



ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

"ΠΑΘΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ PITCH CONTROL"

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτρη Βουρλιώτη
ΑΜ: 5123

Επιβλέπων: Καθηγητής Δημήτρης Χριστάκης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν στην πραγματοποίηση αυτής της πτυχιακής εργασίας, διέθεσαν χρόνο, υπομονή, συμβουλές και γνώσεις. Τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χρηστάκη Δημήτρη για την βοήθεια στην αρχική σύλληψη της ιδέας, την εξέλιξή της και τις καθοριστικές συμβουλές του από το πρώτο ως το τελευταίο βήμα αυτής της εργασίας. Τους συμφοιτητές μου Δημήτρη Γαλάτα και Αιμιλία Τοτοζάνι για την βοήθειά τους στη σχεδίαση τμημάτων του μηχανισμού, στη χρήση του SolidWorks και συγκεκριμένα στην από κοινού σχεδίαση της άρθρωσης που χρησιμοποίησα, με τον πρώτο. Την Ειρήνη Δακανάλη, συνεργάτιδα του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης η οποία και κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης αλλά και μέχρι την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας μου παρείχε τη βοήθειά της σε ότι χρειάστηκα. Τον Thibault Goldoni ο οποίος κατά τη διάρκεια της πρακτικής του άσκησης στο εργαστήριο σχεδίασε και μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω το φτερό με το οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις στο SolidWorks. Τέλος τη Μαρία Μητροπούλου για την ηλεκτρογεννήτρια που χρησιμοποίησα για να πάρω προδιαγραφές για το μηχανισμό που σχεδίασα, η οποία είναι αποτέλεσμα της Διπλωματικής της Εργασία, στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Πάτρας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελ

Περιεχόμενα.....	3
1. Περίληψη	
1.1 Περίληψη στα Ελληνικά.....	4
1.2 Abstract.....	5
2. Εισαγωγή	
2.1 Πρόλογος.....	6
2.2 Ιστορική ανασκόπηση.....	6
2.3 Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς.....	6
2.4 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα.....	7
2.5 Μικρές ανεμογεννήτριες.....	8
2.5.1 Μέρη μικρής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής.....	9
2.6.1 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννήτριας.....	9
2.6.2 Το πρόβλημα της μεγάλης ταχύτητας ανέμου.....	10
2.6.2.1 Pitch Control.....	10
2.6.2.2 Stall Control.....	11
2.6.2.3 Επιλογή συστήματος ελέγχου.....	11
2.1 Αναφορά στον κανονισμό ασφαλείας 61400_2.....	12
2.2 Έρευνα αγοράς.....	15
3. Μελέτη- Προδιαγραφές	
3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	20
3.2.1 Μελέτη τεχνικών χαρακτηριστικών.....	21
3.2.2 Επιλογή Υλικών.....	24
4. Περιγραφή.....	25
5. Συμπεράσματα.....	41
6. Παρατηρήσεις.....	43
7. Βιβλιογραφία.....	44

1. Περίληψη

1.1 Περίληψη

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και τη μελέτη ενός συστήματος παθητικού ελέγχου της γωνίας σφήνωσης (passive pitch control) των φτερών μια μικρής ανεμογεννήτριας. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός βασίζεται στη λογική του ρυθμιστή του Watt και με τη χρήση κατάλληλα προσαρμοσμένων μαζών πάνω στους άξονες των φτερών, μεταβάλλει το pitch των φτερών ανάλογα με τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας ολόκληρου του συστήματος φτερά-πλήμνη.

Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η εξομοίωση του μοντέλου στις τρεις διαστάσεις μέσω του λογισμικού SolidWorks 2012. Τα δεδομένα, προκειμένου να σχεδιαστεί ο μηχανισμός, προέκυψαν έπειτα από ακριβή διαδικασία διαστασιολόγησης αξιοποιώντας τη σύγχρονη μηχανή αξονικής ροής που σχεδιάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Μαρίας Μητροπούλου, από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Πάτρας, το φτερό που σχεδιάστηκε από τον Tibault Goldoni στα πλαίσια της πρακτικής του άσκησης στο Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης, την περίοδο Μάρτης- Μάης 2014 και βιβλιογραφία σχετικά με τον ρυθμιστή του Watt και τις παραλλαγές του, καθώς ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτελεί μια από αυτές.

Κατά την ολοκλήρωση της σχεδίασης υπάρχουν έτοιμα τα σχέδια του κάθε εξαρτήματος του μηχανισμού, οι διαστάσεις τους, τα υλικά κατασκευής τους, η μάζα τους. Ο μηχανισμός πέρασε από αρκετές εικονικές δοκιμές στα πλαίσια των δυνατοτήτων που παρέχει το συγκεκριμένο πρόγραμμα ώστε να βρεθεί η βέλτιστη σχέση διαστάσεων και μάζας των εξαρτημάτων για να συνεργάζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για ένα λειτουργικό αποτέλεσμα.

Η συγκεκριμένη σύγχρονη γεννήτρια αξονικής ροής είναι ισχύος 1kW για ταχύτητα περιστροφής 39,27 rad/s. Το ζητούμενο λοιπόν να επιτευχθεί η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής για το μεγαλύτερο δυνατό φάσμα ταχύτητας ανέμου.

Το φτερό που χρησιμοποιήθηκε για να συνεργαστεί με το μηχανισμό, έχει σαν υλικό κατασκευής τον πολυεστέρα, έχει συνολικό μήκος 1571,40mm και μέγιστο πλάτος 181,16mm.

Το κομμάτι της άρθρωσης στήριξης του φτερού στην πλήμνη της ανεμογεννήτριας σχεδιάστηκε και δοκιμάστηκε εικονικά από τον γράφοντα σε συνεργασία με τον Δημήτρη Γαλάτα, τελειόφοιτο σπουδαστή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, στα πλαίσια της πρακτικής του άσκησης στο Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης, την περίοδο Μάρτης- Αύγουστος 2014.

1.2 Abstract

Small wind turbines are an area of utilization of wind energy which in recent years are gaining ground and their optimization in performance and cost is an issue of crucial importance for their further development. More specifically, in this thesis we dealt with the pitch control of wind turbine. We decided to deal with a system of passive control.

The pitch control is the rotation of the blade around its longitudinal axis, to achieve the desired angle of breach along the length of the blade in order to implement the requirements of engine power. The pitch control for any wind turbine, is crucial in order for its performance to be the highest possible. The typical pitch control applications are passive and active. In active applications the wind speed and the angular speed of the rotor are continuously measured and processed by a computer, which in its turn orders the stepping motor to rotate its blade accordingly. In passive applications, weights are oftenly used, which rotate along with the rotor, and due to the centrifuge they shift, causing the blades to rotate.

In this specific thesis we chose to address a passive pitch control, mostly because of the intrest such an application presents, from a mechanical point of view, ,its manufacturing costs and the ease of installation by people without specific knowledge.

In this application, as seen in the pictures below, the blades are not vertical to the rotation axis but their bases form an isosceles triangle. Within the support center of the wings, there are two support joints for the bases of each wing. At the edge of the wing base we have a Spherical Plain Bearing, in order to maintain stable the blade and its joint, which receives the highest load of the blade due to centrifuge. About 15 cm inward of the edge of the base of the wing there is a cylindrical roller bearing which allows the rotation of the wing around its axis. In between of the two joints, there is a weight embedded, as seen in the pictures below. As the rotational speed of the rotor increases and having that the axis of rotation is vertical to the radius of the circular disk rotor, the weight, due to the effect of the centrifuge tends to depart from the center of rotation. Due to its shape and because it is embedded in the axis-base of the blade, it rotates around the axis- base thus rotating the wing. As we can seen , the weight has adjusted a gear at its edge allowing it to move on the middle disk system, which also has in its center a rotor rotation axis, synchronizing the movements of the three weights and hence the pitch of the three blades. A third disc with a center the rotor axis of rotation is locate, as seen, between which there is a spring to restore the system to its original state when the rotor speed is reduced.

2.Εισαγωγή

2.1 Πρόλογος

Η αιολική ενέργεια καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω των πλεονεκτημάτων που έχει και απέναντι στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και απέναντι στις υπόλοιπες μορφές ανανεώσιμων πηγών. Αφ' ενός η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση του κόσμου, αφ' εταίρου η αναζήτηση οικονομικότερων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργεί μεγάλες προοπτικές για την ανάπτυξη και βελτίωση των τεχνολογιών που υπάρχουν σε μια μικρή ή μεγάλη ανεμογεννήτρια.

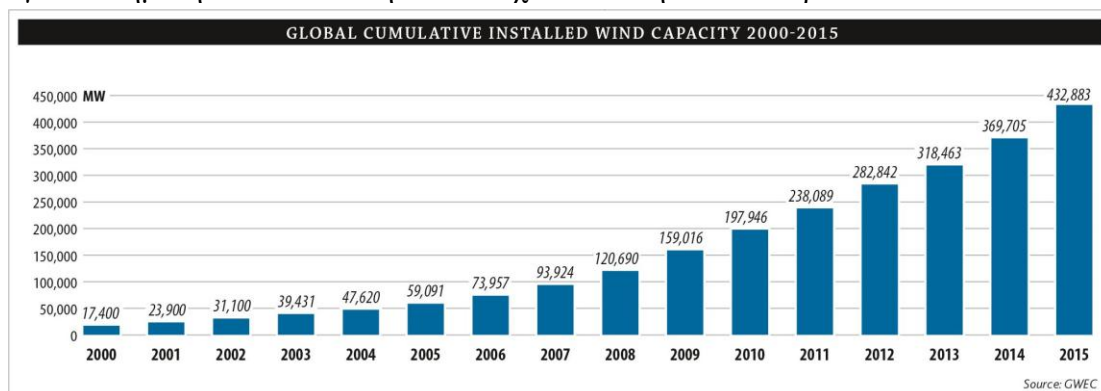
2.2 Ιστορική ανασκόπηση

Πρώτη φορά που ο άνεμος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν το 1887 στη Σκωτία από τον καθηγητή James Blyth που κατασκεύασε έναν ανεμόμυλο συνδεδεμένο με μια γεννήτρια, ενώ την ίδια περίοδο στο Κλήβελαντ του Οχάιο των ΗΠΑ ο Charles Brush κατασκεύασε κάτι αντίστοιχο^[5]. Η πρώτη ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε το 1941 στο Vermont των ΗΠΑ, ενώ η πρώτη χρηστική ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο κατασκευάστηκε το 1951 στα νησιά Ορκάδες της Σκωτίας^[6].

2.3 Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς

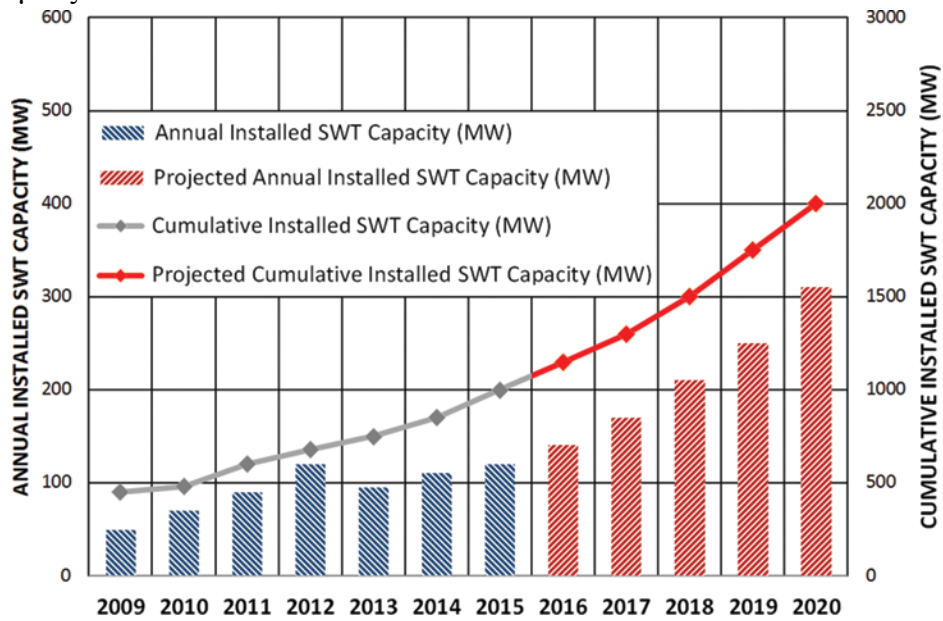
Η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξάνεται σημαντικά χρόνο με το χρόνο^[7]. Αυτό οφείλεται αφ ενός στο γεγονός την αύξησης ισχύος των ανεμογεννητριών, αφ εταίρου στη στροφή που συντελείτε στο πεδίο των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προς την χρήση των ανεμογεννητριών.

Χαρακτηριστικά είναι το παρακάτω γράφημα που δείχνει την παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύ την περίοδο 2000-2015:



Εικόνα 2.3.1^[7]

Ενώ στο παρακάτω βλέπουμε την πρόοδο που παρουσιάζει και που προβλέπεται να παρουσιάσει τα επόμενα χρόνια η εγκατάσταση μικρών ανεμογεννητριών παγκοσμίως:

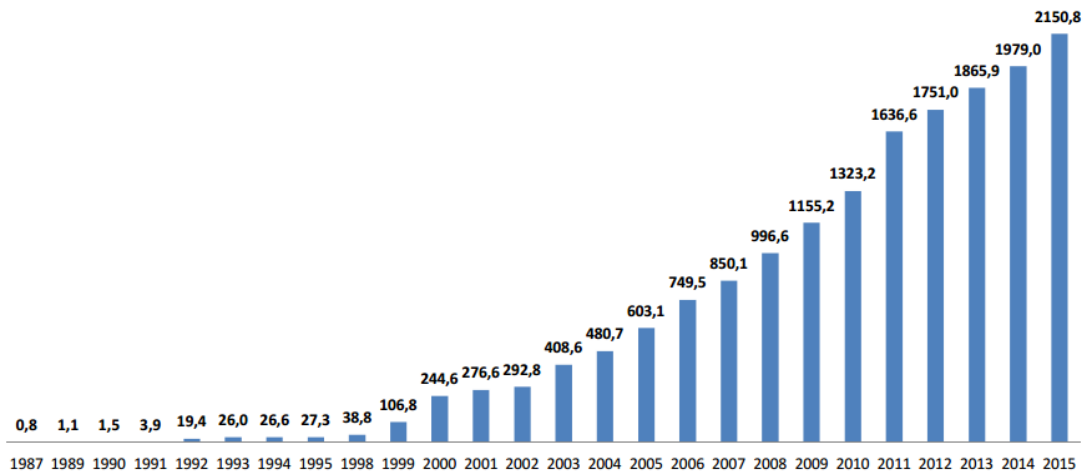


Εικόνα 2.3.2^[8]

2.4 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα

Αντίστοιχα η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στη χώρα μας παρουσιάζει την παρακάτω εξέλιξη:

