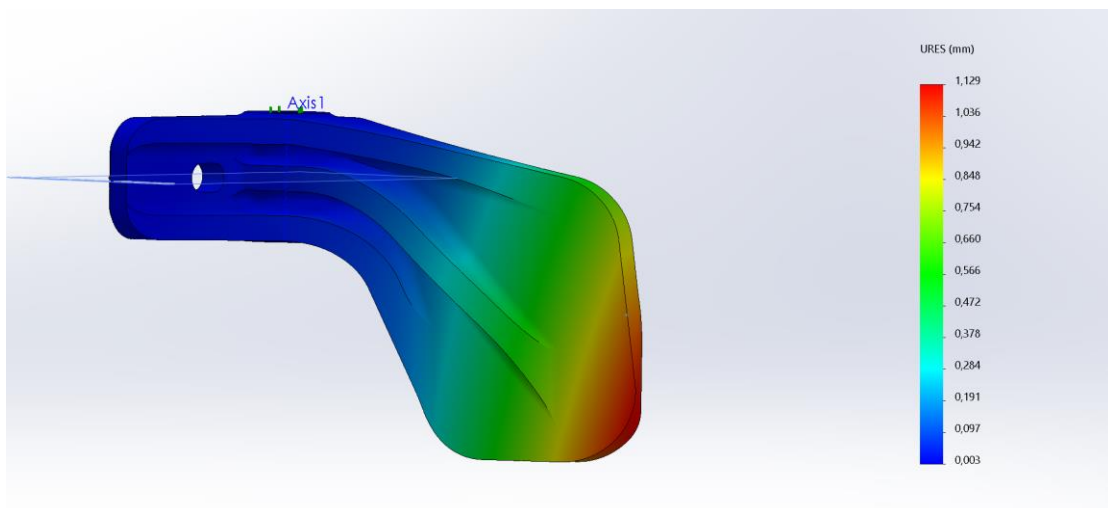
Επιλύοντας και πάλι το μοντέλο με τη νέα γεωμετρία πια βρίσκουμε τις νέες εμφανιζόμενες τάσεις. Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.11.7 η μέγιστη τάση που εμφανίζεται είναι πλέον 8MPa, πετυχαίνοντας μείωση 45%, ενώ αυτή εμφανίζεται μόνο στην κορυφή του νέου νεύρου.





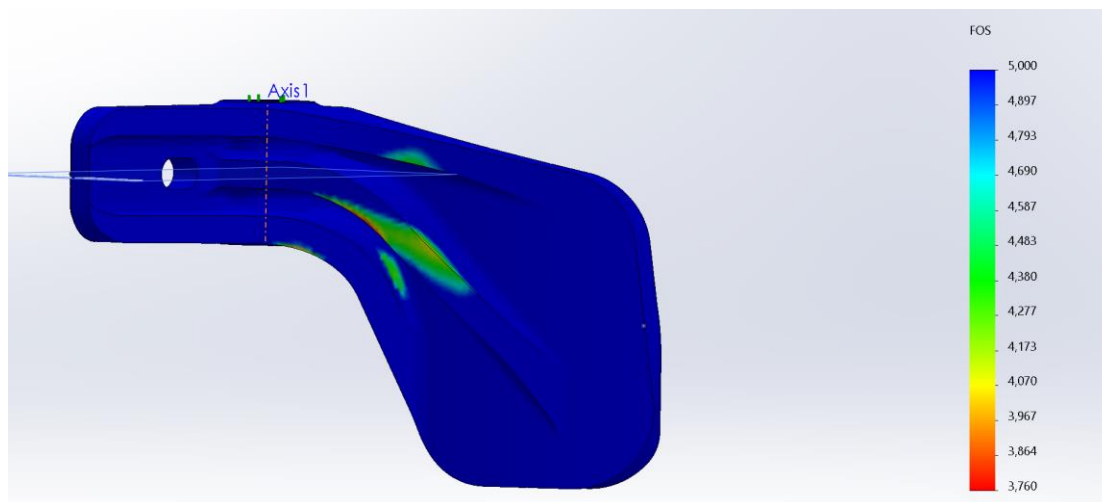
Εικόνα 7.11.7: Τάσεις κατά von Mises στο paddle (ενισχυμένο σχέδιο)

Οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο εξάρτημα φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα . Πλέον η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1,1mm.



Εικόνα 7.11.8: Παραμορφώσεις στο paddle (ενισχυμένο σχέδιο)

Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι πλέον 3,8 ενώ εμφανίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή του νέου νεύρου. Ο συντελεστής ασφαλείας στο υπόλοιπο εξάρτημα κυμαίνεται πολύ παραπάνω (>10). Για λόγους απεικόνισης έχει ρυθμιστεί να εμφανίζεται ως μέγιστος συντελεστής το 5 (Εικόνα 7.11.9).



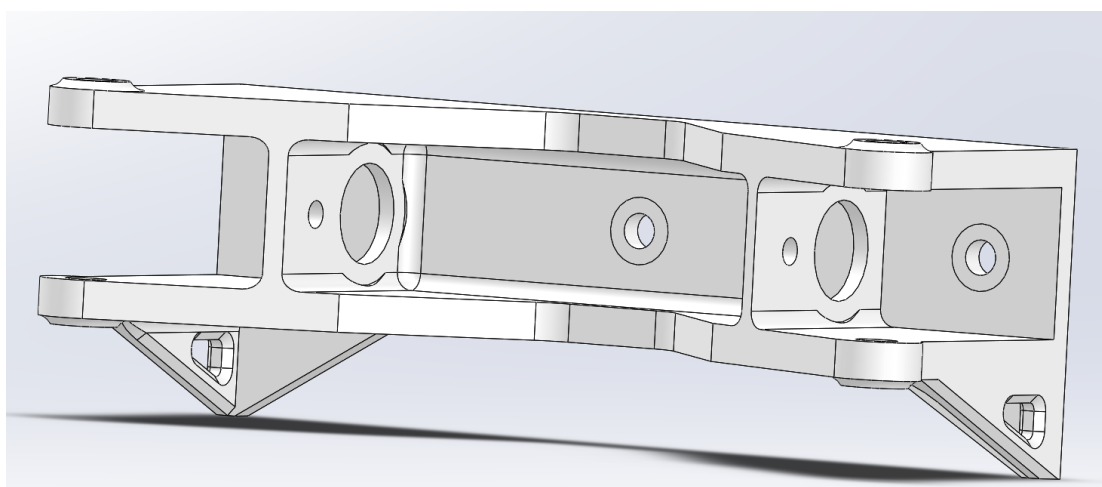
Εικόνα 7.11.9: Συντελεστής ασφαλείας raddle (ενισχυμένο σχέδιο)

Συνεπώς το σχέδιο αυτό ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις ενώ το βάρος του είναι 13,5 γραμμάρια, εντός δηλαδή του στόχου των 20 γραμμαρίων.

## 7.12 Βάση στήριξης χειριστηρίων (paddles)

Για τη στήριξη των χειριστηρίων στο πίσω μέρος του τιμονιού, αλλά και τον ηλεκτρικών διακοπών τύπου button επιλέχθηκε ο σχεδιασμός μιας 3D printed βάσης η οποία θα στηρίζεται στο τιμόνι με τρεις κοχλίες M4 και πάνω της θα μπορούν να στερεωθούν όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα. Το υλικό θα είναι και πάλι ABS, ενώ για τις δυνάμεις που θα δέχεται από τα paddles χρησιμοποιήθηκε από την επίλυση του μοντέλου το raddle η λειτουργία force reaction, ώστε να γίνουν γνωστές οι δυνάμεις που ασκεί το raddle στις στηρίξεις του, δηλαδή στη βάση. Ο στόχος του βάρους τέθηκε στα 35 γραμμάρια.

