



**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΡΗΤΗΣ**
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

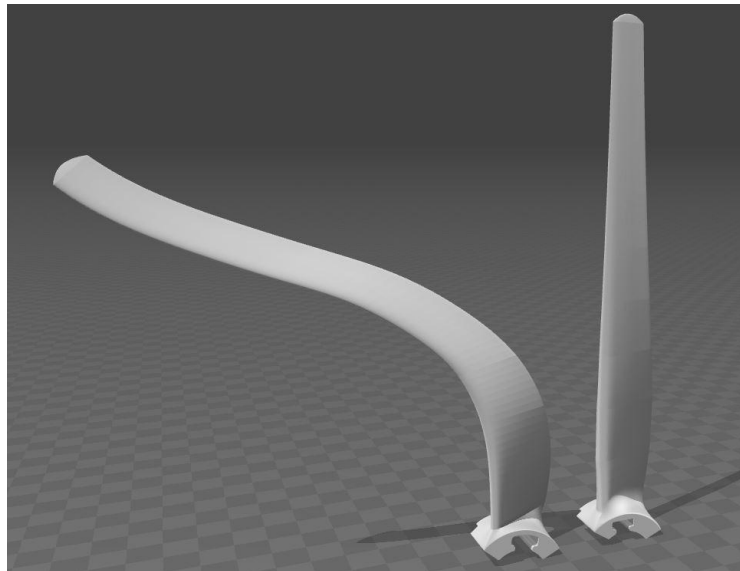
Πτυχιακή Εργασία

Επαλήθευση Γεωμετρίας Τρισδιάστατα Εκτυπωμένων Πτερυγώσεων με Τεχνικές Αντίστροφης Μηχανικής

“Geometry Verification of 3D Printed Wings With Reverse Engineering Technique”

Εκπόνηση Εργασίας:
Στιβακτάκης Εμμανουήλ
Α.Μ.: 5938

Επιβλέπον Καθηγητής:
Δρ. Πετούσης Μάρκος



Ηράκλειο 2017

1. Περίληψη

Στόχος με την παρούσα πτυχιακή εργασία ήταν η επαλήθευση της γεωμετρίας τρισδιάστατα εκτυπωμένων και κατασκευασμένων πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας. Για την επίτευξη του στόχου αυτού έγινε χρήση μεθόδων αντίστροφης μηχανικής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε κάμερα αντίστροφη μηχανικής για την σάρωση τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμών και επαληθεύτηκε η γεωμετρία τους σε κατάλληλο λογισμικό αντίστροφης μηχανικής. Τα δεδομένα της σάρωσης συγκρίθηκαν με το αρχικό CAD γεωμετρικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση ώστε να προσδιοριστούν οι αποκλίσεις από αυτό.

Για τη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις (4) πτερυγώσεις εκ των οποίων οι δύο (2) ήταν εκτυπωμένες σε 3D Printers από υλικό ABS και οι άλλες δύο (2) κατασκευάστηκαν σε φρέζα αυτομάτου ελέγχου CNC της εταιρίας “HAAS”. Χωρίζοντας σε υπο-ομάδες τα πειραματικά δοκίμια όπου αναφέρθηκαν στόχος ήταν να γίνει η αναπαράσταση και η γεωμετρική μελέτη πτερυγώσεων με ίσιο άξονα και αντίστοιχα με καμπύλο άξονα. Και οι δύο κατηγορίες πτερυγώσεων μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν σε πρόγραμμα CAD σε πτυχιακή εργασία του μεταπτυχιακού προγράμματος του ΤΕΙ Κρήτης.

Σε πρώτη φάση, έγινε τρισδιάστατη σάρωση και επαλήθευση της γεωμετρίας δύο (2) πτερυγώσεων με ίσιο άξονα και δύο (2) πτερυγώσεων με καμπύλο άξονα, όπου ανά ζεύγος κατασκευάστηκαν στη φρεζομηχανή και αντίστοιχα εκτυπώθηκαν σε 3D printer. Στόχος ήταν να μελετηθεί η φυσική τους γεωμετρία όπως ακριβώς προέκυψαν από τις διαδικασίες παρασκευής.

Επειτα και τελικό στάδιο ήταν τα ίδια ζεύγη πτερυγώσεων να σαρωθούν και να μελετηθούν υπό συγκεκριμένα καμπτικά φορτία όπου εφαρμόστηκαν ταυτόχρονα κατά μήκος όλων των χορδών της γεωμετρίας τους.

Για την τρισδιάστατη σάρωση χρησιμοποιήθηκε η κάμερα τρισδιάστατης σάρωσης “VIVID 900/910” της εταιρίας “KONICA MINOLTA”, η οποία ανήκει στην οικογένεια των ψηφιοποιητών δίχως επαφή. Με το πέρας της κάθε σάρωσης παρήχθη πλήθος αρχείων όπου έφεραν νέφη σημείων όπου αναπαριστούν την γεωμετρία των πτερυγώσεων στο χώρο. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η σύνθεση της γεωμετρίας της κάθε πτερυγώσεως και τελικώς η μελέτη της για την επαλήθευση της με μετρήσεις όπου πάρθηκαν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.

Τέλος, προτάθηκαν τρεις διαφορετικές βάσεις για την ακριβή σάρωση των πτερυγώσεων κατά την διαδικασία των πειραμάτων με καμπτικό φορτίο κατά μήκος των αεροτομών κάθε πτερυγώσεως.

Συνοπτικά τα βήματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν:

1. Τρισδιάστατη εκτύπωση πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας.
2. Σχεδιασμός και υλοποίηση κατάλληλου χώρου για λήψη τρισδιάστατων σαρώσεων (τοποθέτηση κάμερας, φωτισμός, βάση τοποθέτησης πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας κλπ.).
3. Τρισδιάστατη σάρωση πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας.
4. Τρισδιάστατη σάρωση πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας υπό καμπτικό φορτίο.
5. Επεξεργασία δεδομένων σάρωσης και παραγωγή τρισδιάστατης γεωμετρίας στον υπολογιστή.
6. Σύγκριση δεδομένων σάρωσης με μετρήσεις όπου πάρθηκαν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.
7. Προσδιορισμός και τεκμηρίωση αποκλίσεων τρισδιάστατα εκτυπωμένων και κατασκευασμένων μοντέλων από τις θεωρητικές τιμές.
8. Συγγραφή και παρουσίαση πτυχιακής εργασίας.

2. Abstract

Within this project the aim was to verify the geometry of 3D printed and CNC manufactured wings of wind generator machine through reversed engineering methods. The technology which was used was a reversed engineering camera and the proportional software for the data analyzing and processing. Afterwards, the geometrical results were compared with these designs which were produced on a CAD software.

During the experiments four (4) different wings were used of which two (2) of them were 3D printed with the ABS material and the last two (2) were manufactured on a CNC milling machine of the company "HAAS". The aim of this project was to determine the principal designing geometric values of wings with a straight and curved axes which were designed during the master's program of TEI of Crete.

This thesis is divided into two basic topics. The first was the theoretical topic which was an important part for the experimental procedure and the second was the experiment which was performed. The experimental process also divided into two parts with which the first one was the dimension measuring of the airfoils of each one of the wings which were mentioned before, without a bending load and the second part was the dimension measuring of the wings with a specific bending load on the airfoils of each wing.

For the dimension measuring of the wings, reversed engineering methods were used as mentioned above. For the scanning process and the 3D point cloud acquisition "VIVID 900/900i" 3D camera was used and afterwards with "PTC Creo Parametric" were measured the dimensions of the airfoils of each wing.

Keywords: Dimension Measuring, Airfoils, 3D Printing, CNC Manufacturing, Reversed Engineering Methods, 3D non-contact Camera, Point Cloud Acquisition.

3. Εισαγωγή

Με την πάροδο του χρόνου οι ανάγκες αυξάνοντας για τη βέλτιστη και αποτελεσματική παραγωγή προϊόντων τόσο στη βιομηχανία όσο και σε διάφορους τομείς της επιστήμης για την ακριβέστερη προσομοίωση και μελέτη διαφόρων μεγεθών. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν λογισμικά τα οποία δίδουν την δυνατότητα στο χρήστη να έχει άμεση επαφή και επίβλεψη των προϊόντων όπου επρόκειτο να κατασκευάσει.

Τέτοια λογισμικά τρισδιάστατης και δισδιάστατης σχεδίασης χρησιμοποιούνται και στις μέρες μας τα οποία σε ολοένα και περισσότερο, εξελισσόμενο ρυθμό είναι ικανά να επιλύσουν με μεγαλύτερη ευκολία προβλήματα παραγωγής, μελέτης και επίβλεψης. Τέτοια προγράμματα σχεδιασμού θεωρούνται τα “*PTC Creo Parametric*”, “*AutoCAD*”, “*Solidworks*”, “*Catia*”, “*Rhinoceros*”.

Αντίστοιχα, για την μελέτη, τον υπολογισμό και ακριβής επίβλεψη των γεωμετριών κατασκευάστηκαν λογισμικά τα οποία δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει τις βασικές διαστάσεις και ανοχές ενός αντικειμένου του χώρου καθώς και τον υπολογισμό των φορτίων και των παραμορφώσεων όπου μπορεί να αναπτυχθούν σε μια γεωμετρία ύστερα από ορισμένες συνθήκες φόρτισης, τον υπολογισμό της θερμικής κατανομής στα σώματα και τον τρόπο με τον οποίο αντιδρούν καθώς, τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η χύτευση ρευστών για την παραγωγή προϊόντων διαφόρων γεωμετριών ακόμα και τον τρόπο με τον οποίο.

Τέτοια υπολογιστικά προγράμματα χρησιμοποιούν μεθόδους ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία - *Finite Element Analysis (FEA)* – και μερικά από αυτά είναι το “*PTC Creo Simulate*”, “*Abaqus*”, “*ANSA*”. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό ανεμολογικών δεδομένων πτερυγώσεων αλλά και για τον σχεδιασμό αυτών χρησιμοποιούνται πιστοποιημένες διατάξεις προσομοίωσης γεγονότων όπου η εκάστοτε περύγωση τίθενται σε λειτουργία πριν βγει στην παραγωγή. Τέτοια υπολογιστικά προγράμματα υπολογισμού και σχεδιασμού χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω παράγραφο καθώς και οι τυποποιήσεις σχεδιασμού είναι σύμφωνα με “*NACA*”.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα υπολογιστικά προγράμματα για τον σχεδιασμό και την επίβλεψη της γεωμετρίας πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας όπου στα παρακάτω κεφάλαια αναλύονται μεθοδολογίες σχεδιασμού και προσέγγισης των γεωμετριών πτερυγώσεων με μεθόδους αντίστροφης μηχανικής.

Αντίστροφη μηχανική καλείται ο τεχνολογικός τομέας ο οποίος καθιστά δυνατή την αποτύπωση γεωμετριών σε τρισδιάστατο επίπεδο όταν ήδη είναι κατασκευασμένο ένα προϊόν. Τέτοιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και στην επιστήμη για την άμεση επίβλεψη και εξέταση της γεωμετρίας τόσο ενός αντικειμένου τα οποία παράλληλα μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα CAE (Computer Aided Engineering).

4. Κατάλογος Περιεχομένων

1. Περίληψη.....	3
2. Abstract.....	4
3. Εισαγωγή.....	5
4. Κατάλογος Περιεχομένων.....	6
5. Σχεδιασμός Πτερυγώσεων, Μηχανικές Φορτίσεις και Τεχνολογία Αντίστροφης Μηχανικής.....	8
5.1. Βασικές Αρχές Σχεδιασμού.....	8
5.1.1. Αρχές Σχεδιασμού Πτερυγώσεων Ανεμογεννητριών.....	8
5.1.2. Αρχές Παραμετρικής Μοντελοποίησης και Αντίστροφης Μηχανικής... ..	10
5.2. Μηχανικές Φορτίσεις Πτερυγώσεων και Καμπτικό Φορτίο.....	12
5.3. Αρχή Λειτουργίας της Κάμερας VIVID 900/910i.....	14
5.3.1. Τεχνολογικός Εξοπλισμός Κάμερας.....	15
6. Πειραματική Διαδικασία και Μέτρηση Διαστάσεων Αεροτομών.....	18
6.1. Προσαρμογή Χώρου και Σάρωση Πτερυγώσεων Δίχως Καμπτικό Φορτίο ...	18
6.1.1. Προσαρμογή Χώρου.....	18
6.1.2. Σάρωση Πτερυγώσεων.....	20
6.2. Προσαρμογή Χώρου και Σάρωση Πτερυγώσεων με Καμπτικό Φορτίο.....	22
7. Επεξεργασία και Ανάλυση Γεωμετριών.....	24
7.1. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ στο Geomagic.....	24
7.1.1. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ Χωρίς Καμπτικό Φορτίο.....	24
7.1.2. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ με Καμπτικό Φορτίο.....	30
7.2. Επεξεργασία Γεωμετρίας στο PTC Creo Parametric.....	30
7.2.1. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης χωρίς Καμπτικό Φορτίο. 30	
7.2.2.1. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης με Ευθύγραμμο Άξονα. 30	
7.2.2.2. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης με Κυρτό Άξονα.....	40
7.2.2. Επεξεργασία και Σχεδιασμός των Πτερυγώσεων Ύστερα Από την Προσθήκη Καμπτικού Φορτίου.....	42
8. Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα.....	45
8.1. Πειραματικές Μετρήσεις Δίχως τη Χρήση Καμπτικού φορτίου.....	45
8.1.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης με Ίσιο Άξονα.....	45
8.1.1.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης Κατασκευασμένη σε CNC φρέζα. 45	
8.1.1.2. Πειραματικές Μετρήσεις 3D Εκτυπωμένης Πτερυγώσης.....	48
8.1.2. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης με Κυρτό Άξονα Κατασκευασμένη.....	51
8.1.2.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης Κατασκευασμένη σε CNC φρέζα. 51	
8.1.2.2. Πειραματικές Μετρήσεις 3D Εκτυπωμένης Πτερυγώσης.....	55

8.1.3. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσεων με Προσθήκη Καμπτικού Φορτίου.....	58
9. Παράρτημα	60
9.1. Βελτιστοποίηση του Χώρου Κατά την Σάρωση με Επιπρόσθετο Φορτίο	60
9.1.1. Πρώτη Βάση Τοποθέτησης της Πτερυγώσης.....	62
9.1.2. Δεύτερη Βάση Τοποθέτησης της Πτερυγώσης	69
10. Επίλογος - Συμπεράσματα.....	78
11. Βιβλιογραφία	79

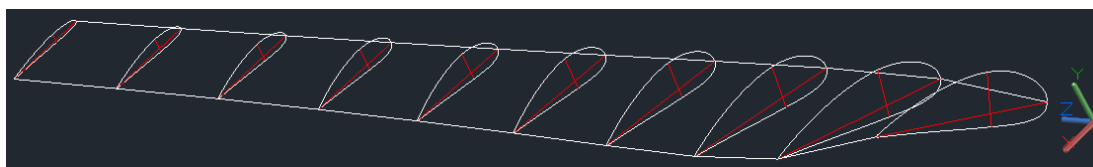
5. Σχεδιασμός Πτερυγώσεων, Μηχανικές Φορτίσεις και Τεχνολογία Αντίστροφης Μηχανικής.

5.1. Βασικές Αρχές Σχεδιασμού

5.1.1. Αρχές Σχεδιασμού Πτερυγώσεων Ανεμογεννητριών

Στη πλειονότητα τους οι πτερυγώσεις τόσο των γεννητριών παραγωγής ενέργειας με τη βοήθεια της υδροδυναμικής ή και της αιολικής δύναμης όσο και των μηχανών σχεδιάζονται βάση ενεργειακών και δυναμικών παραγόντων σύμφωνα με τις συνθήκες και το περιβάλλον λειτουργίας τους. Μερικοί παράγοντες είναι τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά ενός τόπου, κάνοντας αναφορά στις ανεμογεννήτριες καθώς και το υδάτινο περιβάλλον και λοιπές παράμετροι του ρευστού στο οποίο τίθενται η εκάστοτε πτερύγωση σε λειτουργία.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία δόθηκε έμφαση στη μελέτη βασικών μεγεθών σχεδιασμού υποχητικών πτερυγώσεων ανεμογεννήτριας σύμφωνα με το πρότυπο "NACA 1455" και τη θεωρία των αεροτομών "Joukowski" με μεθόδους αντίστροφης μηχανικής. Δηλαδή, έχοντας ήδη ολοκληρώσει τον σχεδιασμό στο λογισμικό "AutoCAD" δύο διαφορετικών πτερυγώσεων, η μια με ίσιο άξονα και η δεύτερη με κυρτό άξονα, εκτυπώθηκαν ομοιώματα αυτών σε 3D Printer και αντίστοιχα κατασκευάστηκαν σε CNC φρέζα. Έπειτα, στόχος ήταν η σάρωση των ομοιωμάτων – δοκιμίων με την κάμερα αντίστροφης μηχανικής "VIVID 900/900i" της εταιρίας "KONICA MINOLTA" με τελικό στόχο την προσομοίωση των δοκιμίων όπου εκτυπώθηκαν και αντίστοιχα κατασκευάστηκαν ώστε να μελετηθούν βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων.

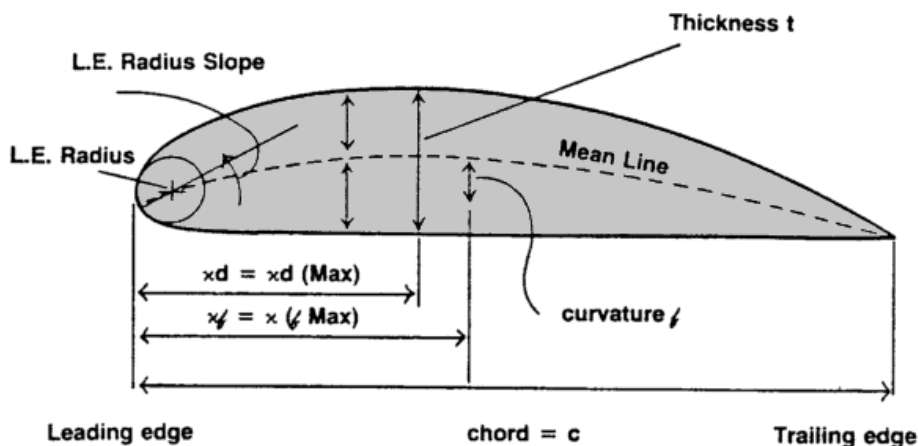


Σχήμα 5.1: Σχεδιασμός πτερυγώσεων στο λογισμικό "AutoCAD".

Για τον σχεδιασμό μιας πτερύγωσης, ανεξάρτητα του κανονισμού όπου θα ληφθούν οι ανάλογες παράμετροι βάση των συνθηκών λειτουργίας, λαμβάνεται υπόψη σύνολο αεροτομών οι οποίες προβάλλονται η μια παράλληλα της άλλης υπό ορισμένη κλίση. Η εν λόγω κλίση ονομάζεται γωνία σφήνωσης ως προς την πλήμνη της εκάστοτε πτερύγωσης και αεροτομή είναι η εγκάρσια τομή της πτερύγωσης σε ορισμένη θέση από τον άξονα περιστροφής. Βάση των αεροτομών γίνεται σύνθεση επιφανειών με γνώμονα την αξονική γραμμή που ενώνει όλες τις αεροτομές και οριακές θέσεις τις ίδιες τις αεροτομές και την απόσταση της κάθε αεροτομής από την αρχή της πτέρυγας.

