



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ***

Σπουδαστής: Φωτεινάτος Σπυρίδων ΑΜ:4646 | Εισηγητής: Κονταξάκης Κωνσταντίνος

Ηράκλειο 2015

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέπων καθηγητή μου Δρ. Κωνσταντίνο Κονταξάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας πτυχιακής εργασίας καθώς και για την καθοδήγηση του και τη βοήθεια που μου προσέφερε για την περάτωση της.

Οφείλω επίσης ένα ευχαριστώ στον καθηγητή Δρ. Πετούση Μάρκο για την παραχώρηση των τρισδιάστατων εκτυπωτών και των εργαλειομηχανών CNC του εργαστηρίου Ρομποτικής του τμήματος, καθώς και στο προσωπικό του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθεια και την συνεργασία τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Αιολικού εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για την ηθική και υλική υποστήριξη όλων αυτό τον καιρό.

Φωτεινάτος Σπύρος

Ηράκλειο 2015

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη σχεδιομελέτη μιας μετρητικής διάταξης κατάλληλης για μετρήσεις απόδοσης πτερυγώσεων μοντέλων μικρών ανεμογεννητριών στην αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης. Ο σχεδιασμός της διάταξης έγινε στο λογισμικό Solidworks και τα κομμάτια κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο του Αιολικού Εργαστηρίου καθώς και στις εργαλειομηχανές CNC και τους τρισδιάστατους εκτυπωτές του Εργαστηρίου Ρομποτικής του τμήματος.

Abstract

This undergraduate project includes the design of a measuring device capable of measuring the performance of small model wind turbine blades at the wind tunnel of Wind Energy Lab of TEI Crete. The design of the device was done in Solidworks and the parts were fabricated at the machine tools of Wind Energy Lab as well as at CNC machines and 3D printers of Robotics Lab of the department.

Keywords

wind energy, wind tunnel, wind turbine, 3D model, 3D design, measuring device

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή
2. Αεροσήραγγα
 - 2.1. Εισαγωγή
 - 2.2. Τύποι αεροσηραγγών
 - 2.3. Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες
 - 2.4. Περιγραφή αεροσήραγγας Αιολικού Εργαστηρίου ΤΕΙ Κρήτης
 - 2.5. Μέτρηση Ροής
3. Πτερυγώσεις ανεμογεννητριών
 - 3.1. Συμβολισμοί
 - 3.2. Υπολογισμός της χορδής των πτερυγώσεων
 - 3.3. Θεωρία αεροδυναμικής απόδοσης της πτερύγωσης.
4. Μετρήσεις
 - 4.1. Μετρήσεις και σφάλματα
 - 4.2. Ακρίβεια μετρήσεων: Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα
 - 4.3. Σφάλματα μετρητικής διάταξης
5. Προδιαγραφές μετρητικής διάταξης
6. Μετρούμενα μεγέθη και αισθητήρες
 - 6.1. Ισχύς
 - 6.1.1. Τρόπος μέτρησης Α΄
 - 6.1.2. Τρόπος μέτρησης Β΄
 - 6.1.2.1 Ροπή
 - 6.1.2.1α. Κυψέλες φόρτισης
 - 6.1.2.1β. Ροπόμετρο
 - 6.1.2.2 Ρυθμός περιστροφής
 - 6.1.2.2α. Αξονικοί οπτικοί κωδικοποιητές
 - 6.2. Οπισθέλκουσα
 - 6.3. Επιλογή Αισθητήρων
7. Σχεδιασμός διάταξης
 - 7.1. Α φάση
 - 7.2. Επιλογή πέδης
 - 7.3. Προβλήματα και αιτίες
 - 7.4. Β φάση (τελική επιλογή)
 - 7.5. Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πλαστικών γκραναζιών
 - 7.6. Βάση διάταξης
 - 7.7. Φωτογραφίες και σχέδια 3d των εξαρτημάτων
8. Υπολογισμοί (άξονες, ρουλεμάν)
 - 8.1. Υπολογισμοί και επιλογή άξονα
 - 8.2. Επιλογή ρουλεμάν
9. Οδηγίες συναρμολόγησης

- 9.1. Έδραση ρουλεμάν 1
- 9.2. Έδραση ρουλεμάν 2
- 9.3. Πέδη
- 9.4. Βάση μετρητικής διάταξης
- 9.5. Ροπόμετρο
- 9.6. Φτερωτή
- 10. Μετρήσεις στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου
- 11. Παραρτήματα
 - 11.1. Παράρτημα 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ροπόμετρου
 - 11.2. Παράρτημα 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά encoder
 - 11.3. Παράρτημα 3: Δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του Αιολικού Εργαστηρίου του ΤΕΙ Κρήτης.
 - 11.4. Παράρτημα 4: Τύρβη
 - 11.5. Τεχνικά χαρακτηριστικά servo
 - 11.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά load cell
 - 11.6. Κατασκευαστικά σχέδια
- 12. Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να μελετηθεί να σχεδιαστεί και τέλος να κατασκευαστεί μια μετρητική διάταξη η οποία θα είναι σε θέση να μετράει την ισχύ μικρών πτερυγώσεων στην αεροσήραγγα του Αιολικού εργαστηρίου του ΤΕΙ Κρήτης.

Οι μετρητικές διατάξεις γενικά έχουν τη σπουδαιότητα ότι μας παρέχουν πειραματικά δεδομένα τα οποία μπορούμε να τα συγκρίνουμε με θεωρητικά δεδομένα από υπολογισμούς που έχουμε κάνει και να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα οι μετρήσεις των πτερυγώσεων στην αεροσήραγγα είναι πολύ σημαντικές διότι μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν το σχεδιασμό των φτερών των ανεμογεννητριών σε σχέση με την ισχύ τους και την ταχύτητα του ανέμου.

Οι προκλήσεις στο σχεδιασμό μιας μετρητικής διάταξης, όπως και αυτή που θα μελετήσουμε, είναι αρκετές. Η πιο σημαντική είναι η διάταξη να είναι ακριβής και αξιόπιστη στα αποτελέσματα που θα μας παρέχει όσο αυτό είναι δυνατόν. Άλλα σημαντικά σημεία είναι η ευκολία κατασκευής, η χωροταξία και φυσικά το κόστος κατασκευής. Είναι λοιπόν προφανές ότι χρειάζεται σωστή μελέτη και σχεδιασμός ώστε να έχουμε μια λειτουργική και αξιόπιστη μετρητική διάταξη.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή και η περιγραφή του σκοπού της πτυχιακής καθώς και ανάλυση της δομής της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία μιας αεροσήραγγας, αναφέρονται διάφοροι τύποι και τέλος παρέχονται τα στοιχεία της αεροσήραγγας του Αιολικού εργαστηρίου του ΤΕΙ Κρήτης όπου και θα χρησιμοποιηθεί η μετρητική διάταξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η θεωρία και το τυπολόγιο που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των πτερυγώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται η θεωρία μετρήσεων και σφαλμάτων και επεξηγείται πως μπορεί μέσω του σχεδιασμού να ελαχιστοποιήσουμε τα σφάλματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι προδιαγραφές που θα έχει η μετρητική διάταξη.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μεγέθη τα οποία πρέπει να μετρούνται, οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και η αρχή λειτουργίας τους

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχικές ιδέες για το σχεδιασμό της διάταξης, προβλήματα και λύσεις του σχεδιασμού καθώς και επιλογή της πέδης που θα χρησιμοποιηθεί.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται η μελέτη και οι υπολογισμοί για τους άξονες και τα έδρανα που θα χρησιμοποιηθούν στη μετρητική διάταξη.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια που αποτελούν τη μετρητική διάταξη.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται οδηγίες για τη συναρμολόγηση της μετρητικής διάταξης.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται μετρήσεις πτερυγώσεων στην αεροσήραγα.

Τέλος, στο δωδέκατο κεφάλαιο υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη διάταξη.

2. Αεροσήραγγα

2.1 Εισαγωγή

Οι **αεροσήραγγες** (wind tunnels) εμφανίστηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλείς το 1903 από τους *αδελφούς Wright*. Η χρήση τους εξαπλώθηκε γρήγορα μιας και έχουν τη δυνατότητα να δέχονται μοντέλα υπό κλίμακα και διαρκή διαθεσιμότητα. Με αυτό τον τρόπο παρέχουν τη δυνατότητα η αεροδυναμική έρευνα να γίνεται προσιτή οικονομικά, ταχύτατη και ακριβής.

Εφόσον στις αεροσήραγγες τοποθετούνται συνήθως μοντέλα με κλίμακα μικρότερη από αυτή των υπό μελέτη αντικειμένων, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στον τρόπο με τον οποίο σχετίζονται τα μοντέλα με τα υπό μελέτη αντικείμενα. Στις αεροσήραγγες χαμηλών ταχυτήτων, όπως αυτή του εργαστηρίου, η συσχέτιση πραγματοποιείται μέσω του *αριθμού Reynolds*, ο οποίος ορίζεται ως :

$$Re = \frac{\rho \times V \times l}{\mu}$$

όπου

ρ : η πυκνότητα του ρευστού (για αέρα 1,225 Kg/m³)

V : η ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

l : μία διάσταση αναφοράς (m)

μ : το ιξώδες του ρευστού (για αέρα 18×10^{-5} Kg/m×sec)

Για να θεωρηθεί ένα πείραμα που πραγματοποιείται σε αεροσήραγγα όμοιο με την αεροδυναμική συμπεριφορά του φυσικού αντικειμένου, πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό Reynolds.



2.1.1 Κατασκευή μοντέλου για αεροδυναμικές μετρήσεις.



2.1.2 Τελική μορφή μοντέλου.

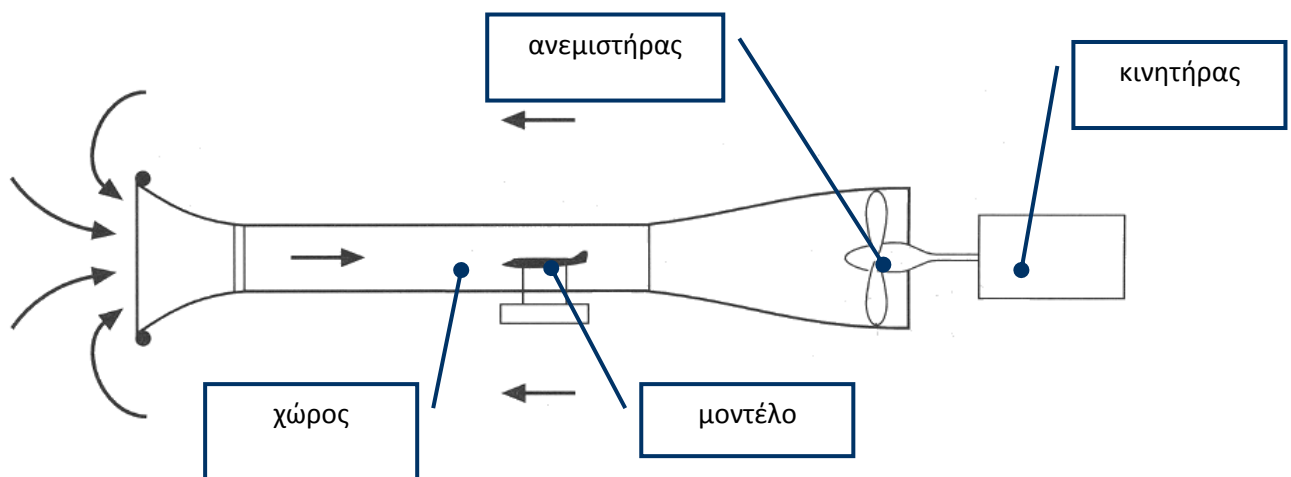
Βασικό ρόλο στη κατασκευή ενός μοντέλου έχει η ακρίβεια με την οποία κατασκευάζεται. Επίσης η επιφάνεια αυτού οφείλει να έχει όσο το δυνατόν πιο λεία υφή για την αποφυγή μεγάλου οριακού στρώματος.

2.2 Τύποι αεροσηραγγών

Οι αεροσήραγγες που συνήθως απαντώνται είναι 2 τύπων με δύο διαφοροποιήσεις του χώρου δοκιμών.

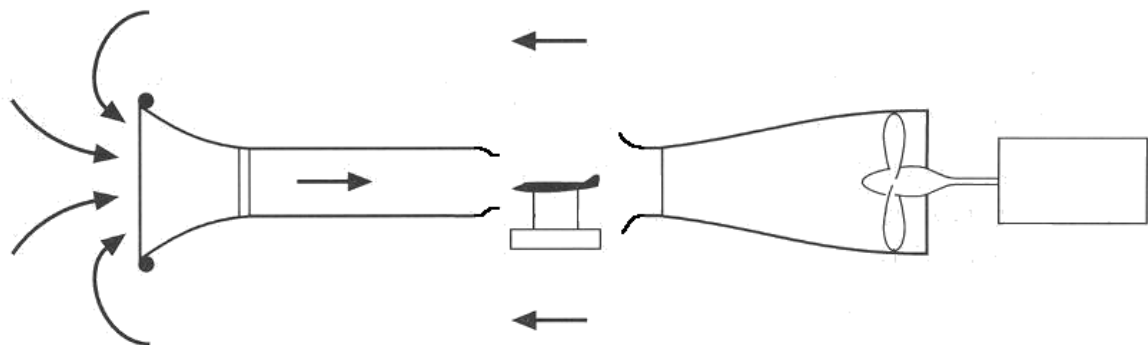
- Η αεροσήραγγα **ανοικτού κυκλώματος** (open circuit) χαρακτηρίζεται από την ευθύγραμμη κίνηση που ο αέρας πραγματοποιεί εντός αυτής και την εισαγωγή του από τον περιβάλλοντα χώρο, όπου και εξέρχεται.

Οι αεροσήραγγες ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών ονομάζονται open circuit - closed jet (NPL type)



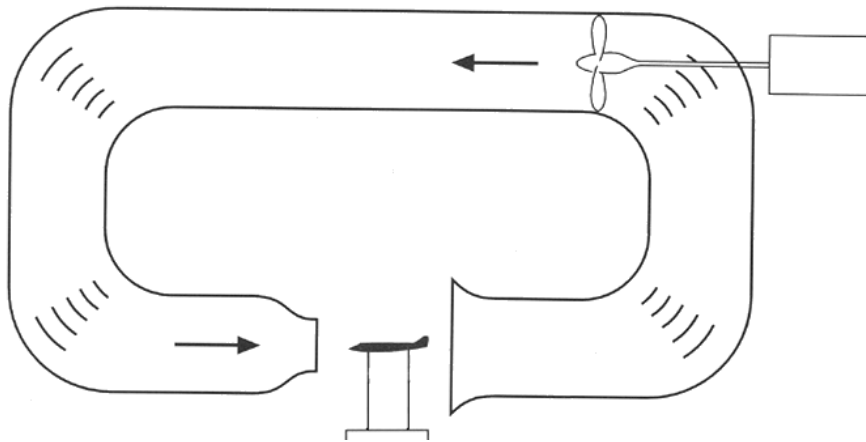
2.2.1 Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών (closed jet - open circuit wind tunnel).

ενώ με ανοικτό χώρο δοκιμών ονομάζονται open circuit - open jet (Eiffel type)



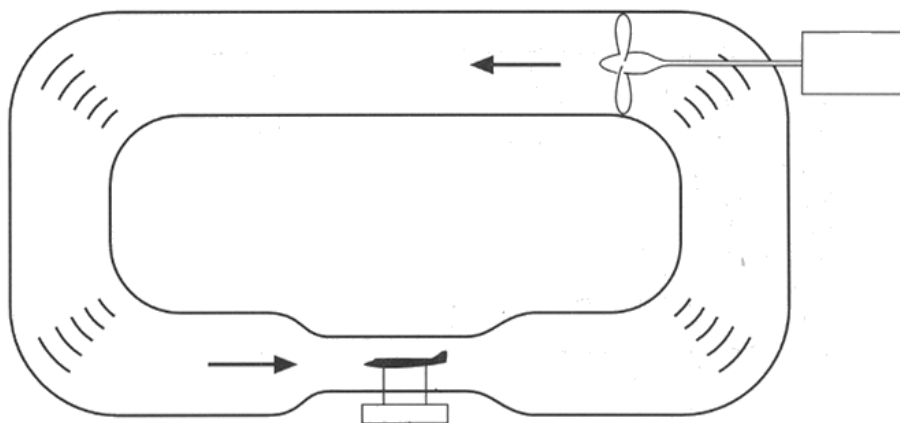
2.2.2 Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών (open jet - open circuit wind tunnel).

- Η αεροσήραγγα **κλειστού κυκλώματος** (closed return), (Prandtl/ Gottingen type), έχει τη μορφή βρόγχου και ο αέρας ακολουθεί μία κλειστή διαδρομή εντός της. Μια αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος μπορεί να έχει ανοικτό χώρο δοκιμών



2.2.3 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών (open jet - closed type wind tunnel).

ή κλειστό χώρο δοκιμών.



2.2.4 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών (closed jet - closed type wind tunnel).

Οι αεροσήραγγες ανοικτού τύπου έχουν μικρό αρχικό κόστος αλλά μεγάλο λειτουργικό συγκρινόμενες με τις αεροσήραγγες κλειστού κυκλώματος μιας και δεν εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια του αέρα που αποβάλλουν στον περιβάλλοντα χώρο. Είναι πιο θορυβώδεις αλλά δεν έχουν προβλήματα αύξησης της θερμοκρασίας. Τέλος είναι πιο πρακτικές για πραγματοποίηση πειραμάτων με χρήση καπνού για απεικόνιση της ροής εφόσον δεν απαιτούν καθαρισμό.

2.3 Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες

Σε αεροσήραγγα μπορούν να πραγματοποιηθούν οι παρακάτω βασικές δοκιμές:

1. Μέτρηση αεροδυναμικών φορτίων.

Η πλέον χρήσιμη εφαρμογή των αεροσηραγγών είναι η μέτρηση των αεροδυναμικών φορτίων που εμφανίζονται σε μία δισδιάστατη ή τρισδιάστατη επιφάνεια. Τα αεροδυναμικά φορτία που εμφανίζονται, δυνάμεις και ροπές, μας δίνουν τη συμπεριφορά της επιφάνειας σε ένα ρεύμα αέρα.

2. Απεικόνιση των γραμμών ροής γύρω από αντικείμενο.

Το πρόβλημα που υφίσταται στη μελέτη αεροδυναμικών φαινομένων είναι η έλλειψη οπτικής επαφής του υπό εξέταση φαινομένου και άρα ελλιπής κατανόησή του. Σε μία αεροσήραγγα με κατάλληλες διατάξεις εμφάνισης των γραμμών ροής (διάταξη παραγωγής καπνού, ίνες κτλ) μπορούμε να έχουμε μία ολοκληρωμένη παρατήρηση του φαινομένου.

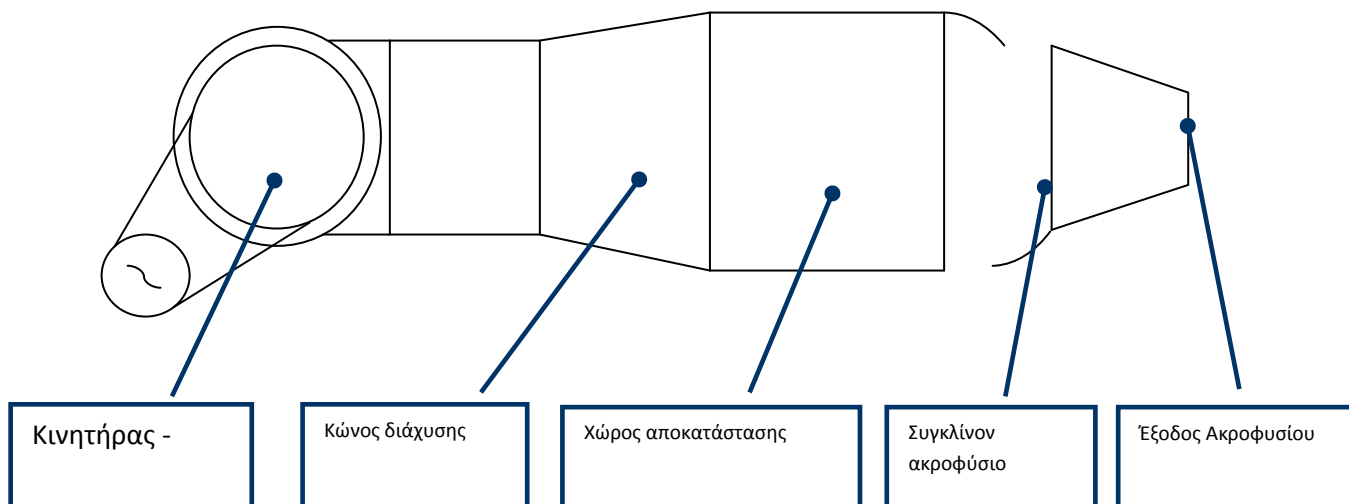


2.3.1 Εμφάνιση γραμμών ροής με χρήση καπνού.

Με τις δύο αυτές δυνατότητες μπορεί ο σχεδιασμός ενός αεροσκάφους, αυτοκινήτου κ.α. να βελτιωθεί. Αεροσήραγγες χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο κτιριακών κατασκευών, γεφυρών κτλ.

2.4 Περιγραφή αεροσήραγγας Αιολικού εργαστηρίου ΤΕΙ Κρήτης

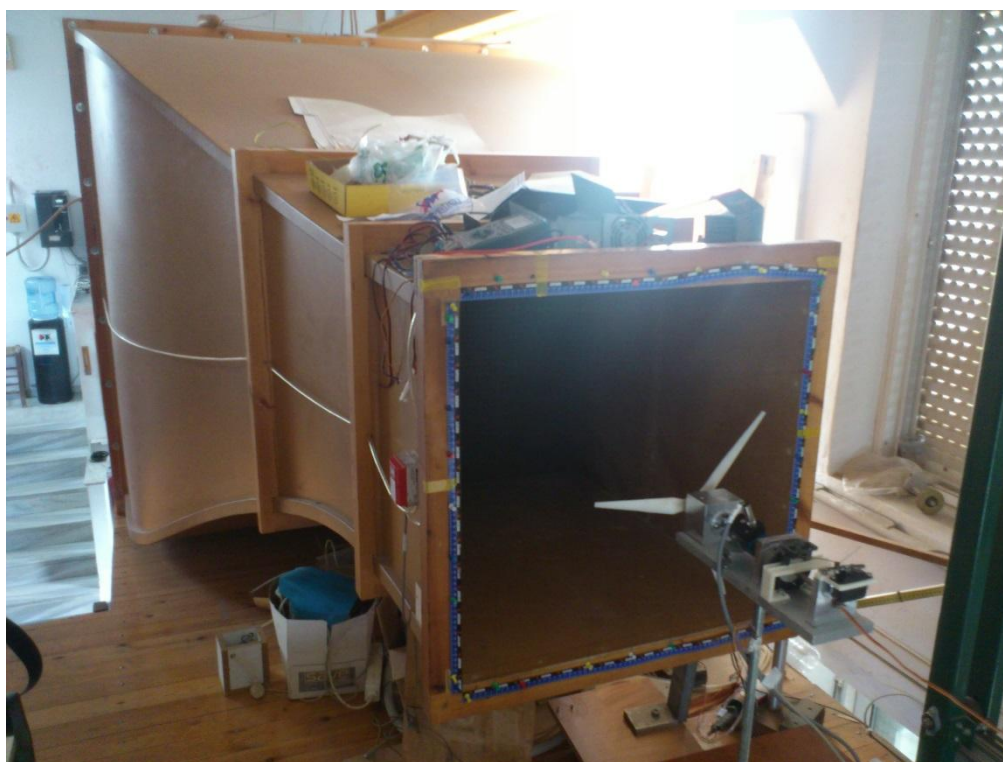
Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου είναι ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών. Η επιφάνεια του ακροφυσίου είναι 600mm x 600mm. Η γεωμετρία της φαίνεται παρακάτω.



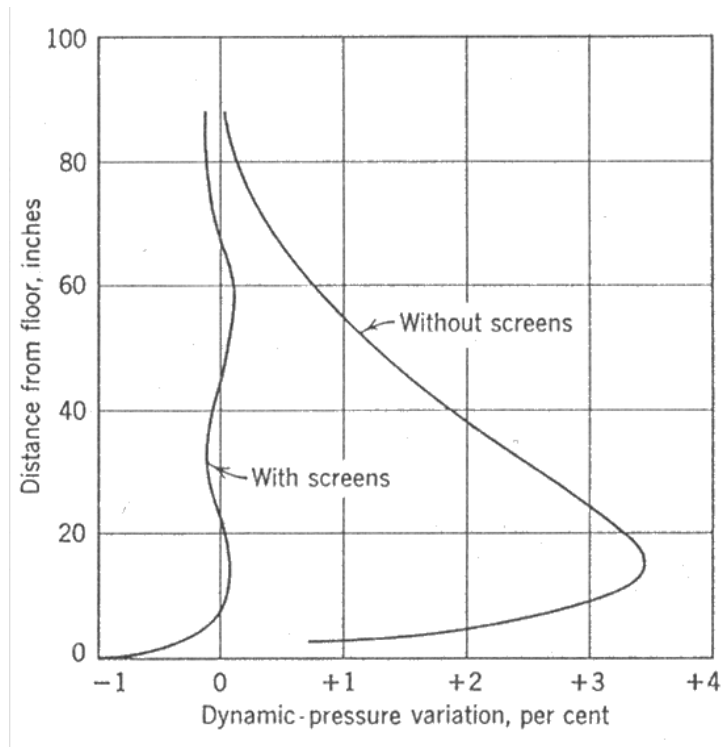
2.4.1 Περιγραφή της αεροσήραγγας του εργαστηρίου.

1. Ο ανεμιστήρας είναι μία φυγόκεντρη αντλία που οδηγείται από ένα τριφασικό κινητήρα 19kW, με μέγιστη περιστροφική ταχύτητα 1410rpm. Ο κινητήρας ελέγχεται μέσω ενός Inverter που μεταβάλλει μέσω της συχνότητας τις στροφές του. Η μέγιστη ταχύτητα εξόδου του αέρα από το ακροφύσιο φτάνει τα 25m/sec.
2. Στη συνέχεια, χώρα λαμβάνει η διάχυση της ροής με σκοπό την μείωση της ταχύτητας της ροής
3. Στο χώρο αποκατάστασης η ροή από στροβιλώδης γίνεται στρωτή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση σιτών (screens) και κυψελών (honeycombs).

Οι σήτες κυρίως μειώνουν τους αξονικούς στροβιλισμούς. Συγχρόνως παρατηρείται μία μεγάλη πτώση της πίεσης επηρεάζοντας κυρίως τις υψηλές ταχύτητες, επιτυγχάνοντας μια πιο ομοιόμορφη αξονική ταχύτητα.

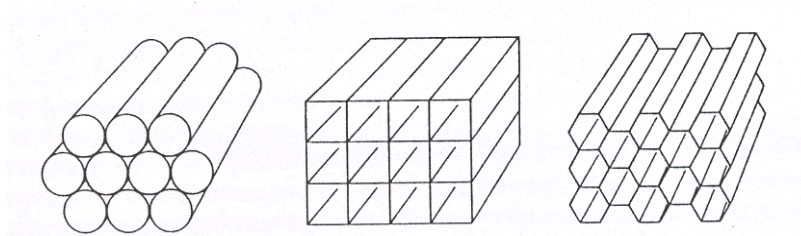


2.4.2 Αεροσήραγγα Αιολικού Εργαστηρίου



2.4.3 Μεταβολή του προφίλ ταχύτητας με χρήση ή όχι σήτας

Οι κυψέλες προκαλούν μικρή πτώση πίεσης που προκαλεί μικρή μείωση στην αξονική ταχύτητα. Χαρακτηρίζονται από μήκος μεγαλύτερο κατά μία τάξη μεγέθους από τη διάμετρό τους, μειώνοντας έτσι την απόκλιση της ροής από την επιθυμητή αξονική.



2.4.4 Κυψέλες διαφόρων μορφών

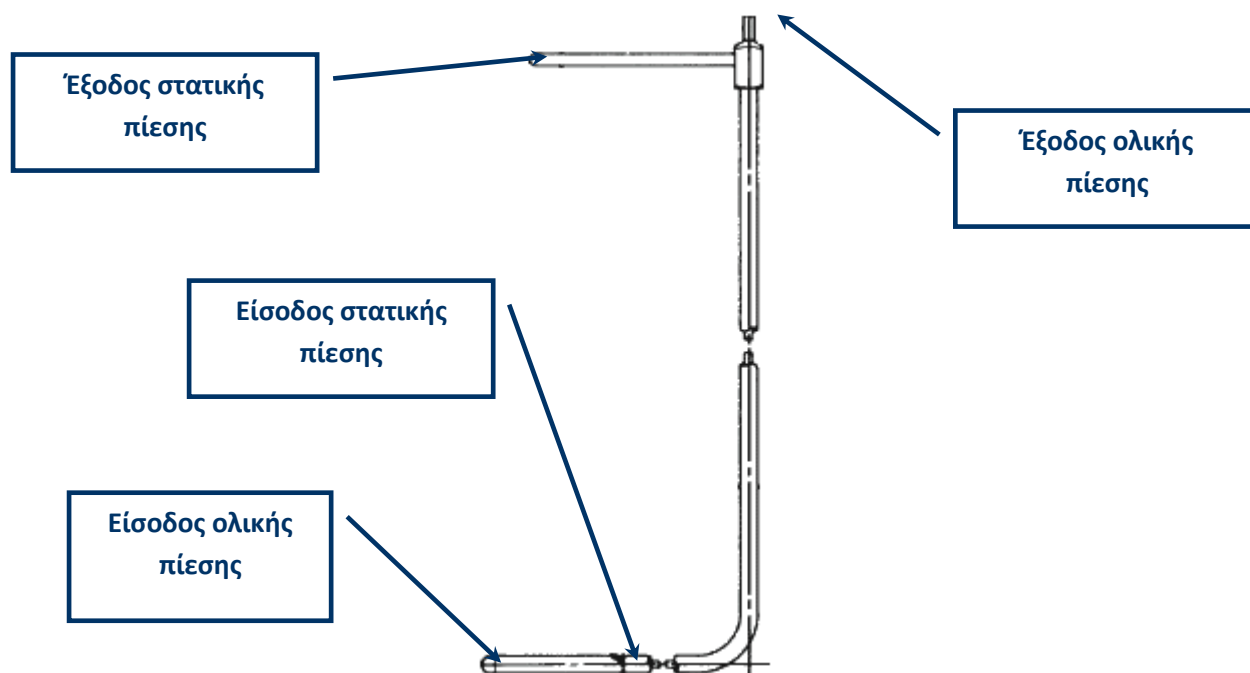
Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου έχει δύο σήτες και μία διάταξη κυψελών πρισματικής μορφής.

Η μείωση της ταχύτητας λόγω εμποδίων έχει μεγάλη επίδραση στην απαιτούμενη ισχύ εφόσον η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Απαραίτητη κρίνεται λοιπόν η τοποθέτηση των σιτών και των κυψελών στο χώρο αποκατάστασης όπου η ταχύτητα έχει τη χαμηλότερη τιμή.

2.5 Μέτρηση ροής

Ένας από τους βασικούς λόγους που χρησιμοποιούνται οι αεροσήραγγες είναι οι ιδανικές συνθήκες αέρα που αυτές παρέχουν. Η ποιότητα ροής που προσφέρουν είναι αυξημένη μιας και απουσιάζουν στροβιλισμοί και αυξομειώσεις της έντασής της. Κάθε φορά που πραγματοποιούνται μετρήσεις σε αεροσήραγγα οφείλουν να υπάρχουν δεδομένα της συμπεριφοράς της για όλο το εύρος ταχυτήτων αέρα λειτουργίας.

Η μέτρηση της ροής μίας αεροσήραγγας πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός σωλήνα pitot.



2.5.1 Περιγραφή σωλήνα pitot.

Ο σωλήνας pitot έχει μια εμπρόσθια είσοδο απ' όπου παίρνουμε την ολική πίεση και 8 μικρές εισόδους στην κυλινδρική του επιφάνεια που αποτελούν την είσοδο της στατικής πίεσης. Η δυναμική πίεση αποτελεί τη διαφορά των δύο. Η πίεση μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα μέσω ενός pressure transducer. Το σήμα αυτό στη συνέχεια οδηγείται μέσω μίας κάρτας I/O στον υπολογιστή όπου και καταγράφονται οι τιμές της ταχύτητας ανέμου.

Με τη χρήση του σωλήνα pitot σαρώνεται ο όγκος του χώρου δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες λειτουργίας, ώστε να υπάρχουν οι συνθήκες ροής σε όλο το εύρος ταχυτήτων λειτουργίας. Στο παράρτημα παρατίθενται δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του Αιολικού Εργαστηρίου του ΤΕΙ Κρήτης.

3. Πτερυγώσεις

3.1 Συμβολισμοί

F	ώση (Nt)
ρ	πυκνότητα αέρα (kg/m^3)
S	επιφάνεια της πτερωτής (m^2)
V_1	ταχύτητα ανάντη της πτερωτής (m/sec)
V_2	ταχύτητα κατόντη της πτερωτής (m/sec)
ω	γωνιακή ταχύτητα (rad/sec)
U	περιφερειακή ταχύτητα ($\frac{\text{rad}}{\text{sec}} m$)
\vec{V}	απόλυτη ταχύτητα (m/sec)
\vec{W}	σχετική ταχύτητα (m/sec)
C_z	συντελεστής άνωσης
C_x	συντελεστής αντίστασης
l	μήκος της χορδής (m)
ε	γωνία μεταξύ του dR και dR _z (°)
r	ακτίνα ενός στοιχείου της πτερωτής (m)
R	ακτίνα όλης της πτερύγωσης (m)
l	γωνία κλίσης (°)
p	αριθμός των πτερύγων
λ	λόγος ταχυτήτων
λ_0	λόγος ταχυτήτων στο ακροπτερύγιο

i	γωνία σφήνωσης ($^{\circ}$)
α	γωνία προσβολής ($^{\circ}$)
n	αεροδυναμική απόδοση της πτερύγωσης
P	ισχύς που παράγεται πάνω στην πτερύγωση (W)
C_M	συντελεστής ροπής

3.2 Υπολογισμός της χορδής πτερύγωσης

Για το υπολογισμό της χορδής της πτερύγωσης, θα υπολογίσουμε με δύο διαφορετικούς τρόπους την αξονική ώση που εφαρμόζεται στο δρομέα μεταξύ r και $r + dr$, στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.

Αρχική εκτίμηση

Με βάση την θεωρία του Betz, η συνολική ώση επί του δρομέα της ανεμογεννήτριας ισούται με:

$$F = \rho S(V_1^2 - V_2^2)/2$$

Η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διέλευση του διαμέσου του δρομέα είναι:

$$V = (V_1 + V_2)/2$$

Η V_1 και V_2 υποδηλώνει την ταχύτητα του ανέμου, στο ανάντη και το κατόντη της πτερωτής.

Η ισχύς είναι η μέγιστη όταν:

$$V_2 = V_1/3 \text{ (θεώρημα του Betz)}$$

Τότε:

$$F = \frac{4}{9}\rho S V_1^2 \quad \text{και} \quad V = \frac{2}{3}V_1$$

και , επομένως :

$$F = \rho S V^2$$

Υποθέτουμε ότι κάθε στοιχείο της επιφάνειας σάρωσης συμβάλλει αναλογικά με το εμβαδόν του στην ώση. Η συμβολή στην ώση κάθε στοιχείου που βρίσκεται μεταξύ της αποστάσεως r και $r+dr$ είναι :

$$dF = \rho V^2 dS = 2\pi r V^2 dr$$

Δεύτερη εκτίμηση

Αν η γωνιακή ταχύτητα είναι ω και η περιφερειακή ταχύτητα των στοιχείων της πτερύγωσης μεταξύ των ακτίνων r και $r + dr$ είναι :

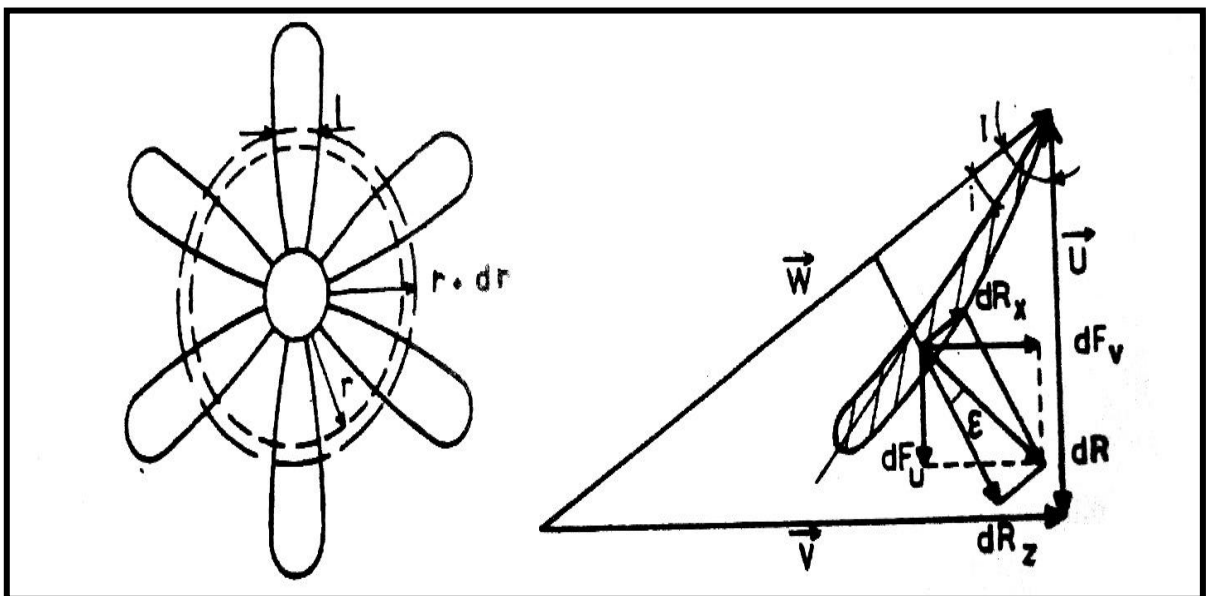
$$U = \omega r$$

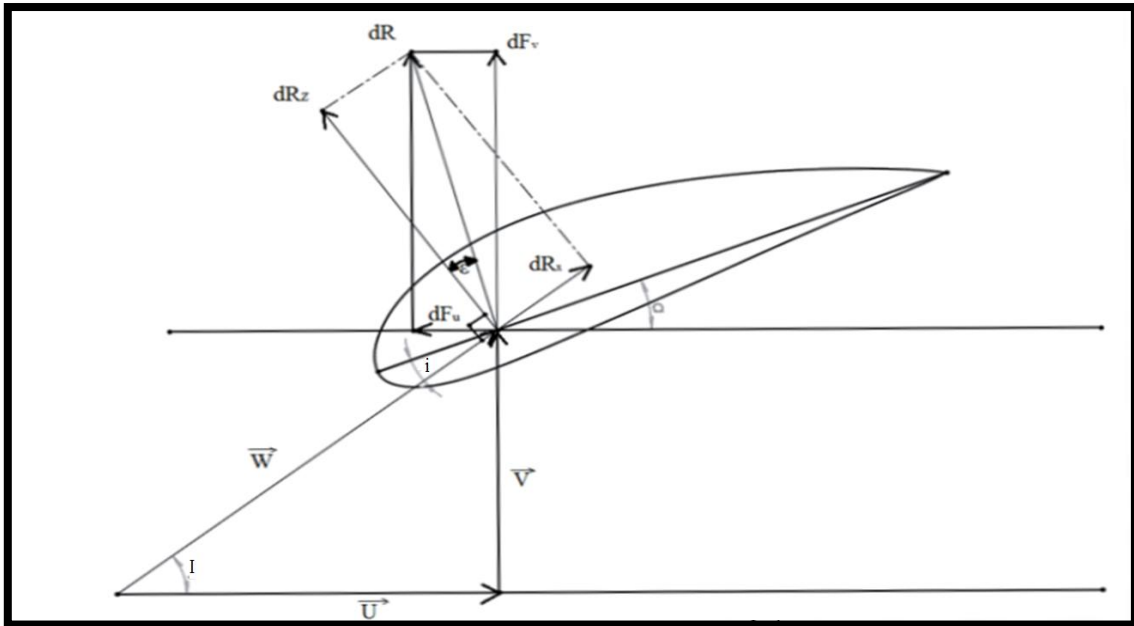
Μεταξύ της απόλυτης ταχύτητας του ανέμου \vec{V} που διασχίζει το δρομέα, της σχετικής ταχύτητας του ανέμου \vec{W} , που βλέπει η αεροτομή και της περιφερειακής ταχύτητας \vec{U} , ισχύει η σχέση:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U}$$

μπορεί να γραφτεί επίσης:

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$$





3.2.1 Άνωση, αντίσταση και γωνίες που την περιβάλλουν

Ένα στοιχείο της πτερύγωσης μήκους dR παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Οπότε, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές της άνωσης R_z , και της αντίστασης R_x , στο στοιχείο αυτό:

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr$$

και

$$dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr$$

και προκύπτει η συνισταμένη δύναμη:

$$dR = dR_z / \cos \epsilon$$

όπου (ϵ) είναι η γωνία μεταξύ του dR και dR_z και (l) η χορδή του προφίλ στην απόσταση r .

Επίσης διαπιστώνουμε ότι :

$$W = \frac{V}{\sin I}$$

και

$$dR = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{W^2 l}{\cos \epsilon} dr = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{l dr}{\cos \epsilon}$$

Η συνισταμένη δύναμη \vec{R} προβάλλεται στην κατεύθυνση του επιπέδου περιστροφής (dF_u) και υπολογίζονται οι συνιστώσες dF_v και dF_u της συνισταμένης αεροδυναμικής δύναμης dF του σχήματος του στοιχείου που βρίσκεται μεταξύ των ακτίνων r και $r + dr$.

Αν οριστεί σαν (p) ο αριθμός των πτερύγων, ο άνεμος :

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_z p \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} l dr$$

Αυτή η σχέση εκφράζεται σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση του dF και ως εξής :

$$C_z p l = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I - \varepsilon)}$$

Η μελέτη και η απλούστευση της παραπάνω σχέσης

Όσον αφορά την προηγούμενη σχέση μπορεί επίσης να γραφτεί αναπτύσσοντας το $\cos(I - \varepsilon)$

$$C_z p l = 4\pi r \frac{\tan^2 I \cos I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$

Στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διέλευση διαμέσου του δρομέα είναι :

$$V = 2/3 V_1,$$

V_1 είναι η ταχύτητα του ανέμου ανάντη του δρομέα.

Η γωνία I συνδέεται με την ταχύτητα του ανέμου V_1 από την παρακάτω σχέση :

$$\cotan I = \frac{\omega r}{V} = \frac{3 \omega r}{2 V_1} = \frac{3}{2} \lambda$$

Αντικαθιστώντας στην έκφραση για το C_{zpl} :

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}} \left(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \varepsilon\right)}$$

Υπό κανονικές συνθήκες, η τιμή του $\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$ είναι σε γενικές γραμμές πολύ χαμηλή.

Η βέλτιστη τιμή του $\tan \varepsilon$, για μια συνηθισμένη αεροτομή είναι της τάξεως του 0.05, οπότε η παρένθεση $\left(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \varepsilon\right)$ είναι περίπου ίση με τη μονάδα και η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}}$$

Για μια συγκεκριμένη ταχύτητα λ σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής, $\lambda = \omega r / V_1$ και στο ακροπτερύγιο ($r=R$), $\lambda_0 = \omega R / V_1$. Τα λ και λ_0 συνδέονται με τη σχέση:

$$\lambda = \lambda_0 r / R.$$

Με βάση τα παραπάνω για C_{zpl} έχουμε :

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 + \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}}$$

3.2 Υπολογισμός της χορδής των πτερυγώσεων

Αν είναι γνωστά ο λόγος ταχυτήτων, λ και η διάμετρος του δρομέα, η γωνία κλίσης l για συγκεκριμένες τιμές r δίνεται από την σχέση :

$$\cotan l = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R}$$

Εάν η γωνία σφήνωσης, α , είναι καθορισμένη, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε την γωνία προσβολής i ($i = I - \alpha$). Στη συνέχεια μπορούμε να βρούμε τον συντελεστή άνωσης C_z με τη βοήθεια κατάλληλων διαγραμμάτων $C_z - i$.

Εάν ο αριθμός των πτερυγίων, p , είναι δεδομένος, τότε χωρίς δυσκολία μπορούμε να υπολογίσουμε το $C_z p l$ καθώς και τη χορδή l σε διάφορα σημεία κατά μήκος της πτέρυγας, αναλόγως της απόστασης r από τον άξονα περιστροφής της πτερύγωσης.

Η έκφραση $C_z p l$ δείχνει ότι η χορδή του προφίλ στην απόσταση r από τον άξονα, είναι πολύ μικρότερη για λόγο ταχυτήτων λ_0 υψηλό. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν ο λόγος ταχυτήτων λ_0 είναι υψηλός η γωνιακή ταχύτητα είναι σημαντική. Οι πτερυγώσεις είναι ελαφρύτερες όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής.

Η σχέση δείχνει επίσης, ότι αν το C_z παραμένει σταθερό κατά το μήκος της πτέρυγας τότε το πλάτος της αυξάνεται από το ακροπτερύγιο προς τη βάση της πτέρυγας.

Για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες, η τιμή του C_z αυξάνεται από το ακροπτερύγιο προς τη βάση της πτέρυγας έτσι ώστε η αύξηση του πλάτους της πτερύγωσης να είναι μειωμένη σε σύγκριση με την περίπτωση όπου C_z είναι σταθερό και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουμε τη μείωση της μάζας των πτερύγων.

3.3 Θεωρία αεροδυναμικής απόδοσης της πτερύγωσης. Βέλτιστη γωνία προσβολής

Ορίζουμε την αεροδυναμική απόδοση, n , της πτερύγωσης μεταξύ των αποστάσεων r και $r + dr$ σαν το λόγο μεταξύ της ισχύος που παράγεται πάνω στην πτερύγωση προς τη συνολική ισχύ που αναπτύσσεται από τον άνεμο που διασχίζει την πτερύγωση.

$$n = \frac{dP_u}{dP_t} = \frac{\omega dM}{V dF_v} = \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

Τα dF_u , dF_v είναι οι συνιστώσες του αεροδυναμικού φορτίου στο επίπεδο περιστροφής της πτερύγωσης και κάθετα σ' αυτόν αντίστοιχα.

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I$$

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I$$

Εξάλλου:

$$\cotan I = U/V$$

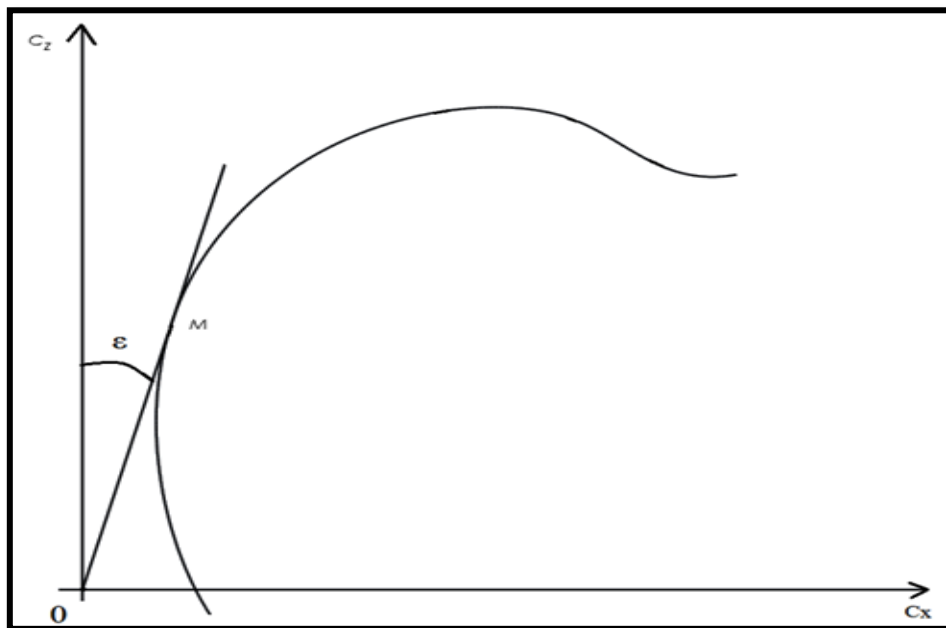
Υπό αυτές τις συνθήκες :

$$n = \frac{U dF_u}{V dF_v} = \frac{dR_z \sin I - dR_x \cos I}{dR_z \cos I + dR_x \sin I} \cotan I$$

Αυτή η έκφραση για την απόδοση, n , μπορεί να γραφτεί διαφορετικά, λαμβάνοντας υπόψη:

$$\tan \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$$

$$n = \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{\cotan I + \tan \varepsilon} \cotan I = \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$



3.2.2 Διάγραμμα Cz-Cx

Όσο πιο μικρό είναι το $\tan\epsilon$, τόσο καλύτερη απόδοση, η , έχουμε. Αν το $\tan\epsilon$ είναι ίσο με μηδέν τότε η αεροδυναμική απόδοση ισούται με τη μονάδα.

Στην πραγματικότητα, η τιμή της $\tan\epsilon$ καθορίζεται από την τιμή της γωνίας προσβολής, i . Το $\tan\epsilon$ έχει ελάχιστη τιμή στο σημείο που η OM εφάπτεται στο διάγραμμα C_z-C_x . (βλέπε εικόνα 3.3.1). Σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο, η αεροδυναμική απόδοση είναι η μέγιστη.

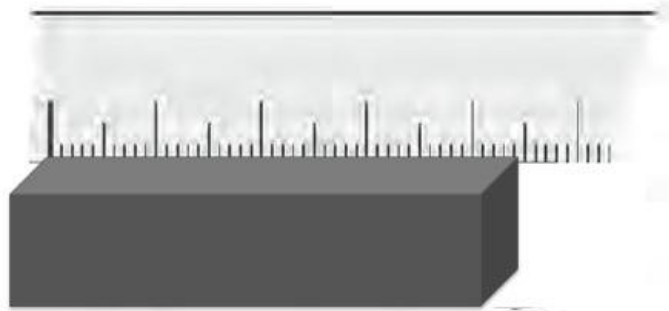
4. Μετρήσεις

4.1 Μετρήσεις και σφάλματα

Κάθε πειραματική μέτρηση υπόκειται σε πειραματικά σφάλματα. Με τον όρο αυτό δεν εννοούμε λάθη τα οποία γίνονται κατά την εκτέλεση του πειράματος ή τη λήψη των μετρήσεων, τα οποία προφανώς θα πρέπει να αποφεύγονται. Αντίθετα, με τον όρο «πειραματικό σφάλμα» αναφερόμαστε στους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις μετρήσεις μας, και οι οποίοι δεν μπορούν να εξαλειφθούν, καθώς και στην αβεβαιότητα που υπάρχει για την τιμή της κάθε μέτρησης. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να οφείλεται είτε στον τρόπο που γίνεται η μέτρηση, είτε στη ακρίβεια των οργάνων μέτρησης. Γενικότερα υπάρχουν δύο κατηγορίες σφαλμάτων: τα συστηματικά σφάλματα, και τα τυχαία ή στατιστικά σφάλματα.

Συστηματικά σφάλματα, είναι τα σφάλματα τα οποία επηρεάζουν συστηματικά και με τον ίδιο τρόπο όλες τις μετρήσεις. Τέτοια είναι τα σφάλματα που οφείλονται στη λάθος βαθμονόμηση της μετρητικής συσκευής ή σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Για παράδειγμα η χρήση ενός θερμομέτρου του οποίου η κλίμακα βαθμονόμησης έχει μετατοπιστεί, θα έχει ως αποτέλεσμα το μηδέν της κλίμακας να μην αντιστοιχεί σε 0^ο C, και επομένως όλες οι μετρήσεις θα είναι μετατοπισμένες από την πραγματική θερμοκρασία κατά αυτή τη διαφορά. Αντίστοιχα εάν χρησιμοποιήσουμε για τη μέτρηση ενός μήκους μια μετροταινία που έχει βαθμονομηθεί σε πολύ διαφορετική θερμοκρασία, τότε λόγω συστολής/διαστολής η κλίμακα της μετροταινίας θα έχει αλλάξει και το μήκος που μετράμε δεν θα αντιστοιχεί στο πραγματικό μήκος, με αποτέλεσμα να παίρνουμε συστηματικά διαφορετικές μετρήσεις. Τα συστηματικά σφάλματα τις περισσότερες φορές μπορούν να αναγνωρισθούν και να διορθωθούν κατά την ανάλυση των μετρήσεων. Για παράδειγμα στην περίπτωση του θερμομέτρου, μετρώντας τη θερμοκρασία πάγου που λιώνει, ή αποσταγμένου νερού που βράζει για τα οποία γνωρίζουμε την πραγματική τους θερμοκρασία μπορούμε να εκτιμήσουμε αποκλίσεις της κλίμακας και να τις προσθέσουμε αλγεβρικά σε όλες τις μετρήσεις.

Τα **Τυχαία σφάλματα**, σε αντίθεση επηρεάζουν όλες τις μετρήσεις αλλά με **τυχαίο τρόπο** και επομένως δεν μπορούν να αφαιρεθούν κατά την επεξεργασία τους. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται σε ατέλειες της πειραματικής διάταξης και την πεπερασμένη ακρίβεια των μετρητικών οργάνων σε συνδυασμό με την επίδραση των αισθήσεων μας. Επιπλέον τυχαίες και μη ελεγχόμενες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις μας κατά μη επαναλήψιμο τρόπο. Οι παραπάνω παράγοντες θα έχουν ως αποτέλεσμα να παίρνουμε διαφορετικές τιμές από πολλαπλές μετρήσεις του ίδιου μεγέθους. Επειδή ακριβώς οι μετρήσεις διαφέρουν κατά έναν μεταβαλλόμενο, μη προβλέψιμο, παράγοντα δεν είναι δυνατόν να διορθωθούν για την επίδραση των τυχαίων σφαλμάτων (σε αντίθεση με τα συστηματικά σφάλματα η επίδραση των οποίων είναι η ίδια και επομένως διορθώσιμη). Για παράδειγμα εάν μετράμε το μήκος ενός αντικειμένου με ένα χάρακα, η τιμή της μέτρησης θα εξαρτάται από την ακριβή θέση που θα τοποθετήσουμε το χάρακα, την εκτίμηση που θα κάνουμε για την ακριβή ένδειξη στο σημείο που βρίσκεται η ακμή του αντικειμένου (Σχήμα 1), τη γωνία παρατήρησης, κ.λ.π. Το αποτέλεσμα της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων θα είναι οι μετρήσεις να διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα μικρό τυχαίο ποσό.



4.1.1. Παράδειγμα μέτρησης του μήκους μιας ράβδου. Το πραγματικό μήκος της ράβδου είναι μεταξύ 4.4 και 4.5. Η ακρίβεια με την οποία μπορεί να γίνει η μέτρηση εξαρτάται από την ακρίβεια του χάρακα.

4.2 Ακρίβεια μετρήσεων: Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα

Όπως είδαμε κάθε μέτρηση εμπεριέχει και κάποιο σφάλμα. Επομένως ο τρόπος με τον οποίο θα παρουσιάζουμε τις μετρήσεις μας θα πρέπει να ανακλά την ακρίβεια της μέτρησης. Για παράδειγμα εάν μετρήσουμε ένα μήκος 15.5cm με σφάλμα 0.5cm, τότε γράφουμε (15.5 ± 0.5) cm. Δηλαδή η πραγματική τιμή του μήκους κυμαίνεται μεταξύ 15.0 και 16.0 cm.

Εάν κάνουμε την παραπάνω μέτρηση με ένα όργανο μεγαλύτερης ακρίβειας τότε θα βρούμε 15.62 cm με σφάλμα 0.05cm, ή (15.62 ± 0.05) cm. Δηλαδή τώρα γνωρίζουμε ότι η πραγματική τιμή είναι πιο κοντά στο 15.6 cm, και μάλιστα βρίσκεται μεταξύ του 15.57 cm και 15.67 cm.

Τα τυχαία σφάλματα 0.5 cm και 0.02 cm λέγονται **απόλυτα σφάλματα**.

- Στην περίπτωση μετρήσεων με αναλογικά όργανα το απόλυτο σφάλμα της κάθε μέτρησης ισούται με το μισό της ελάχιστης υποδιαίρεσης, καθώς μέσα σε αυτά τα όρια βρίσκεται η καλύτερη εκτίμηση που μπορούμε να κάνουμε για την τιμή της μέτρησης.
- Στην περίπτωση μετρήσεων με ψηφιακά όργανα το απόλυτο σφάλμα του οργάνου μας δίνεται από τον κατασκευαστή.
- Το σφάλμα των οργάνων είναι το ελάχιστο σφάλμα που μπορεί να έχει μια μέτρηση. Παράγοντες όπως η γωνία παρατήρησης της μετρητικής συσκευής, ο χρόνος αντίδρασης, τυχαίοι περιβαλλοντικοί παράγοντες, συνεισφέρουν επιπλέον στα πειραματικά σφάλματα. **Μια εκτίμηση του συνολικού σφάλματος μας δίνεται από την τυπική απόκλιση του δείγματος η οποία υπολογίζεται με τη σχέση (2).** Με βάση τα παραπάνω η τυπική απόκλιση του δείγματος θα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από το σφάλμα του οργάνου, αφού ακόμα και εάν αποκλείσουμε όλες τις άλλες πηγές σφάλματος, η ακρίβεια των μετρήσεων θα καθορίζεται κατ' ελάχιστο από την ακρίβεια του οργάνου μέτρησης.