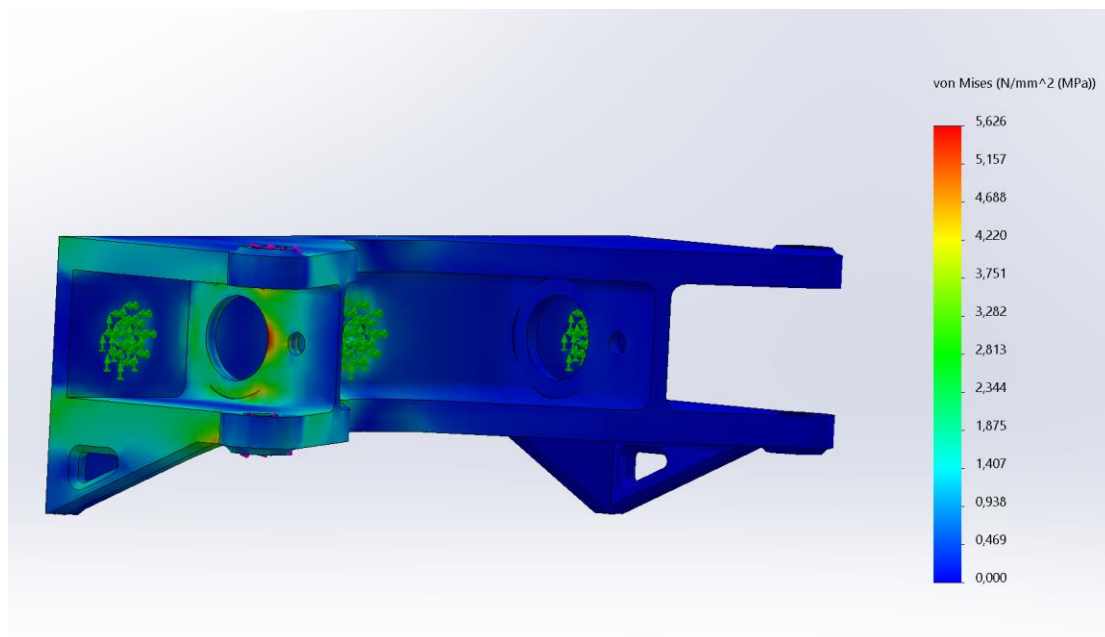
Το αρχικό σχέδιο για τη βάση φαίνεται στην Εικόνα 7.12.1. Διαθέτει τις απαραίτητες οπές ώστε να μπορούν να περάσουν τα καλώδια που συνδέουν τους διακόπτες, καθώς και να στερεωθούν οι ίδιοι.



Εικόνα 7.12.1: Αρχικό σχέδιο βάσης

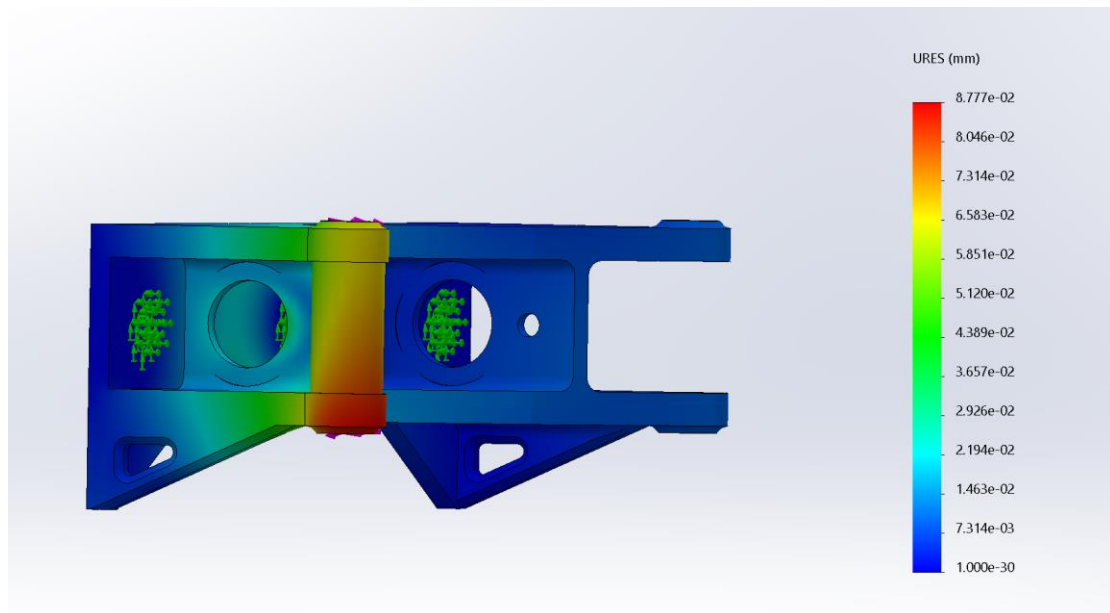
Το σχέδιο αυτό θα μελετηθεί ως προς την αντοχή του με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στο περιβάλλον του Solidworks. Με χρήση του force reaction οι αντιδράσεις που προκαλούνται στη βάση από τη χρήση του paddle είναι στον άξονα περιστροφής προς δύο κατευθύνσεις και συγκεκριμένα 72N και 63N αντίστοιχα. Ακόμα στη θέση όπου εδράζονται οι ηλεκτρικοί διακόπτες υπάρχει μια δύναμη 63N. Τέλος υπάρχει και μια ροπή 0,54Nm στον άξονα περιστροφής. Ως προς τις στηρίξεις του μοντέλου θεωρούνται τρεις πακτώσεις στα σημεία των κοχλιοσυνδέσεων και συγκεκριμένα στους κυκλικούς δίσκους που προσομοιάζουν τις ροδέλες που θα χρησιμοποιηθούν (Φ8), ενώ ακόμα προστίθεται ένας εικονικός τοίχος (virtual wall) στην πλευρά που ακουμπά στο τιμόνι, ώστε να εμποδιστεί η παραμόρφωση της βάσης προς αυτή την κατεύθυνση. Τέλος, προστίθεται ένας rigid κύλινδρος στη θέση του paddle ώστε να εμποδίσει την παραμόρφωση της βάσης και κατά αυτόν τον τρόπο. Η βάση μελετάται για τη χρήση ενός paddle κάθε φορά, καθώς σε κανένα σενάριο χρήσης ο οδηγός δεν καλείται να χρησιμοποιήσει και τα δύο paddles ταυτόχρονα.

Οι προκύπτουσες αναπτυσσόμενες τάσεις στο εξάρτημα από την επίλυση του μοντέλου φαίνονται στην Εικόνα 7.12.2. Η μέγιστη τάση εμφανίζεται κοντά στην έδραση του διακόπτη όπου δέχεται 63N και είναι 5,6MPa.