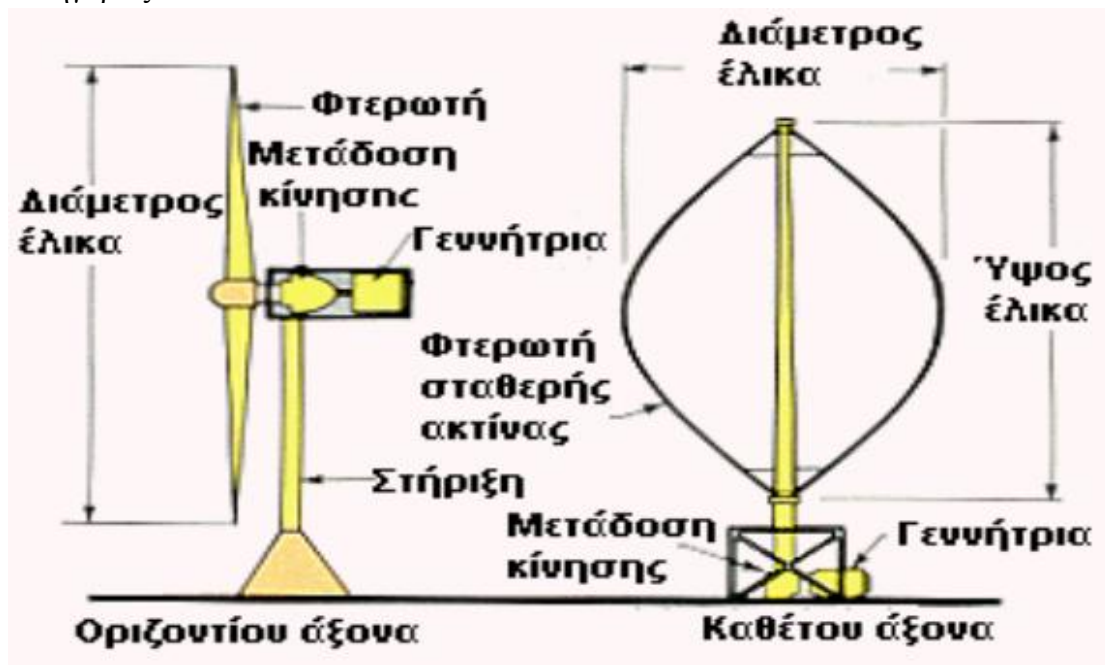
Total installed MW per year



Εικόνα 2.4^[9]

2.5 Μικρές ανεμογεννήτριες

Σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό προδιαγραφών IEC61400-2 μικρές ανεμογεννήτριες είναι όσες έχουν εμβαδό σάρωσης μικρότερο ή ίσο των 200m^2 , εννοώντας το εμβαδό του κυκλικού δίσκου που διαγράφουν τα φτερά της ανεμογεννήτριας, και παράγουν τάση μικρότερη των 1000V εναλλασσόμενου ρεύματος ή 1500V συνεχούς, συνδεδεμένων ή μη, στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας^[10]. Αυτές οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές οικιακές ή γενικά μικρές αυτόνομες και αποκομμένες. Έχουν το πλεονέκτημα του μικρού κόστους κτήσης και συντήρησης και είναι σχετικά προσιτές στο ευρύ κοινό. Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2.2.2 και είναι μια ενδιαφέρουσα λύση ιδιαίτερα σε περιόδους και περιοχές που η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή καθώς επίσης και για εφαρμογές εκτός πόλεων. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:



Εικόνα 2.5^[11]

Δεξιά: κατακόρυφου άξονα περιστροφής, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους.

Αριστερά: οριζόντιου άξονα περιστροφής, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.

Η συγκεκριμένη εργασία αφορά μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων μικρής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα περιστροφής.

2.6.2 Το πρόβλημα της μεγάλης ταχύτητας ανέμου

Τα προβλήματα με την περιστροφή ξεκινούν όταν ο άνεμος είναι πιο δυνατός από όσο χρειάζεται η ανεμογεννήτρια, για να περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα που θα αποδίδει τη μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια στη γεννήτρια. Δεν είναι όμως μόνο ζήτημα μέγιστης απόδοσης της γεννήτριας αλλά κυρίως ασφάλειας, αφού αν οι στροφές της ανεμογεννήτριας αυξηθούν πολύ, κάποια στιγμή η κατασκευή θα καταστραφεί, πράγμα που σημαίνει κόστος και κίνδυνο τραυματισμού. Οι λύσεις που αφορούν συγκεκριμένα το κομμάτι των πτερυγίων και έχουν επικρατήσει και στις μικρές και στις μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι δύο και κάποτε τις συναντάμε ξεχωριστά ενώ κάποιες φορές συνδυάζονται.

2.6.2.1 Pitch Control

Pitch control ονομάζεται ο έλεγχος της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων. Πιο συγκεκριμένα αλλάζει η κλίση των πτερυγίων σε σχέση με τον άνεμο, που έρχεται πάντα κάθετα προς τον κυκλικό δίσκο που σχηματίζουν τα πτερύγια, με αποτέλεσμα να χαλάει η αεροδυναμική του πτερυγίου άρα να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 2.6.2.1^[14]

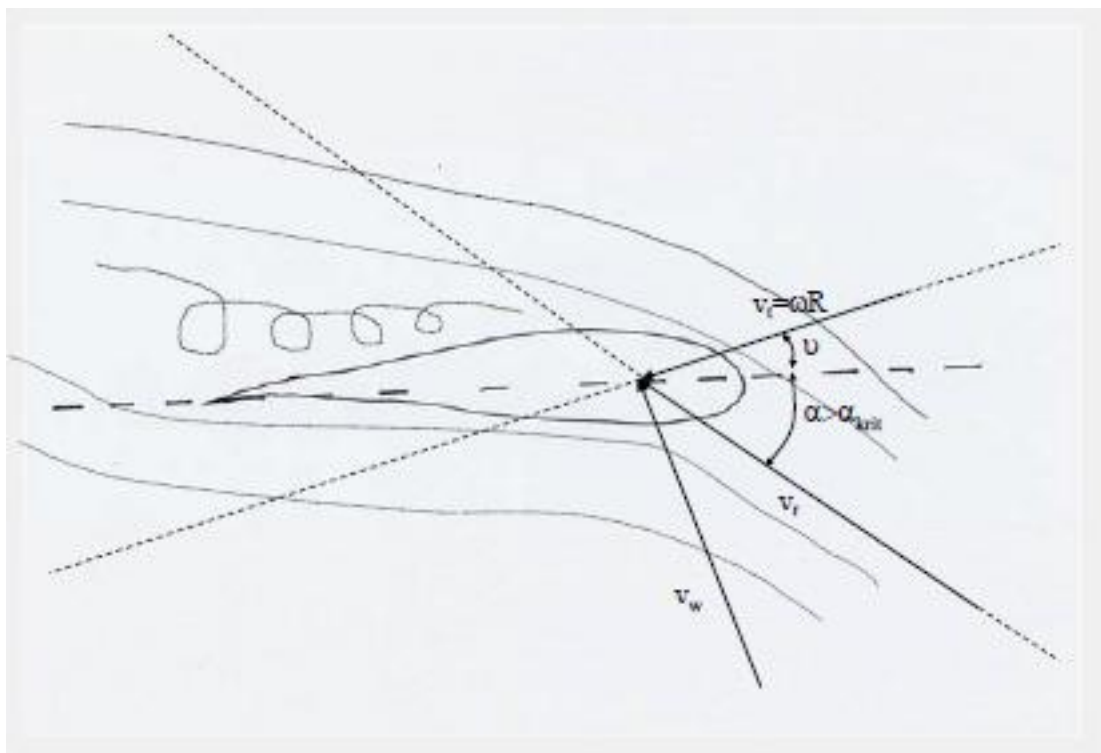
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6.2.1 η γωνία με την οποία ο άνεμος πέφτει πάνω στο πτερύγιο είναι τόσο μεγάλη που τα στρώματα του αέρα αποκολλώνται από το πάνω μέρος του πτερυγίου και δημιουργείται τύρβη, άρα κακή αεροδυναμική, άρα πτώση της απόδοσης και συνεπώς της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Τέλος, όταν οι στροφές της ανεμογεννήτριας πέσουν, διορθώνεται και η κλίση των πτερυγίων. Αυτή είναι μια διαδικασία που συμβαίνει συνεχώς, όσο η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία.

Το pitch control μπορεί να είναι είτε ενεργητικό είτε παθητικό. Πιο συγκεκριμένα όταν λέμε ενεργητικό (active) pitch control εννοούμε ένα σύστημα που θα λαμβάνει συνεχώς δεδομένα (ταχύτητα ανέμου, ταχύτητα περιστροφής ανεμογεννήτριας κτλ) και με βάση αυτά θα δίνει εντολή σε μοτέρ προσαρμοσμένα στα φτερά, να περιστρέψουν το φτερό αλλάζοντας το pitch σύμφωνα με την ανάγκη που υπάρχει κάθε στιγμή. Παθητικό (passive) pitch control είναι το σύστημα που χρησιμοποιώντας κάποια δύναμη που μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα

περιστροφής της ανεμογεννήτριας (συνήθως η φυγόκεντρος) , θα κινεί μέσω ενός μηχανισμού τα φτερά επιτυγχάνοντας το επιθυμητό pitch κάθε στιγμή. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιείται μόνο το active pitch control ενώ στις μικρές χρησιμοποιούνται και τα δύο.

2.6.2.2 Stall Control

Stall Control ονομάζεται η απώλεια αεροδυναμικής στήριξης που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων. Πιο συγκεκριμένα, το πτερύγιο είναι έτσι σχεδιασμένο, ώστε να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων ανέμου, όταν αυτό ξεπεραστεί, τότε η στρωτή ροή στο πάνω μέρος του πτερυγίου γίνεται τυρβώδης και έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα με τη μέθοδο του pitch control.



Εικόνα 2.6.2.2^[15]

2.6.3 Επιλογή συστήματος ελέγχου

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε το pitch control και πιο συγκεκριμένα το passive pitch control. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως με κριτήριο το χαμηλό κόστος κατασκευής και την αξιοπιστία που έχει ένας μηχανισμός χωρίς ηλεκτρονικά συστήματα και με λίγα κινούμενα μέρη. Παρακάτω, στην έρευνα αγοράς παρουσιάζονται και άλλα παθητικά συστήματα που έχουν φτιαχτεί. Για το σχεδιασμό του μηχανισμού λάβαμε υπόψη τον κανονισμό ασφάλειας IEC61400_2 για την σχεδίαση και κατασκευή μικρών ανεμογεννητριών.

2.7 Αναφορά στον κανονισμό ασφαλείας IEC61400 2^[10]

Για τον σχεδιασμό της μηχανισμού της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τον διεθνή κανονισμό προδιαγραφών IEC61400-2. Σύμφωνα με αυτόν, για να ελέγξουμε την αντοχή μιας ανεμογεννήτριας και κατ' επέκταση, του μηχανισμού του pitch control, για τον οποίο γίνεται και η παρούσα εργασία, θα πρέπει να ακολουθήσουμε τις εξής μεθόδους:

“1) Simplified loads methodology

For certain turbine configurations a simplified calculation method is given. A limited set of load cases and configurations is given with simple formulas and simplified external conditions. The turbine data assumed within the simplified equations shall be verified by the “Tests to verify design data”.

2) Simulation model

A model shall be used to determine the loads over a range of wind speeds, using the turbulence conditions and other extreme wind conditions defined, and design situations defined. This approach uses a structural dynamics simulation model in combination with wind turbine and application adequate assumptions. The assumptions shall be verified by the “Tests to verify design data”.

All relevant combinations of external conditions and design situations shall be analysed. A minimum set of such combinations has been defined as load cases in this standard.

3) Full scale load measurement

Full scale load measurement with load extrapolation»

Το οποίο σε μετάφραση σημαίνει:

« 1) Απλοποιημένη μεθοδολογία φορτίων

Για ορισμένες διαμορφώσεις ανεμογεννητριών δίνεται μια απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμών. Με απλούς μαθηματικούς τύπους και απλουστευμένες εξωτερικές συνθήκες. Τα δεδομένα των ανεμογεννητριών που παίρνουμε ως υπόθεση στις απλοποιημένες εξισώσεις, πρέπει να επαληθεύονται από τις “Δοκιμές επαλήθευσης δεδομένων σχεδιασμού”.

2) Μοντέλο προσομοίωσης

Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρότυπο για τον προσδιορισμό των φορτίων πάνω από ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου, κάνοντας χρήση των συνθηκών αναταραχής και άλλων ακραίων συνθηκών ανέμου και καταστάσεων σχεδίασης. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα δομικό δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης σε συνδυασμό με την ανεμογεννήτρια και την εφαρμογή των κατάλληλων παραδοχών. Οι παραδοχές πρέπει να επαληθεύονται από τις “Δοκιμές επαλήθευσης δεδομένων σχεδιασμού”.

Θα πρέπει να αναλυθούν όλοι οι σχετικοί σχεδιασμοί των εξωτερικών συνθηκών και των καταστάσεων σχεδιασμού. Ένα ελάχιστο όριο αυτών των συνδυασμών έχει ορισθεί ως “περιπτώσεις φορτίου” στο πρότυπο αυτό.

3) Μέτρηση φορτίου πλήρους κλίμακας

Μέτρηση φορτίου πλήρους κλίμακας με αναγωγή φορτίου.»

Επίσης λαμβάνουμε υπόψη και τα εξής:

«For design purposes, the life of a SWT can be represented by a set of design situations covering the most significant conditions which the turbine system may experience.

The load cases shall be determined from the combination of specific assembly, erection, maintenance, and operational modes or design situations with the external conditions. All relevant load cases with a reasonable probability of occurrence shall be considered, together with the behaviour of the control and protection system.

Generally the design load cases used to determine the structural integrity of a SWT may be calculated from the following combinations:

- turbine operation without fault and with normal external conditions;
- turbine operation without fault and with extreme external conditions;
- turbine operation with fault and appropriate external conditions; and
- transportation, installation and maintenance design situations and appropriate external conditions (see also 10.6).

If a significant correlation exists between an extreme external condition and a fault situation, a realistic combination of the two shall be considered as a design load case.»

Τα οποία σε μετάφραση σημαίνουν:

«Για τους σκοπούς του σχεδιασμού, η ζωή μιας Μικρής Ανεμογεννήτριας (Small Wind Turbine, SWT) μπορεί να αντιπροσωπευτεί από ένα σύνολο σχεδιαστικών καταστάσεων που καλύπτουν τις πιο σημαντικές συνθήκες που ενδέχεται να αντιμετωπίσει ένα σύστημα ανεμογεννητριών.

Οι περιπτώσεις φορτίων πρέπει να προσδιορίζονται από τον συνδυασμό της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας, ανέγερσης, συντήρησης και λειτουργικών συνθηκών ή καταστάσεων σχεδίασης, με τις εξωτερικές συνθήκες. Όλες οι σχετικές περιπτώσεις φορτίων που έχουν έστω και μια εύλογη πιθανότητα να εμφανιστούν θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως και η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και προστασίας.

Γενικά, ο σχεδιασμός των περιπτώσεων των φορτίων που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δομικής ακεραιότητας της SWT μπορεί να υπολογισθεί από τους ακόλουθους συνδυασμούς:

- Λειτουργία ανεμογεννήτριας χωρίς πρόβλημα σε κανονικές εξωτερικές συνθήκες

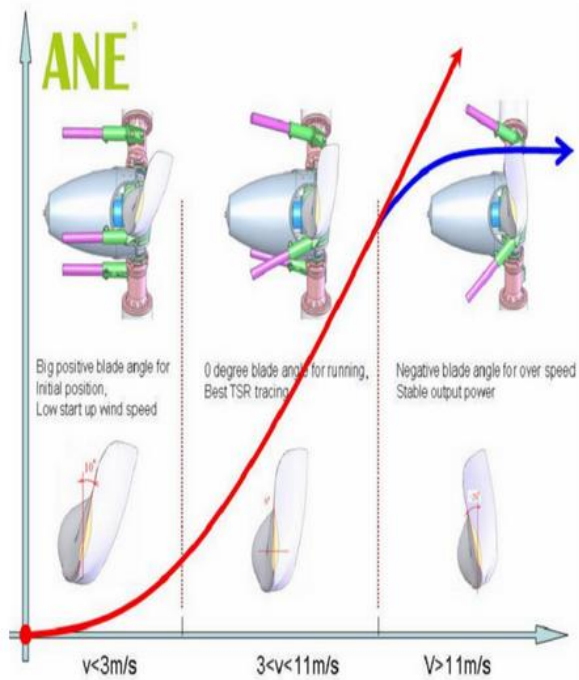
- Λειτουργία ανεμογεννήτριας χωρίς πρόβλημα ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- Λειτουργία ανεμογεννήτριας με πρόβλημα σε κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες, και
- Καταστάσεις σχεδιασμού μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης με κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες

Εάν υπάρχει κάποια σημαντική συσχέτιση μεταξύ μιας ακραίας εξωτερικής συνθήκης και μιας κατάστασης σφάλματος, θα πρέπει να βρεθεί ένας ρεαλιστικός συνδυασμός των δύο για να θεωρηθεί περίπτωση σχεδίασης φορτίου.»