Από την παραπάνω σύγκριση είναι προφανές ότι η μέτρηση (15.62 ± 0.05) cm είναι **πιό ακριβής** από τη μέτρηση (15.5 ± 0.5) cm, αφού έχει μικρότερο σφάλμα.

Ισχύει όμως το ίδιο εάν συγκρίνουμε δύο υποθετικές μετρήσεις (1587.5 ± 0.5) cm και (15.25 ± 0.05) cm; Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να λάβουμε υπ'οψιν μας το γεγονός ότι ένα σφάλμα της τάξεως του 0.5 cm έχει πολύ μικρότερη σημασία σε μία μέτρηση με μεγάλη αριθμητική τιμή όπως 1587.5cm απ' ότι μια μέτρηση με σφάλμα 0.05 cm που αναφέρεται σε μία κατά πολύ μικρότερη αριθμητική τιμή. Επομένως ένας πιο ποσοτικός τρόπος για να εκτιμήσουμε την ακρίβεια μιας μέτρησης είναι να δούμε το **σχετικό της σφάλμα** που ορίζεται ως

4.3 Σφάλματα μετρητικής διάταξης

Στη μετρητική διάταξη που θα σχεδιαστεί και θα κατασκευαστεί μπορούμε να περιορίσουμε τα τυχαία σφάλματα και ειδικότερα αυτά που οφείλονται στις ατέλειες της διάταξης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αρχικά με σωστό σχεδιασμό της κατασκευής, δηλαδή την ύπαρξη “οδηγών” για τα κομμάτια που την αποτελούν και έτσι να συναρμολογούνται σωστά στη θέση που θα πρέπει να είναι, ώστε να τηρούνται για παράδειγμα ευγραμμίες οι οποίες θα είναι απαραίτητες για τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων. Το δεύτερο που θα πρέπει να προσέξουμε είναι η ακρίβεια με την οποία θα κατασκευαστούν τα κομμάτια η οποία θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη για το λόγω που αναφέραμε και πριν.

Αν τηρηθούν αυτές οι δύο προϋποθέσεις τότε θα έχουμε επιτύχει περιορισμό των τυχαίων σφαλμάτων που βασίζονται στις ατέλειες της πειραματικής διάταξης.

5. Προδιαγραφές μετρητικής διάταξης

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται κάποιες προδιαγραφές που έχουμε ορίσει για την μετρητική διάταξη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ

#	A	E	Περιγραφή προδιαγραφής	Παραπομπές
1	x		Μετρούμενα μεγέθη: Ροπή στην άτρακτο [0-1 Nm] Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου [0-10.000rpm] Ταχύτητα ανέμου [0-25M/s] Δύναμη οπισθέλκουσας [0-85N] Ποσοστό πέδησης [0-100%]	Κεφ. 6.1.2.1, 8.1 Κεφ. 6.1.2.1, 8.1 Κεφ. 2.4 Κεφ. 6.2, 8.2 Κεφ. 7.4
2		x	Ακρίβεια κατασκευής: 0.05 mm	Κεφ. 7.1
3		x	Ανοχή ευθυγραμμίας της γραμμής μετάδοσης της ισχύος: 0.05 mm	Κεφ. 7.1
4	x		Συναρμολόγηση χωρίς κίνδυνο καταστροφής ροπόμετρου	Κεφ. 9.5, 9.6
6		x	Βάση για απόσβεση κραδασμών	Κεφ. 7.5
7	x		Ώρες λειτουργίας: 10000h	Κεφ. 8.2
8	x		Δύναμη πέδησης: 150N	Κεφ. 7.4

A: Αναγκαίο

E: Επιθυμητό

6. Μετρούμενα μεγέθη και αισθητήρες

6.1 Ισχύς

Αυτό το οποίο μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε στις πτερυγώσεις είναι η μηχανική ισχύς τους. Σκοπός είναι να πάρουμε διάφορες χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος της φτερωτής που εξετάζουμε συναρτήσει των στροφών περιστροφής τους σε διάφορες ταχύτητες αέρα. Ουσιαστικά πρέπει να μετρήσουμε την ισχύ στον άξονα που συνδέεται η φτερωτή. Υπάρχουν διάφορες λύσεις για τη μέτρηση ισχύος σε περιστρεφόμενο άξονα. Παρακάτω θα δούμε τις πιο δημοφιλείς καθώς και την επιλογή μιας από αυτών για την εφαρμογή μας.

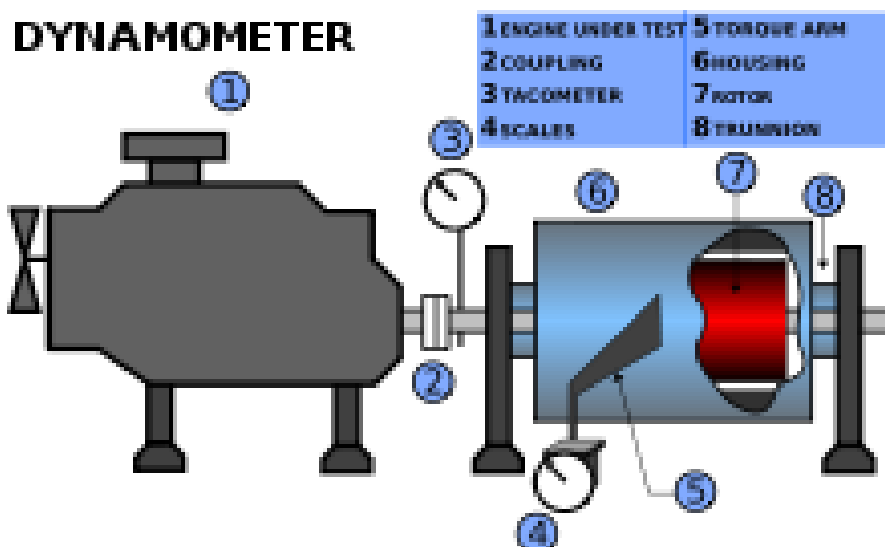
6.1.1 Τρόπος μέτρησης Α΄

Ένας τρόπος μέτρησης της ισχύος ενός άξονα μπορεί να γίνει με έναν ηλεκτροκινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας συνδέεται με τον άξονα του οποίου την ισχύ θέλουμε να μετρήσουμε. Καθώς ο άξονας περιστρέφεται ο ηλεκτροκινητήρας δουλεύει ως γεννήτρια. Συνδέοντας τα κατάλληλα όργανα μπορούμε να μετρήσουμε την τάση και το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια. Όπως γνωρίζουμε το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα μας δίνει την ισχύ που παράγει η γεννήτρια.

$$P = V \times I$$

Όπου P η ισχύς, V η τάση και I το ρεύμα

Μετρώντας λοιπόν την ισχύ της γεννήτριας βλέπουμε αυτομάτως την ισχύ που παράγεται στον άξονα. Ο συγκεκριμένος τρόπος μέτρησης είναι σχετικά απλός κατασκευαστικά αλλά και στον προγραμματισμό του λογισμικού που θα αναλαμβάνει να παίρνει μετρήσεις. Επίσης για την κατασκευή που μελετάμε ένας ηλεκτροκινητήρας της τάξης μεγέθους ισχύος που θέλουμε έχει σχετικά μικρό κόστος.



Παρ' όλα αυτά υπάρχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα σε αυτή τη μέθοδο. Πρώτα απ' όλα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική όπως όλες οι μετατροπές ενέργειας άλλωστε χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό απόδοσης, ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση εξαρτάται από τον ηλεκτροκινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην είναι απόλυτα ακριβείς. Επίσης παράγοντες όπως η θερμοκρασία έχουν αρνητικές συνέπειες στην ακρίβεια και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Κάτι τελευταίο το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τις μετρήσεις είναι ότι οι ηλεκτροκινητήρες έχουν μια συγκεκριμένη ροπή εκκίνησης, πράγμα το οποίο δε μας εξυπηρετεί. Η φτερωτή θα πρέπει να ξεκινάει σε χαμηλές ταχύτητες αέρα και να παίρνονται μετρήσεις και σε αυτές τις ταχύτητες. Η ροπή εκκίνησης του ηλεκτροκινητήρα είναι αμφίβολο αν θα το επιτρέπει αυτό καθώς ο κινητήρας θα παρουσιάζει αντίσταση στην κίνηση του άξονα και σε χαμηλές ταχύτητες αέρα πιθανών η ροπή της φτερωτής να είναι μικρότερη της ροπής εκκίνησης του άξονα με αποτέλεσμα να μη μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις σε αυτές τις ταχύτητες.

6.1.2 Τρόπος μέτρησης Β'

Ο άλλος τρόπος μέτρησης της ισχύος ενός άξονα είναι έμμεσος και πιο πολύπλοκος στην υλοποίηση είναι όμως πιο αξιόπιστος. Όπως γνωρίζουμε από τη φυσική η ισχύ ορίζεται ως το γινόμενο της ροπής επί το ρυθμό περιστροφής.

$$P = T \times \omega$$

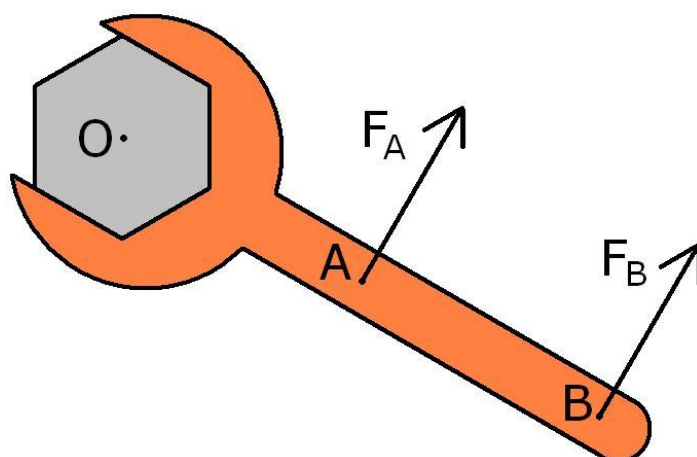
Όπου P η ισχύς, T η ροπή και ω ο ρυθμός περιστροφής

Έτσι λοιπόν μετρώντας τη ροπή και τις στροφές της φτερωτής μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ που αναπτύσσεται στον άξονα. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να μετρηθούν με διάφορους τρόπους τους οποίους θα αναλύσουμε ξεχωριστά στα επόμενα κεφάλαια.

6.1.2.1 Ροπή

Η ροπή έχει και αυτή δυο βασικούς τρόπους μέτρησης. Την άμεση και την έμμεση. Η έμμεση μέθοδος βασίζεται στον ορισμό της ροπής που είναι ο εξής από τη φυσική:

Ροπή δυνάμεως ως προς σημείο είναι το διανυσματικό φυσικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο προς το γινόμενο της δύναμης επί την (κάθετη) απόσταση της δύναμης από το σημείο. Κατά όμοιο τρόπο ροπή δυνάμεως ως προς άξονα είναι το διανυσματικό μέγεθος που έχει ως μέτρο το γινόμενο της δύναμης επί την (κάθετη) απόσταση της δύναμης από τον άξονα, και φορά τον άξονα.

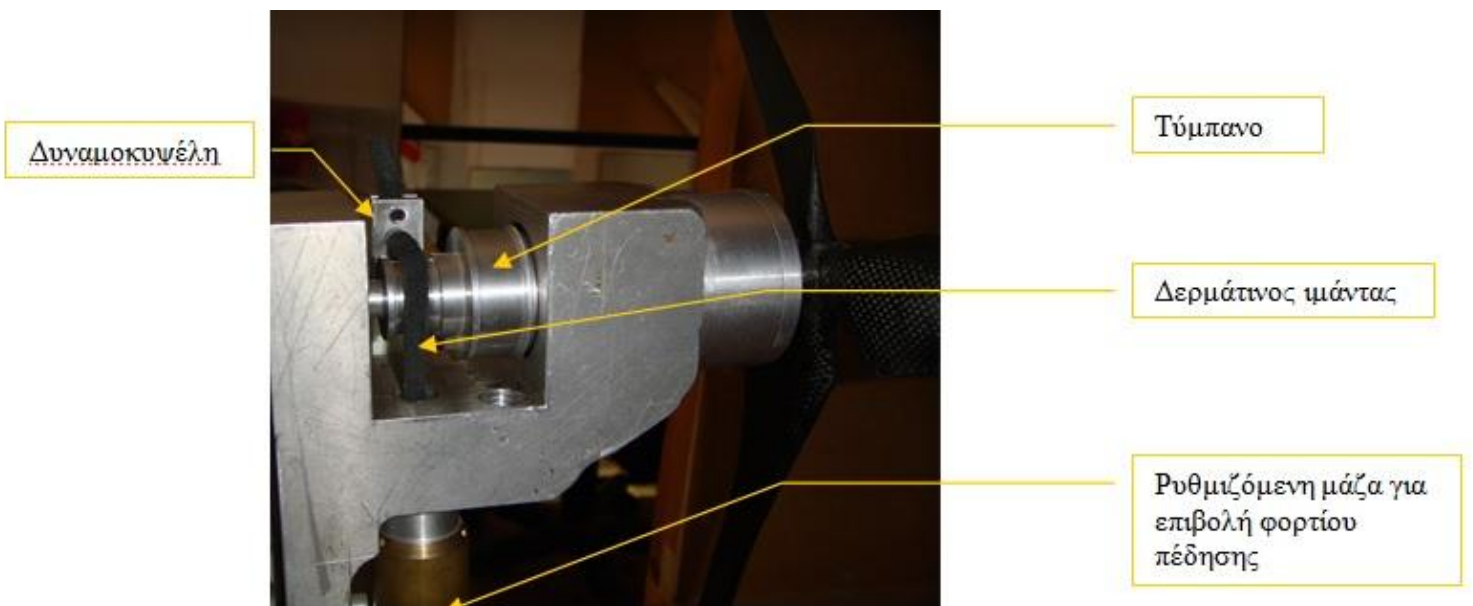


Για παράδειγμα όταν σπρώχνεται μια τεράστια καγκελόπορτα ασκείται σ' αυτή μια δύναμη σε κάποια απόσταση από τον άξονα περιστροφής της (ζεύγος δυνάμεων με το σημείο αντίδρασης/στήριξης, τον μεντεσέ). Έτσι η ασκούμενη δύναμη περιστρέφει την καγκελόπορτα και την κλείνει ή την ανοίγει. Η επίδραση είναι περισσότερο έντονη όσο πιο μακριά από τον άξονα περιστροφής βρίσκεται το σημείο εφαρμογής της δύναμης, και όσο πιο κάθετη είναι η δύναμη στην καγκελόπορτα. Η ροπή λοιπόν ορίζεται από τη διανυσματική σχέση:

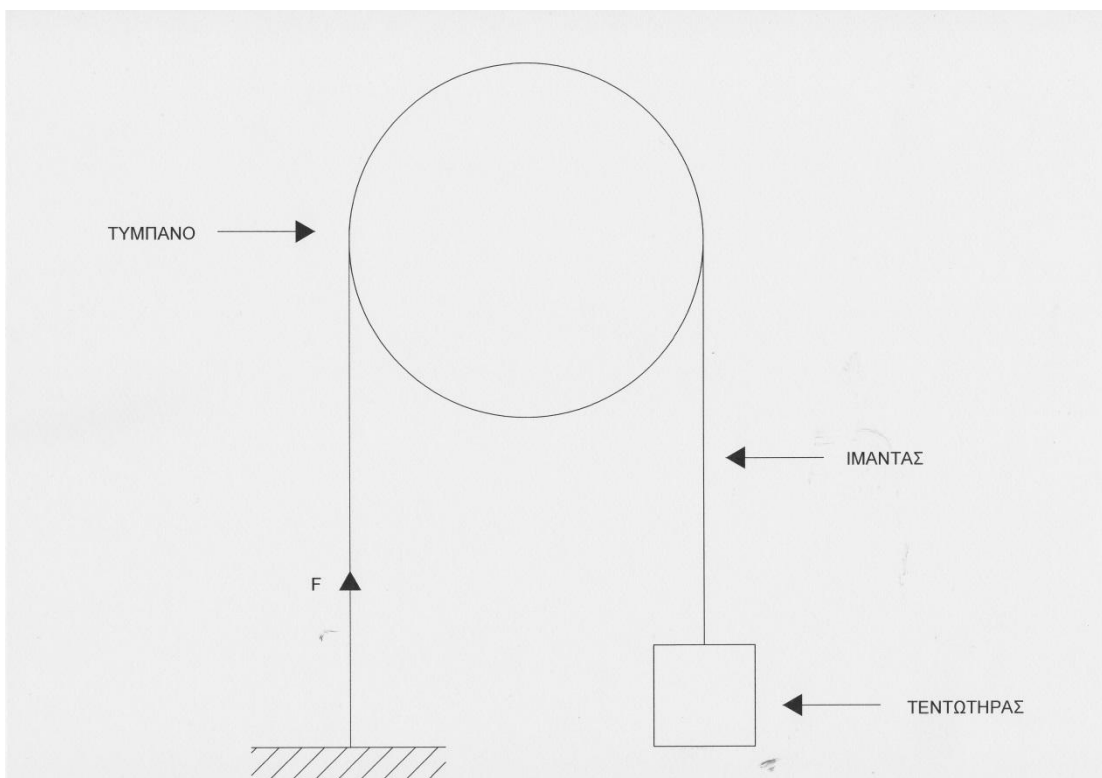
$$T = r \times F$$

Όπου T η ροπή, r η απόσταση από το εξεταζόμενο σημείο του σημείου εφαρμογής της δύναμης και F η ασκούμενη δύναμη

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι θα πρέπει να μετρηθεί η δύναμη που ασκείται σε μια ορισμένη απόσταση από τον άξονα σε ένα σταθερό σημείο. Αυτό μπορεί να γίνει με τον εξής τρόπο: Έστω ότι έχουμε μια διάταξη όπως στην παρακάτω φωτογραφία.



Υπάρχει στον άξονα ενσωματωμένο ένα «τύμπανο» το οποίο περιβάλλεται από έναν ιμάντα. Ο ιμάντας αυτός είναι στερεωμένος στη μια μεριά σε ένα σταθερό σημείο και από την άλλη υπάρχει ένας τεντωτήρας. Καθώς περιστρέφεται ο άξονας και σφίγγουμε τον ιμάντα δημιουργείται τριβή και ο ιμάντας έλκεται. Αυτό δημιουργεί μια δύναμη F που ασκεί ο ιμάντας ως προς το σταθερό σημείο.



Αν μπορέσουμε με κάποιο τρόπο να μετρήσουμε τη δύναμη F που ασκείται στο σταθερό σημείο, γνωρίζοντας την ακτίνα του τυμπάνου (άρα την απόσταση r από την οποία ασκείται η δύναμη ή αλλιώς το μοχλοβραχίονα της δύναμης) αυτομάτως θα γνωρίζουμε τη ροπή του άξονά μας. Παρακάτω θα δούμε με ποια μέθοδο και με τι αισθητήρες μπορούμε να μετρήσουμε δυνάμεις.

6.1.2.1α Κυψέλες φόρτισης (Load cells)

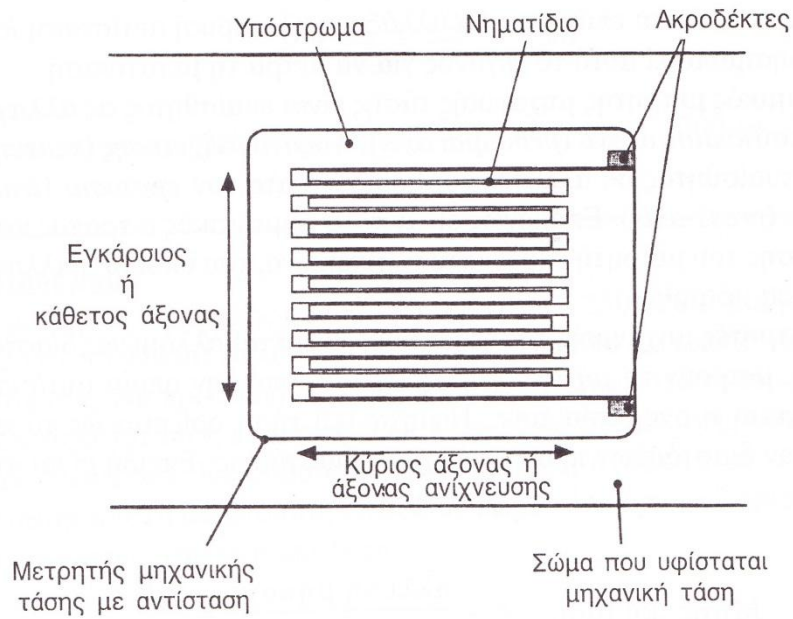
Οι κυψέλες φόρτισης (load cells) είναι συσκευές που χρησιμοποιούν μετρητές μηχανικής τάσης για να προσδιορίζουν την τιμή μιας άγνωστης δύναμης. Πριν δούμε όμως μια τέτοια συσκευή θα αναφερθούμε στους μετρητές μηχανικής τάσης.

Οι μετρητές μηχανικής τάσης μετρούν τις αλλαγές του μεγέθους ενός στερεού αντικείμενου που προκαλούνται με συμπίεση ή εφελκυσμό του. Οι μετρητές αυτοί είναι στερεωμένοι στο αντικείμενο και έτσι, όταν αλλάζει το αντικείμενο αλλάζουν και αυτοί.

Παρότι υπάρχουν διαθέσιμες και άλλες μορφές μετρητών μηχανικής τάσης, ο μετρητής με αντίσταση αποτελεί το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο τύπο μετρητή. Για ευκολία αναφέρεται απλά ως μετρητής μηχανικής τάσης (strain gauge).

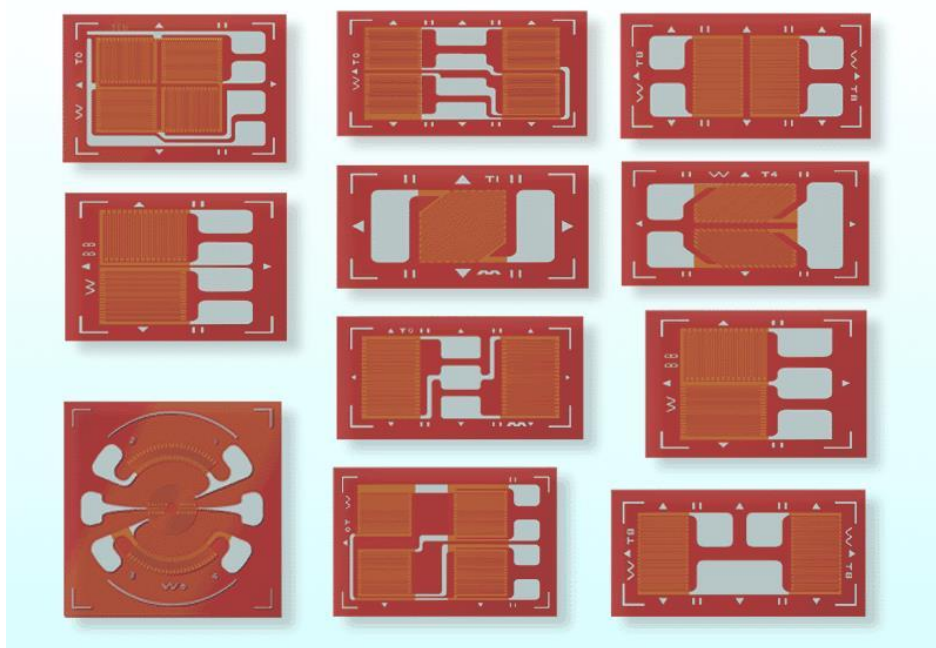
Οι μετρητές μηχανικής τάσης είναι αισθητήρες που εμφανίζουν αλλαγή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων όταν αλλάζουν οι διαστάσεις τους. Όταν οι μετρητές αυτοί τεντώνονται ή συμπιέζονται αλλάζει η αντίστασή του, και αυτή η αλλαγή μπορεί να συσχετιστεί με μια μετατόπιση. Οι μετρητές μηχανικής τάσης με αντίσταση μπορούν να μετρούν τάσεις σε αντικείμενα μήκους έως 50 mm, με τη συνολική μετατόπιση να αποτελεί ένα μικρό ποσοστό αυτού του μήκους (περίπου 1% συνήθως).

Ένας απλός μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση συνίσταται από ένα μεταλλικό φύλλο, το οποίο είναι στερεωμένο σε ένα υπόστρωμα. Το μεταλλικό φύλλο έχει χαραχθεί ή ξυστεί με τη βοήθεια φωτογραφικών τεχνικών, έτσι ώστε να σχηματίζει μια συνεχή τεθλασμένη γραμμή με σχήμα ζιγκ ζαγκ. Αυτή η γραμμή ονομάζεται νηματίδιο. Τα νηματίδια των μετρητών μηχανικής τάσης είναι κατασκευασμένα από κράματα χαλκού-νικελίου ή χρωμίου-νικελίου, τα οποία έχουν υψηλή ειδική αντίσταση και υψηλή μηχανική αντοχή. Το πάχος τους συνήθως είναι μερικά μικρόμετρα. Τα υποστρώματα, στα οποία τα νηματίδια είναι κολλημένα, είναι κατασκευασμένα από εποξικές ρητίνες διαφόρων τύπων, ανάλογα με την εφαρμογή, και είναι επίσης πολύ λεπτά. Μερικές φορές ολόκληρος ο μετρητής μπορεί να ευρίσκεται μέσα σε κάψουλα (θήκη).



6.1.2.1 α.1 Απλός μετρητής μηχανικής τάσης με αντίσταση

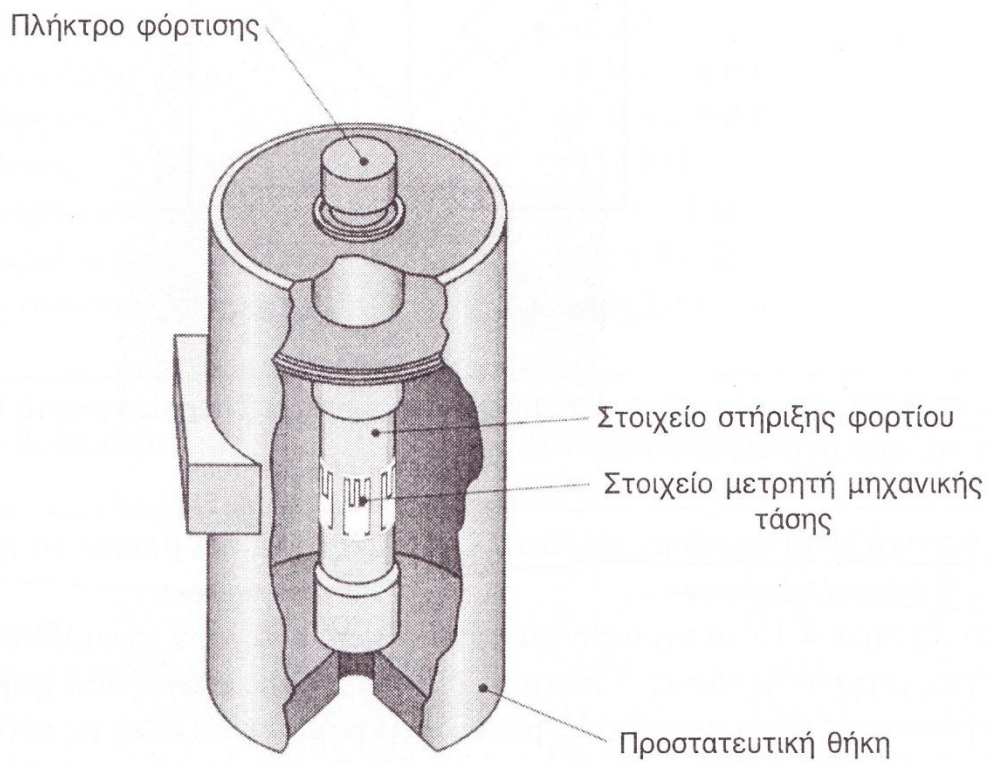
Οι μετρητές μηχανικής τάσης έχουν διάφορα μεγέθη, από μερικά κλάσματα του χιλιοστού έως περίπου πενήντα χιλιοστά. Στερεώνονται ακλόνητα στο αντικείμενο προς μέτρηση με τη βοήθεια ειδικών συγκολλητικών κονιαμάτων, αλλά μερικές φορές μπορεί να είναι εντοιχισμένα ή κολλημένα με ηλεκτροκόλληση. Η ουσία που πραγματοποιεί τη συγκόλληση αντικειμένου και μετρητή θα πρέπει να είναι πολύ ισχυρή και επιπλέον μονωτική.



6.1.2.1α.2 Διάφοροι μετρητές μηχανικής τάσης

Όταν ένας μετρητής μηχανικής τάσης συγκολλείται σε ένα αντικείμενο και το αντικείμενο (και επομένως και ο μετρητής) αλλάξουν μέγεθος, θα αλλάξει η αντίσταση του νηματιδίου του μετρητή.

Μια τυπική κυψελίδα φόρτισης με μετρητή μηχανικής τάσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



6.1.2.1α.3 Κυψελίδα φόρτισης με μετρητή μηχανικής τάσης

Αυτή χρησιμοποιεί τέσσερις μετρητές μηχανικής τάσης, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο στοιχείο στήριξης φορτίου, το οποίο δέχεται τη δύναμη. Όταν το στοιχείο αυτό ευρίσκεται υπό μηχανική τάση, τότε προκαλούνται μικρές μεταβολές στις αντιστάσεις των τεσσάρων μετρητών. Τα στοιχεία, μαζί με κατάλληλες αντιστάσεις σταθερής τιμής, συγκροτούν μια γέφυρα Wheatstone, η ακριβής φύση της οποίας εξαρτάται από την εφαρμογή και τη μορφή της μηχανικής τάσης που ασκείται. Η γέφυρα Wheatstone ρυθμίζει το σήμα εξόδου της ώστε να είναι ανάλογο του είδους της μηχανικής τάσης που ασκείται. Η τιμή της διαφοράς δυναμικού στην έξοδο της σχετίζεται με το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου.

Τα σφάλματα που προκαλούν οι μεταβολές θερμοκρασίας (καθώς επηρεάζονται οι τιμές των αντιστάσεων) μπορούν να ελαχιστοποιηθούν εάν οι μετρητές μηχανικής τάσης προσαρμοστούν ηλεκτρικά.

Οι κυψελίδες φόρτισης χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για τη μέτρηση:

- του βάρους των υλικών που αποθηκεύονται σε κάδους
- του βάρους οχημάτων σε γέφυρες ζύγισης
- της στάθμης και του όγκου υγρών σε δεξαμενές (εάν είναι γνωστό το βάρος, μπορεί να υπολογιστεί ο όγκος)

Η τεχνική είναι ακριβής, ευέλικτη, σχετικά φθηνή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευρύ φάσμα φορτίων. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μόνο συμπίεσης, μόνο εφελκυσμού ή σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι προδιαγραφές δείχνουν ότι οι συσκευές αυτές:

- είναι ακριβείς (καλύτερα από 0.25%)
- είναι γραμμικές (καλύτερα από 90%)
- έχουν καλή επαναληψιμότητα (καλύτερα από 0.25%)
- είναι ανθεκτικές σε υπερφόρτιση (καλύτερα από 150%)

Είδαμε λοιπόν ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις κυψελίδες φόρτισης για να μετρήσουμε δυνάμεις με πολύ καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Οι κυψελίδες φόρτισης διατίθενται σε πληθώρα μεγεθών και εύρους δυνάμεων που μπορούν να μετρήσουν. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένας τέτοιος αισθητήρας στη θέση του σταθερού σημείου στήριξης όπως αναφέραμε, ώστε να μετράμε τη δύναμη που ασκείται στον ιμάντα και πολλαπλασιάζοντάς τη με την ακτίνα του τυμπάνου να βρούμε τη ροπή που ασκείται στον άξονα η οποία θα είναι η ροπή της φτερωτής στις εκάστοτε στροφές που παίρνουμε τη μέτρηση.

Αυτός ο τρόπος μέτρησης είναι αρκετά ακριβής και σχετικά φθηνός. Έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν με αρκετά καλά αποτελέσματα. Επίσης έχει το πλεονέκτημα ότι το ίδιο το τύμπανο με τον ιμάντα και τον τεντωτήρα χρησιμοποιείται σαν πέδη ώστε να ρυθμίζουμε τις στροφές εκεί που θέλουμε για τις μετρήσεις που θέλουμε να πάρουμε.

Παρόλα αυτά η κατασκευή έχει το μειονέκτημα ότι προσθέτει στον άξονα καμπτικά φορτία. Παρακάτω θα δούμε μια άλλη λύση που μας απαλλάσσει από αυτό το πρόβλημα.

6.1.2.1β Ροπόμετρο

Το ροπόμετρο είναι μια συσκευή για τη μέτρηση και την καταγραφή της ροπής σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα όπως ένας κινητήρας, ένας στρόφαλος, ένα κιβώτιο ταχυτήτων κλπ. Η στατική ροπή είναι σχετικά εύκολο να μετρηθεί. Η δυναμική ροπή, από την άλλη μεριά, δεν είναι εύκολο να μετρηθεί επειδή γενικά χρειάζεται μεταφορά (ηλεκτρική ή μαγνητική) από τον άξονα που μετριέται σε ένα στατικό σύστημα.

Ένας τρόπος να το επιτύχουμε αυτό είναι να τοποθετηθούν στον άξονα μια σειρά από διατάξεις που δημιουργούν μαγνητικά πεδία. Τα μαγνητικά χαρακτηριστικά θα ποικίλουν σύμφωνα με τη ροπή που ασκείται, και έτσι μπορεί να μετρηθεί χωρίς να έρχονται σε επαφή οι αισθητήρες μεταξύ τους. Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα, αεροσκάφη κλπ.

Συνήθως οι αισθητήρες ροπής χρησιμοποιούν επιμηκυνσιόμετρα τοποθετημένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα. Με αυτή τη μέθοδο είναι απαραίτητο ένα μέσο για να τροφοδοτήσει τη γέφυρα του επιμηκυνσιόμετρου, καθώς και ένα μέσο για να λαμβάνει το σήμα από τον άξονα περιστροφής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση δακτυλίων, ασύρματη τηλεμετρία, ή περιστρεφόμενους μετασχηματιστές. Το ροπόμετρο παρεμβάλλεται, μέσω ελαστικών συνδέσμων, μεταξύ του άξονα του οποίου τη ροπή θέλουμε να μετρήσουμε και μεταξύ ενός άλλου άξονα στον οποίο ασκούμε φορτίο. Έτσι ο άξονας του ροπόμετρου καταπονείται σε στρέψη και κατά συνέπεια αλλάζει η τάση του επιμηκυνσιόμετρου, οπότε με την κατάλληλη βαθμονόμηση μπορούμε να πάρουμε σαν αποτέλεσμα τιμές ροπής σε διάφορα φορτία και στροφές.

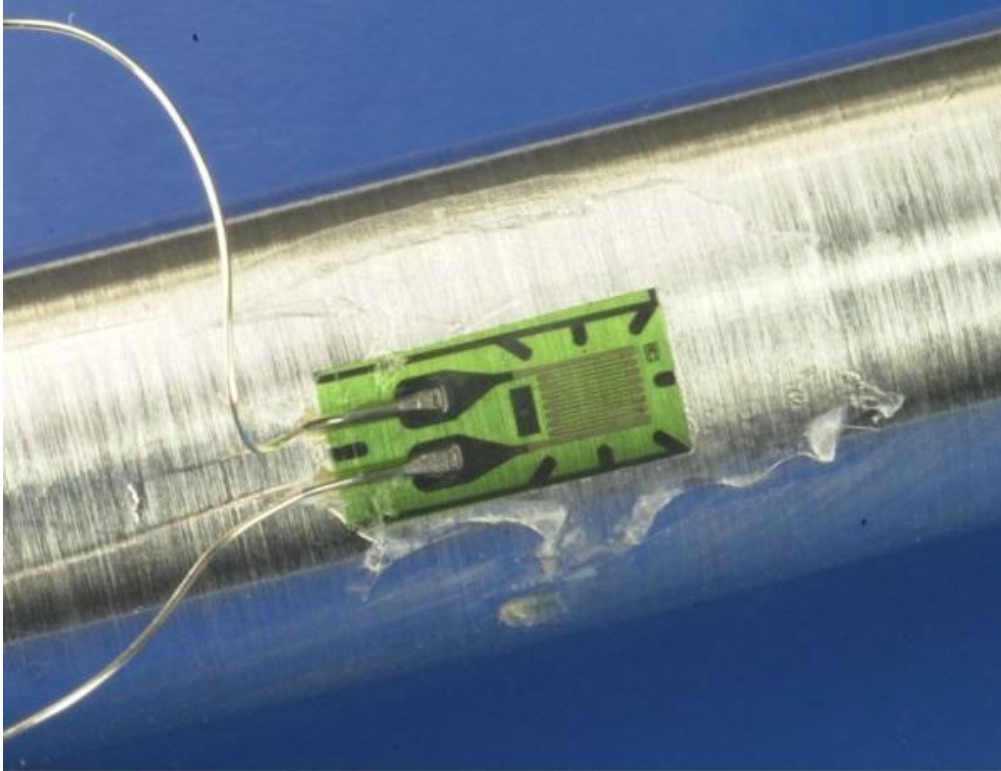
Αυτή η μέθοδος είναι η πιο αξιόπιστη στις μετρήσεις επειδή η ροπή μετριέται άμεσα πάνω στην περιστρεφόμενη άτρακτο, χωρίς να παρεμβάλλεται πέδη. Η πέδη βρίσκεται μετά το σημείο μέτρησης της ροπής. Για αυτό προτιμήθηκε τελικά από τις προηγούμενες. Το μειονέκτημά της είναι ότι το ροπόμετρο είναι μια ακριβή συσκευή και εκτός αυτού θα πρέπει να σχεδιάσουμε ένα ξεχωριστό σύστημα πέδησης ώστε να μπορούμε να ασκούμε φορτία στον άξονα και να ρυθμίζουμε τις στροφές.



6.1.2.1β.1 Ροπόμετρο σε πειραματική διάταξη



6.1.2.1β2 Διάφορα ροπόμετρα



6.1.2.1β3 Επιμηκυνσιόμετρο τοποθετημένο σε άξονα

6.1.2.2 Ρυθμός περιστροφής

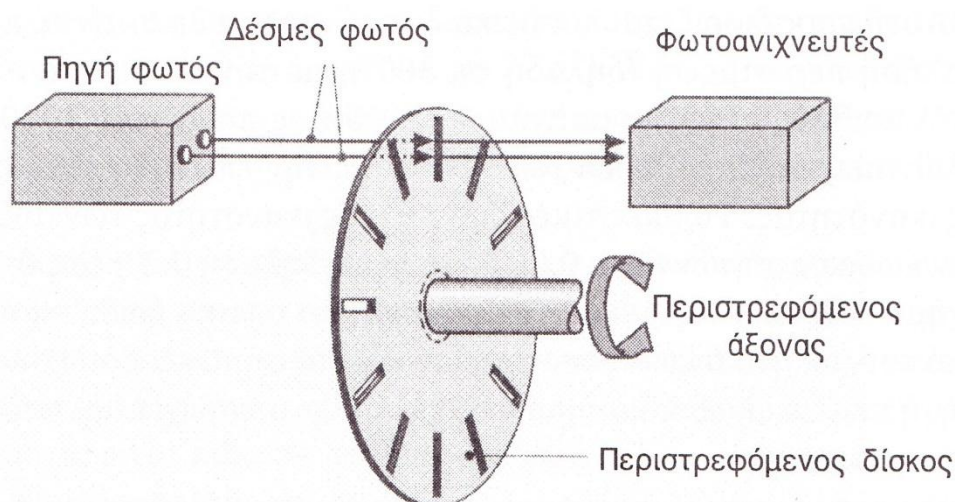
Για τη μέτρηση του ρυθμού περιστροφής θα πρέπει να ανατρέξουμε στη μέτρηση γωνιακής μετατόπισης. Η γωνιακή (ή περιστροφική) μετατόπιση λοιπόν εμφανίζεται πολύ συχνά σε συσκευές και μηχανήματα. Η μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης είναι συχνά αναγκαία για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός μηχανήματος και είναι ουσιαστική σε διάφορα συστήματα τοποθέτησης και ελέγχου. Από τη γωνιακή μετατόπιση μπορούν να υπολογιστούν και άλλες παράμετροι. Για παράδειγμα, η γωνιακή ταχύτητα, που είναι η γωνιακή μετατόπιση στη μονάδα του χρόνου, των τροχών ενός οχήματος είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας του αυτοκινήτου. Η προσαρμογή ενός κατάλληλου αισθητήρα στους τροχούς ενός οχήματος επιτρέπει τη μέτρηση κάθε στιγμή της γωνιακής τους ταχύτητας και αυτή η πληροφορία μπορεί να απεικονιστεί άμεσα με τη βοήθεια της συσκευής του ταχύμετρου, το οποίο είναι βαθμονομημένο σε μονάδες ταχύτητας. Παρακάτω θα εξετάσουμε τον αισθητήρα που θα χρησιμοποιήσουμε και τις αρχές λειτουργίας του.

6.1.2.2α Αξονικοί οπτικοί κωδικοποιητές

Οι αξονικοί οπτικοί κωδικοποιητές (optical shaft encoders) παρέχουν πληροφορίες για τη γωνιακή μετατόπιση σε ψηφιακή μορφή. Αυτό είναι χρήσιμο επειδή οι ψηφιακές έξοδοι είναι συμβατές με υπολογιστές και άλλα ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα.

Υπάρχουν δύο κύρια είδη τέτοιων κωδικοποιητών, οι αυξητικοί κωδικοποιητές (incremental encoders) και οι απόλυτοι κωδικοποιητές (absolute encoders). Οι αυξητικοί κωδικοποιητές παράγουν ένα σήμα το οποίο δείχνει ότι έχει συμβεί μια γωνιακή μετατόπιση σε έναν άξονα. Απαριθμούνται πολλά τέτοια σήματα εξόδου και από το πλήθος τους εξάγεται η γωνιακή μετατόπιση του άξονα. Ο απόλυτος κωδικοποιητής παράγει ένα σήμα εξόδου, το οποίο δείχνει τη συνολική γωνιακή μετατόπιση του άξονα, από μία θέση που θεωρείται αρχική (θέση μηδέν).

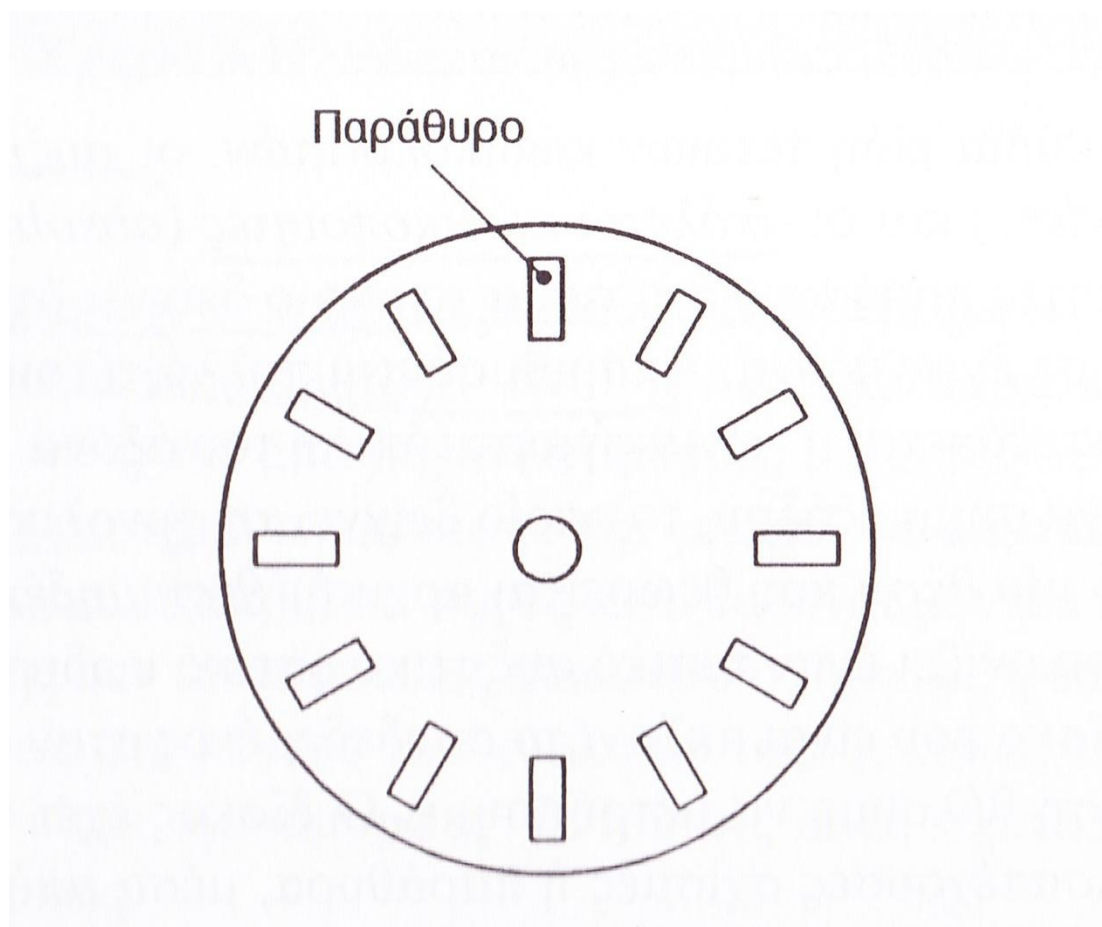
Ένας αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής αποτελείται από ένα δίσκο που είναι ακλόνητα συνδεδεμένος στον άξονα, του οποίου τη γωνιακή μετατόπιση θέλουμε να μετρήσουμε. Ο δίσκος έχει στην περιφέρειά του έναν αριθμό από ισαπέχουσες σχισμές ή παράθυρα, μέσα από τα οποία μπορεί να περνά μια φωτεινή ακτίνα. Το υπόλοιπο τμήμα του δίσκου είναι αδιαφανές. Μία πηγή φωτός, η οποία αποτελείται από δύο διόδους φωτοεκπομπής (light-emitting diodes, LED's) ευθυγραμμίζεται με το δίσκο. Εάν το φως από αυτές τις διόδους περάσει μέσα από το δίσκο χωρίς να διακοπεί, συλλέγεται από δύο φωτοανιχνευτές.



6.1.2.2α.1 Αυξητικός οπτικός κωδικοποιητής

Καθώς περιστρέφεται ο άξονας, το φως περνά περιοδικά μέσα από τα ισαπέχοντα παράθυρα του δίσκου και εμποδίζεται από τις ενδιάμεσες αδιαφανείς περιοχές. Επομένως παράγεται μια παλμική δέσμη φωτός στην άλλη πλευρά του δίσκου. Οι ανιχνευτές LED είναι έτσι τοποθετημένοι ώστε, καθώς περιστρέφεται ο άξονας και ο δίσκος, η διαφορά φάσης των παλμοσειρών φωτός που προκύπτουν στους ανιχνευτές να δείχνει την κατεύθυνση της περιστροφής. Ο αριθμός των παλμών που ανιχνεύονται είναι ανάλογος της

γωνίας κατά την οποία έχει μετατοπιστεί ο άξονας και ο δίσκος. Η γωνιακή μετατόπιση του άξονα μπορεί να προσδιοριστεί αναφορικά με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο έναρξης.

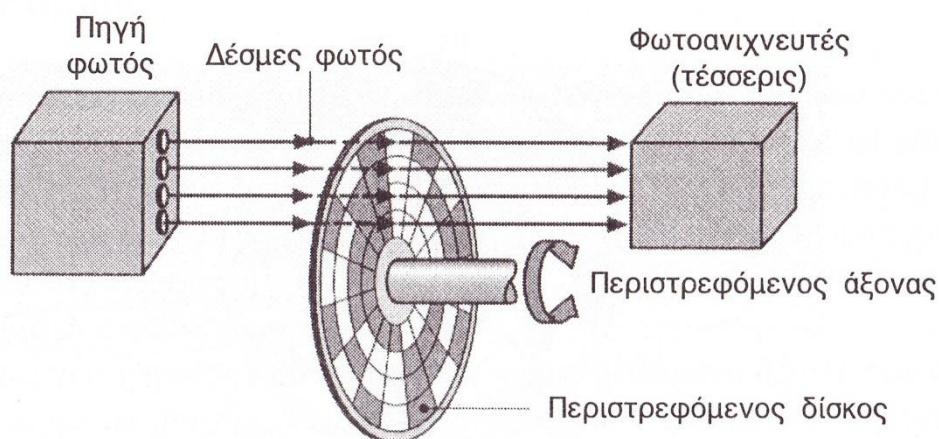


6.1.2.2.α.2 Δίσκος αυξητικού οπτικού αξονικού κωδικοποιητή

Η διακριτική ικανότητα του δίσκου εξαρτάται από τον αριθμό των παραθύρων που περιέχει. Όσο περισσότερα είναι αυτά, τόσο υψηλότερη είναι η διακριτική ικανότητα. Αυτή προσδιορίζεται ποσοτικά διαιρώντας τα 2π ακτίνια, που αντιστοιχούν σε μια πλήρη περιστροφή (δηλαδή σε 360°), με τον αριθμό των παραθύρων του δίσκου. Ο αριθμός αυτός κυμαίνεται από 60 έως πάνω από 1000, με τη βοήθεια πολλαπλών σειρών παραθύρων, επιτρέποντας την επίτευξη εξαιρετικά καλής διακριτικής ικανότητας. Τυπικές τιμές διακριτικής ικανότητας των αυξητικών οπτικών αξονικών αποκωδικοποιητών είναι 0.0034 ακτίνια (δηλαδή 0.2°) έως 0.102 ακτίνια (6°).

Ένα άλλο είδος αξονικού οπτικού αποκωδικοποιητή είναι ο απόλυτος οπτικός κωδικοποιητής. Αυτός διαφέρει από τον αυξητικό κωδικοποιητή, στο ότι το σήμα εξόδου που παράγει είναι σε ψηφιακή, ή εν γένει κωδικοποιημένη μορφή. Αυτό παρέχει μία απόλυτη τιμή για τη μετατόπιση του άξονα.

Στον άξονα προσαρμόζεται ένας περιστρεφόμενος δίσκος με έναν αριθμό ομόκεντρων καναλιών (αυλακώσεων). Μια πηγή φωτός που αποτελείται από μερικές διόδους LED ευθυγραμμίζεται με τις αυλακώσεις του δίσκου. Μερικοί φωτοανιχνευτές ευθυγραμμίζονται με όμοιο τρόπο με το δίσκο και τις δέσμες φωτός που περνούν μέσα από το δίσκο.



6.1.2.2.α.3 Απόλυτος κωδικοποιητής

Ένα «κλειστό» παράθυρο το, το οποίο είναι αδιαφανές και εμποδίζει τη διέλευση της φωτεινής δέσμης από κάποιο LED προς τον αντίστοιχο ανιχνευτή, αντιπροσωπεύει το δυαδικό αριθμό «0». Ένα «ανοικτό» παράθυρο, το οποίο επιτρέπει το φως από κάποιο LED να φθάσει στον ανιχνευτή που βρίσκεται απέναντί του αντιπροσωπεύει το δυαδικό αριθμό «1». Ο συνδυασμός ανοικτών και κλειστών παραθύρων μπορεί να αντιπροσωπεύσει όλους τους δεκαδικούς αριθμούς από 0 έως $2_n - 1$, όπου n είναι ο αριθμός των αυλακώσεων.

Ας πάρουμε για παράδειγμα το δίσκο ενός δυαδικού, απόλυτου αξονικού κωδικοποιητή με τέσσερις αυλακώσεις και επομένως ο κάθε δυαδικός αριθμός που μπορεί να σχηματισθεί περιέχει τέσσερα bit. Ο αριθμός των θέσεων που μπορούν να ανιχνευθούν είναι 16 (δηλαδή 2^4) και έτσι η δυαδική ακολουθία εκτείνεται από τον αριθμό 0 έως τον αριθμό 15 (που ισούται με $2^4 - 1$). Η διακριτική ικανότητα, η οποία προσδιορίζεται εάν διαιρέσουμε τα 2π ακτίνια (ή τις 360°) με τον αριθμό των παραθύρων, που είναι 16, είναι 0.393 ακτίνια (ή 22.5°). Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν περιστρεφόμενο δίσκο με οκτώ αυλακώσεις, τότε ο αριθμός των θέσεων που μπορούν να ανιχνευθούν είναι $2^8 = 256$. Η διακριτική ικανότητα είναι τότε 0.024 ακτίνια (ή 14.1°).

Στην πράξη υπάρχουν προβλήματα με αυτόν τον τύπο δυαδικού απόλυτου κωδικοποιητή. Είναι δύσκολο να επιτευχθεί ακριβής ρύθμιση των ακμών των παραθύρων με τις φωτεινές δέσμες σε κάθε αυλακωση και επομένως εισάγονται συχνά σφάλματα. Αυτά τα σφάλματα συμβαίνουν στα όρια μεταξύ των παραθύρων και σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανόν να διαπραχθεί σφάλμα 180° κατά τον υπολογισμό της γωνιακής μετατόπισης του άξονα.

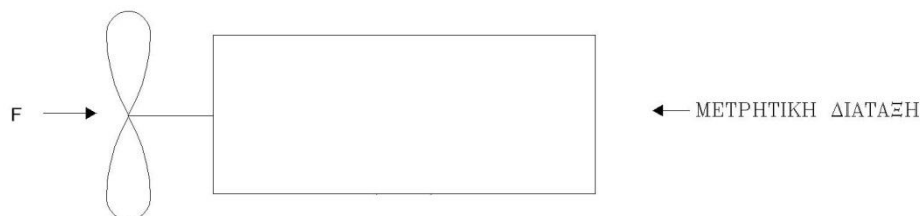
Ένα κύριο μειονέκτημα του δυαδικού απόλυτου κωδικοποιητή είναι ότι σε πολλές περιπτώσεις μια αύξηση της μετατόπισης θα προκαλέσει ταυτόχρονη αλλαγή κατάστασης σε περισσότερα από ένα παράθυρα. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης του δυαδικού συστήματος αρίθμησης. Για παράδειγμα, όταν από τον αριθμό 0011 οδηγούμαστε στον αριθμό 0100 (από το δεκαδικό «3» στο δεκαδικό «4») αλλάζουν τρία παράθυρα, και όταν από τον αριθμό 0111 οδηγούμαστε στον αριθμό 1000 (από το δεκαδικό «7» στο δεκαδικό «8») αλλάζουν κατάσταση τέσσερα παράθυρα, κ.ο.κ. Η πιο σημαντική αλλαγή είναι όταν από τον αριθμό 1111 οδηγούμαστε στον αριθμό 0000 (από το δεκαδικό «15» στο δεκαδικό «16»), οπότε αλλάζουν κατάσταση τέσσερα παράθυρα. Επομένως, εάν ο απόλυτος κωδικοποιητής αναγνώσει λάθος κάποιο παράθυρο, θα προκληθούν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της θέσης. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έχει επινοηθεί ο κώδικας Gray, που έλαβε την ονομασία του Frank Gray των Εργαστηρίων Bell. Αυτός απεικονίζει τους δεκαδικούς αριθμούς με τέτοια δυαδική μορφή, έτσι ώστε από κάποιον αριθμό στον επόμενο να αλλάζει μόνο ένα bit, ή αλλιώς, στην περίπτωση μας, ένα παράθυρο.

Οι οπτικοί κωδικοποιητές για τη μέτρηση της γωνιακής μετατόπισης έχουν εφαρμογές σε μηχανές που ελέγχονται αριθμητικά, όπως είναι οι τόννοι και οι φρέζες που ελέγχονται από υπολογιστή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη ρομποτική και τα συστήματα τοποθέτησης. Μια συνηθισμένη εφαρμογή των σχετικών οπτικών κωδικοποιητών στους υπολογιστές αποτελεί το ποντίκι.

Λόγω της ευρείας εφαρμογής του οπτικού αποκωδικοποιητή σε διάφορα συστήματα καταλήξαμε ότι είναι ο καταλληλότερος τρόπος μέτρησης των στροφών για την κατασκευή μας.