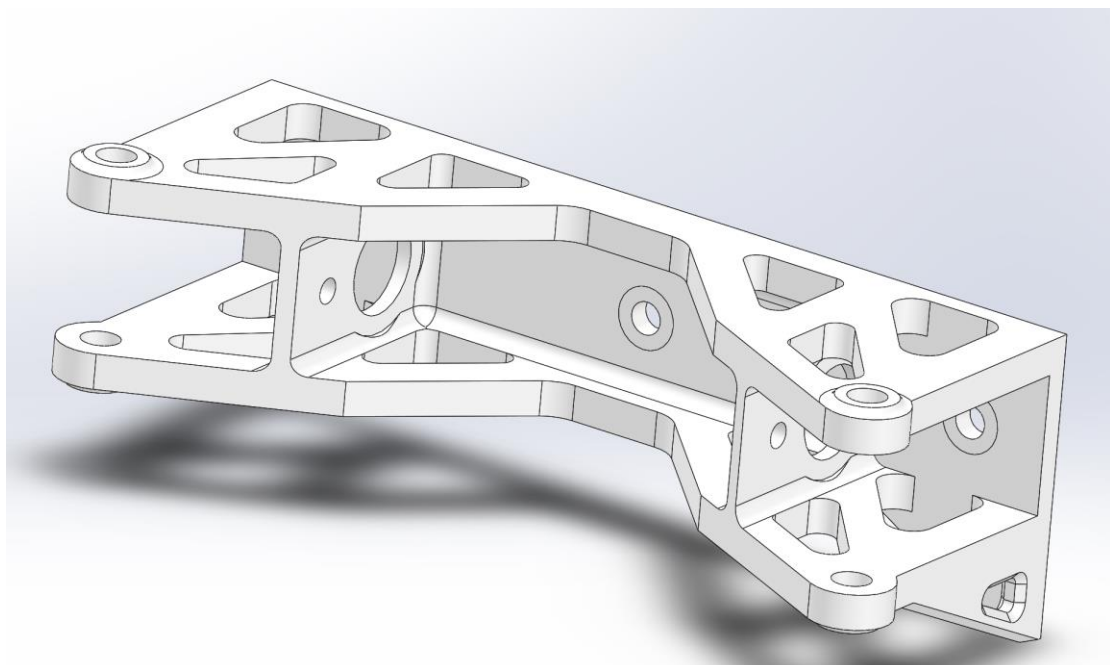
Εικόνα 7.12.2: Τάσεις κατά von Mises στο αρχικό σχέδιο βάσης

Η μέγιστη παραμόρφωση του εξαρτήματος 0,08mm, γεγονός που δε δημιουργεί κανένα πρόβλημα στο εξάρτημα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.12.3.



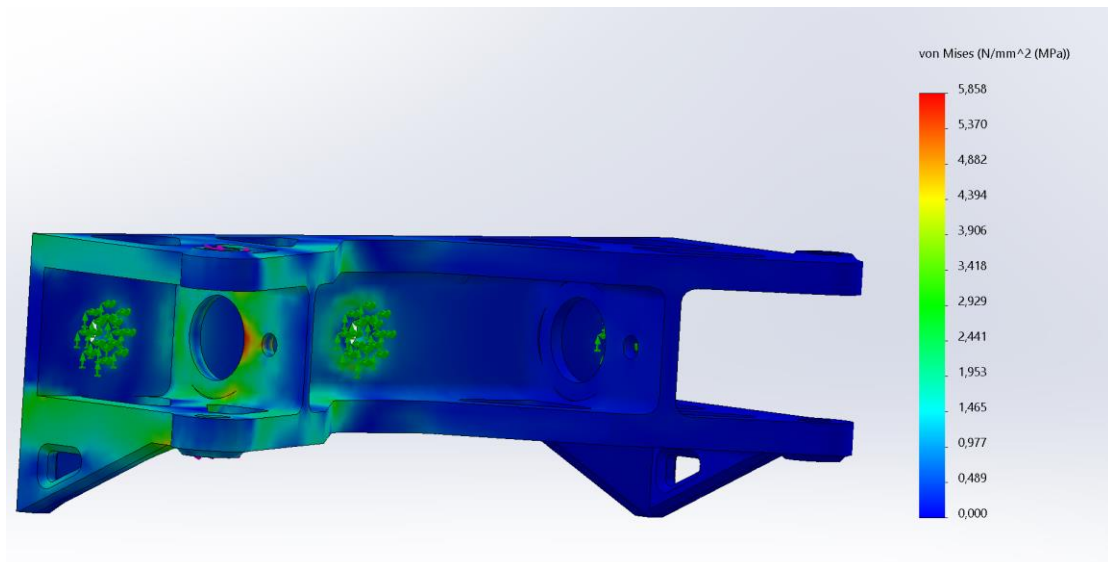
**Εικόνα 7.12.3: Παραμορφώσεις στο αρχικό σχέδιο βάσης**

Παρ' ότι το εξάρτημα με το σχεδιασμό αυτό ικανοποιεί τα κριτήρια αντοχής, δεν ικανοποιεί το κριτήριο του βάρους, καθώς ζυγίζει 42 γραμμάρια. Για το λόγο αυτό γίνονται κάποια τριγωνικά ελαφρώματα στις οριζόντιες πλευρές του, που κρίνοντας από τα αποτελέσματα της μελέτης δε φορτίζονται σημαντικά. Έτσι πλέον το σχέδιο έχει την ακόλουθη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 7.12.4. Πλέον ζυγίζει 31 γραμμάρια και θα αναλυθεί εκ νέου για να διαπιστωθεί η αντοχή του.



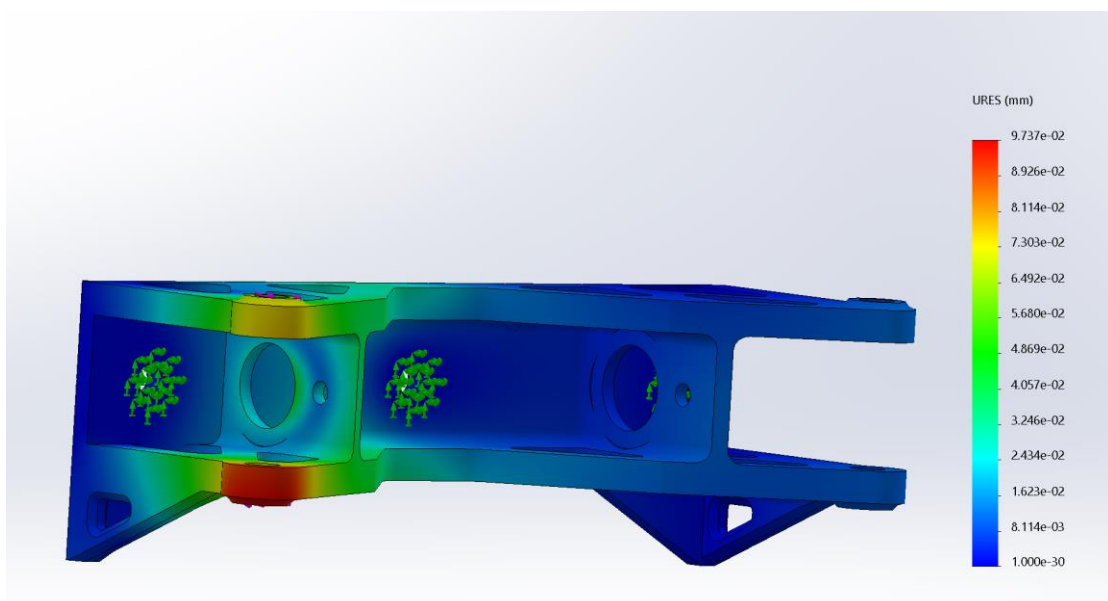
**Εικόνα 7.12.4: Ελαφρωμένο σχέδιο βάσης**

Από την επίλυση του μοντέλου με τη νέα γεωμετρία προκύπτει πως η μέγιστη εμφανιζόμενη τάση είναι 5,9MPa (Εικόνα 7.12.5), η οποία εμφανίζεται στο ίδιο σημείο. Συνεπώς η αύξηση ήταν ασήμαντη.



Εικόνα 7.12.5: Τάσεις κατά von Mises στο ελαφρωμένο σχέδιο βάσης

Αντίθετα, οι παραμορφώσεις ελαττώθηκαν, όντας πλέον της τάξης των μικρομέτρων (Εικόνα 7.12.6), συνεπώς θεωρούνται μηδενικές.



Εικόνα 7.12.6: Παραμορφώσεις στο ελαφρωμένο σχέδιο βάσης

Έτσι διαπιστώνεται πως το σχέδιο αυτό πληροί τόσο τις προϋποθέσεις αντοχής, όσο και αυτές του βάρους.