Κάθε πτερύγωση ανεμογεννήτριας αποτελείται από βασικά γεωμετρικά μεγέθη σχεδιασμού τα οποία την καθιστούν ικανή να ανταπεξέλθει στις ανάλογες συνθήκες λειτουργίας. Αντίστοιχα και οι πτερυγώσεις όπου σχεδιάζονται σύμφωνα με το κανονισμό "NACA 1455". Συγκεκριμένα, αποτελείται από το Χείλος Προσβολής, το Χείλος Εκφυγής, την Ανω Επιφάνεια, την Κάτω Επιφάνεια, τη Μέση Γραμμή και τη Χορδή.

Δίδοντας έμφαση, οι αεροτομές σύμφωνα με το κανονισμό "NACA" προκύπτουν από τη σχεδίαση της Μέσης Γραμμής και την Κατανομή Πάχους γύρω από αυτήν. Συγκεκριμένα, Μέση Γραμμή ονομάζεται η καμπύλη που προσδιορίζει την κύρτωση της κάθε αεροτομής ενώ η Κατανομή Πάχους αποτελεί τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται, το κάθε φορά επιθυμητό πάχος γύρω από την Μέση Γραμμή προσδιορίζοντας τη τελική γεωμετρία της Ανω και Κάτω Επιφάνειας.



Σχήμα 5.2: Σχεδιάγραμμα με τα γεωμετρικά μεγέθη των αεροτομών.

Αντίστοιχα, Χείλος Προσβολής ονομάζεται το ένα άκρο της Μέσης Γραμμής όπου προσπίπτει το ρευστό κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας, Χείλος Εκφυγής είναι το άκρο της αεροτομής από το οποίο εγκαταλείπει το ρευστό την αεροτομή και Χορδή ονομάζεται το ευθύγραμμο τμήμα που τέμνει τα δύο ακραία σημεία της Μέσης Γραμμής ή αλλιώς η ένωση του άκρου του Χείλους Προσβολής με το Χείλος Εκφυγής.

Παρατηρώντας μια αεροτομή της οικογένειας “NACA” θα ήταν δυνατό χωρισθεί τρία βασικά μέρη τα οποία κρίθηκαν και απαραίτητα για την αναγνώριση των γεωμετριών στη παρούσα πτυχιακή εργασία, λαμβάνοντας υπόψη ότι πλέον δεν είναι δυνατό να σχεδιασθεί βάση της θεωρίας σχεδιασμού αεροτομών διότι ήδη, ύστερα από την ολοκλήρωση της σάρωσης, η ολική γεωμετρία υπάρχει στη βάση δεδομένων.

Τα τρία βασικά τμήματα είναι ο νοητός κύκλος όπου σχηματίζει το χείλος προσβολής, το “σώμα” της αεροτομής και το χείλος εκφυγής. Πρώτο βασικό τμήμα είναι το “σώμα της αεροτομής όπου σε αυτό γίνεται αναφορά για το μέγιστο ύψος της εκάστοτε αεροτομής, το οποίο προσδιορίζεται βάση της Κατανομής Πάχους όπου αναφέρθηκε παραπάνω. Θεωρητικά η εξίσωση όπου δίδει τη κατανομή είναι:

$$y_{ti} = \frac{t}{20} \cdot [0.2969 \cdot \sqrt{x_i} - 0.126 \cdot x_i - 0.3516 \cdot x_i^2 + 0.2843 \cdot x_i^3 - 0.1015 \cdot x_i^4] \quad (5.1)$$

Επεξήγηση των μεγεθών των παραπάνω εξισώσεων:

- y_{ti} : Κατανομή του πάχους της αεροτομής.
- x_i : Συντεταγμένη της Μέσης Γραμμής ως προς την τετμημένη του σύστημα συντεταγμένων του χώρου (WCS).

Δεύτερο τμήμα είναι ο κύκλος όπου σχηματίζει το χείλος προσβολής με κέντρο του ένα συνεφθιακό σημείο επάνω στη Μέση Γραμμή, δηλαδή ακτίνα R με κλίση όμοια της Μέσης Γραμμής ως προς τον $X'X$ άξονα του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων του χώρου. Θεωρητικά, η εξίσωση που δίνει τη κλίση της Μέσης Γραμμής και αντίστοιχα την ακτίνα είναι:

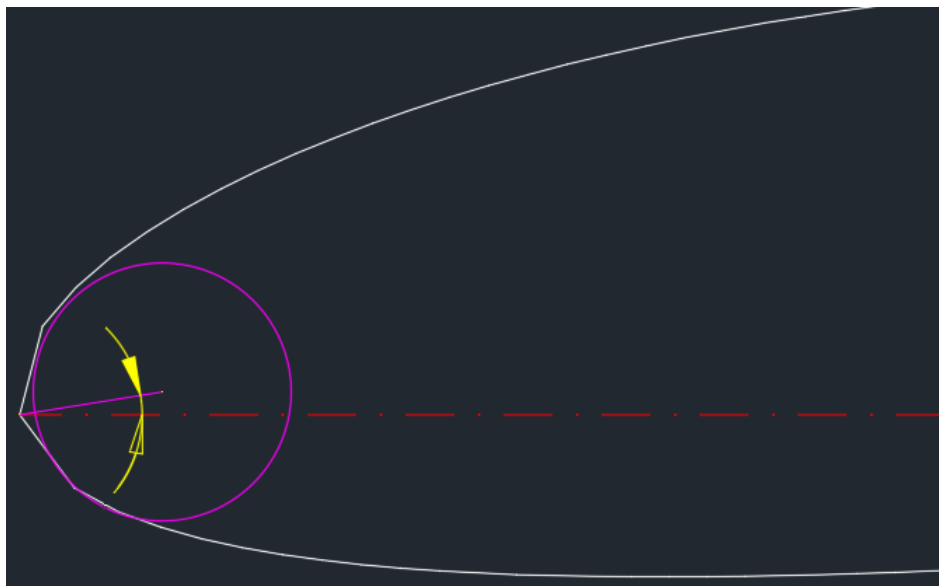
$$\theta_i = \text{atan} \left(\frac{d}{dx} y_{ci} \right) \quad (5.2)$$

$$r_t = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{0.2} \cdot 0.2969 \right)^2 = 1.1019 \cdot t^2 \quad (5.3)$$

Επεξήγηση των μεγεθών των παραπάνω εξισώσεων:

- θ_i : Γωνία κλίσης της ακτίνας R του χείλους προσβολής.

- y_{ci} : Συντεταγμένη της Μέσης Γραμμής ως προς την τεταγμένη του σύστημα συντεταγμένων του χώρου (WCS).
- r_t : Ακτίνα R του χείλους προσβολής.
- t : Το μέγιστο πάχος της αεροτομής.



Σχήμα 5.3: Νοητός κύκλος στο χείλος προσβολής της αεροτομής και η κλίση της ακτίνας R . (*Ο κύκλος παρουσιάζεται με χρώμα Magenda όπως και η ακτίνα R .*)

Τέλος, σημαντικό κρίθηκε να γίνει αναφορά ότι ο σχεδιασμός σε κάθε περίπτωση των πτερυγώσεων γίνεται όπως προαναφέρθηκε βάση των συνθηκών όπου επρόκειτο να τεθεί σε λειτουργία. Αυτό σημαίνει ότι και η κλίση της αεροτομής ως προς τη διεύθυνση του διανύσματος του ανέμου καθορίζει και την ευστάθεια και τη λειτουργικότητα της πτερύγωσης.

Συγκεκριμένα σύμφωνα με μελέτες στο πεδίο της αεροδυναμικής των πτερυγώσεων παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου στην Άνω Επιφάνεια της πτερύγωσης έναντι της Κάτω Επιφάνειας. Αυτό το φαινόμενο τείνει να προκαλέσει υποπίεση στην Άνω Επιφάνεια και υπερπίεση στη Κάτω Επιφάνεια. Ρυθμίζοντας την κλίση της εκάστοτε αεροτομής είναι και δυνατό να προσδιοριστεί ο έλεγχος της άνωσης και κατ' επέκταση η λειτουργικότητα της πτερύγωσης.

5.1.2. Αρχές Παραμετρικής Μοντελοποίησης και Αντίστροφης Μηχανικής.

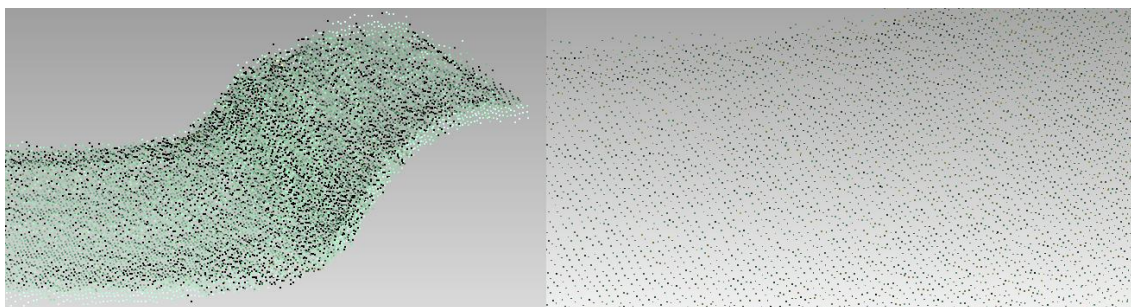
Για την μελέτη και λεπτομερή παρατήρηση ενός αντικειμένου τόσο στον επιστημονικό χώρο, την καθημερινότητα όσο και στην παραγωγή ενός προϊόντος, χρησιμοποιούνται μέθοδοι γραφικής αναπαράστασης κάνοντας γρηγορότερη και ευκολότερη την αποσφαλμάτωση κάθε διαδικασίας παραγωγής ενός αντικειμένου. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές αναπαράστασης και σχεδιασμού ενός αντικειμένου, είτε στο επίπεδο είτε σε τρισδιάστατη μορφή.

Συγκεκριμένα, τεχνικές όπως της παραμετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση απλών αλλά και πολυσύνθετων αντικειμένων έχοντας την δυνατότητα της αυτόματης προσαρμογής των διαστάσεων και της γεωμετρίας ύστερα από κάθε αλλαγή μιας ή περισσότερων από τις παραμέτρους σχεδιασμού. Βασικό χαρακτηριστικό της παραμετρικής μοντελοποίησης είναι ο λογαριθμικός προσδιορισμός μιας γεωμετρίας καθώς και οι αρχές αλγεβρικής λογικής για τον σχεδιασμό γεωμετριών.

Κατά τον τρισδιάστατο σχεδιασμό ενός αντικειμένου λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις του στο επίπεδο και τελικώς και η τρίτη διάσταση στο χώρο, σχηματίζοντας στερεά αντικείμενα είτε αντικείμενα επιφανειών (Κεφάλαιο 7).

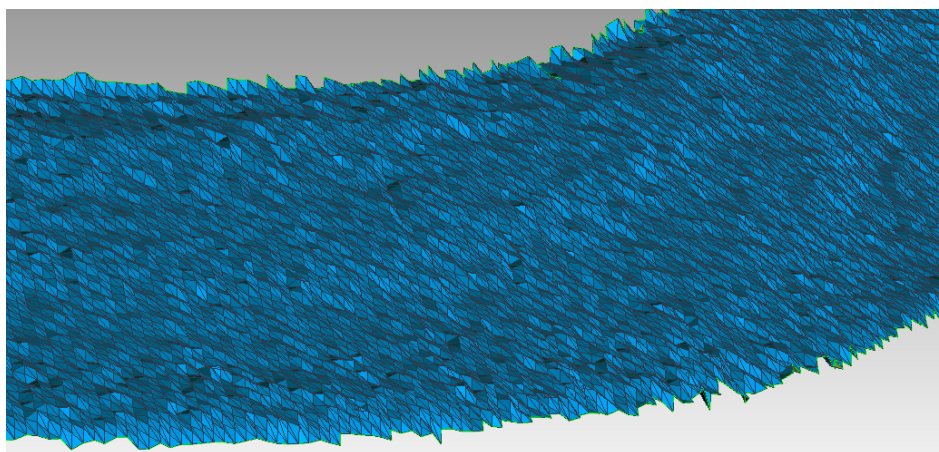
Αντίστοιχα και στις μεθόδους αντίστροφη μηχανικής στόχος είναι η προσομοίωση ενός πραγματικού αντικειμένου όπου ήδη υπάρχει κατασκευασμένο, με ένα ψηφιακό του ομοίωμα. Η αντίστροφη μηχανική βρίσκει εφαρμογή τόσο στο πεδίο της μηχανικής, της αεροδιαστημικής, της μετρολογίας, κλπ. όσο και στην ιατρική. Συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για την σάρωση αντικειμένων είτε με τεχνικές επαφής, μέσω ειδικών CMM γραφίδων είτε με τεχνικές δίχως επαφή, όπως είναι οι τεχνολογίες Laser.

Σε κάθε περίπτωση, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας λήψης της πληροφορίας όσον αφορά την γεωμετρία ενός αντικειμένου στο χώρο, παράγεται πλήθος νέφους σημείων. Κάθε σημείο αποτελείται από τρεις (3) συντεταγμένες στο χώρο του λογισμικού όπου συνεργάζεται ο κάθε τεχνολογικός εξοπλισμός και αποδίδει τις ανάλογες τιμές ως προς το σύστημα συντεταγμένων στο χώρο.



Σχήμα 5.4: Νέφος σημείων μιας γεωμετρίας στο χώρο ύστερα από το πέρας της διαδικασίας σάρωσης σε μια ορισμένη περιοχή μιας πτερυγώσης και σε μια αντίστοιχη εστιασμένη περιοχή.

Έπειτα, η λογική με την οποία συντίθενται τα νέφη σημείων, ώστε το τελικό αρχείο να προσομοιώνει την πραγματική γεωμετρία, δεν απέχει μακράν από την ανάλογη πληροφορία όπου φέρουν τα “*.stl” αρχεία. Συγκεκριμένα, κάθε σημείο στο χώρο αποτελεί κόμβο ενός πλέγματος από πολύγωνα τα οποία φέρουν την καμπύλωση και το προσανατολισμό ανάλογα της θέσης των κόμβων. Τέλος, στο σύνολο τους τα πολύγωνα αποδίδουν τρισδιάστατα την γεωμετρία του κάθε αντικειμένου.

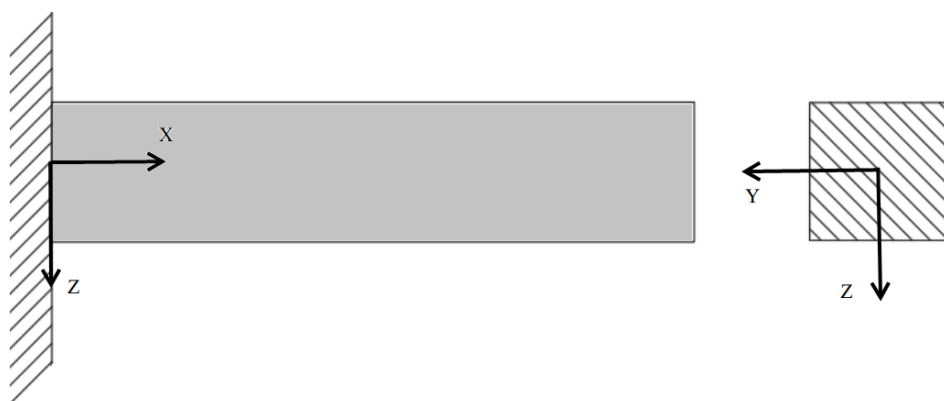


Σχήμα 5.5: Πλήθος πολυγώνων μιας γεωμετρίας στο χώρο.

5.2. Μηχανικές Φορτίσεις Πτερυγώσεων και Καμπτικό Φορτίο.

Κάθε πτερύγωση όπου τίθεται σε λειτουργία με σκοπό την παραγωγή έργου υπόκειται σε φορτία κατά μήκος των επιφανειών της λόγω του ανέμου όπου προσπίπτει στις επιφάνειες της. Για τη λειτουργία ενός συστήματος όπου κύριο μέσο για την παραγωγή κίνησης είναι οι πτερυγώσεις, φέρει γεωμετρία ανάλογη ώστε να είναι δυνατό μέσω αεροδυναμικών φαινομένων να επιτευχθεί η κίνηση όπου συγκεκριμένα πακτώνεται από το ένα της σημείο και το υπόλοιπο σώμα της φέρει την ανάλογη γεωμετρία ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης ώση της από τον άνεμο.

Μια πτερύγωση κατά την λειτουργία της υπόκειται σε καμπτικά φορτία λόγω του πραγματικού ή φαινομένου αέρα όπου προσπίπτει επάνω στις επιφάνειες του. Ανάλογα με την ένταση του ανέμου και συγκεκριμένα ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας, ανάλογο φορτίο αναπτύσσεται στη πτερύγωση έχοντας ως αποτέλεσμα την κάμψη της. Ύστερα από το φαινόμενο της κάμψης και λόγω συνολικής γεωμετρίας της πτερύγωσης οι χορδές σε κάθε αεροτομή υπόκειται επίσης σε μια σχετική στροφή ως προς την αρχική τους θέση. Για την μελέτη των φορτίων και των σχετικών θέσεων η πτερύγωση θα μπορούσε να προσομοιωθεί ως συμπαγές δοκός.



Σχήμα 5.6: Εγκάρσια τομή δοκού και πρόοψη δοκού.