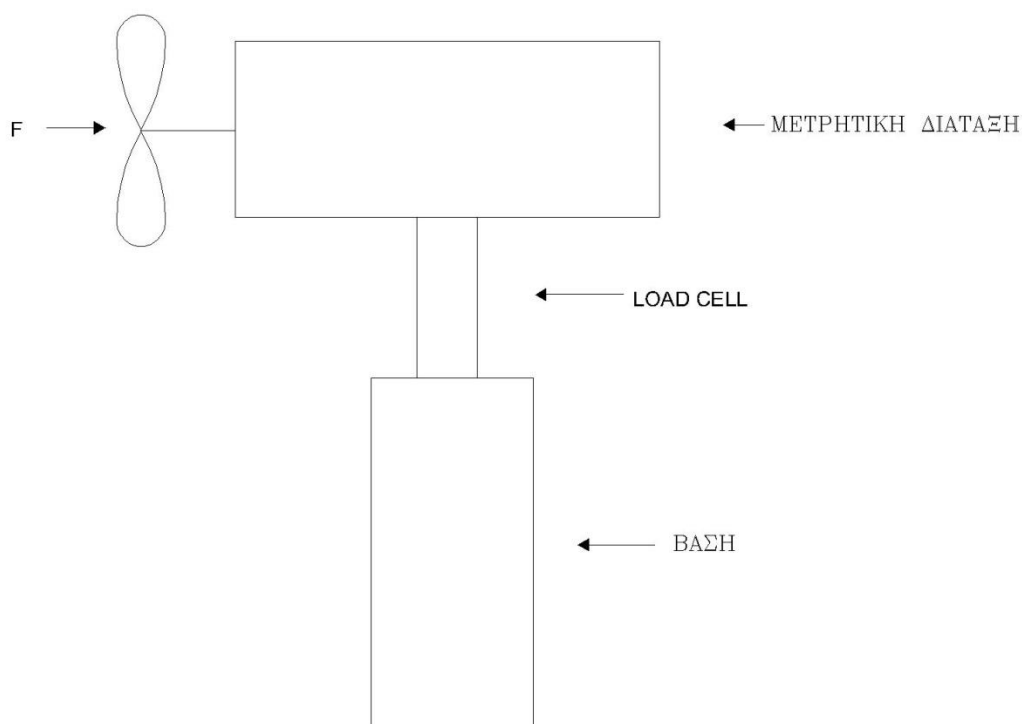
6.2 Οπισθέλκουσα

Η οπισθέλκουσα είναι ένα σημαντικό μέγεθος που θα πρέπει να γνωρίζουμε σε κάθε πτερύγωση που μελετάται. Αναφερθήκαμε εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3. Πρακτικά στην μετρητική διάταξη αυτό που πρέπει να είμαστε σε θέση να μετράμε είναι η δύναμη F που ασκείται στον άξονα όπου εδράζεται η φτερωτή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



6.2.1 Η οπισθέλκουσα F που ασκείται στη φτερωτή

Αυτό μπορούμε να το κατορθώσουμε εδράζοντας τη διάταξη σε ένα load cell. Έτσι η δύναμη F , δηλαδή η οπισθέλκουσα θα μεταφέρεται μέσω της φτερωτής στον άξονα από εκεί στην έδραση του άξονα στη συνέχεια στην ίδια τη μετρητική διάταξη και τέλος στο load cell. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται πως μπορεί να σχεδιαστεί μια βάση για τη μετρητική διάταξη όπως αναφέραμε παραπάνω.



6.2.2 Σκαρίφημα μετρητικής διάταξης με βάση με load cell

Με σωστό σχεδιασμό και την κατάλληλη βαθμονόμηση του load cell με πρότυπα βάρη μπορούμε να έχουμε μια πολύ αξιόπιστη μέτρηση της οπισθέλκουσας. Ο συγκεκριμένος τρόπος μέτρησης της οπισθέλκουσας έχει χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες μετρητικές διατάξεις πτερυγώσεων με πολύ καλά αποτελέσματα.

6.3 Επιλογή αισθητήρων

Ανακεφαλαιώνοντας τα όσα παρουσιάσαμε παραπάνω, για να υπολογίσουμε την ισχύ θα πρέπει να μετρήσουμε πρώτα τη ροπή και το ρυθμό περιστροφής της εκάστοτε φτερωτής.

Για τη μέτρηση της ροπής επιλέχθηκε σε πρώτη φάση ένα ροπόμετρο της εταιρίας **SCAIME** με αριθμό μοντέλου **DR2112** και με ικανότητα μέτρησης ροπής μέχρι 1Nm. Για τη μέτρηση του ρυθμού περιστροφής επιλέχθηκε ένας encoder της εταιρίας **US DIGITAL** με αριθμό μοντέλου **E4P**.

Κάνοντας τις αρχικές δοκιμές το ροπόμετρο παρουσίασε βλάβη και έτσι έγινε αντικατάσταση του από ίδιο μοντέλο αλλά με ενσωματωμένο encoder αυτή τη φορά, οπότε απαλλασσόμαστε από την ανάγκη πρόσθετου encoder. Έτσι υπήρξε η ανάγκη επανασχεδιασμού της διάταξης χωρίς πρόβλεψη για πρόσθετο encoder μια και είναι πλέον ενσωματωμένος στο ροπόμετρο πράγμα το οποίο μας απάλλαξε και από κάποια άλλα προβλήματα σχεδιασμού και κατασκευής τα οποία θα αναλύσουμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

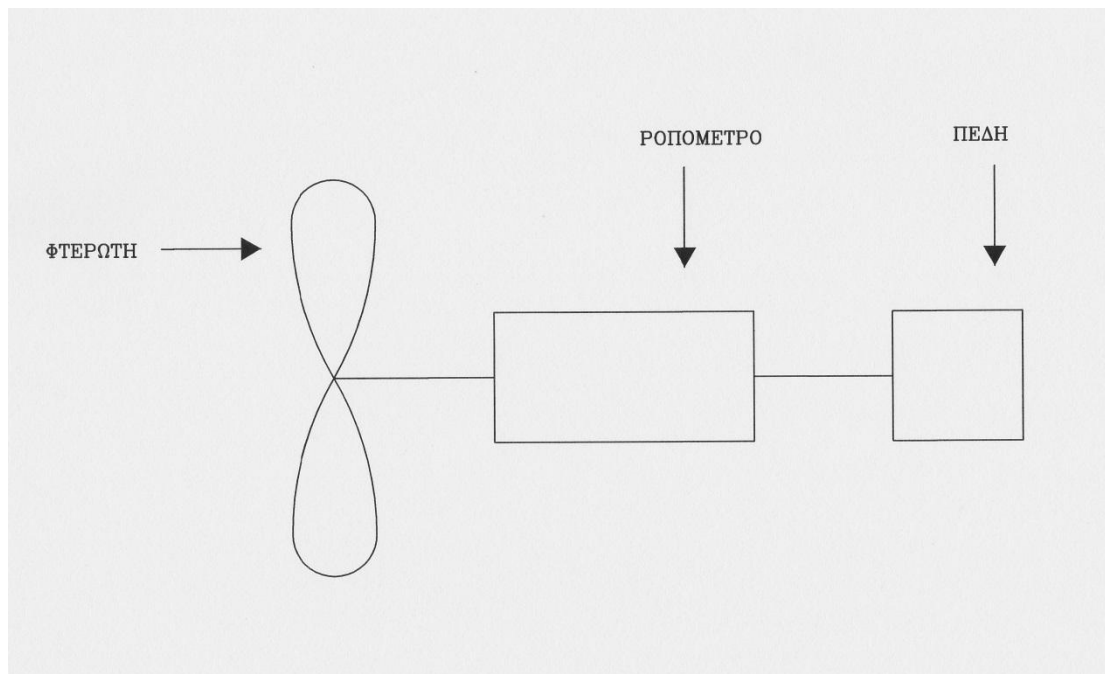
Για την μέτρηση της οπισθέλκουσας επιλέχτηκε ένα load cell της εταιρίας **HBM** με αριθμό μοντέλου **SP4C3MR**.

Στο παράρτημα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων.

7. Σχεδιασμός διάταξης

7.1 Α φάση

Η πειραματική διάταξη που θα σχεδιαστεί και στη συνέχεια θα κατασκευαστεί, θα πρέπει να έχει την εξής μορφή:

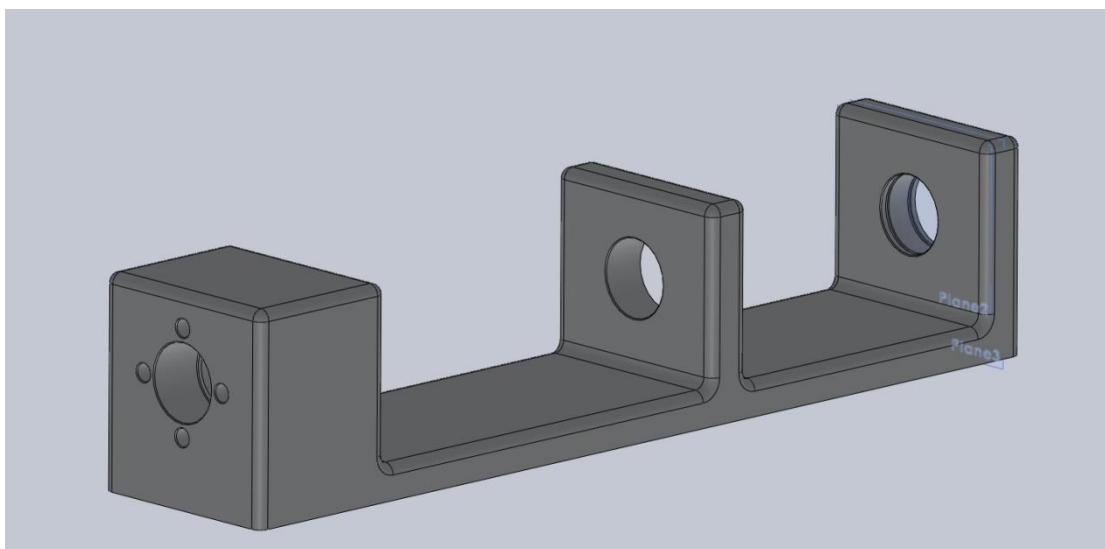


Όπως βλέπουμε από το παραπάνω σκαρίφημα θα πρέπει αρχικά να εδραστεί σωστά ο άξονας όπου θα στηρίζεται η φτερωτή. Για την έδραση του άξονα θα χρησιμοποιηθούν ρουλεμάν τα οποία μπορούν να μας προσφέρουν χαμηλές τριβές. Αυτό είναι και το πιο βασικό κομμάτι της κατασκευής. Στη συνέχεια ο άξονας θα πρέπει να εκτείνεται μέχρι τον ελαστικό σύνδεσμο του ροπόμετρου. Από την πίσω μεριά του ροπόμετρου θα πρέπει να εκτείνεται ακόμα ένας άξονας όπου εκεί θα επενεργεί κάποιας μορφής πέδη η οποία θα ασκεί φορτίο στον άξονα ώστε να μπορούμε να ρυθμίσουμε το ρυθμό περιστροφής της φτερωτής και να μετρήσουμε ροπή. Η μορφή της πέδης που θα χρησιμοποιήσουμε θα αναλυθεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

Η αρχική ιδέα ήταν να κατασκευαστεί η διάταξη από ένα ενιαίο κομμάτι αλουμινίου ώστε οι τρύπες που θα ανοιχτούν για να περάσουν οι άξονες και να τοποθετηθούν τα ρουλεμάν, να κατασκευαστούν με μία μόνο διεργασία στον τόρνο με αποτέλεσμα να είναι ακριβώς ευθυγραμμισμένες, κάτι πολύ σημαντικό για τη σωστή λειτουργία της διάταξης. Στη συνέχεια θα πρέπει να αφαιρεθεί υλικό ώστε να τοποθετηθεί το ροπόμετρο και η πέδη.

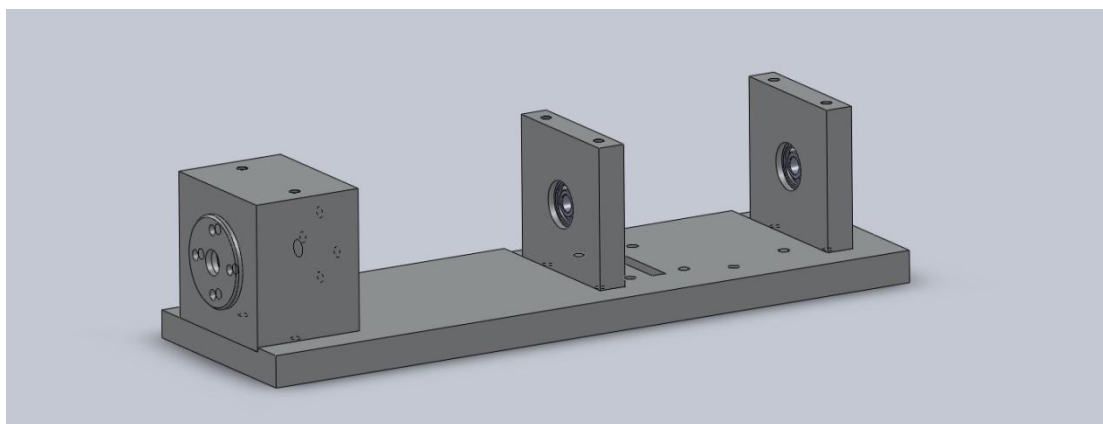
Σύντομα όμως εγκαταλείφθηκε αυτή η ιδέα διότι η επεξεργασία που θα γινόταν στη φρέζα θα αποτελούσε τεράστια σπατάλη υλικού. Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι το μήκος που χρειάζεται η κατασκευή για να χωρέσει το ροπόμετρο είναι πολύ μεγάλο για να ανοιχτούν οι τρύπες με μια διεργασία. Επίσης θα ήταν πολύ δύσκολο σε μια

ενιαία κατασκευή, λόγω χώρου, να τοποθετηθούν τα υπόλοιπα εξαρτήματα όπως τα ρουλεμάν, οι άξονες, το ροπόμετρο κλπ. Έτσι η διάταξη θα κατασκευαστεί τελικά από ξεχωριστά κομμάτια και θα συναρμολογηθεί στο τέλος. Απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι να κατασκευαστούν και να συναρμολογηθούν τα κομμάτια με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια ώστε οι άξονες να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθυγραμμισμένοι, κάτι πολύ σημαντικό για τη σωστή λειτουργία της διάταξης.



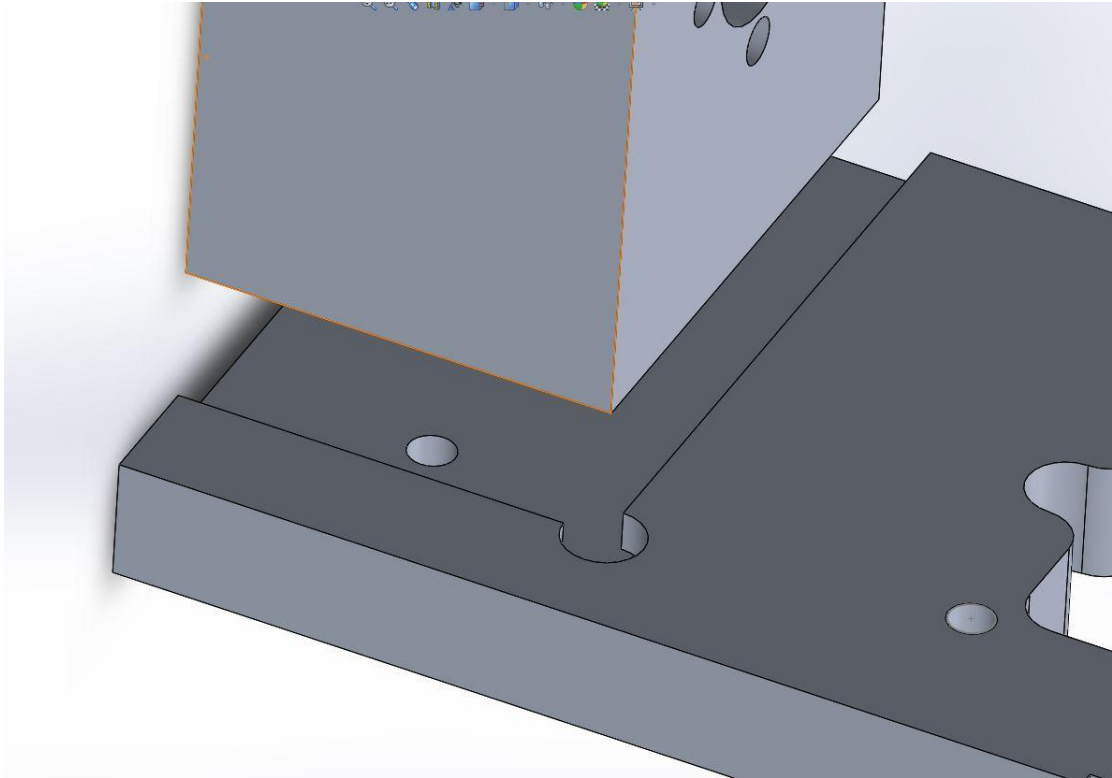
7.1.1 Αρχική ιδέα κατασκευής από ενιαίο κομμάτι σε 3D στο Solidworks

Όλα τα κομμάτια της μετρητικής διάταξης κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο του Αιολικού εργαστηρίου από συμβατικές εργαλειομηχανές (τόρνος, φρέζα). Όπως προαναφέραμε δόθηκε μεγάλη προσοχή κατά τη διάρκεια της κατασκευής ώστε να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στις διαστάσεις για να πετύχουμε την επιθυμητή ευθυγράμμιση.



7.1.2 Σχέδιο 3D στο Solidworks

Επίσης όσον αφορά τη συναρμολόγηση η βάση σχεδιάστηκε ώστε οι δύο κάθετες πλευρές των κομματιών που τοποθετούνται τα ρουλεμάν να εφάπτονται σε οδηγούς ώστε πάντα τα εξαρτήματα να συναρμολογούνται στη θέση που πρέπει ώστε να υπάρχει ευθυγράμμιση.



7.1.3 Συναρμολόγηση έδρασης ρουλεμάν



7.1.4 Πραγματική κατασκευή στην αεροσήραγγα

7.2 Επιλογή πέδης

Όπως αναφέραμε προηγουμένως για να μπορούμε να μετρήσουμε τα χαρακτηριστικά της φτερωτής και να σχεδιαστούν οι καμπύλες ισχύος θα πρέπει να είμαστε σε θέση να ασκούμε φορτίο στο ροπόμετρο με κάποιου είδους πέδη.

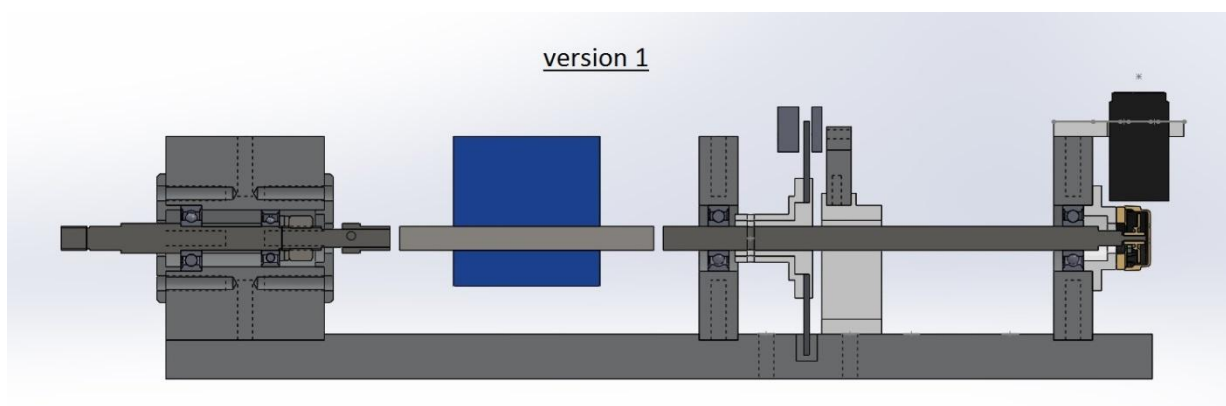
Αρχικά μια ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθεί μια ηλεκτρική πέδη, δηλαδή στην ουσία μια ηλεκτρική γεννήτρια (ηλεκτρομαγνητική πέδη) η οποία θα είναι συνδεδεμένη με την έξοδο του ροπόμετρου. Έτσι δίνοντας ρεύμα αντίθετο από τη φορά περιστροφής θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πέδη. Αναλόγως λοιπόν το ρεύμα που του δίνουμε το μοτέρ θα μπορεί να ασκεί ανάλογο φορτίο στον άξονα και διατηρώντας τον στις στροφές που θέλουμε στην εκάστοτε ταχύτητα ανέμου θα μπορούν να παρθούν τιμές ροπής (και κατ'επέκταση ισχύος) από το ροπόμετρο. Επίσης αυτός ο τύπος πέδης θα μπορούσε να έχει και ένα άλλο πλεονέκτημα. Εκτός των τιμών της μηχανικής ισχύος της φτερωτής θα μπορούσαν να παρθούν δεδομένα και ηλεκτρικής ισχύος από το μοτέρ κάτι το οποίο θα είχε αρκετό ενδιαφέρον. Δυστυχώς στην πράξη δεν δούλεψε η ιδέα της ηλεκτρικής πέδης για τους λόγους τους οποίους θα περιγράψουμε παρακάτω.

Η ισχύς των πτερυγώσεων που μελετούνται στο αιολικό εργαστήριο είναι αρκετά μικρή λόγω του μεγέθους τους, με αποτέλεσμα να παρατηρηθούν στα πειράματα με την ηλεκτρική πέδη τα εξής φαινόμενα που θα αναλύσουμε. Η ροπή εκκίνησης του ηλεκτρικού μοτέρ είναι αρκετά μεγάλη για τις φτερωτές. Αυτό σημαίνει ότι μέχρι να ξεκινήσει να

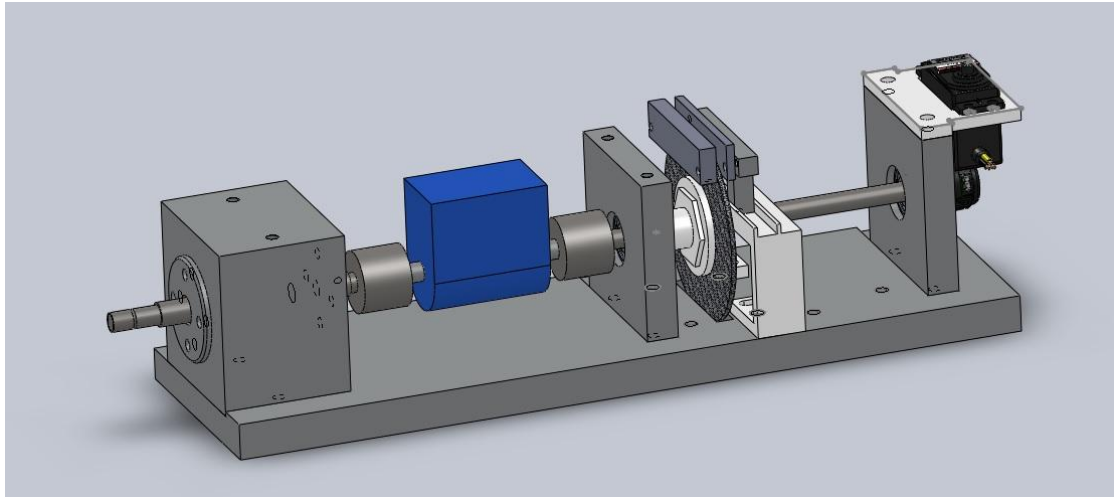
περιστρέφεται το σύστημά μας θα έχουμε χάσει ένα μεγάλο εύρος στροφών και ταχυτήτων ανέμου που μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις. Το δεύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει αυτή η διάταξη είναι πως ενώ περιστρέφεται και θέλουμε να ασκήσουμε φορτίο στην ηλεκτρική πέδη, δεν μπορούμε να κρατήσουμε τη φτερωτή σε σταθερές στροφές. Όσο λίγο φορτίο και να ασκήσουμε η φτερωτή σταματάει εντελώς. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς της ηλεκτρικής γεννήτριας είναι αρκετά μεγάλη για την εφαρμογή μας. Αν και δοκιμάστηκαν διαφορετικές ηλεκτρικές γεννήτριες με μικρότερη ισχύ το αποτέλεσμα ήταν το ίδιο. Έτσι αυτή η ιδέα εγκαταλείφθηκε σύντομα.

Εφόσον η ηλεκτρική πέδη ήταν αναποτελεσματική καταφύγαμε στην ιδέα μιας μηχανικής πέδης. Η πρώτη λύση που συζητήθηκε είναι να κατασκευαστεί ένα σύστημα όμοιο με εκείνο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 6.2 για τη μέτρηση της ροπής με τη βοήθεια ενός τυμπάνου το οποίο σφίγγει με έναν ιμάντα και ένα τεντωτήρα. Αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει την πέδη και παράλληλα αν το επιθυμούμε να έχουμε και μια δεύτερη μέτρηση ροπής για να ελέγχουμε αν το ροπόμετρο παίρνει σωστές μετρήσεις. Όπως όμως είχαμε αναφέρει όταν αναλύσαμε το συγκεκριμένο σύστημα μια τέτοια διάταξη θα πρόσθετε καμπτικά φορτία στον άξονα, πράγμα που θέλαμε εξ' αρχής να αποφύγουμε.

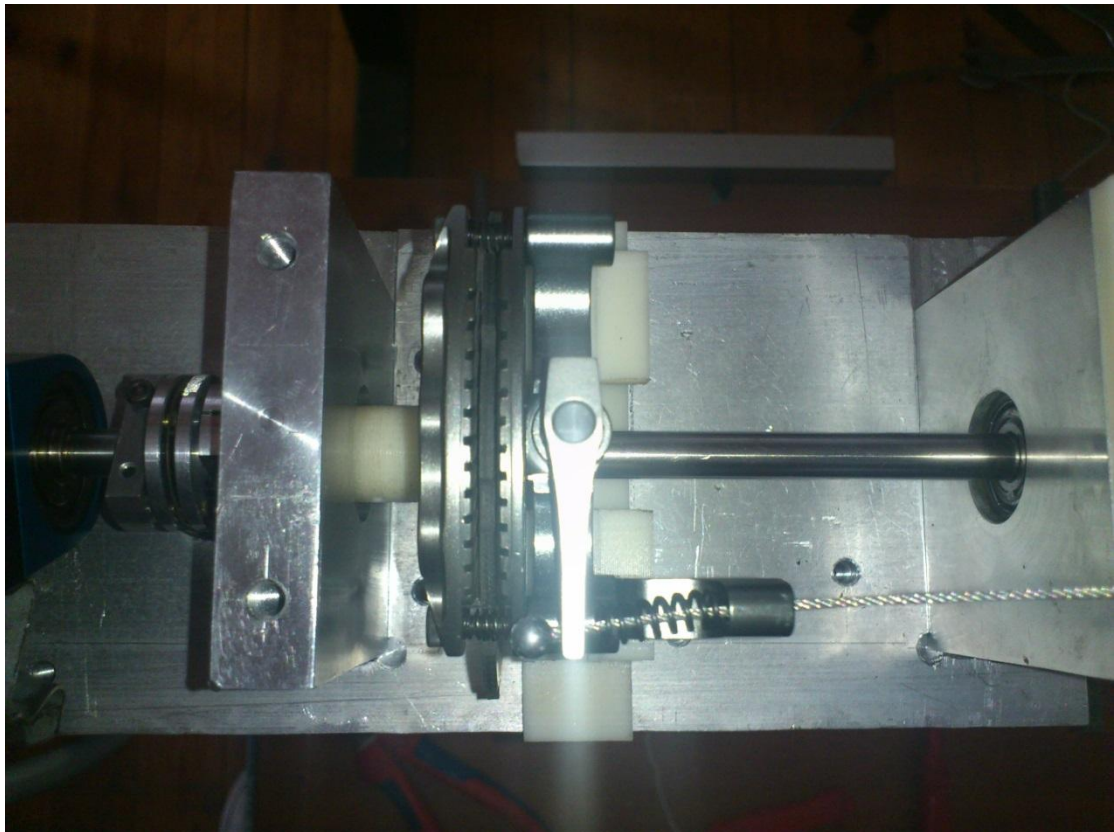
Καταλήξαμε ότι ίσως μια καλή λύση να είναι κάποιο είδους φρένο από το χώρο του μοντελισμού. Μετά από έρευνα βρήκαμε ένα σύστημα με δισκόφρενο και δαγκάνα το οποίο χρησιμοποιείται στα τηλεκατευθυνόμενα αυτοκίνητα μοντελισμού. Το συγκεκριμένο σύστημα ενεργοποιείται από μία ντίζα στην οποία δρα ένας ηλεκτρικός επενεργητής. Έτσι σχεδιάστηκαν κάποιες βάσεις για να τοποθετηθεί στην ήδη υπάρχουσα κατασκευή οι οποίες στη συνέχεια κατασκευάστηκαν στο 3D printer που διαθέτει το εργαστήριο ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης. Στη συνέχεια επιλέξαμε ένα μοτέρ τύπου servo το οποίο θα επενεργεί στη ντίζα του φρένου για να ελέγχεται μέσω του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί. Στα πειράματα που ακολούθησαν παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη πέδη δουλεύει πολύ καλά και μας επιτρέπει να έχουμε καλό έλεγχο στο ρυθμό περιστροφής του άξονα, έτσι επιλέχθηκε τελικά το συγκεκριμένο σύστημα πέδης.



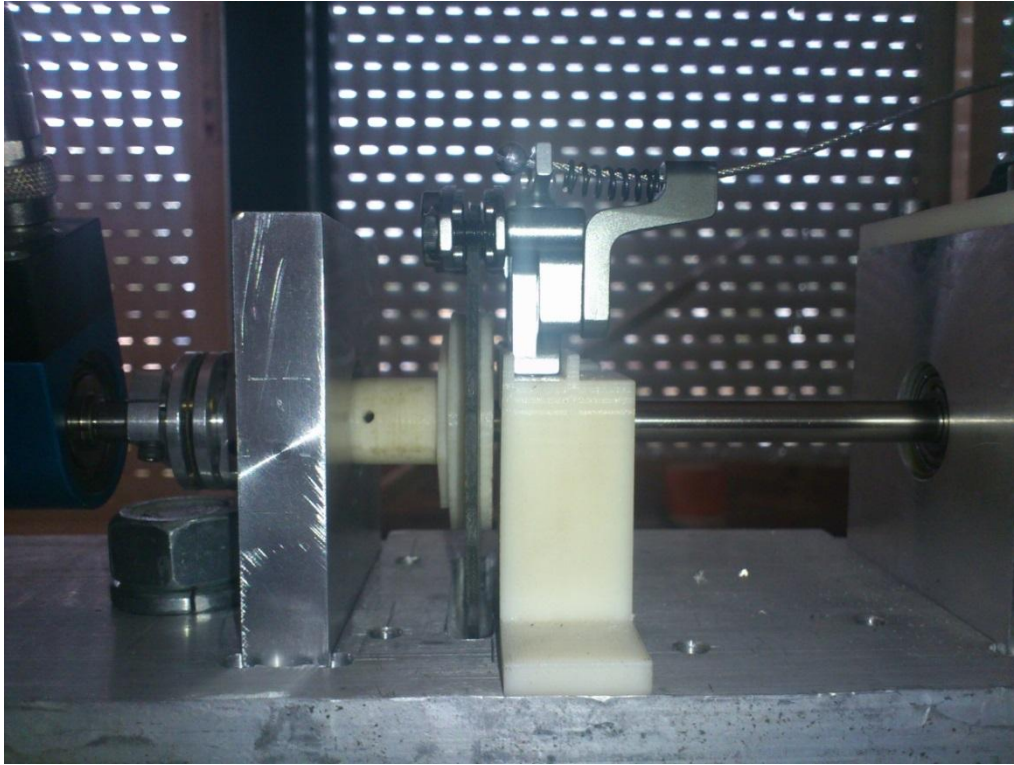
7.2.1 Τομή μετρητικής διάταξης στο Solidworks



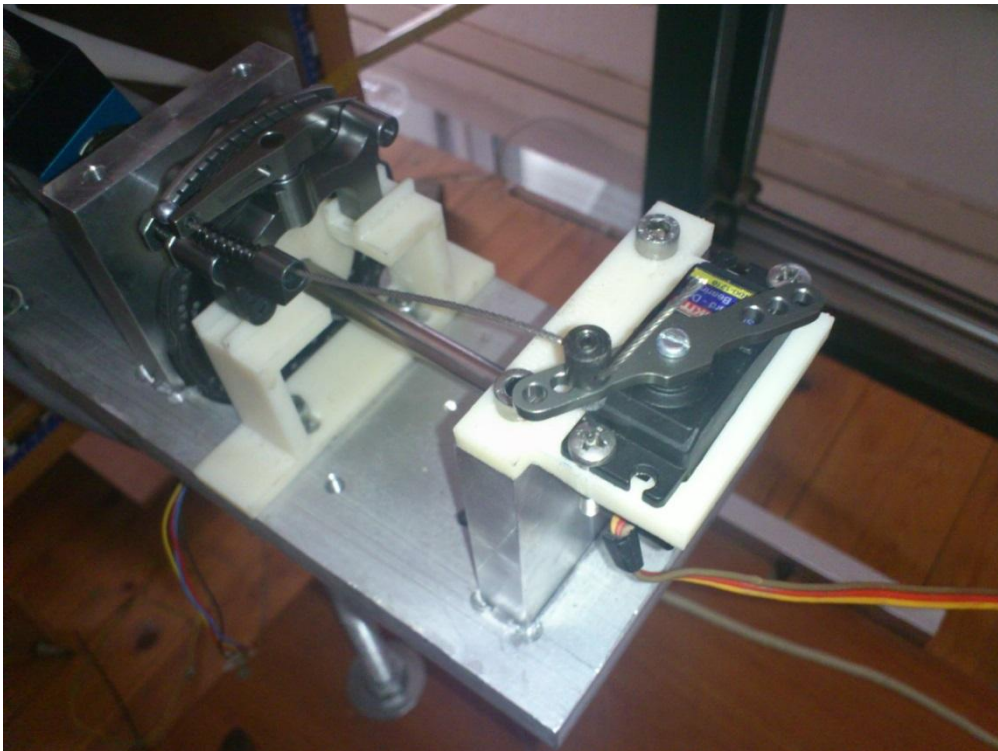
7.2.2 Σχέδιο κατασκευής στο Solidworks με όλα τα εξαρτήματα



7.2.3 Σύστημα φρένου με δίσκο και δαγκάνα



7.2.4 Βάση φρένου εκτυπωμένη σε 3D printer



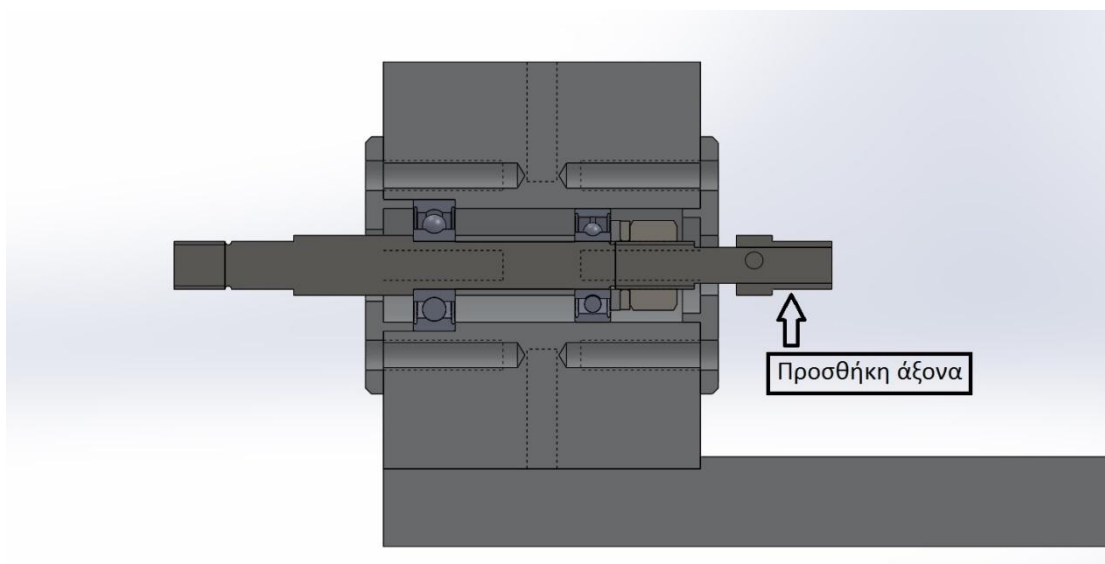
7.2.5 Επενεργητής πέδης (servo)

7.3 Προβλήματα και αιτίες

Αφού κατασκευάστηκαν τα κομμάτια της μετρητικής διάταξης έγιναν δοκιμές στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου όπου εκεί παρατηρήθηκαν κάποια προβλήματα. Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν ήταν τα εξής:

1. Αζυγοσταθμίες στους άξονες
2. Προβλήματα ευθυγράμμισης των κομματιών
3. Προβλήματα αντοχής πλαστικών κομματιών όπου εδράζεται η πέδη

Τα δύο πρώτα προβλήματα δημιουργούσαν ταλαντώσεις στο ροπόμετρο με αποτέλεσμα να μην παίρνονται σωστές μετρήσεις και στο τέλος να εμφανιστεί βλάβη. Οι αζυγοσταθμίες στους άξονες είναι πιθανό να προέρχονται από κάποιες προσθήκες που υπάρχουν με σκοπό να γίνεται διαβάθμιση του άξονα, κάτι που εξυπηρετεί στη συναρμολόγηση των ρουλεμάν.



7.3.1 Προσθήκη άξονα

Τα προβλήματα ευθυγράμμισης των κομματιών προέρχονται από την έλλειψη της απαιτούμενης ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί στις κλασικές εργαλειομηχανές.

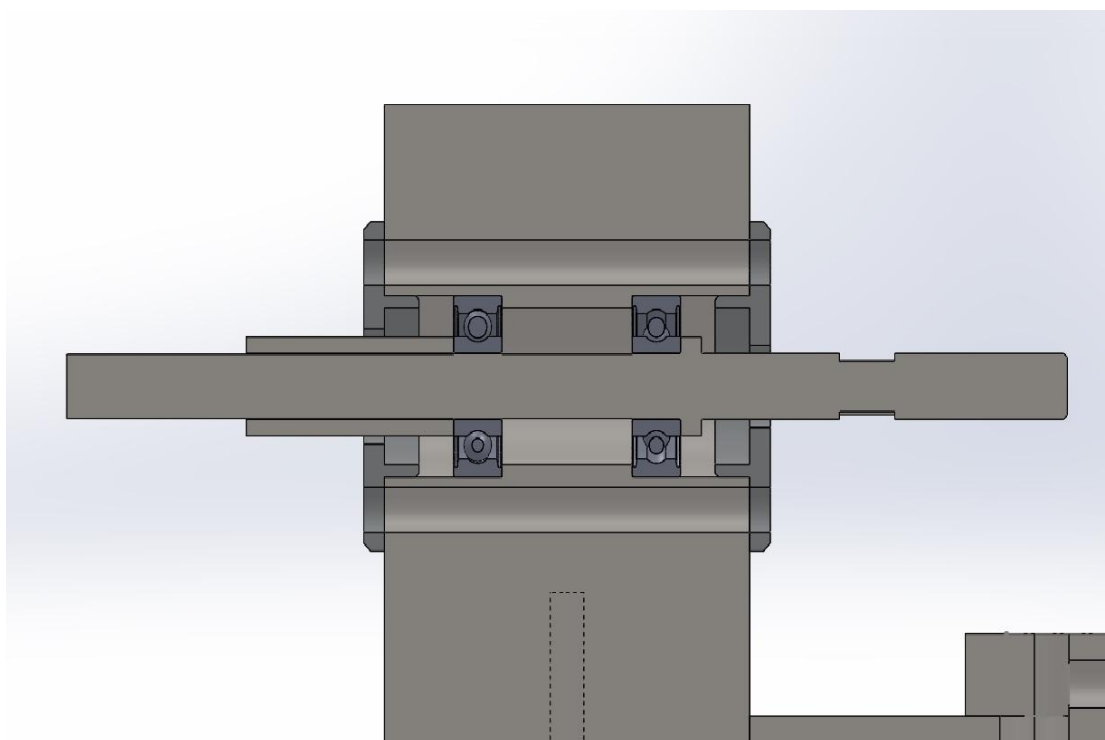
Ήταν απαραίτητο λοιπόν να επανασχεδιαστεί η μετρητική διάταξη και να βρεθούν λύσεις στα προβλήματα ώστε να υπάρξει ομαλή λειτουργία της διάταξης για να μπορούμε να πάρουμε αξιόπιστες μετρήσεις και να μην υπάρχουν θέματα αξιοπιστίας.

7.4 Β φάση (τελική επιλογή)

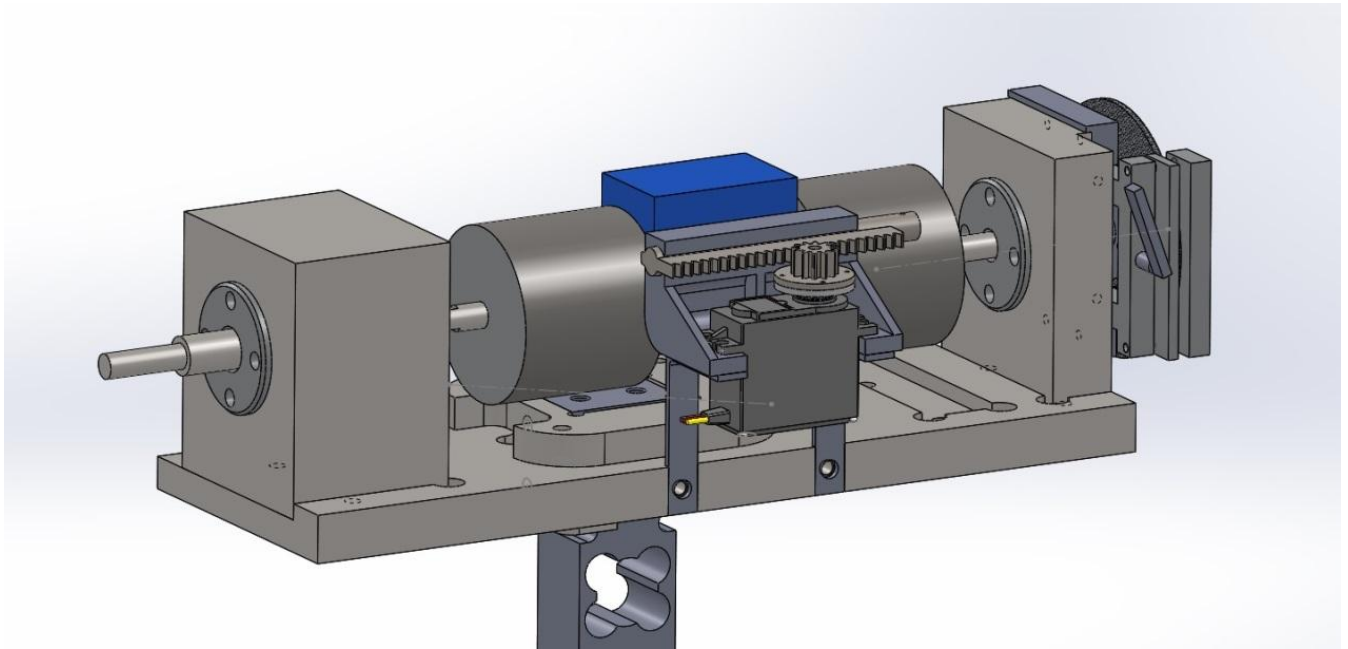
Εφόσον έπρεπε να προβούμε σε αντικατάσταση του ροπόμετρου αποφασίστηκε να τοποθετηθεί η έκδοση του ροπόμετρου με ενσωματωμένο encoder. Αυτό μπορεί να μας λύσει αρκετά προβλήματα όπως θα περιγράψουμε παρακάτω.

Καταρχήν μπορούμε να μικρύνουμε την διάταξη οπότε θα έχουμε μια πιο ελαφριά κατασκευή. Επίσης θα μειωθεί το μήκος των αξόνων, κάτι που επίσης είναι σημαντικό γιατί πρώτον θα μειωθεί η ροπή αδράνειας και δεύτερον είναι λιγότερο πιθανό να εμφανιστούν αζυγοσταθμίες.

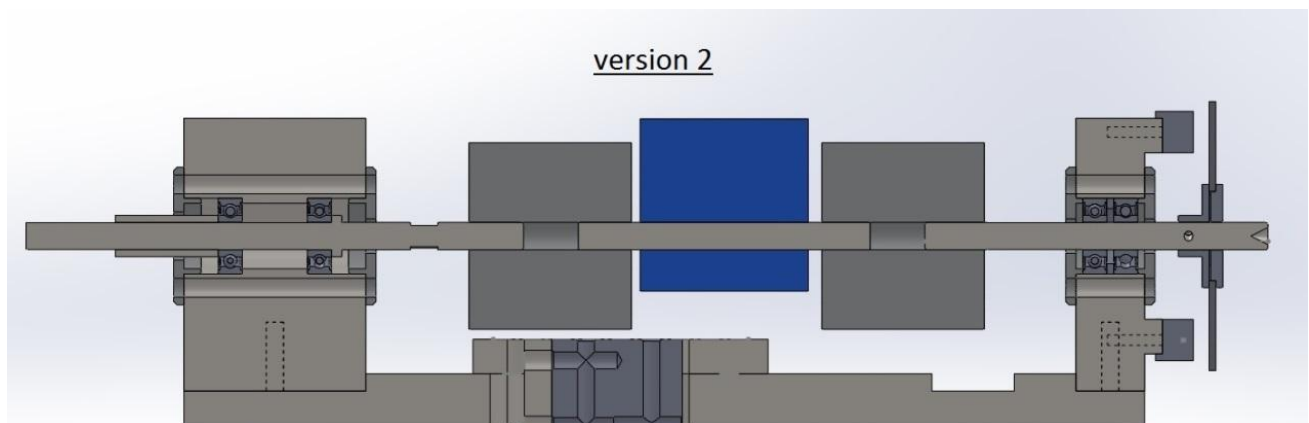
Επίσης θα επανασχεδιαστεί η διάταξη των ρουλεμάν ώστε να μη χρειάζεται πλέον προσθήκη στον άξονα αλλά αυτός να είναι ενιαίος. Τέλος αποφασίστηκε τα κομμάτια να κατασκευαστούν στο Εργαστήριο ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης το οποίο διαθέτει εργαλειομηχανές CNC ώστε να μπορούμε να έχουμε μεγάλη ακρίβεια, πράγμα το οποίο θα μας βοηθήσει πολύ στην ευθυγράμμιση όπως έχουμε προαναφέρει.



7.4.1 Άξονας χωρίς προσθήκη



7.4.2 Σχέδιο καινούργιας μετρητικής διάταξης στο Solidworks με όλα τα εξαρτήματα

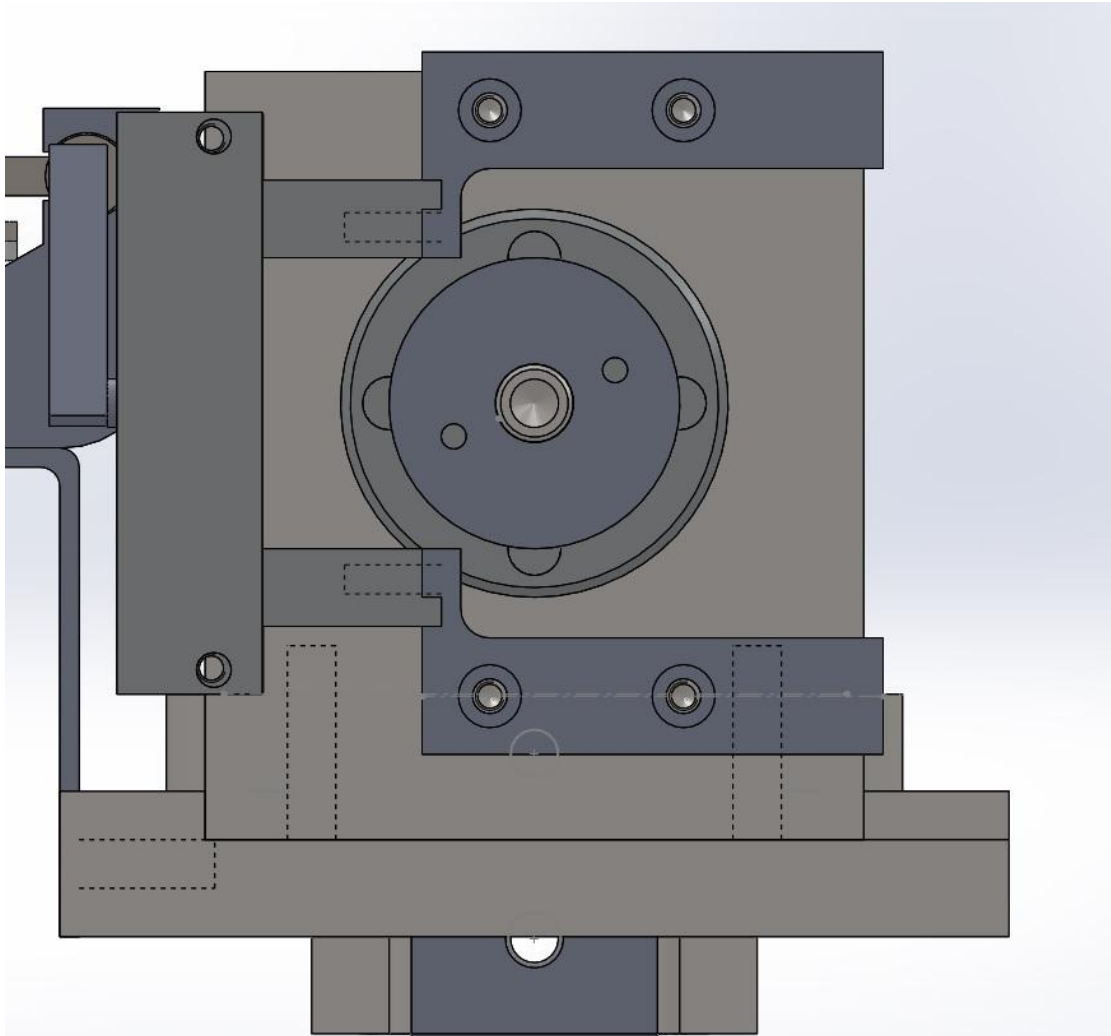


7.4.3 Τομή της μετρητικής διάταξης στο Solidworks

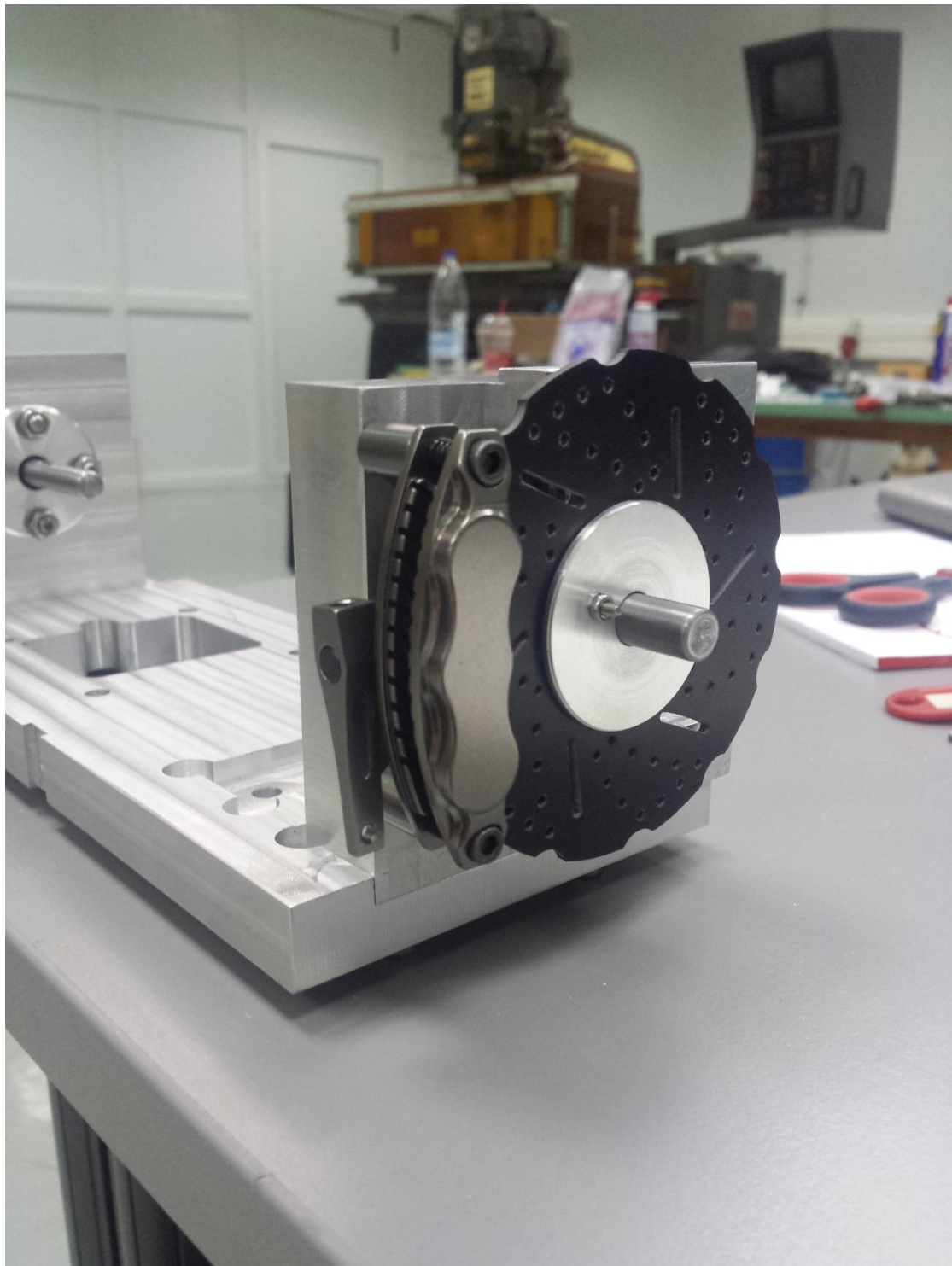


7.4.4 Μετρητική διάταξη στην αεροσήραγγα

Για να λυθεί το πρόβλημα της πέδης σχεδιάστηκε από την αρχή η έδραση της δαγκάνας του φρένου, η οποία πλέον θα βιδώνεται επάνω σε μεταλλικές βάσεις. Επίσης έγινε αντικατάσταση του servo γιατί παρατηρήθηκε ότι σε πολύ υψηλές ταχύτητες αέρα όπου είχαμε μεγάλη ροπή και υψηλό ρυθμό περιστροφής το παλιό servo δεν είχε αρκετή ισχύ ώστε να έχουμε πέδηση 100%, δηλαδή να είναι σε θέση να σταματάει εντελώς η φτερωτή. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε τελικά είναι το **Hitec HS-645MG**.



7.4.5 Έδραση δαγκάνας πέδης στο Solidworks

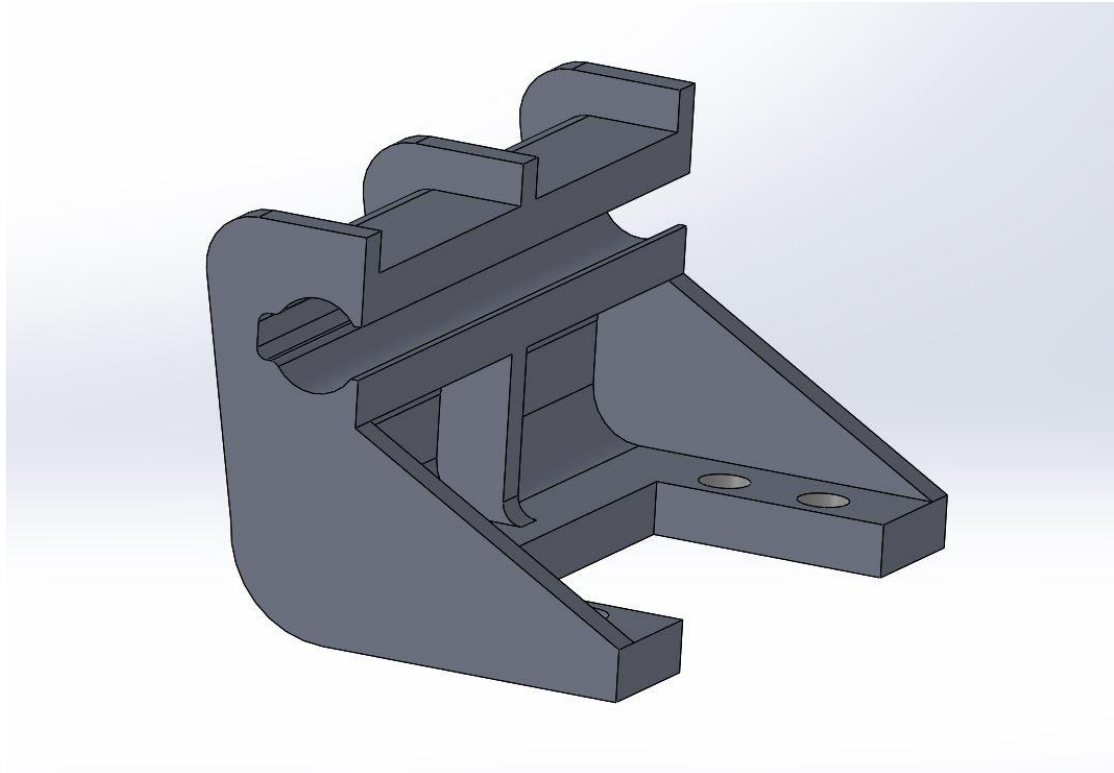


7.4.6 Έδραση δαγκάνας σε πραγματική κατασκευή

Επίσης για να επιτύχουμε ακόμα καλύτερο έλεγχο έγινε μετατροπή του servo από περιστροφικό σε γραμμικό μέσω ενός συστήματος κρεμαγιέρας με πινιόν και κανόνα. Έτσι ήμασταν σε θέση να μετατρέψουμε την περιστροφική κίνηση σε γραμμική αλλά και να επιλέξουμε μέσω των γριναζιών και το επιθυμητό βήμα μετάδοσης ώστε να έχουμε

καλύτερο έλεγχο της πέδησης. Η μετατροπή έγινε με τον τρόπο που θα εξηγήσουμε παρακάτω.