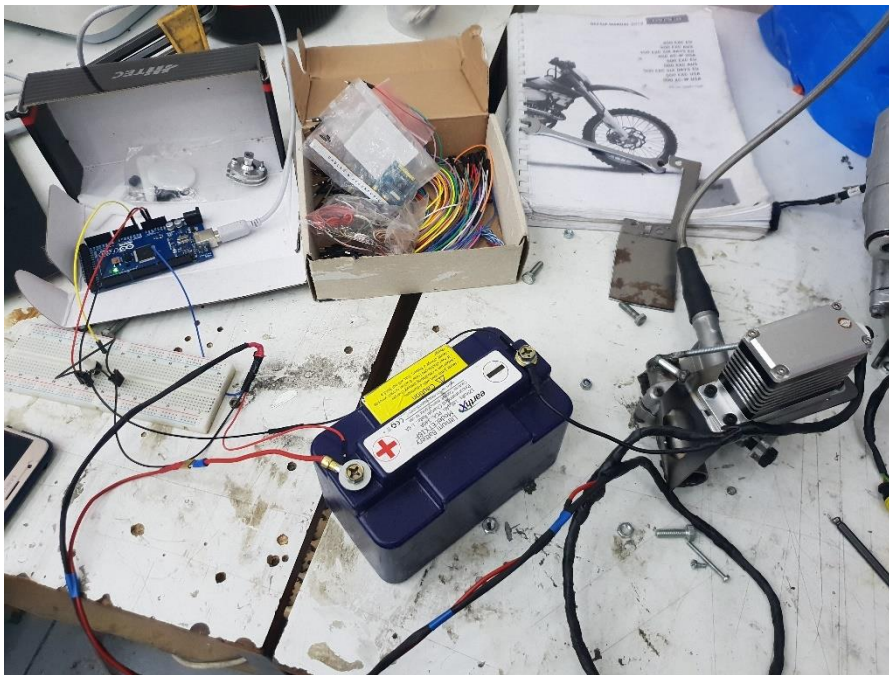




## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ – ΔΟΚΙΜΕΣ - TROUBLESHOOTING

Τα εξαρτήματα του μηχανισμού όπως έχει φανεί και από τα προηγούμενα χωρίζονται σε αγοραστά και προς κατασκευή. Τα προς κατασκευή χωρίζονται σε αυτά που γίνονται από εξωτερικούς συνεργάτες, όπως οι υπηρεσίες laser cut και η 3D εκτύπωση και σε αυτά που γίνονται με ίδια μέσα στο εργαστήριο της ομάδας. Καθώς ο κινητήρας ήταν διαθέσιμος από τις αρχές του 2018, ενώ κάποια αγοραστά κομμάτια κυρίως του πνευματικού συστήματος που αποτελούσαν προϊόν χορηγίας ή παραγγελίας από Αμερική καθυστέρησαν, κατά την αρχική φάση δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη του κώδικα αλλά και τη δοκιμή του συμπλέκτη.

Γι' αυτό το λόγο τα κομμάτια που μπορούσαν να κατασκευαστούν in-house αποπερατώθηκαν γρήγορα και ξεκίνησε η φάση της δοκιμής του συμπλέκτη. Κατά τη φάση αυτή έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι μοίρες στις οποίες ο συμπλέκτης ξεκινά και αποσυμπλέκεται (οι τροχοί γυρνούν χωρίς να κινείται ο στρόφαλος). Γι' αυτό έγινε χρήση ενός breadboard, ενός Arduino και της μπαταρίας του μονοθεσίου. Έπειτα από πρακτικές δοκιμές (Εικόνα 8.1.1) με τον σερβοκινητήρα συνδεδεμένο πάνω στο συμπλέκτη, καθορίστηκαν ως κρίσιμες οι 24 μοίρες.



Εικόνα 8.1.1: Δοκιμαστική διάταξη σερβοκινητήρα

Στη συνέχεια, κι ενώ τα εξαρτήματα του πνευματικού συστήματος παραλήφθηκαν, έγιναν στατικές δοκιμές αλλαγής ταχυτήτων ώστε να μετρηθεί ο χρόνος αλλαγής των ταχυτήτων και να καθοριστούν οι χρόνοι που χρειάζονται τα πηνία της βαλβίδας για να ανοίξουν και να κλείσουν. Ακόμα τα εξαρτήματα που θα τοποθετούνταν στο χώρο του κινητήρα ντύθηκαν με αλουμινοταινία ώστε να μειωθεί η μετάδοση θερμότητας σε αυτά από ακτινοβολία. Συγκεκριμένα ντύθηκαν η βαλβίδα, τα σωληνάκια, η μπουκάλα (αποτελεί και απαίτηση των κανονισμών), ενώ το συγκολλητό bracket βάφτηκε με primer και χρώμα για προστασία από

τη σκουριά και τα 3d printed κομμάτια κόκκινα για να έχουν καλή εικόνα στους κριτές του διαγωνισμού.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως από τους κανόνες του διαγωνισμού το τιμόνι θα πρέπει να μπορεί να αφαιρεθεί από τον οδηγό, με χρήση ενός quick release. Δεδομένου ότι πάνω στο τιμόνι υπάρχει καλωδίωση για τα paddles και για την αποφυγή ύπαρξης πολύ μακριών καλωδίων ώστε να μπορεί να το τιμόνι να μετακινείται πέρα από την καθορισμένη του θέση στην κολώνα, έγινε χρήση ενός quick release το οποίο διαθέτει έτοιμη καλωδίωση με 8 pins τα οποία συνδέονται στο πολύσφηνο από τη μεριά της κολώνας του τιμονιού με το κούμπωμα του quick release.