Αυτοί οι κανόνες ακολουθήθηκαν για την ολοκλήρωση της εργασίας. Έγινε ανάλυση των δυνάμεων που θα ασκηθούν στον μηχανισμό σε όλο το φάσμα των στροφών που μπορεί να αναπτύξει η ανεμογεννήτρια και σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων του ανέμου που μπορεί να προσκρούσει πάνω της.

2.8 Έρευνα αγοράς

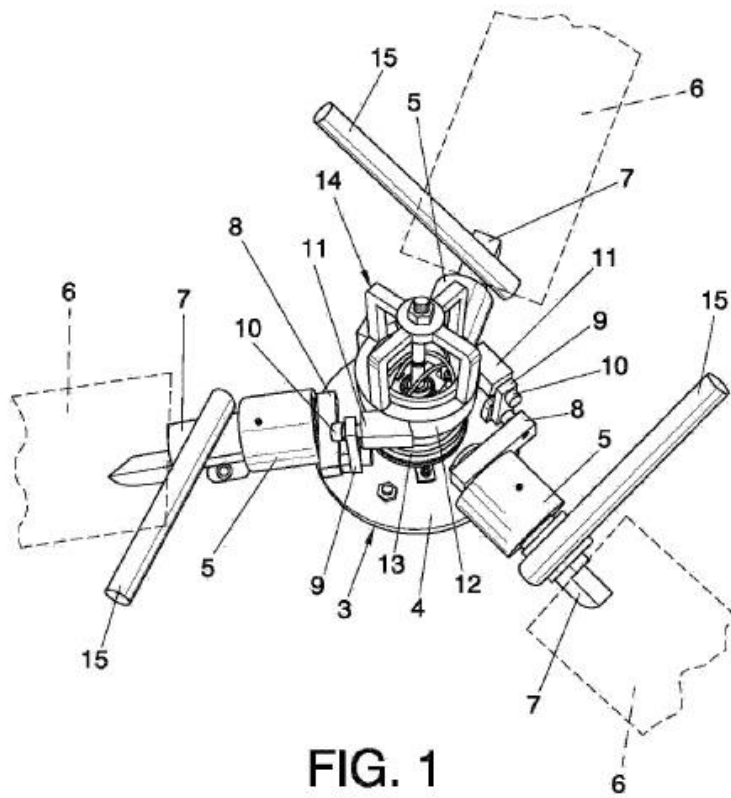
Στα πλαίσια της αναζήτησης βέλτιστης λύσης για το παθητικό pitch control που πραγματοποιείται η παρούσα εργασία, βρέθηκαν οι παρακάτω εναλλακτικές:



Εικόνα 2.2.1



Εικόνα 2.2.2



Εικόνα 2.2.3



Εικόνα 2.2.4



Εικόνα 2.2.5



Εικόνα 2.2.6

- **Μηχανισμός με εξωτερικές μάζες**

Η έρευνα αγοράς έδειξε πως οι περισσότεροι κατασκευαστές που εφαρμόζουν σύστημα passive pitch control για την ανεμογεννήτριά τους, χρησιμοποιούν τον τρόπο που φαίνεται στις εικόνες 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.2.5 και 2.2.6 ή κάποια παραλλαγή του.

Στη δημοφιλέστερη εκδοχή του passive pitch control, υπάρχουν όμοιες μάζες στο άκρο του φτερού που βρίσκεται κοντά στο κέντρο περιστροφής της ανεμογεννήτριας, οι οποίες είναι τοποθετημένες υπό γωνία σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του φτερού. Η θέση τους αυτή τους επιτρέπει όταν η ταχύτητα περιστροφής αυξηθεί πάνω από ένα όριο που έχει επιλέξει ο κατασκευαστής, κάτω από την επίδραση της αντίδρασης της κεντρομόλου δύναμης, να τείνουν να απομακρυνθούν από το κέντρο και λόγω της πάκτωσής τους και της γωνίας υπό την οποία είναι τοποθετημένα στη βάση του φτερού, το περιστρέφουν το φτερό κατά τον διαμήκη άξονά του. Τα τρία φτερά συνδέονται μεταξύ τους με άξονες, οι οποίοι συνδέονται στο κέντρο περιστροφής της ανεμογεννήτριας, παρέχουν τον απόλυτο συγχρονισμό των τριών φτερών που είναι απαραίτητος και είναι σε θέση να συμπιέσουν ένα ελατήριο όταν ξεκινήσει να αυξάνεται η γωνία pitch. Όταν οι στροφές πέσουν και η επίδραση της αντίδρασης της κεντρομόλου δύναμης παρέλθει, η δύναμη του ελατηρίου επαναφέρει μέσω των αξόνων τα φτερά στην αρχική τους γωνία.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός πλεονεκτεί σε σχέση με την απλότητα και την εύκολη ρύθμισή του, τη συντήρησή του και την έλλειψη τριβόμενων μερών με εξαίρεση το «δαχτυλίδι» που συνδέει του άξονες και φέρει το ελατήριο.

Μειονεκτεί στο γεγονός ότι υπάρχει πολύ μάζα περιστρεφόμενη μακριά από το κέντρο που σημαίνει απώλεια ζυγοστάθμισης και περισσότερες φθορές. Ταυτόχρονα οι μεταλλικές μάζες που προκαλούν την περιστροφή, αποτελούν έναν καλό αγωγό της ηλεκτρικής ενέργειας άρα ένα σημείο με περισσότερες πιθανότητες για να πληγεί από κεραυνό.

- **Μηχανισμός με τρία ελατήρια**

Στο μηχανισμό που φαίνεται στην εικόνα 4, έχουμε έναν ενδιαφέρον μα και περίπλοκο μηχανισμό.

Περιμετρικά του κελύφους υπάρχουν τρία βαρίδια, τα οποία φαίνονται με μαύρο χρώμα στη φωτογραφία, τα οποία με την επίδραση της αντίδρασης της κεντρομόλου πάνω τους, τείνουν να απομακρυνθούν από το κέντρο του κελύφους, το οποίο είναι και κέντρο περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Η άρθρωση που έχει στη μία μεριά του το βαρίδι του επιβάλλει να κάνει περιστροφική κίνηση, καθώς απομακρύνεται από το κέντρο. Από την άρθρωση που βρίσκεται περιφερειακά του κελύφους, το βαρίδι έχει μια προέκταση εντός του κελύφους και κάθετα προς το κέντρο του. Η προέκταση αυτή καταλήγει με μια άρθρωση σε ένα δακτύλιο που είναι τοποθετημένος γύρω από το κέντρο περιστροφής. Ενδιάμεσα από κάθε δύο

διαδοχικές αρθρώσεις, ο δακτύλιος διαθέτει οδόντωση. Όταν το βαρίδι εξωθείται και απομακρύνεται από το κέντρο του κελύφους, η κάθετη προέκτασή του περιστρέφει τον κεντρικό δακτύλιο, ο οποίος με τη σειρά του, μέσω της οδόντωσης η οποία συνδέεται με το άκρο του φτερού και το εξαναγκάζει να περιστραφεί. Η άλλη μεριά του εξωτερικού τμήματος του βαριδιού είναι συνδεμένη με έναν άξονα ο οποίος καταλήγει στο κέντρο του κελύφους και περιβάλλεται από ελατήριο ώστε όταν πέφτουν οι στροφές της μηχανής και η επίδραση της κεντρομόλου μειώνεται, να επαναφέρει το βαρίδι στην αρχική κατάσταση.

3. Μελέτη- Προδιαγραφές

3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Ο μηχανισμός καλείται να συνεργαστεί με την ηλεκτρογεννήτρια που μελέτησε και σχεδίασε η Μαρία Μητροπούλου στην Διπλωματική της Εργασία, στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Πάτρας. Θα είναι μια μηχανή ισχύος 1kW σε γωνιακή ταχύτητα της φτερωτής στα 39,27rad/s.

Από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε πως για να υπάρξει έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας, η μέγιστη γωνία pitch που χρειάζεται είναι περίπου 42°.

Αναλύσαμε τις ανάγκες του μηχανισμού και καταλήξαμε πως πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	375	[RPM]	2.250	[DEG/SEC]	39,27	[RAD/S]
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΡITCH	361,66	[RPM]	2.170	[DEG/SEC]	37,87	[RAD/S]
ΣΤΡΟΦΕΣ MAX ΡITCH	390	[RPM]	2.340	[DEG/SEC]	40,84	[RAD/S]
ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	420	[RPM]	2.520	[DEG/SEC]	43,98	[RAD/S]
MIN ΡITCH	3,89	[DEG]				
MAX ΡITCH	41,38	[DEG]				

Πίνακας 3.1.1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΛΑΤΗΡΙΟΥ		
Σταθερά Ελατηρίου (K)	15	[N/mm]
ΦΥΣΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	205	[mm]
ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ	13,5	[mm]

ΜΑΖΑ ΒΑΡΙΔΙΟΥ	1.681,82	[gr]
----------------------	----------	------

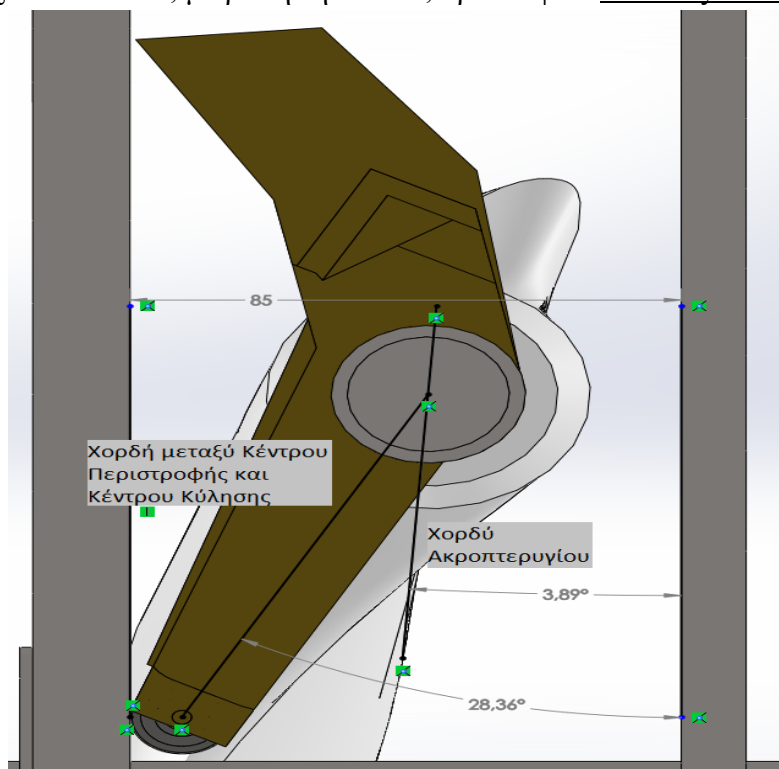
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	58.022,97	[gr]
---------------------------------	-----------	------

Πίνακας 3.1.2

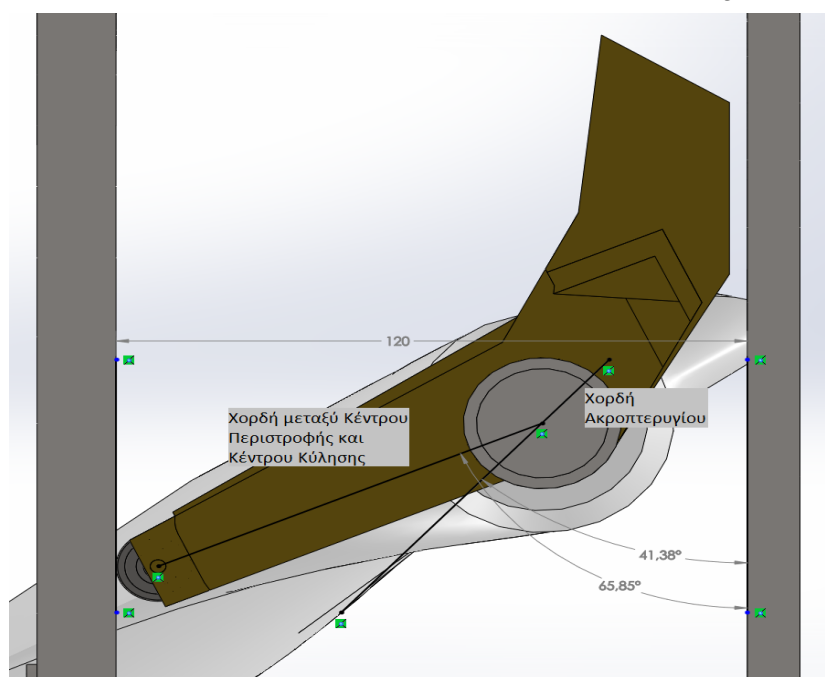
3.2.1 Μελέτη τεχνικών χαρακτηριστικών

Με δεδομένο πως το φτερό πρέπει να έχει μια αρχική, ελάχιστη γωνία pitch περίπου 4° και μια τελική, μέγιστη περίπου 40° , δόθηκαν τα αντίστοιχα περιθώρια μεταξύ των δύο κυρίων πλακών του μηχανισμού και οι κατάλληλη διαμόρφωση στο σχήμα του βαριδιού.

Έγινε η συσχέτιση μεταξύ της γωνίας του βαριδιού, του pitch και της απόστασης των πλακών, με βάση την οποία, προέκυψε ο Πίνακας 3.2.1.1.