Κατ' αυτή τη λογική και σύμφωνα με τη θεωρία της καθαρής κάμψης, το στοιχείο που υποβάλλεται σε τέτοιο φαινόμενο υπόκειται από διαμητικά εξωτερικά φορτία προκαλώντας στρεπτικές παραμορφώσεις ως προς το σημείο πάκτωσης της δοκού κατά τον άξονα $Z'Z$. Σε αυτή την περίπτωση το ελεύθερο σημείο της δοκού μετατοπίζεται από την αρχική του θέση κατά συγκεκριμένη απόσταση ορίζοντας το βέλος κάμψης (deflection). Η ακτίνα καμπυλότητας της δοκού σύμφωνα με το φορτίο που παραλαμβάνει δίδεται από τον τύπο (5.1) όπου είναι ανάλογη της θέσης της ουδέτερης γραμμής z .

$$(5.1) \quad \rho = \frac{z}{\varepsilon_{xx}}$$

Παράλληλα, παρατηρώντας τη δοκό σε εγκάρσια τομή αλλά και προοπτικά, η κατανομή των τάσεων και αντίστοιχα των τροπών γίνονται γύρω από την ουδέτερη γραμμή η οποία κατά την διάρκεια της κάμψης δεν παραμορφώνεται. Η κατανομή της τάσης και η τροπή κατά μήκος της δοκού γίνεται ανάλογα και δίδονται από τις εξισώσεις (5.2) και (5.4).

$$(5.2) \quad \sigma_{xx} = \frac{M}{W}$$

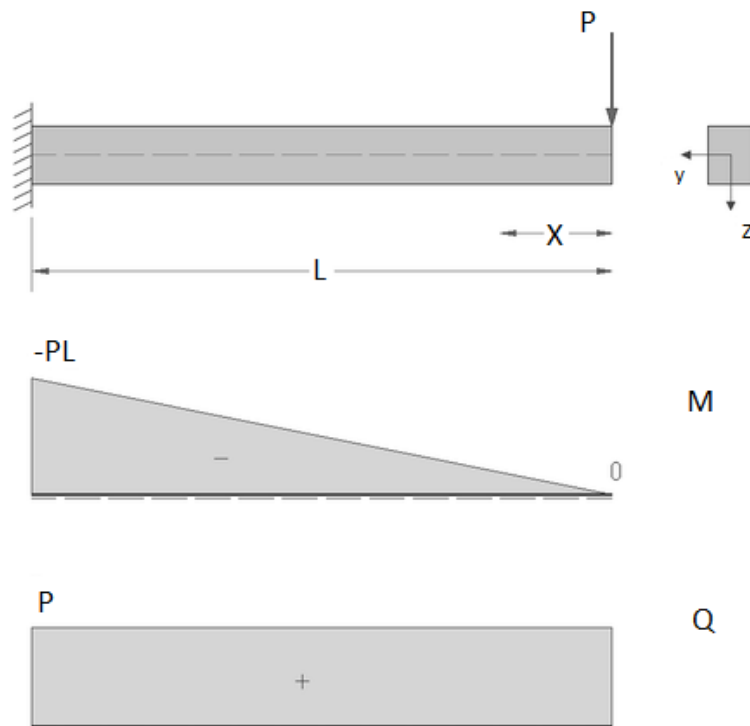
Όπου:

$$(5.3) \quad W = \frac{I}{z}$$

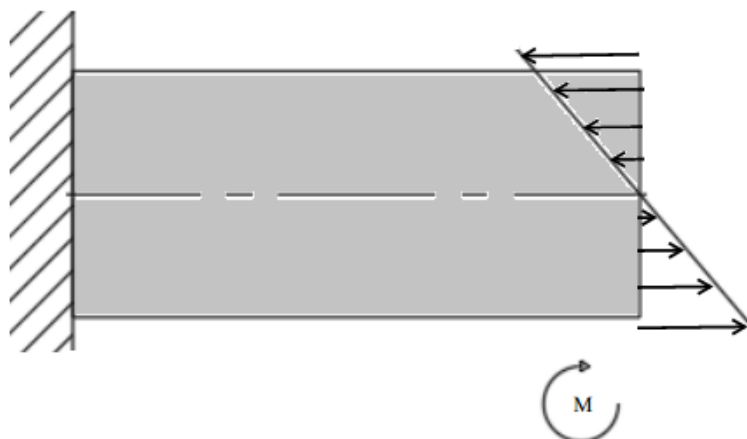
(5.4)
$$\varepsilon_{xx} = \frac{M \cdot z}{E \cdot I}$$



Σχήμα 5.7: Βέλος κάμψης δοκού τετραγωνικής διατομής όταν σε αυτή εφαρμόζονται καμπτικά φορτία.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα τάσεων Q και καμπτικής ροπής M.

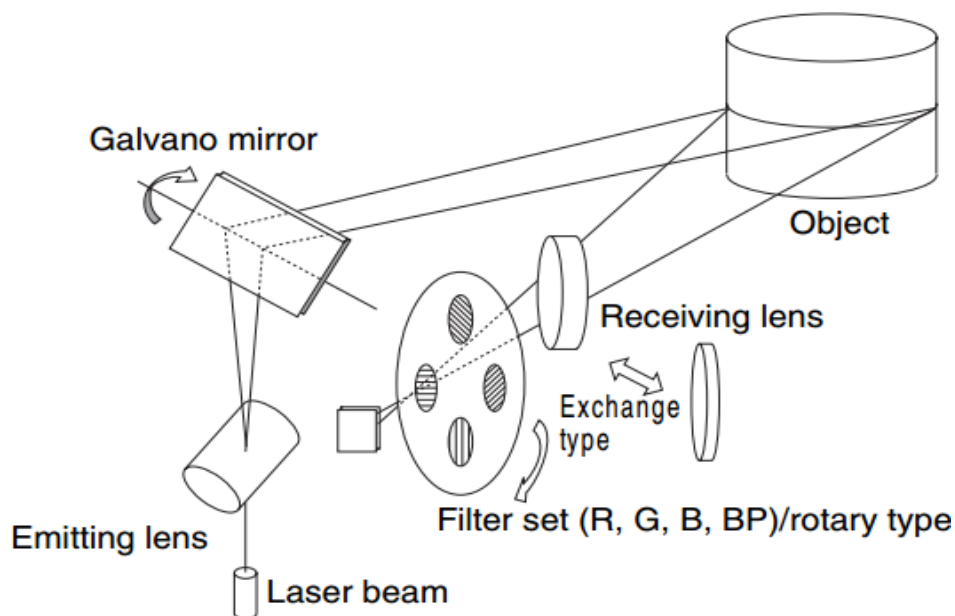


Σχήμα 5.9: Κατανομή διατμητικών φορτίων στην εγκάρσια τομή της δοκού.

5.3. Αρχή Λειτουργίας της Κάμερας VIVID 900/910i

Η αρχή λειτουργίας της κάμερας “VIVID 900/910i” βασίζεται στη μέθοδο της αντίστροφης τριγωνοποίησης. Οπτικά, η κάμερα αποτελείται από δύο φακούς, εκ των οποίων ο ένας χαρακτηρίζεται ο πομπός μονοχρωματικής δέσμης Laser με ισχύ $P = 30 [mW]$ και μήκος κύματος $\lambda = 690 [nm]$, από γαλβανικό καθρέπτη με ρυθμιζόμενη ένταση (Gain) και πυκνότητα (LD) της δέσμης και ο δεύτερος φακός είναι ο δέκτης της ανακλώμενης δέσμης από το αντικείμενο επάνω σε CCD αισθητήρα, έχοντας τη δυνατότητα αλλαγής φακών εστίασης

Μια ολοκληρωμένη σάρωση αποτελείται από τρεις επιμέρους, όπου μια γραμμική δέσμη laser σαρώνει το αντικείμενο με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω. Τότε, ένα μέρος της δέσμης αντανακλάται στην επιφάνεια του αισθητήρα και σύμφωνα με τη μέθοδο της τριγωνοποίησης, μετρώντας τη θέση της δέσμης μετατρέπεται σε απόσταση του ίδιου του αντικειμένου.



Σχήμα 5.10: Σχήμα της μεθόδου τριγωνοποίησης.

Κατά την σάρωση των αντικειμένων παράγεται πλήθος νέφους σημείων όπου έχουν ορισμένη θέση στο σύστημα συντεταγμένων του λογισμικού όπου συνεργάζεται η κάμερα. Η θέση των σημείων είναι ανάλογη της θέσης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπου φέρει ένα αντικείμενο στο χώρο καθώς και ανάλογη της απόστασης του αντικειμένου από την κάμερα. Επομένως το σύστημα συντεταγμένων όπου θα φέρει το τελικό νέφος σημείων έχει προσανατολισμό και απόσταση ίδια με τα αντίστοιχα του συστήματος συντεταγμένων της κάμερας ως προς το αντικείμενο.

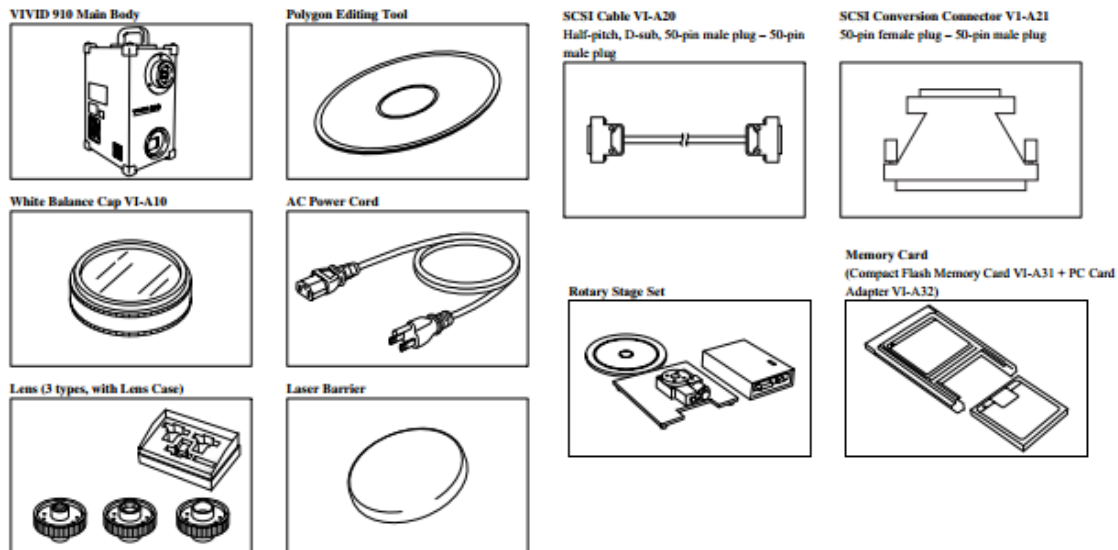
Τέλος, το πρόγραμμα όπου χρησιμοποιείται για τον αυτόματο χειρισμό της κάμερας μέσω υπολογιστή καθώς και για την λήψη και επεξεργασία του νέφους σημείων είναι το “*Polygon Editing Tool*”.

5.3.1. Τεχνολογικός Εξοπλισμός Κάμερας

Ο χειρισμός και η λειτουργία της κάμερας με στόχο τη σάρωση και τη κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων από διάφορα αντικείμενα του χώρου, έγκειται στον υλικοτεχνικό εξοπλισμό όπου απαρτίζουν την κάμερα “VIVID 900/910i”. Συγκεκριμένα η κάμερα είναι δυνατό να σαρώσει αντικείμενα του χώρου είτε απευθείας μέσω του ενσωματωμένου τηλεχειριστήριου όπου φέρει στην κατασκευή της, είτε αυτόματα μέσω του λογισμικού “*Polygon Editing Tool*”.

Από υλικοτεχνική άποψη, η κάμερα αποτελείται από ολοκληρωμένο σύστημα ψηφιοποιητή δίχως επαφή όπου σε συνδυασμό με το σύστημα γαλβανικού καθρέπτη είναι δυνατή η σάρωση αντικειμένων με ακτίνα laser και η αποτύπωση της γεωμετρίας του. Παράλληλα, μέσω της μεθόδου τριγωνοποίησης, όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω παράγραφο, γίνεται η καταγραφή της γεωμετρίας στο χώρο βάση του μεγέθους της και της πολυπλοκότητας όπου φέρει.

Συγκεκριμένα, τα βασικά αντικείμενα όπου φέρει η κάμερα είναι το φίλτρο ρύθμισης λευκού χρώματος, τρεις διαφορετικούς φακούς, μια περιστρεφόμενη βάση, το USB Hub για την λειτουργία του προγράμματος αυτόματης σάρωσης και τα καλώδια SCSI για την σύνδεση της κάμερας μέσω USB με τον υπολογιστή, Adaptor για κάρτα μνήμης για την μεταφορά των σαρώσεων κατά την χειροκίνητη λήψη σαρώσεων και προστατευτικά καλύμματα για τους φακούς και του γαλβανικού καθρέπτη.



Σχήμα 5.11: Βασικός υλικοτεχνικός εξοπλισμός κάμερας.



Σχήμα 5.12: Κάμερα αντίστροφης μηχανικής με ψηφιοποιητή δίχως επαφή της εταιρίας “KONIKA MINOLTA”.

Για τα διάφορα μεγέθη αντικειμένων, η κάμερα φέρει τρεις διαφορετικούς φακούς με τρία διαφορετικά σημεία εστίασης. Οι φακοί αυτοί είναι οι “TELE”, “MIDDLE” και “WIDE” με τον κάθε ένα αντιστοίχως να έχει σημείο εστίασης τα $f = 25 [mm]$, $f = 14 [mm]$ και $f = 8 [mm]$. Παράλληλα, βάση των παραπάνω φακών αλλά και της απόστασης του αντικειμένου, η ακρίβεια και η επαναληπτικότητα της κάμερας ποικίλει, στο πλήθος των σαρώσεων όπου μπορεί να πραγματοποιήσει για το ίδιο αντικείμενο κάθε φορά. Η επαναληπτικότητα βάση των παραπάνω φακών αντιστοίχως είναι $P = 8 [\mu m]$, $P = 16 [\mu m]$ και $P = 32 [\mu m]$. Η ακρίβεια ανά καρτεσιανό άξονα είναι:

TELLE	X'X [mm]	± 0.22
	Y'Y [mm]	± 0.16
	Z'Z [mm]	± 0.1
MIDDLE	X'X [mm]	± 0.38
	Y'Y [mm]	± 0.31
	Z'Z [mm]	± 0.2
WIDE	X'X [mm]	± 1.4
	Y'Y [mm]	± 1.04
	Z'Z [mm]	± 0.4

Πίνακας 5.1: Ακρίβεια κάμερας ανά άξονα καρτεσιανού επιπέδου, βάση του φακού όπου έχει επιλεγεί.

TELLE	X'X [mm]	111 - 463
	Y'Y [mm]	83-347
	Z'Z [mm]	40 - 500
MIDDLE	X'X [mm]	198 - 823
	Y'Y [mm]	148 - 618
	Z'Z [mm]	70 - 800
WIDE	X'X [mm]	359 - 1196
	Y'Y [mm]	269 - 897
	Z'Z [mm]	110 - 750

Πίνακας 5.2: Εύρος παραθύρου εργασίας βάση του σημείου εστίασης του φακού.

6. Πειραματική Διαδικασία και Μέτρηση Διαστάσεων Αεροτομών

6.1. Προσαρμογή Χώρου και Σάρωση Πτερυγώσεων Δίχως Καμπτικό Φορτίο

6.1.1. Προσαρμογή Χώρου

Για τη σάρωση των δοκιμίων (πτερυγώσεων) κρίθηκε απαραίτητη η διαμόρφωση του χώρου ανάλογα με τις προδιαγραφές λειτουργίας της κάμερας, όπως ορίζει η κατασκευάστρια εταιρεία. Συγκεκριμένα, τα σημεία τα οποία έπρεπε να προσεχθούν με βάση το εγχειρίδιο της κάμερας (manual) ώστε η σάρωση να είναι επιτυχή ήταν:

- 1) Το φόντο του χώρου στο οποίο επρόκειτο να τοποθετηθούν τα δοκίμια.
- 2) Ο φωτισμός του περιβάλλοντος.
- 3) Οι γεωμετρικές λεπτομέρειες του αντικειμένου και η θέση του στο χώρο ως προς το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας.
- 4) Το σημείο εστίασης τη κάμερας – είδος φακού.
- 5) Καθώς και τα λοιπά χαρακτηριστικά λειτουργίας του προγράμματος και της ίδιας της κάμερας.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία για κάθε πτερυγώση εκ των έξι ορισμένων για την εργασία αυτή, μετρήθηκαν πειραματικά με μετροταινία οι διαστάσεις των εκτυπωμένων προσομοιωμάτων και προέκυψε ότι οι διαστάσεις αυτών ήταν:

Object Size [mm]	
Horizontal	Vertical
~150	~15

Πίνακας 6.1: Πειραματική μέτρηση διαστάσεων των πτερυγώσεων ίσιου και κυρτού άξονα.

Με βάση το εγχειρίδιο χρήσης της κάμερας VIVID 910 η επιλογή του φακού για τις σαρώσεις των πτερυγώσεων έγινε ανάλογα ως προς το μέτρο των διαστάσεων τους (Measurement Distance) στον άξονα X'X (Horizontal) και αντίστοιχα στον άξονα Y'Y (Vertical). Με βάση τις παραπάνω τιμές, ο φακός όπου επιλέχθηκε για τις σαρώσεις των δοκιμίων ήταν ο τηλεσκοπικός "TELE", φέροντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

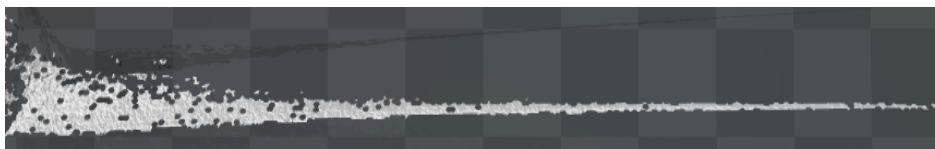
Focal Distance [mm]	25			
Measurement Distance [mm]	600			
Object Size [mm]	Horizontal	113.9	Vertical	85.4
X Direction input range [mm]	From	111	To	463
Y Direction input range [mm]	From	83	To	347

Z Direction input range [mm]	From	40	To	500		
Accuracy [mm]	X	±0.22	Y	±0.16	Z	±0.10

Πίνακας 6.2: Πρότυπες τιμές λειτουργίας της κάμερας VIVID 910 για το τηλεσκοπικό (TELE) φακό και σύμφωνα με διαστάσεις των πτερυγώσεων.

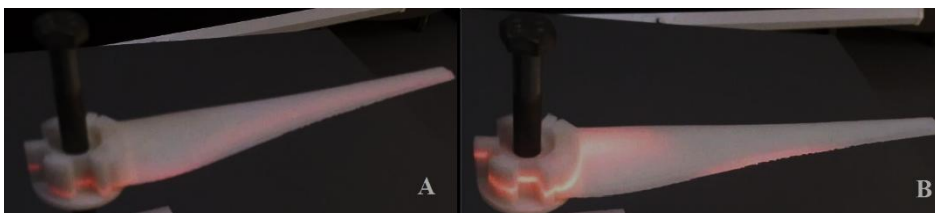
Με βάση τους παραπάνω πίνακες η τιμή της διάστασης στον οριζόντιο και κάθετο άξονα των αντικειμένων που επρόκειτο να σαρωθούν ήταν εντός του πρότυπου πεδίου τιμών με βάση το manual της κάμερας. Για το λόγο αυτό ο χώρος και οι συνθήκες σάρωσης των αντικειμένων προσαρμόστηκαν ανάλογα ώστε να πραγματοποιηθούν οι σαρώσεις των αντικειμένων.

Στη παρούσα πειραματική διάταξη έγινε λόγος για την αδυναμία αποτύπωσης της γεωμετρίας παρά τις πρότυπες συνθήκες όπου ορίστηκαν με βάση το εγχειρίδιο χρήσης της κάμερας. Δηλαδή, με το πέρας δοκιμαστικών σαρώσεων παρατηρήθηκε ότι σχηματιζόταν πολυγωνικό προφίλ μόνο σε σημεία όπου το πάχος του υλικού ήταν μεγαλύτερο του $l = 4 [mm]$ ενώ δεν παρουσιαζόταν νέφος σημείων για το υπόλοιπο σώμα των πτερυγώσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.1: Βέλτιστο δυνατό παραγόμενο νέφος σημείων ύστερα από πλήθος σαρώσεων (4) για την αποτύπωση της γεωμετρίας των πτερυγώσεων.

Η δέσμη laser που προσπίπτει επάνω στα δοκίμια για την αποτύπωση της γεωμετρίας τους, διαχέεται εντός των κοιλιοτήτων των πτερυγώσεων και λόγω των διαστάσεων του έχει ως αποτέλεσμα να σκεδιάζει η ακτινοβολία, μην επιστρέφοντας στο φακό της κάμερας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.2: Σκέδαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας κατά την διαδικασία της σάρωσης. A: Μέγιστο ποσοστό λειτουργίας LD για τα δοκίμια. B: Τιμή LD σύγκρισης με το δυνατό εύρος. (Για λόγους οπτικής ευκρίνειας έχει μειωθεί η φωτεινότητα κατά 40% και έχει αυξηθεί το contrast κατά 40% της φωτογραφίας).