**Εικόνα 8.1.2: Τελική μορφή αεροφυλακίου, σωλήνα επενδυμένων με αλουμινοταινία και ρυθμιστών πίεσης**

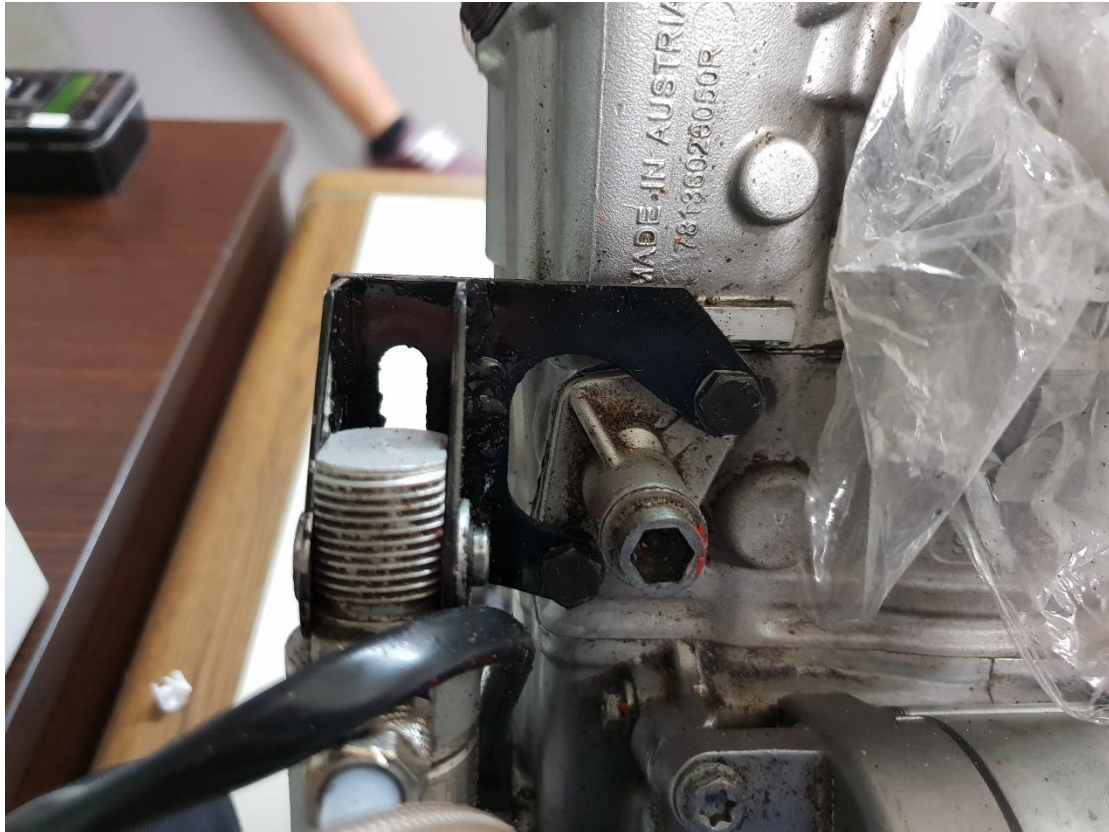




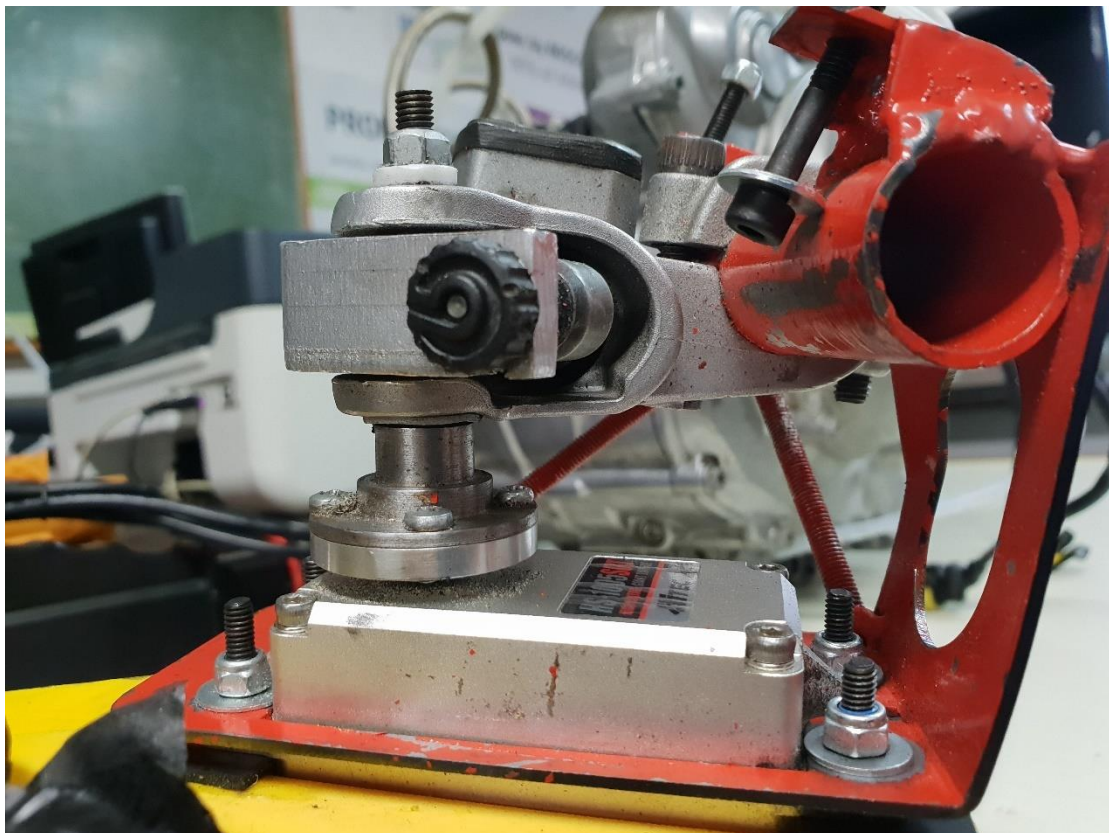
**Εικόνα 8.1.3:** Διαδικασία ρύθμισης πίεσης εξόδου από το δεύτερο ρυθμιστή πίεσης με χρήση κλειδιού τύπου Allen



**Εικόνα 8.1.4:** Τελική μορφή assembly τιμονιού και χειριστηρίων shifter



Εικόνα 8.1.5: Τελική μορφή συγκολλητού bracket πνευματικού εμβόλου



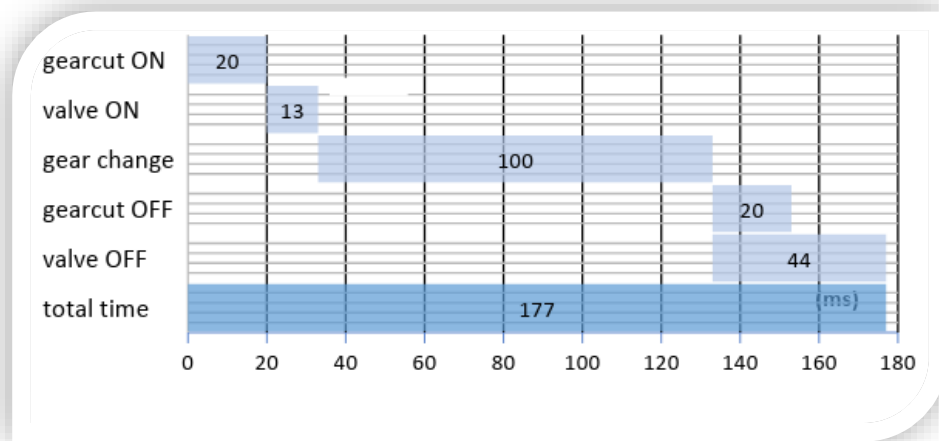
Εικόνα 8.1.6: Τελική μορφή assembly σερβοκινητήρα και συμπλέκτη – 1<sup>η</sup> όψη



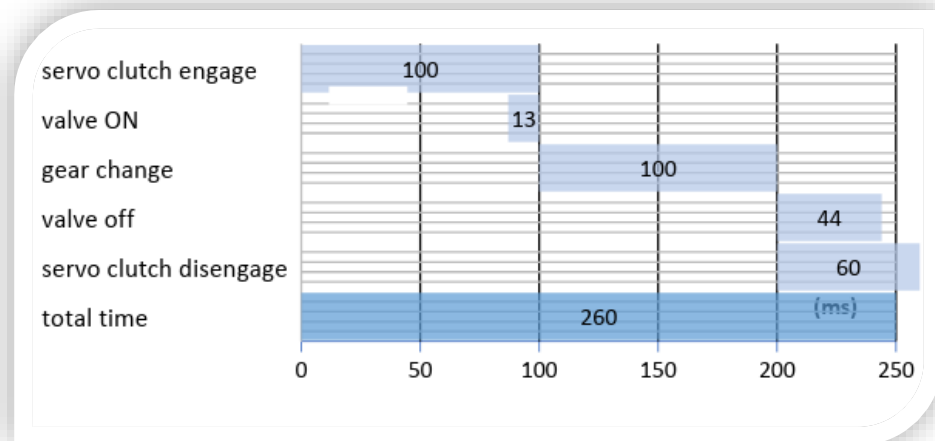


Εικόνα 8.1.7: Τελική μορφή assembly σερβοκινητήρα και συμπλέκτη – 2<sup>η</sup> όψη