Εικόνα 3.2.1.1



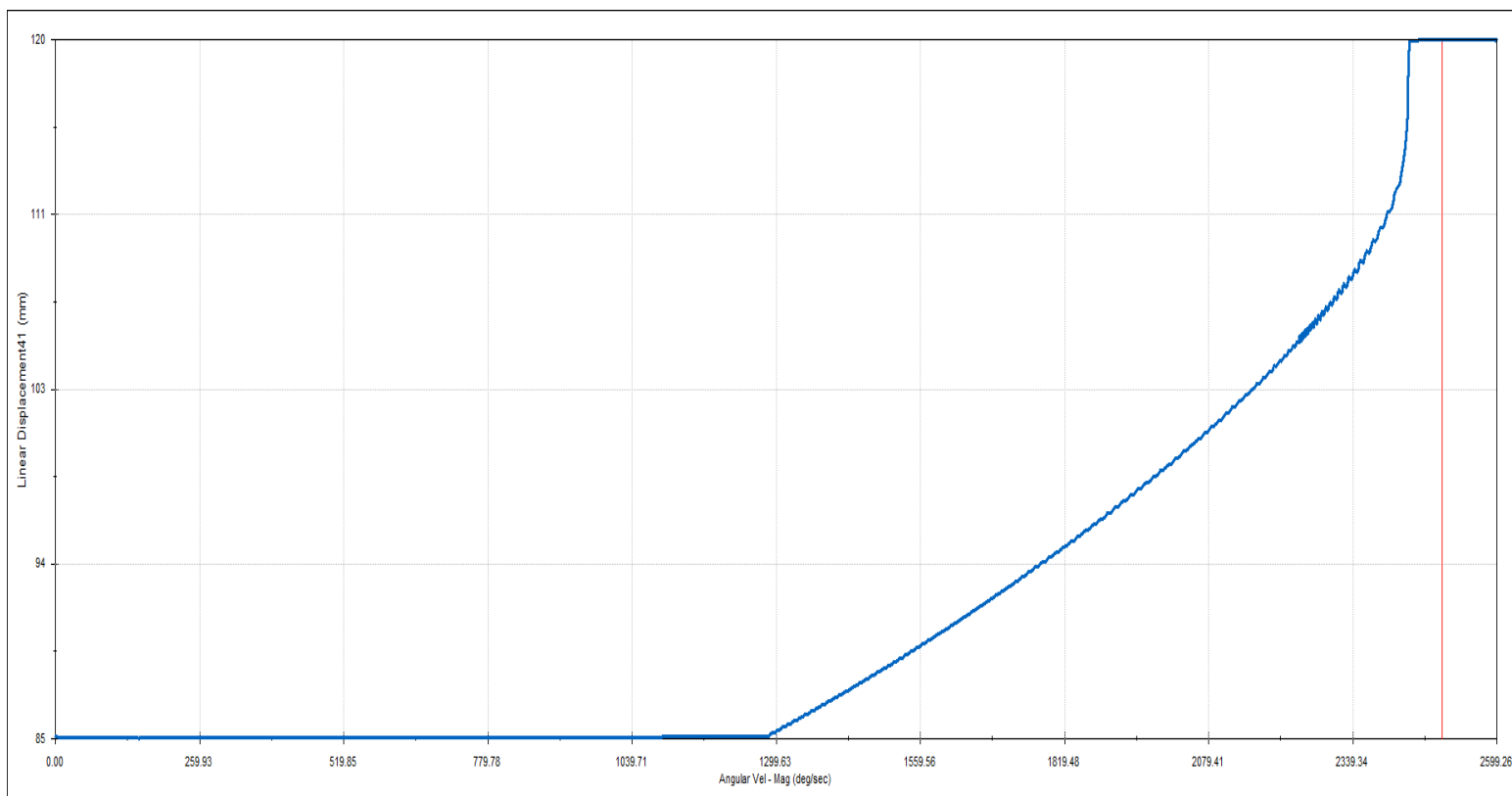
Εικόνα 3.2.1.2

Η συγκεκριμένη διάταξη έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

ΓΩΝΙΑ ΒΑΡΥΔΙΟΥ [DEG]	PITCH [DEG]	ΓΩΝΙΑ ΒΑΡΥΔΙΟΥ [rad]	ημίτονο γωνίας βαριδιού	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΛΑΚΩΝ [mm]
28,36	3,89	0,494974958	0,4750096	85,00
28,42	4	0,496022154	0,4759309	85,09
29,42	5	0,513475432	0,4912075	86,57
30,42	6	0,53092871	0,5063344	88,03
31,42	7	0,548381988	0,5213072	89,48
32,42	8	0,565835266	0,5361211	90,92
33,42	9	0,583288543	0,5507717	91,10
34,42	10	0,600741821	0,5652546	92,47
35,42	11	0,618195099	0,5795652	93,82
36,42	12	0,635648377	0,5936994	95,16
37,42	13	0,653101654	0,6076527	96,48
38,42	14	0,670554932	0,6214209	96,67
39,42	15	0,68800821	0,6349998	97,93
40,42	16	0,705461488	0,6483852	99,18
41,42	17	0,722914766	0,6615732	100,40
42,42	18	0,740368043	0,6745597	101,61
43,42	19	0,757821321	0,6873406	101,97
44,42	20	0,775274599	0,6999122	103,13
45,42	21	0,792727877	0,7122706	104,26
46,42	22	0,810181154	0,7244121	105,37
47,42	23	0,827634432	0,7363328	106,46
48,42	24	0,84508771	0,7480293	106,83
49,42	25	0,862540988	0,759498	107,87
50,42	26	0,879994266	0,7707352	108,89
51,42	27	0,897447543	0,7817377	109,89
52,42	28	0,914900821	0,7925021	110,86
53,42	29	0,932354099	0,8030251	111,26
54,42	30	0,949807377	0,8133034	112,19
55,42	31	0,967260654	0,8233341	113,09
56,42	32	0,984713932	0,8331139	113,97
57,42	33	1,00216721	0,84264	114,83
58,42	34	1,019620488	0,8519093	115,17
59,42	35	1,037073766	0,8609192	115,97
60,42	36	1,054527043	0,8696669	116,76
61,42	37	1,071980321	0,8781496	117,52
62,42	38	1,089433599	0,8863648	118,25
63,42	39	1,106886877	0,8943101	118,55
64,42	40	1,124340154	0,9019829	119,23
65,85	41,38	1,149298342	0,9124771	120

Πίνακας 3.2.1.1

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της απόστασης των δύο κυρίων πλακών σε χιλιοστά [mm] (κάθετος άξονας) σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής σε μοίρες ανά δευτερόλεπτο [deg/sec] (οριζόντιος άξονας), όπως αυτό προέκυψε από την προσομοίωση στο SolidWorks:



Διάγραμμα 3.2.1.1

Παρατηρούμε πως λίγο πριν φτάσουμε στη μέγιστη απόσταση των πλακών (μετά τα 111mm) έχουμε ένα σχεδόν ακαριαίο τέλος. Αυτό είναι μη αποδεκτό σαν εφαρμογή όμως είναι το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα χωρίς τη χρήση αποσβεστήρα, στη συγκεκριμένη διάταξη.

Επίσης η μη ομαλή αύξηση της απόστασης που παρατηρείται στο διάγραμμα οφείλεται στην ταλάντωση του ελατηρίου και θεωρούμε πως σε μια πραγματική εφαρμογή, θα εξαλειφόταν, λόγω αδράνειας των κινητών μερών.

Ενδεικτικά μπορούμε να συμπεράνουμε από το διάγραμμα πως:

- Από 0 ως 1290deg/sec η απόσταση των πλακών είναι στα 85mm
- Στις 1500deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 88mm
- Στις 1750deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 93mm
- Στις 2000deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 98mm
- Στις 2250deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 105mm
- Στις 2350deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 109mm
- Στις 2400deg/sec η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 111mm
- Από 2450deg/sec και πάνω η απόσταση των πλακών έχει φτάσει στα 120mm

Για να γίνουν πιο κατανοητές αυτές οι τιμές, με τη βοήθεια του **Πίνακα 3.2.1.1** και της σχέσης $1\text{deg/sec}=0.0174532925\text{rad/sec}$, μετατρέπουμε στο διεθνές σύστημα (SI):

- Από 0 ως 22,51rad/s η γωνία pitch θα είναι 3,89°
- Στις 26,18rad/s η γωνία pitch θα είναι 6°
- Στις 30,54rad/s η γωνία pitch θα είναι 10,4°
- Στις 34,91rad/s η γωνία pitch θα είναι 15°
- Στις 39,27rad/s η γωνία pitch θα είναι 21,7°
- Στις 41,02rad/s η γωνία pitch θα είναι 26°
- Στις 41,89rad/s η γωνία pitch θα είναι 28,4°
- Από τις 42,67rad/s και πάνω η γωνία pitch θα είναι 41,38°

3.2.2 Επιλογή Υλικών

Για τα κομμάτια της άρθρωσης που θα συγκρατεί την άκρη του φτερού, χρησιμοποιήθηκαν:

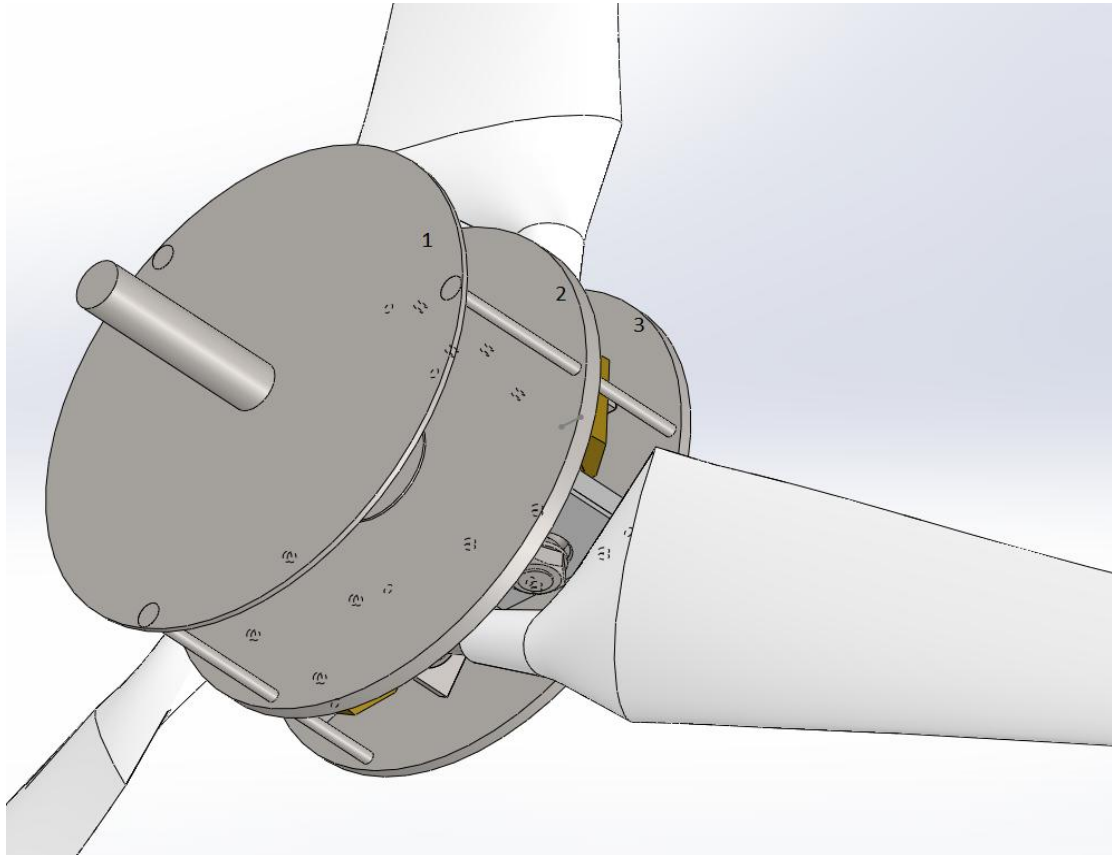
- πολυακετάλη (ertacetal): στο σώμα της άρθρωσης και στην τάπα, γιατί είναι ένα υλικό με υψηλή αντοχή, καλή συνεργασία, χωρίς τριβές με μέταλλα όπως ο ορείχαλκος και ο χάλυβας, εύκολη κατεργασία, μικρό βάρος και χαμηλή τιμή
- ορείχαλκος(μπρούτζος): στα δύο κομμάτια της κοτύλης (που μέσα τους συγκρατούν την μπίλια στήριξης) γιατί είναι εύκολος στην κατεργασία, συνεργάζεται χωρίς μεγάλο συντελεστή τριβής με τον χάλυβα και έχει μεγάλη ανθεκτικότητα, ώστε να μπορέσει να αντέξει τα φορτία που θα του ασκηθούν κατά την επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης
- χάλυβας: στη μπίλια, στην τάπα και στο παξιμάδι, γιατί έχει μεγάλη ανθεκτικότητα, μικρό κόστος, πολύ καλή συνεργασία, χωρίς μεγάλο συντελεστή τριβής με μέταλλα όπως ο ορείχαλκος και πολυμερή όπως το ertacetal.

Στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν:

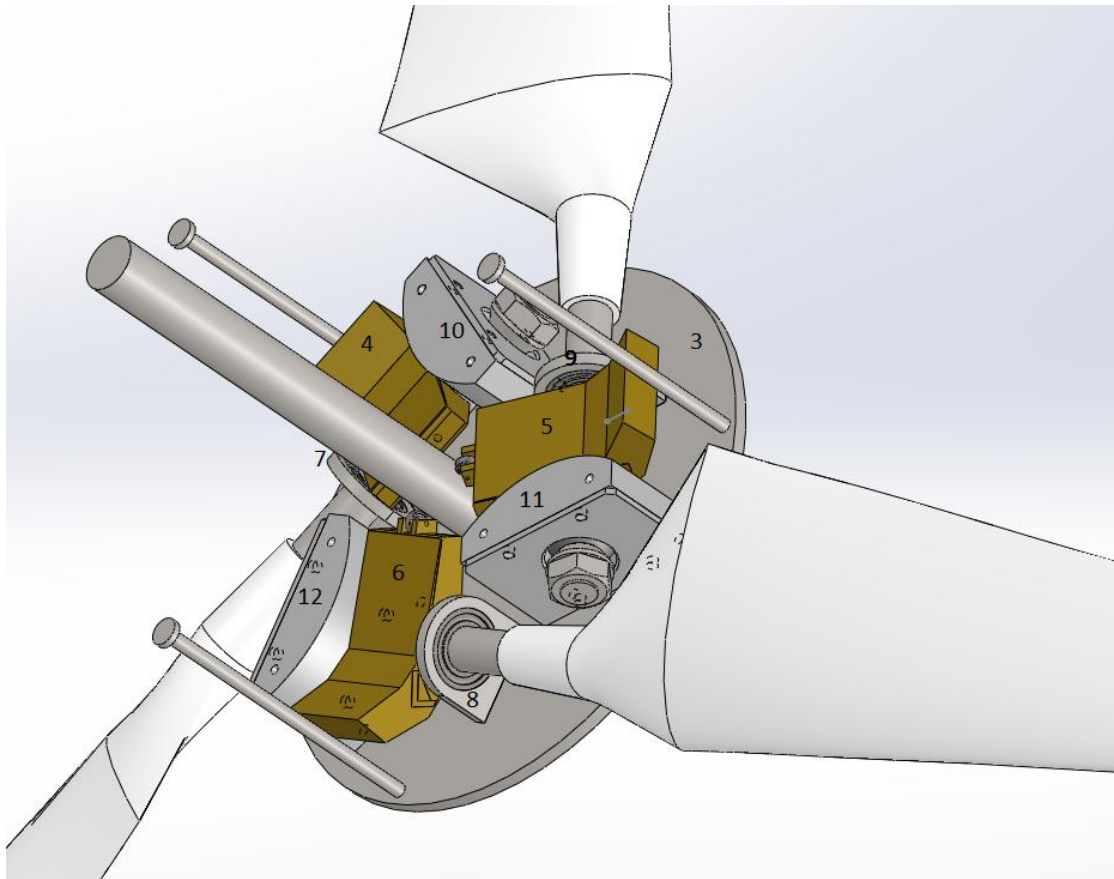
- ορείχαλκος: στα βαρίδια γιατί είναι ένα υλικό που κατεργάζεται εύκολα είτε χυτό είτε τορναριστό και έχει μεγάλη πυκνότητα ($8.4 - 8.75 \times 1000 \text{ kg/m}^3$), άρα με μικρό όγκο έχουμε μεγάλη μάζα.
- χάλυβας: στις τρεις φέτες που συγκρατούν όλο το σύστημα, στους άξονες των φτερών,, στον κεντρικό άξονα της μηχανής και στις βάσεις των κοινών ρουλεμάν λόγω υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας.
- πολυεστέρας: στα φτερά γιατί είναι ένα υλικό ελαφρύ, ανθεκτικό και εύκολο στο να του δοθεί το απαιτούμενο σχήμα.