Αρχικά σχεδιάστηκε μια βάση όπου μπορεί να τοποθετηθεί το servo η οποία έχει έναν οδηγό για τον κανόνα.



Στη συνέχεια επιλέχθηκε ένα βήμα μετάδοσης που θεωρούμε ότι θα μας προσφέρει καλό έλεγχο. Αποφασίστηκε ότι για 180° που είναι το μέγιστο που μπορεί να περιστραφεί τον πινιόν λόγω servo ο κανόνας θα πρέπει να κινείται περίπου 35 mm. Έτσι επιλέχθηκε για το πινιόν αριθμός δοντιών $N = 12$ με module $m = 1$. Αυτό θα μας δώσει κίνηση του κανόνα (L) όπως φαίνεται παρακάτω.

$$L = \pi \times m \times N$$

$$L = 3.14 \times 1 \times 12$$

$$L = 37,7 \text{ mm}$$

Τη δύναμη πέδησης μπορούμε να την υπολογίσουμε μετρώντας την εξωτερική διάμετρο του πινιόν και λαμβάνοντας υπόψη τη ροπή του servo. Έτσι έχουμε:

$$T = F \times r$$

$$F = T/r$$

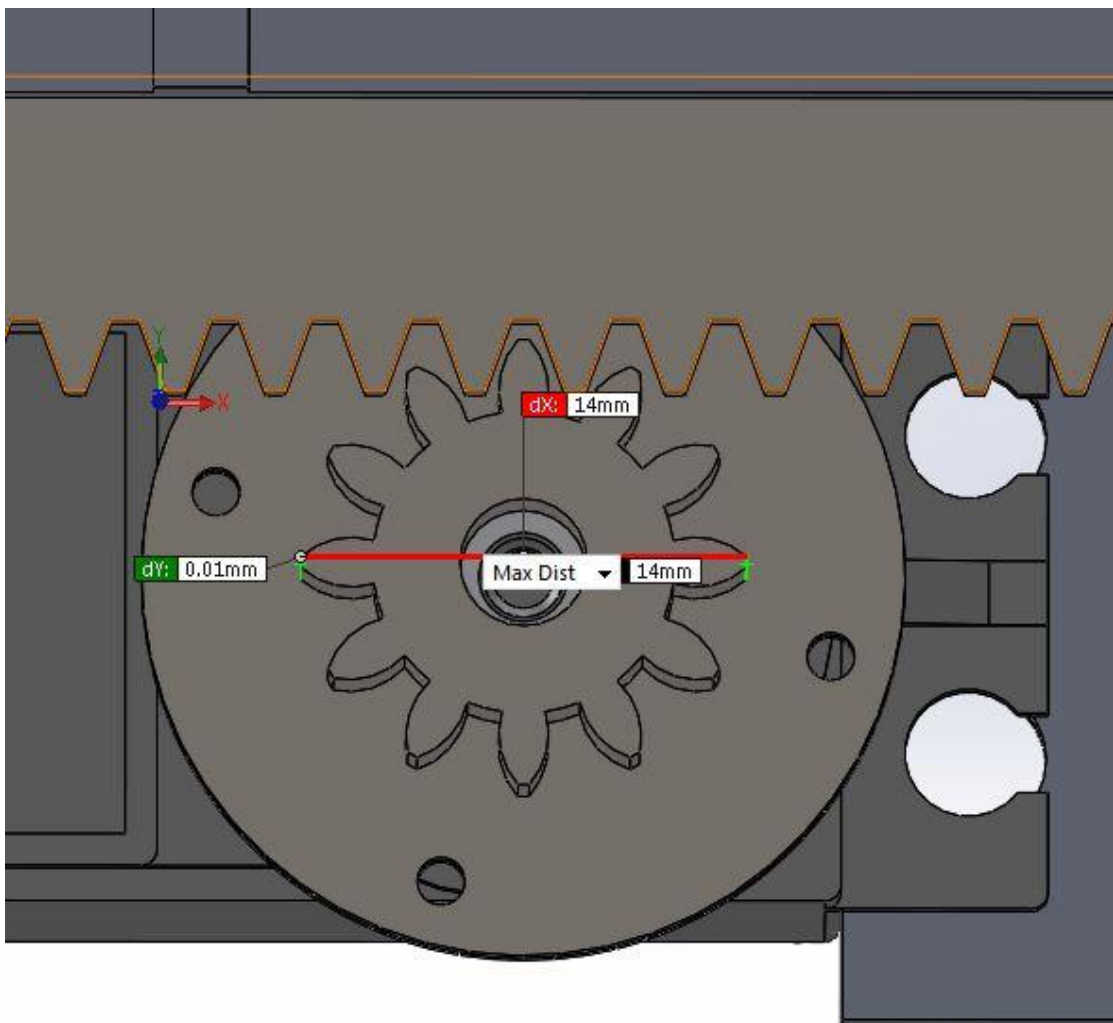
$$F = 1\text{Nm}/0.007\text{m}$$

$$F = 143\text{ N}$$

Όπου: F η δύναμη πέδησης

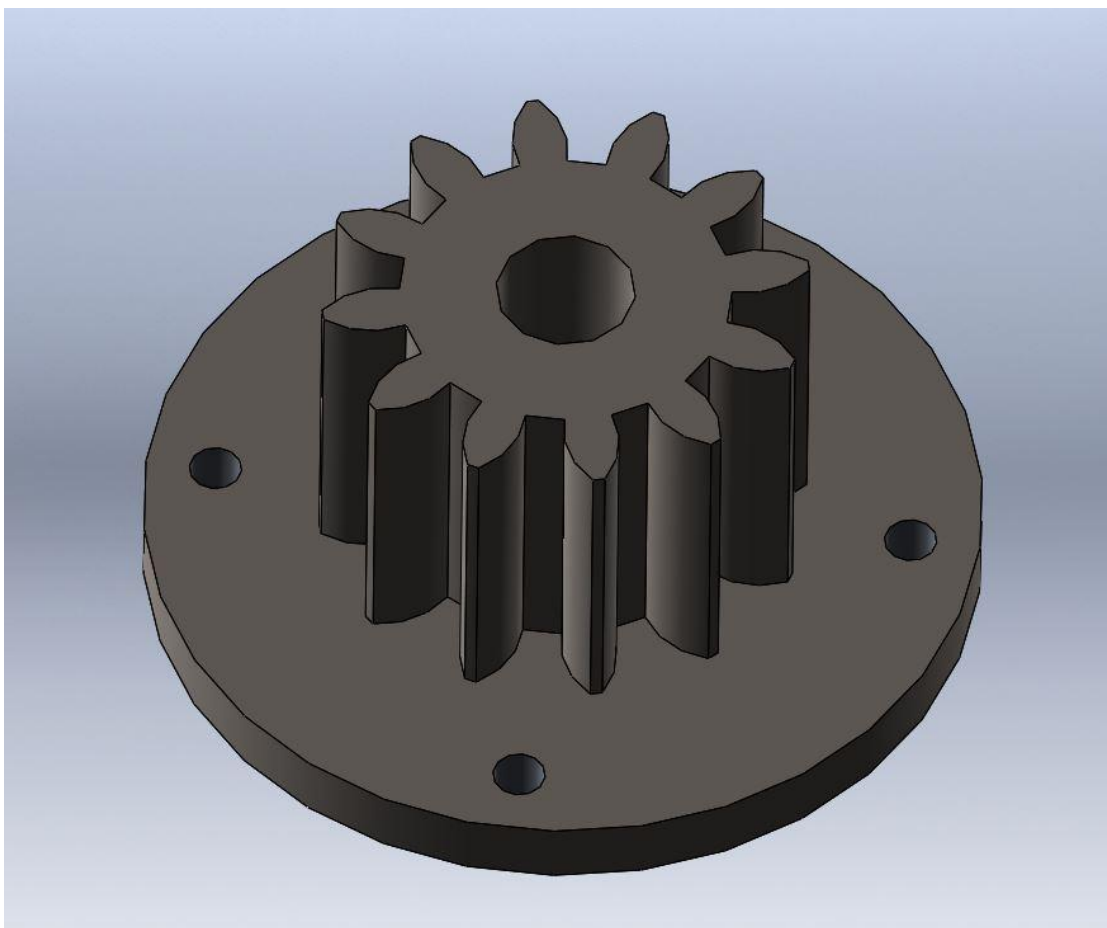
r η ακτίνα του πινιόν από το κέντρο του έως την αρχική διάμετρο

T η ροπή του servo

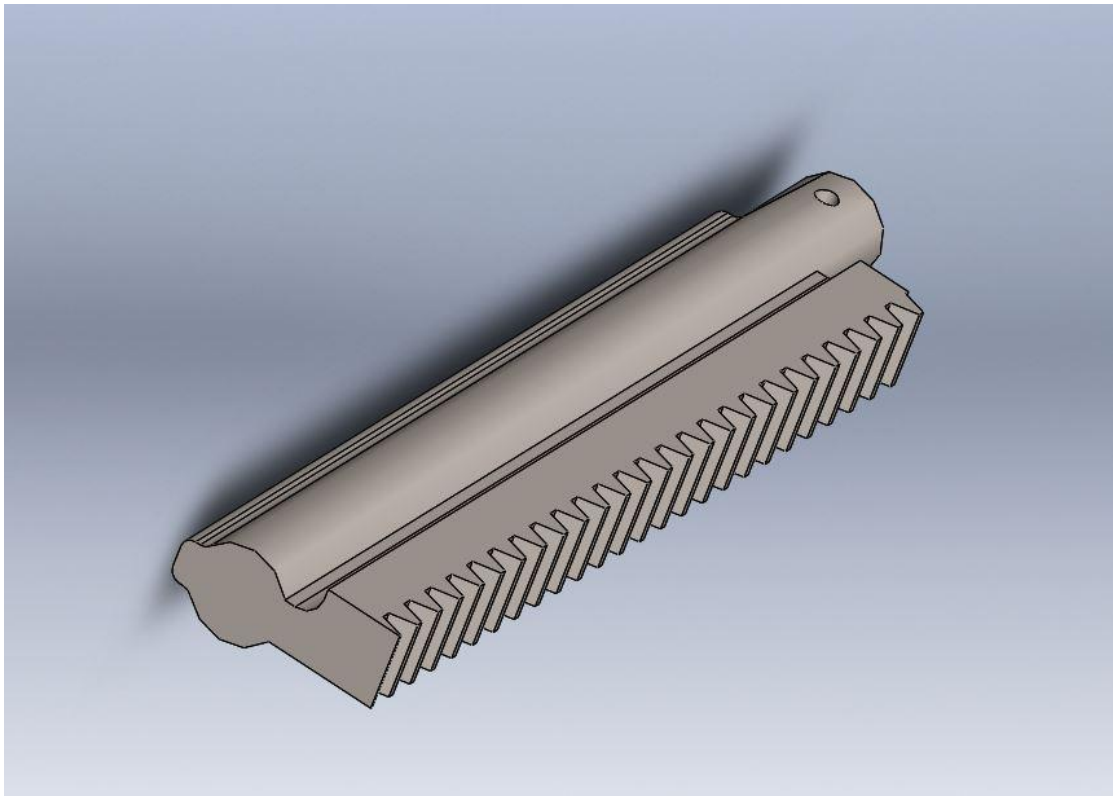




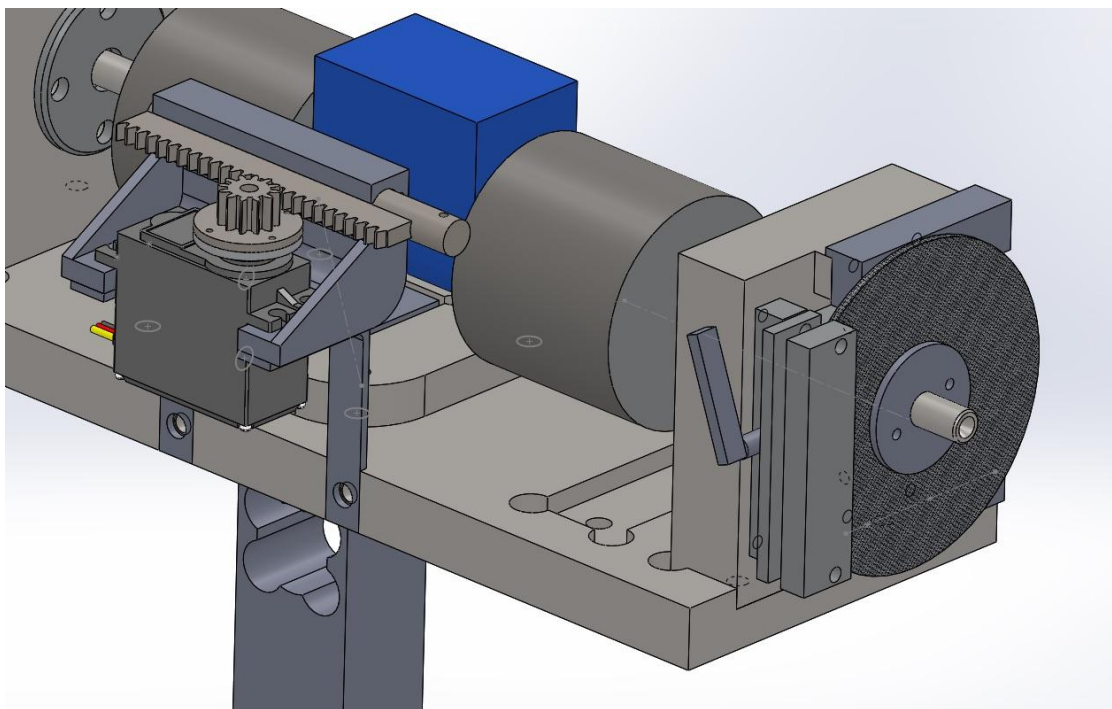
7.4.7 Σύστημα κανόνα πινιόν



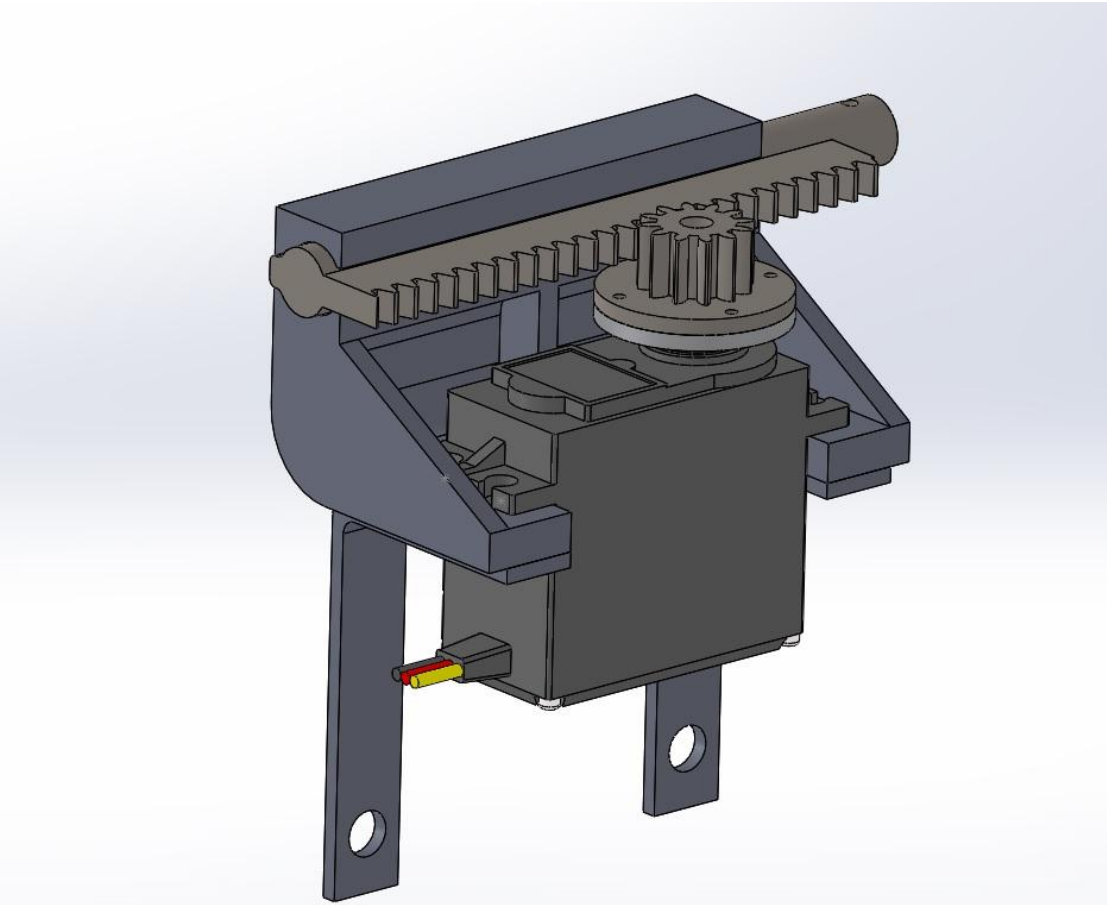
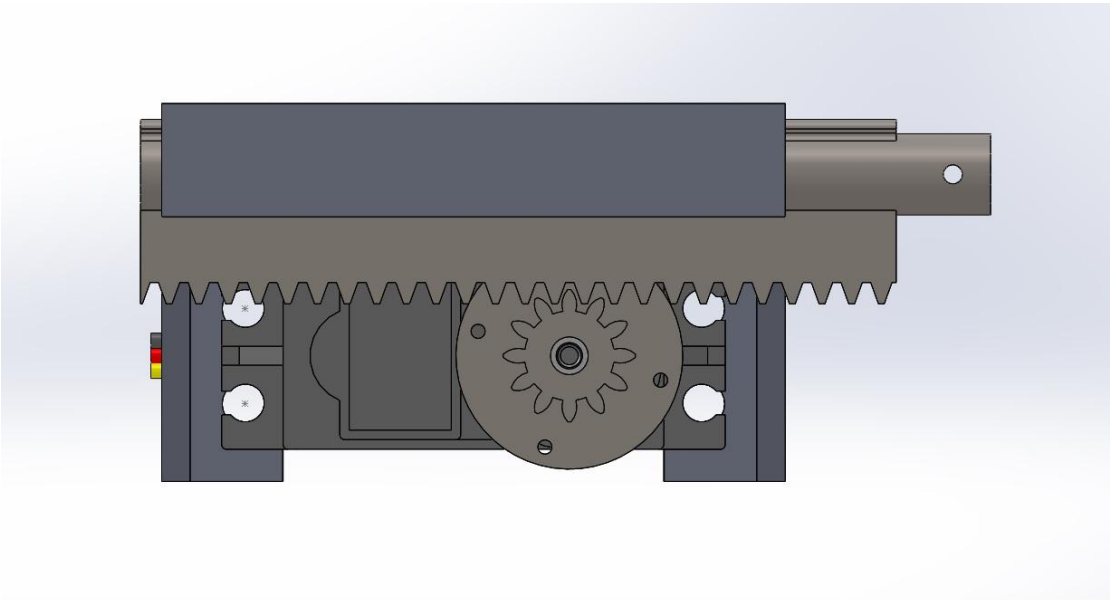
7.4.8 Πινιόν στο Solidworks

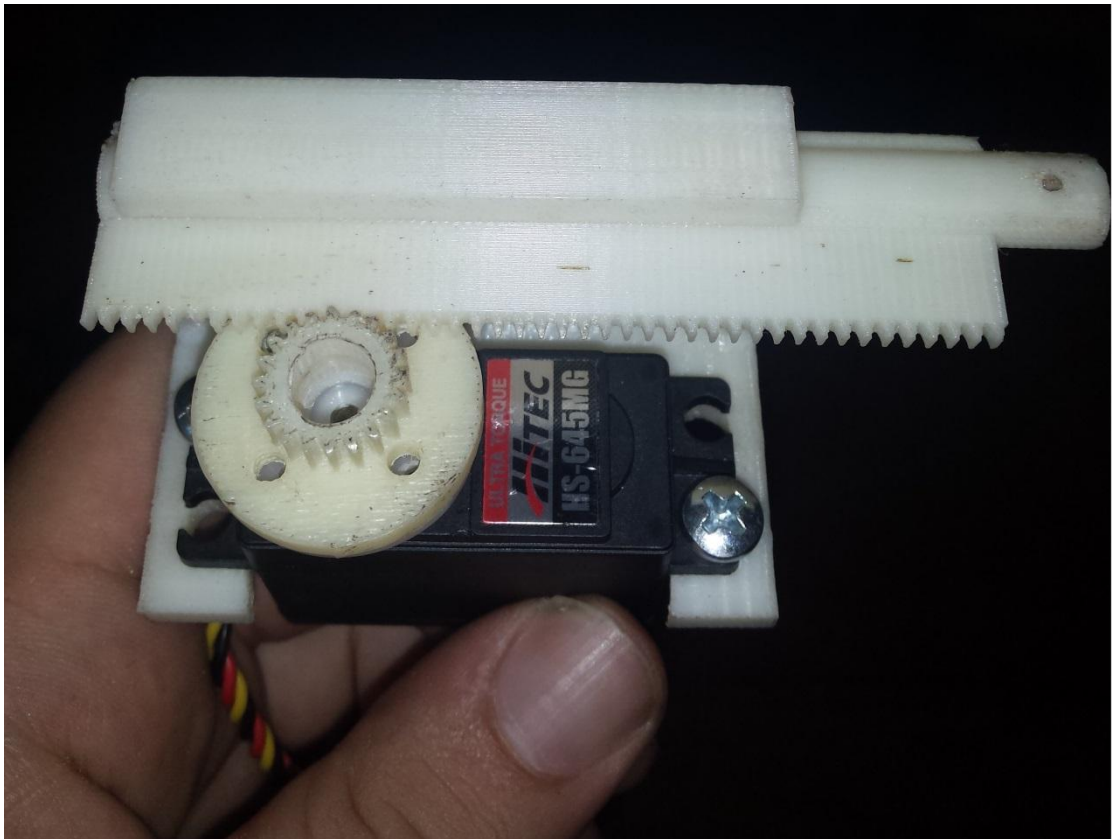
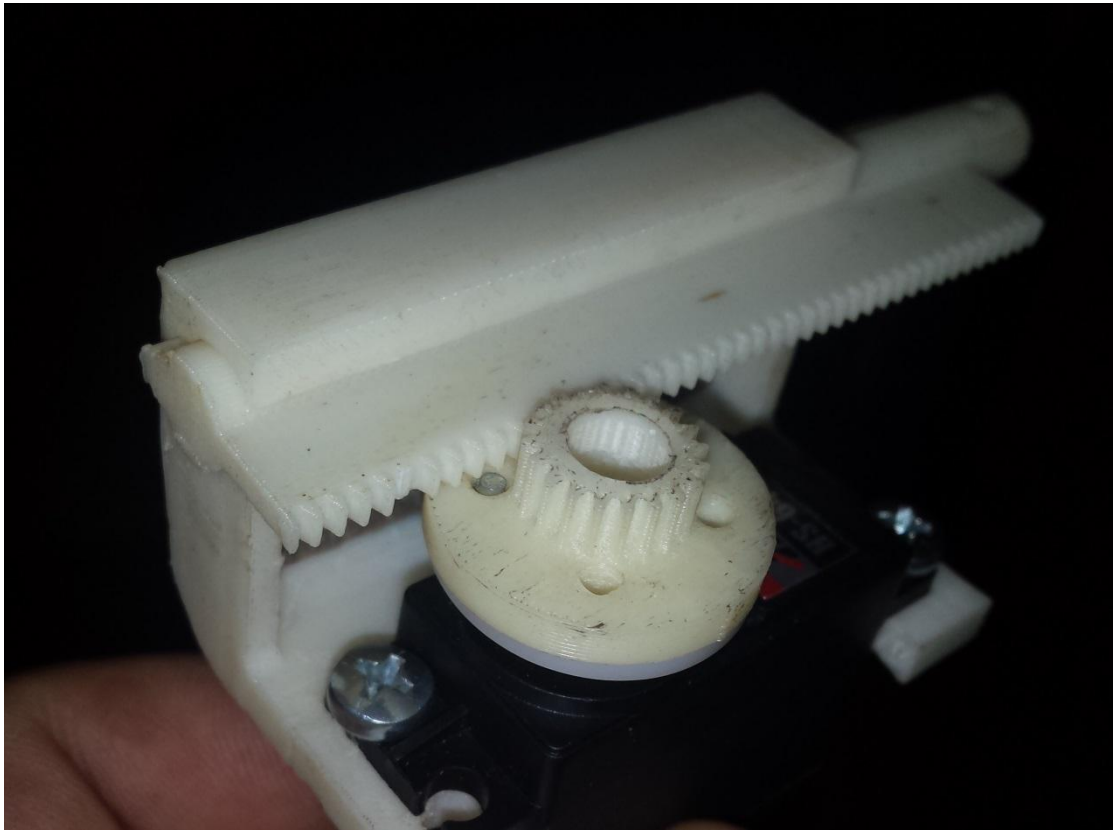


7.4.9 Κανόνας στο Solidworks



7.4.10 Σύστημα πέδης

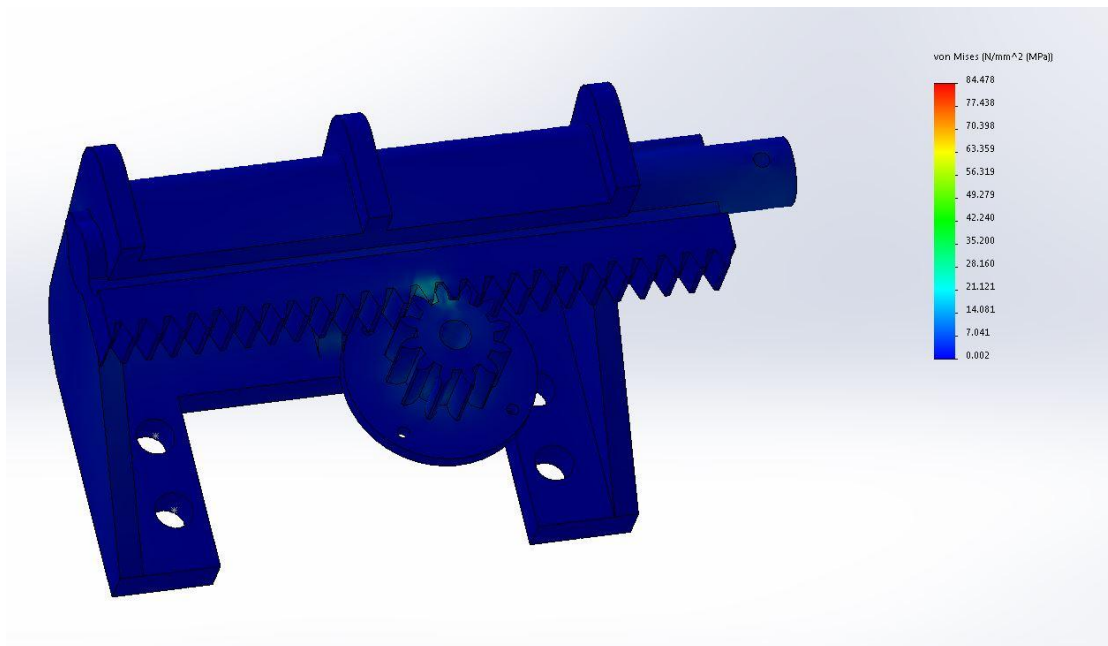




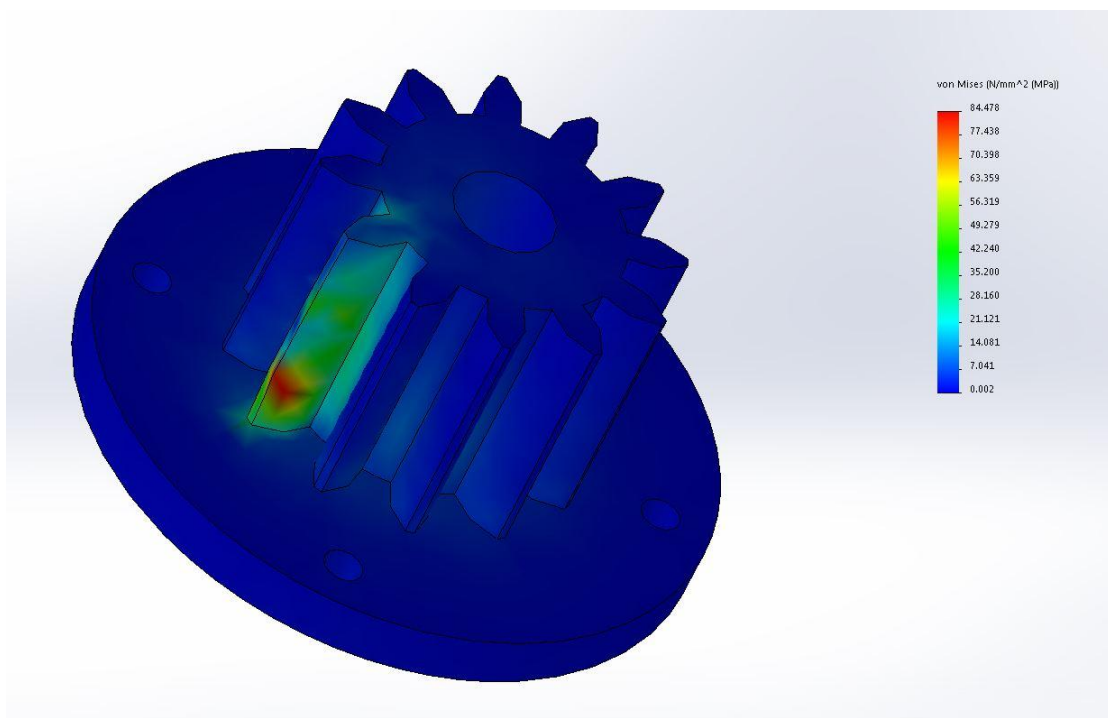
7.4.8 Μετατροπή servo σε γραμμικό

7.5 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πλαστικών γραναζιών

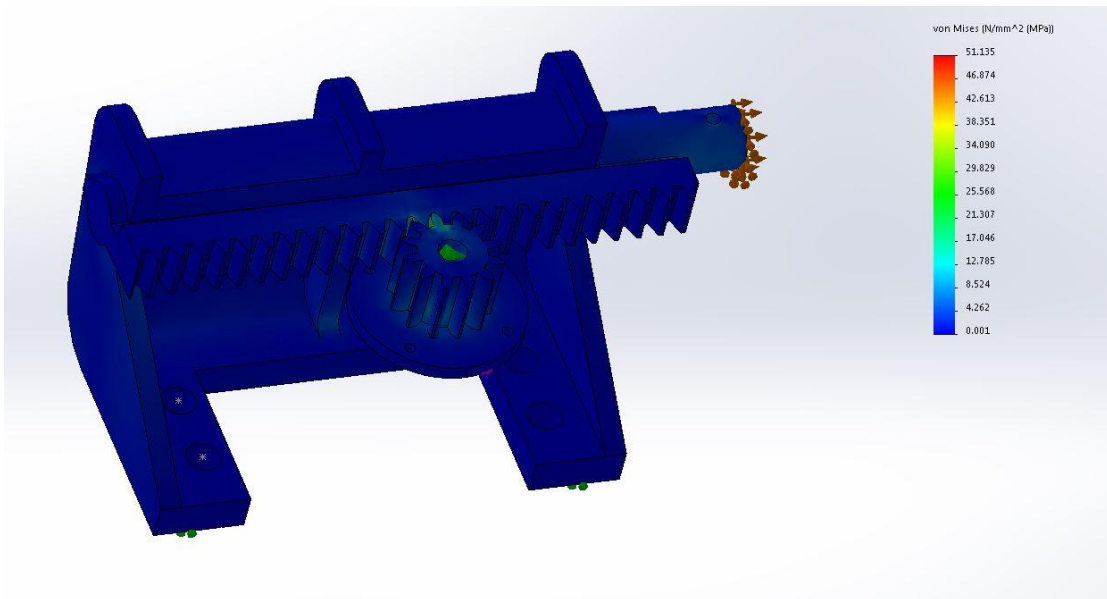
Επειδή τα γρανάζια και η βάση για τη μετατροπή του servo κατασκευάστηκαν από πλαστικό θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μια ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για να ελεγχτεί η αντοχή τους. Για την ανάλυση ασκήσαμε στο πινιόν τη μεγαλύτερη ροπή που μπορεί να ασκήσει το servo η οποία είναι 1Nm.



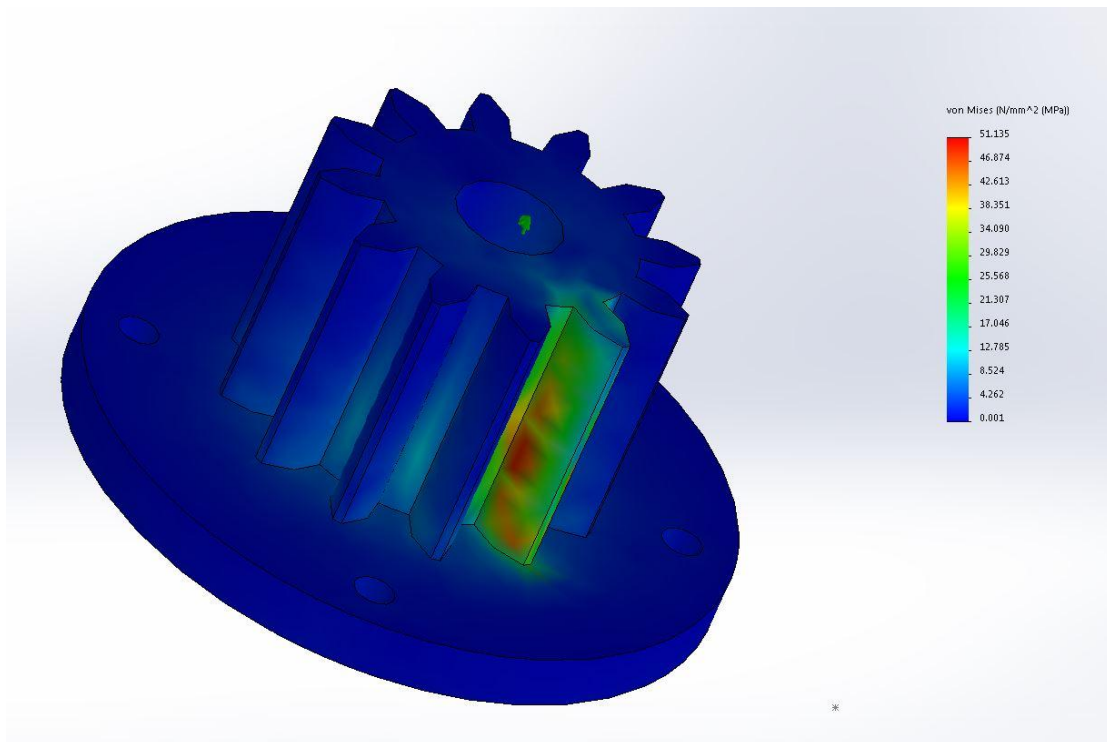
Εκ πρώτης όψεως δε φαίνεται να υπάρχει πρόβλημα με τα κομμάτια. Το όριο διαρροής του πλαστικού ABS είναι 43 MPa. Αν όμως παρατηρήσουμε καλύτερα θα δούμε ότι το πινιόν ξεπερνάει κατά πολύ το όριο διαρροής του πλαστικού.



Στη συνέχεια δοκιμάσαμε να αντικατασταθεί το υλικό του πινιόν με κάποιο μέταλλο. Δοκιμάστηκε ορείχαλκος ο οποίος έχει όριο διαρροής 240 MPa και τα υπόλοιπα κομμάτια παρέμειναν πλαστικά.



Παρατηρήθηκε ότι και πάλι τα υπόλοιπα κομμάτια δεν παρουσίασαν πρόβλημα και αυτή τη φορά το πινιόν δεν ξεπέρασε το όριο διαρροής του υλικού του.



Προτείνεται λοιπόν η αντικατάσταση του πινιόν με ορειχάλκινο το οποίο υπάρχει στην αγορά για servo τέτοιου τύπου

7.6 Βάση διάταξης

Για να είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις της οπισθέλκουσας θα πρέπει η βάση στην οποία θα εδράζεται η μετρητική διάταξη να είναι ικανή να απορροφά τους κραδασμούς. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν η βάση έχει μεγάλη αδράνεια δηλαδή στην ουσία χρειάζεται μια βάση με μεγάλο βάρος και όσο το δυνατόν πιο άκαμπτη. Για το λόγω αυτό επιλέχθηκε μια κοιλοδοκός η οποία μπορεί να προσφέρει καλή ακαμψία και επάνω βιδώθηκε το load cell το οποίο στηρίζει τη μετρητική διάταξη.

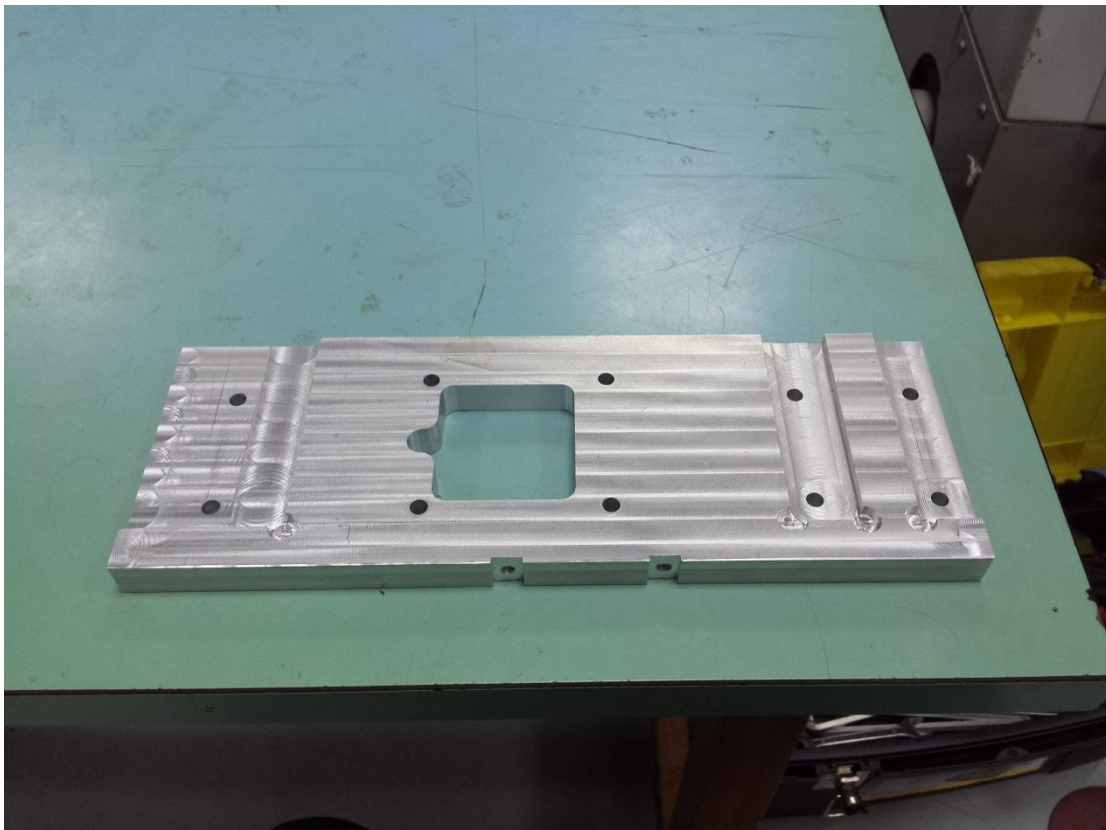
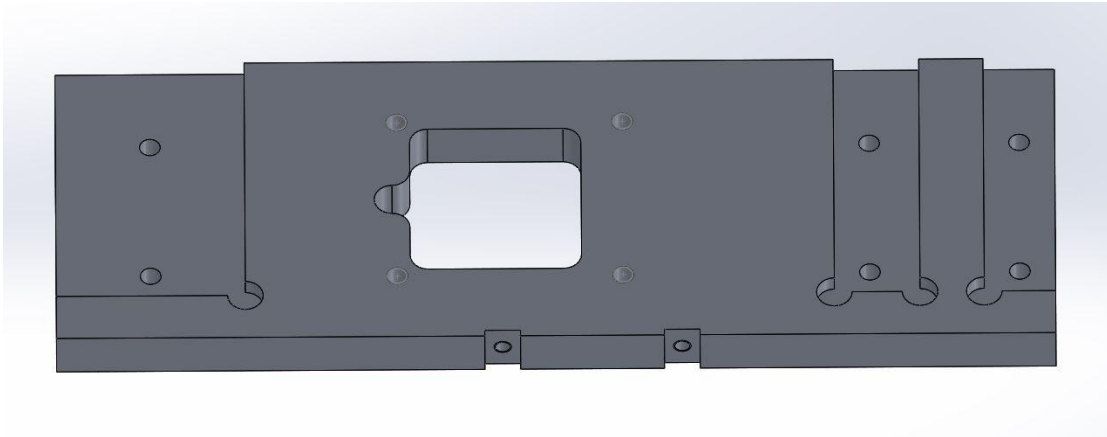


7.6.1 Βάση διάταξης

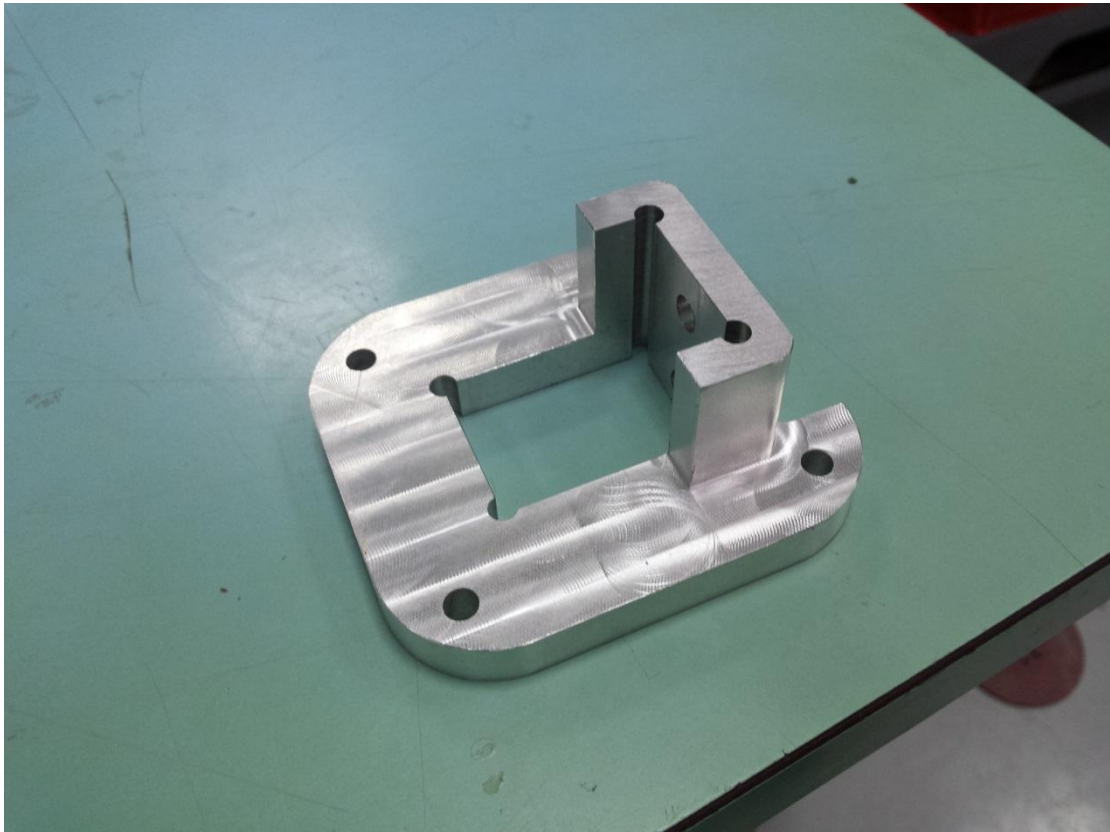
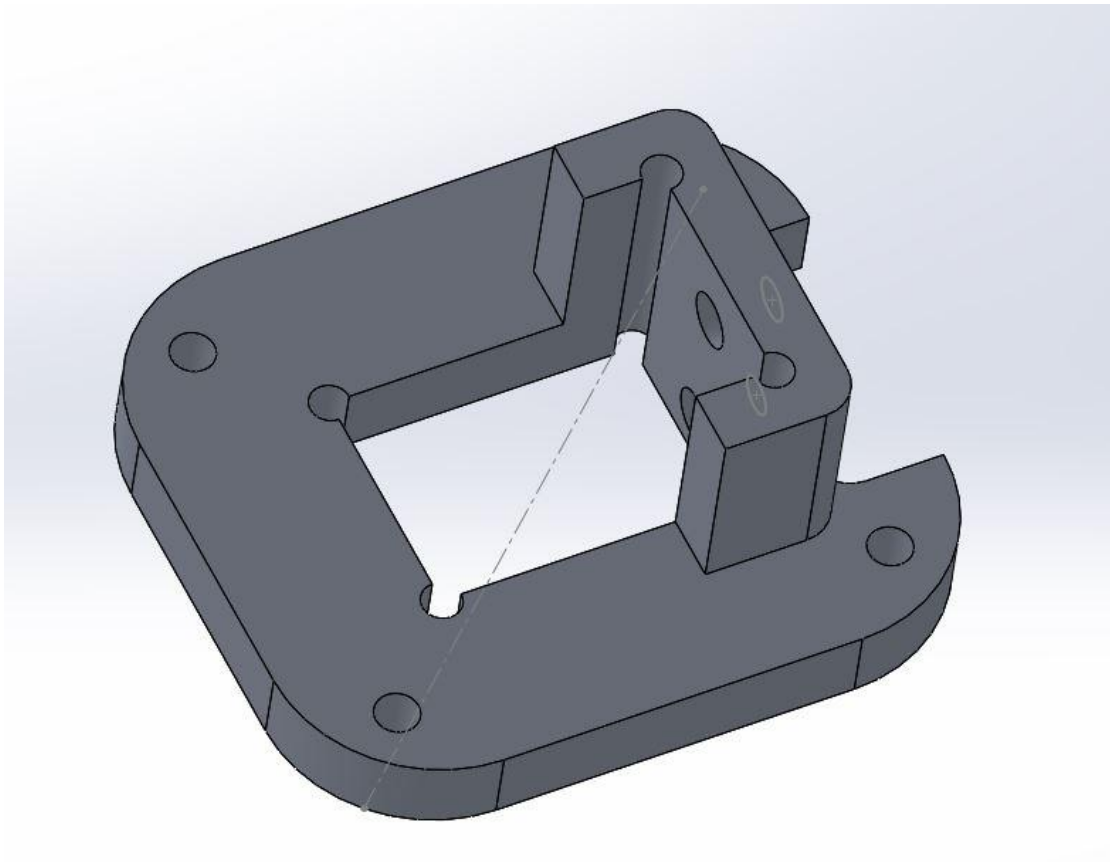
7.7 Φωτογραφίες και σχέδια 3D των εξαρτημάτων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα εξαρτήματα της μετρητικής διάταξης σε φωτογραφίες και σχέδια 3D στο Solidworks. Τα κατασκευαστικά σχέδια βρίσκονται στο παράρτημα.

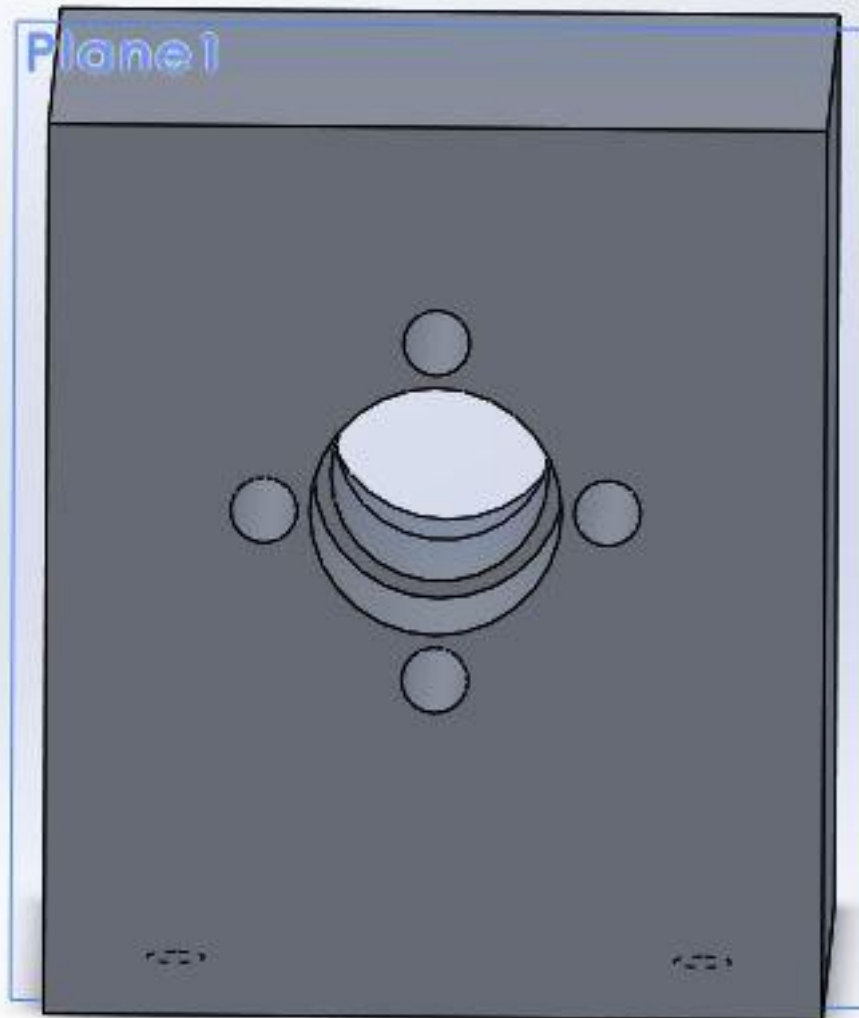
Βάση

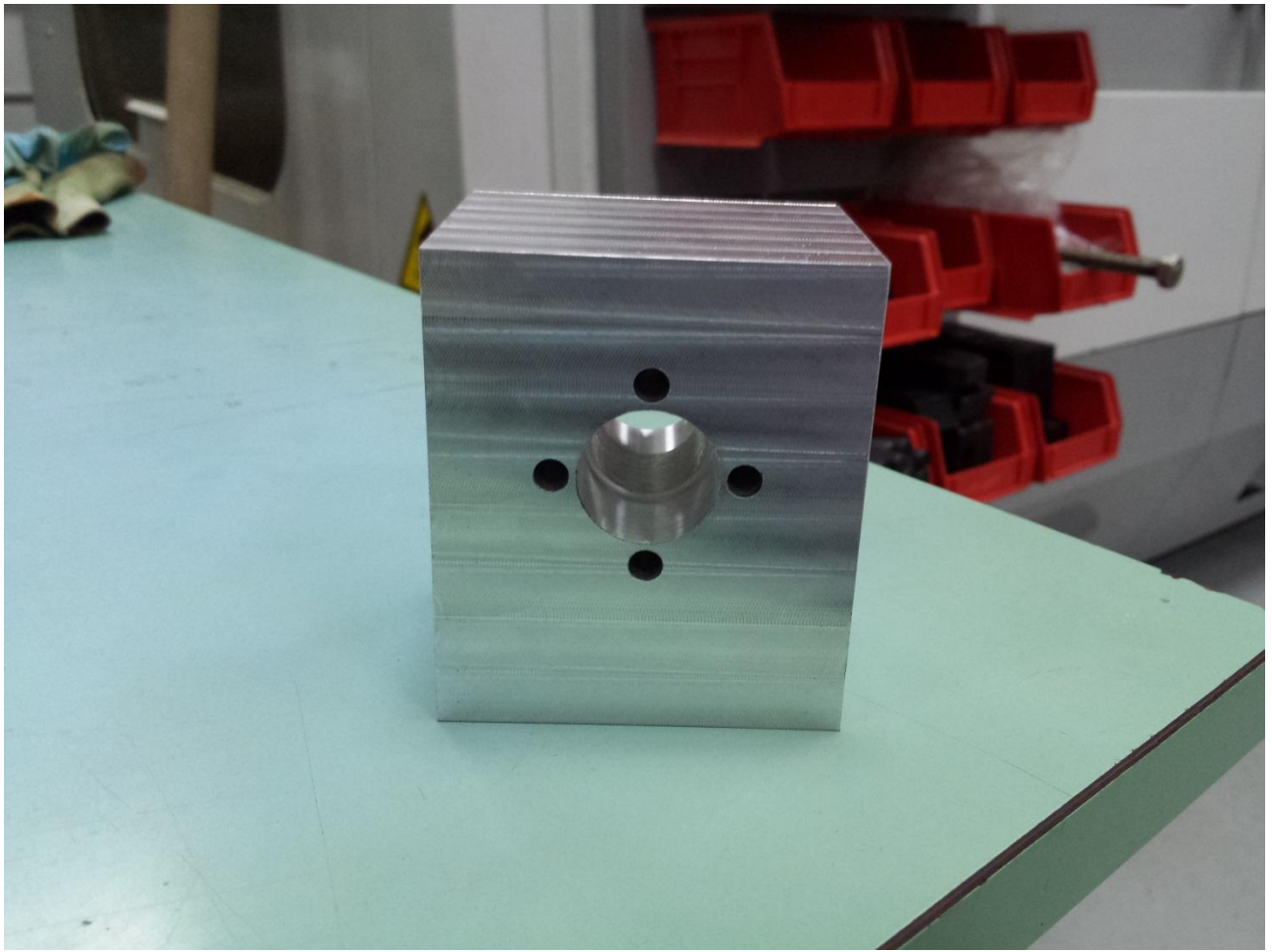


Στήριξη Load cell

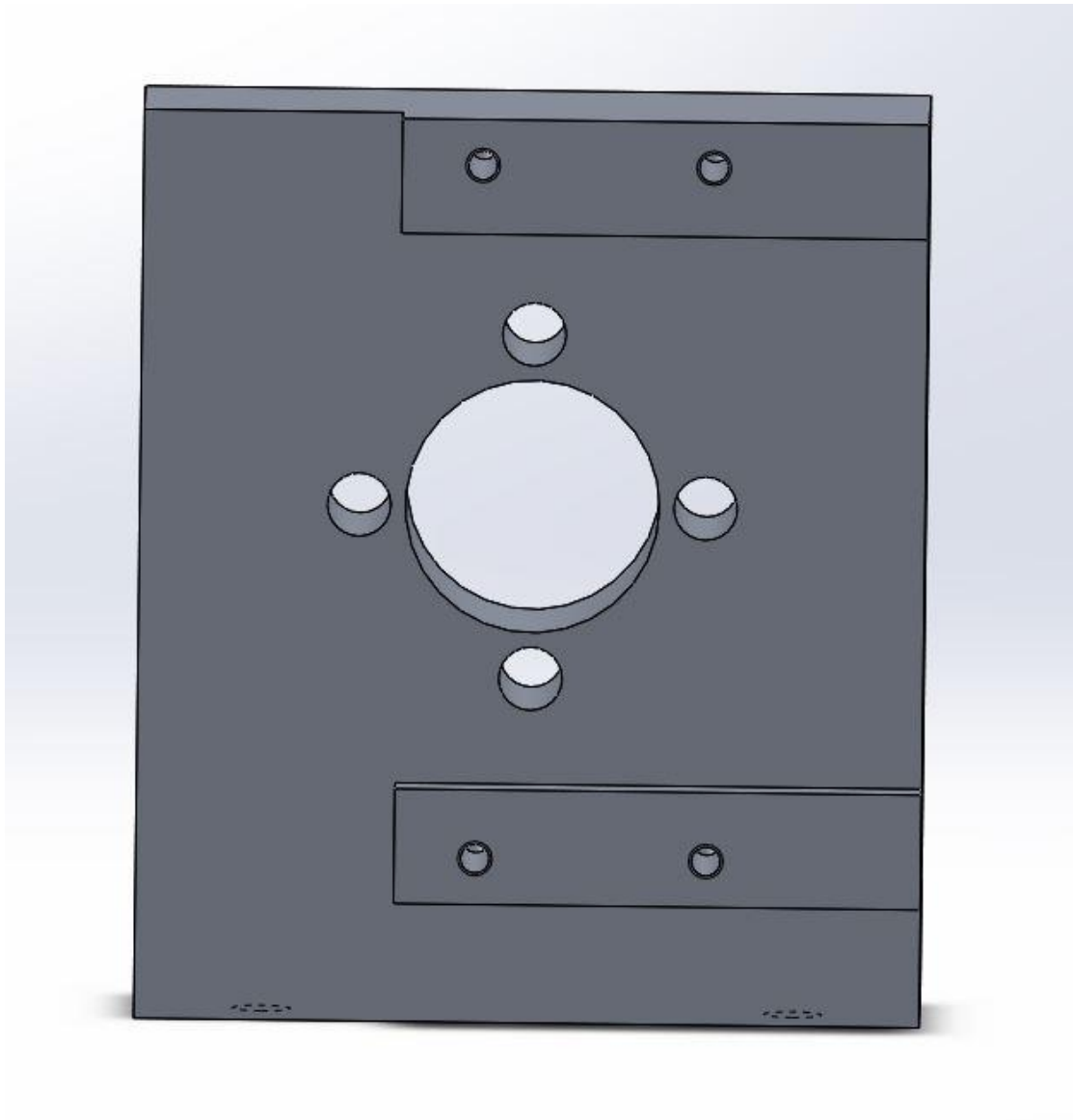


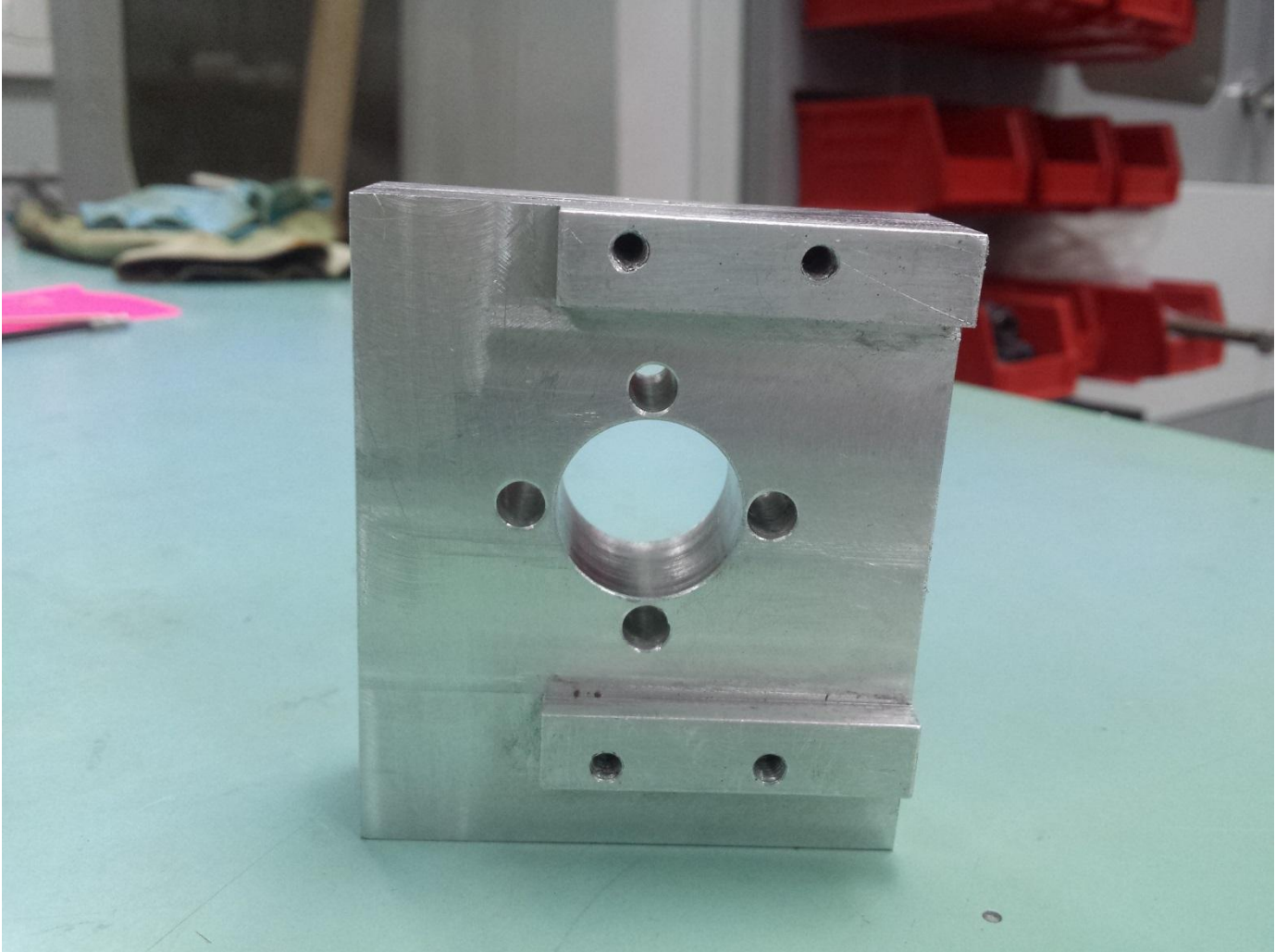
Εμπρός έδραση ρουλεμάν



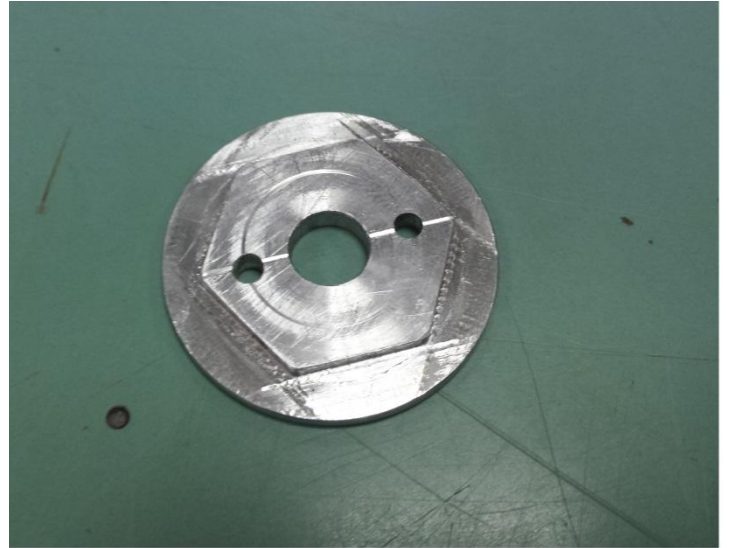
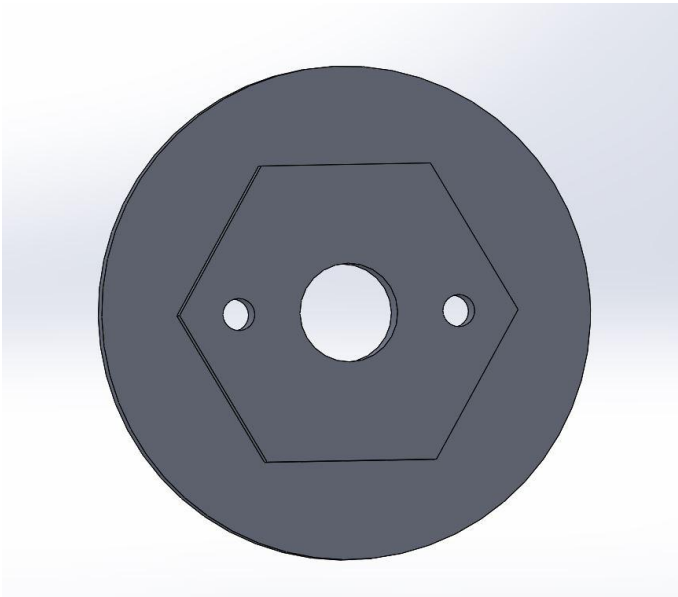