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του μονοθεσίου, ακολούθησε περίοδος δοκιμών στον Ιππόδρομο Μαρκόπουλου. Εκεί μαζί με τις δοκιμές αξιοπιστίας και απόδοσης που έγιναν για όλα τα υποσυστήματα του μονοθεσίου πριν τη συμμετοχή στους διαγωνισμούς, έγιναν και δοκιμές για το σύστημα αλλαγής ταχυτήτων. Κατά τη φάση αυτή προστέθηκε ένας μετρητής (counter) στον κώδικα ώστε να μετρηθούν πόσες αλλαγές μπορεί το σύστημα να κάνει στην πραγματικότητα και να συγκριθεί με τις θεωρητικά υπολογισμένες του κεφαλαίου. Διαπιστώθηκε πως η απόκλιση ήταν πολύ μικρή, μετρώντας συνολικά 903 αλλαγές μέχρι να σταματήσει να πραγματοποιεί άλλες (θεωρητικώς υπολογισμένες 926 αλλαγές). Επίσης κατά τη φάση αυτή οι οδηγοί εκπαιδεύτηκαν και εξοικειώθηκαν με τη χρήση του raddle του συμπλέκτη κατά την εκκίνηση του μονοθεσίου, ενώ έγιναν και μετρήσεις του χρόνου αλλαγής ταχυτήτων όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Εικόνα 8.1.8: Συνολικός χρόνος upshift 177 ms, χωρίς τη χρήση συμπλέκτη, αλλά με χρήση gearcut (spark/fuel cut)



Εικόνα 8.1.9: Συνολικός χρόνος downshift 260 ms, με χρήση συμπλέκτη

Επίσης κατά τη φάση των δοκιμών διαπιστώθηκε ύπαρξη θορύβου στο κύκλωμα το οποίο δημιουργούσε διάφορα προβλήματα (το σήμα του οδηγού ή του controller αλλοιωνόταν) καθώς τα καλώδια του συστήματος γειτνιάζαν με καλώδια της υπόλοιπης ηλεκτρικής και ηλεκτρονικής διάταξης του μονοθεσίου. Γι' αυτό το λόγο τα καλώδια αντικαταστάθηκαν με νέα shielded τα οποία απέτρεπαν την εμφάνιση του θορύβου στο κύκλωμα.

Ακόμα λόγω περιορισμένου χρόνου δοκιμών κάποια προβλήματα αξιοπιστίας και συνέπειας του συστήματος δεν μπόρεσαν να γίνουν. Έτσι αυτά αντιμετωπίστηκαν κατά τους διαγωνισμούς, όπου διαπιστώθηκε ότι οι δονήσεις που προέρχονταν από τη λειτουργία του κινητήρα δημιουργούσαν πρόβλημα στη βαλβίδα ελέγχου. Για το λόγο αυτό η βαλβίδα στερεώθηκε στο σασί με χρήση ελασμάτων ανάμεσα σε αυτή και το σασί για απόσβεση των κραδασμών, πράγμα που βελτίωσε σημαντικά τα προβλήματα.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο πρωταρχικός στόχος αυτού του project ήταν η ανάπτυξη ενός ημι-αυτόματου συστήματος αλλαγής ταχυτήτων για χρήση σε οχήματα τύπου Formula Student. Η ανάπτυξη του συστήματος αυτού πηγάζει από την ανάγκη για υψηλών επιδόσεων αλλαγές ταχυτήτων αλλά και την υποβοήθηση του οδηγού σε πίστες υψηλών απαιτήσεων. Παρ' όλο που υπάρχουν πολλά εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα που προσφέρουν ανέβασμα ταχύτητας (upshift) χωρίς τη χρήση συμπλέκτη μέσω της διακοπής της ανάφλεξης, δεν υπάρχουν πιο γενικές λύσεις που βελτιώνουν τη συνολική λειτουργία του συστήματος αλλαγής ταχυτήτων. Γι' αυτό το λόγο καταγράφηκαν οι απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος (PDS), το οποίο συμπεριέλαβε και τη χρήση του συμπλέκτη. Το project χωρίστηκε σε πέντε μεγάλες ενότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν τις πειραματικές μετρήσεις σε απαιτήσεις δύναμης, ροπής και μετατόπισης, το πνευματικό κύκλωμα, το σύστημα ελέγχου, το σχεδιασμό των εξαρτημάτων όπως οι στηρίξεις, καθώς και την κατασκευή και δοκιμή του συστήματος.

Ως αποτέλεσμα αυτών, το πεντάλ αλλαγής ταχυτήτων ελέγχεται από ένα πνευματικό έμβολο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα αεροφυλάκιο υψηλής πίεσης, καθώς αποτελεί πιο ελαφριά λύση σε σχέση με τη λύση ενός μικρού συμπιεστή. Ο συμπλέκτης ενεργοποιείται ηλεκτρο-υδραυλικά και αποτελεί το πιο αργό κομμάτι του όλου συστήματος. Και τα δύο αυτά συστήματα παρακολουθούνται από ποτενσιόμετρα, ενώ ελέγχονται από έναν μικροελεγκτή, για τον οποίο αναπτύχθηκε σχετικός κώδικας. Όλα τα κομμάτια του συστήματος εδράζονται σε brackets τα οποία έχουν σχεδιαστεί και μελετηθεί με γνώμονα το χαμηλό βάρος αλλά και την αντοχή τους. Για την κατασκευή τους έγινε χρήση διάφορων υλικών όπως το αλουμίνιο και το ατσάλι, αλλά και θερμοπλαστικών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε 3D εκτυπωτές, ενώ βάση για το σχεδιασμό μερικών εξαρτημάτων αποτέλεσαν laser scans του κινητήρα, τα οποία διασταυρώθηκαν με πραγματικές μετρήσεις πάνω στον κινητήρα που υπήρχε στη διάθεσή μας. Ακόμα η απόδοση του συστήματος σε αλλαγές ταχυτήτων μετρήθηκε και συγκρίθηκε με τη θεωρητικώς υπολογισμένη.

Γενικά, το σύστημα αυτό αποτελεί μεγάλη εξέλιξη και βελτίωση, αν συγκριθεί με την προηγούμενη χρησιμοποιούμενη μέθοδο αλλαγής ταχυτήτων της Prom Racing, ενώ εκπλήρωσε όλες τις κύριες απαιτήσεις που είχαν τεθεί (ανέβασμα ταχύτητας σε λιγότερο από 300 ms και κατέβασμα σε λιγότερο από 375 ms, έναντι 177 ms και 260 ms αντίστοιχα στην πραγματικότητα), συντέλεσε στην ευκολία οδήγησης του μονοθεσίου από τους οδηγούς, ενώ το βάρος του παρέμεινε στα 2,4 kg συνολικά (απαιτήση για βάρος μικρότερο των 2,5 kg). Ο αντίκτυπος της χρήσης αυτού του συστήματος σε χρόνο πίστας είναι, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις της ομάδας Vehicle Dynamics, μείωση 3200 ms, χρόνος σημαντικά υψηλός στα πλαίσια ενός μονοθεσίου υψηλών επιδόσεων. Το concept αυτό έχει δυνατότητα για περαιτέρω εξέλιξη, κυρίως στη χρήση του συμπλέκτη και στη στήριξη του πνευματικού εμβόλου.

## ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Το σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί θεωρητικά σε οποιοδήποτε κινητήρα KTM 500 EXC χωρίς μετατροπές και ο βασικός χρήστης του είναι οι ομάδες Formula Student. Ο κινητήρας, για τον οποίο σχεδιάστηκε, είναι πολύ κοινός και μπορεί να ωφελήσει πολλά πανεπιστήμια.

Ωστόσο, το σύστημα αυτό, έχει χώρο για περαιτέρω εξέλιξη και βελτίωση σε μερικά υποσυστήματά του. Πιο συγκεκριμένα ο σερβοκινητήρας που χρησιμοποιείται στο συμπλέκτη, αποτελεί το πιο αργό στοιχείο της «αλυσίδας» αλλαγής ταχυτήτων. Αυτός μπορεί να αντικατασταθεί από έναν υψηλής απόδοσης περιστροφικό πνευματικό επενεργητή, αλλά ο έλεγχος του συστήματος θα δυσκολέψει σημαντικά, ενώ είναι απαραίτητη και η χρήση ηλεκτρικής πεταλούδας γκαζιού (fly-by-wire) για να επιτευχθούν ομαλές αλλαγές ταχυτήτων. Το σύστημα ελέγχου μπορεί να ρυθμιστεί και να βελτιστοποιηθεί ώστε να επιτρέπει μεγαλύτερο overlap μεταξύ των διάφορων λειτουργιών που εκτελούνται κατά την αλλαγή των ταχυτήτων, ενώ κάποιες σταθερές του κώδικα μπορούν να αλλάξουν βάσει των συγκεκριμένων προτιμήσεων του κάθε οδηγού.