4. Περιγραφή

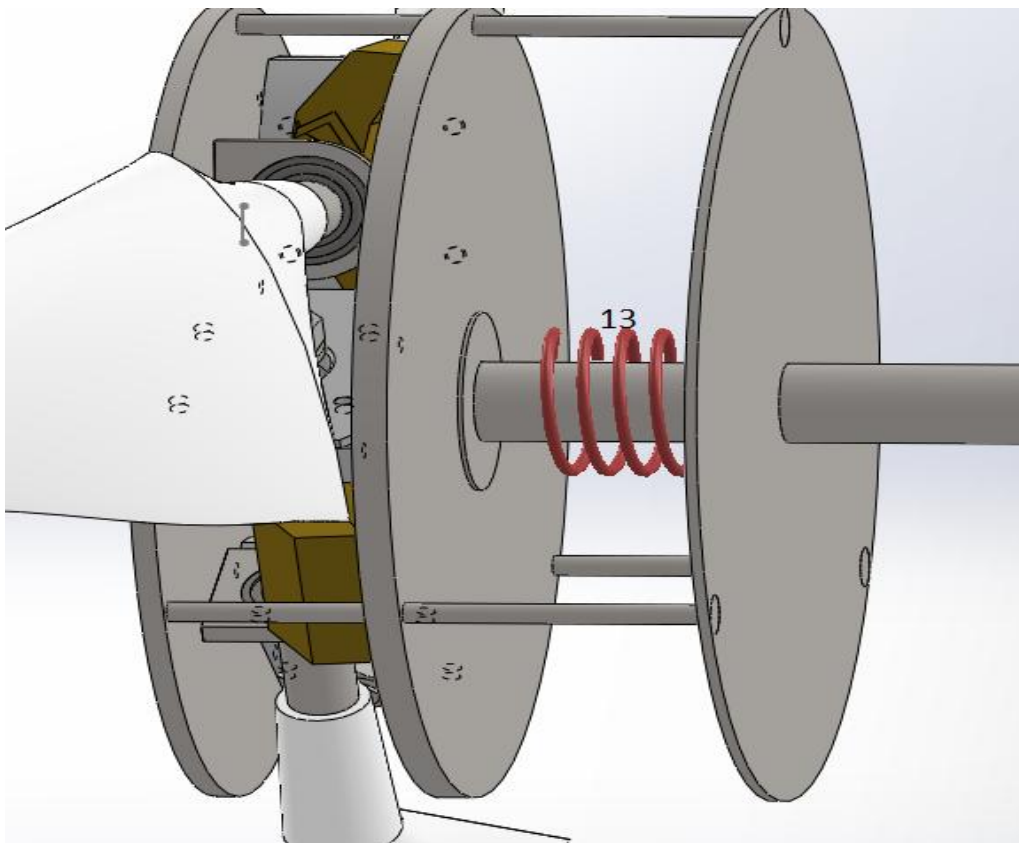
Ο μηχανισμός αποτελείται από τρεις δίσκους που τοποθετούνται παράλληλα (1,2,3), τρία βαρίδια (4,5,6) ένα για κάθε φτερό, μια βάση με ρουλεμάν για τον κάθε άξονα φτερού (7,8,9), τρία έδρανα στήριξης που παρέχουν αντοχή σε αξονική τάση (10,11,12) και ένα ελατήριο (13).



Εικόνα 4.1



Εικόνα 4.2

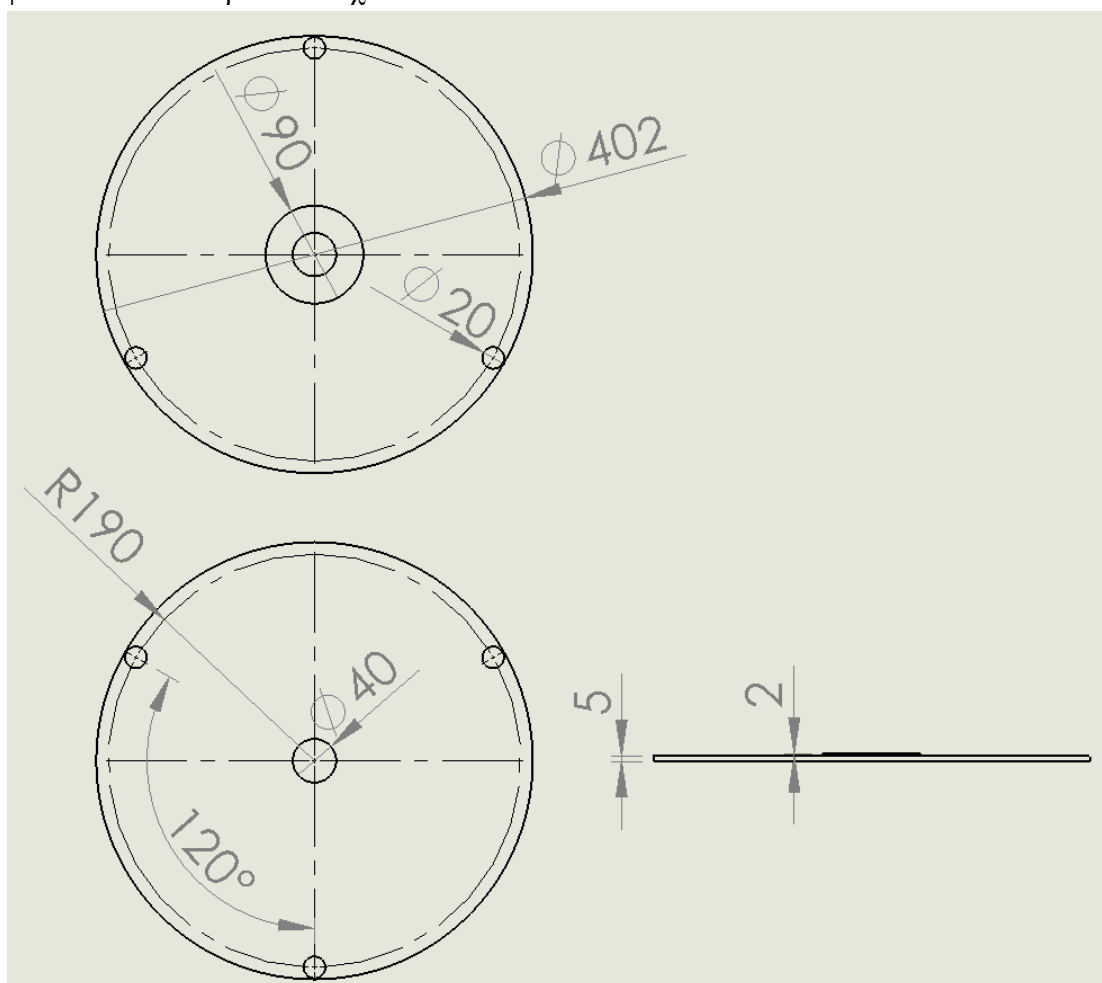


Εικόνα 4.3

Για τη λειτουργία του, στηρίζομαστε στην διέγερση της φυγοκέντρου, που ασκείται πάνω στο βαρίδι, το οποίο είναι τοποθετημένο κάθετα προς τον άξονα περιστροφής της ανεμογεννήτριας, πάνω στον άξονα-προέκταση του φτερού, ο οποίος είναι τοποθετημένος παράκεντρα. Όταν η μηχανή μας αρχίζει να περιστρέφεται πάνω από μια ορισμένη ταχύτητα (28,36 rad/s), η φυγόκεντρος που επιδρά πάνω στα βαρίδια, υπερνικά τη δύναμη του ελατηρίου και αρχίζει να τα σπρώχνει να απομακρυνθούν από το κέντρο περιστροφής, άρα να περιστραφούν γύρω από τους άξονες των φτερών στα οποία είναι πακτωμένα, το καθένα βαρίδι ξεχωριστά. Στην άκρη τους τα βαρίδια έχουν ένα ρουλεμάν που επιτρέπει την κύλιση με ελάχιστη τριβή της άκρης του βαριδιού πάνω στην πλάκα (2), σπρώχνοντάς την να απομακρυνθεί από την (3) και να έρθει πιο κοντά στην (1) μιας και η απόσταση μεταξύ (1) και (3) είναι σταθερή. Ανάμεσα στις πλάκες (1) και (2) υπάρχει το ελατήριο (12 N/mm), το οποίο συμπιέζεται και επιτρέπει στο μηχανισμό να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, όταν ο αέρας ελαττωθεί, άρα μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής. Το συνολικό βάρος του μηχανισμού θα είναι 55kg (54.939,49 gr).

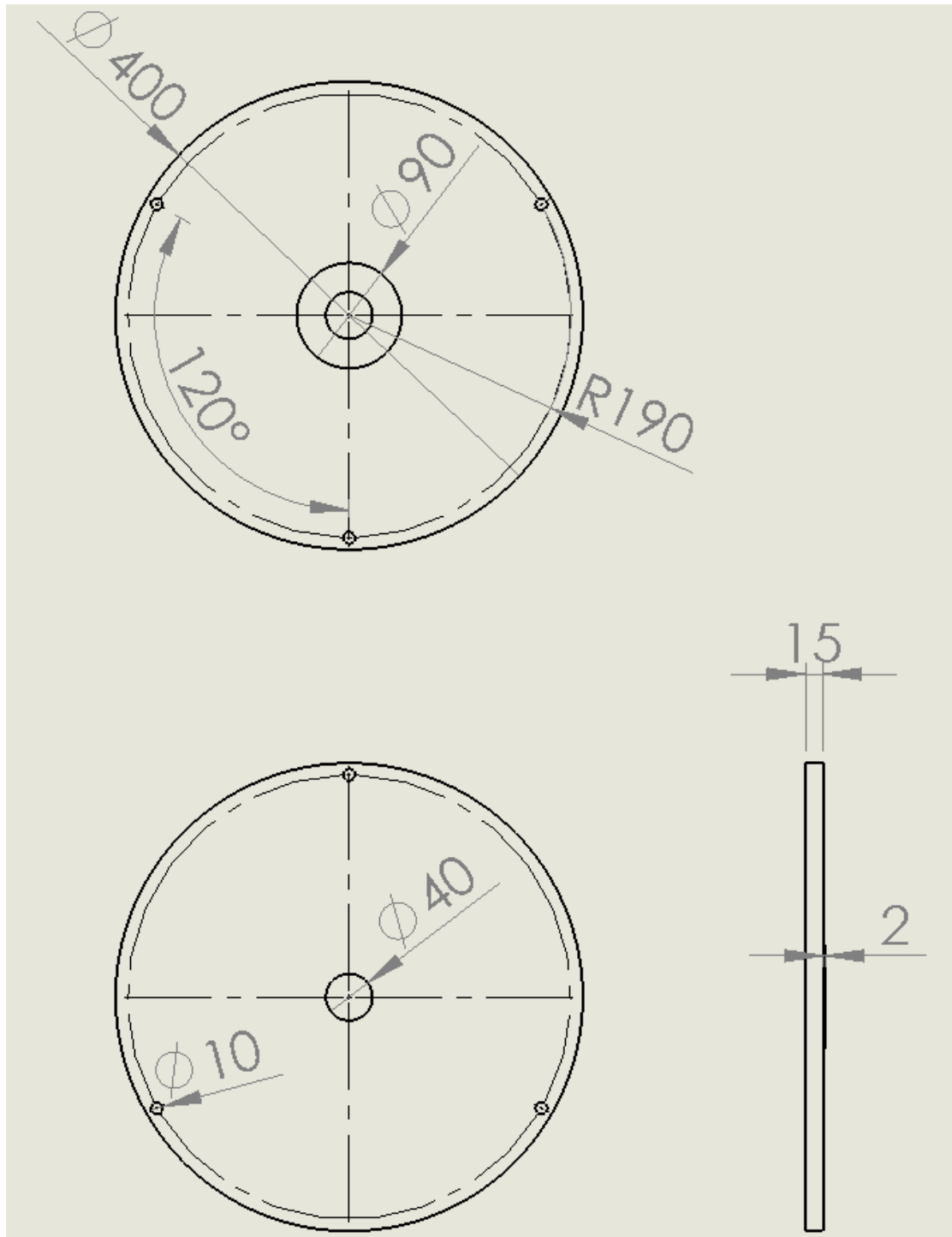
Παρακάτω παρουσιάζονται τα στοιχεία που συνθέτουν τον υπό μελέτη μηχανισμό.

Ο δίσκος (1) θα είναι από χάλυβα, θα ζυγίζει 5kg (4.943,89 gr) και οι διαστάσεις του φαίνονται στα παρακάτω σχέδια:



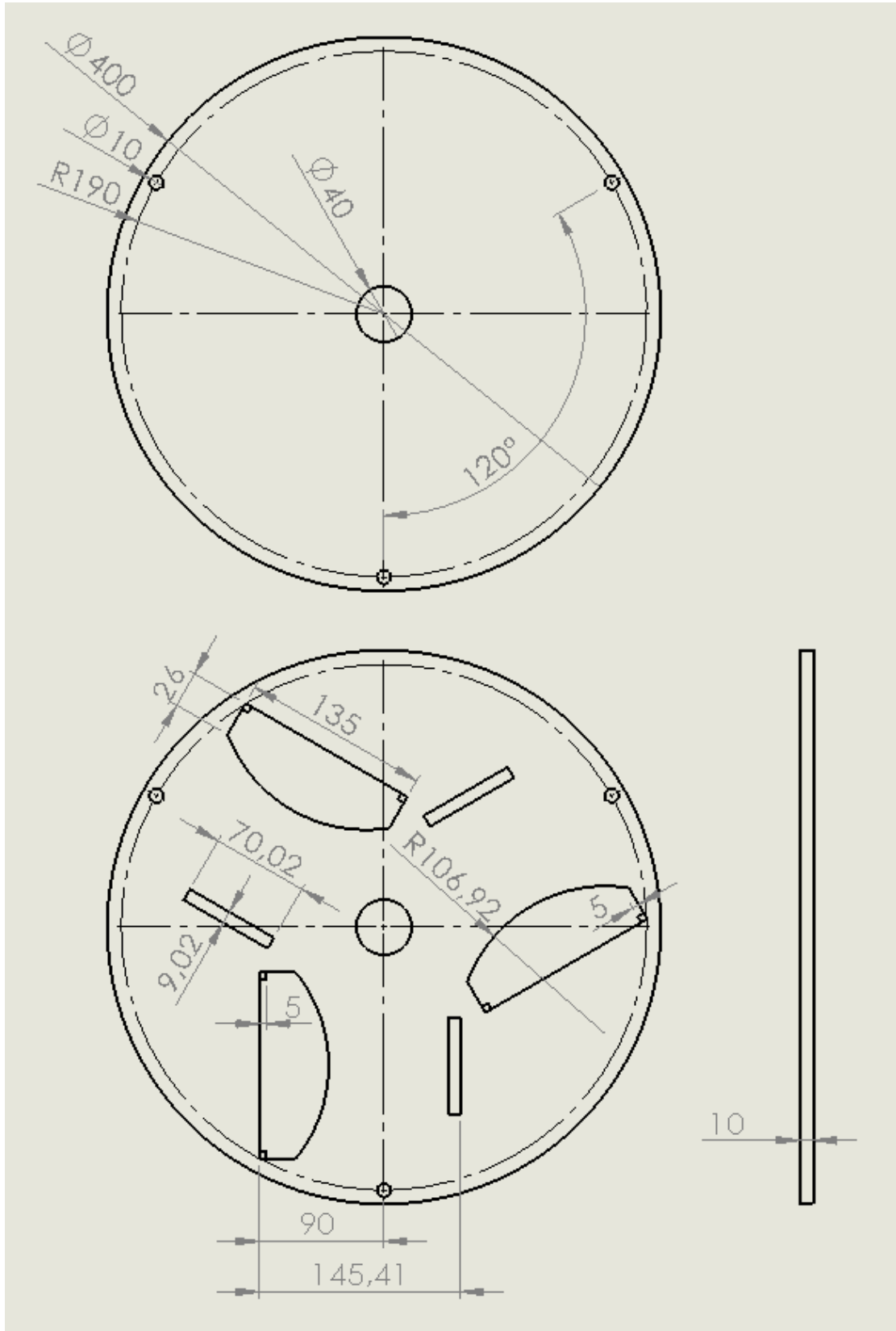
Σχέδιο 4.1

Ο δίσκος (2) θα είναι από χάλυβα, θα ζυγίζει 14,6kg (14.607,70 gr) και οι διαστάσεις του φαίνονται στα παρακάτω σχέδια:



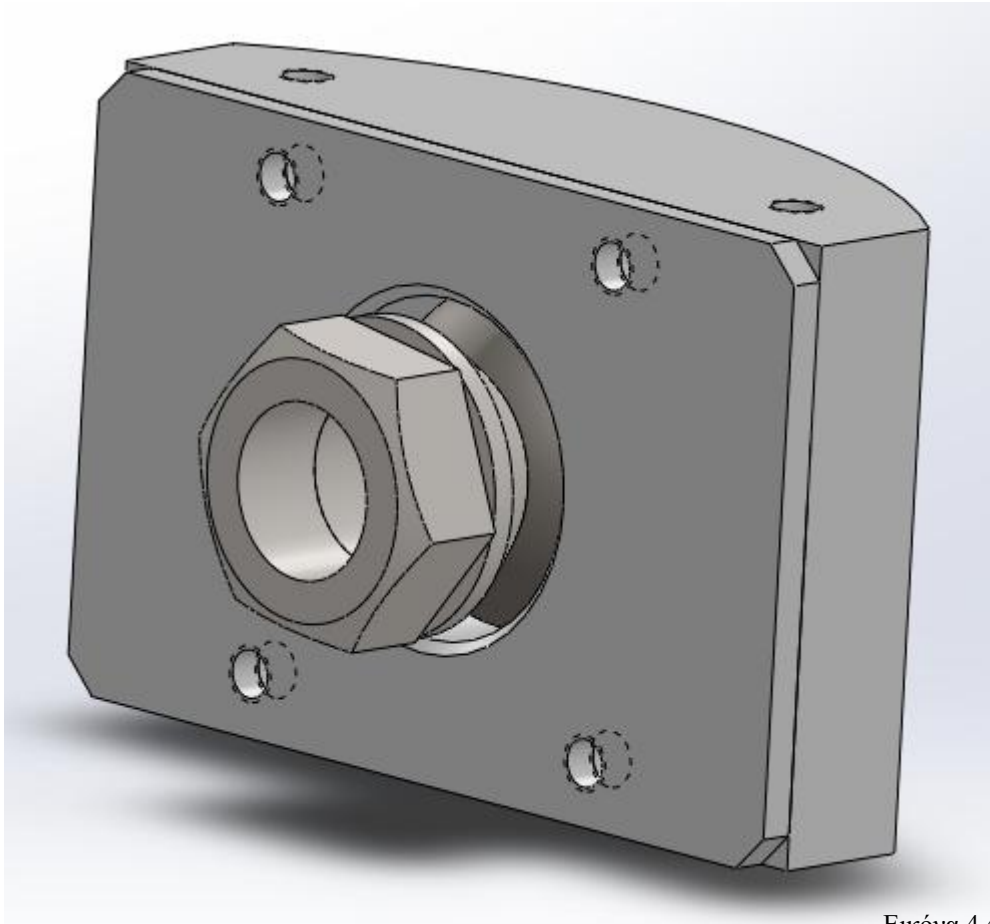
Σχέδιο 4.2

Ο δίσκος (3) θα είναι από χάλυβα, θα ζυγίζει 9kg (8.944,73 gr) και οι διαστάσεις του φαίνονται στα παρακάτω σχέδια:

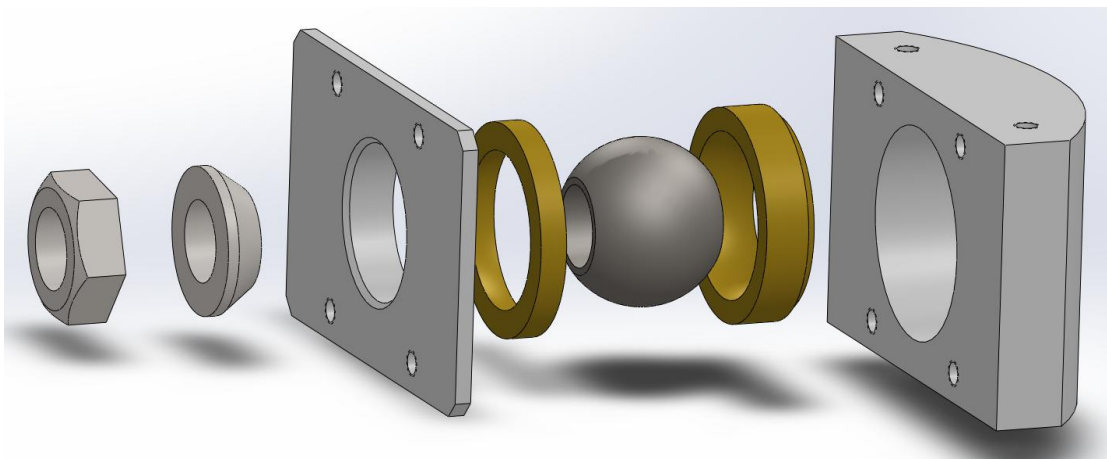


Σχέδιο 4.3

Η αρθρώσεις στήριξης των φτερών, οι οποίες εφαρμόζονται στις μεγάλες οπές του δίσκου (3), φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 4.4



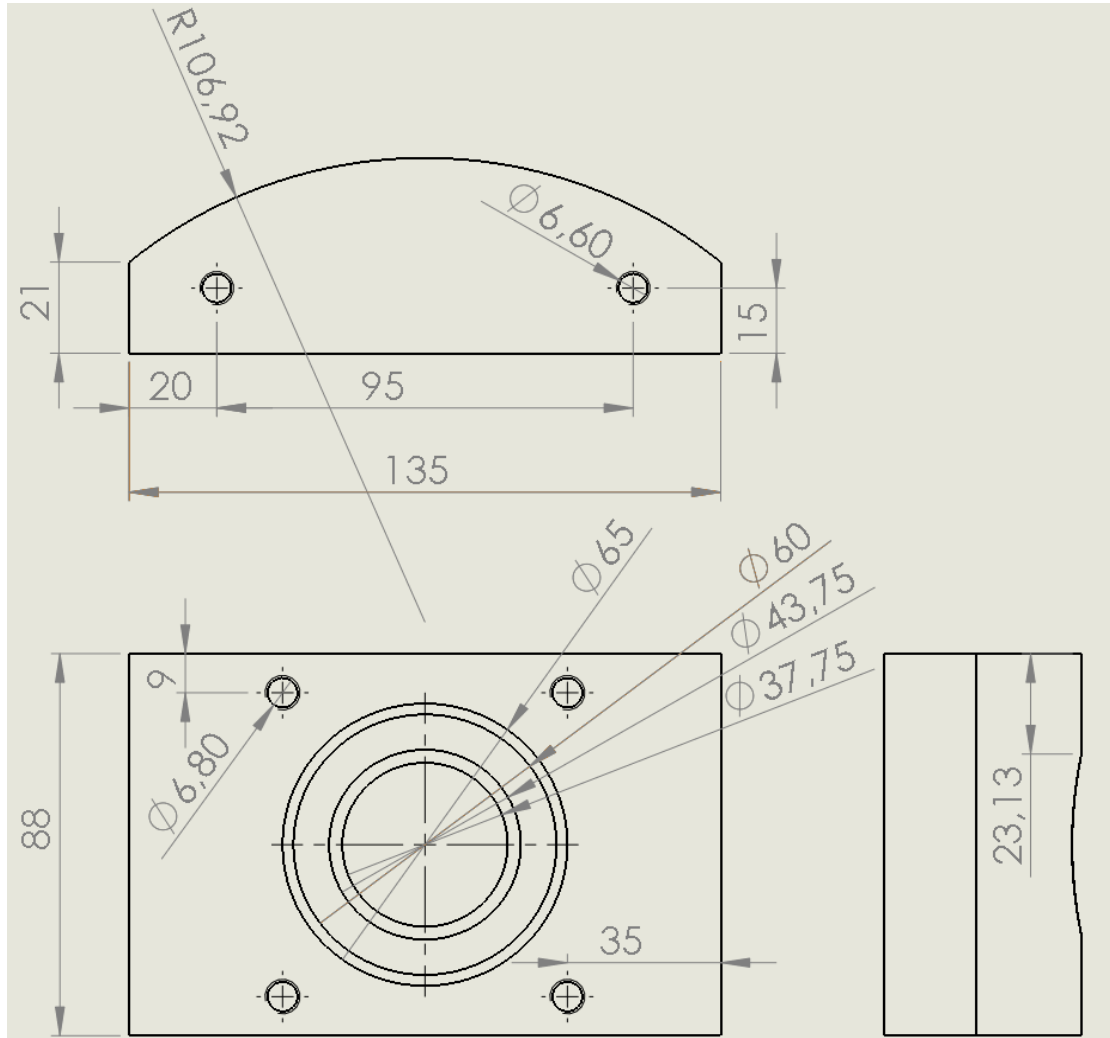
Εικόνα 4.5

Και στα παρακάτω σχέδια φαίνονται οι διαστάσεις του κάθε εξαρτήματος της άρθρωσης:

Σώμα:

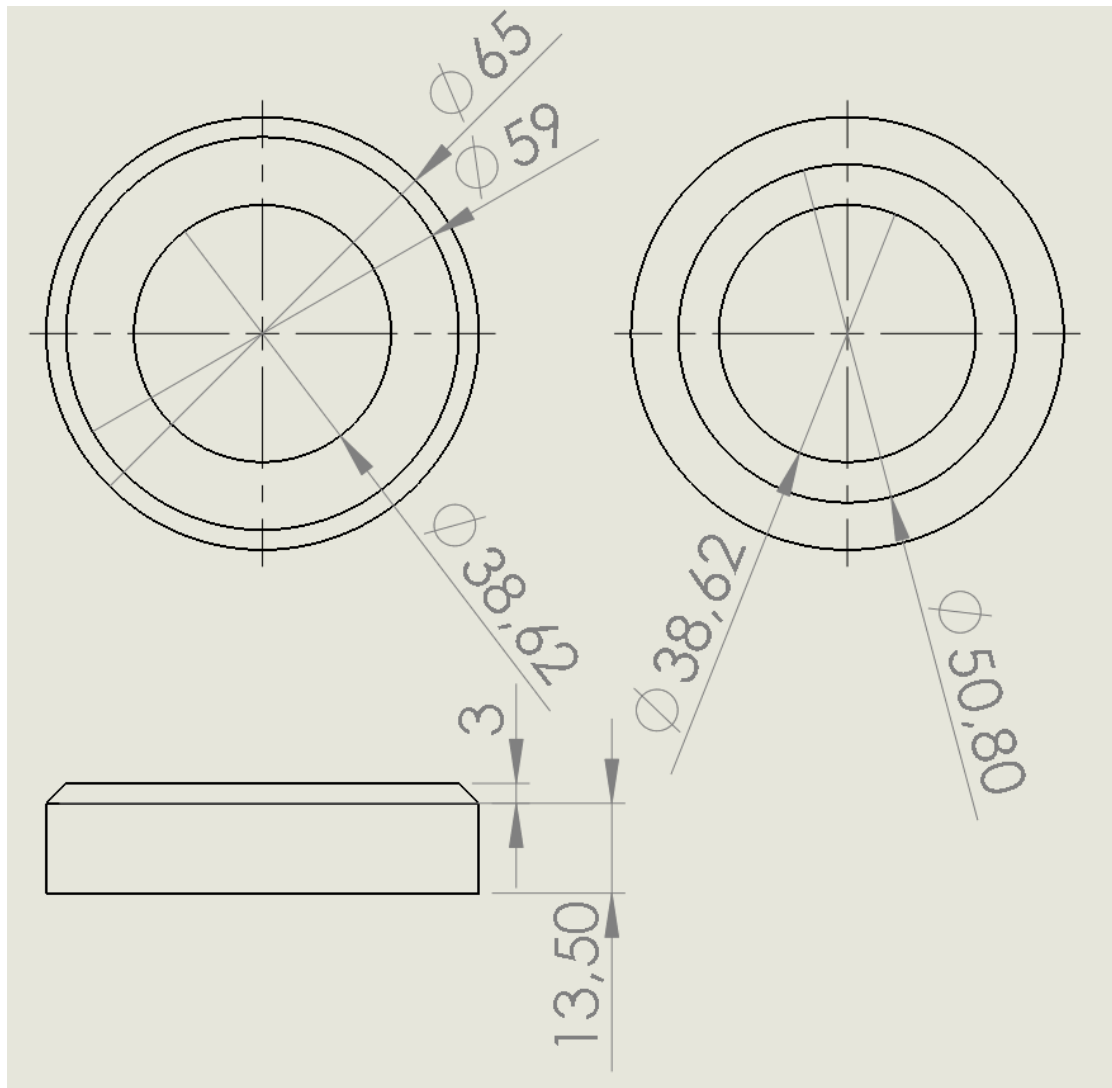
Υλικό: Ertacetal

Βάρος: 0,5kg (434,79 gr)