Καθώς, υπό τις παρούσες συνθήκες το πεδίο τιμών του ποσοστού πυκνότητας της μονοχρωματικής ακτινοβολίας όπου ήταν δυνατό να αποτυπωθεί η παραπάνω γεωμετρία ήταν μεταξύ $LD: [8 - 14] \%$ της μέγιστης έντασης κατά τις προδιαγραφές της κάμερας, όπως παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.4.2 του παραπάνω κεφαλαίου.

Επομένως, για την αποτελεσματική αποτύπωση της γεωμετρίας των πτερυγώσεων κρίθηκε αναγκαία η βαφή τους με χρώμα λευκό ματ. Κατ' αυτό τον τρόπο εξαλείφθηκε το φαινόμενο της διάχυσης τόσο της

πολυχρωματικής ακτινοβολίας του περιβάλλοντα χώρου (Φωτισμός Γραφείου) και των όποιων επιπρόσθετων φωτισμών όπου χρησιμοποιήθηκαν καθώς και της δέσμης laser της κάμερας.

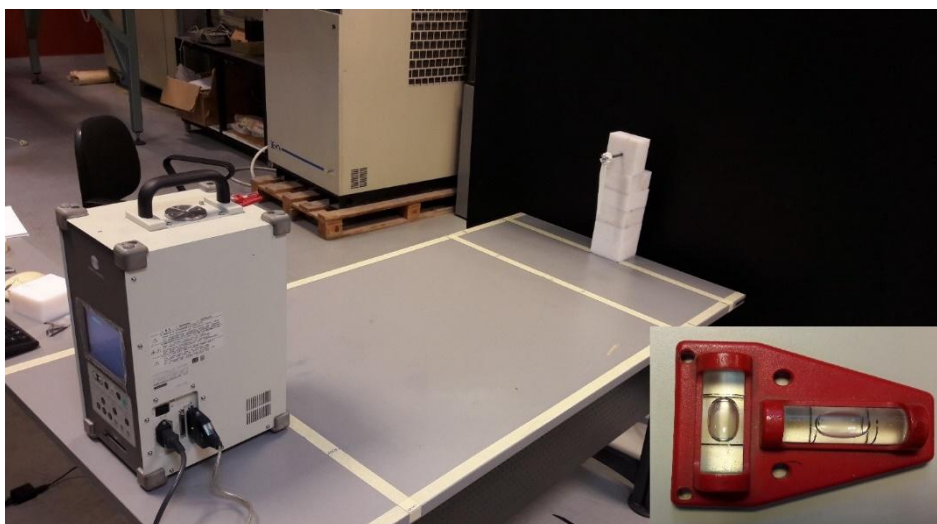


Σχήμα 6.3: Πτερυγώσεις ύστερα από την βαφή με σπρέι λευκό ματ χρώμα.

Παράλληλα με τα προαναφερθέν κρίθηκε αναγκαία η αλλαγή κατεύθυνσης των δοκιμών ως προς τον φακό για την αποτύπωση όλη της γεωμετρίας των σωμάτων. Δηλαδή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 η πτερυγώση έχει τοποθετηθεί παράλληλα στο φακό της κάμερας καθιστώντας αδύνατη την σάρωση όλης της γεωμετρίας των σωμάτων. Για το λόγο αυτό έγινε περιστροφή κατά 90° ως προς τον άξονα ($X'X$) και ($Z'Z$) ώστε το σώμα των πτερυγώσεων να είναι κάθετα στο φακό και την δέσμη laser της κάμερας.

Επίσης, παράγοντας μείζονος σημασίας για την σωστή μελέτη της γεωμετρίας ήταν η ακριβής γνώση της θέσης και του προσανατολισμού της εκάστοτε πτερυγώσης από τον φακό της κάμερας, Για τον λόγω αυτό ήταν απαραίτητο να ελαχιστοποιηθούν οι βαθμοί ελευθερίας κίνησης του αντικειμένου ως προς τους τρεις καρτεσιανούς άξονες.

Συγκεκριμένα, ένα αντικείμενο στο χώρο φέρει έξι βαθμούς ελευθερίας εκ των οποίων τρεις αφορούν την μεταφορά ενός αντικειμένου επάνω στους τρεις κάθετους άξονες (X, Y, Z) και τρεις αφορούν την περιστροφή ενός αντικειμένου επί των αξόνων αυτών. Στην παρούσα πειραματική διαδικασία στόχος ήταν να εξασφαλιστεί η πλήρης ακινησία του αντικειμένου και σαφής καθετότητα της πλήρους της πτερυγώσης ως προς το φακό της κάμερας.



Σχήμα 6.5: Βαθμονομημένος χώρος σαρώσεων.

6.1.2. Σάρωση Πτερυγώσεων

Για την σάρωση και των τεσσάρων, στο πλήθος, πτερυγώσεων εκ των οποίων οι τρεις φέρουν ίσιο άξονα και τρεις κυρτό άξονα, χρησιμοποιήθηκε βάση όπου τοποθετήθηκαν για τη τελική σάρωση και τελικώς πακτώθηκαν σε πλαστικούς κύβους συνολικού ύψους $H = 210 [mm]$. Ο προσανατολισμός της

περύγωσης ήταν κάθετα στο φακό της κάμερας όπου η επιφάνεια του σώματος των φτερών ήταν εμφανής κατά την αποτύπωση ασπρόμαυρου στιγμιότυπου (φωτογραφία) από την κάμερα. Για κάθε περύγωση ελήφθησαν δύο σαρώσεις όπου κάθε μια έφερε τη γεωμετρία της επιφάνειας των σωμάτων.

Ο χώρος προσαρμόστηκε ώστε να μην υπάρχουν άλλα αντικείμενα ή περεταίρω γεωμετρίες στο φόντο όπου επρόκειτο να γίνουν οι σαρώσεις ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη. Το χρώμα και η υφή του φόντου όπου χρησιμοποιήθηκε ήταν μαύρο ματ δίχως να προστεθεί επιπλέον φωτισμός πέραν του ήδη υπάρχοντος στο χώρο του εργαστηρίου.

Ο φακός όπου επιλέχθηκε για την σάρωση του δοκιμίου είχε σημείο εστίασης σε απόσταση $L = 25 [mm]$, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης της κάμερας και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του προγράμματος και της κάμερας ήταν οι αυτόματες επιλογές με βάση την εντολή “Auto Focus”. Στην παρούσα σάρωση επειδή η απόσταση του αντικειμένου ορίστηκε μικρότερη του κατώτερου ορίου προδιαγραφών ήταν αδύνατη η χρήση της εντολής “Focus Lock”. Για το λόγω αυτό, η ένταση του laser και συγκεκριμένα του συντελεστή LD ορίστηκε κατ’ επιλογήν του χειριστή, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Body Name	A, B
Wing Material	ABS
Wing Direction	—
Background	Black smooth
Light [Lumens/Watt] + Direction (dist. from upper cube [cm]) / More Light [Lumens/Watt] + Direction (dist. [cm])	272 ▼ (208)
Focal Length Φακού [mm]	25
Auto Distance (Z’Z) [mm]	803
Manual Distance (Z’Z) [cm]	79
Manual Distance (Y’Y) [cm]	23.4
Manual Distance (X’X) [cm]	33
Intensity [%]	✓
LD [%]	12
Gain [%]	0
Log	✓
Smooth	✗
Dark	✗
Threshold [0-1023]	50
Color Level [1-10]	✗
High Quality Mode	✗
Dynamic Range Expansion Mode	✓
Fast	✗
Fine	✓
Use Texture	✓

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά λειτουργίας με βάση την εντολή “Auto Focus”.

Το τελικό αποτέλεσμα γίνεται εμφανές από το πολυγωνικό προφίλ της πτερυγώσης με ίσιο άξονα και αντίστοιχα με κυρτό άξονα, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες από το πρόγραμμα “Polygon Editing Tool”.

6.2. Προσαρμογή Χώρου και Σάρωση Πτερυγώσεων με Καμπτικό Φορτίο

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία στόχος ήταν να μελετηθεί η στροφή της εκάστοτε χορδής κατά μήκος της κάθε πτερυγώσης όταν σε αυτές ταυτόχρονα εφαρμοστεί ορισμένο φορτίο. Λόγω γεωμετρίας της πτέρυγας θα παρατηρηθεί το φαινόμενο της κάμψης, φέροντας κατ’ επέκταση ορισμένο ποσό βέλος κάμψης, ως προς την αρχική θέση της πτερυγώσης. Παράλληλα, στη θέση όπου θα εφαρμοστεί το φορτίο, λόγω γεωμετρίας η χορδή θα στραφεί κατά ορισμένες μοίρες ως προς την αρχική της θέση.

Ίδιες συνθήκες και παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του χώρου κατά την σάρωση των ίδιων τεσσάρων πτερυγώσεων αλλά με καμπτικό φορτίο, όπως και στην περίπτωση δίχως καμπτικό φορτίο. Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν αντικείμενα για την προσομοίωση του καμπτικού φορτίου όπου έπρεπε να εφαρμοστεί στην κάθε αεροτομή.

Παρακάτω δίδεται ο πίνακας με την προ-απαιτούμενη μάζα όπου έπρεπε να τοποθετηθεί κατά μήκος της κάθε αεροτομής προσομοιώνοντας με αυτό τον τρόπο το φορτίο όπου δέχεται η κάθε πτερυγώση στην αντίστοιχη θέση όταν στο χείλος προσβολής προσπίπτει ο αέρας και διαφεύγει από το χείλος εκφυγής.

U_{air} [m/s]	10
Αεροτομή	m [gram]
1	1.12
2	4.28
3	7.75
4	11.11
5	14.48
6	17.85
7	21.11
8	24.37
9	27.63
10	30.80

Πίνακας 6.2: Τιμές βάρους όπου εφαρμόστηκαν κατά μήκος της κάθε αεροτομής.

Η κατανομή του φορτίου σε κάθε αεροτομή έγινε με την χρήση νημάτων και τοποθετήθηκαν κατά μήκος νοητών χορδών όπου χαραχτήκαν στις ακριβείς θέσεις αυτών.



Σχήμα 6.8: Θέση νημάτων και επιπρόσθετου φορτίου επάνω στις νοητές χορδές κατά μήκος της πτέρυγας.

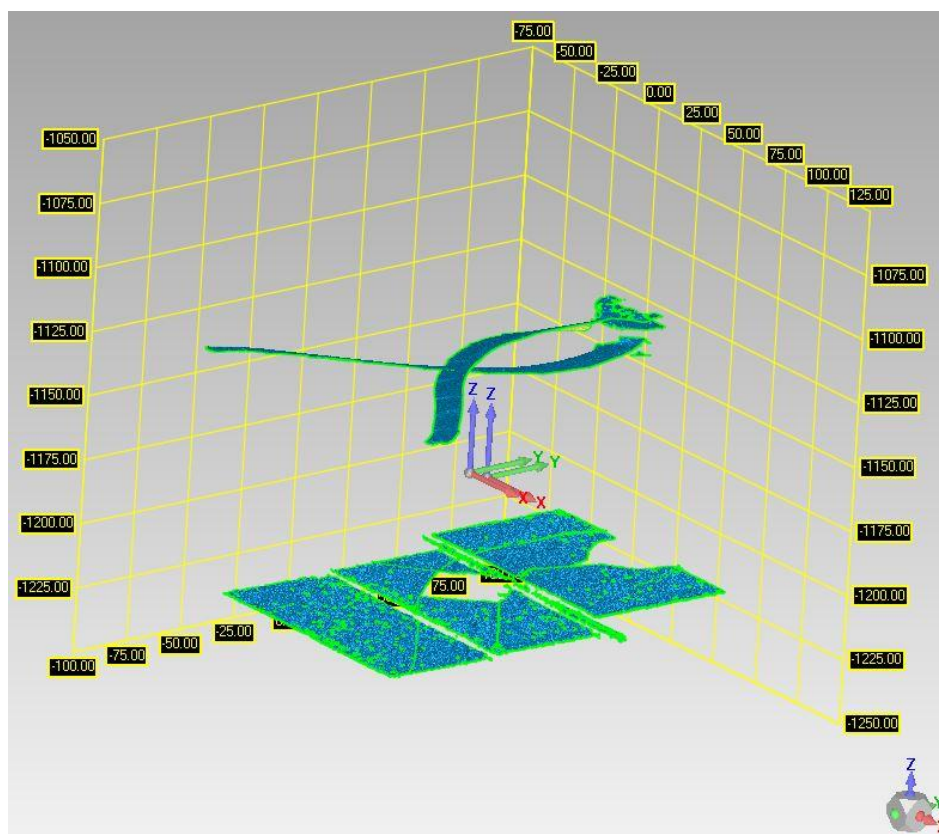
7. Επεξεργασία και Ανάλυση Γεωμετριών

7.1. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ στο Geomagic

7.1.1. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ Χωρίς Καμπτικό Φορτίο.

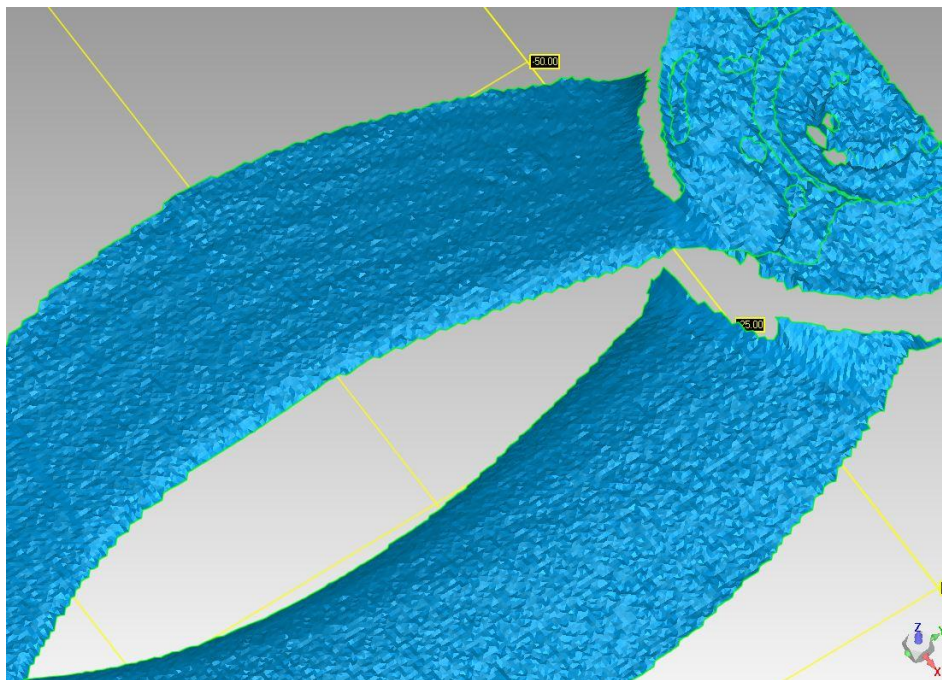
Για την δημιουργία επιφανειακών μοντέλων των πτερυγώσεων ικανών προς μελέτη και μέτρηση διαφόρων μεγεθών όπως ορίζει η παρούσα πτυχιακή εργασία κρίθηκε απαραίτητη η επεξεργασία του αρχικού πολυγωνικού προφίλ όπου παρήχθη από το πρόγραμμα της 3D κάμερας. Συγκεκριμένα η διαδικασία επεξεργασίας του πολυγωνικού προφίλ χωρίστηκε σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο αφορούσε την εισαγωγή και την μετατροπή του πολυγωνικού νέφους σε νέφος σημείων. Το δεύτερο ήταν η επεξεργασία του νέφους και τέλος η μετατροπή του σε μοντέλο επιφανειών. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης “*Geomagic Studio*” που αφορά την απεικόνιση με μεθόδους αντίστροφης μηχανικής.

Αρχικά εισήχθησαν δύο αρχεία [* .stl] στο πρόγραμμα επεξεργασίας τα οποία έφεραν την γεωμετρία των δύο σωμάτων της εκάστοτε πτερυγώσης. Επιλέχθηκε να εισάγονται ταυτόχρονα κατά την επεξεργασία της κάθε πτερυγώσης ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη και όμοια επεξεργασία τους και τελικώς η σύνθεση τους για την απόδοση της τελικής γεωμετρίας. Με βάση τη μορφή αρχείου όπου επιλέχθηκε να εισαχθεί η ανεπεξεργαστη γεωμετρία αλλά και με βάση τις ιδιότητες από το πρόγραμμα “*Polygon Editing Tool*” το πρόγραμμα επεξεργασίας εμφάνισε δύο διαφορετικές γεωμετρίες πολυγωνικού προφίλ όπου έφεραν διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων ανάλογα προς την θέση την οποία τοποθετήθηκαν από τον χειριστή για την σάρωση των επιθυμητών επιφανειών από τις εκτυπωμένες πτερυγώσεις. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η ομογενοποίηση των γεωμετριών σε μία.

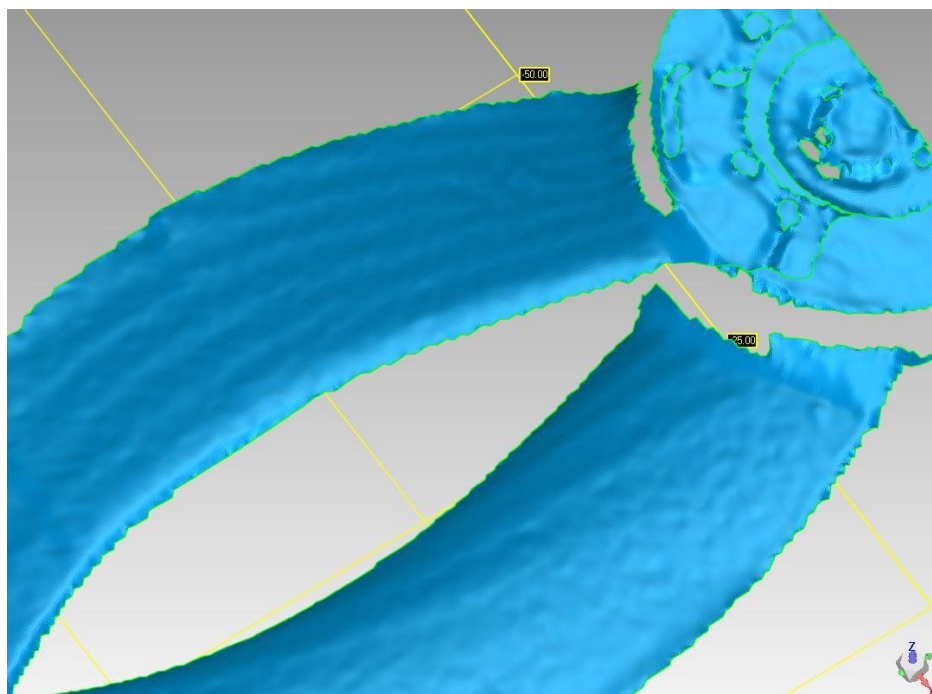


Σχήμα 7.1: Πολυγωνικό προφίλ σωμάτων μιας πτερυγώσης δίχως κοινό σύστημα συντεταγμένων.

Κατ' επιλογήν έγινε τετραπλασιασμός των ήδη υπάρχον πολυγώνων με συντελεστή δύο (2) και διόρθωση των επιμέρους ορίων της γεωμετρίας μέσω της εντολής "Refine". Καθώς έγινε και γρήγορη επαναπροσδιορισμό των πολυγώνων στο χώρο όμοια της κυρτότητας των επιφανειών μέσω της εντολής "Quick Smooth" και έπειτα οι ανεπεξέργαστες γεωμετρίες μετατράπηκαν σε νέφος σημείων.