Επιπροσθέτως, μια άλλη εκδοχή της στήριξης του πνευματικού εμβόλου, ώστε να αυτό να συγκρατείται οριζόντια, θα βοηθούσε στη μείωση του συνολικού κέντρου βάρους του μονοθεσίου. Αντίστοιχα, κατά το σχεδιασμό των μελλοντικών μονοθεσίων της ομάδας θα μπορούσε να γίνει ειδική μέριμνα ώστε και το αεροφυλάκιο να μπορεί να τοποθετηθεί χαμηλά στο μονοθέσιο, επιτρέποντας ωστόσο την εύκολη πρόσβαση σε αυτό για να γίνεται η αναπλήρωσή του. Ακόμα, η βαλβίδα ελέγχου μπορεί να τοποθετηθεί πιο κοντά στο πνευματικό έμβολο, ώστε να μειωθούν οι απώλειες πίεσης και να αυξηθεί ο αριθμός αλλαγών που το σύστημα μπορεί να εκτελέσει χωρίς να χρειάζεται αναπλήρωση, ενώ θα μπορούσε να γίνει χρήση νέων τεχνολογιών κατασκευής όπως το sintering μετάλλων για κάποια εξαρτήματα του συστήματος, που επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων, κερδίζοντας σε ακαμψία, ενώ παράλληλα μειώνει το βάρος.

Τέλος, η επιλογή της νεκράς από τον οδηγό, λόγω της ανάγκης για εκτέλεση μισής κίνησης από το έμβολο, πολλές φορές αποτυγχάνει. Ωστόσο δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για το σύστημα, καθώς η απόδοση και η συνέπεια του συστήματος κατά την επιλογή της νεκράς δεν έχει σημασία για όταν το μονοθέσιο φτάνει σε στάση, αφού μπορεί να γίνει χρήση του συμπλέκτη. Παρ' όλα αυτά, ιδανικά και στην περίπτωση που το βάρος δεν αποτελούσε σημαντικό παράγοντα θα μπορούσε να γίνει χρήση μιας ακόμα βαλβίδας ελέγχου που να επιτρέπει την εκτέλεση της κίνησης του εμβόλου πιο αργά και με ακρίβεια. Ακόμα, η ομάδα Prom Racing σχεδιάζει ένα εντελώς νέο κιβώτιο ταχυτήτων με 4 ταχύτητες, πράγμα που σημαίνει πως ο αριθμός απαιτούμενων αλλαγών θα μειωθεί και συνεπώς θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα αεροφυλάκιο μικρότερου όγκου, άρα και βάρους.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΩΔΙΚΑΣ

Κώδικας για μικροελεγκτή Arduino

```
#include <Servo.h>
#define debounceDelay 50
#define total_gears 5
#define shift_down 3
#define shift_up 4
#define port1 5
#define port2 6
#define clutch_pin 9
#define sparkcut 13 //Gearcut pin at ECU
#define pot_clutch_MIN 939
#define pot_clutch_MAX 1023
#define pot_error 10
#define shift_t 150 //milliseconds to keep valve ON on a full shift
#define hshift_t 15 //milliseconds to keep valve ON on a half
shift(for NEUTRAL)

unsigned long up_DebounceTime=0, down_DebounceTime=0;
int current_gear=0, target_gear=0, gear_pos;
uint16_t pot_pos, clutch_pos, prev_pot_pos=0;
uint8_t shift_up_unpressed, shift_down_unpressed;

Servo clutch;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(shift_up, INPUT_PULLUP);
  pinMode(shift_down, INPUT_PULLUP);
  pinMode(port1, OUTPUT); //moves lever up
  pinMode(port2, OUTPUT); //moves lever down
  pinMode(sparkcut, OUTPUT);

  clutch.attach(clutch_pin, 1000, 1900); //1000->1600ms = 0->60
degrees
  clutch.writeMicroseconds(1900); //initialize servo's position
  Serial.println("----Racing KTM----");
  Serial.println("-----");
}

void loop() {
  pot_pos = analogRead(A0);
  gear_pos=analogRead(A1);

  //check if the clutch is pressed
  //Serial.print("Gear pos: ");
  //Serial.println(gear_pos);
  if(Serial.available()) {
    int c_gear = Serial.parseInt();
    current_gear = c_gear;
    target_gear = current_gear;
  }
  Serial.println(current_gear);
  //Serial.println(clutch.readMicroseconds());
  if(pot_pos<(pot_clutch_MIN+pot_error)) { //the clutch is not
disengaged
    clutch.writeMicroseconds(1900);
```

```

// Serial.println("mpainei");
if ((millis() - up_DebounceTime) > debounceDelay) {
// whatever the reading is at, it's been there for longer
// than the debounce delay, so take it as the actual current
state:

if(digitalRead(shift_up)==LOW) shift_up_unpressed=true; //up
shift
else{
delay(debounceDelay);
if(shift_up_unpressed==true and
digitalRead(shift_up)==HIGH){
target_gear++;
if(target_gear <= total_gears &&
target_gear>1) { //check if we passed the total number of gears
current_gear=target_gear;
Serial.print(current_gear);
Serial.println(" Gear | Up Shift");
Serial.println("-----");
clutch.writeMicroseconds(1500);
delay(94);
digitalWrite(port1, HIGH);
delay(shift_t);
clutch.writeMicroseconds(1800);
digitalWrite(port1, LOW);
}else if(target_gear == 1) target_gear=0;
else target_gear=5;
up_DebounceTime = millis();
shift_up_unpressed=false;
}
}
}

if ((millis() - down_DebounceTime) > debounceDelay) {
// whatever the reading is at, it's been there for longer
// than the debounce delay, so take it as the actual current
state:

if(digitalRead(shift_down)==LOW) shift_down_unpressed=true;
else{
delay(debounceDelay);
if(shift_down_unpressed==true and
digitalRead(shift_down)==HIGH){
target_gear--;
if(target_gear>=1) {
current_gear=target_gear;
Serial.print(current_gear);
Serial.println(" Gear | Down Shift");
Serial.println("-----");
clutch.writeMicroseconds(1500);
delay(94);
digitalWrite(port2, HIGH);
delay(shift_t);
clutch.writeMicroseconds(1800);
digitalWrite(port2, LOW);
// delay(100);
} else if(target_gear < 0) target_gear = 0;
else target_gear=1;
down_DebounceTime = millis();
shift_down_unpressed=false;
}
}
}