Πίσω έδραση ρουλεμάν

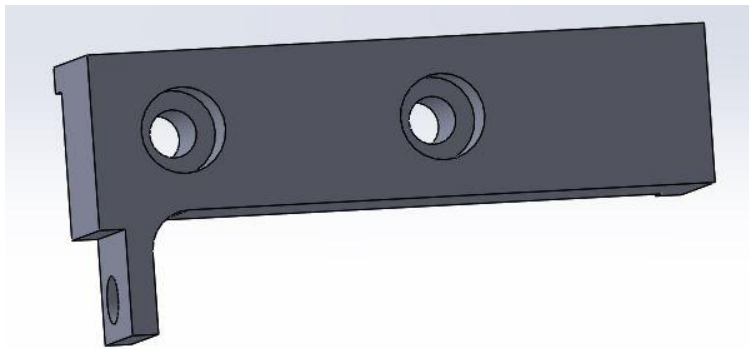




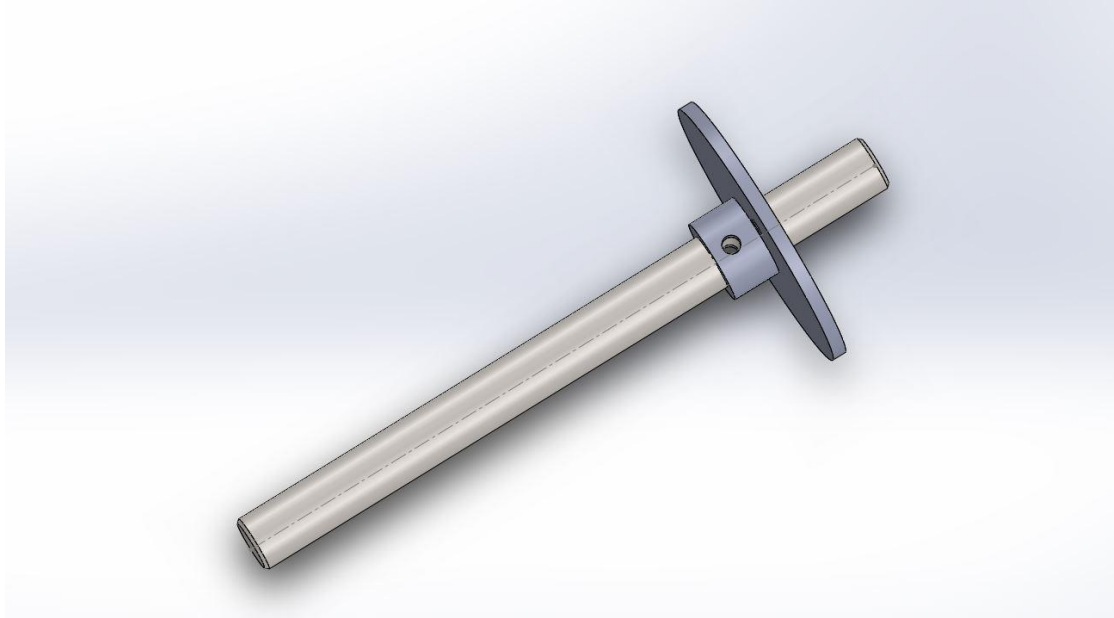
Βάση δίσκου



Βάση δαγκάνας



Άξονας φρένου



8. Υπολογισμοί

8.1 Υπολογισμοί και επιλογή άξονα

Για να κατασκευαστεί ένας άξονας απαραίτητη προϋπόθεση είναι να γνωρίζουμε τα φορτία τα οποία ασκούνται σε αυτόν καθώς και το είδος τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι δυνάμεις που ασκούνται στον άξονα προέρχονται από τη φτερωτή η οποία είναι πακτωμένη πάνω σε αυτόν. Ασκείται λοιπόν μια αξονική δύναμη η οποία είναι η οπισθέλκουσα της φτερωτής και μια ροπή στρέψης η οποία είναι η ροπή της φτερωτής και προέρχεται από της δυνάμεις που ασκούνται στα φτερά από τον αέρα.

Πρώτα θα πρέπει λοιπόν να γνωρίζουμε τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στη φτερωτή και για να τις υπολογίσουμε θα πρέπει να ξέρουμε το μέγεθος της φτερωτής, το λ και την ταχύτητα του αέρα όπως θα δούμε παρακάτω από τους σχετικούς τύπους.

8.1.1 Υπολογισμός Ισχύος

Για να βρεθεί η θεωρητική ροπή της φτερωτής θα πρέπει πρώτα να ξέρουμε την ισχύ η οποία προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$P = 0.2 \times D^2 \times v^3$$

Όπου: P η Ισχύς

D η διάμετρος της φτερωτής και

v η ταχύτητα του αέρα

Η μεγαλύτερη φτερωτή που μπορεί να δοκιμαστεί στην αεροσήραγγα είναι 30cm λόγω του wall effect και η μέγιστη ταχύτητα του αέρα φτάνει τα 25m/s. Έτσι αν αντικαταστήσουμε θα έχουμε:

$$P = 0.2 \times (0.3)^2 \times 25^3$$

$$P \cong 280 \text{ W}$$

Στη συνέχεια πρέπει να βρούμε τις μέγιστες στροφές που μπορεί να δουλέψει μια φτερωτή. Οι στροφές που μπορεί να αναπτύξει η φτερωτή είναι συνάρτηση του λόγου της ταχύτητας του ακροπτερυγίου (λ) και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{\pi \times n \times D}{60 \times v}$$

Όπου: n οι στροφές

D η διάμετρος της φτερωτής και

v η ταχύτητα του αέρα.

Η μεγαλύτερη τιμή του λ που μπορούμε να έχουμε είναι 7. Αν επιλύσουμε ως προς n θα έχουμε τη σχέση:

$$n = \frac{\lambda \times 60 \times v}{\pi \times D}$$

Αν αντικαταστήσουμε έχουμε:

$$n = \frac{7 \times 60 \times 25}{3.14 \times 0.3}$$

$$n \cong 11000 \text{ rpm}$$

8.1.2 Υπολογισμός Ροπής

Ως ροπή στρέψης η οποία θα ασκείται στον άξονα θα θεωρήσουμε τη μέγιστη ροπή την οποία μπορεί να μετρήσει το ροπόμετρο. Άρα έχουμε:

$$T \cong 1 \text{ Nm}$$

Αφού βρέθηκε η ροπή στρέψης του άξονα αυτό που μένει να βρεθεί τώρα είναι η αξονική δύναμη που καταπονεί τον άξονα η οποία είναι η οπισθέλκουσα της φτερωτής. Θα πάρουμε διάφορες υποθέσεις ώστε να επιλέξουμε τη χειρότερη περίπτωση φόρτισης.

8.1.3 Υπόθεση φορτίου οπισθέλκουσας σταματημένης φτερωτής

Σε αυτό τον υπολογισμό υποθέτουμε ότι η φτερωτή είναι σταματημένη με τη μέγιστη ταχύτητα αέρα

$$F = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A$$

Όπου: ρ η πυκνότητα του αέρα

C_D ο συντελεστής οπισθέλκουσας

v η ταχύτητα του αέρα.

A η επιφάνεια προβολής της φτερωτής

Έτσι αντικαθιστώντας έχουμε:

$$F = 2 \times \frac{1}{2} \times 1.225 \times 25^2 \times 0.07$$

$$F \cong 54 \text{ N}$$

8.1.4 Υπόθεση φορτίου οπισθέλκουσας μέγιστου thrust

Σε αυτό τον υπολογισμό υποθέτουμε ότι στη φτερωτή ασκείται το μέγιστο αξονικό φορτίο.

$$F = C_T \times 3.125 \times \rho \times v^2 \times \pi \times R^2$$

Όπου: ρ η πυκνότητα του αέρα

C_T ο συντελεστής thrust

v η ταχύτητα του αέρα.

R η ακτίνα της φτερωτής

$$F = 0.5 \times 3.125 \times 1.225 \times 25^2 \times \pi \times 0.15^2$$

$$F \cong 85 \text{ N}$$

8.1.5 Υπόθεση φορτίου οπισθέλκουσας υπό κανονικές συνθήκες

Σε αυτό τον υπολογισμό υποθέτουμε ότι στη φτερωτή δουλεύει υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

$$F = \frac{3}{2} \times \frac{\lambda \times T}{R}$$

Όπου: λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

T η ροπή της φτερωτής

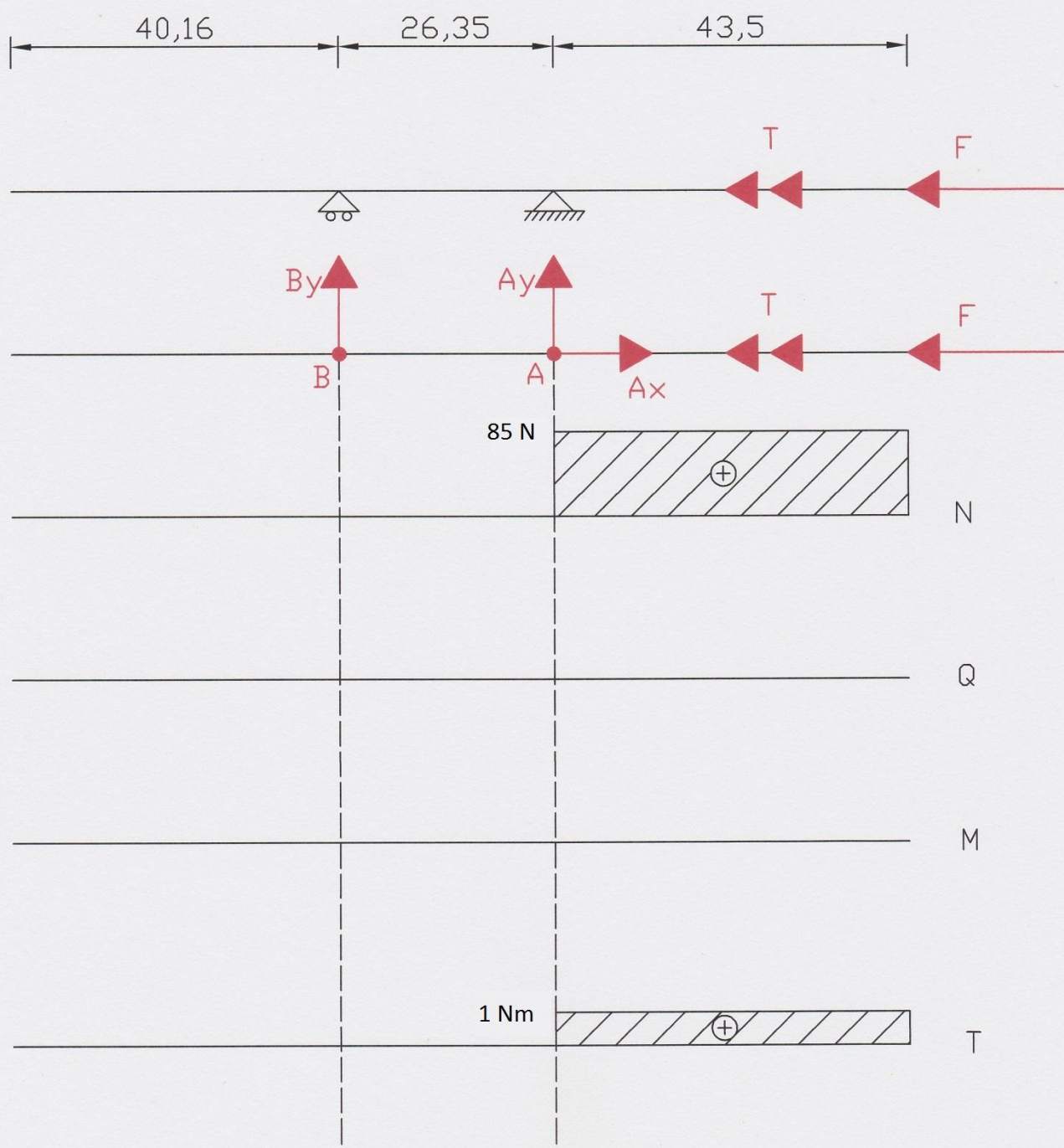
R η ακτίνα της φτερωτής

$$F = \frac{3}{2} \times \frac{7 \times 1}{0.15}$$

$$F \cong 70 \text{ N}$$

8.1.6 Υπολογισμός διαμέτρου άξονα

Για να υπολογίσουμε τη διάμετρο του άξονα θα πρέπει να κάνουμε στατική μελέτη. Θα φτιάξουμε διάγραμμα ελευθέρου σώματος και θα υπολογίσουμε τις αντιδράσεις από τις στηρίξεις. Ως τη δύναμη που ασκείται στον άξονα θα χρησιμοποιήσουμε τη μέγιστη από τα 3 σενάρια που μελετήσαμε.



$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow A_x - F = 0 \Rightarrow A_x = F$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow A_y + B_y = 0 \Rightarrow A_y = -B_y$$

$$\Sigma M_B = 0 \Rightarrow A_y \times 26.5 = 0 \Rightarrow A_y = 0, B_y = 0$$

Για να υπολογισθεί η διάμετρος του άξονα χρησιμοποιείται η σχέση:

$$d = 39.4 \sqrt[3]{\frac{C \times T_{max}}{\tau_{\epsilon\pi}}}$$

Όπου **d** η διάμετρος του άξονα

C ο συντελεστής κρούσεων, στην περίπτωση μας 1.35

T_{max} η μέγιστη ροπή στρέψης και

τ_{επ} το όριο διαρροής σε στρέψη του υλικού.

Το υλικό κατασκευής του άξονα είναι χάλυβας St45 με όριο διαρροής στρέψης 300 N/mm².

Έτσι αντικαθιστώντας τη σχέση έχουμε:

$$d = 39.4 \sqrt[3]{\frac{1,35 \times 1}{300}}$$

$$d \cong 6.5 \text{ mm}$$

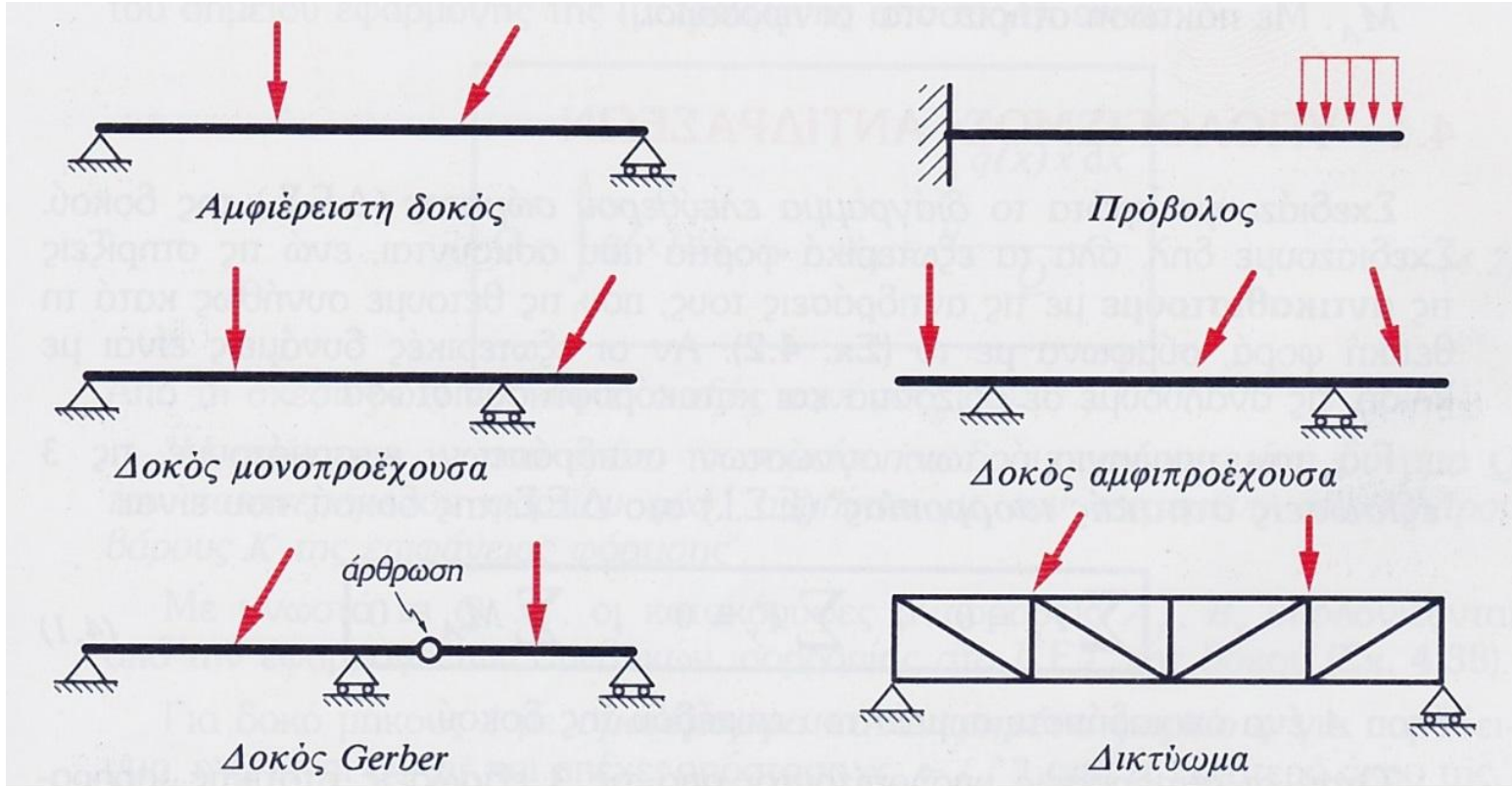
Για κατασκευαστικούς λόγους επιλέγουμε άξονα 8mm ο οποίος υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις μας. Συνεπώς πλέον έχουμε συντελεστή ασφαλείας **1,23**.

8.2 Επιλογή εδράνων (ρουλεμάν)

Για να εδράζεται σωστά ο άξονας που επιλέξαμε και να περιστρέφεται σωστά και χωρίς υπερβολικές τριβές, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή τύπου και διαστάσεων των εδράνων (ρουλεμάν). Για να κατανοηθεί όμως καλύτερα η επιλογή των εδράνων θα παρουσιάσουμε μερικά στοιχεία για τα έδρανα (τύπους, εφαρμογές κλπ).

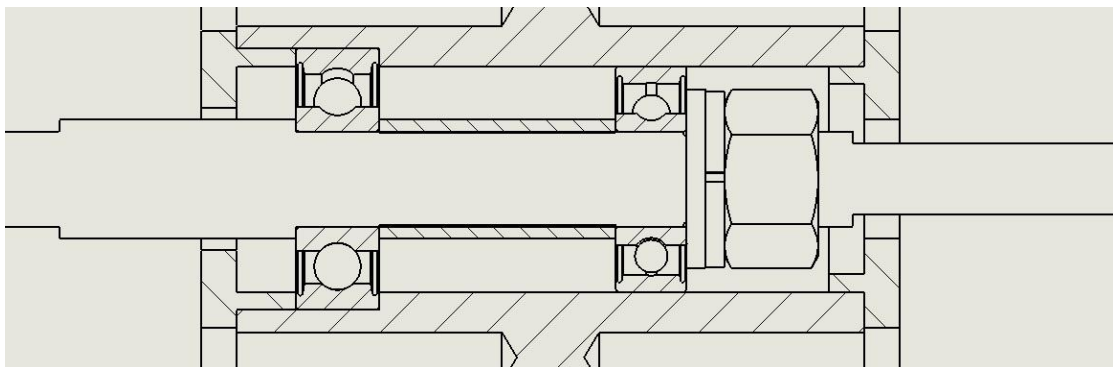
Το μοντέλο του άξονα που χρησιμοποιείται στην κατασκευή μας είναι μια αμφιπροέχουσα δοκός. Υπάρχουν τρεις τρόποι στήριξης μιας δοκού

1. **Κύλιση:** Στην κύλιση το σημείο στήριξης είναι ελεύθερο να μετακινείται χωρίς τριβές με τη βοήθεια του εδράνου κύλισης κατά μία μόνο διεύθυνση, δηλαδή επιτρέπει συγχρόνως ένα βαθμό ελευθερίας και στροφή. Περιορίζεται δηλαδή μόνο ο ένας βαθμός ελευθερίας.
2. **Άρθρωση:** Η άρθρωση επιτρέπει την ελεύθερη στροφή της δοκού και περιορίζει και τους δύο βαθμούς ελευθερίας. Η άρθρωση πρακτικά επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός πείρου.
3. **Πάκτωση:** Η πάκτωση δεν επιτρέπει καμία μετακίνηση ή στροφή της δοκού.



8.2.1 Διάφοροι δοκοί

Οι στηρίξεις που θα χρησιμοποιήσουμε είναι άρθρωση και κύλιση. Για να το πετύχουμε αυτό τα ρουλεμάν που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε θα είναι τύπου “single row deep groove ball bearing” δηλαδή ένσφαιροι τριβείς με μια σειρά σφαίρες με βαθύ αύλακα. Το ρουλεμάν που θα χρησιμοποιηθεί για το ρόλο της άρθρωσης θα πρέπει να εδράζεται σταθερά στον άξονα και στο κέλυφος ενώ το ρουλεμάν που θα χρησιμοποιηθεί για το ρόλο της κύλισης θα πρέπει να εδράζεται σταθερά μόνο στον άξονα και να είναι ελεύθερο να κυλιέται στο κέλυφος.



8.2.2 Λεπτομέρεια από κατασκευαστικό σχέδιο version 1

The matrix can only provide a rough guide so that in each individual case it is necessary to make a more qualified selection referring to the information given in the catalogue

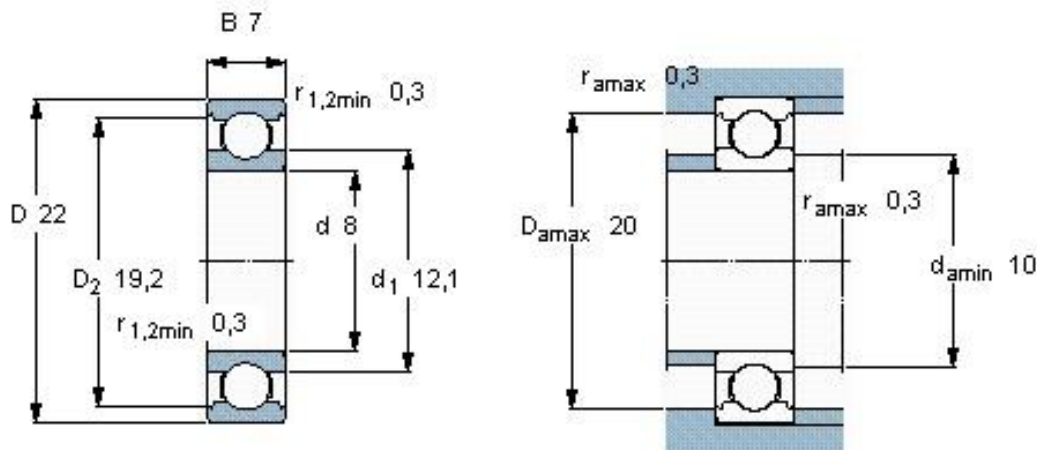
Symbols
 +++ excellent - poor
 ++ good -- unsuitable
 + fair +- single direction
 ↔ double direction

	Design	Characteristics Suitability of bearings for																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Deep groove ball bearings			a				+	+	+	-	+++	+++	+	+++	+++	-	-	++	+	--
Angular contact ball bearings							+	+	++	-	++	+++	+	++	++	-	-	++	--	--
Self-aligning ball bearings							+	-	-	--	+++	++	-	++	+++	+++	+++	+	+	--
Cylindrical roller bearings							++	--	--	--	++	++	++	++	++	-	-	--	+++	+++
full complement					a	b	+++	-	+	--	-	+	+++	-	-	-	-	+	+	+
Needle roller bearings			a	c			++	--	--	--	+	+	+++	+	-	--	--	+++	+++	+++
Tapered roller bearings							++	++	+++	-	+	+	++	+	+	-	-	+++	---	---
Spherical roller bearings							+++	++	+++	-	+	+	++	+	+	+++	+++	++	+	--
CARB bearings							+++	--	--	--	+	+	++	+	+	+++	+++	--	+++	+++
full complement							+++	--	--	--	-	+	+++	+	+	+++	+++	--	+++	+++
Thrust ball bearings							--	+	--	--	-	++	+	-	+	-	--	++	---	---
Needle Cylindrical roller thrust bearings							--	++	--	--	-	a+	++	-	-	--	--	++	---	---
Spherical roller thrust bearings							--	+++	+	--	-	+	++	-	+	+++	+++	+++	---	---

8.2.3 Πίνακας εκλογής τύπου ρουλεμαν

Επειδή θα χρησιμοποιήσουμε άξονα 8mm τα ρουλεμάν που θα διαλέξουμε θα πρέπει να έχουν εσωτερική διάμετρο 8mm. Ψάχνοντας στον κατάλογο της SKF μπορούμε να βρούμε τα ρουλεμάν που θα χρειαστούμε.

Για το ρουλεμάν το οποίο θα εδράζεται στον άξονα και στο κέλυφος διαλέγουμε το 608 το οποίο έχει εξωτερική διάμετρο 22mm

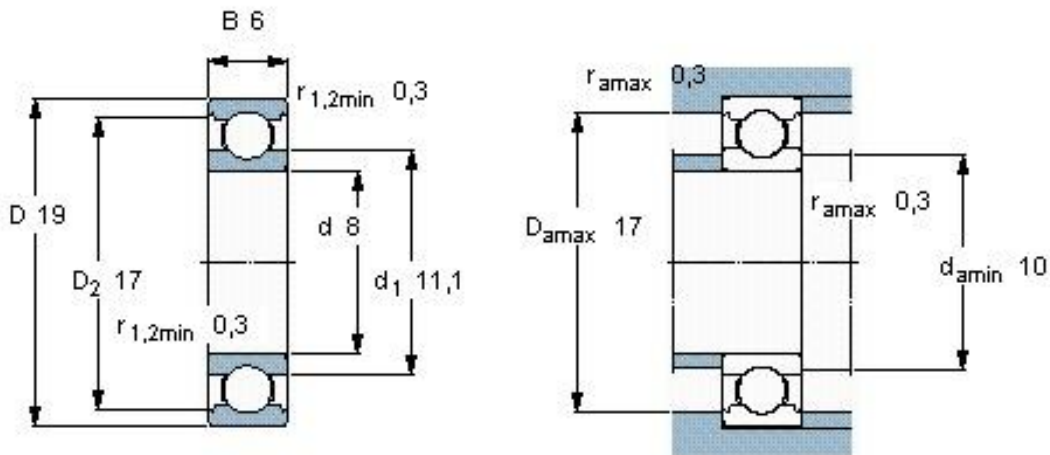


Calculation factors

k_r 0,025
 f_0 12

8.2.4 SKF single row deep groove ball bearing 608

Για κατασκευαστικούς λόγους το ρουλεμάν το οποίο θα εδράζεται μόνο στον άξονα θα πρέπει να έχει εξωτερική διάμετρο μικρότερη από το ρουλεμάν που θα εδράζεται και στο κέλυφος. Για το λόγο αυτό διαλέγουμε το ρουλεμάν 619/8 με εξωτερική διάμετρο 19mm.



Calculation factors

k_r 0,02
 f_0 10

8.2.5 SKF single row deep groove ball bearing 619/8

Στη συνέχεια θα πρέπει να εξετάσουμε το χρόνο ζωής των ρουλεμάν. Η διάρκεια ζωής που θέλουμε να έχει το ρουλεμάν σε ώρες λειτουργίας είναι $L_{10h} = 10000h$. Επειδή το ρουλεμάν 608 δέχεται όλα τα φορτία θα κάνουμε τους υπολογισμούς μας για αυτό. Παίρνουμε την εξίσωση:

$$P = XFr + YFa$$

Όπου P το ισοδύναμο δυναμικό φορτίο του ρουλεμάν

F_r το ακτινικό φορτίο του ρουλεμάν

F_a το αξονικό φορτίο του ρουλεμάν

X ο συντελεστής ακτινικού φορτίου του ρουλεμάν

Y ο συντελεστής αξονικού φορτίου του ρουλεμάν

Επειδή το ρουλεμάν δέχεται μόνο αξονική δύναμη η εξίσωση μετατρέπεται:

$$P = Fa = 85N$$

Σε ώρες λειτουργίας θα ισούνται με:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10}$$

$$L_{10} = \frac{L_{10h} \times 60n}{10^6}$$

$$L_{10} = \frac{10000 \times 60 \times 6000rpm}{10^6}$$

$$L_{10} = 3600 \text{ εκατομμύρια περιστροφές}$$

Έπειτα χρησιμοποιούμε τη βασική εξίσωση ζωής του ρουλεμάν για 90% αξιοπιστία

$$L_{10h} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

$$C = \sqrt[3]{L_{10}} \times P$$

$$C = \sqrt[3]{3600} \times 0.085 \text{ KN}$$

$$C = 1.3$$

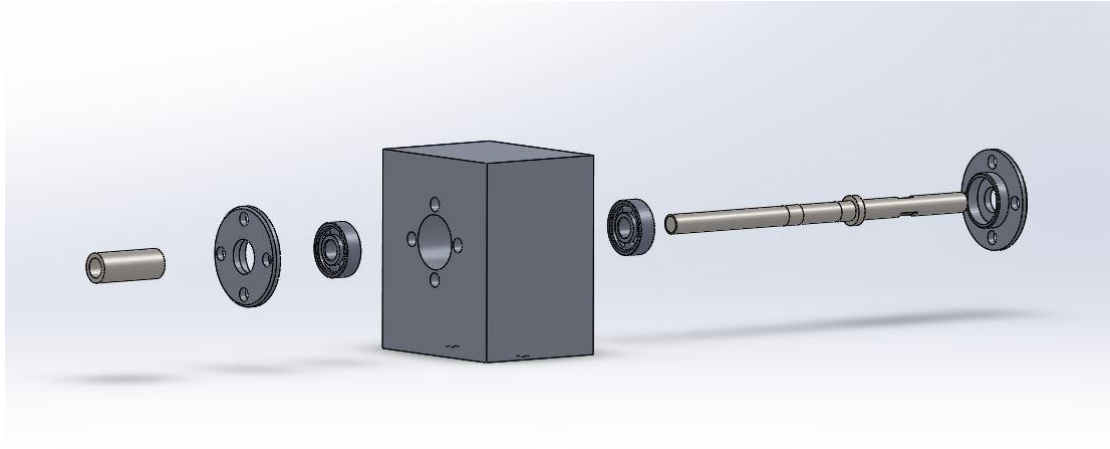
Από τον πίνακα της SKF διαπιστώνουμε ότι το ρουλεμάν υπερκαλύπτει τις ώρες λειτουργίας που έχουμε θέσει.

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit P_u	Speed ratings		Mass	Designation
d	D	B	dynamic C	static C_0		Reference speed	Limiting speed		
mm			kN		kN	r/min		kg	-
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	623
4	9	2,5	0,54	0,18	0,007	140 000	85 000	0,0007	618/4
	11	4	0,715	0,232	0,010	130 000	80 000	0,0017	619/4
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	624
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634
5	11	3	0,637	0,255	0,011	120 000	75 000	0,0012	618/5
	13	4	0,884	0,34	0,014	110 000	67 000	0,0025	619/5
	16	5	1,14	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0050	* 625
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0090	* 635
6	13	3,5	0,884	0,345	0,015	110 000	67 000	0,0020	618/6
	15	5	1,24	0,475	0,02	100 000	63 000	0,0039	619/6
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0084	* 626
7	14	3,5	0,956	0,4	0,017	100 000	63 000	0,0022	618/7
	17	5	1,48	0,56	0,024	90 000	56 000	0,0049	619/7
	19	6	2,34	0,95	0,04	85 000	53 000	0,0075	* 607
	22	7	3,45	1,37	0,057	70 000	45 000	0,013	* 627
8	16	4	1,33	0,57	0,024	90 000	56 000	0,0030	618/8
	19	6	1,9	0,735	0,031	80 000	50 000	0,0071	619/8
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	48 000	0,012	* 608
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	40 000	0,017	* 628
9	17	4	1,43	0,64	0,027	85 000	53 000	0,0034	618/9
	20	6	2,08	0,865	0,036	80 000	48 000	0,0076	619/9
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	43 000	0,014	* 609
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	38 000	0,020	* 629
10	19	5	1,38	0,585	0,025	80 000	48 000	0,0055	61800
	22	6	2,08	0,85	0,036	75 000	45 000	0,010	61900
	26	8	4,75	1,96	0,083	67 000	40 000	0,019	* 6000
	28	8	4,62	1,96	0,083	63 000	40 000	0,022	16100
	30	9	5,4	2,36	0,1	56 000	34 000	0,032	* 6200
	35	11	8,52	3,4	0,143	50 000	32 000	0,053	* 6300

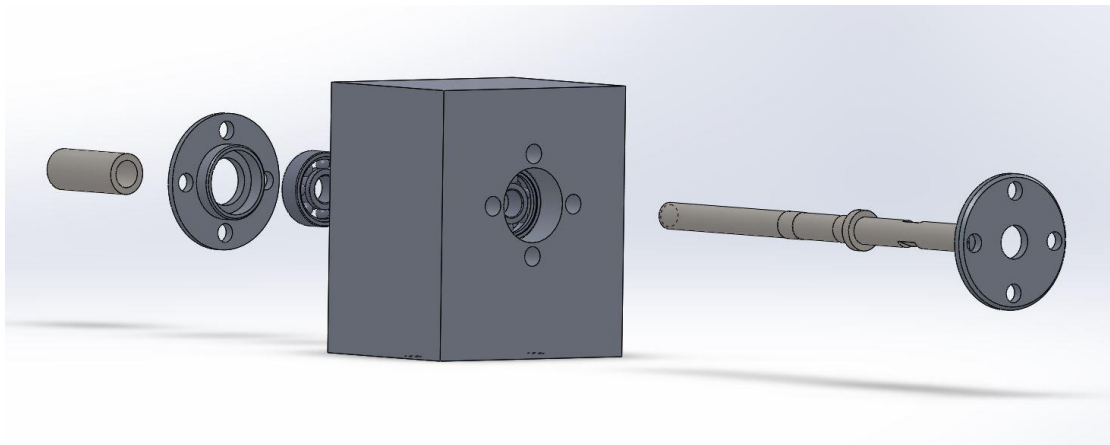
8.2.6 Πίνακας στοιχείων ρουλεμάν

9. Οδηγίες συναρμολόγησης

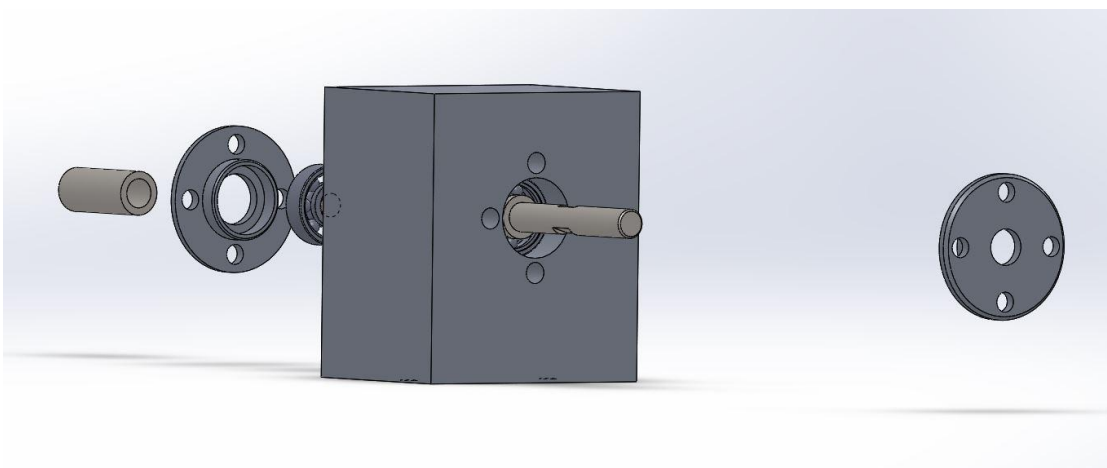
9.1 Έδραση ρουλεμάν 1



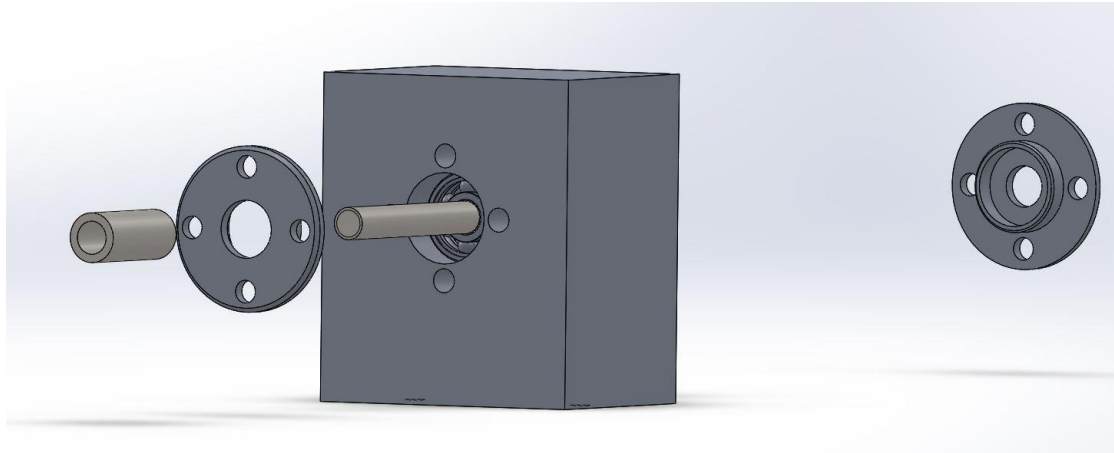
Βήμα 1^ο : Τοποθετούμε το πίσω ρουλεμάν



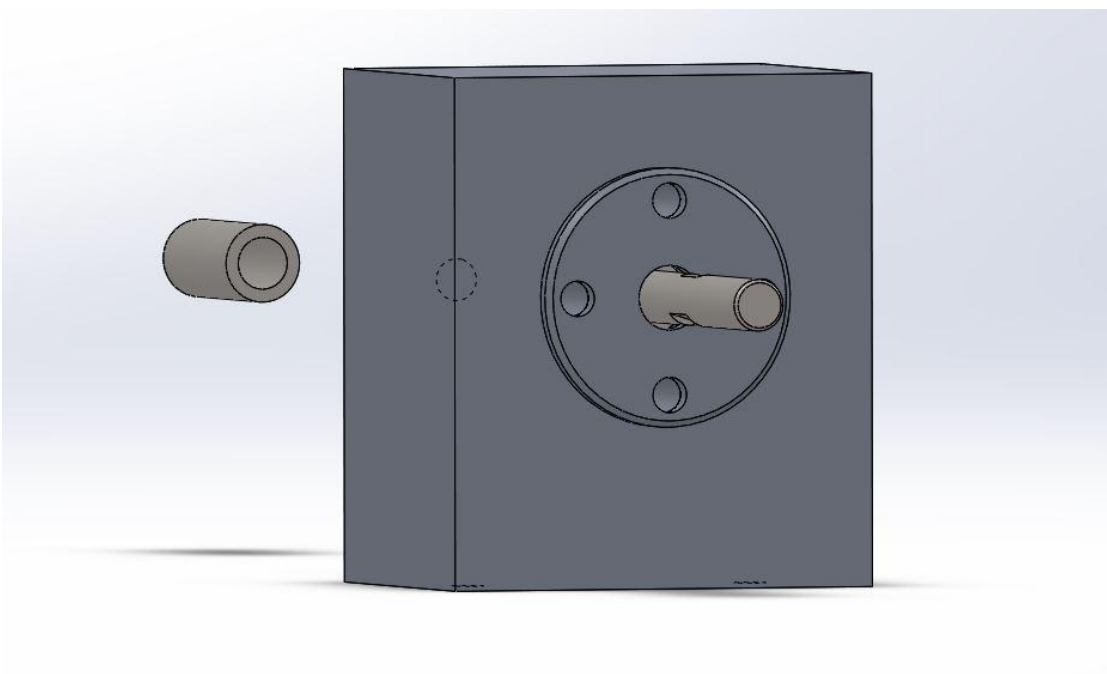
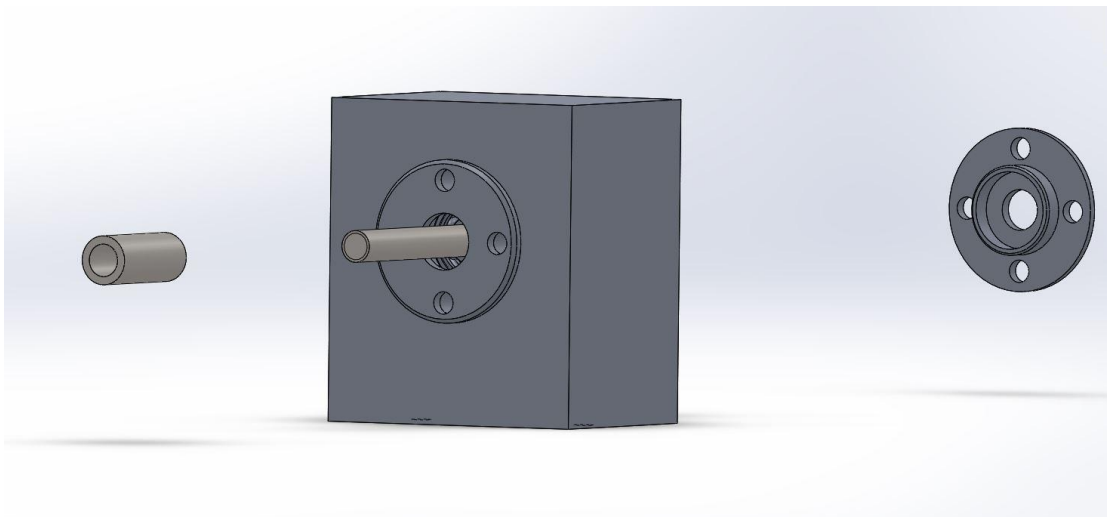
Βήμα 2^ο : Τοποθετούμε τον άξονα στο ρουλεμάν



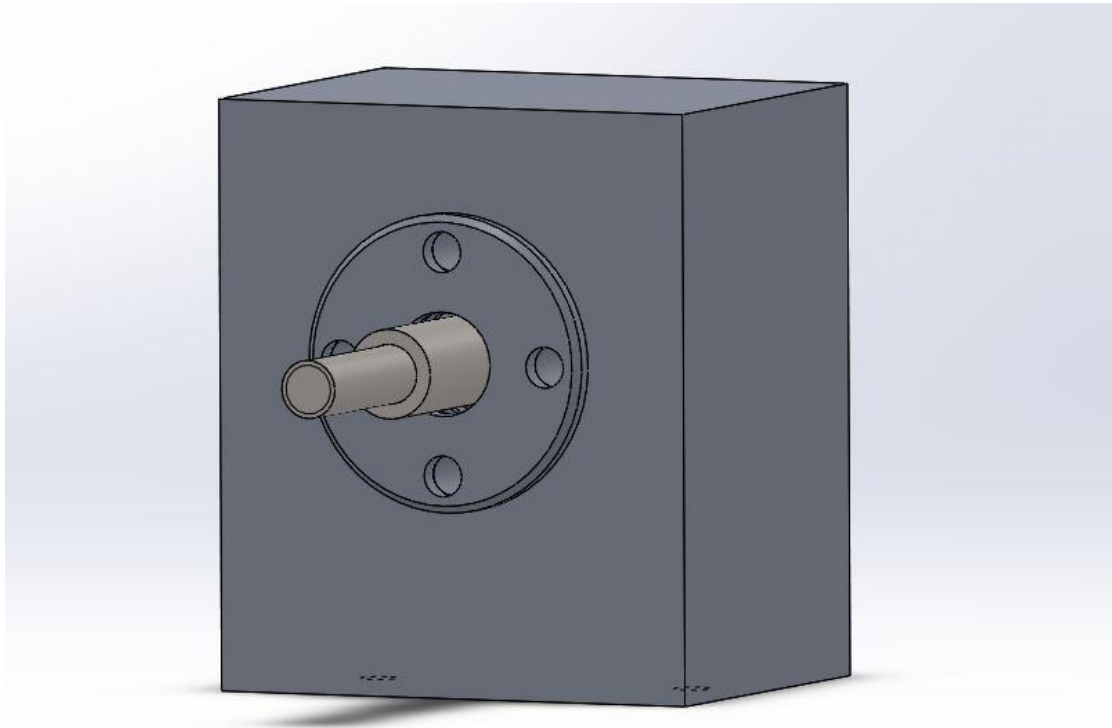
Βήμα 3° : Τοποθετούμε το εμπρός ρουλεμάν



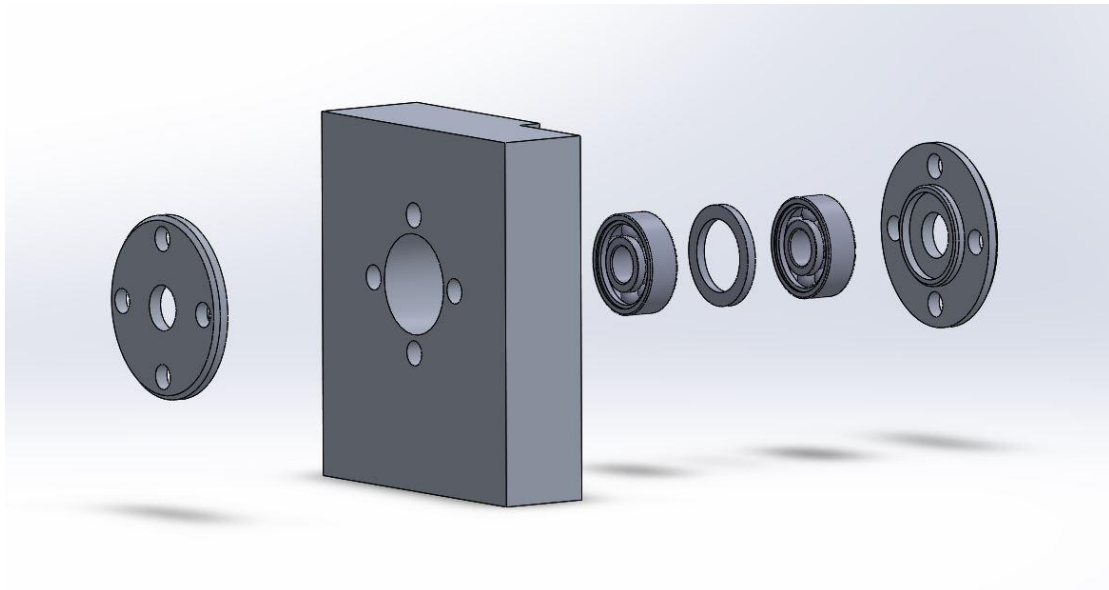
Βήμα 4° : Τοποθετούμε τα καπάκια και τα βιδώνουμε