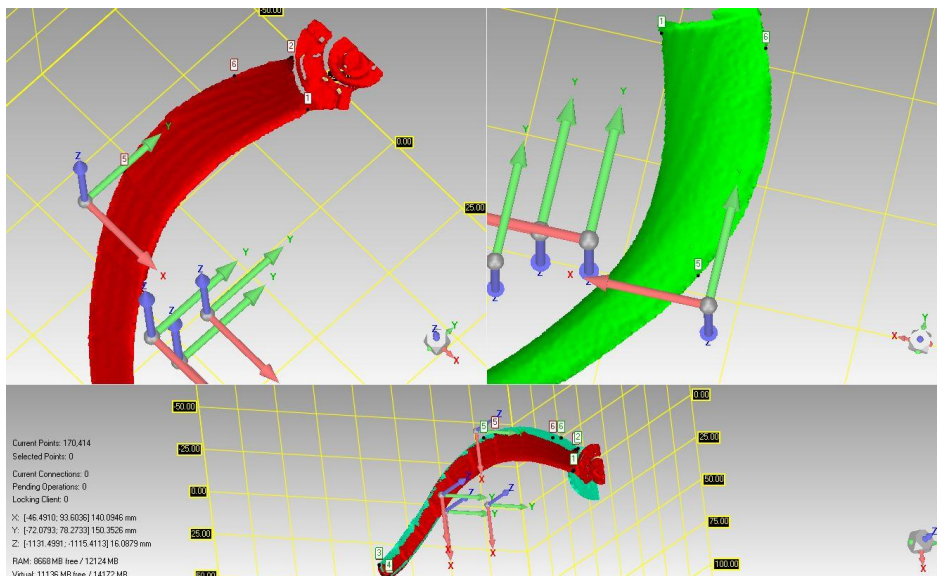


Σχήμα 7.2: Πριν την αρχική βελτίωση πολυγώνων για την δημιουργία ενιαίου μοντέλου.



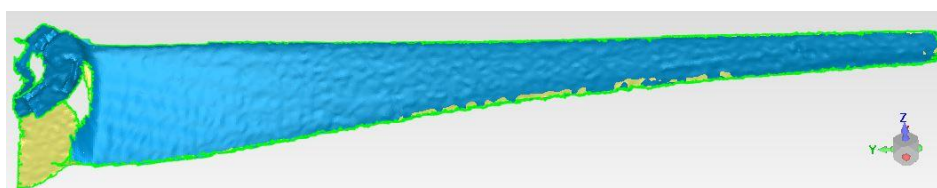
Σχήμα 7.3: Μετά την αρχική βελτίωση πολυγώνων για την δημιουργία ενιαίου μοντέλου.

Υπό μορφή νέφους έγινε χειροκίνητος ορισμός των σημείων εκείνων μεταξύ των δύο σωμάτων για την σαφή ένωση των δύο επιφανειών με τελικό στόχο την δημιουργία της ολοκληρωμένης γεωμετρίας. Η επιλογή των εν λόγω σημείων έγινε με βάση την κρίση του χειριστή του προγράμματος έχοντας στόχο να μην προκύψουν τυχόν σφάλματα κατά την ένωση τα οποία θα οφείλονταν σε απόσταση των σωμάτων μικρότερης ή και μεγαλύτερης των ανοχών διάστασης από το πρότυπο τρισδιάστατο μοντέλο. Η παραπάνω διαδικασία επιτευχθεί μέσω της εντολής “Manual Registration”. Με την διαδικασία αυτή ορίζεται πλέον ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων μεταξύ των δύο επιφανειών το οποίο αφορά την τελική γεωμετρία της εκάστοτε πτερυγώσης.



Σχήμα 7.4: Χειροκίνητη ένωση (Manual Registration) των δύο σωμάτων μιας πτερυγώσης.

Επόμενο στάδιο για την οριστικοποίηση ενός κοινού συστήματος συντεταγμένων και η απαλοιφή τυχόν επικαλύψεων και τομών μεταξύ κόμβων ύστερα από την χειροκίνητη ένωση των σωμάτων ήταν η ένωση των επιφανειών. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η εντολή “Merge”. Στόχος με την παρούσα εντολή ήταν η απαλοιφή νέφους σημείων όπου αποδίδουν ίδια γεωμετρία και η δημιουργία ενός συνδυασμένου νέφους αποδίδοντας πολυγωνικό προφίλ ύστερα από το συνδυασμό γεωμετρικών λεπτομερειών των δύο διαφορετικών περιοχών όπου βρίσκονταν σε επικάλυψη (Boolean Geometry).



Σχήμα 7.5: Τελική μορφή πολυγωνικού προφίλ ύστερα από την εντολή “Merge”.

Προτελευταίο στάδιο επεξεργασίας και πριν την δημιουργία επιφανειακού τρισδιάστατου μοντέλου ήταν η βελτίωση του πολυγωνικού προφίλ. Σε αυτή τη διαδικασία ακολουθήθηκαν σύνολο εντολών με στόχο την προσέγγιση της πρότυπης γεωμετρίας των πτερυγώσεων επαναπροσδιορίζοντας τα πολύγωνα και ελαττώνοντας το πλήθος τους αφού αρχικά απαλείφθηκαν ανομοιομορφίες και πιθανές ασυνέχειες. Για το παρόν στάδιο χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω εντολές:

- Create Feature: Cylinder

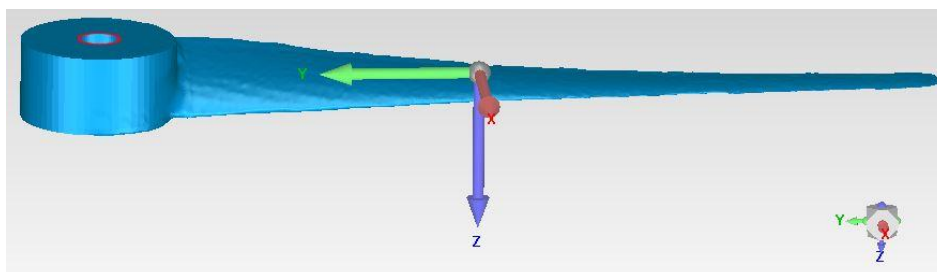
- Fill Holes,
- Remove Spikes,
- Relax,
- Remesh,
- Decimate.

Συγκεκριμένα στόχος ήταν η προσομοίωση της πλήρους της περύγωσης ώστε να είναι γνωστή η ακριβής θέση του κέντρου του εσωτερικού κυλίνδρου. Κατ' αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατή η μέτρηση της γωνίας σφήνωσης και των υπολοίπων μεγεθών σχεδίασης της περύγωσης. Για την παρούσα διαδικασία δεν κρίθηκε απαραίτητη η λεπτομερής αποτύπωση της γεωμετρίας της βάσης, όπως στο πρότυπο σχεδιασμό της γι' αυτό και η θεώρηση της ως επιφανειακός κύλινδρος αρκούσε για τις μετρήσεις όπου προαναφέρθηκαν.

Επιλεγμένη Σειρά Εντολών		Επιλεγμένες Τιμές	
Refine	4X	2 φορές	
	Fix Boundaries	✓	
Convert to points		✓	
Manual Registration		✓	
Merge	Settings	Local Noise Reduction	None
		Global Registration	✗
		Global Noise Reduction	None
		Keep Original Data	✓
		Delete Small Components	✓
	Sampling	Max Triangles	25000000
	Performance	Quality	Highest
Create Feature	Cylinder 1	Base Point [mm]	(77.5437, -15.1410, -1002.7186)
		Direction	(-0.0000, 0.0000, 1.0000)
		Height [mm]	15.00
		Diameter [mm]	30.00
		Solidity	Hollow
	Cylinder 2	Base Point [mm]	(77.5437, -15.1410, -987.0000)
		Direction	(0.0000, -0.0000, -1.0000)
		Height [mm]	16.00
		Diameter [mm]	8.00
		Solidity	Hollow
Edit Features	Features to polygon Objects	✓	

Polygons	Combine	Boolean	✓
Fill Holes			✓
Remove Spikes	Smoothness Level		maximum
Relax	Smoothness Level		maximum
	Strength		maximum
	Curvature Priority		maximum
	Fix Boundaries		✓
Remesh	Fixed Vertices		All
	Preserve Sharp Edges	Add Boundaries	✓
		A°	45.00
		Minimum Length [mm]	3.00
Decimate	Triangles		10^6

Πίνακας 7.1: Πίνακας εντολών και ιδιοτήτων που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία πολυγωνικού προφίλ.



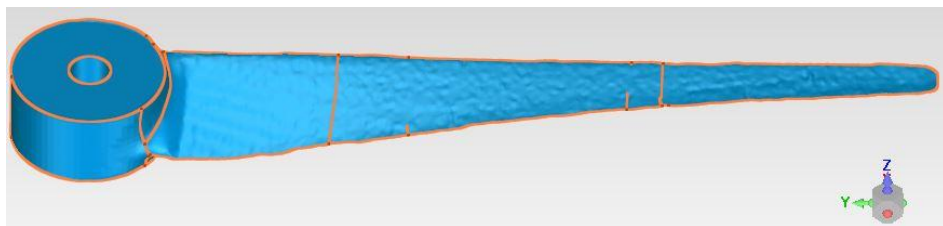
Σχήμα 7.6: Σχεδιασμός πλήμνης πτερυγώσεων σύμφωνα με τις διαστάσεις των πρότυπων σχεδίων

Τελικό στάδιο ήταν η δημιουργία επιφανειακών μοντέλων μέσω της καρτέλας εντολών “Exact Surface”. Στόχος με την καρτέλα αυτή ήταν η επικάλυψη του πολυγωνικού προφίλ με σύνολο ανομοιόμορφων ρητών καμπυλών B-Splines (Non Uniform Rational B-Splines – NURBS) και όχι η κατασκευή παραμετρικών τρισδιάστατων μοντέλων. Για την διαδικασία αυτή ακολούθησε σύνολο εντολών με τις οποίες αρχικά αναγνωρίστηκαν οι περιοχές της γεωμετρίας με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας, έπειτα δημιουργία πλέγματος το οποίο αναπαριστά την γεωμετρία των πολυγώνων και τέλος η εντολή κατασκευής επιφανειών. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται η σειρά των εντολών όπου επιλέχθηκαν και οι ανάλογες τιμές τους.

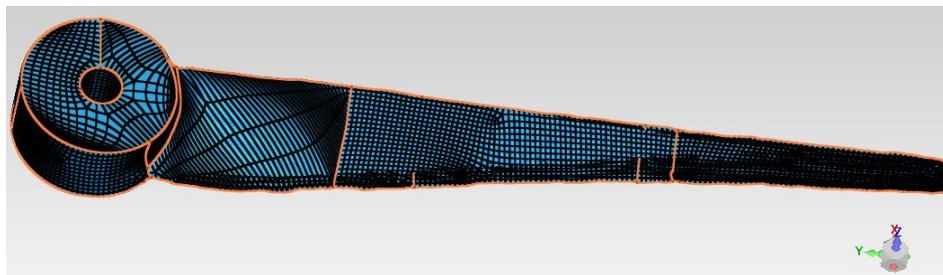
Επιλεγμένη Σειρά Εντολών			Επιλεγμένες Τιμές
Detect Contours	Curvature Sensitivity [%]		80.0
	Separator Sensitivity [%]		60.0
	Minimum Area [mm^2]		1.7410
	Contours	Minimum Length [mm]	0.5216
		Sensitivity	2.0
Construct Patches	Specify Patch Count	Target Patch Count	2000.0

		Check Patch Intersection	✓
Construct Grid	Resolution [%]		30.0
Fit Surface	Adaptive Fitting Method	Maximum Control Points	28.0
		Tolerance [mm]	0.08812
		Surface Tension [mm]	0
		Outlier Percentage [%]	0.5

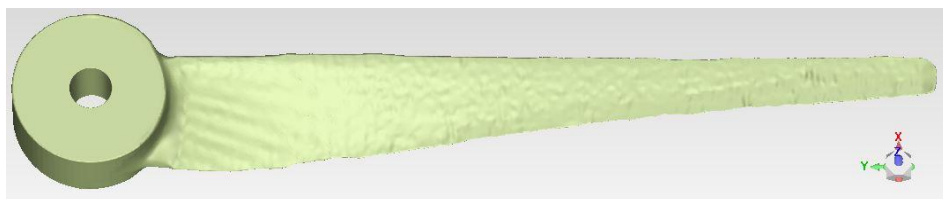
Πίνακας 7.2: Πίνακας εντολών και ιδιοτήτων που επιλέχθηκαν για την δημιουργία επιφανειακού μοντέλου.



Σχήμα 7.7: Εύρεση ορίων γεωμετρίας με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας.



Σχήμα 7.8: Ορισμός πλέγματος για την κάλυψη του πολυγωνικού προφίλ με NURBS σύνολο επιφανειών.



Σχήμα 7.9: Τελικό επιφανειακό μοντέλο.

7.1.2. Επεξεργασία Πολυγωνικού Προφίλ με Καμπτικό Φορτίο.

Για την επεξεργασία του πολυγωνικού προφίλ στο “Geomagik” ύστερα από τη σάρωση των πτερυγώσεων έχοντας επιπρόσθετο φορτίο κατά μήκος της κάθε αεροτομής, κρίθηκε απαραίτητη η σάρωση μόνο της μιας από τις δύο επιφάνειες των πτερυγώσεων μιας και στόχος ήταν μόνο να μελετηθεί η γωνία παραμόρφωσης όπου θα έφερε η κάθε αεροτομή λόγω των διατημητικών δυνάμεων.

Συγκεκριμένα, μέσω των προαναφερθέν εντολών έγινε βελτιστοποίηση του πολυγωνικού προφίλ ώστε η ευκρίνεια της εκάστοτε επιφάνεια να είναι δυνατή καθώς και να είναι δυνατό να επεξεργασθούν τα ανοικτά όρια της γεωμετρίας. Έπειτα, μέσω της εντολής “Fill” επεξεργάστηκαν τα όρια του πολυγωνικού προφίλ κάθε επιφάνειας ώστε να μην υπάρχουν αιχμές λόγω των πολυγώνων αλλά όσο το δυνατόν ομοιόμορφη και λεία (smooth) γραμμή.

Τελικώς, προσομοιώθηκε το επιφανειακό μοντέλο των πτερυγώσεων όπως αναφέρθηκε και στην παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας του πολυγωνικού προφίλ χωρίς επιπρόσθετο εξωτερικό φορτίο κατά μήκος όλων των χορδών, αφήνοντας την μια πλευρά της πτερυγώσης ανοικτή ικανή όμως προς επεξεργασία από το “PTC Creo Parametric” για την μέτρηση των γωνιών σφήνωσης.

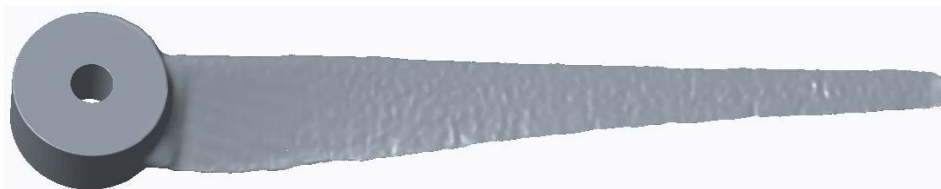
7.2. Επεξεργασία Γεωμετρίας στο PTC Creo Parametric

7.2.1. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης χωρίς Καμπτικό Φορτίο.

7.2.2.1. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης με Ευθύγραμμο Άξονα.

Ύστερα από την επεξεργασία του νέφους σημείων και κατ’ επέκταση του πολυγωνικού προφίλ στο “Geomagik Studio” για την κατασκευή ενός επιφανειακού μοντέλου το οποίο θα ήταν δυνατό να αναγνωριστεί από άλλα προγράμματα CAD, ήταν απαραίτητο να μελετηθούν, να σχεδιασθούν και να μετρηθούν βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων. Η παρακάτω διαδικασία όπου ακολουθήθηκε ήταν αδύνατη και για τις δύο περιπτώσεις σαρώσεων. Δηλαδή και για τις σαρώσεις δίχως καμπτικό φορτίο αλλά και με καμπτικό φορτίο.

Συγκεκριμένα, στόχος ήταν να μετρηθούν η γωνία σφήνωσης θ° των χορδών ως προς την πλήμνη της πτερυγώσης, το ύψος H [mm] της πτερυγώσης και το μήκος των χορδών της πτερυγώσης C [mm]. Επομένως, αρχικώς τα επιφανειακά μοντέλα εισήχθησαν στο πρόγραμμα “PTC Creo Parametric” υπό την μορφή “*.iges” αρχείου και επιλέγοντας την εντολή “Automatic” να γίνει αυτόματη αναγνώριση των επιφανειών όπου έφεραν τα εν λόγω αρχεία.

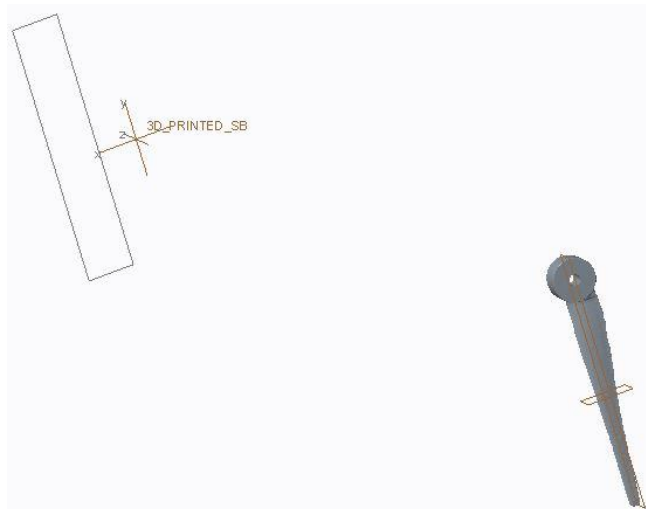


Σχήμα 7.10: Εισαγωγή επιφανειακού μοντέλου στο “PTC Creo Parametric”

Για τον σχεδιασμό των βασικών μεγεθών όπου αναφέρθηκαν παραπάνω ήταν απαραίτητο να προσδιορισθούν αρχικές βασικές σχεδιαστικές παράμετροι ώστε να γίνει γνωστή η θέση των χορδών κατά μήκος της γεωμετρίας των πτερυγώσεων όπου προέκυψε με μεθόδους αντίστροφης μηχανικής. Είναι σημαντικό να γίνει γνωστό ότι τα αρχεία παραμετρικής μοντελοποίησης δεν αναγνωρίζουν σαν παραμετρικά επιφανειακά ή στερεά μοντέλα αλλά σαν “Features”. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνει σχεδιασμών των τριών βασικών επιπέδων σχεδίασης και του συστήματος συντεταγμένων.