```



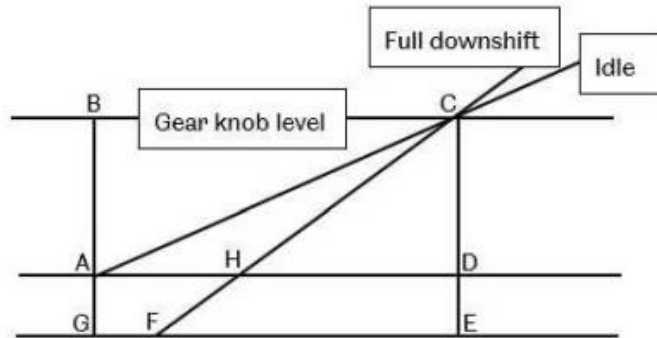
```
    }  
  }  
  }else if (pot_pos > (pot_clutch_MIN+pot_error) and  
pot_pos<=pot_clutch_MAX) { //the clutch is disengaged  
  
    //move servo  
    //Serial.println(pot_pos);  
    clutch_pos = map(pot_pos, pot_clutch_MIN, pot_clutch_MAX, 1800,  
1000);  
    //if (prev_pot_pos-pot_pos>30 || pot_pos - prev_pot_pos>30) {  
    //Serial.println(clutch_pos);  
    clutch.writeMicroseconds(clutch_pos);  
    //prev_pot_pos = pot_pos;  
    //}  
  
    //delay(15);  
  
    if ((millis() - up_DebounceTime) > debounceDelay) {  
    // whatever the reading is at, it's been there for longer  
    // than the debounce delay, so take it as the actual current  
state:  
  
    if (digitalRead(shift_up)==LOW) shift_up_unpressed=true;  
    else{  
    delay(debounceDelay);  
    if (shift_up_unpressed==true and  
digitalRead(shift_up)==HIGH) {  
    target_gear++;  
    if (target_gear <= total_gears && target_gear > 1) {  
    current_gear=target_gear;  
    Serial.print(current_gear);  
    Serial.print(" Gear | Up Shift | Clutch: ");  
    Serial.println(clutch_pos);  
    Serial.println("-----");  
    digitalWrite(port1, HIGH);  
    delay(shift_t);  
    digitalWrite(port1, LOW);  
    }else if (target_gear == 1) {  
    current_gear=target_gear;  
    Serial.print(current_gear);  
    Serial.print(" Gear | Up Shift | Clutch: ");  
    Serial.println(clutch_pos);  
    Serial.println("-----");  
    digitalWrite(port2, HIGH);  
    delay(shift_t);  
    digitalWrite(port2, LOW);  
    }  
    else{target_gear=5;}  
    up_DebounceTime = millis();  
    shift_up_unpressed=false;  
    }  
  }  
  }  
  }  
  
  if ((millis() - down_DebounceTime) > debounceDelay) {  
    // whatever the reading is at, it's been there for longer  
    // than the debounce delay, so take it as the actual current  
state:  
  
    if (digitalRead(shift_down)==LOW) shift_down_unpressed=true;  
    else{
```

```

    delay(debounceDelay);
    if(shift_down_unpressed==true and
digitalRead(shift_down)==HIGH){
        target_gear--;
        if(target_gear>=1) {
            current_gear=target_gear;
            Serial.print(current_gear);
            Serial.print(" Gear | Down Shift | Clutch: ");
            Serial.println(clutch_pos);
            Serial.println("-----");
            digitalWrite(port2, HIGH);
            delay(shift_t);
            digitalWrite(port2, LOW);
        }
        else if(target_gear==0){
            current_gear=target_gear;
            Serial.print(current_gear);
            Serial.print(" Gear | Down Shift | Clutch: ");
            Serial.println(clutch_pos);
            Serial.println("-----");
            digitalWrite(port1, HIGH);
            delay(hshift_t);
            digitalWrite(port1, LOW);
        }
        else{target_gear=0;}
        down_DebounceTime = millis();
        shift_down_unpressed=false;
    }
}
}
}
}

```

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΕΝΤΑΛ ΑΛΛΑΓΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ



Εικόνα Β.1: Γεωμετρία περιστροφής πεντάλ αλλαγής ταχύτητας

Θεωρούμε το πεντάλ αλλαγής ταχύτητας ( $R=110\text{mm}$ ) σε δύο θέσεις, τη θέση ηρεμίας (idle) AC και το πλήρες κατέβασμα (full downshift) FC. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις κάθετης απόστασης  $GA=66-35=31\text{mm}$  (Πίνακας 3.1) και ότι  $B\hat{C}A = 20^\circ$ , η  $A\hat{C}F$  μπορεί να υπολογιστεί, η οποία και είναι η γωνία περιστροφής για ένα πλήρες downshift. Η μέθοδος επίλυσης είναι παρόμοια και για τις άλλες κινήσεις του πεντάλ.

Από Πυθαγόρειο Θεώρημα ισχύει:

$$FC^2 = EC^2 + FE^2 \quad (1)$$

$$FE = GE - GF \quad (2)$$

Αντικαθιστώντας τη (2) στην (1) έχουμε:

$$FC^2 = EC^2 + GE^2 - 2 * GE * GF + GF^2 \quad (3)$$

$$GE = AD = R * \cos(20) \quad (4)$$

$$DC = R * \sin(20) \quad (5)$$

Αντικαθιστώντας τις (4) και (5) στην (3) έχουμε:

$$R^2 = (R * \sin(20) + GA)^2 + (R * \cos(20))^2 - 2 * R * \cos(20) * GF + GF^2 \quad (6)$$

Από Πυθαγόρειο (Εξ. 7)  $AF=35,6\text{mm}$ , συνεπώς από νόμο ημιτόνων (Εξ. 8), η  $A\hat{C}F$  μπορεί να υπολογιστεί (Εξ. 9), οπότε και η τελική γωνία είναι  $20+18,6=38,6$  μοίρες. Τα πλήρη αποτελέσματα βρίσκονται στον Πίνακα 3.1.

$$AF^2 = GA^2 + GF^2 \quad (7)$$

$$AF = R * \frac{\sin(180 - 2 * C\hat{F}A)}{\sin(C\hat{F}A)} = R * \frac{\sin(2 * C\hat{F}A)}{\sin(C\hat{F}A)} \quad (8)$$

$$A\hat{C}F = 180 - 2 * \cos^{-1}\left(\frac{AF}{2 * R}\right) = 18,6 \quad (9)$$

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Formula Student Germany**, 2018 Rules v1.1.
- [2] **Dahiya, Siddharth, et al.** Electro-Pneumatic Shifting System and Gear Control Unit for a Sequential Gearbox. s.l. : SAE INTERNATIONAL, 2016.
- [3] **Siler, Wes.** Riding Tricks - Blipping the Throttle to Make Downshifts Smoother. RideApart. 2013.
- [4] **Yamamoto, Mauricio Kenji, et al.** Some Considerations Regarding the Development Procedure of Commercial Vehicles Shifting Systems. Brasil : DaimlerChrysler Ltda, 2003.
- [5] **Hawkings, C.** Design and Development of the IRL Transmission for the 2000-2005 Seasons. s.l. : Xtrac Limited, Motorsport Transmissions, 2002.
- [6] **Okunishi, S, et al.** Technical Developments of Power Train of the FSAE-J Championship Car Originally. s.l. : Department of Mechanical Engineering, Osaka University, 2011.
- [7] How Do Motorcycle Quick Shifters Work? **Poovey, B.** s.l. : RideApart, 2014.
- [8] Conceptual Design of Economic Hybrid Vehicle System Using Clutchless Geared Smart Transmission. **Yoon, Y S, Kim, S J and Kim, K S.** 5, Daejeon, Korea : s.n., 2013, Vol. 14.
- [9] **Ajirogi, Andrew, et al.** Paddle Shifters. s.l. : UC Berkeley Formula SAE Team, 2011.
- [10] **Nagpal, Shaurya.** Upgraded Design of Electrical Gear Shifter For Formula Student Racing car. s.l. : University of Glasgow School of Engineering, 2012.
- [11] **Enomoto, H, et al.** Simplification of the Shift/Clutch Operations for the Formula SAE Vehicles. s.l. : Kanazawa University and KADO Corporation, 2007.
- [12] **Braghin, F and Salis, F.** A Low Cost System for Active Gear Shift and Clutch Control. s.l. : Polytechnic University of Milan, 2015.
- [13] **Baronti, F, et al.** Electronic Control System of a Formula SAE Gearbox Using Electric Voice Coil Actuators. s.l. : University of Pisa, 2009.