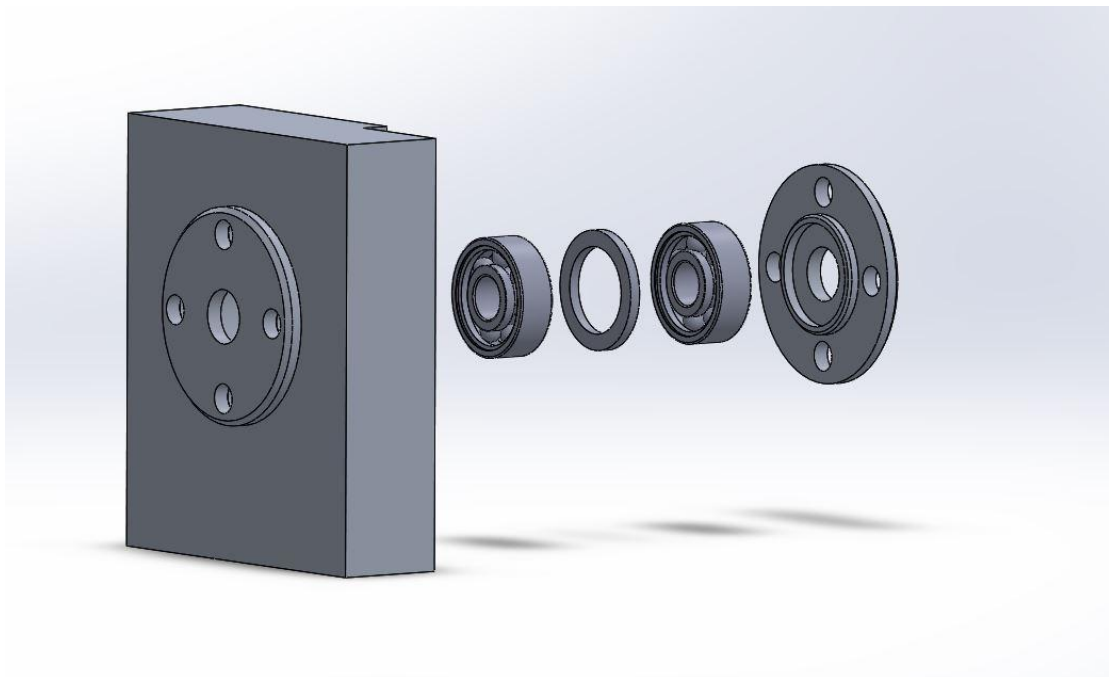
Βήμα 5° : Τοποθετούμε τον αποστάτη



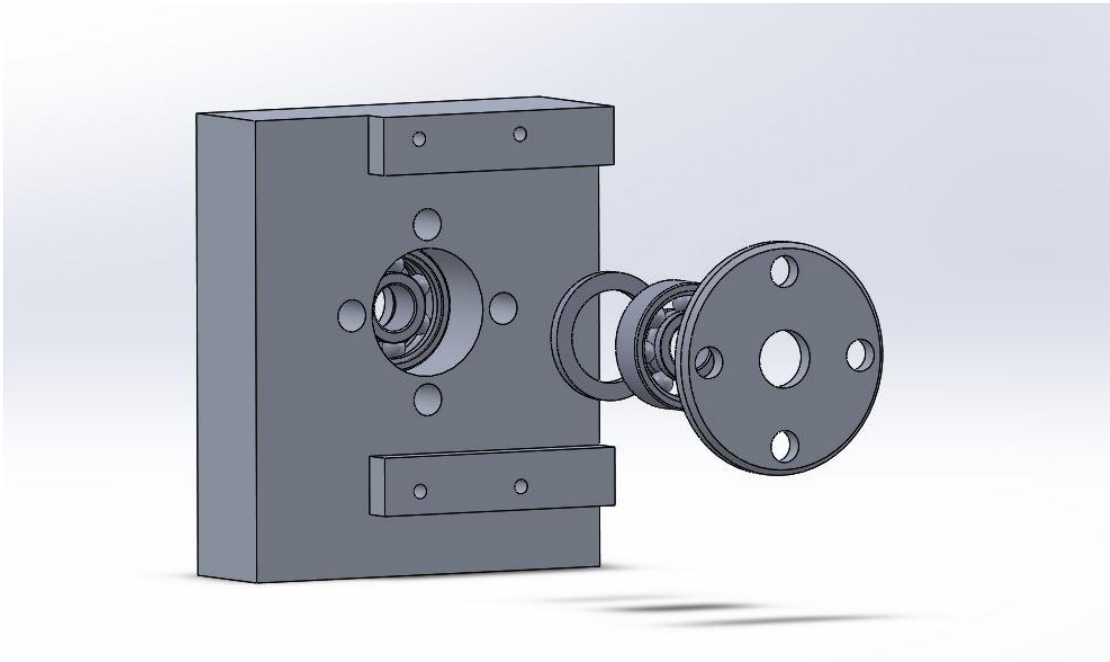
9.2 Έδραση ρουλεμάν 2



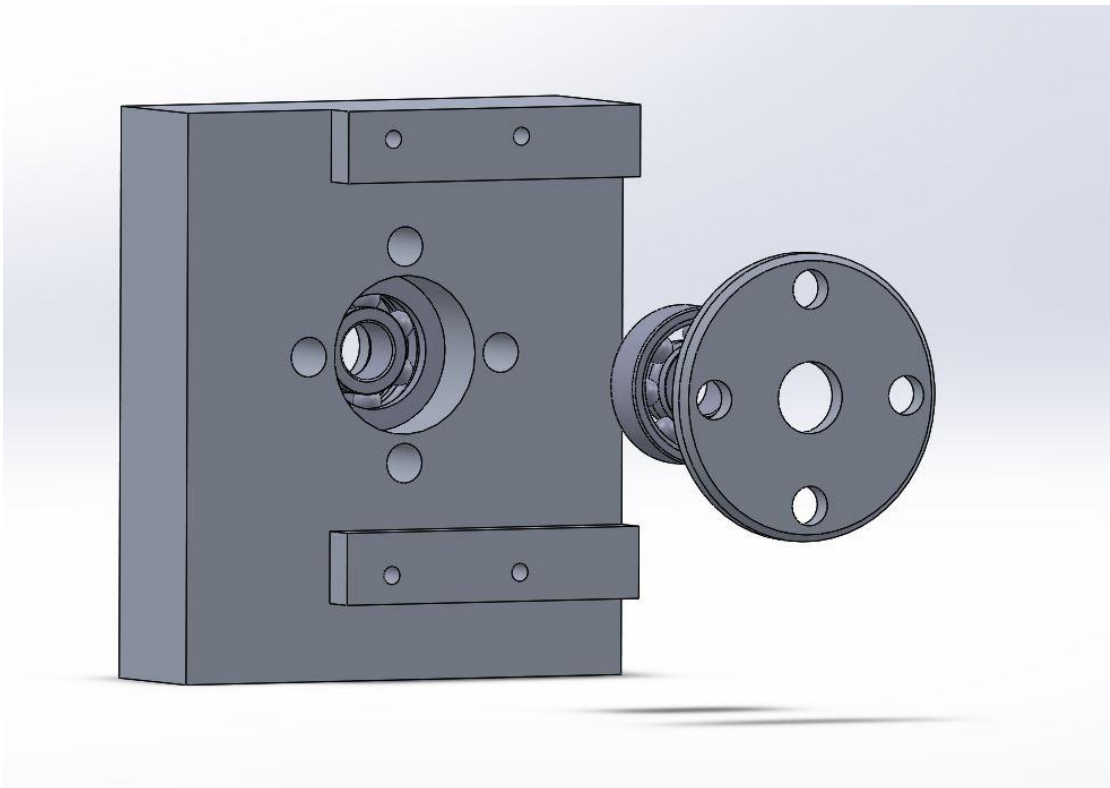
Βήμα 1^ο: Τοποθετούμε το εμπρός καπάκι



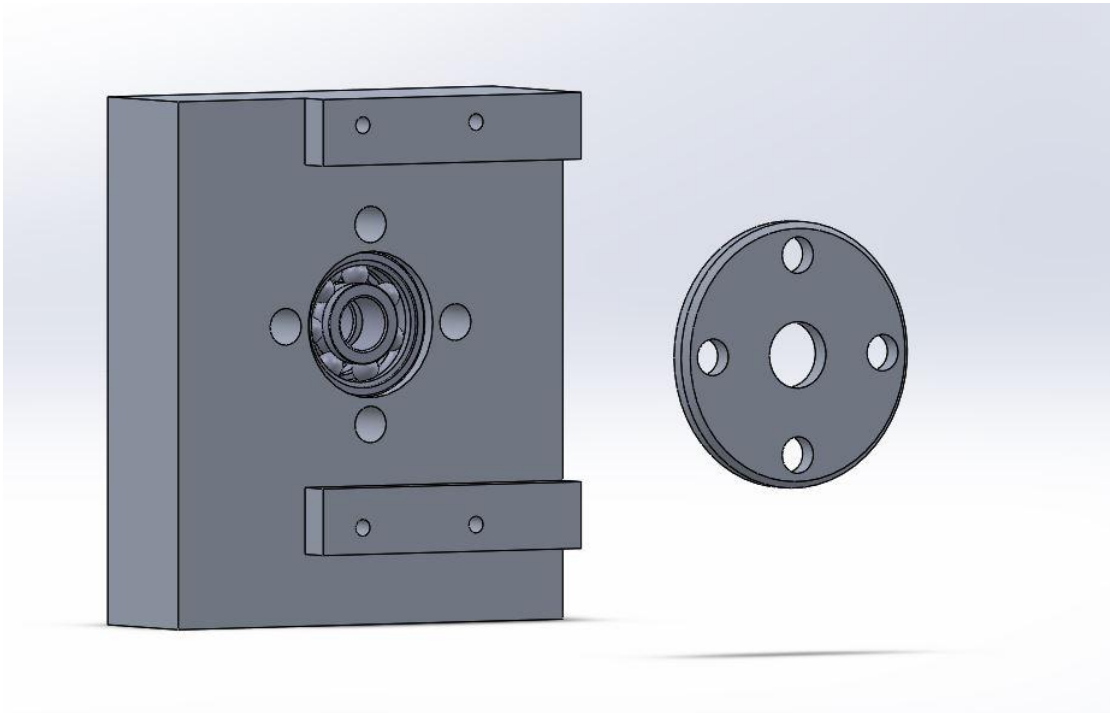
Βήμα 2^ο: Τοποθετούμε το εμπρός ρουλεμάν



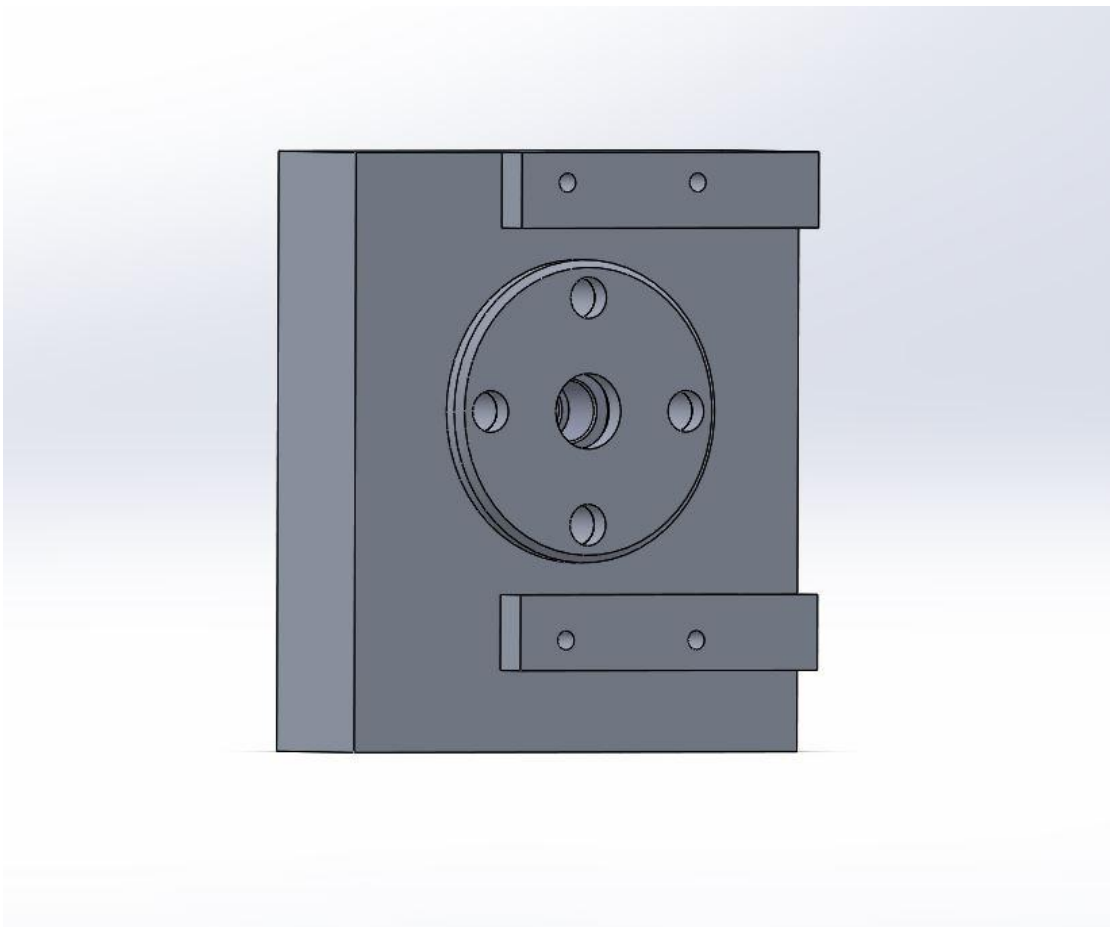
Βήμα 3^ο : Τοποθετούμε τον αποστάτη



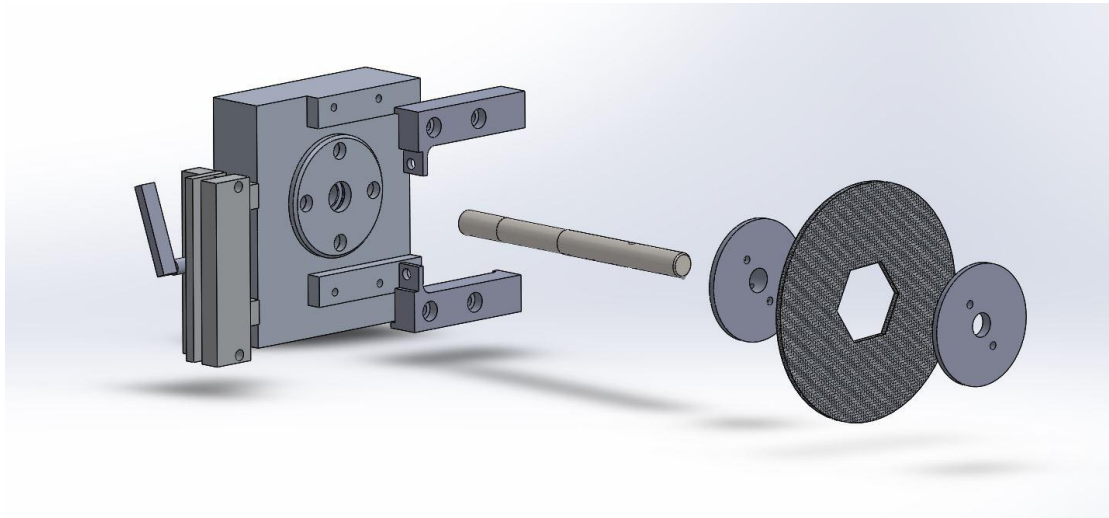
Βήμα 4° : Τοποθετούμε το πίσω ρουλεμάν



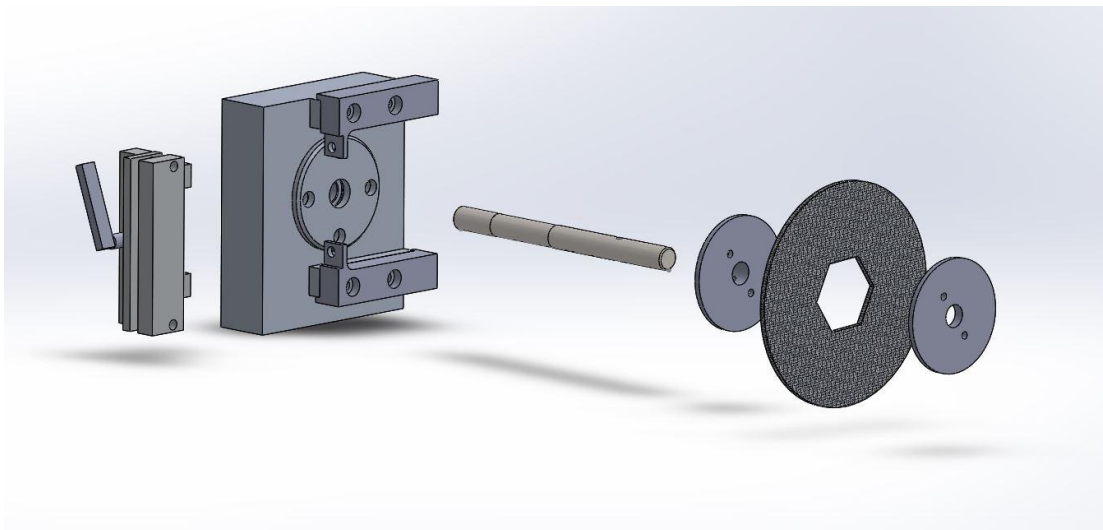
Βήμα 5° : Τοποθετούμε το πίσω καπάκι και βιδώνουμε τα καπάκια



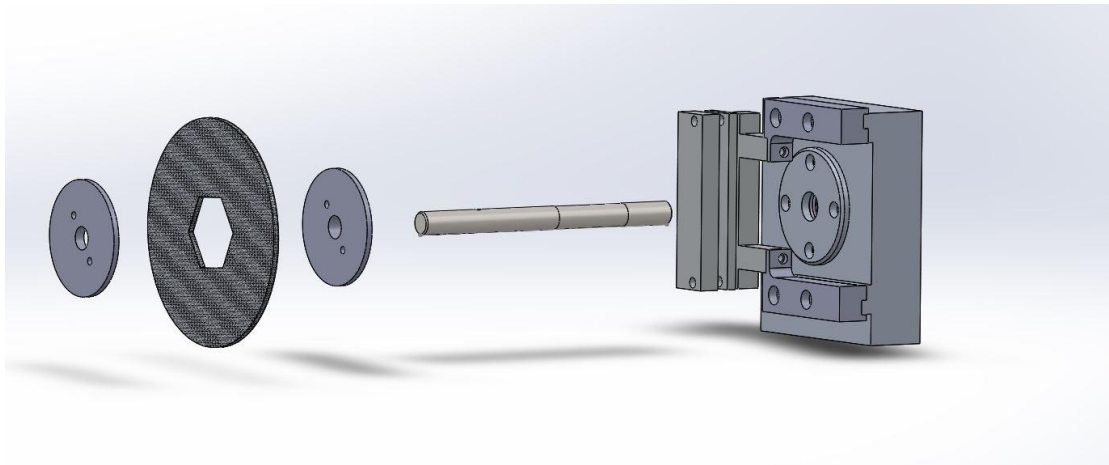
9.3 Πέδη



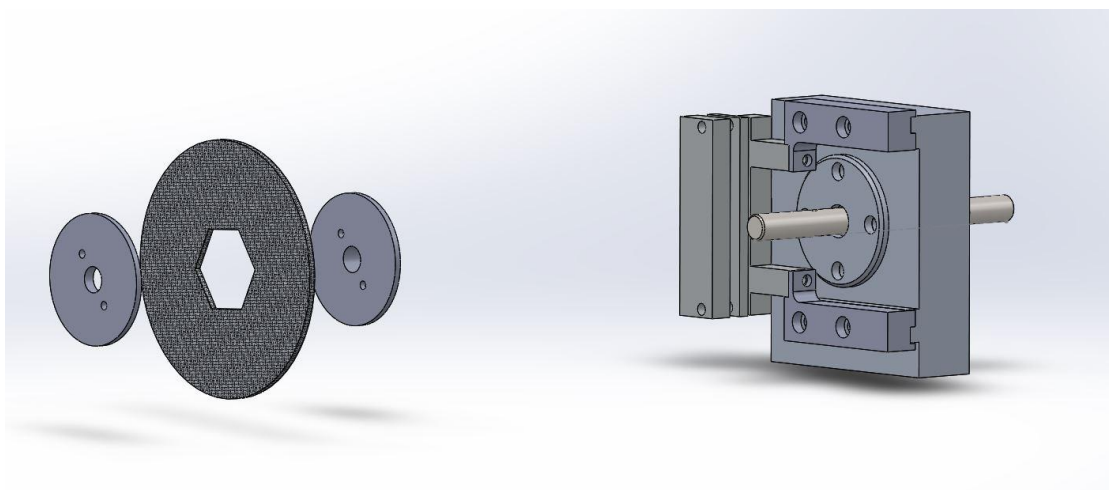
Βήμα 1° : Τοποθετούμε την επάνω βάση και την κάτω βάση της δαγκάνας και τη βιδώνουμε



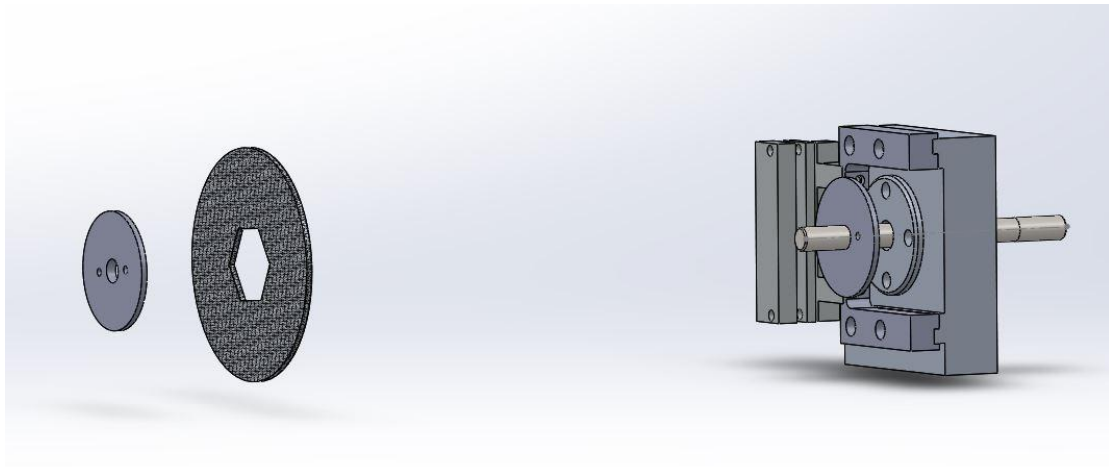
Βήμα 2° : Τοποθετούμε τη δαγκάνα και τη βιδώνουμε



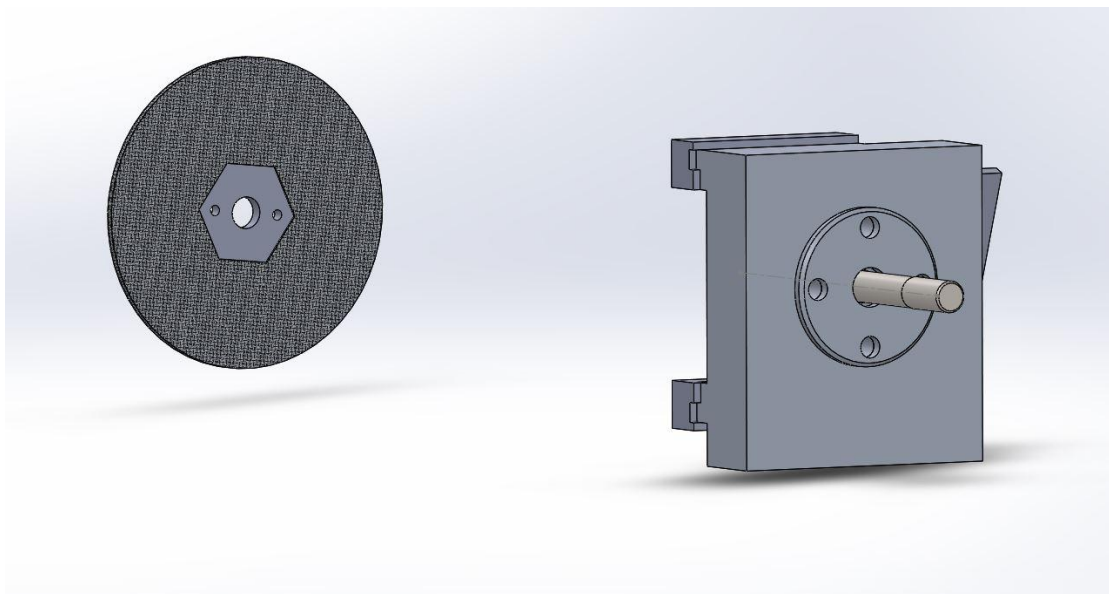
Βήμα 3° : Τοποθετούμε τον άξονα στα ρουλεμάν



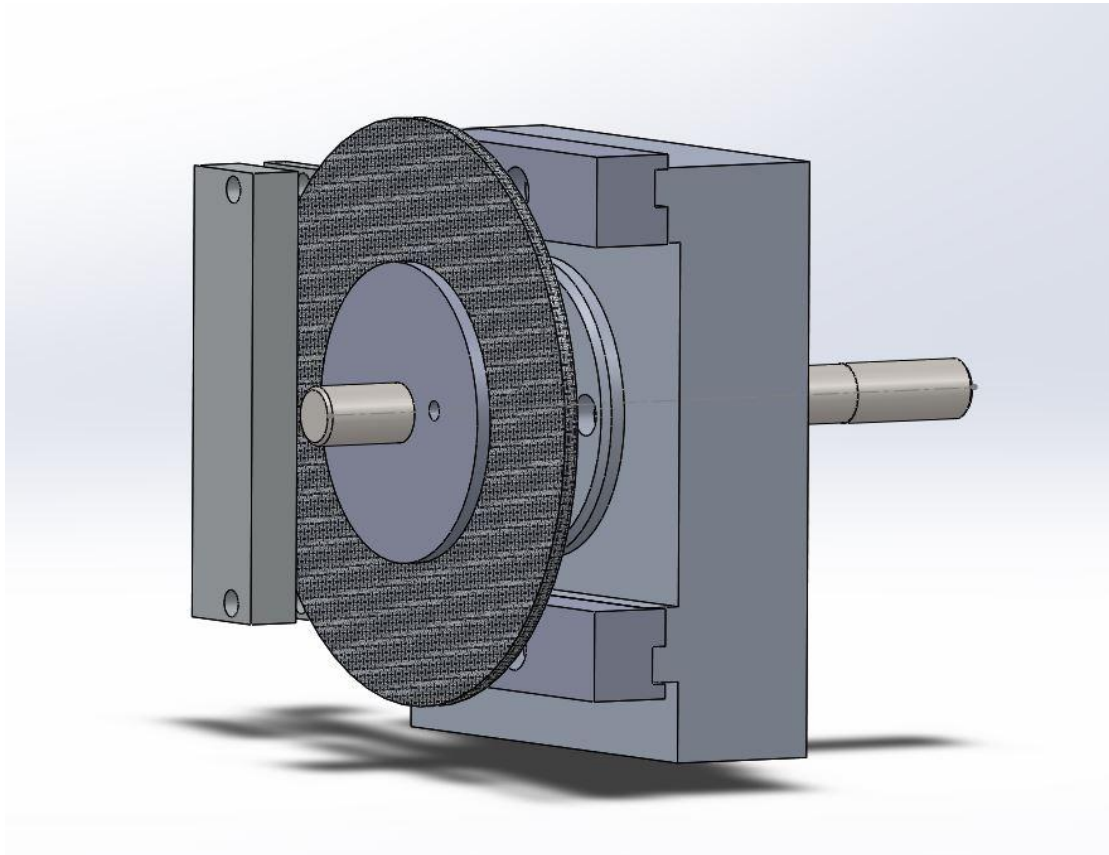
Βήμα 4° : Τοποθετούμε την εμπρός βάση του δίσκου στον άξονα και την ασφαλίζουμε



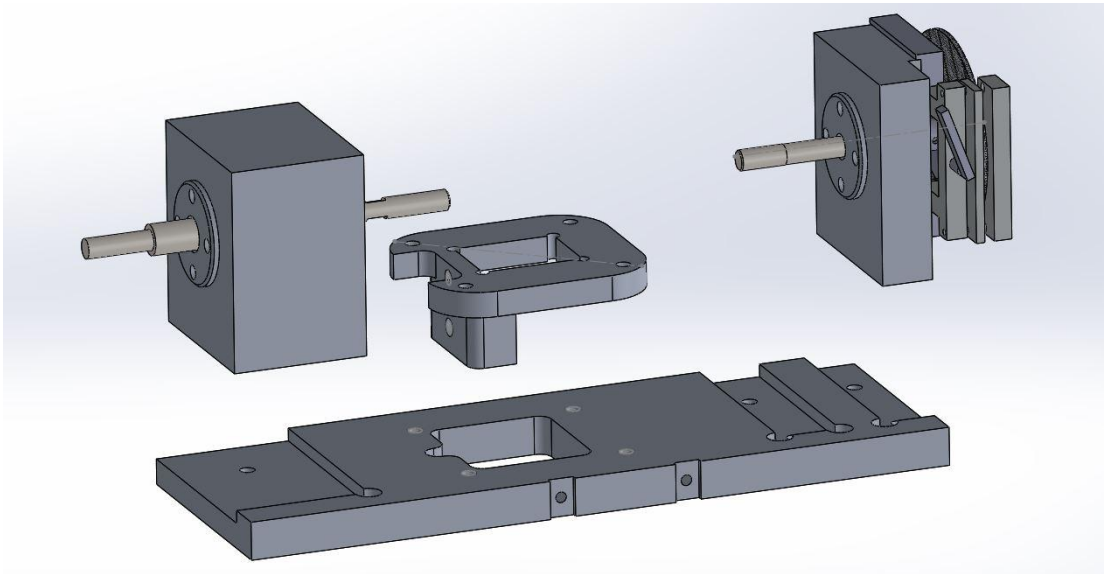
Βήμα 5° : Τοποθετούμε το δίσκο στην πίσω βάση



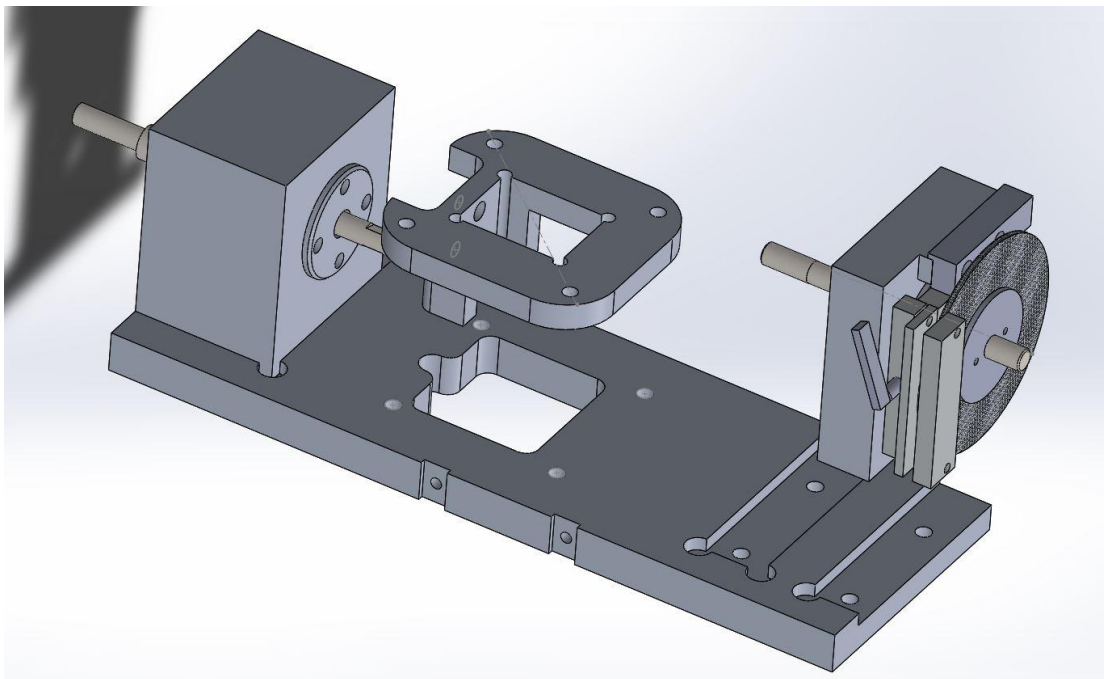
Βήμα 6° : Τοποθετούμε τη βάση μαζί με το δίσκο στον άξονα και τη βιδώνουμε στην εμπρός βάση



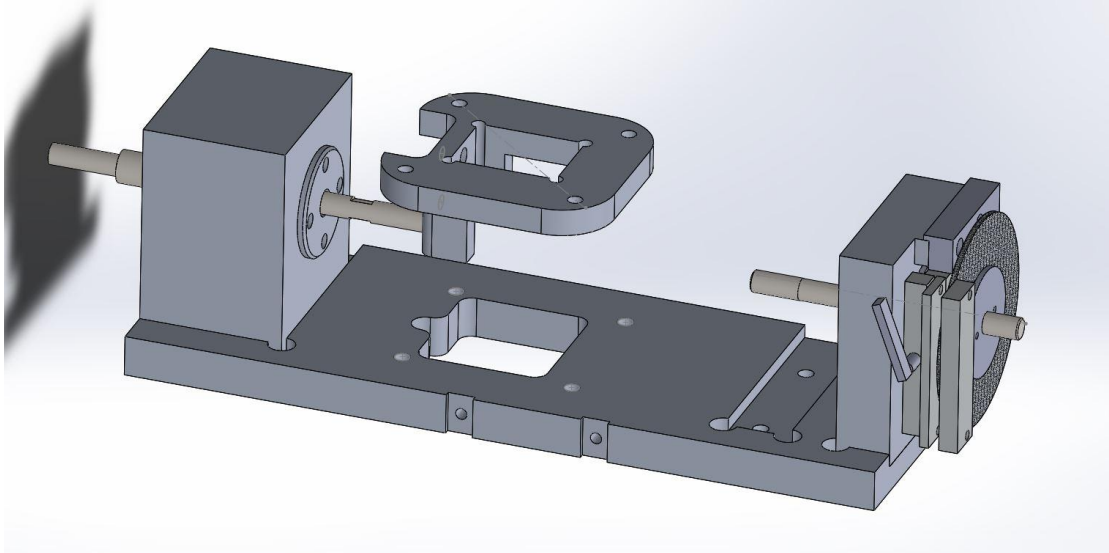
9.4 Βάση μετρητικής διάταξης



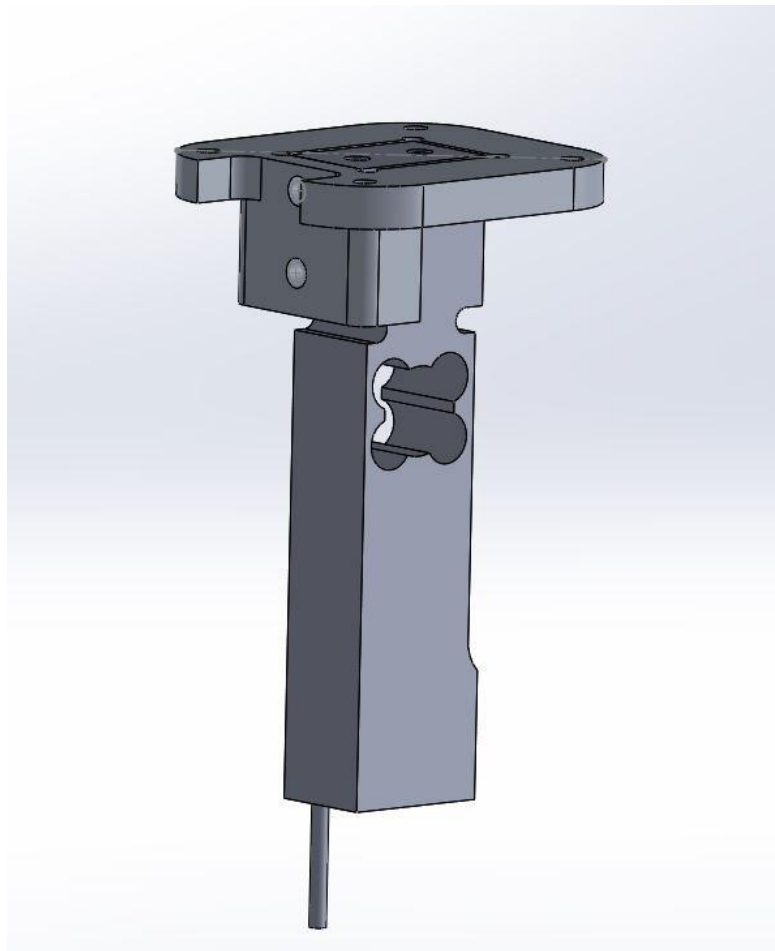
Βήμα 1^ο : Τοποθετούμε την εμπρός έδραση των ρουλεμάν επάνω στη βάση. Προσέχουμε ώστε οι πλευρές του κομματιού να εφάπτονται στους οδηγούς της βάσης και στη συνέχεια βιδώνουμε το κομμάτι



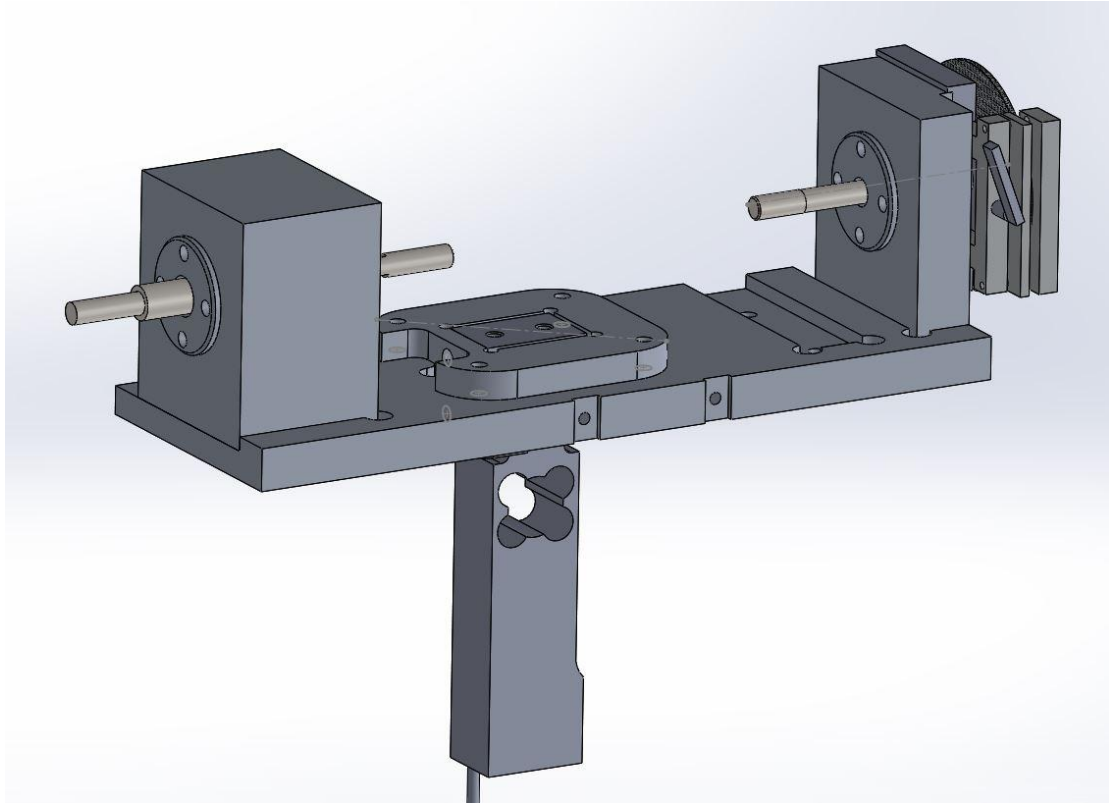
Βήμα 2° : Τοποθετούμε την πίσω έδραση των ρουλεμάν επάνω στη βάση.
Προσέχουμε ώστε οι πλευρές του κομματιού να εφάπτονται στους οδηγούς της βάσης και
στη συνέχεια βιδώνουμε το κομμάτι



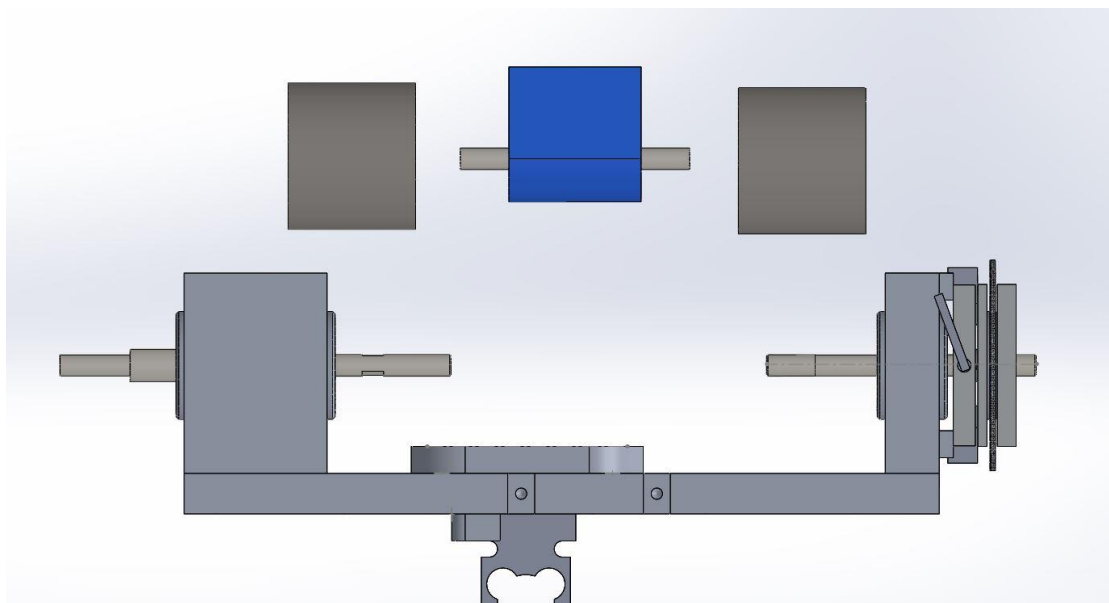
Βήμα 3° : Βιδώνουμε το load cell επάνω στην ειδική στήριξη του



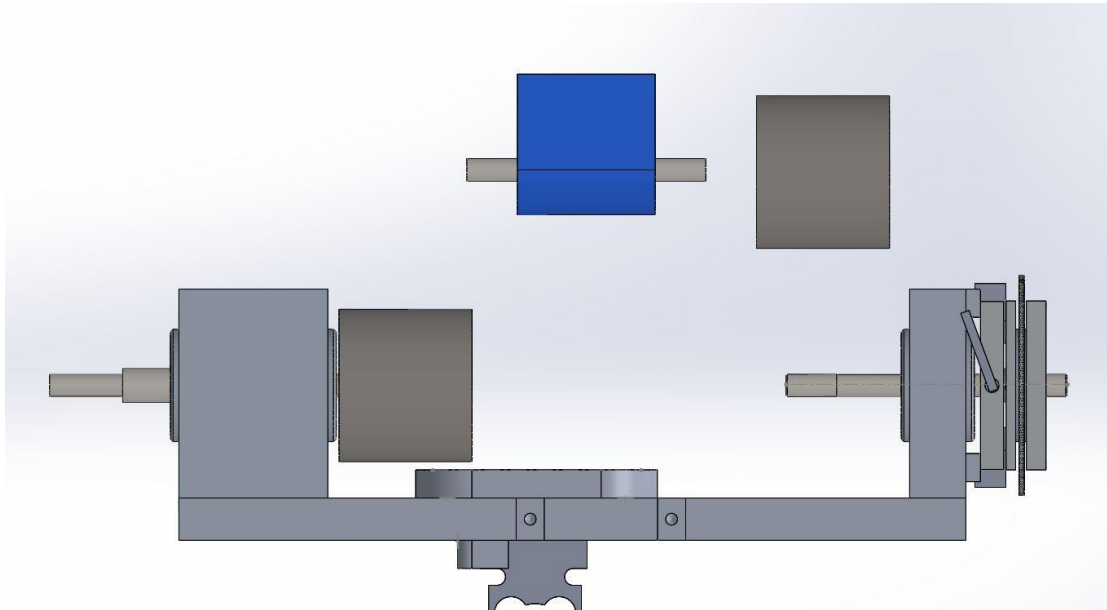
Βήμα 4° : Βιδώνουμε τη στήριξη μαζί με το load cell στη βάση



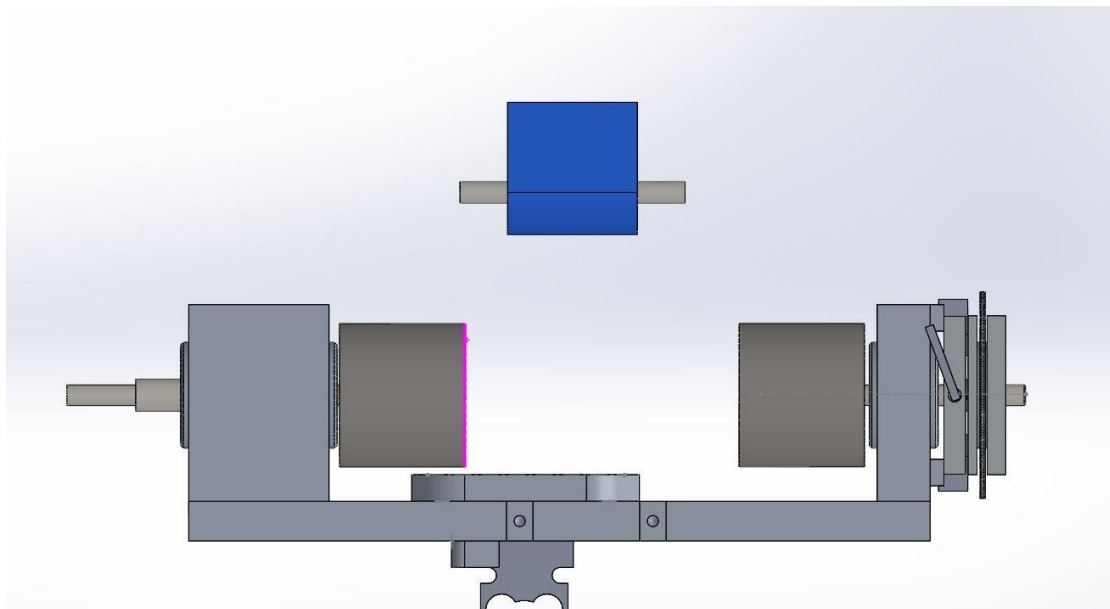
9.5 Ρολόμετρο



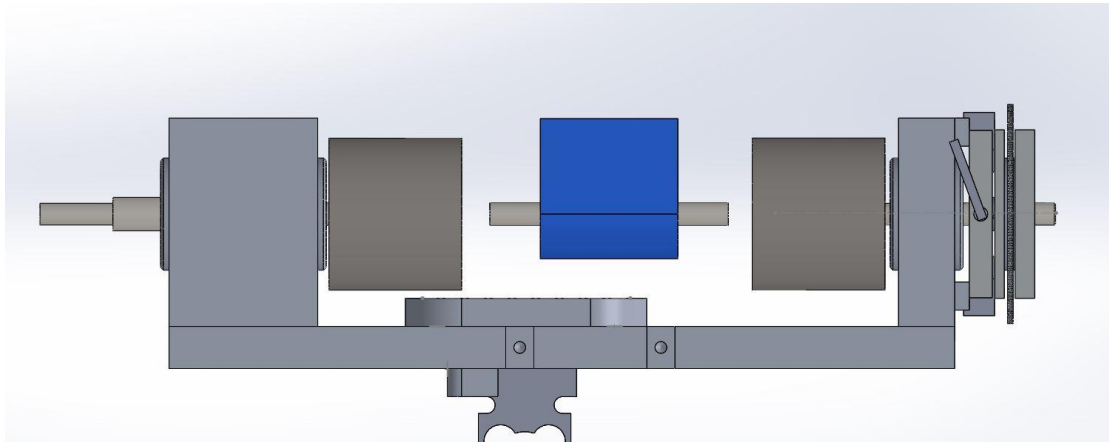
Βήμα 1° : Τοποθετούμε το coupler στον εμπρός άξονα και το σύρουμε μέχρι να ακουμπήσει στην εμπρός έδραση των ρουλεμάν.



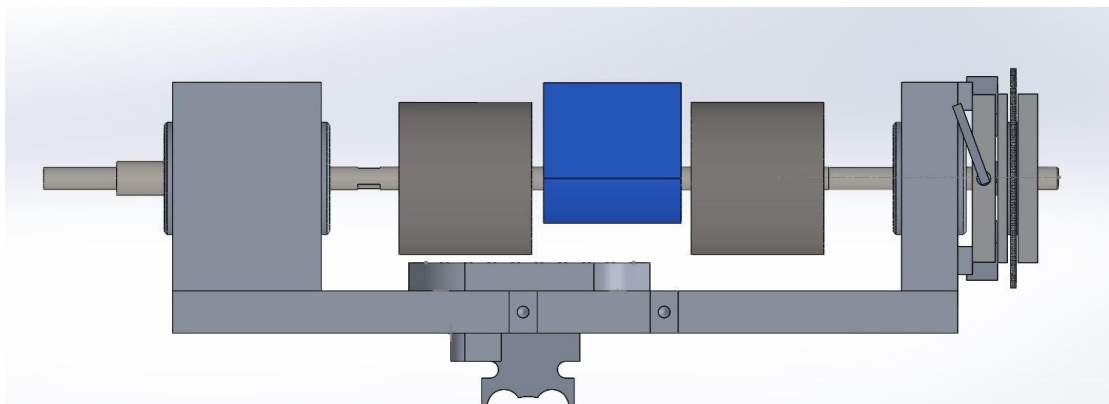
Βήμα 2° : Τοποθετούμε το coupler στον πίσω άξονα και το σύρουμε μέχρι να ακουμπήσει στην πίσω έδραση των ρουλεμάν.



Βήμα 3° : Ευθυγραμμίζουμε το ροπόμετρο με τους άξονες. Προσέχουμε πως χειριζόμαστε το ροπόμετρο διότι είναι πολύ ευαίσθητο σε κραδασμούς.



Βήμα 4° : Σύρουμε τα compler ώστε να εφαρμόσουν σε όλους τους άξονες και σφίγγουμε τις βίδες των compler



9.6 Φτερωτή

Τοποθετούμε τη φτερωτή στον άξονα και σφίγγουμε το παξιμάδι τοποθετώντας ένα κλειδί N.6 στην ειδική υποδοχή του άξονα ώστε να αποτρέψουμε τον άξονα από την περιστροφή. Τα παραπάνω τα κάνουμε αφού έχουμε ξεσφίξει το coupler ώστε να μην μεταφέρεται ροπή στον άξονα.

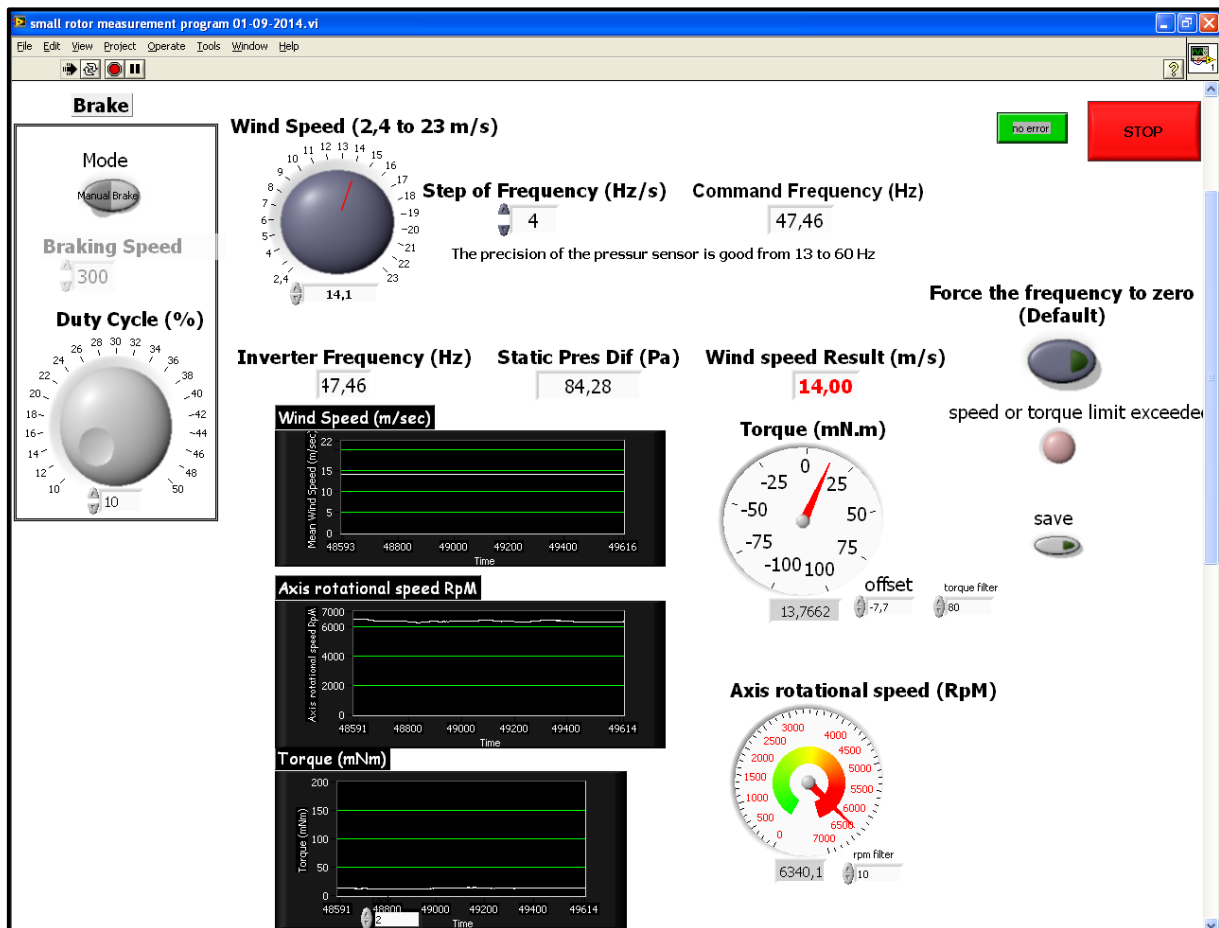
10. Μετρήσεις στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου

10.1 Περιγραφή πειράματος

Θέτουμε σε λειτουργία την αεροσήραγγα, το τροφοδοτικό και τον Η/Υ της πειραματικής εγκατάστασης. Ανοίγουμε το αρχείο “small rotor measurement program” το οποίο είναι ένα πρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί με την εφαρμογή LabVIEW.

Μεσα απο αυτό το πρόγραμμα μπορούμε σε πραγματικό χρόνο:

1. να ρυθμίσουμε την ταχύτητα του αέρα στην έξοδο της αεροσήραγγας
2. να δούμε την ροπή στον άξονα με την πτερύγωση
3. τις στροφές ανα λεπτό του άξονα
4. να φρενάrouμε τον άξονα με την πτερύγωση
5. να αποθηκεύσουμε τις μετρήσεις αυτές σε αρχείο .txt



10.1.1 Παράθυρο Labview

Τρέχουμε το πρόγραμμα και αυξάνουμε σταδιακά την ταχύτητα του αέρα. Αφού σταθεροποιηθεί η ταχύτητα του αέρα (κόκκινοι αριθμοί) στην επιθυμητή ταχύτητα, πατάμε το κουμπί **save**. Στην συνέχεια φρενάρουμε με αργό ρυθμό μέχρι να σταματήσει η περιστροφή του άξονα. Έτσι παίρνουμε την καμπύλη της μεταβολής της ροπής στην συγκεκριμένη ταχύτητα αέρα. Με το πέρας της διαδικασίας πατάμε ξανά το **save** για να σταματήσει η καταγραφή. Σταματάμε το πρόγραμμα και μπορούμε μέσα από τον φάκελο του προγράμματος να πάρουμε το αρχείο test.txt όπου έχουν καταγραφεί τα δεδομένα της μέτρησης. Το αρχείο test.txt καταγράφει δεδομένα σε τέσσερις στήλες: στροφές (rpm), ροπή (mNm), ταχύτητα αέρα (m/s) και το ποσοστό του φρένου (%).