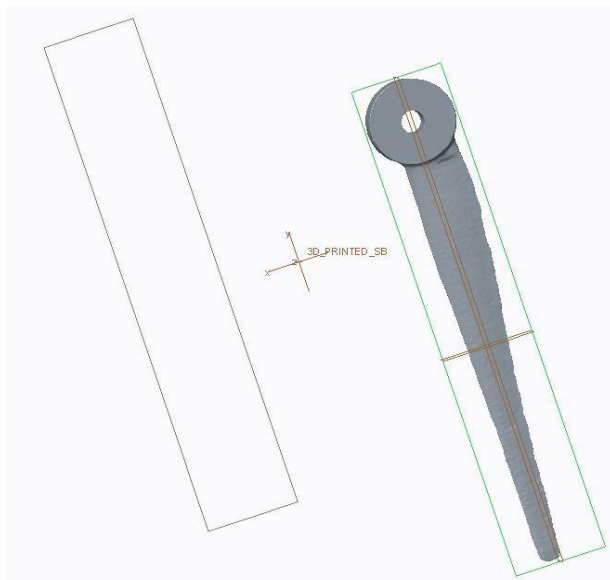
Κάθε γεωμετρία από αντίστροφη μηχανική, φέρει το σύστημα συντεταγμένων που έχει από το πρόγραμμα επεξεργασίας ή και αυτό που έχει η κάμερα. Επομένως για τον προσδιορισμό των επιπέδων σχεδιασμού (XY, YZ, ZX) επιλέχθηκε η εντολή “Offset” με τιμή ανά άξονα ($X = 0.0000, Y = 0.0000, Z = 0.0000$). Επομένως, τα επίπεδα όπου επρόκειτο να σχεδιασθούν, είχαν θέση στο σημείο

αναφοράς του κάθε άξονα όπου προέκυψε από την ανάλογη θέση της πτερύγωσης από την κάμερα σάρωσης κατά την πειραματική διαδικασία.



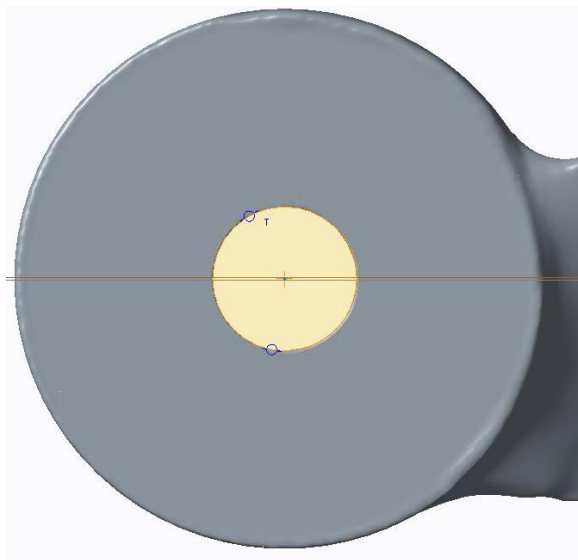
Σχήμα 7.11: Δημιουργία των βασικών επιπέδων σχεδιασμού στο “PTC Creo Parametric”.

Ύστερα από αυτή την διαδικασία ήταν απαραίτητο να προσδιορισθεί και να διορθωθεί η απόσταση των παραπάνω επιπέδων σχεδιασμού σύμφωνα με τη σχετική θέση της γεωμετρία όπου εισήχθη στο πρόγραμμα σχεδιασμού ως προς αυτά. Δηλαδή, στον άξονα ($Z'Z'$) η απόσταση του αντικειμένου από το φακό της κάμερας είχε σχετική απόσταση ίση με $L_z = \sim 600$ [mm]. Επομένως, για το προσδιορισμό της θέσης των χορδών ήταν αναγκαίο να δημιουργηθεί νέο επίπεδο σχεδιασμού (“Reference Plane”) στο μέσο της πλήμνης. Για το λόγω αυτό μετρήθηκε με τα μετρητικά εργαλεία του προγράμματος το μήκος της πλήμνης και η ανάλογη απόσταση της από το βασικό επίπεδο σχεδιασμού και αλγεβρικός κατασκευάστηκε το νέο επίπεδο αναφοράς.



Σχήμα 7.12: Σχεδιασμός νέου επιπέδου αναφοράς στο μέσο στις πλήμνης

Επόμενο βήμα ήταν ο σχεδιασμός των παραμέτρων όπου δίδουν την θέση των χορδών κατά μήκος της πτερύγωσης. Συγκεκριμένα, επιλέγοντας το επίπεδο σχεδιασμού όπου περιεγράφηκε παραπάνω και με την εντολή “Sketch” στο “PTC Creo Parametric” ορίστηκε σαν σημείο αναφοράς ο εσωτερικός κύλινδρος της πλήμνης επιλέγοντας τις ακμές της γεωμετρίας όπου έτεμναν το ενεργό επίπεδο σχεδιασμού. Ολοκληρώνοντας τον πρώτο σχεδιασμό, δημιουργήθηκε κύκλος εφαπτόμενος στις ακμές αναφοράς, προσδιορίζοντας το κέντρο του κύκλου και κατ’ επέκταση το κέντρο του κυλίνδρου.



Σχήμα 7.13: Σχεδιασμός κύκλου για τον προσδιορισμό του κέντρου του κυλίνδρου της πλήμνης.

Από το σημείο αυτό και έπειτα δημιουργήθηκαν ομάδες διαφορετικών σχεδιασμών για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης της κάθε χορδής κατά μήκος της ανάλογης αεροτομής. Κάθε ομάδα περιελάμβανε τρεις (3) διαφορετικούς σχεδιασμούς εκ των οποίων οι δύο ήταν μέσω της εντολής “Sketch” ενώ η τρίτη ήταν μέσω της εντολής “Extrude”.

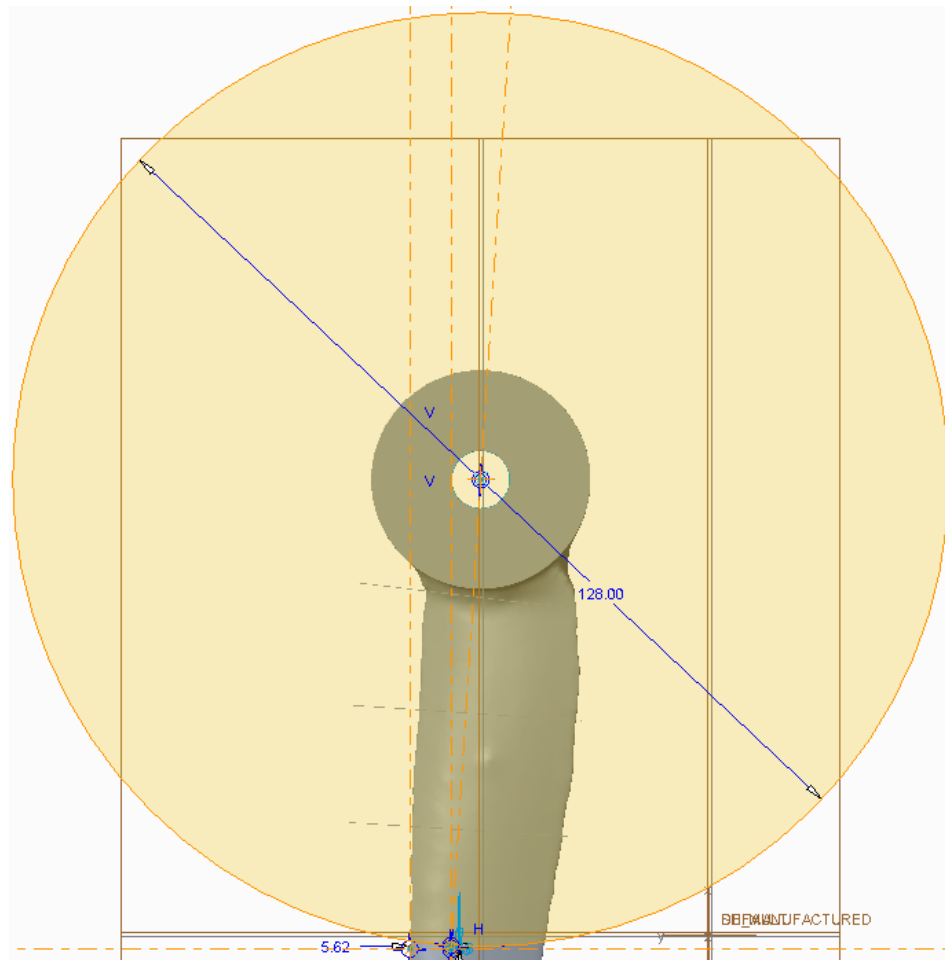
Στόχος ήταν ο προσδιορισμός της θέσης των χορδών κατά μήκος της κάθε πτερύγωσης. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε σαν μέθοδος αναφορά αυτή των κύκλων ορισμένης διαμέτρου όπου σχεδιάστηκαν και στα πρότυπα σχέδια στο “SolidWorks”. Έπειτα κρίθηκε αναγκαίος ο υπολογισμός της θέσης του σημείου εκείνου όπου διέρχεται η εφαπτομένη από το γεωμετρικό τόπο του κύκλου, τον σχεδιασμό των αντίστοιχων επιπέδων σχεδιασμού και τέλος την μέτρηση των ζητούμενων μεγεθών.

Η παραπάνω διαδικασία χωρίστηκε σε δύο κατηγορίες, με την πρώτη να αφορά τον σχεδιασμό της ίσιας πτερύγωσης και το δεύτερο να αφορά την κυρτή πτερύγωση. Επομένως, στο προαναφερθέν επίπεδο σχεδιασμού όπου κατασκευάστηκε και με αρχικό σημείο το κέντρο του κυλίνδρου, σχεδιάστηκε ο κάθε κύκλος σύμφωνα με τις διαστάσεις σχεδιασμού των πρότυπων πτερυγώσεων στην ίσια και την κυρτή πτερύγωση, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Κύκλος	Straight Blade
	Διάμετρος Κύκλων [mm]
P0	8
P1	32

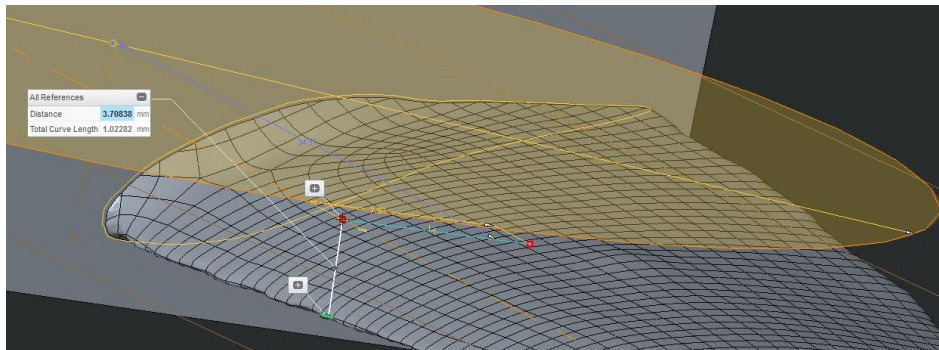
P2	64
P3	96
P4	128
P5	160
P6	192
P7	224
P8	256
P9	288
P10	320

Πίνακας 7.3: Πίνακας βασικών διαστάσεων σχεδιασμού των κύκλων κατά μήκος της ίσιας και της κυρτής πτερυγώσης.



Σχήμα 7.14: Σχεδιασμός του κύκλου από όπου διέρχεται η χορδή στην ίσια πτερυγώση.

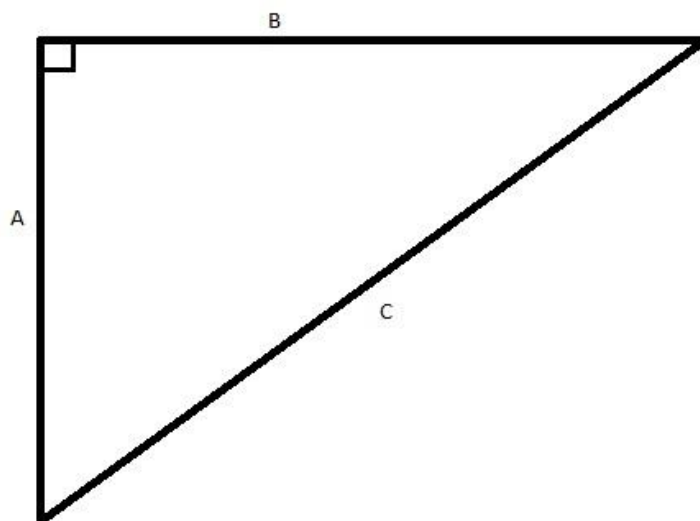
Η πρώτη κατηγορία σχεδιασμού όπου αφορούσε την εύρεση του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$ όπου διέρχεται η εφαπτομένη, δηλαδή η χορδή στην ίσια περύγωση χωρίσθηκε σε τρία βασικά βήματα. Στο πρώτο βήμα υπολογίσθηκε το ένα τρίτο ($\frac{1}{3}$) του μήκους της κάθε χορδής των πρότυπων σχεδίων. Η τιμή αυτή αντιπροσώπευε την θέση του ζητούμενου σημείου από το χείλος προσβολής της περύγωσης βάση του πρότυπου σχεδιασμού και σύμφωνα με την τυποποίηση "NAKA 1455".



Σχήμα 7.15: Εύρεση πραγματικής διάστασης για την προσέγγιση της θέσης του σημείου όπου διέρχεται η χορδή.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ο προσδιορισμός της θέσης του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$ δεν αποτελεί πρόβλημα δύο διαστάσεων ώστε να γίνει απλός υπολογισμός της θέσης του σημείου και αντίστοιχα ο σχεδιασμός του. Εν γέννη, η περύγωση φέρει μια σχετική στροφή ως προς τον διαμήκη άξονα της με αποτέλεσμα η αντίστοιχη προβολή των ακμών του χείλους προσβολής στο επιλεγμένο επίπεδο σχεδιασμού έδινε λανθασμένη τελική θέση. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός της πραγματικής τιμής με την οποία επρόκειτο να σχεδιασθεί η θέση του σημείου.

Το παραπάνω πρόβλημα επιλύθηκε ανάγοντας το από τη τρίτη διάσταση στο ανάλογο επίπεδο σχεδιασμού ή ακόμα καλύτερα στην αντίστοιχη όψη, όπου καταλήγοντας έγινε υπολογισμός της μιας εκ των δύο κάθετων ακμών του νοητού τριγώνου όπου σχηματιζόταν μέσω του πυθαγορείου θεωρήματος. Η υποτεινόμενα παρομοίαζε όσο το δυνατόν περισσότερο τη χορδή προσεγγίζοντας έτσι τη θέση του εκάστοτε σημείου.



Σχήμα 7.16: Αναγωγή προβλήματος στο επίπεδο.

Για τον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή χρησιμοποιήθηκε το πυθαγόρειο θεώρημα και βάση αυτού επιλύθηκε αλγεβρικά η εξίσωση ώστε να υπολογίσει το επιθυμητό μήκος του ευθυγράμμου τμήματος, δηλαδή τη θέση του σημείου.

$$A^2 + B^2 = C^2 \quad (7.1)$$

Σε πρώτο στάδιο η εξίσωση του πυθαγορείου θεωρήματος επιλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε ως προς την οριζόντια ακμή, όπως φαίνεται στο παραπάνω ορθογώνιο τρίγωνο υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο την αρχική θέση του σημείου $M(x, y, z)$ από το χείλος προσβολής και έφερε την μορφή:

$$B = \sqrt{\left(\frac{C_0}{3}\right)^2 - A^2} \quad (7.2)$$

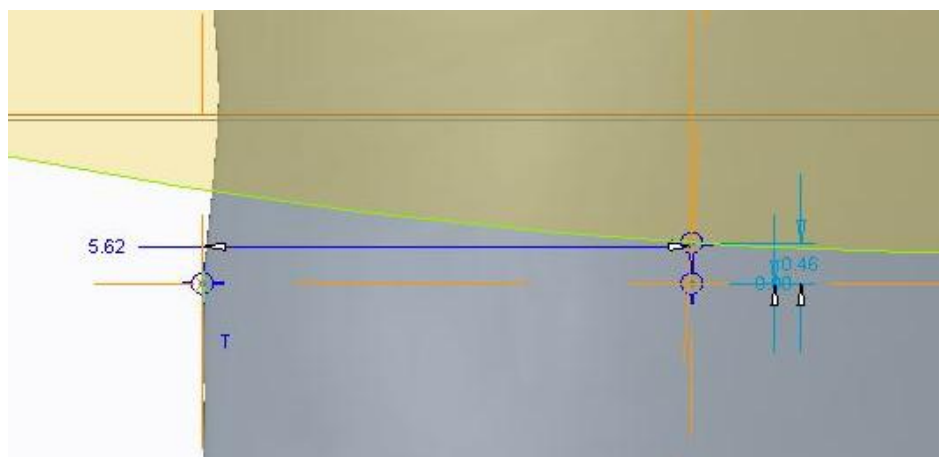
Τελικώς, η ίδια εξίσωση χρησιμοποιήθηκε ξανά ώστε να προσεγγιστεί η θέση του σημείου με μεγαλύτερη ακρίβεια.

$$B_{new} = \sqrt{\left(\frac{C_t}{3}\right)^2 - A^2} \quad (7.3)$$

Επεξήγηση των μεγεθών των παραπάνω εξισώσεων:

- A : Απόσταση της ακμής του χείλους προσβολής από την προβολή της στο αντίστοιχο επίπεδο σχεδιασμού σε $[mm]$.
- B : Απόσταση σε $[mm]$ από την προβαλλόμενη ακμή του χείλους προσβολής ως το σημείο M για την προσέγγιση του $1/3$ του μήκους της χορδής.
- C : Μήκος υποτεινουσας σε $[mm]$ όπου παρομοίαζε την χορδή.
- C_0 : Μήκος χορδής σε $[mm]$ από το πρότυπο σχεδιασμό στο “Solidworks” σύμφωνα με το κανονισμό *NACA 1455*.

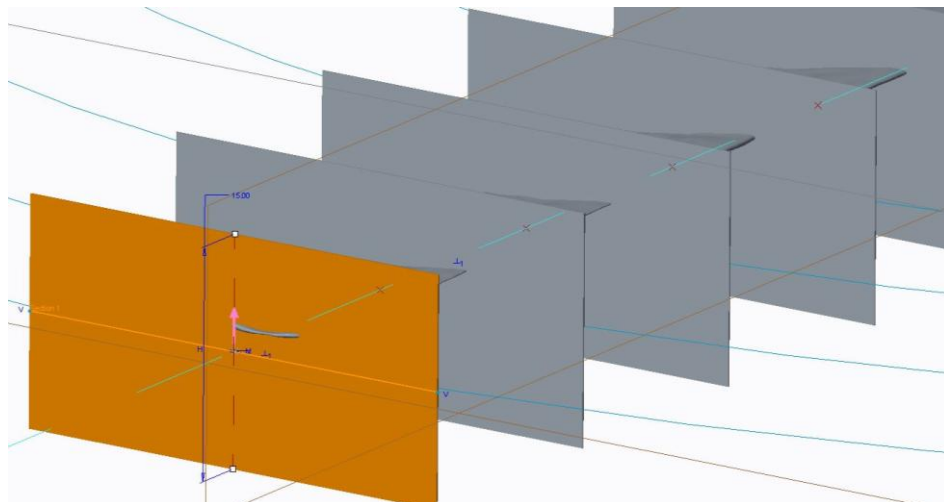
Για το προσδιορισμό του σημείου M πάρθηκαν αξονικές γραμμές ως προς τα ευθύγραμμα τμήματα όπου σχεδιάστηκαν προσομοιώνοντας την ακμή του χείλους προσβολής.