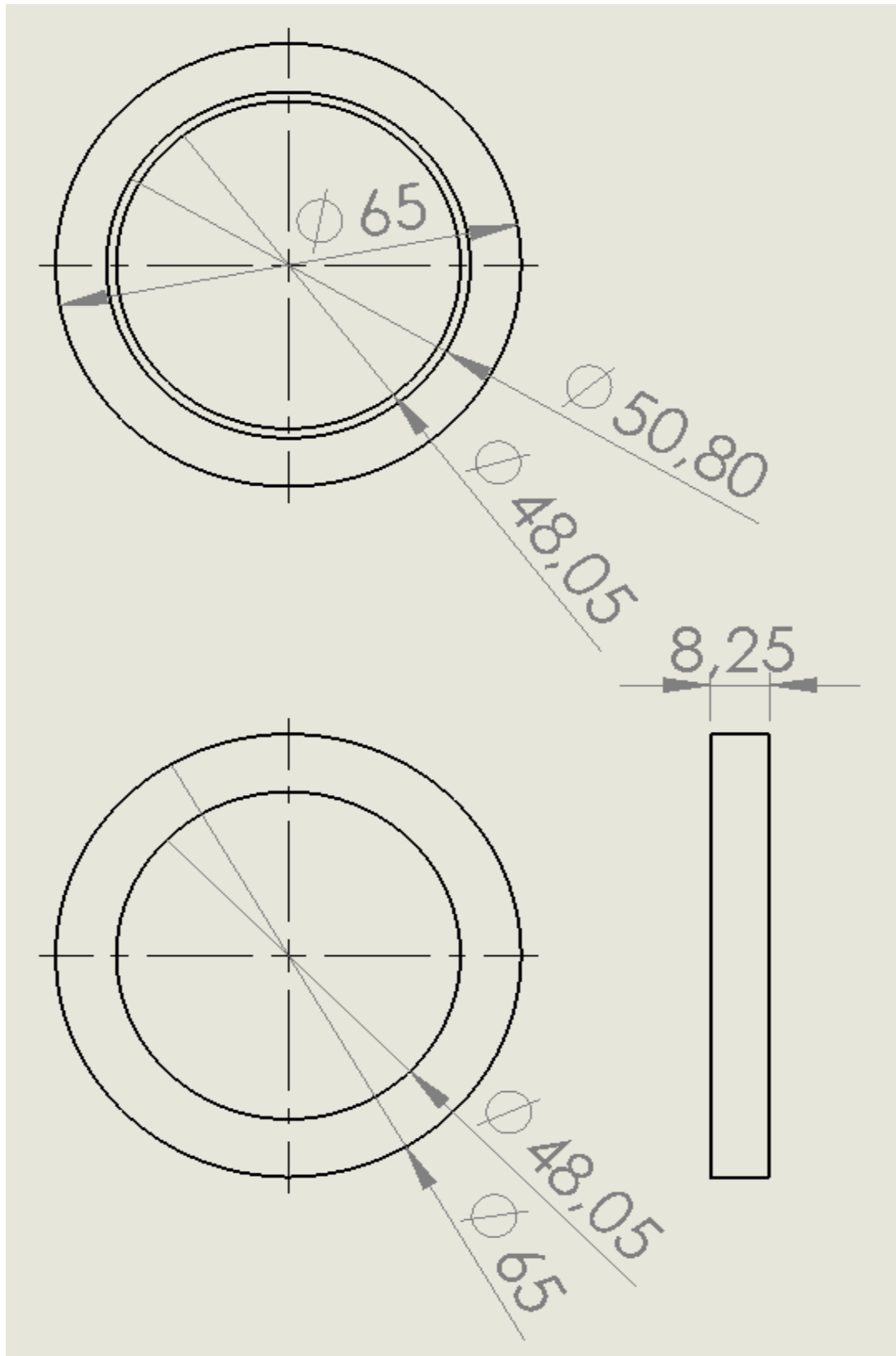
Σχέδιο 4.4

Κοτύλη α:
Υλικό: Ορείχαλκος
Βάρος: 213,55 gr



Σχέδιο 4.5

Κοτύλη β:
Υλικό: Ορείχαλκος
Βάρος: 95,57 gr

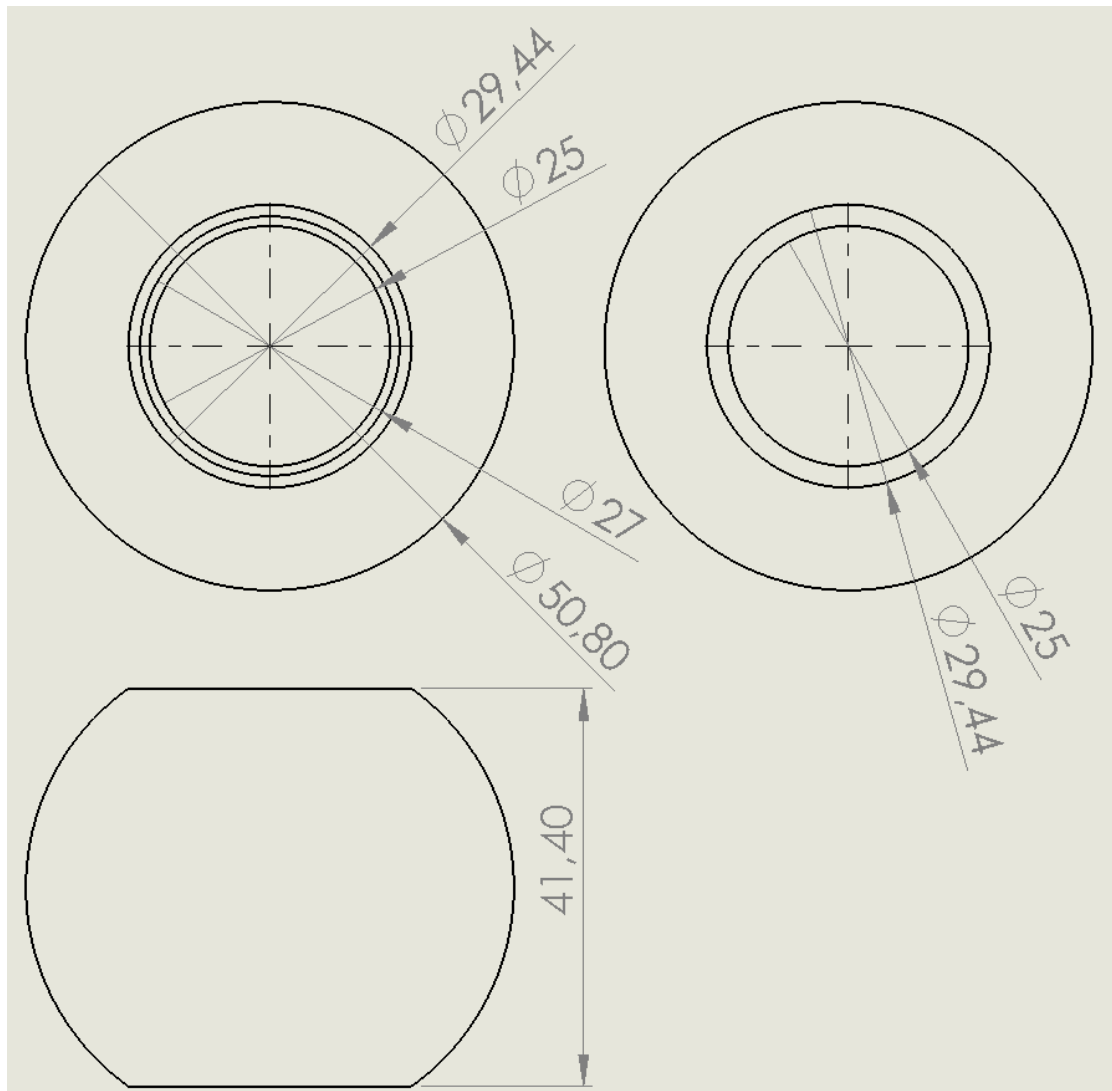


Σχέδιο 4.6

Μπίλια:

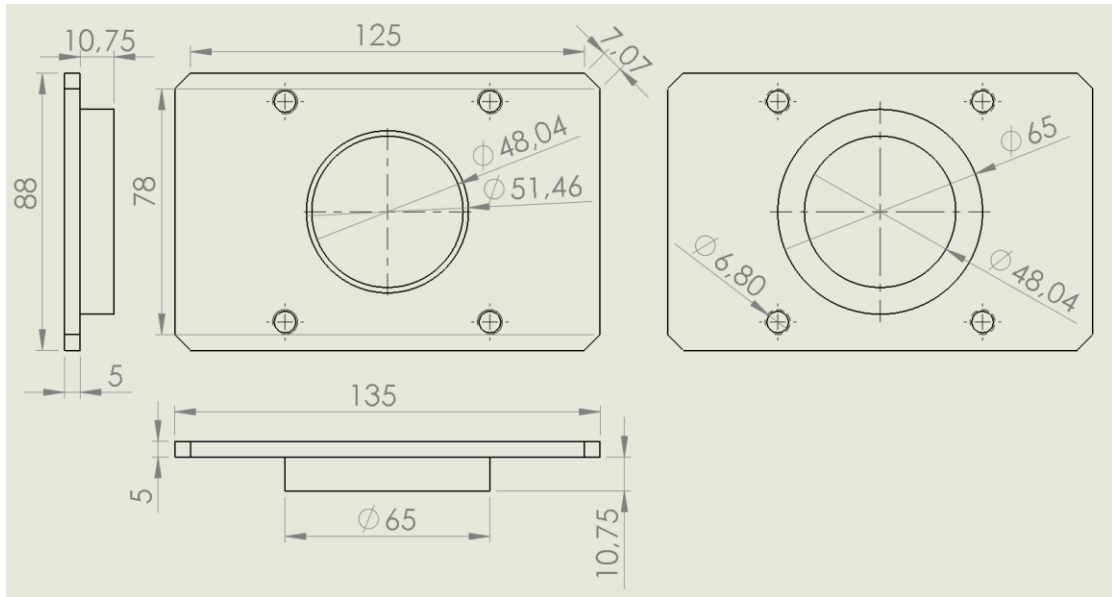
Υλικό: AISI 4130 Steel, annealed at 865C

Βάρος: 353,20 gr



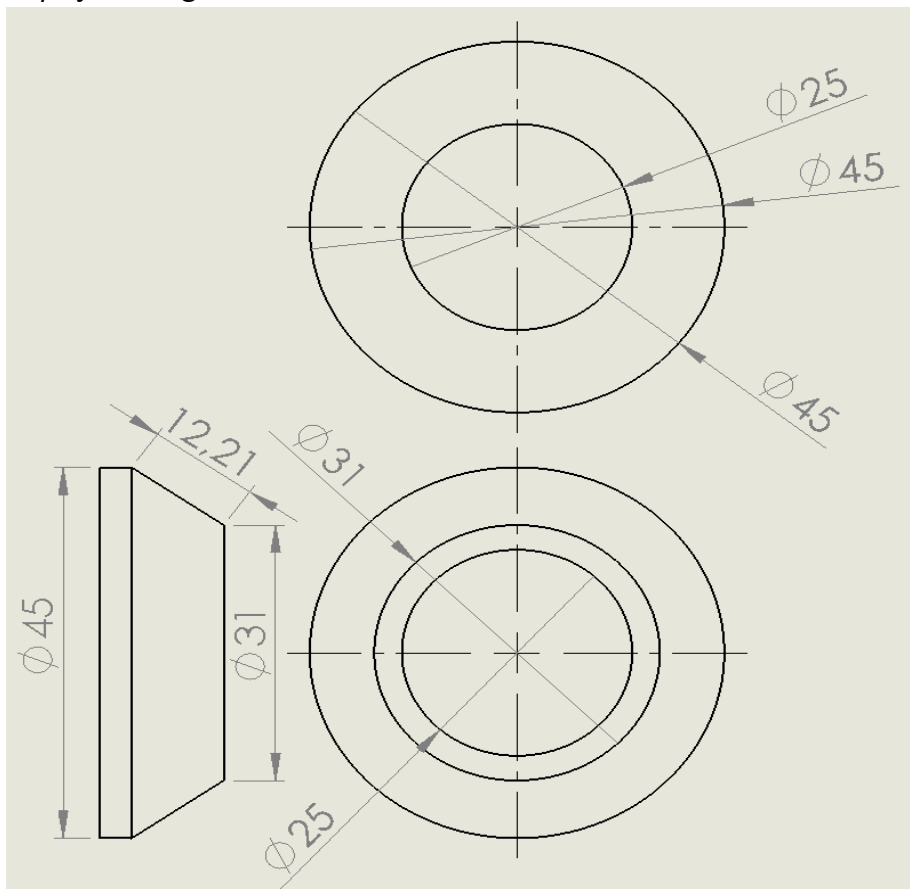
Σχέδιο 4.7

Τάπα:
Υλικό: Ertacetal
Βάρος: 92,10 gr



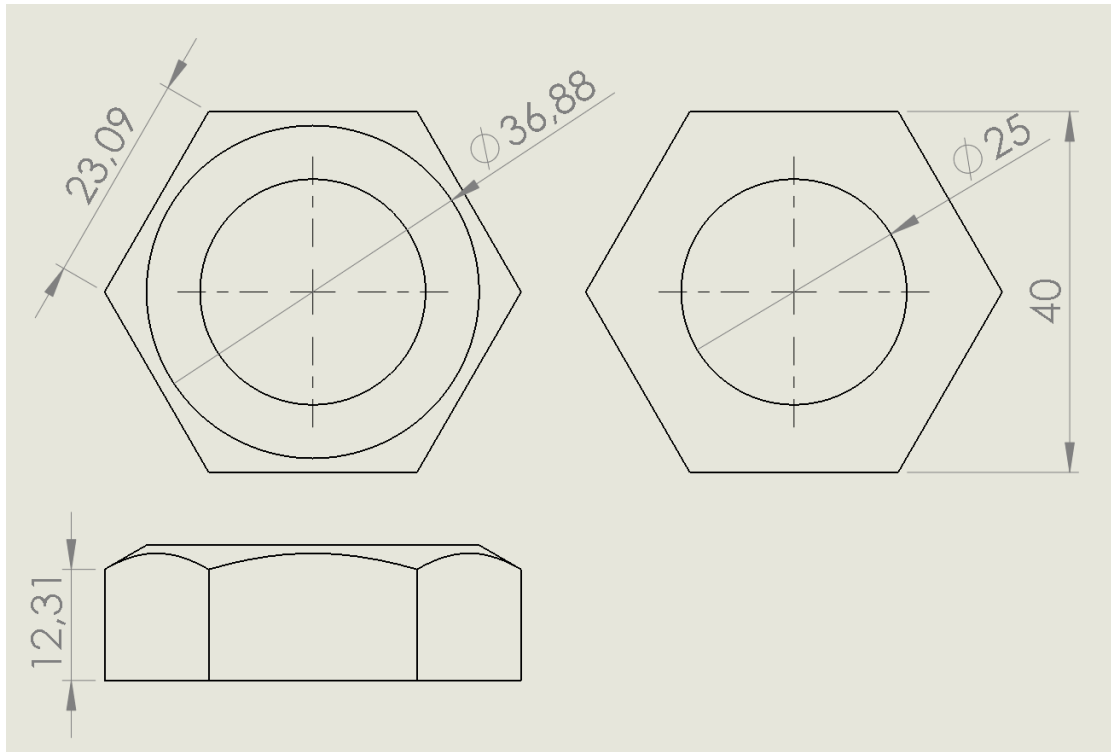
Σχέδιο 4.8

Φλάντζα:
Υλικό: Ertacetal
Βάρος: 81,21 gr



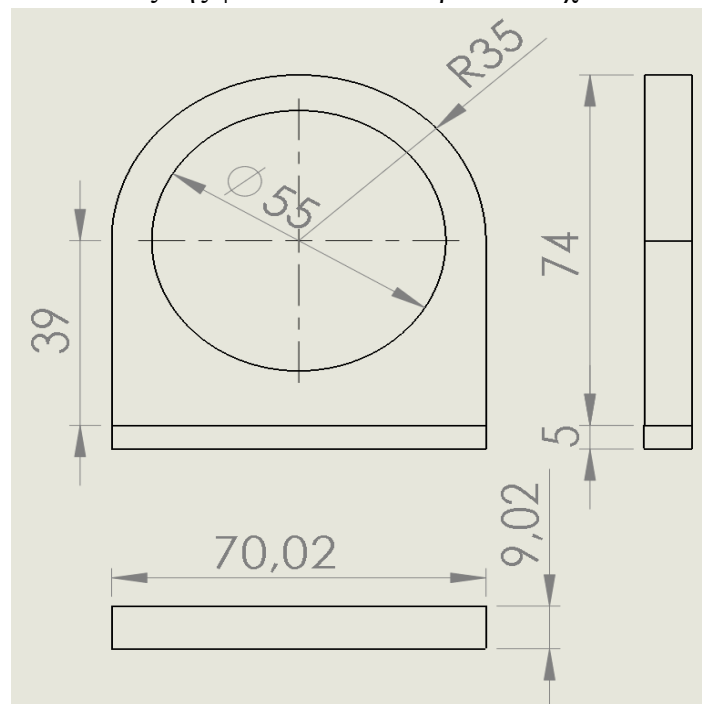
Σχέδιο 4.9

Παξιμάδι:
Υλικό: Χάλυβας
Βάρος: 102,57 gr



Σχέδιο 4.10

Το δεύτερο σημείο στήριξης του άξονα είναι σε ένα απλό ρουλεμάν το οποίο εδράζεται μέσα στη φωλιά που έχει φτιαχτεί γι αυτό το σκοπό και τοποθετείται στη μικρή οπή παραλληλόγραμμου σχήματος, θα είναι φτιαγμένη από χάλυβα, θα ζυγίζει 184,58 gr και οι διαστάσεις της φαίνονται στο παρακάτω σχέδιο:

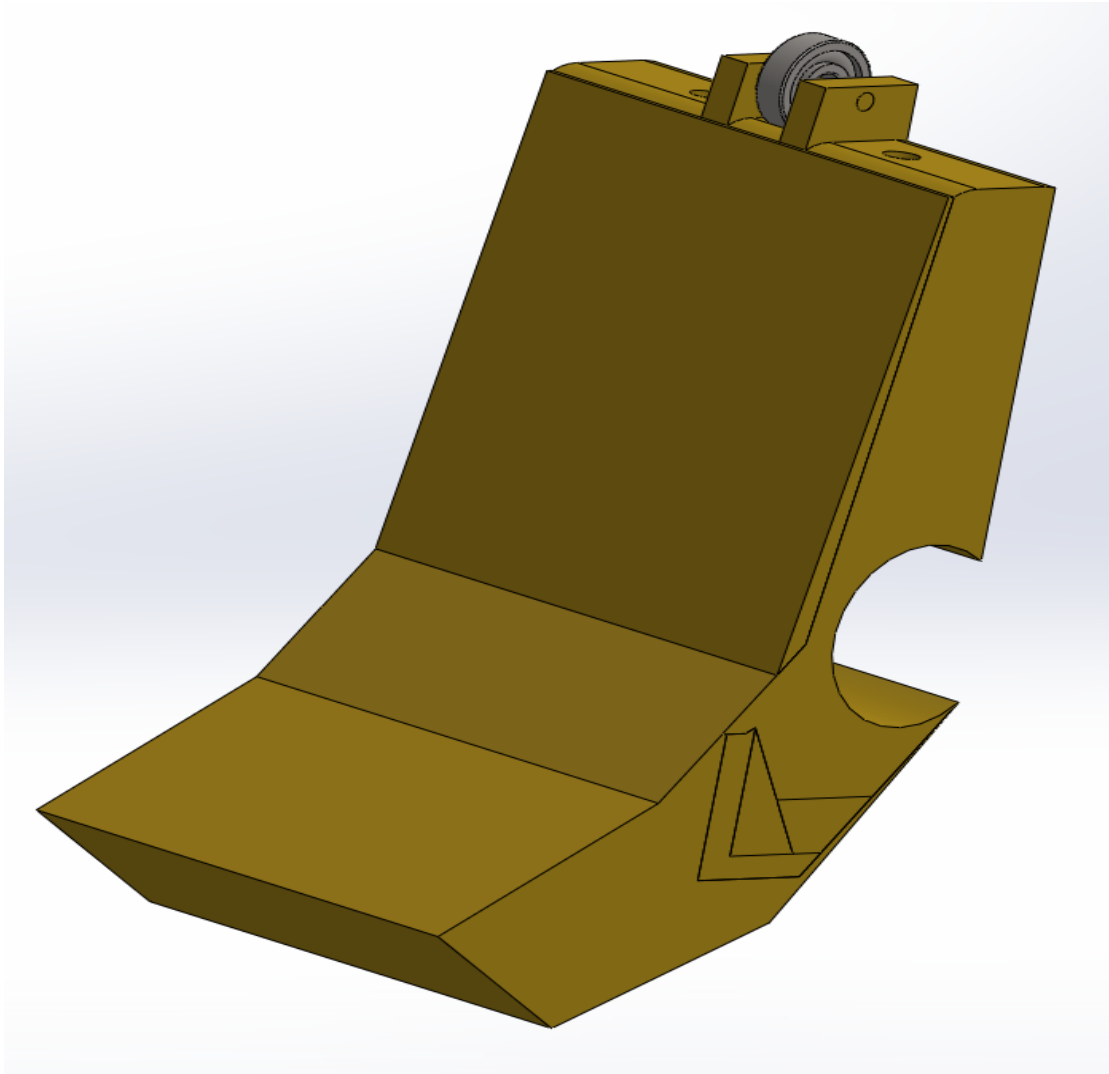


Σχέδιο 4.11

Περιφερειακά των δίσκων υπάρχουν 3 οδηγοί οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε γωνία 120 μοιρών μεταξύ τους, θα είναι φτιαγμένοι από χάλυβα, θα ζυγίζουν 157,13 gr και θα έχουν τις εξής διαστάσεις:



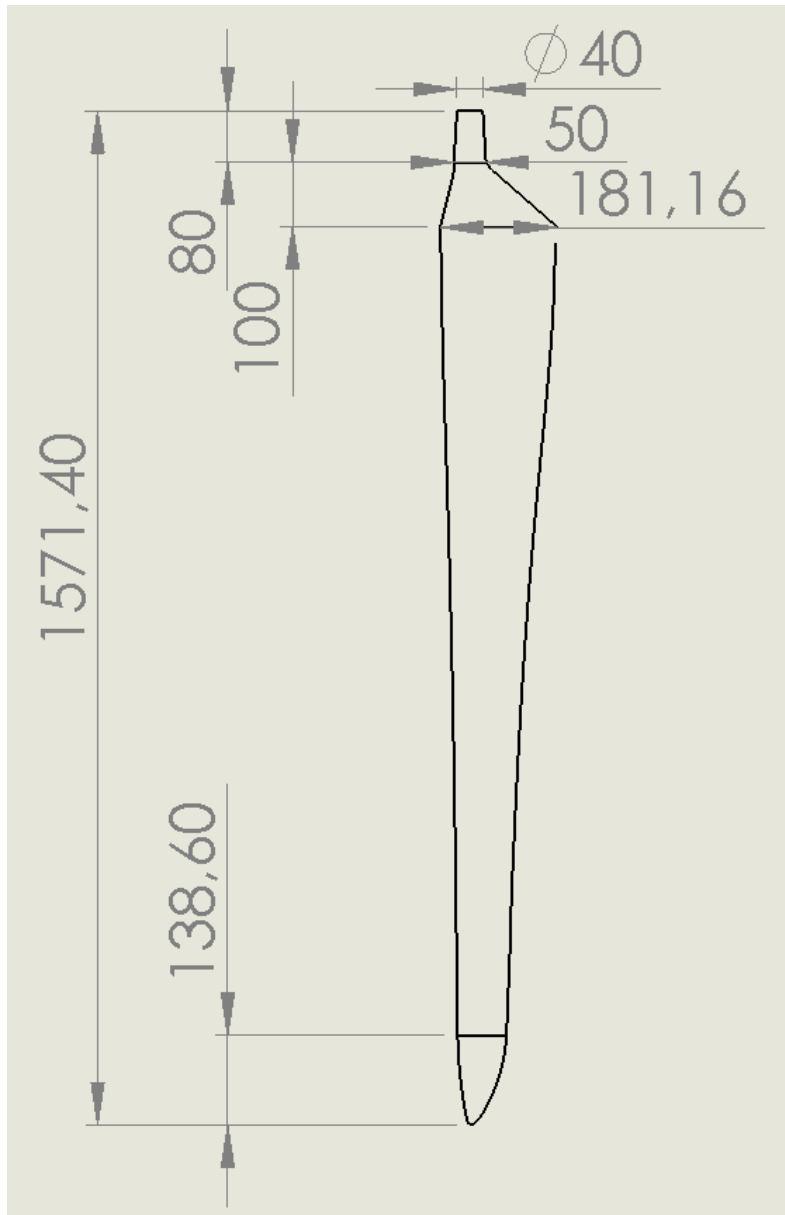
Σχέδιο 4.12



Εικόνα 4.7

Όπως φαίνεται στην εικόνα, στο πάνω μέρος του βαριδιού υπάρχει ένα ρουλεμάν κύλισης το οποίο επιτρέπει την κατά το δυνατόν χωρίς τριβές κύλιση του άκρου του βαριδιού στην επιφάνεια του δίσκου (2).

Το φτερό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον μηχανισμό, θα είναι από πολυεστέρα, θα έχει βάρος 3,1kg (3.094,41 gr) και θα έχει τις παρακάτω βασικές διαστάσεις:



Σχέδιο 4.15

5. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, έχουμε ένα μηχανισμό ελέγχου μικρής Ανεμογεννήτριας ο οποίος:

- Λειτουργεί σε θεωρητικό επίπεδο εντός των προδιαγραφών που πρέπει να έχει ένα σύστημα παθητικού ελέγχου της γωνίας σφήνωσης μιας μικρής ανεμογεννήτριας.
- Είναι λιτός αφού έχει λίγα εξαρτήματα και ακόμα λιγότερα κινητά μέρη, ελαφρύς, εύκολος και φθηνός στην κατασκευή .
- Δεν έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει πολύ το pitch,
- Δεν έγινε κατορθωτό να κατασκευαστεί και να δοκιμαστεί πειραματικά,
- Δεν είναι μια "plug and play" λύση μιας και είναι μελετημένη για συγκεκριμένες διαστάσεις φτερού, συγκεκριμένο εύρος στροφών λειτουργίας και συγκεκριμένη γεννήτρια με την οποία θα συνεργάζεται.
- Αποτελείται από λίγα εξαρτήματα κάτι που συμφωνεί με τη γενική αρχή πως όσο πιο λιτός είναι ένας μηχανισμός, τόσο πιο εύκολα μπορούν να προβλεφθούν δυσλειτουργίες, αστοχίες και τελικά να προκύψουν προβλήματα.
- Το εύρος γωνιών pitch στο οποίο μπορεί να κινηθεί ο μηχανισμός είναι μεταξύ $3,89^\circ$ και $41,38^\circ$, δηλαδή ένα εύρος $37,49^\circ$, το οποίο είναι αρκετό για να φρενάρει τη μηχανή, δεν έχει όμως το εύρος των ενεργητικών συστημάτων ελέγχου ή άλλων εφαρμογών παθητικού ελέγχου.

Χρησιμοποιώντας ρουλεμάν, σφαιρικές αρθρώσεις και μπούσες, ελαχιστοποιούμε τις τριβές και τις φθορές άρα υπάρχει αξιοπιστία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το συνολικό βάρος του μηχανισμού θα είναι 55 κιλά που τον καθιστά εύκολο στη μεταφορά και την τοποθέτηση. Πέρα από τις σφαιρικές αρθρώσεις που θεωρήθηκε πως δεν αγοράζονται έτοιμες, για να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στη συγκεκριμένη εφαρμογή, οι οποίες για να κατασκευαστούν απαιτούν ακρίβεια κατά την κατεργασία, όλα τα υπόλοιπα μέρη είτε πωλούνται ευρέως στο εμπόριο φθηνά είτε μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα σε ένα μηχανουργείο.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι:
ανοξειδωτος χάλυβας (8 €/kg) ,
ορείχαλκος (μπρούτζος) (12,44 €/kg),
ertacetal (8,5 €/kg).

Άρα έχουμε ένα κόστος του υλικού, χωρίς να υπολογίσουμε όσο χαθεί κατά την κατεργασία:

- ανοξειδωτος χάλυβας → $31,5\text{kg} \times 8\text{€/kg} = 252\text{€}$
- ορείχαλκος → $8,5\text{kg} \times 12,44\text{ €/kg} = 106\text{€}$
- ertacetal → $1,8\text{kg} \times 8,5\text{ €/kg} = 15,5\text{€}$

Σύνολο 373,5€ άρα μπορούμε να υπολογίζουμε γύρω στα 400€ μαζί με το υλικό που θα χαθεί κατά την κατεργασία.

Εμπειρικά υπολογίζουμε πως το κόστος εργασίας για την κατεργασία θα είναι 1/3 επιπλέον του κόστους των πρώτων υλών, δηλαδή περίπου 135€.

Καταλήγουμε λοιπόν σε μια προσεγγιστική εκτίμηση του συνολικού κόστους περίπου στα 535€.

6. Παρατηρήσεις

A. Λόγω έλλειψης χρόνου, δεν έγινε δυνατή η κατασκευή πρωτοτύπων για πειραματικές δοκιμές κάτι που θα εξασφάλιζε ασφαλέστερα στοιχεία και ενδεχόμενες διορθώσεις στο σχεδιασμό.

B. Η εφαρμογή αυτή για να μπορέσει να λειτουργήσει σε άλλα δεδομένα γεννήτριας και διαστάσεων φτερού, θα πρέπει να επαναυπολογιστεί η μάζα των βαριδιών, οι διαστάσεις των σφαιρικών αρθρώσεων και τα χαρακτηριστικά του ελατηρίου.

7. Βιβλιογραφία

1. Εικόνες μηχανισμών παθητικού pitch control:
 - 2.2.1: http://chinawindenergy.en.alibaba.com/product/466716424-215790062/AH_5kw_pitch_control_wind_turbine.html?tracelog=generatings12-2
 - 2.2.2: http://chinawindenergy.en.alibaba.com/product/205148231-215790062/Pitch_controlled_wind_turbine_for_home_use_and_commercial_use.html
 - 2.2.3: <http://www.greenpatentblog.com/2011/06/01/awea-report-part-i-windspot-by-sonkyo-and-synerdrive-by-kenersys/>
 - 2.2.4: <http://www.aluminum-solar-absorbers.com/wind-power>
 - 2.2.5: <http://www.fieldlines.com/index.php?topic=138013.27>
 - 2.2.6: <http://www.power-talk.net/kestrel-wind-turbines.html>
2. Πρόγραμμα σχεδίασης, προσομοίωσης κίνησης του μηχανισμού και εξαγωγής αποτελεσμάτων: **SolidWorks 2012, Educational Edition**
3. Οι τιμές των υλικών που χρειάζονται για τον μηχανισμό (Ανοξειδωτος χάλυβας, Ορείχαλκος και Ertacetal) προέκυψαν από προσφορά που ζήτησε εκ μέρους του εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης η συνεργάτιδα του εργαστηρίου Ειρήνη Δακανάλη από την εταιρία "Μεταλλοβιομηχανική Α.Ε.Β.Ε." στις 7/6/2016
4. Η ηλεκτρογεννήτρια με την οποία θα συνεργάζεται ο μηχανισμός και που με βάση αυτή προέκυψαν κάποιες από τις προδιαγραφές του, είναι προϊόν της Διπλωματικής Εργασίας της Μαρίας Μητροπούλου, στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Πάτρας.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
7. <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>
8. <http://www.intechopen.com/books/wind-turbines-design-control-and-applications/small-wind-turbines-specification-design-and-economic-evaluation>
9. http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2016/01/2015_-HWEA_Statistics_Greece.pdf
10. Διεθνής κανονισμός προδιαγραφών IEC61400-2
11. <http://docplayer.gr/8464626-Shediasmos-kai-kataskeyi-anemogennitriton.html>
12. http://www.homepower.com/sites/default/files/articles/ajax/docs/1_Piggott-Exploded.jpg
13. http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C124/54/418,1554/images/img_4_38.jpg
14. http://3.bp.blogspot.com/-RvM6hGIbpmU/Vn8Fj8MboGI/AAAAAAAAABsg/XV8LbAld-Gc/s1600/airfoil_stalled.jpg

15. https://energypedia.info/wiki/File:Wind_turbine_blade_aerodynamics_-_stall_control.jpg