10.2 Επεξεργασία Μετρήσεων

Έχοντας τις μετρήσεις της ροπής και των στροφών μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ με βάση τον τύπο: $P = M * \omega$ όπου $\omega = \frac{2*\pi*N}{60}$

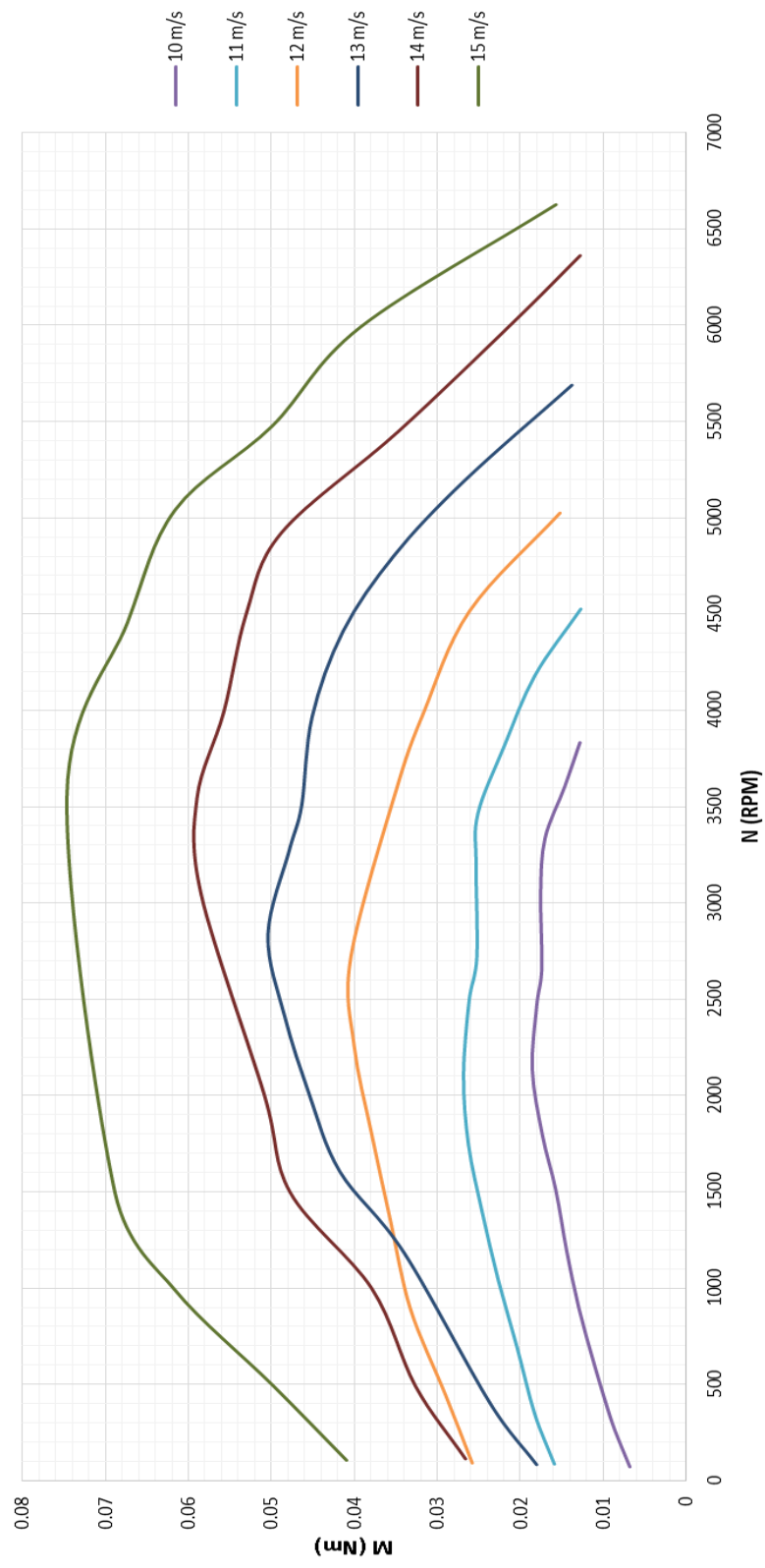
Τέλος υπολογίζουμε τον συντελεστή ισχύος με βάση τον τύπο:

$$Cp = \frac{2P}{\rho * A * V^3}$$

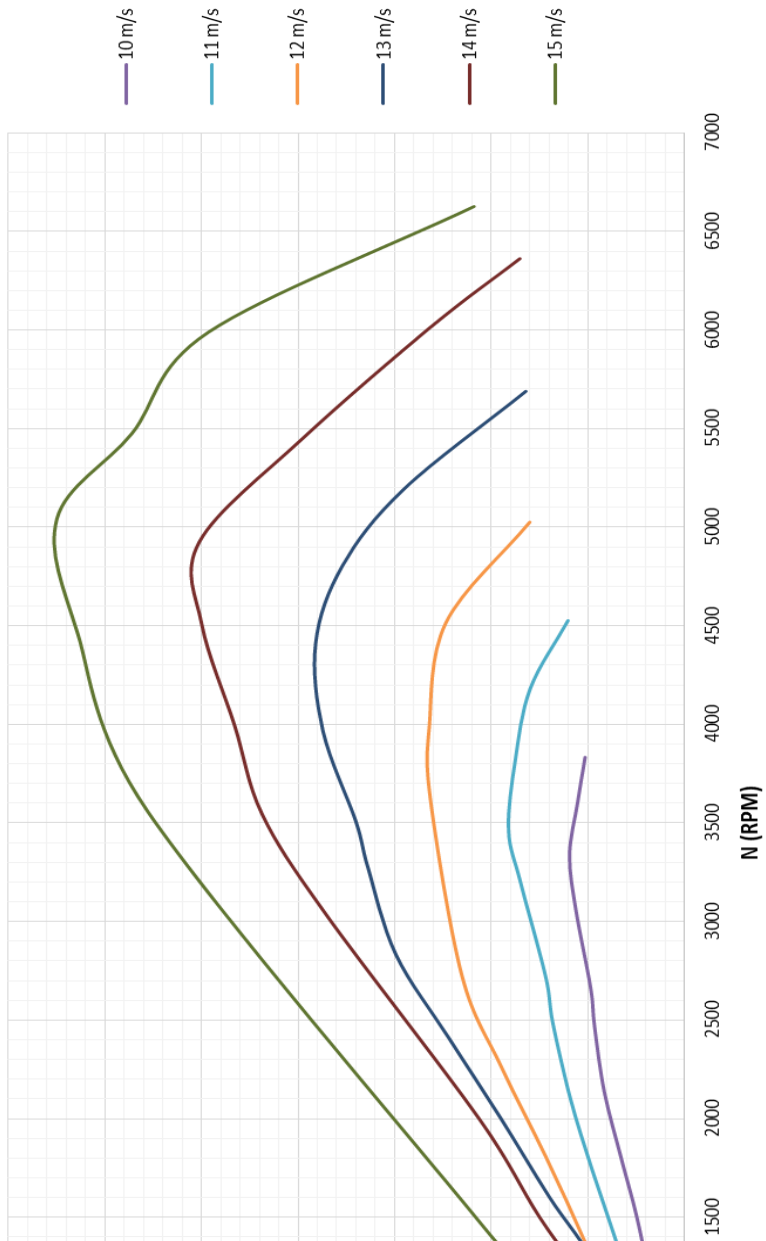
10.3 Πειραματικά Διαγράμματα

Η ταχύτητα εκκίνησης της πτερύγωσης που μελετήθηκε είναι τα 6 m/s αλλά από 10 m/s και άνω κρίθηκαν ποιοτικές οι μετρήσεις. Ακολουθούν τα διαγράμματα ροπής (Nm) και ισχύος (W) συναρτήση των στροφών του άξονα (Rpm), για ταχύτητες αέρα από 10 έως 15 m/s. Όλες οι μετρήσεις που παρουσιάζονται έγιναν με τη μετρητική διάταξη version 1.

Ροπή στο 10 έως 15 m/s



Ισχύς από 10 έως 15 m/s



11. Παραρτήματα

11.1 Παράρτημα 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ρολόμετρου

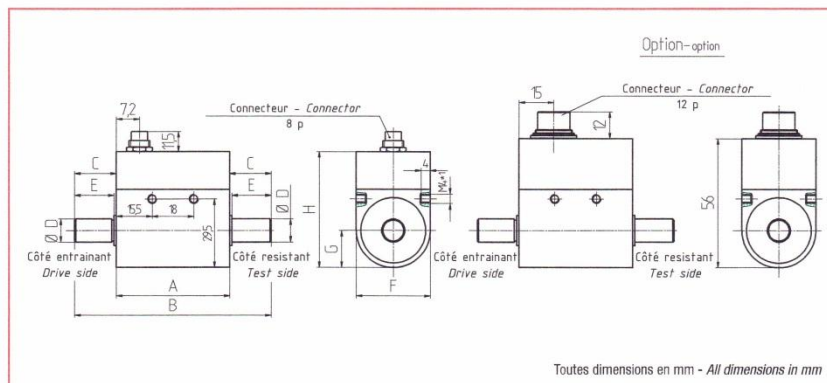
Capteurs de Couple - Rotatif
Rotatif Torque Sensor

DR2112-DR2112L

0.1 Nm ... 20 000 Nm



- Transmission digitale du signal, sans contact
- Maintenance réduite (pas de balais)
- Fréquence de rafraichissement élevée (10 KHz)
- Signal de sortie haut niveau ($\pm 5 V$) ou numérique (RS485)
- Grande précision
- Contactless digital signal transmission
- Few needs for maintenance
- High refreshing rate (10 KHz)
- Active output signal ($\pm 5 V$)
- High accuracy



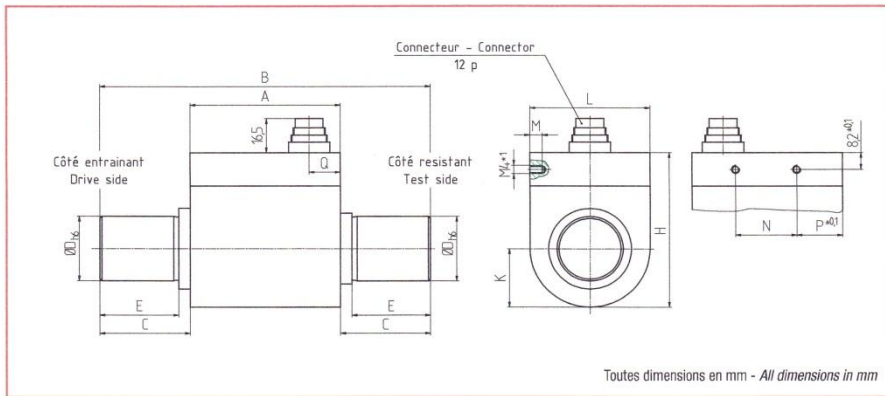
Couple Nominal (C.N.) Nominal Torque [Nm]	Dimensions Dimensions [mm]							
	A	B	C	D	E	F	G	H
0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5	49	85	18	8 g6	17	32	16	50
10, 15	49	85	18	10 g6	17	32	16	50

 **SCAIME**

DR2112-DR2112L

0.1 Nm ... 20 000 Nm

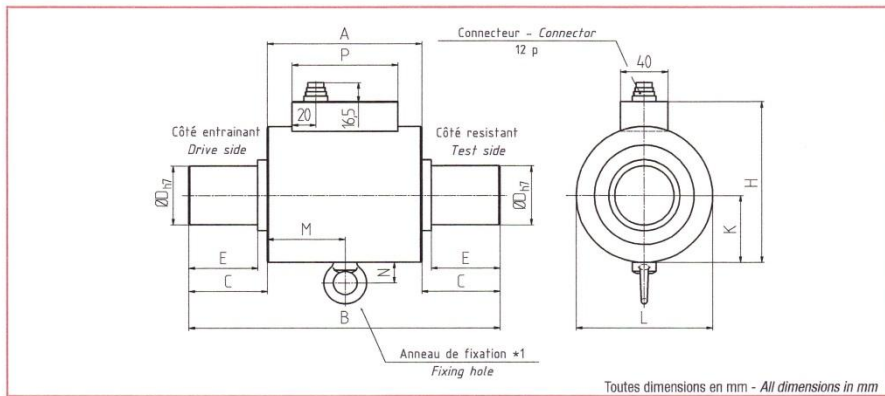
Capteurs de Couple - Rotatif Rotatif Torque Sensor



**Couple Nominal
(C.N.)**
Nominal Torque

Dimensions
Dimensions
[mm]

[Nm]	A	B	C	D	E	H	K	L	M	N	P	Q
20, 30	71.5	111.5	20	18 h6	18	59	20	40	5	41.5	15	12
50, 100	71.5	147.5	38	18 h6	36	59	20	40	5	41.5	15	12
200, 500	72.5	159.5	43.5	32 h6	38	76	29	58	6	29.5	22	15



*1 : Trous taraudés ou anneau de fixation pour système anti-rotation non rigide (ressort, fil, ...) - Threaded hole or fixing ring for non rigid antirotation system (spring, wire, ...)

**Couple Nominal
(C.N.)**
Nominal Torque
[Nm]

Dimensions
Dimensions
[mm]

[Nm]	A	B	C	D	E	H	K	L	M	N	P
1 000	130	362	66	50 h7	58	136	57.5	115	65.5	18	89
2 000*, 5 000*	135	377	121	70 h7	110	161	69.5	139	67.5	18	89
10 000*, 20 000*	170	450	140	110 h7	120	233	104	208	95	18	89

Nota : L'utilisation de deux accouplements est indispensable, ceux proposés par SCAME vous assurent fiabilité et performance - The use of two couplings is essential, those proposed by SCAME ensure you reliability and performance

* Valable uniquement pour DR2112 - Only available for DR2112

Caractéristiques Techniques - Technical specifications

Couple Nominal (C.N.) <i>Nominal Torque</i>	Vitesse de rotation max. <i>Max. Speed</i>	Raideur <i>Springrate</i>	Moment d'inertie <i>Moment of inertia</i>		Charge axiale max. <i>Max. thrust load</i>
			J en [kg m ²]		
[Nm]	[tr/min]	[Nm/rad]	Côté entraînant <i>Drive side</i>	Côté résistant <i>Test side</i>	[N]
0.1	15 000	1.0	1.9 x 10 ⁻⁶	0.28 x 10 ⁻⁶	15
0.2	15 000	1.0	1.9 x 10 ⁻⁶	0.28 x 10 ⁻⁶	20
0.5	15 000	9.9	1.9 x 10 ⁻⁶	0.28 x 10 ⁻⁶	30
1	15 000	9.9	1.9 x 10 ⁻⁶	0.28 x 10 ⁻⁶	40
2	15 000	360	1.9 x 10 ⁻⁵	0.29 x 10 ⁻⁶	50
5	15 000	650	1.9 x 10 ⁻⁶	0.30 x 10 ⁻⁶	50
10	15 000	850	2.1 x 10 ⁻⁶	0.39 x 10 ⁻⁶	50
15	15 000	850	2.1 x 10 ⁻⁶	0.39 x 10 ⁻⁶	100
20	15 000	4 500	12 x 10 ⁻⁶	9.9 x 10 ⁻⁶	300
30	15 000	4 500	12 x 10 ⁻⁶	9.9 x 10 ⁻⁶	1 000
50	15 000	8.5 x 10 ³	13 x 10 ⁻⁶	12 x 10 ⁻⁶	1 600
100	12 000	8.5 x 10 ³	13 x 10 ⁻⁶	12 x 10 ⁻⁶	2 600
200	10 000	67 x 10 ³	100 x 10 ⁻⁶	90 x 10 ⁻⁶	3 200
500	10 000	78 x 10 ³	100 x 10 ⁻⁶	92 x 10 ⁻⁶	7 500
1 000	7 000	310 x 10 ³	1.6 x 10 ⁻³	1.1 x 10 ⁻³	10 000
2 000*	5 500	0.72 x 10 ⁶	5.3 x 10 ⁻³	4.3 x 10 ⁻³	18 000
5 000*	5 500	0.8 x 10 ⁶	5.4 x 10 ⁻³	4.3 x 10 ⁻³	32 000
10 000*	5 000	1.2 x 10 ⁶	41 x 10 ⁻³	39 x 10 ⁻³	125 000
20 000*	5 000	2.1 x 10 ⁶	41 x 10 ⁻³	43 x 10 ⁻³	200 000

* Valable uniquement pour la série DR2112 - Only available for serie DR2112

Connexion électrique - Electric Connection

8 points			
Pin 1	+ alim.	+ excit.	12 ... 28 Vcc
Pin 2	- alim.	- excit.	0 Vcc
Pin 3	+ signal	+ signal	±5 V
Pin 4	- signal	- signal	0 V
Pin 5	Cran de calibration (100 % C.N.)	Calibration control	Niv. 0 : u < 2 V ; Niv. 1 : 3.5 V < u < 30 V
Pin 6	Impulsions voie A (option)	Angle A (option)	TTL
Pin 7	Impulsions voie B (option)	Angle B (option)	TTL
Pin 8	NC	NC	

12 points			
Pin A	NC	NC	
Pin B	Impulsions voie B (option)	Angle B (option)	TTL
Pin C	+ signal	+ signal	±5 V
Pin D	- signal	- signal	0 V
Pin E	- alim.	- excit.	0 Vcc
Pin F	+ alim.	+ excit.	12 ... 28 Vcc
Pin G	Impulsions voie A (option)	Angle A (option)	TTL
Pin H	NC	NC	
Pin J	- RS485 (option)	- RS485 (option)	
Pin K	Cran de calibration (100 % C.N.)	Calibration control	Niv. 0 : u < 2 V ; Niv. 1 : 3.5 V < u < 30 V
Pin L	+ RS485 (option)	+ RS485 (option)	
Pin M	Blindage	Housing	

DR2112-DR2112L

0.1 Nm ... 20 000 Nm

Capteurs de Couple - Rotatif Rotatif Torque Sensor



Caractéristiques - Specifications

MÉCANIQUES	MECHANICAL		
Couple Nominal (C.N.)	Nominal Torque (C.N.)	Voir page - See page 3	Nm
Couple de travail admissible	Service torque**	150	% C.N.
Couple ultime avant rupture	Ultimate torque	> 300	% C.N.
PRÉCISIONS	ACCURACY		
Classe de précision	Accuracy class	0.1 / 0.2*	% C.N.
Répétabilité	Repeatability	±0.02 / ±0.04*	% C.N.
Fréquence de rafraîchissement	Refreshing rate	10	KHz
Bande passante (-3 dB)	Cut off frequency (-3 dB)	1	KHz
ÉLECTRIQUES	ELECTRICAL		
Tension d'alimentation	Supply voltage	12 ... 28	Vcc
Courant d'alimentation	Supply current	< 60	mA
Signal de sortie	Output signal	±5	V
Courant de sortie max.	Output current max	5	mA
Principe de connexion	Connection type	C.N. ≤ 15Nm : 8p - C.N. ≥ 15Nm : 12p	
GÉNÉRALES	GENERAL		
Plage de température compensée	Nominal temperature range	+5 ... +45	°C
Plage de température opérationnelle	Service temperature range	0 ... +60	°C
Dérive thermique de sensibilité	Temperature coefficient of sensitivity	±0.01 / ±0.02*	% C.N./°C
Dérive thermique de zéro	Temperature coefficient of zero signal	±0.02 / ±0.03*	% C.N./°C
Degré de protection (DIN 40 050)	Protection level (DIN 40 050)	IP50	
Temps de réponse	Response time	200	µs

* pour DR2112L seulement - only available for DR2112L

** Attention : le signal de sortie sera en saturation en dessus de 110 %
the output signal will be saturated above 110 %

Options - Options

Signal de sortie	Output signal	±10	V
Mesure d'angle et de vitesse	Angle-speed control	-W : 2x360 impulsions - pulses 5V TTL 2 signaux à 90° (C.N. ≥ 2 000 Nm : -D : 1 signal : 60 pulses)	Sens horaire - CW-turn Voie A  Voie B 
C.N. spéciales	Special ranges		
Sortie numérique	Digital output	RS485	
Principe de connexion	Connection type	Connecteur 12p (C.N. ≤ 15Nm)	
Classe de précision DR2112	Accuracy class DR2112	0.05	% C.N.

Accessoires - Accessories



Accouplement



GM80-PA



PAX-D



BP501 - F 74105 Annemasse Cedex
Tél. : (+33) 4 50 87 78 64
Fax : (+33) 4 50 87 78 42
E.mail : info@scaime.com



Téléchargez tous
nos documents sur :
Download all
our documents from :
www.scaime.com

Agent

11.2 Παράρτημα 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά encoder



E4P

OEM Miniature Optical Kit Encoder

Page 1 of 8



Description

The E4P miniature encoder is designed to provide digital quadrature encoder feedback for high volume applications with limited space constraints. The E4P version utilizes an innovative, patented push-on codewheel which accepts shaft diameters of 1.5mm to .250".

The E4P encoder is the leader for high quantity OEM applications, but the E4 is the ideal choice when a set-screw codewheel encoder is required (see the E4 page).

The E4P miniature encoder base provides mounting holes for two #3-48, length 1/4" or two M2.5x.45mm, length 6mm screws on a .586" bolt circle. When mounting holes are not available, a pre-applied transfer adhesive (with peel-off backing) is available for "stick-on" mounting.

The encoder cover is easily snapped onto the base and is embossed with the connector pin-out.

The E4P series encoder can be connected by using a (high retention 4-conductor snap-in polarized 1.25mm pitch) connector. Mating cables and connectors (see the Cables / Connectors web page) are not included and are available separately.



Features

- ▶ Miniature size
- ▶ Push-on hub - spring loaded collet design
- ▶ Minimum shaft length of .375"
- ▶ Fits shaft diameters of .059" to .250"
- ▶ Accepts +/- .020" Axial shaft play
- ▶ Off-axis mounting tolerance of .010"
- ▶ 100 to 360 cycles per revolution (CPR)
- ▶ 400 to 1440 pulses per revolution (PPR)
- ▶ Single +5V supply

Related Products & Accessories

- ▶ CA-FC5-SH-MIC4 5-Pin Latching / 4-Pin Micro Shielded Cable (Base price \$15.18)
- ▶ CA-MD6-SS-MIC4 6-Pin Modular / 4-Pin Micro Silver Satin Cable (Base price \$11.53)
- ▶ CA-MIC4-SH-NC 4-Pin Micro / Unterminated Shielded Cable (Base price \$7.30)
- ▶ CA-MIC4-W4-NC 4-Pin Micro / Unterminated 4-Wire Discrete Cable (Base price \$6.80)
- ▶ CON-MIC4 4-Pin Micro Connector (Base price \$3.15)
- ▶ MCTOOL Centering Tool for E4, E4P, and E8P (Base price \$5.25)
- ▶ SPACER Spacer Tool (Base price \$0.95)

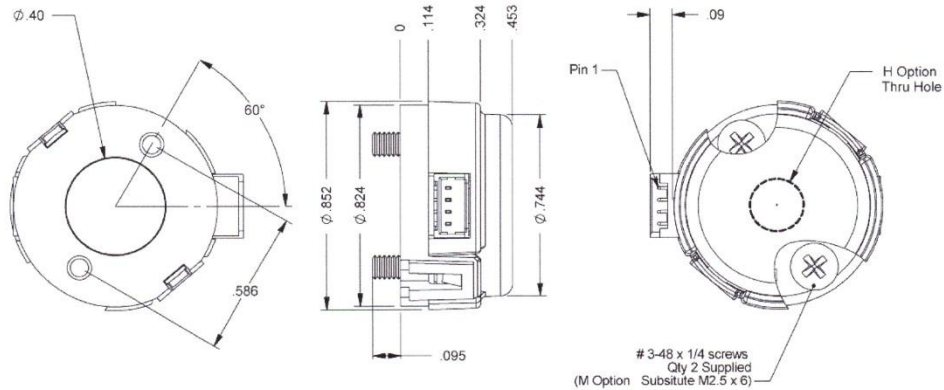
Mechanical Drawing



1400 NE 136th Avenue
Vancouver, Washington 98684, USA

info@usdigital.com
www.usdigital.com

Local: 360.260.2468
Toll-free: 800.736.0194



Mechanical

Parameter	Dimension	Units
Moment of Inertia	3.0×10^{-6}	oz-in-s ²
Mounting Screw Size	#3-48 x 1/4"	-
M-option Screw Size	M2.5x.45mm, length 6mm	-
Screw Bolt Circle Diameter	$.586 \pm .002$	in.
Required Shaft Length*	$.375$ to $.395$	in.
Axial Length Codewheel	$.270$	in.

* Includes axial play.

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Min.	Max.	Units
Vibration (5Hz to 2kHz)	-	20	G
Shaft Axial Play	-	$.020$	in.
Off-axis Mounting Tolerance	-	$.010$	in.
Acceleration	-	250,000	rad/sec ²
Maximum RPM e.x. CPR = 360, max. rpm = 10000 e.x. CPR = 100, max. rpm = 36000	-	minimum value of (3600000/CPR) and (60000)	rpm
Relative Humidity	-	90	%
Storage Temperature	-40	100	C

Parameter	Min.	Max.	Units
Operating Temperature	-20	100	C

▶ Note: 60000 rpm is the maximum rpm due to mechanical considerations. The maximum rpm due to the module's 60kHz maximum count frequency is (360000/CPR).

Phase Relationship

A leads B for clockwise shaft rotation, B leads A for counter clockwise shaft rotation viewed from the shaft/bushing side of the encoder (see the AEDR page).

Electrical

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Detector Supply Current	-	6	9	mA	
High Level Output Voltage	2.4	-	-	V	IOH = -1.2 mA
Low Level Output Voltage	-	-	0.4	V	IOL = 6.0 mA
Rise Time	-	500	-	ns	CL = 25pF, RL = 2.7kOhm
Fall Time	-	100	-	ns	
ESD	-	-	-	-	Human Body Model JESD22-A114-A Class 2 Machine Model JESD22-A115-A Class B

- ▶ Specifications apply over entire operating temperature range.
- ▶ Values are for the worst error over full rotation.
- ▶ Specifications are based on the AEDR module used in the product, together with 2.67k pull-ups on the quadrature outputs.

Torque

Parameter	Torque
Base to Mounting Surface	2-3 in.-lbs.

Options

H-option (Hole In Cover)

The H-option adds a hole in the cover for the shaft to pass through:

- ▶ For shaft diameters of 1.5mm to 1/8", a 0.170" hole is supplied.
- ▶ For shaft diameters of 5/32" to 1/4", a 0.295" hole is supplied.

L-option (Low Power Strobe)

To reduce the average power requirements, the L-option version of the E4P power can be strobed on just long enough to sample outputs A and B. This option is the same as our standard E4P, except the internal power bypass capacitor is not installed. The outputs settling time is typically 200 to 400 nano seconds after power up. The minimum sample frequency must be less than the maximum RPM X the CPR / 10.

M-option (Metric Mounting Screws)

Provides alternate metric M2.5x.45mm, length 6mm screws. When M-option is NOT specified the default is #3-48 x 1/4" screws.

T-option (Transfer Adhesive)

When mounting holes are not available, a pre-applied transfer adhesive (with peel-off backing) is available for "stick-on" mounting. Use the centering tool (above) to position the base. T-option specifies transfer adhesive.

Before installation, cleaning the mounting surface with alcohol is recommended to remove dust and oil.

 **Accessories**

Centering Tool

Part #: MCTOOL - (Shaft Diameter*)

Description:This reusable tool provides a simple method for accurately centering the E4Pbase onto the shaft.

Material:Aluminum.

Please note:A centering tool is highly recommended when using the T-option transfer adhesive.

* See Ordering Information below for available Shaft Diameters.

Spacer Tool



Part #: SPACER-E4P

Description:This reusable tool is used to properly space the codewheel from the encoder base. Provides air gap of 0.07" to 0.03".

Material:Polycarbonate.

Please note:Each order includes at least one spacer tool per 100 encoders.

 **Pin-out**

Pin	Description
1	+5VDC power

Pin	Description
2	A channel
3	Ground
4	B channel

Assembly Instructions

View the PDF version of this document.



1. Base Mounting

Place base onto shaft. Secure base to mounting surface using two screws.

Transfer Adhesive: Peel off paper backing, place centering tool into center hole of base, slip centering tool onto shaft and slide base and centering tool down onto mounting surface as one piece. Press to form a good bond, then slip centering tool off shaft and continue with standard mounting instructions.



2. Codewheel Placement

Place codewheel onto shaft with pattern-side down towards base.



3. Codewheel Installation

Position spacer / installation tool onto codewheel. Spacer / installation tool provides an air gap of $0.07'' \pm 0.03''$. Press down firmly until tool bottoms out on base latching ears.

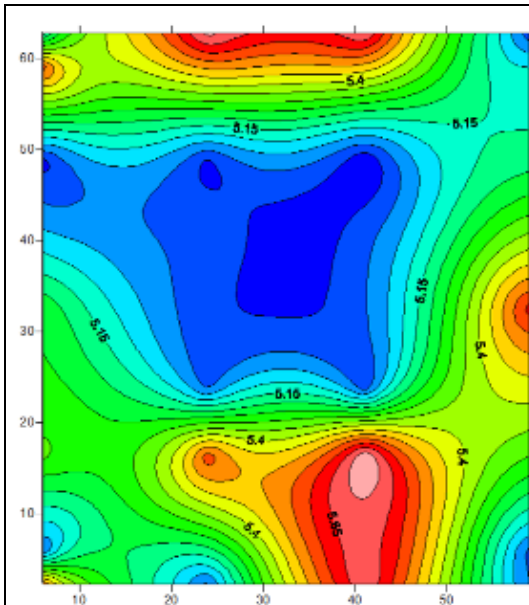


4. Cover Installation

Place housing (cover) on. With thumb and finger, squeeze ears together to insure that cover fully latches.

11.3 Παράρτημα 3: Δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του Αιολικού Εργαστηρίου του ΤΕΙ Κρήτης.

Ταχύτητα 5m/s

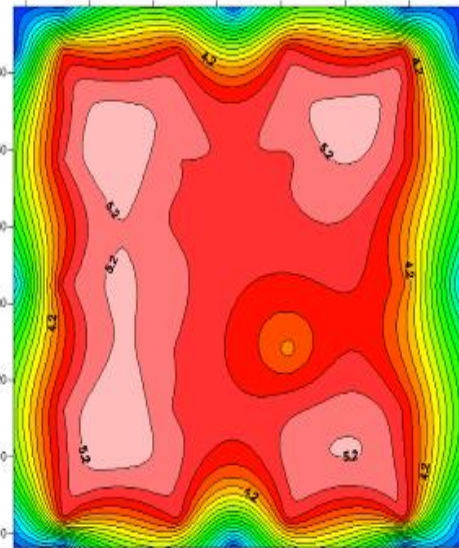


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.1%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

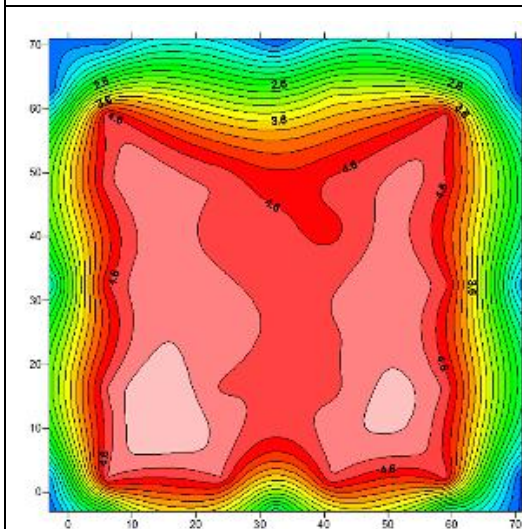


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

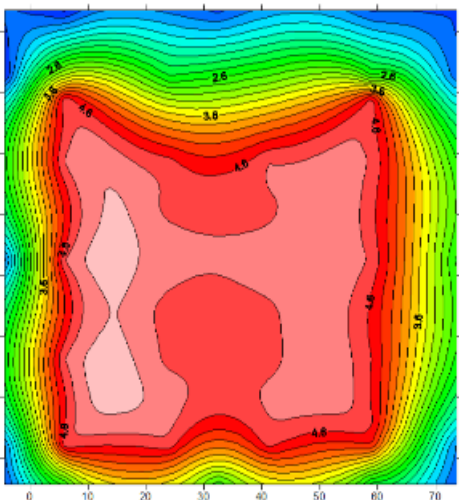


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.3%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.7%

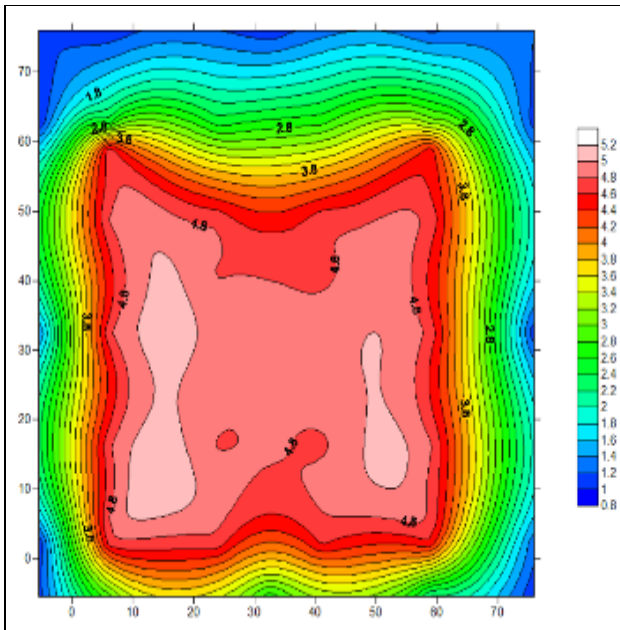


35cm

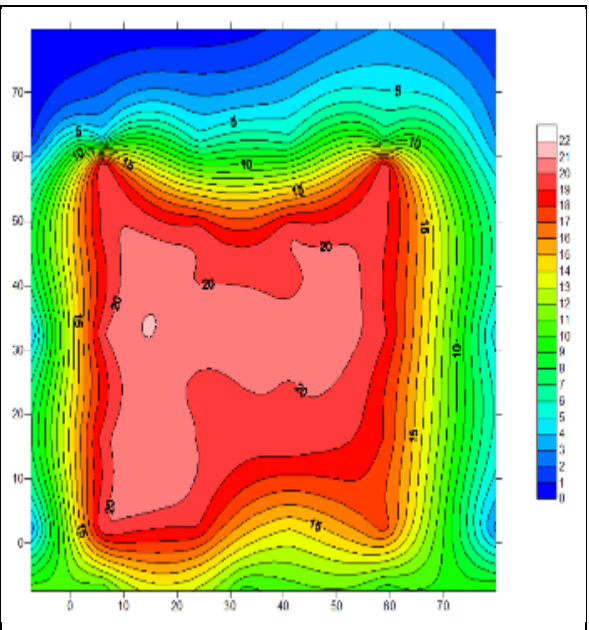
Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 7.1%

Κοντά στα τοιχώματα : 5.5%

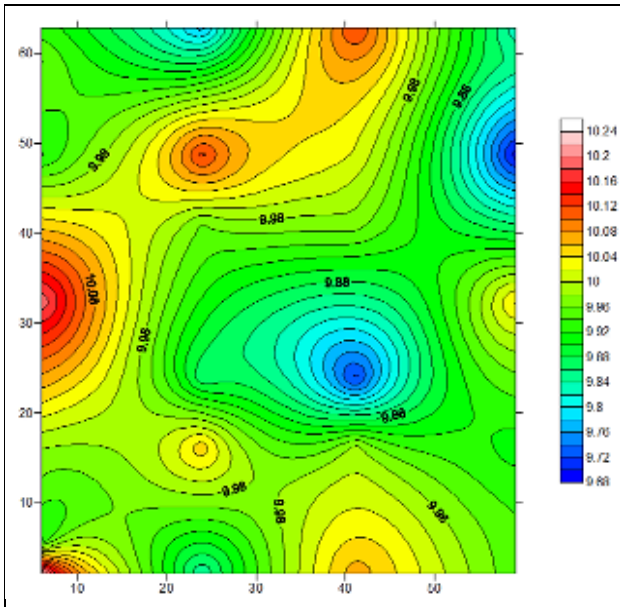


45cm
Ένταση Τύρβης :
Στο κέντρο : 5.9%
Κοντά στα τοιχώματα : 5.7%

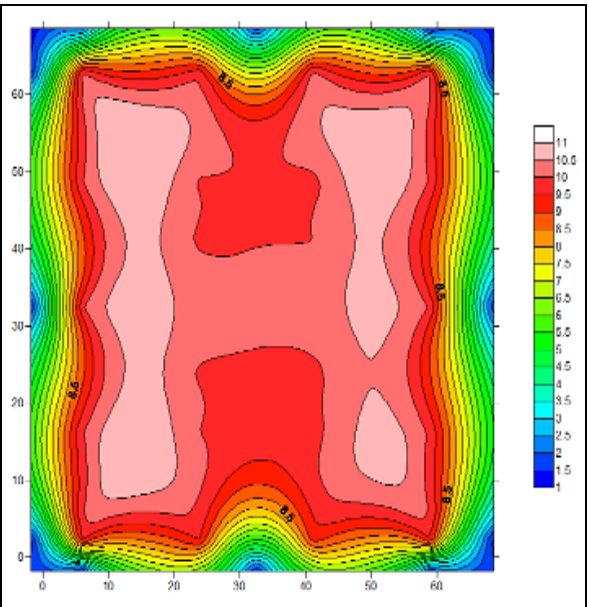


60cm
Ένταση Τύρβης :
Στο κέντρο : 5.5%
Κοντά στα τοιχώματα : 7%

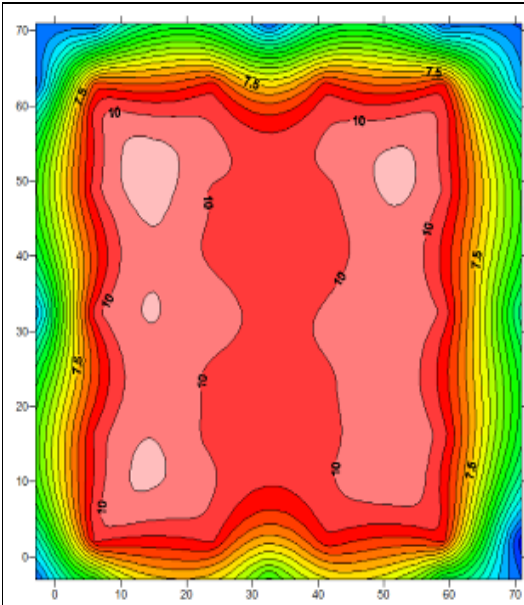
Ταχύτητα 10m/s



5cm
Ένταση Τύρβης :
Στο κέντρο : 2.2%
Κοντά στα τοιχώματα : 2.4%



15cm
Ένταση Τύρβης :
Στο κέντρο : 2.5%
Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

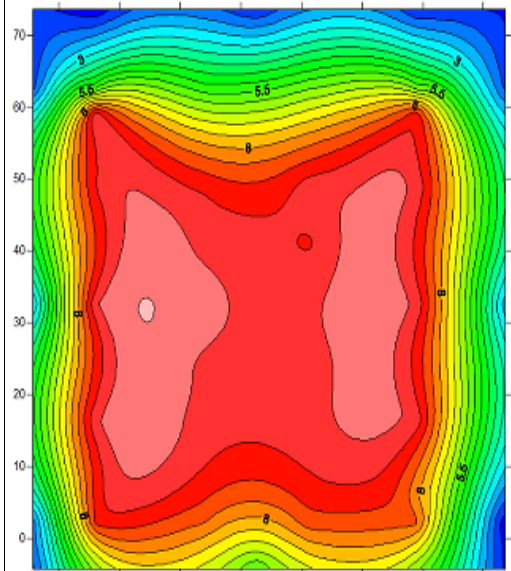


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.2%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.7%

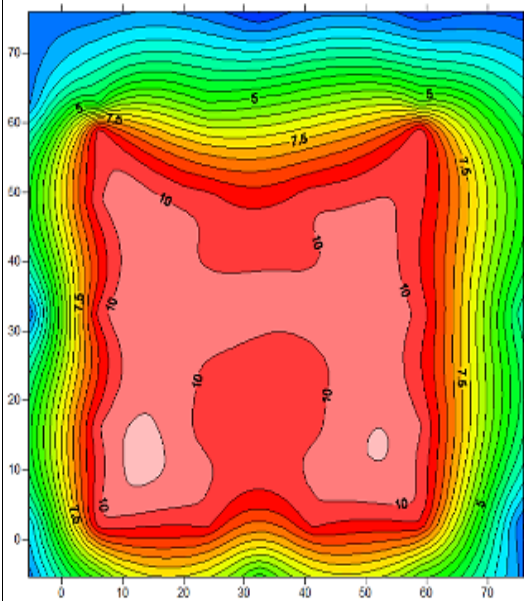


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.2%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.8%

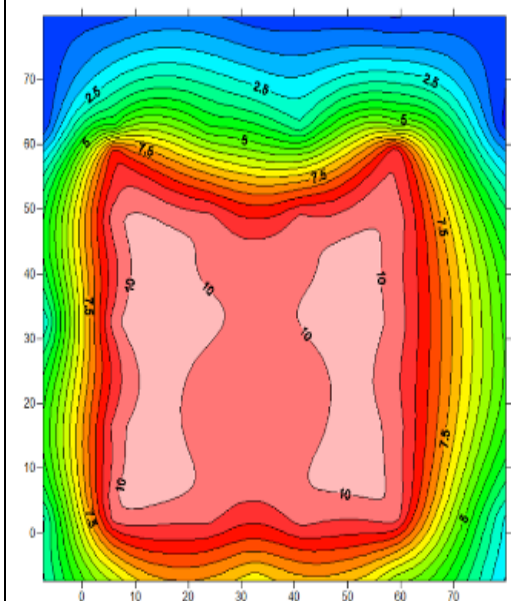


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.7%



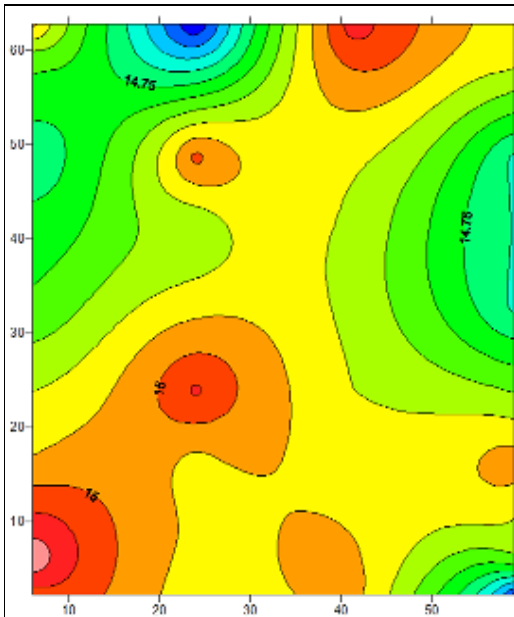
60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 4.3%

Ταχύτητα 15m/s

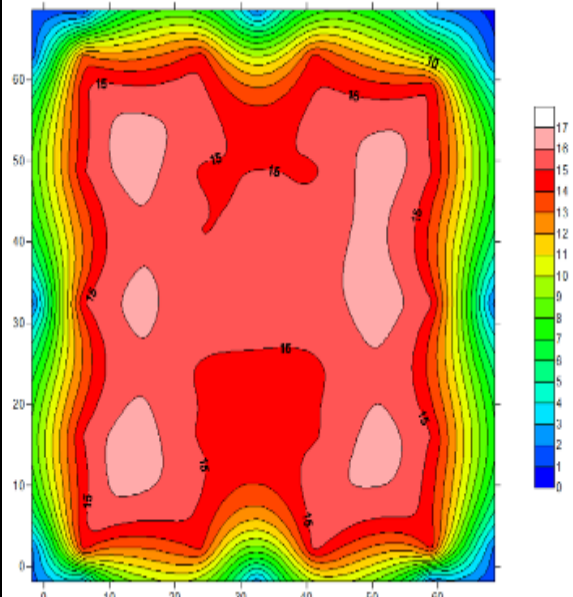


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.6%

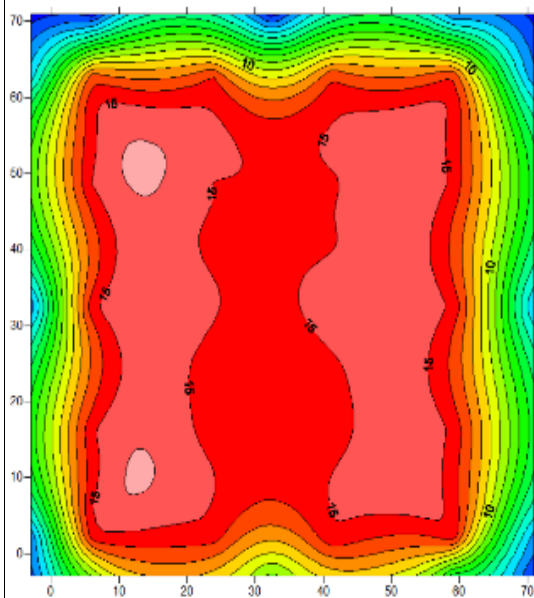


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

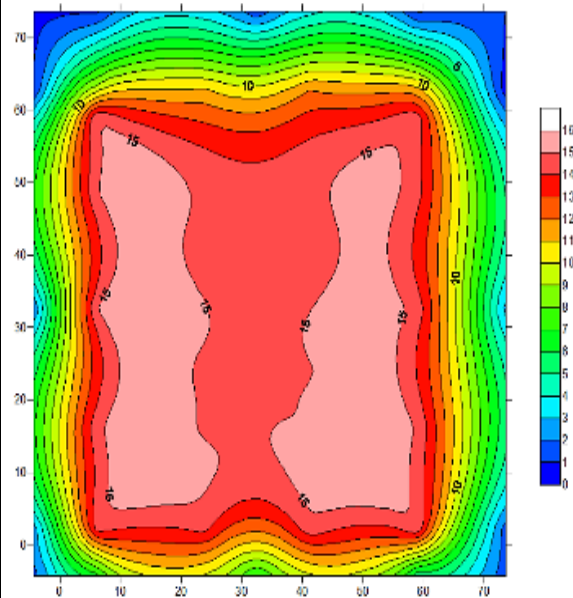


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

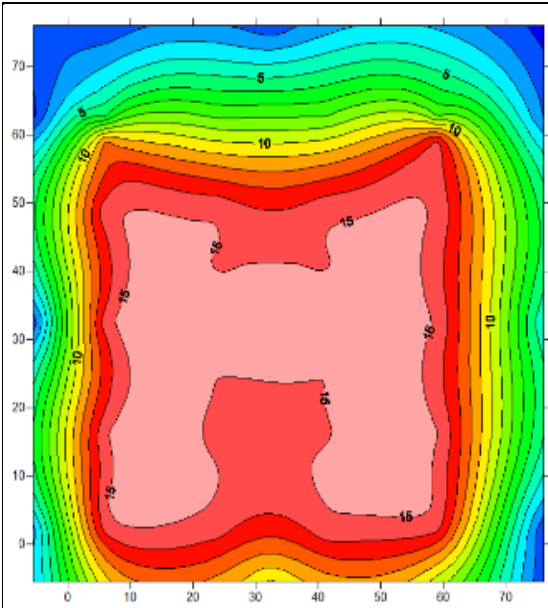


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

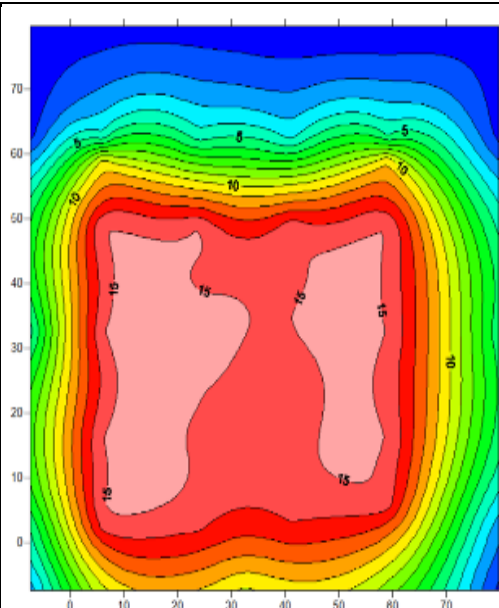


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.7%



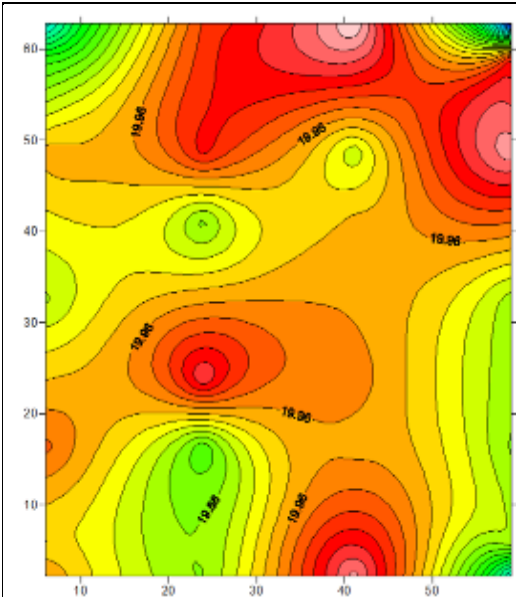
60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 3.3%

Ταχύτητα 20m/s

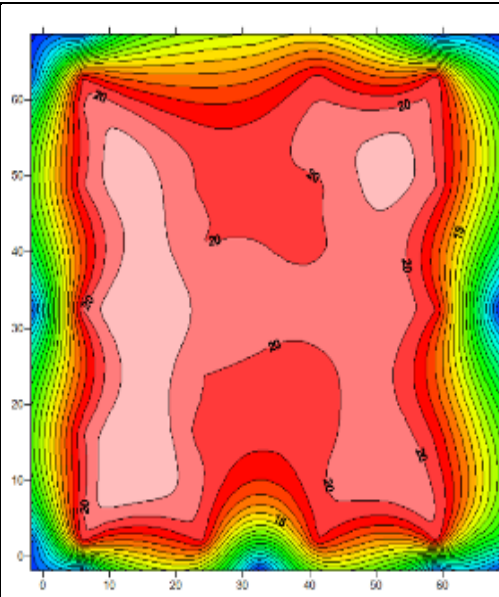


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.1%

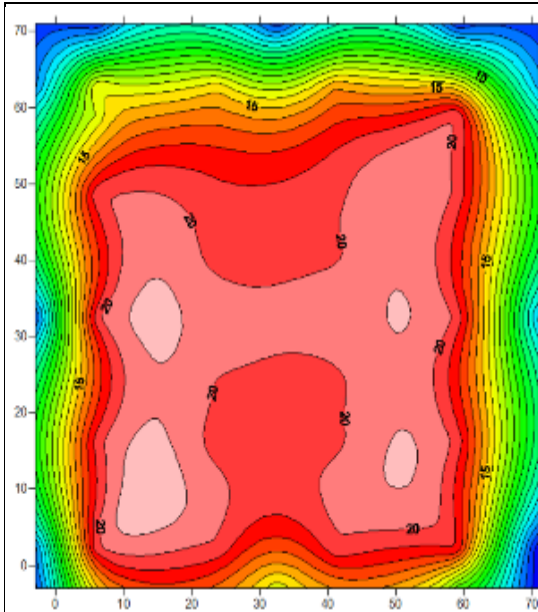


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.6%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.7%

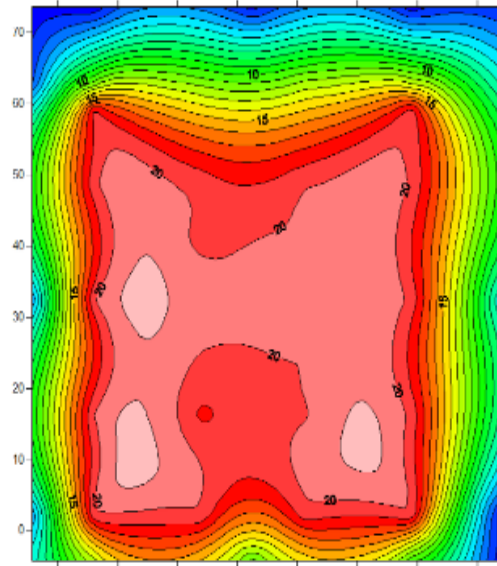


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.6%

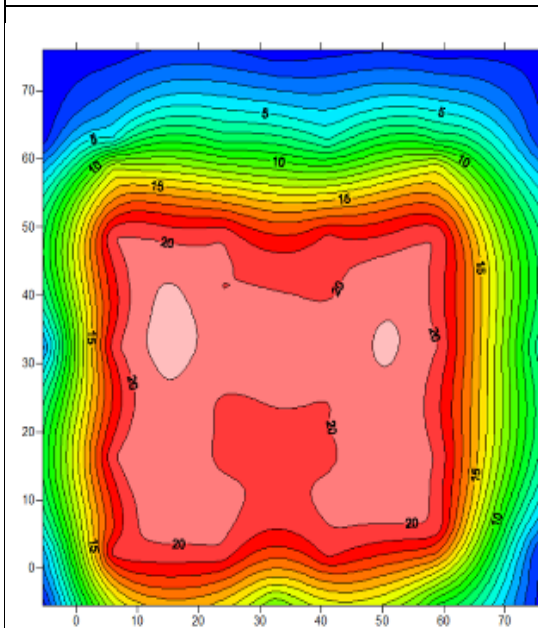


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.8%

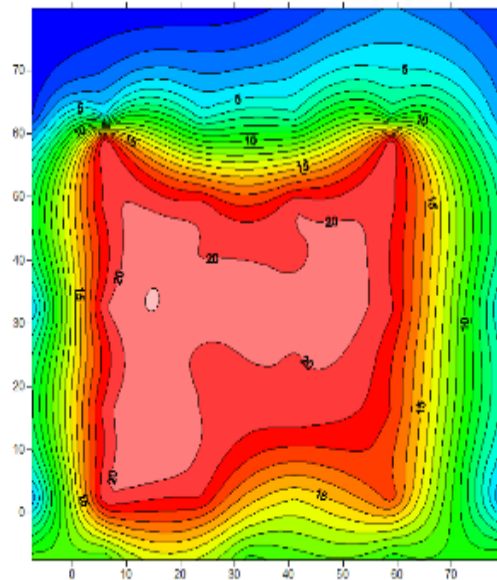


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.0%



60cm

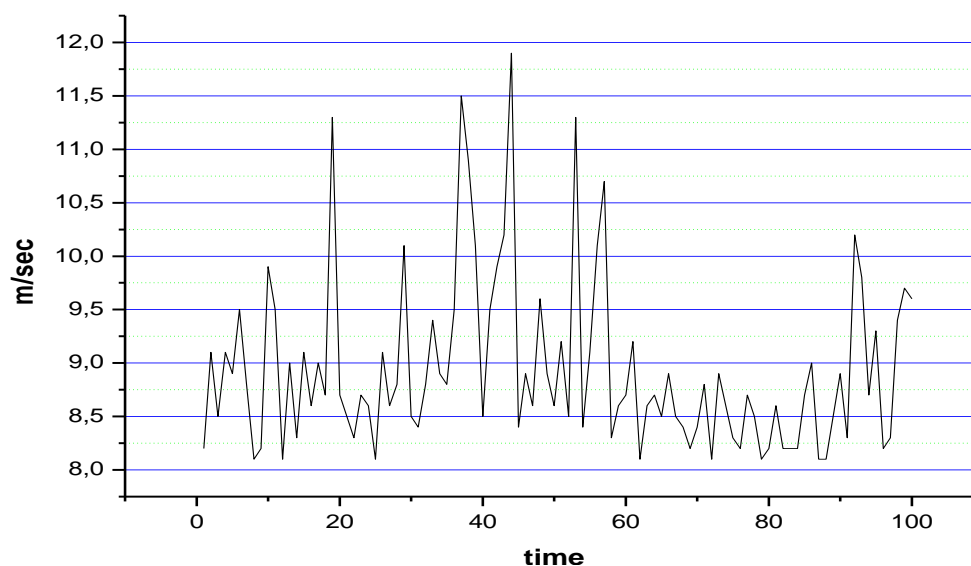
Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 3.3%

11.4 Παράρτημα 4: Τύρβη

Η ταχύτητα ανέμου ορίζεται συνήθως ως η σύνθεση μίας μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου σε ορισμένο χρονικό διάστημα και διαφόρων διακυμάνσεων.



11.4.1 Διακύμανση αέρα.

Αυτό που είναι εμφανές σε κάθε διακύμανση του ανέμου είναι ότι υπάρχει έλλειψη περιοδικότητας και δεν μπορεί να περιγραφεί με κάποιο αιτιοκρατικό τρόπο. Συνήθως η τύρβη περιγράφεται μέσω της στατιστικής επιστήμης που είναι σε θέση να αναλύσει τυχαία μεταβαλλόμενα συμβάντα.

Η τύρβη ορίζεται ως το άθροισμα όλων των διακυμάνσεων με συχνότητα μεγαλύτερη αυτής της μέσης τιμής ανέμου στο σταθερό κάθε φορά χρονικό διάστημα. Επομένως αποτελεί την απόκλιση της στιγμιαίας ταχύτητας $U_{(t)}$ από την μέση τιμή της ταχύτητας \bar{U} :

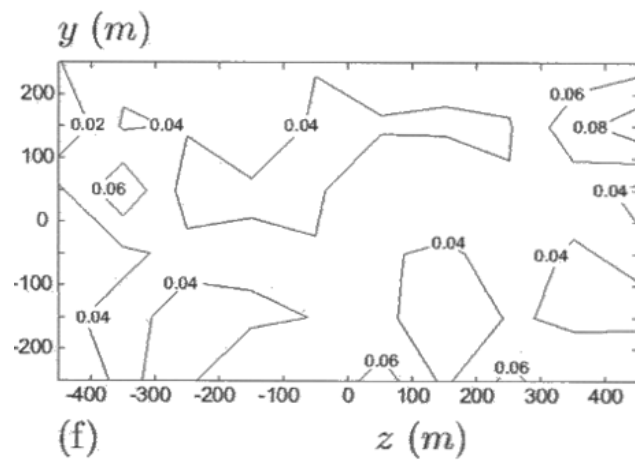
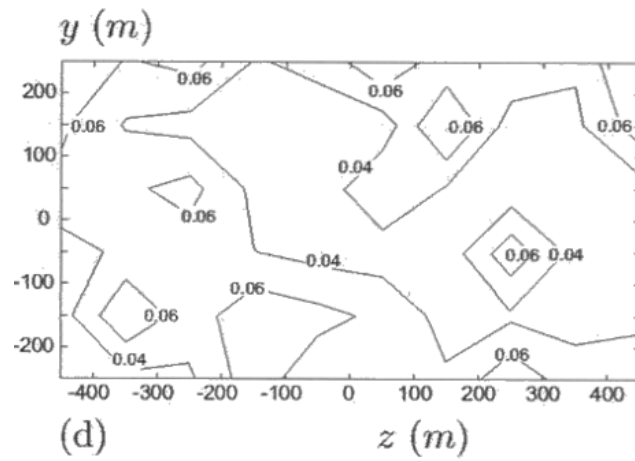
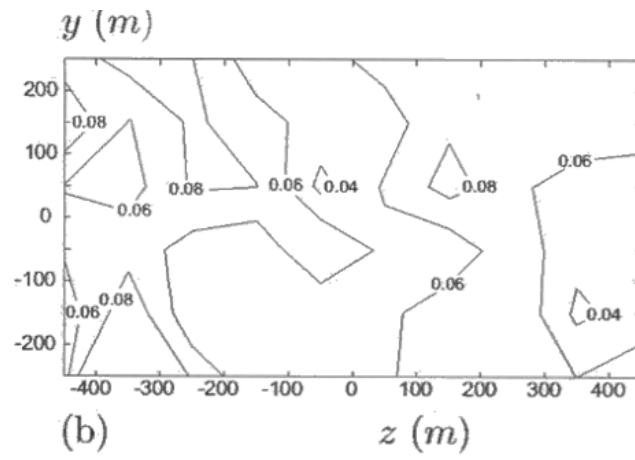
$$u_{(t)} = U_{(t)} - \bar{U}$$

Η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου περιγράφεται καλλίτερα με την μεταβολή σ_u^2 :

$$\sigma_u^2 = \overline{u^2} = \frac{1}{T} \times \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} [U_{(t)} - \bar{U}]^2 dt$$

Ένα μέτρο της εμφάνισης ριπών στον άνεμο είναι η ένταση της τύρβης I_w , μέγεθος αδιάστατο, που ορίζεται ως:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}$$



11.4.2 Μεταβολή της έντασης της τύρβης σε % ποσοστό σε ταχύτητες αέρα (a) 10 m/sec, (b) 25 m/sec, (c) 40 m/sec.