Σχήμα 7.17: Προσδιορισμός σημείου M στην ίσια πτερύγωση

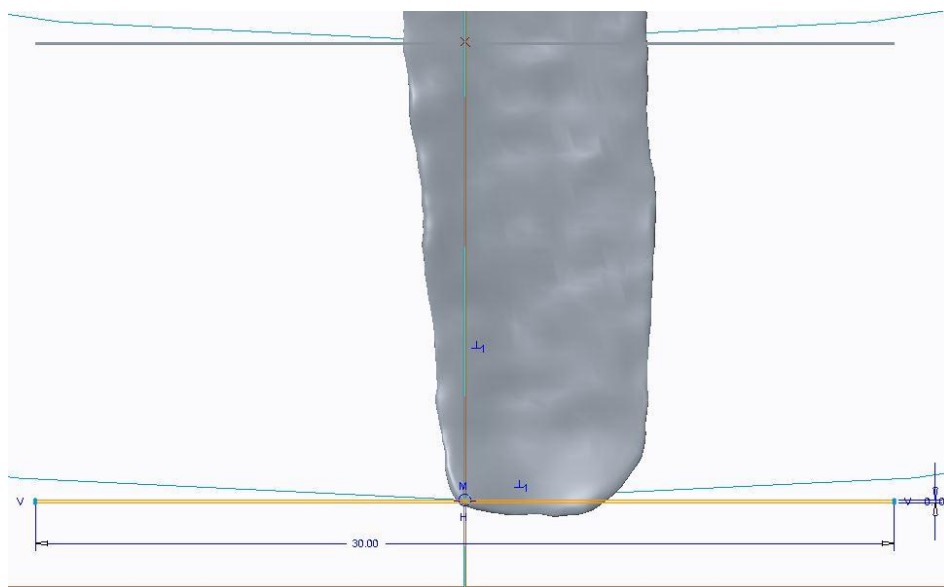
Δεύτερο βήμα ήταν ο σχεδιασμός των επιπέδων μέσω της εντολής “Extrude”. επάνω στα οποία θα γινόταν ο σχεδιασμός και η μέτρηση των ζητούμενων μεγεθών, δηλαδή του μήκους της χορδής C $[mm]$, του ύψους της αεροτομής H $[mm]$ και της γωνίας σφήνωσης α $[^\circ]$ της κάθε πτερύγωσης. Για τον λόγο

αυτό σχεδιάσθηκαν στέρεα ορθογώνια παραλληλόγραμμα διαστάσεων 30X15X0.1 όπου προσομοίωσαν τα επίπεδα και έτεμαν την πτερυγωση στην ακριβής θέση όπου ήταν η χορδή της πτερυγωσης.



Σχήμα 7.18: Προσομοίωση επιπέδων για τον σχεδιασμό των χορδών και των καμπυλών της πτερυγωσης.

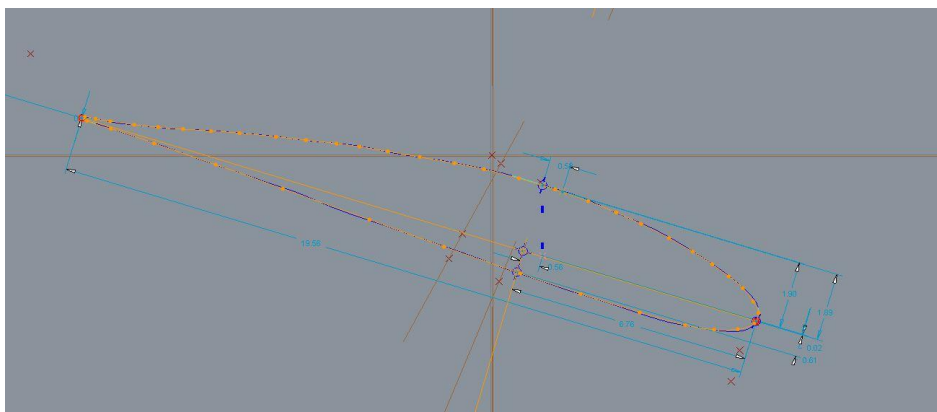
Για τη διαδικασία αυτή, λήφθηκε υπόψη ότι οι επιφάνειες αυτές διέρχονται εφαπτόμενα από το σημείο $M(X_i, Y_i, Z_i)$ και κάθετα στην αξονική με αρχή το ίδιο το σημείο M και τέλος το κέντρο του κυλίνδρου, δηλαδή της πλήμνης της πτερυγωσης.



Σχήμα 7.19: Σχεδιασμός επιπέδων όπου αναπαριστούν τα επίπεδα σχεδιασμού των χορδών και των καμπυλών της πτερυγωσης.

Τρίτο βήμα για την μέτρηση των τριών βασικών μεγεθών, ήταν απαραίτητο να σχεδιασθεί η γεωμετρία της αεροτομής μέσω της εντολής “Sketch” στα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς και έπειτα να προσδιορισθούν μέσω του σχεδιασμού οι χορδές.

Δηλαδή, μέσω των εντολών “*Spline*” και “*Line*” ορίσθηκαν σημεία αναφοράς βάση των ακμών όπου έτεμναν το αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς σχεδιασμού και κατασκευάστηκε η εν λόγω γεωμετρία της πτερυγώσης δίδοντας τελικώς τα αποτελέσματα όπου ζητούνταν.



Σχήμα 7.20: Σχεδιασμός των καμπυλών και των χορδών βάση της γεωμετρίας όπου προέκυψε από τις σαρώσεις.

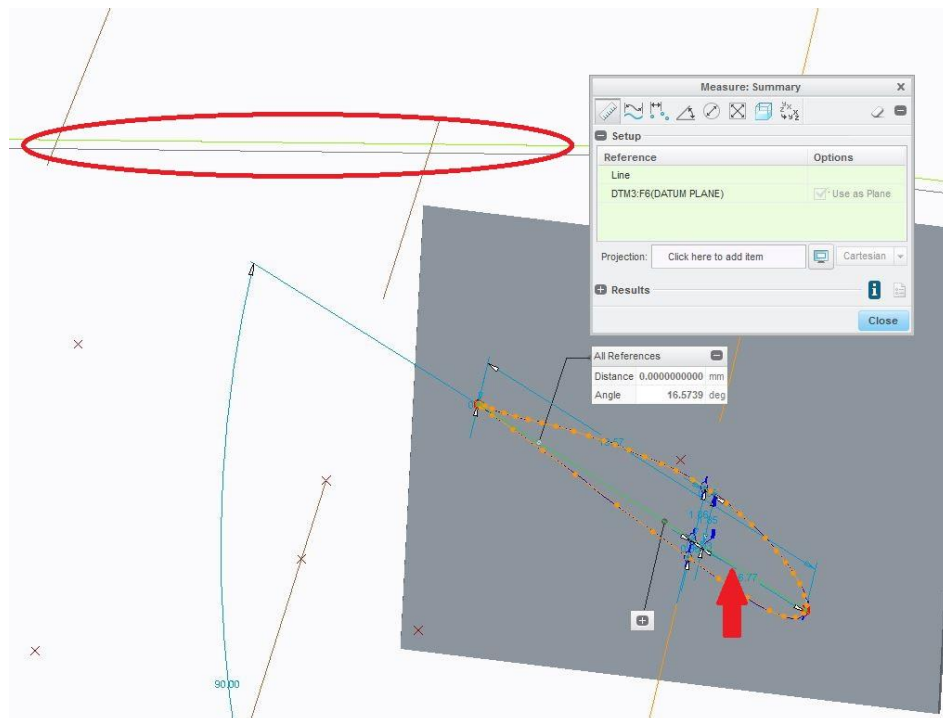
Πριν την μέτρηση των βασικών μεγεθών μέσω των εργαλείων του προγράμματος σχεδιασμού, η “*Spline*” καμπύλη επεξεργάστηκε ώστε να φέρει ομαλή καμπύλωση και τον ακριβή αριθμό σημείων όπου χρειαζόταν με βάση το μέγεθος και την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας όπου προέκυψε κατά την προβολή των ακμών αναφοράς στο επίπεδο σχεδιασμού.

Επιλεγμένη Σειρά Εντολών			Επιλεγμένες Τιμές
Open *.iges file.	Creation Method		Automatic
	Template		mmns_part_solid
Plane	Top Reference Plane	Translation [mm]	Equal to scanning distance
	Right Reference Plane		
	Front Reference Plane		
Sketch	References		Η περίμετρος του εσωτερικού κύκλου
	Circle		✓
	Line		✓
Datum	Point		✓
Extrude	Sketch Line Rectangular	length [mm]	30.0000
		width [mm]	0.1000
	Height [mm]		15.0000
	Extrude on Both Sides		✓
Sketch	Plane		✓
	References		✓

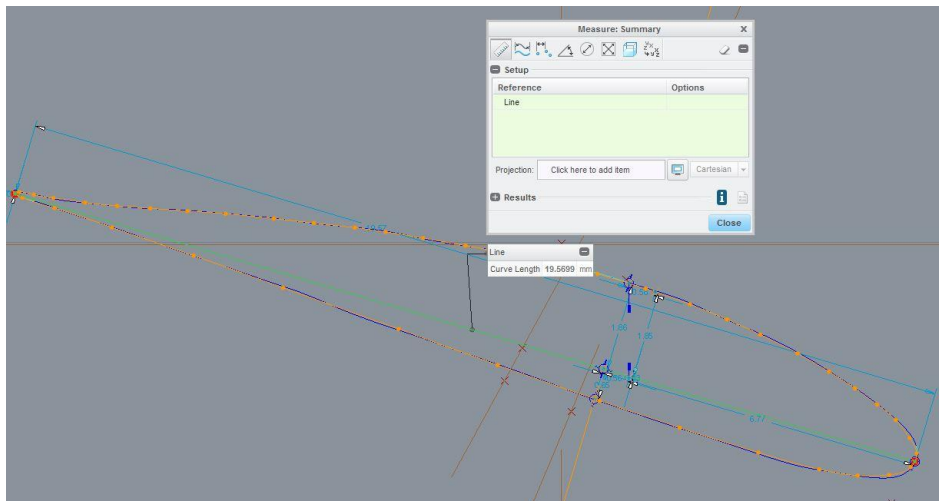
	Spline	Sketch		✓
		Edit	Point	Reform the curvature.
			Fit type: Sparse	0.0050
	Fit type: Smooth	2.0000		
Datum	Centerline		✓	

Πίνακας 7.4: Πίνακας εντολών και ιδιοτήτων που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία των spline καμπυλών.

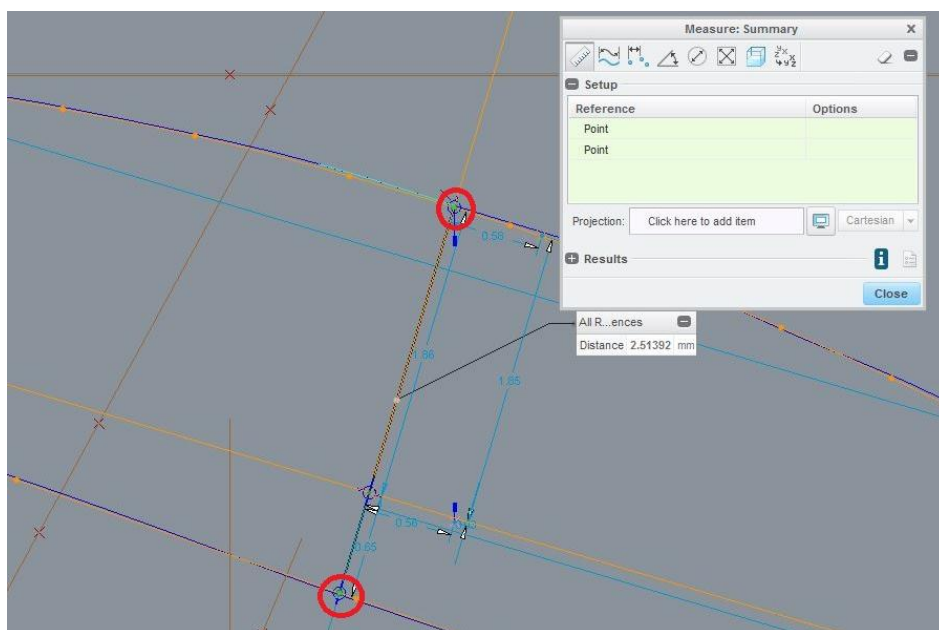
Τελικώς, μέσω της εντολής “Measure” έγινε η μέτρηση του μήκους της χορδής C [mm], το ύψος της χορδής H [mm] και της γωνίας σφήνωσης ως προς το “Reference Plane” και πάρθηκαν τα δεδομένα με στόχο να γίνει η μελέτη της γεωμετρίας των πτερυγώσεων.



Σχήμα 7.21: Μέτρηση γωνίας σφήνωσης με τα εργαλεία του προγράμματος “PTC Creo Parametric” ως προς το “Reference Plane”.



Σχήμα 7.22: Μέτρηση μήκους χορδής C [mm] με τα εργαλεία του προγράμματος “PTC Creo Parametric” ως προς το “Reference Plane”.



Σχήμα 7.23: Μέτρηση ύψους αεροτομής H [mm] με τα εργαλεία του προγράμματος “PTC Creo Parametric” ως προς το “Reference Plane”.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας προσεγγίστηκε το μέτρο της κάθε χορδής, αντίστοιχα η γωνία σφήνωσης και το ύψος της αεροτομής βάση των διαστάσεων της πρότυπης πτερυγώσης, σχεδιάζοντας επάνω στη πτερυγώση όπου μοντελοποιήθηκε μέσω της κάμερας αντίστροφης μηχανικής.

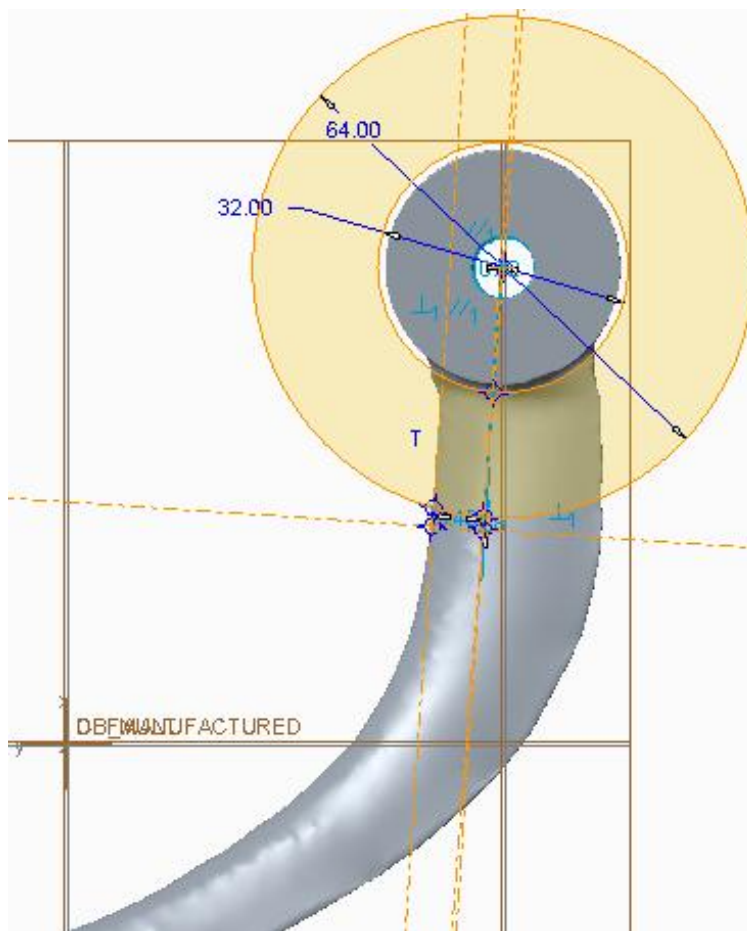
Για την ολοκλήρωση και τον ακριβέστερο προσδιορισμό της θέσης του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$ και αντίστοιχα όλων των υπολοίπων μεγεθών όπου αναζητούνταν έγινε μέτρηση του μήκους της χορδής όπου σχεδιάστηκε στο τρίτο βήμα της παραπάνω διαδικασίας και ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία μελέτης και σχεδιασμού όλων των μεγεθών όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Με αυτό το τρόπο έγινε η προσέγγιση τους βάση των πραγματικών διαστάσεων της μοντελοποιημένης πτερυγώσης αποδεσμεύοντας όσο το δυνατόν περισσότερο τις μετρήσεις από κάθε σχεδιαστικό συσχετισμό με αυτό των μοντέλων από το "SolidWorks". Τελικώς, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν και προσδιορίστηκε το σφάλμα της μεθόδου αυτής.

7.2.2.2. Επεξεργασία και Σχεδιασμός της Πτερυγώσης με Κυρτό Άξονα.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον σχεδιασμό στη κυρτή πτερυγώση. Συγκεκριμένα, για την εύρεση του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$ το πρόβλημα πλέον ανάγεται στο επίπεδο έχοντας το γεωμετρικό τόπο του κύκλου να τέμνεται από δύο κυρτά ευθύγραμμο τμήματα. Κατ' αυτή την λογική ήταν αδύνατο να προσδιορισθεί ποιο θα είναι το ευθύγραμμο τμήμα στο οποίο επρόκειτο να ληφθούν κάθετες αξονικές για την εύρεση του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$.

Επομένως, στοιχεία της μεθοδολογίας όπου προσεγγίστηκε η μελέτη των πτερυγώσεων με ευθύγραμμο άξονα, χρησιμοποιήθηκαν και για τη μελέτη των πτερυγώσεων με κυρτό άξονα. Η μελέτη και ο σχεδιασμός χωρίστηκαν σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο κρίθηκε απαραίτητο να γίνει ο προσδιορισμός της αξονικής γραμμής των δύο αρχικών αεροτομών - κοντύτερα στο κέντρο της πλήμνης - όπου στο σχεδιασμό τους στο "Solidworks" ήταν όμοια με την πτερυγώση όπου έφερε ίσιο άξονα.

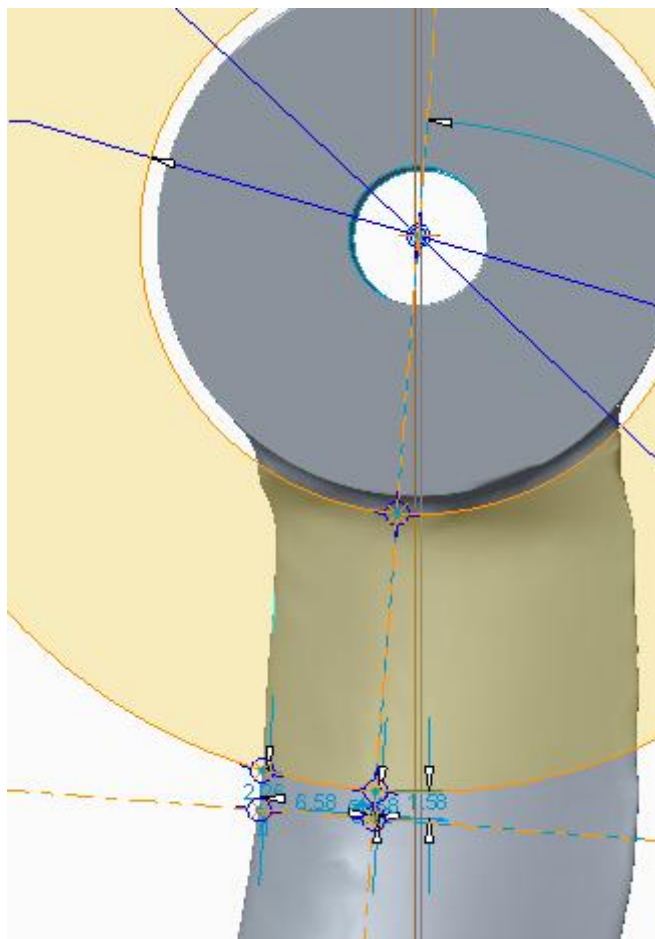


Σχήμα 7.24: Κοινή αξονική γραμμή μεταξύ των πτερυγώσεων με κυρτό και ευθύγραμμο άξονα.