11.5 Παράρτημα 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά servo

Model: HS-645MG Ultra Torque

Control System: +Pulse Width Control 1500usec Neutral

Required Pulse: 3-5 Volt Peak to Peak Square Wave

Operating Voltage: 4.8-6.0 Volts

Operating Temperature Range: -20 to +60 Degree C

Operating Speed (4.8V): 0.24sec/60° at no load

Operating Speed (6.0V): 0.20sec/60° at no load

Stall Torque (4.8V): 106.93 oz/in. (7.7kg.cm)

Stall Torque (6.0V): 133.31 oz/in. (9.6kg.cm)

Operating Angle: 45 Deg. one side pulse traveling 400usec

Continuous Rotation Modifiable: Yes

Direction: Clockwise/Pulse Traveling 1500 to 1900usec

Current Drain (4.8V): 8.8mA/idle and 350mA no load operating

Current Drain (6.0V): 9.1mA/idle and 450mA no load operating

Dead Band Width: 8usec

Motor Type: 3 Pole Ferrite

Potentiometer Drive: Indirect Drive

Bearing Type: Dual Ball Bearing

Gear Type: 3 Metal Gears and 1 Resin Metal Gear

Connector Wire Length: 11.81" (300mm)

Dimensions: 1.59" x 0.77" x 1.48" (40.6 x 19.8 x 37.8mm)

Weight: 1.94oz. (55.2g)

11.6 Παράρτημα6: Τεχνικά χαρακτηριστικά load cell

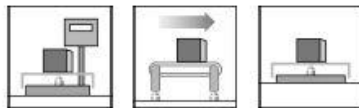
Data Sheet

SP4C3-MR

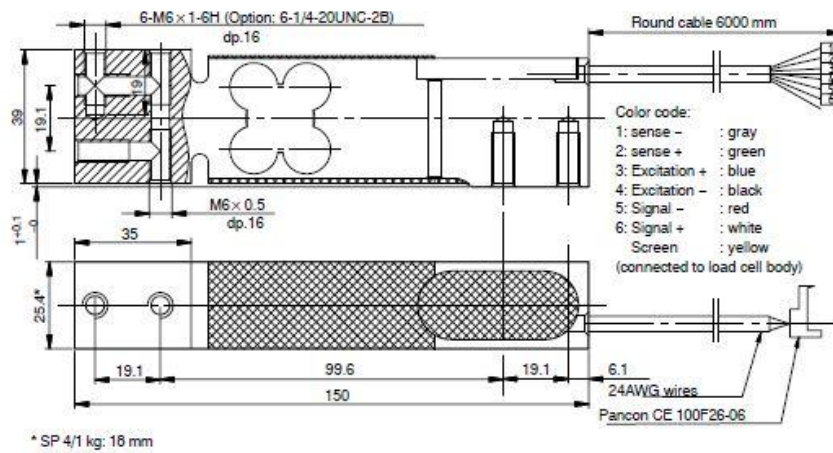
Single point load cell

Special features

- Accuracy class C3 according to OIML-R60 approval
- Off center load compensated (OIML R76)
- Protection class IP65 according to EN 60 529
- shielded connection cable



Dimensions (in mm; 1 mm= 0.03937 inches)



B1089-1.1 en



Specifications

Type		SP4C3-MR											
Accuracy class		C3MR											
Max. number of load cell intervals (n_{LC})		3000											
Maximum capacity (E_{max})	kg	1	3	5	7	10	15	20	30	50	75	100	200
Minimum LC verification interval (v_{min})	g	0.1	0.2	0.5	0.5	1	1	2	2	5	5	10	20
Temperature effect on zero balance (TK_0)	% of C_n / 10 K	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0100	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0093	± 0.0140	± 0.0140
Maximum platform size	mm	300 x 300				450 x 450				600 x 600			
Sensitivity (C_n)	mV/V	2.0 \pm 0.1 % (1 kg: 1.8 \pm 0.1 %)											
Zero balance	0 \pm 0.1												
Temperature effect on sensitivity (TK_C) ¹⁾	% of C_n / 10 K	± 0.017 (Reference value) ± 0.011 (Reference value)											
Temperature range +20 °C...+40 °C [+68 °F...+104 °F] -10 °C...+20 °C [+14 °F...+68 °F]													
Non-linearity (d_{lin}) ¹⁾		± 0.015 (typ.)											
Hysteresis error (d_{hy}) ¹⁾		± 0.015 (typ.)											
Minimum dead load output return (DR)		± 0.0166											
Off center load error ²⁾		± 0.0233											
Input resistance (R_{LC})	Ω	420 \pm 10											
Output resistance (R_0)		350 \pm 0.3											
Reference excitation voltage (U_{ref})		5											
Nominal range of excitation voltage (B_U)	V	0 ... 12											
Maximum excitation voltage		15											
Insulation resistance (R_{is}) at 100 V _{DC}	G Ω	>2											
Nominal temperature range (B_T)		-10 ... +40 [+14 ... +104]											
Operating temperature range (B_{tu})	°C [°F]	-20 ... +50 [-4 ... +122]											
Storage temperature range (B_{st})		-30 ... +70 [-22 ... +156]											
Safe load limit (E_L)		150											
Lateral load limit (E_{LQ}), static		300											
Breaking load (E_d)		300											
Material: Measuring element		Aluminium											
Coating		Silicone rubber											
Cable sheath		PVC											

¹⁾ The data of Non-linearity (d_{lin}), Hysteresis error (d_{hy}) and Temperature effect on sensitivity (TK_C) are typical values. the sum of these data meets the requirements according to OIML R60.

²⁾ All relative error specified refer to Sensitivity. Off center load error according to OIML R76 class III.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only. They are not to be understood as express warranty and do not constitute any liability whatsoever.

B1089-1.1 en

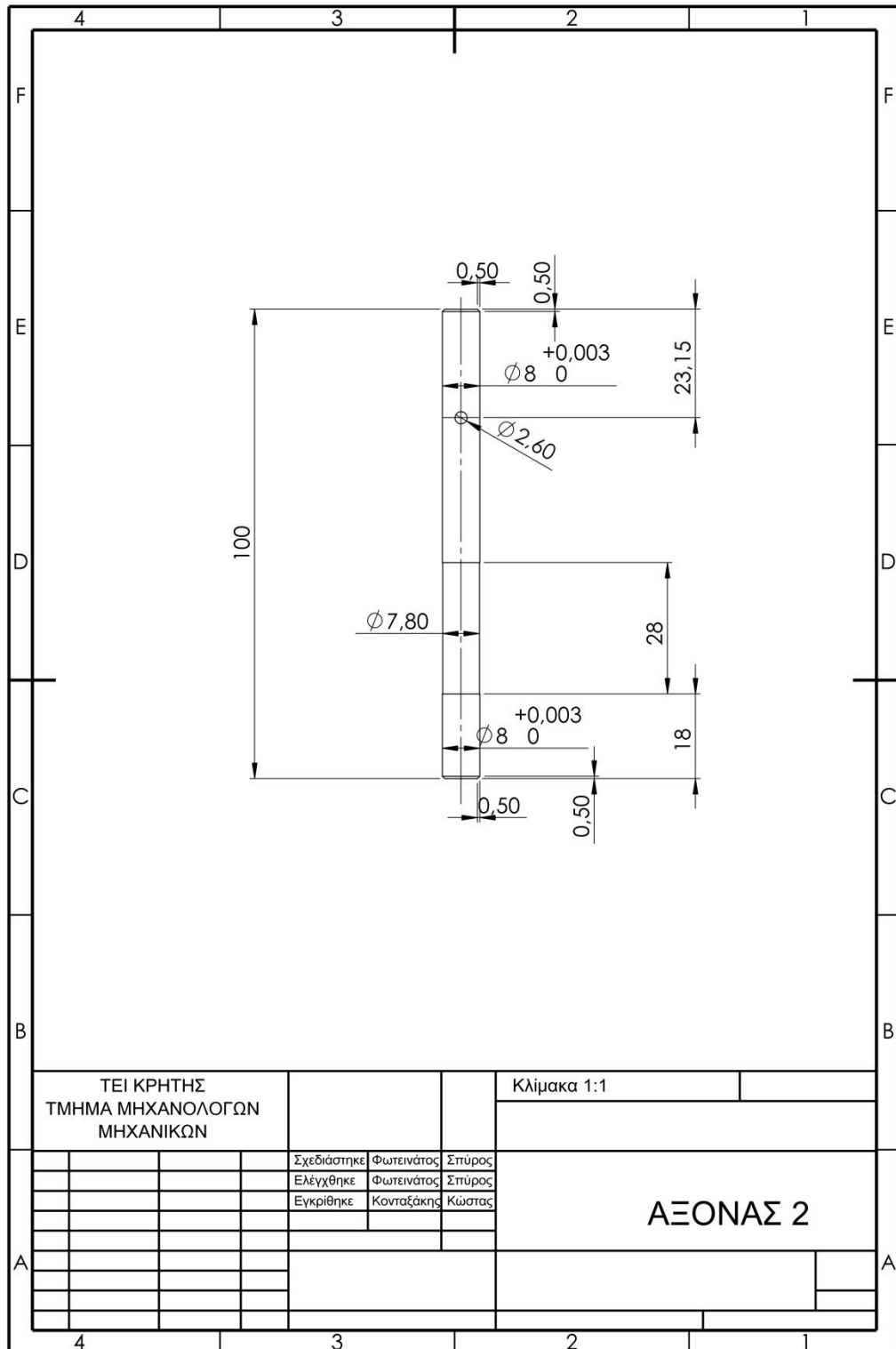
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH

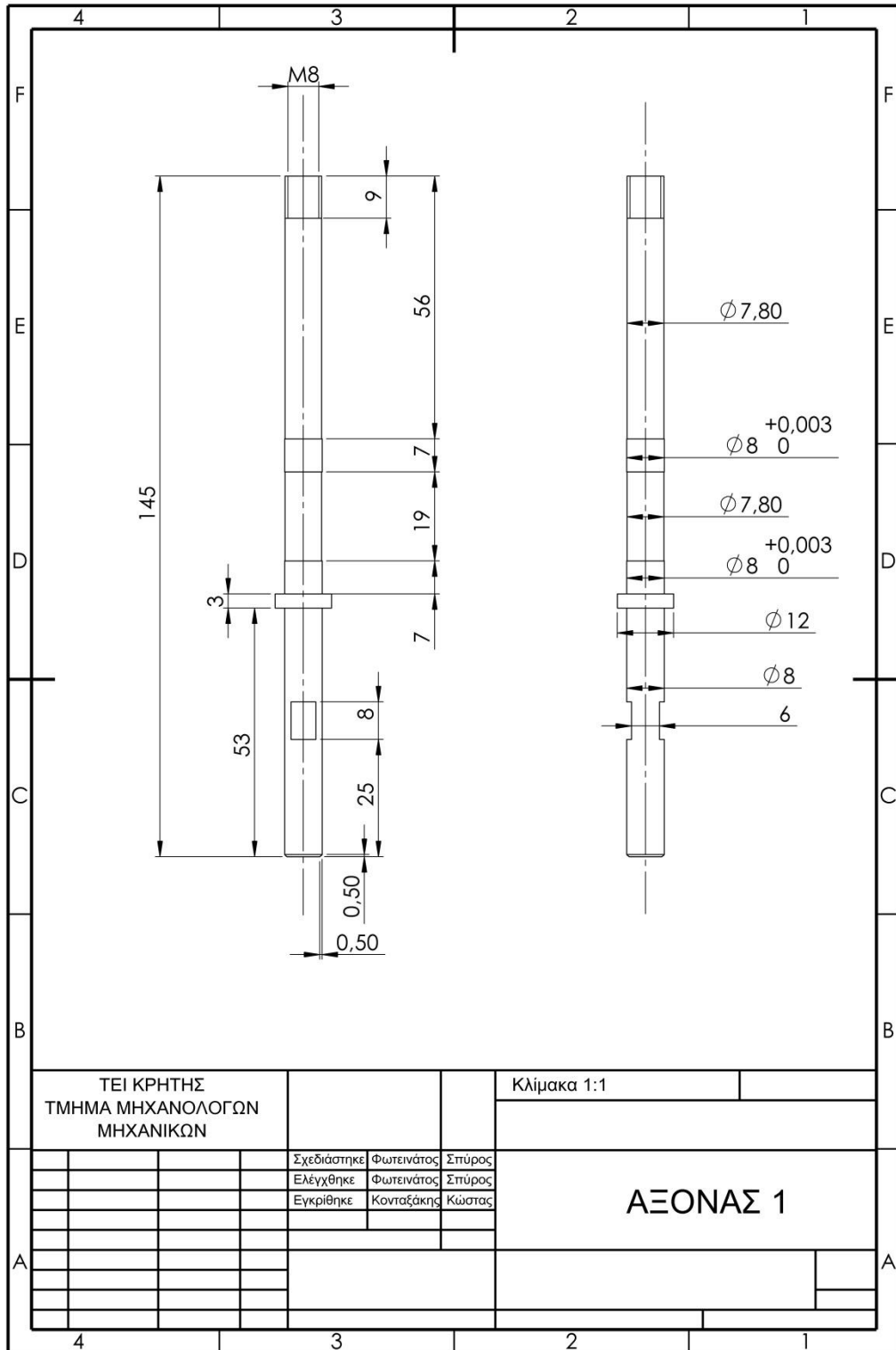
Im Tiefen See 45, D-64293 Darmstadt, Germany
Tel.: +49 6151 8030 Fax: +49 6151 803 9100
Email: support@hbm.com Internet: www.hbm.com

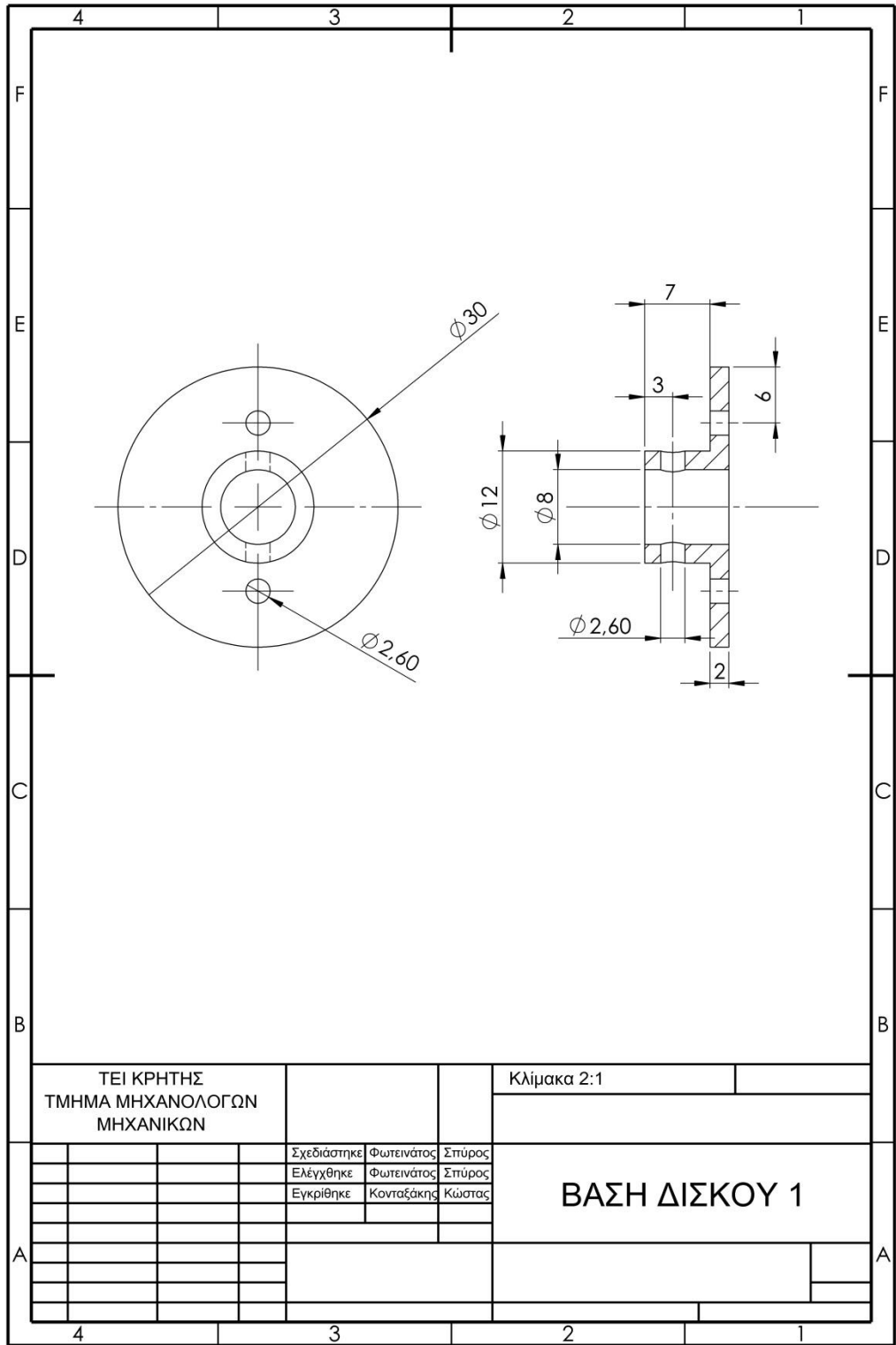


measurement with confidence

11.7 Παράρτημα7: Κατασκευαστικά σχέδια





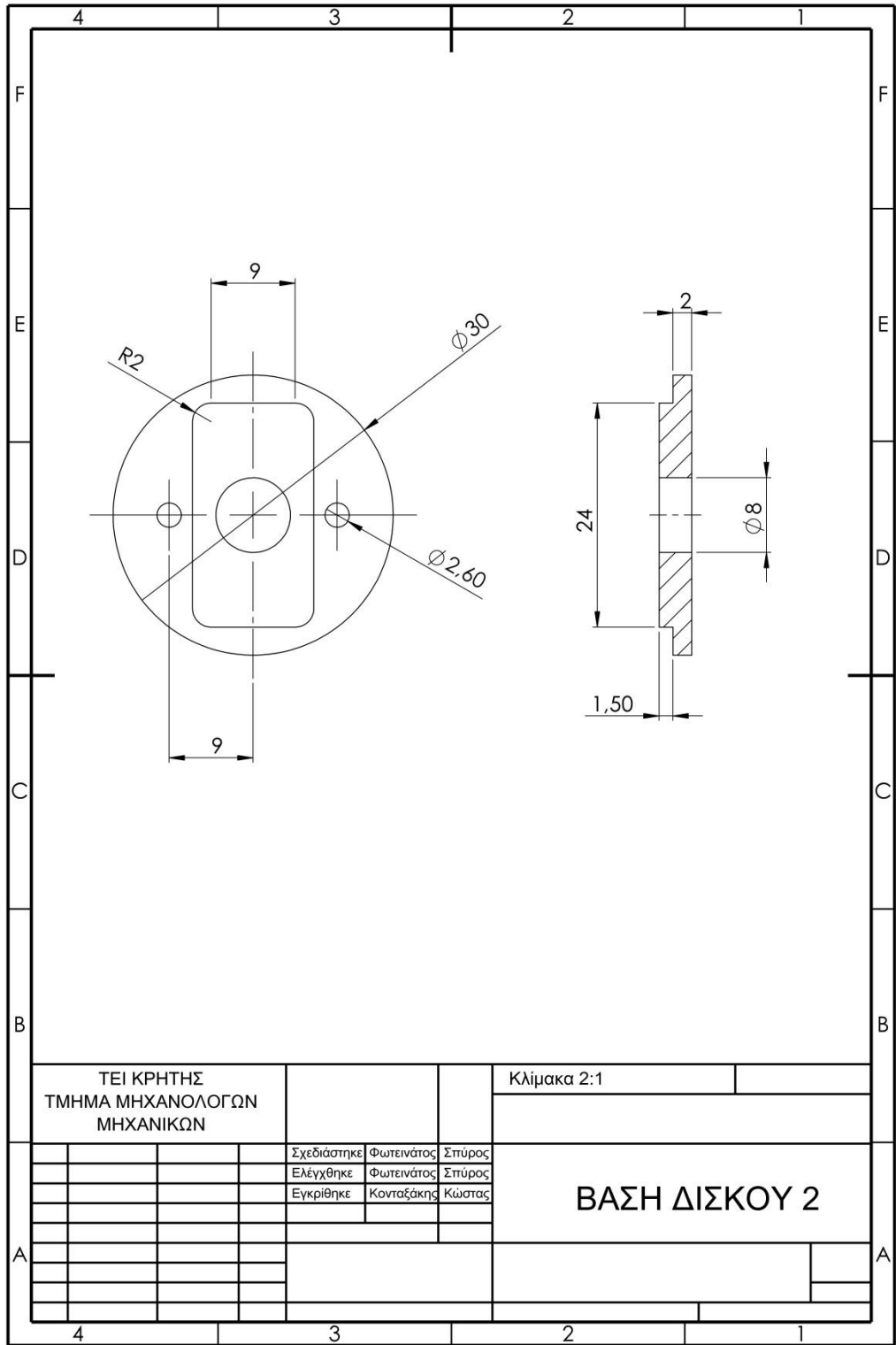


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΒΑΣΗ ΔΙΣΚΟΥ 1

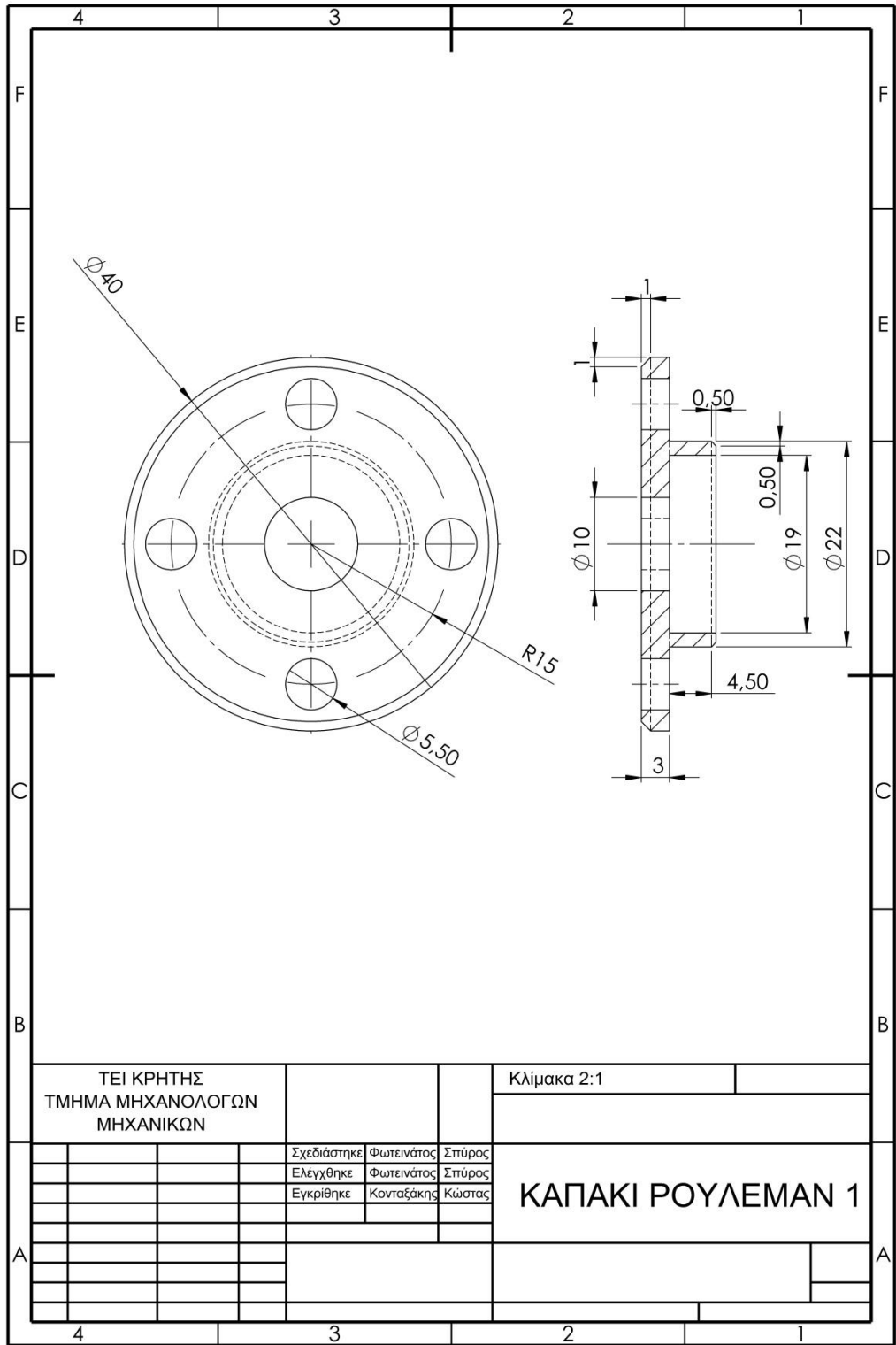


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΒΑΣΗ ΔΙΣΚΟΥ 2

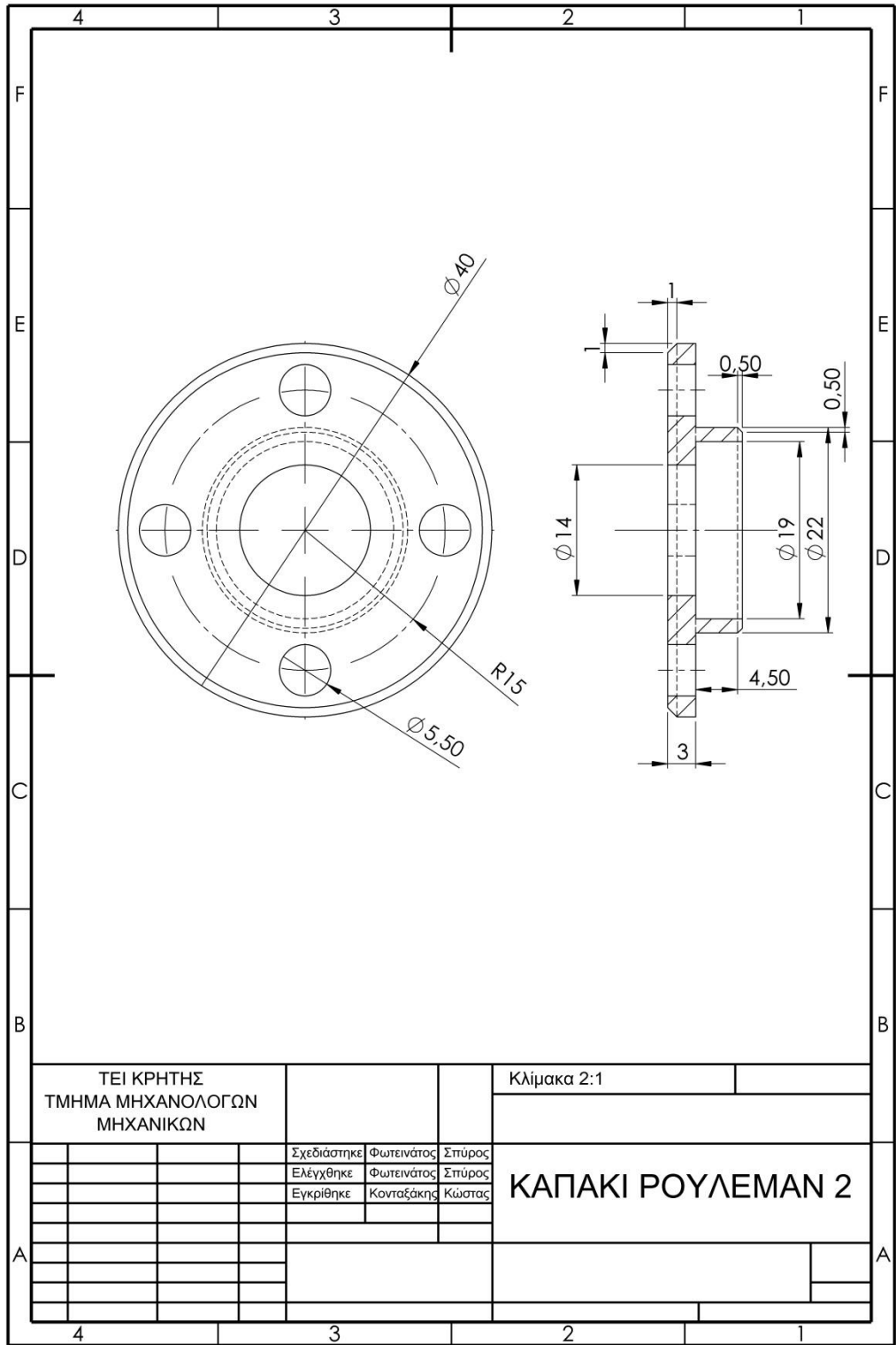


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΚΑΠΑΚΙ ΡΟΥΛΕΜΑΝ 1

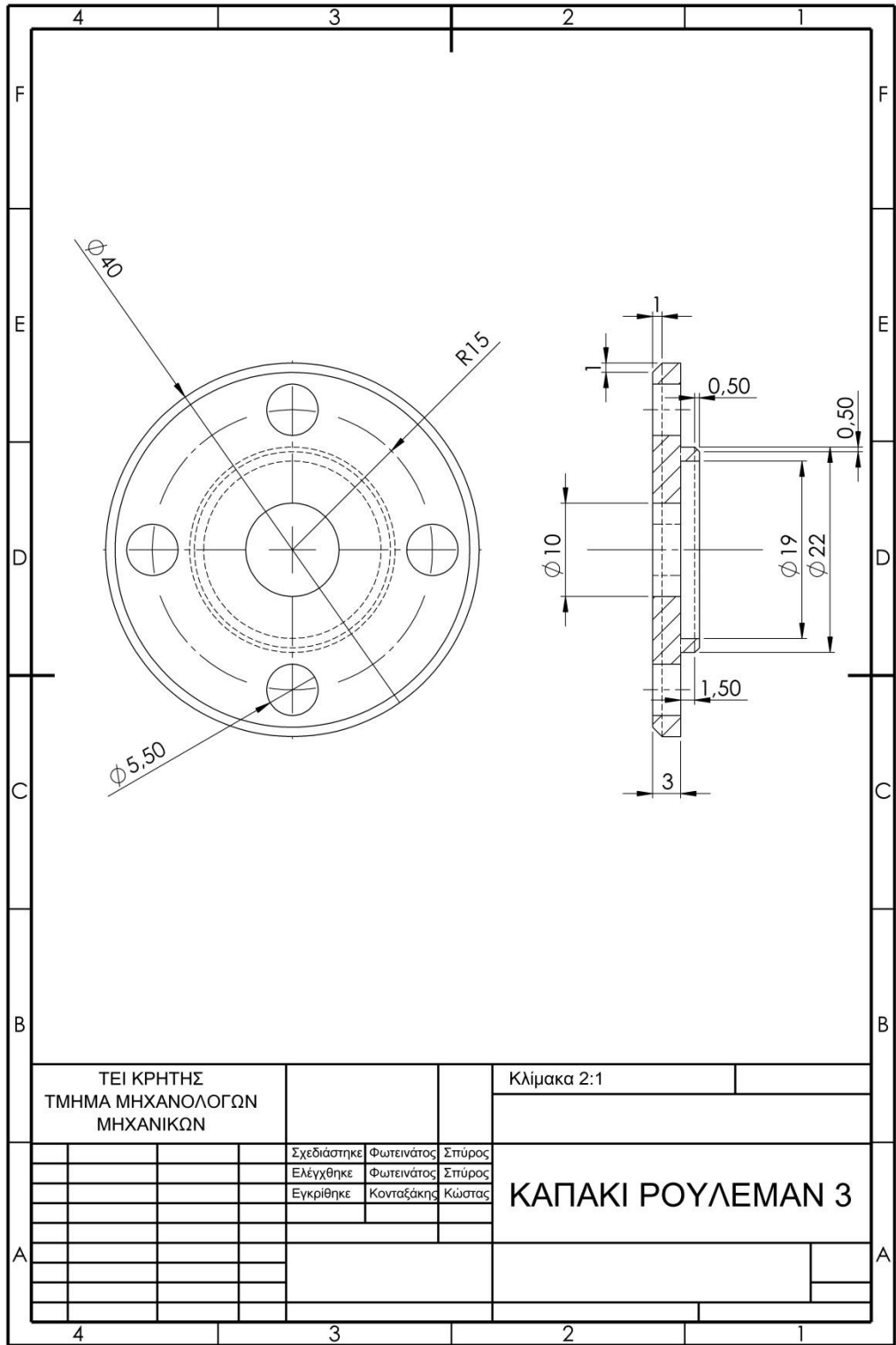


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΚΑΠΑΚΙ ΡΟΥΛΕΜΑΝ 2

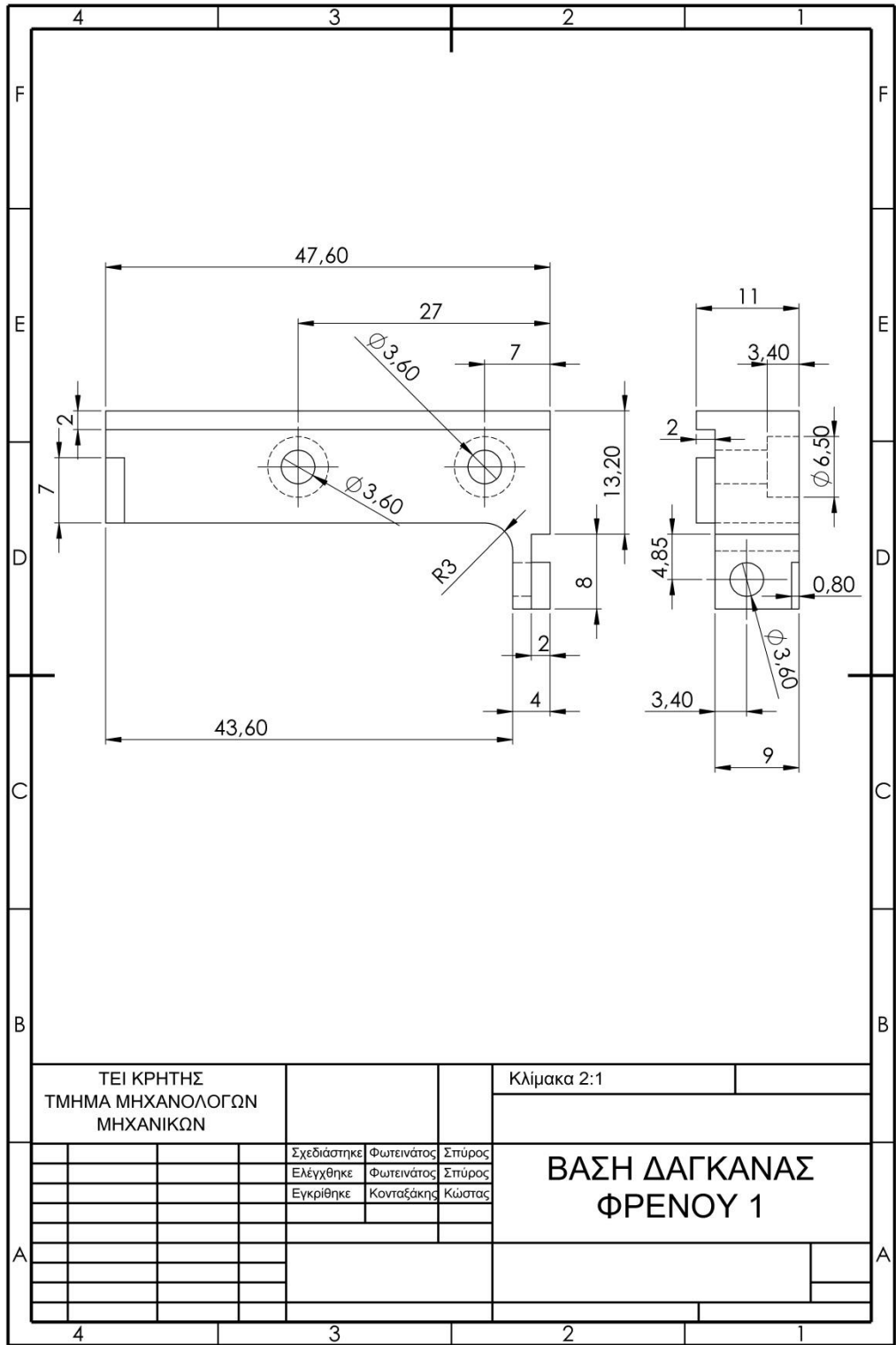


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΚΑΠΑΚΙ ΡΟΥΛΕΜΑΝ 3

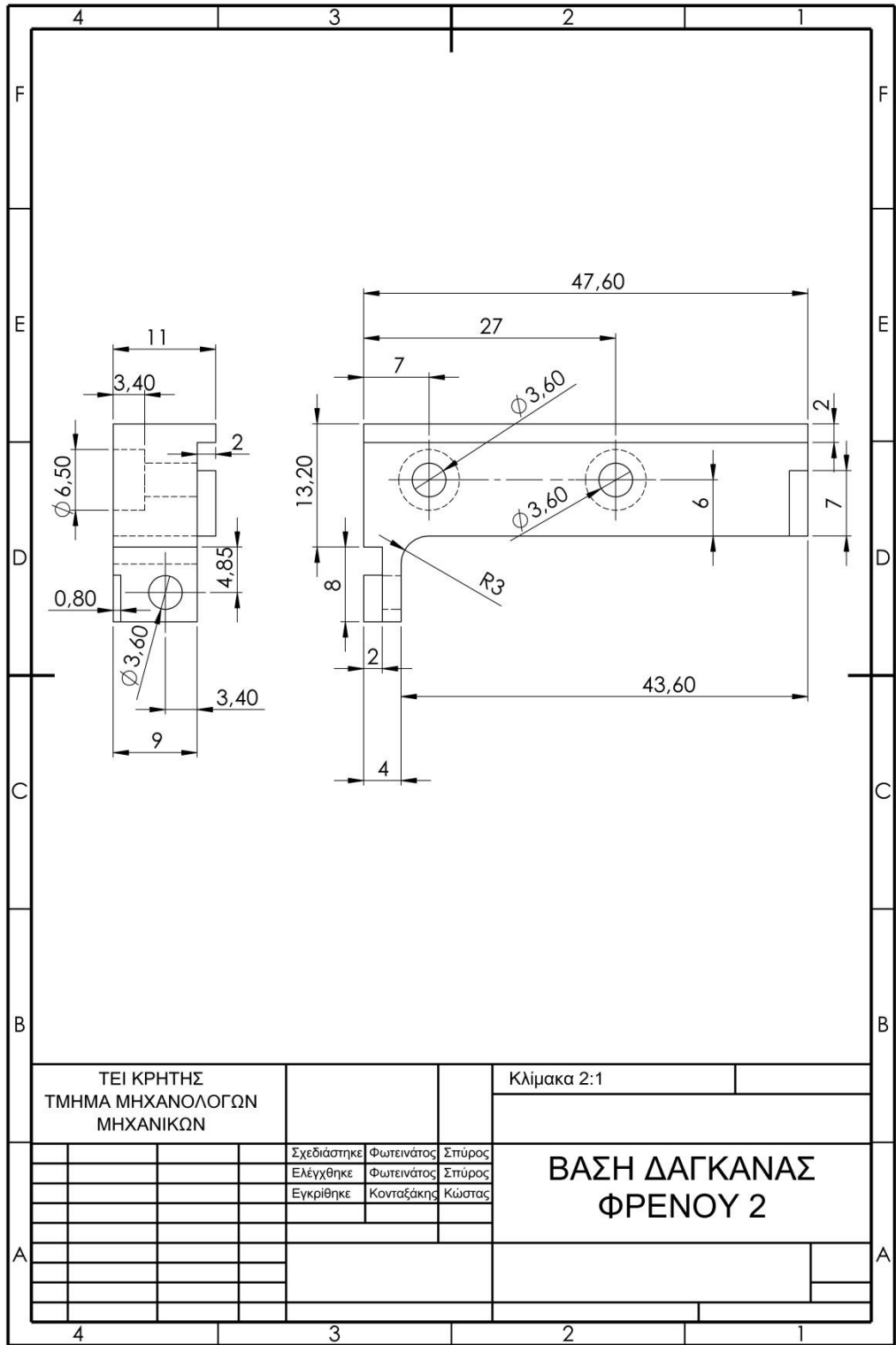


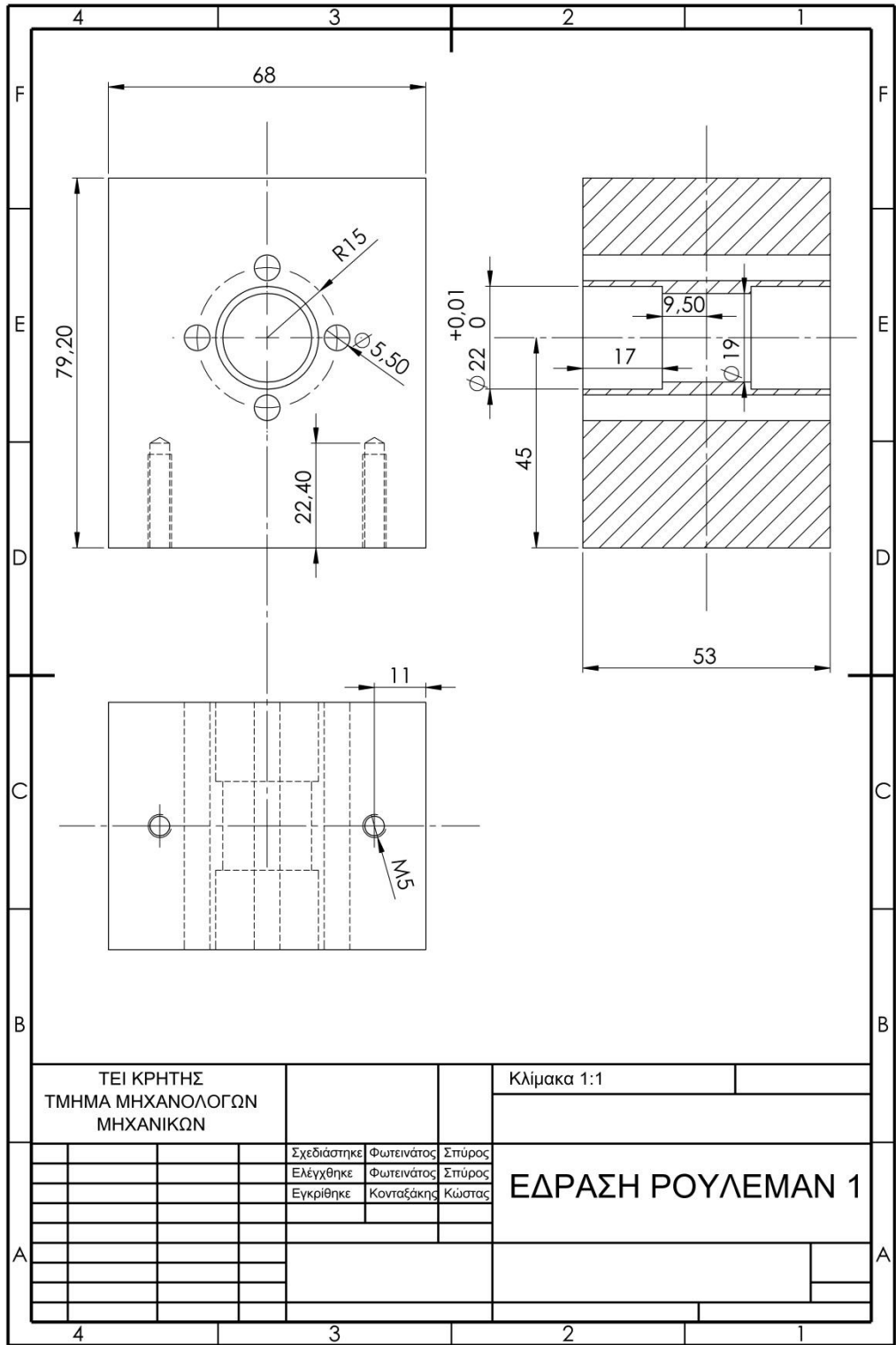
ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

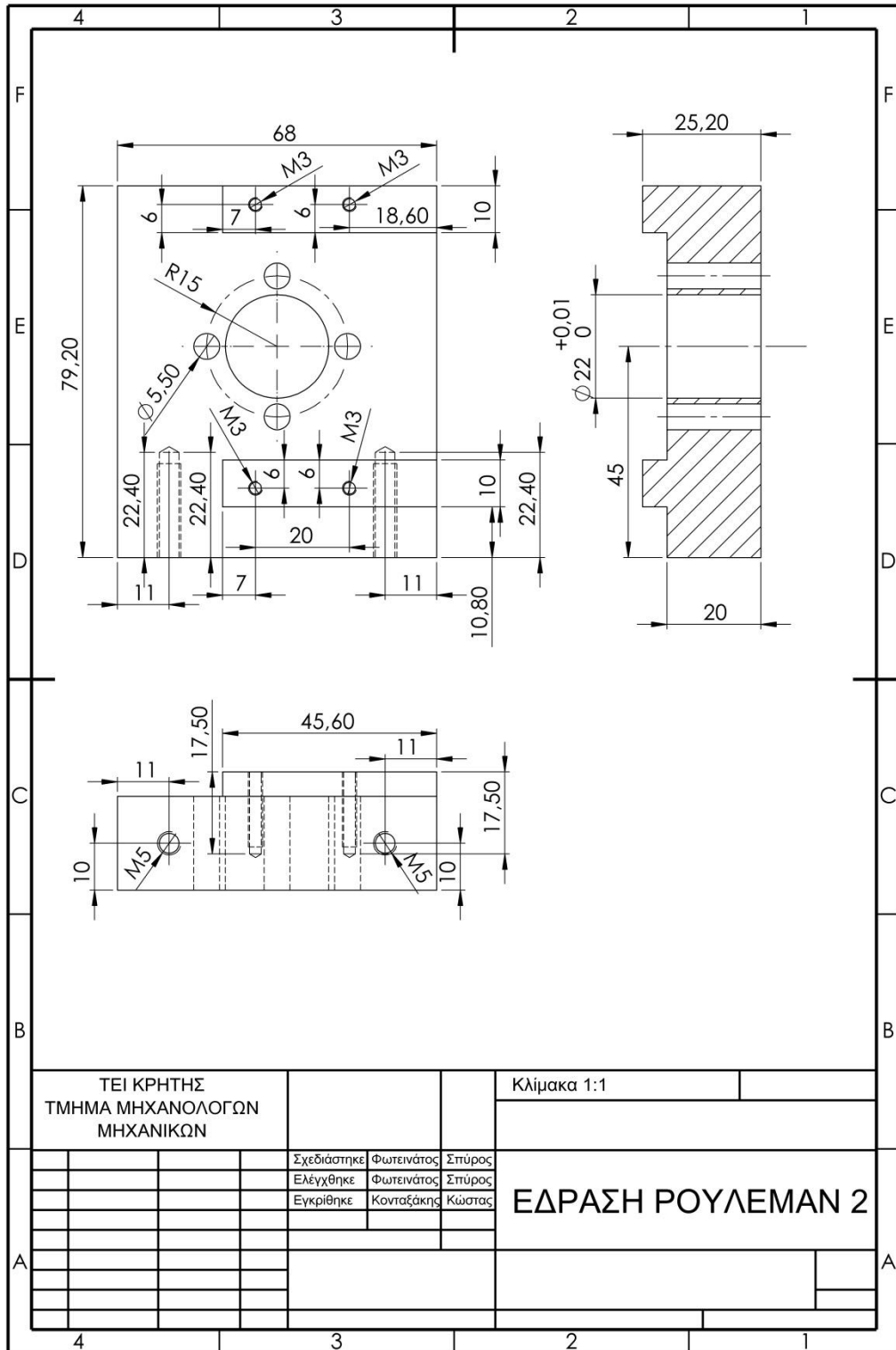
Κλίμακα 2:1

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

**ΒΑΣΗ ΔΑΓΚΑΝΑΣ
ΦΡΕΝΟΥ 1**





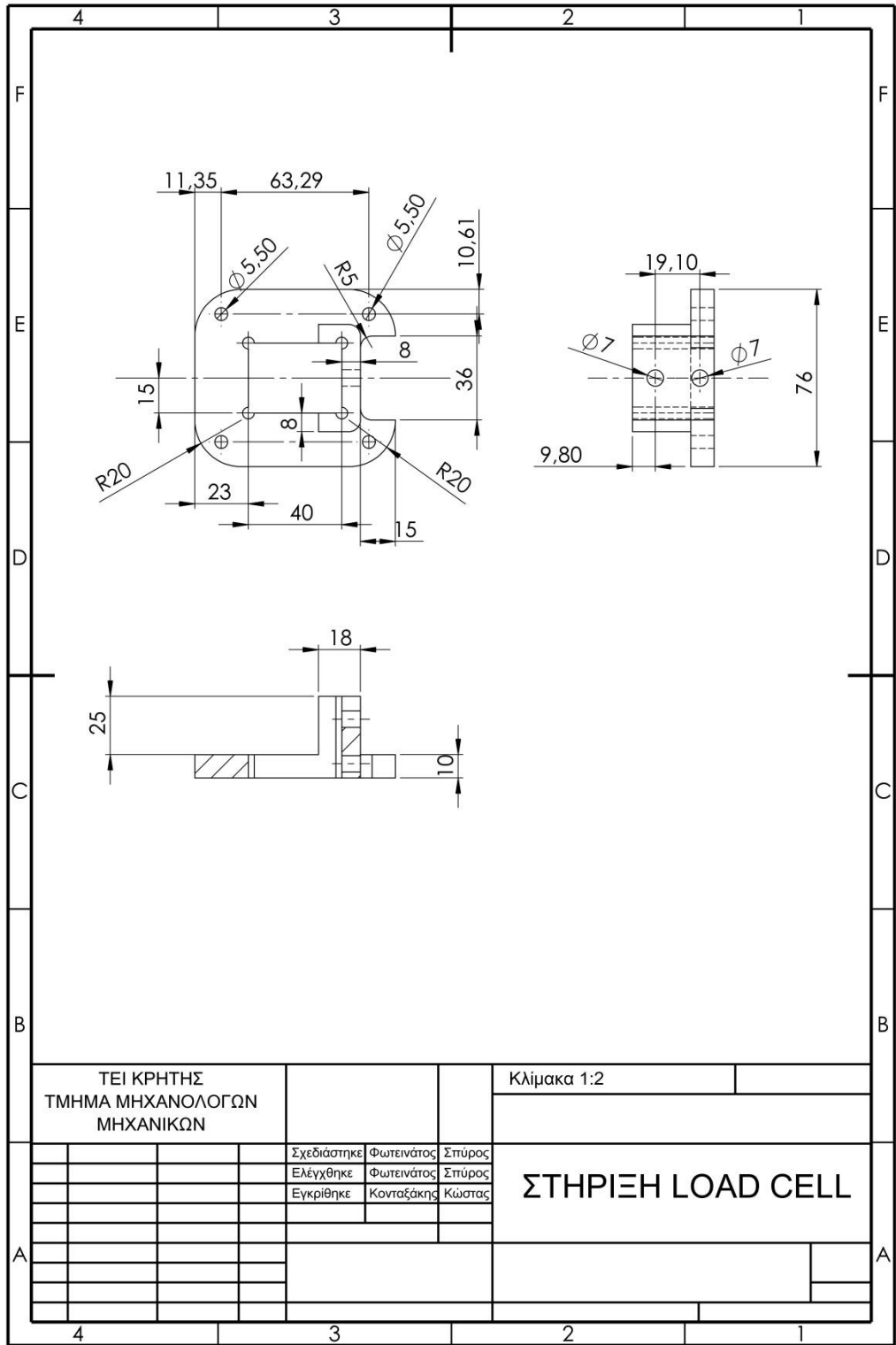


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 1:1

Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΕΔΡΑΣΗ ΡΟΥΛΕΜΑΝ 2

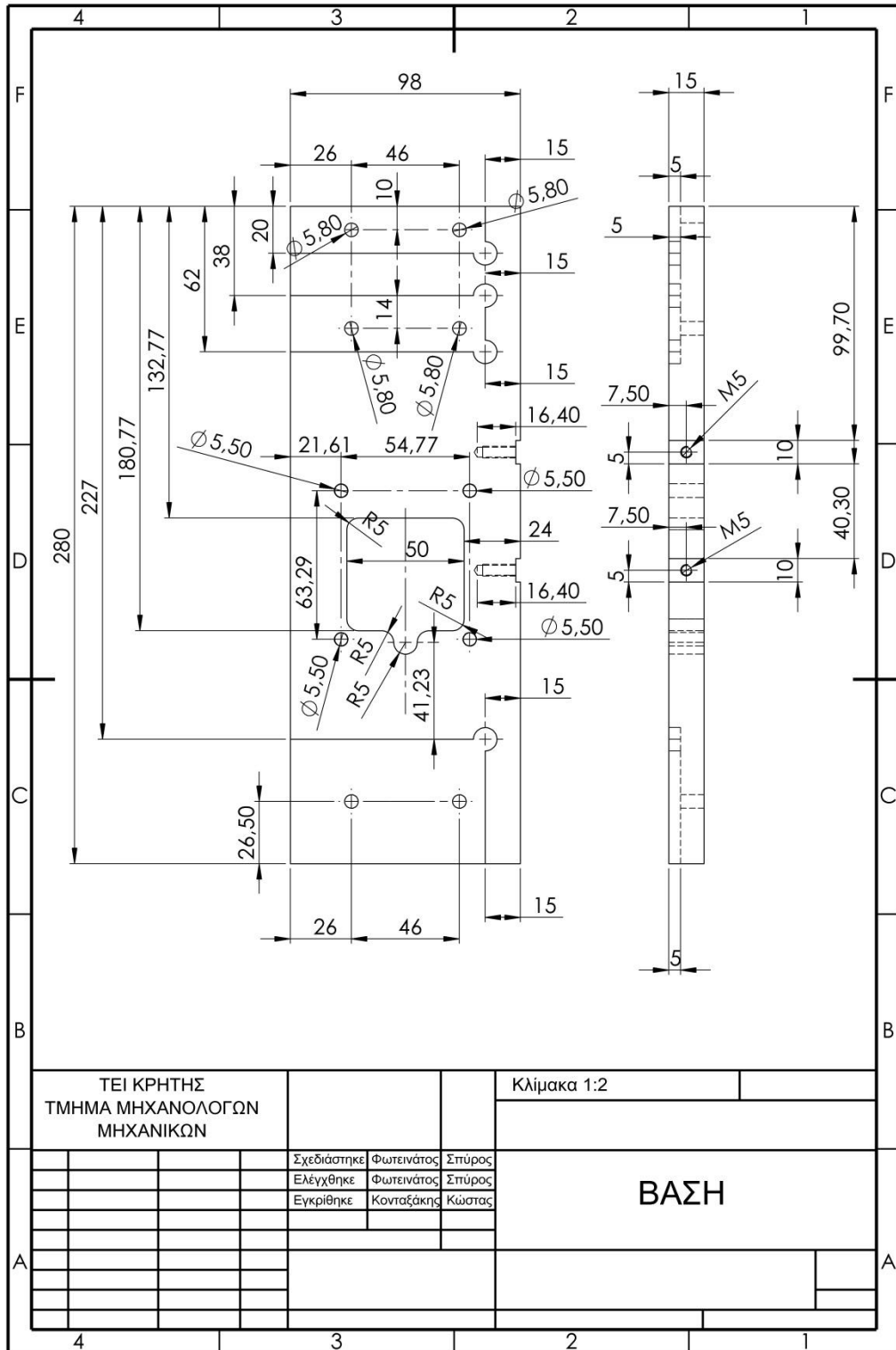


ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Κλίμακα 1:2

			Σχεδιάστηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Ελέγχθηκε	Φωτεινάτος	Σπύρος
			Εγκρίθηκε	Κονταξάκης	Κώστας

ΣΤΗΡΙΑΧΗ LOAD CELL



12. Βιβλιογραφία

1. www.wikipedia.com
2. Δρ. Π. Α. Βουθούνης «Μηχανική του απαραμόρφοτου στερεού –ΣΤΑΤΙΚΗ-
3. Χρήστος Α. Παπαδόπουλος «Στοιχεία Μηχανών-Στοιχεία Μεταφοράς Ισχύος Τόμος Β» Εκδόσεις Τζιόλα
4. Αριστομένης Θ. Αντωνιάδης «Μηχανολογικό Σχέδιο» Εκδόσεις Τζιόλα
5. Peter Elgar «Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου» Εκδόσεις Τζιόλα
6. Σάκα Χρήστος «Πτυχιακή Εργασία: Αξιολόγηση πρωτότυπων πτερυγώσεων ανεμογεννητριών»
7. Σημειώσεις Θεωρίας Πτερυγώσεων
8. Σημειώσεις Εργαστηρίου Αιολικών Συστημάτων
9. Εργαστηριακός Οδηγός Εργαστηρίου Φυσικής Ι Πανεπιστημίου Κρήτης, Τμήμα Φυσικής
10. SKF Catalogue