Ο λόγος για τον οποίο έγινε ο προσδιορισμός της θέσης, αυτής της αξονικής γραμμής ήταν γιατί, όπως και στην πτερυγώση με ευθύγραμμο άξονα ήταν αδύνατο να προσδιορισθεί το οποίο σφάλμα όπου έφερε η βαθμονόμηση μιας και οι γεωμετρίες *Free Form Shape* δεν φέρουν ομοιόμορφες επιφάνειες.

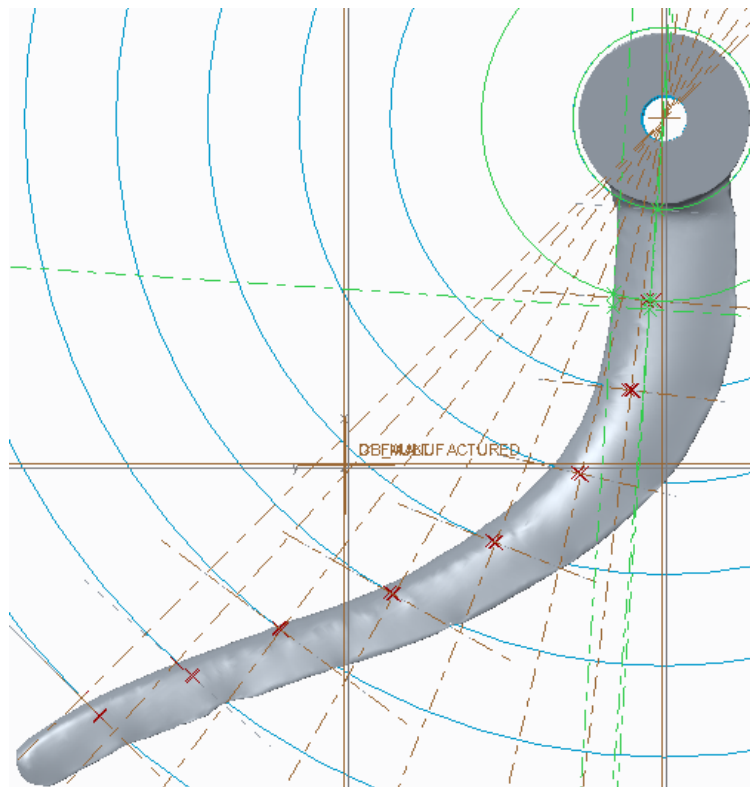
Τα βήματα όπου ακολουθήθηκαν για την εύρεση της θέσης της αξονικής γραμμής και του σημείου στον πρώτο (1^ο) και δεύτερο (2^ο) κύκλο, όπως ορίζει ο σχεδιασμός των αεροτομών στο “SolidWorks” σύμφωνα με το πρότυπο “NAKA 5410” ήταν όμοια όπως και στην περύγωση με ευθύγραμμο άξονα λαμβάνοντας υπόψη το 1/3 της απόστασης του σημείου όπου διέρχεται η αξονική, από το χείλος προσβολής καθώς και τον διορθωτικό έλεγχο όπου περιγράφηκε παραπάνω για τη θέση του σημείου.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό της θέσης του σημείου $M(X_i, Y_i, Z_i)$ έγινε διορθωτικός έλεγχος μεταξύ των δύο αποστάσεων του από το χείλος προσβολής και των δύο κύκλων. Αφού έγινε διόρθωση και σχεδιάστηκε ξανά η θέση του σημείου υπολογίστηκε η μέση τιμή των δύο αποστάσεων από την οποία διέρχονταν και τα δύο σημεία και των δύο παραπάνω κύκλων.



Σχήμα 7.25: Κοινός άξονας των δύο πρώτων αεροτομών.

Δεύτερο και τελικό στάδιο ήταν ο προσδιορισμός της θέσης των υπολοίπων σημείων της περύγωσης με κυρτό άξονα. Για αυτή την διαδικασία λήφθηκε υπόψη ο σχεδιασμός των περυγώσεων στο “SolidWorks”. Δηλαδή, από την αξονική γραμμή όπου υπολογίστηκε στο πρώτο στάδιο σχεδιάστηκαν επιμέρους αξονικές γραμμές της εκάστοτε αεροτομής υπό γωνία συγκεκριμένων μοιρών ως προς την βασική.



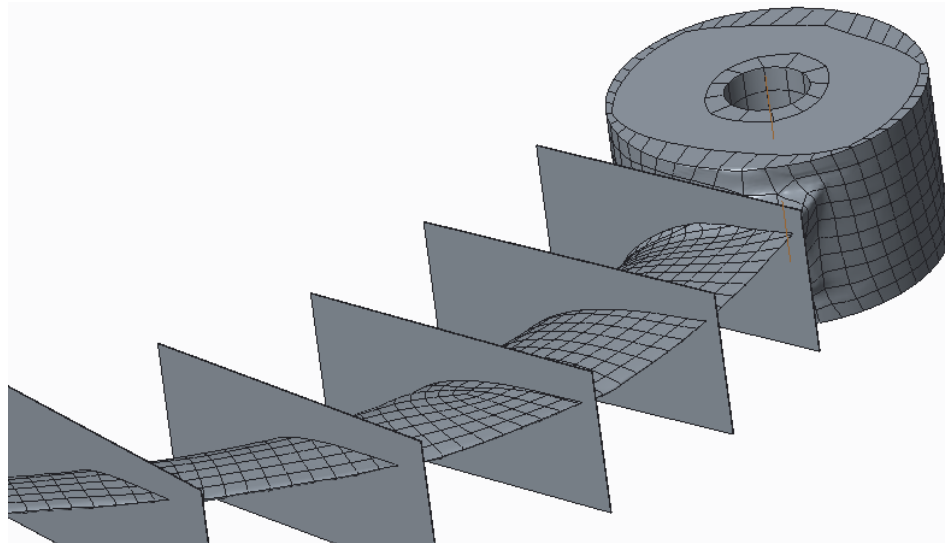
Σχήμα 7.26: Επιμέρους άξονες όλων των αεροτομών.

Έπειτα, για το σχεδιασμό και τη μέτρηση του μήκους της χορδής C [mm] του ύψους της αεροτομής H [mm] και της γωνίας σφήνωσης θ° , ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την πτερυγώση όπου έφερε ευθύγραμμο άξονα.

7.2.2. Επεξεργασία και Σχεδιασμός των Πτερυγώσεων Ύστερα Από την Προσθήκη Καμπτικού Φορτίου.

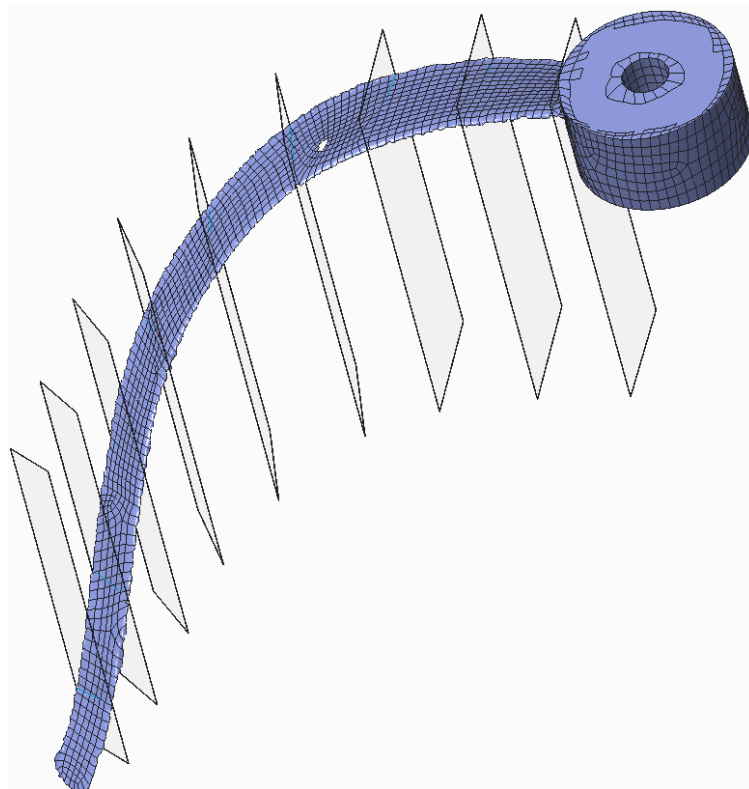
Ύστερα από την προσθήκη καμπτικού φορτίου κατά μήκος όλων των χορδών της εκάστοτε πτερυγώσης το σώμα αυτών παραμορφώθηκε φέροντας μια σχετική μετατόπιση κατά τον άξονα $Y'Y$, βάση της αντοχής των υλικών. Επιπρόσθετα, κατά μήκος του άξονα της εκάστοτε πτερυγώσης παρατηρήθηκε μια σχετική στροφή λόγω της ήδη προϋπάρχου γωνίας σφήνωσης στη κάθε αεροτομή.

Για την μελέτη της γεωμετρίας των δοκιμών ύστερα από την παρούσα πειραματική διαδικασία κρίθηκε αναγκαία η οριοθέτηση των χορδών μέσω νήματος πριν την έναρξη του πειράματος ώστε κατά την σάρωση να είναι δυνατή η αποτύπωση της θέσης αυτών και με αυτό τον τρόπο να απλοποιηθεί η διαδικασία του σχεδιασμού.



Σχήμα 7.27: Θέση των χορδών βάση του νήματος όπου χρησιμοποιήθηκε πριν την πειραματική διαδικασία.

Ο σχεδιασμός της χορδής και της αεροτομής των πτερυγώσεων υπό καμπτικό φορτίο στο “PTC Creo Parametric” έγινε βάση των προ-οριοθετημένων χορδών όπου αποτυπώθηκαν κατά την διαδικασία της σάρωσης. Με αυτό τον τρόπο ήταν ευκολότερος ο προσδιορισμός επιπέδων ανά χορδή για την χάραξη της και έπειτα για την μέτρηση της γωνίας σφήνωσης θ° .



Σχήμα 7.28: Θέση των χορδών και τομή των σχημάτων από τα επίπεδα σχεδιασμού.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο λογική σχεδιασμού όπου χρησιμοποιήθηκε και στο σχεδιασμό των αντίστοιχων μεγεθών στις πτερυγώσεις δίχως καμπτικό φορτίο. Κρίθηκε σημαντικό να τονιστεί ότι ανά προ – οριοθετημένη χορδή μέσω νημάτων σχεδιάσθηκαν επίπεδα αναφοράς τα οποία ήταν κάθετα στο βασικό επίπεδο σχεδιασμού όπου ορίσθηκε στην αρχή μέσω της εντολής “*Offset*”.

Με αυτό τον τρόπο δεν επηρεάσθηκε η θέση και η κλίση της χορδής γιατί τα δύο σημεία από το χείλος προσβολής και το χείλος εκφυγής παραμένουν αναλλοίωτα, παρά μόνο το ύψος, όπου για την παρούσα εργασία δεν ήταν στόχος προς μελέτη, όταν στην πτερύγωση εφαρμόζεται καμπτικό φορτίο.

8. Πειραματικές Μετρήσεις και Αποτελέσματα

8.1. Πειραματικές Μετρήσεις Δίχως τη Χρήση Καμπτικού φορτίου.

8.1.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερύγωσης με Ίσιο Άξονα.

8.1.1.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερύγωσης Κατασκευασμένη σε CNC φρέζα.

Ύστερα από τη πρώτη πειραματική διαδικασία κατά την οποία τέσσερις πτερυγώσεις σαρώθηκαν δίχως να εφαρμοστεί καμπτικό φορτίο κατά μήκος της εκάστοτε αεροτομής, παρήχθησαν νέφη σημείων τα οποία επεξεργάστηκαν και στην τελική τους μορφή αποτελούσαν 3D στερεή και επιφανειακή γεωμετρία πτερυγώσεων. Στόχος ήταν να μετρηθούν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων τέτοια όπως το μήκος της χορδής, το ύψος της αεροτομής και η γωνία σφήνωσης της χορδής ως προς τη πλήμνη.

Αεροτομή	$C_{(final)}$ [mm]	$a_{(final)}$ [°]	$H_{(final)}$ [mm]
1	-	-	-
2	22.915	20.53	4.2458
3	21.5784	14.2	3.7373
4	19.0715	10.72857	3.074
5	16.5726	7.81869	2.64909
6	14.6232	5.01692	2.21789
7	12.8695	4.641277	2.02934
8	11.323	4.645497	1.56375
9	10.1694	5.1627	1.41601
10	-	-	-

Πίνακας 8.1: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων πτερύγωσης με ίσιο άξονα, κατασκευασμένη σε CNC φρέζα και ύστερα από την σάρωση με κάμερα αντίστροφης μηχανικής.

Αντίστοιχα οι μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας δίδονται στο παρακάτω πίνακα.

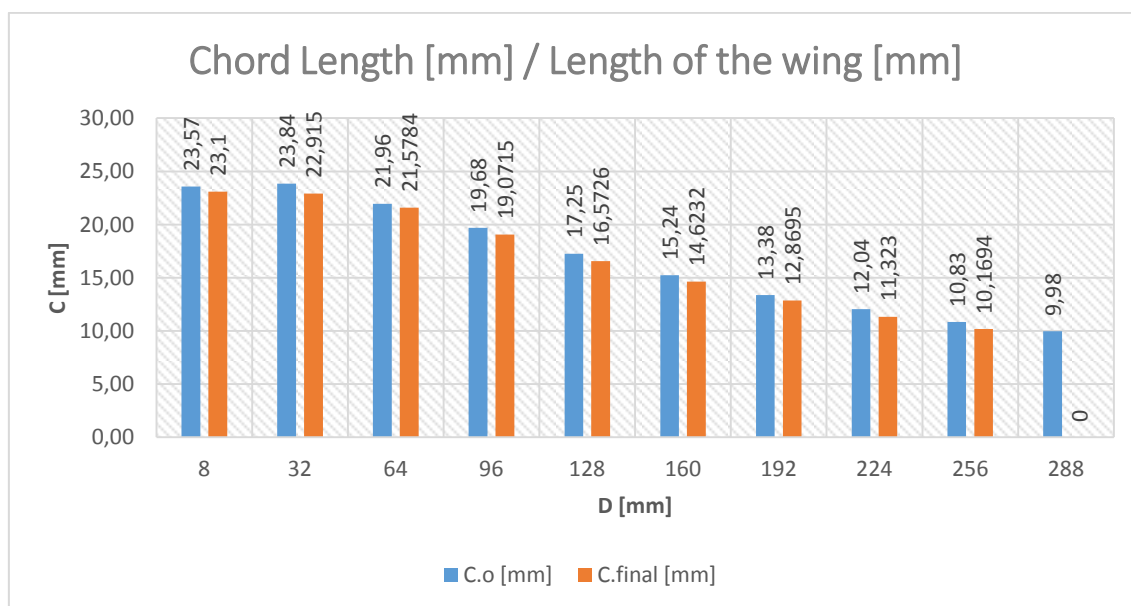
Αεροτομή	C_o [mm]	a_o [°]	$H_{(o)}$ [mm]
1	23.57		4.66
2	23.84	21.2	4.28
3	21.96	14.1	3.83
4	19.68	11	3.20
5	17.25	8.2	2.66
6	15.24	6.4	2.25
7	13.38	5.4	1.82
8	12.04	4	1.57
9	10.83	3.3	1.34
10	9.98	2.7	1.13

Πίνακας 8.2: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων πτερύγωσης με ίσιο άξονα, κατασκευασμένη σε CNC φρέζα και ύστερα από την μέτρηση στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.

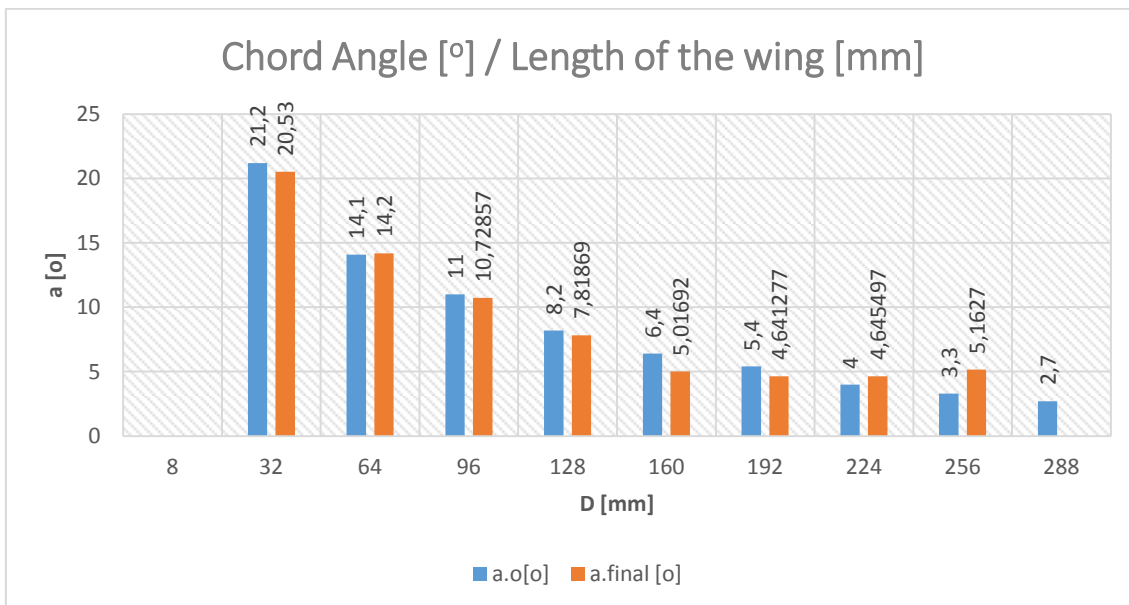
Υπολογίζοντας την μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των μετρήσεων από το εργαστήριο αιολικής ενέργειας και αυτών ύστερα από τη σάρωση με κάμερα αντίστροφη μηχανικής για την ίδια πτερύγωση, στο παρακάτω πίνακα δίδεται η ανάλογη ποσοστιαία τιμή. Οι αντίστοιχες τιμές αναπαρίστανται γραφικώς για το μήκος της χορδής ως προς την ανάλογη θέση τους, τη γωνία σφίνωσης αυτών ως προς την πλήμνη καθώς και το ύψος της κάθε αεροτομής.

Αεροτομή	$\Delta C_{(o,final)}$ %	Δa_o %	$\Delta H_{(o,final)}$ %
1	-	-	-
2	3.880033557	3.160377358	0.799065421
3	1.737704918	-0.709219858	2.420365535
4	3.091971545	2.467545455	3.9375
5	3.926956522	4.650121951	0.410150376
6	4.047244094	21.610625	1.427111111
7	3.815396114	14.05042593	-11.5021978
8	5.955149502	-16.137425	0.398089172
9	6.099722992	-56.44545455	-5.67238806
10	-	-	-

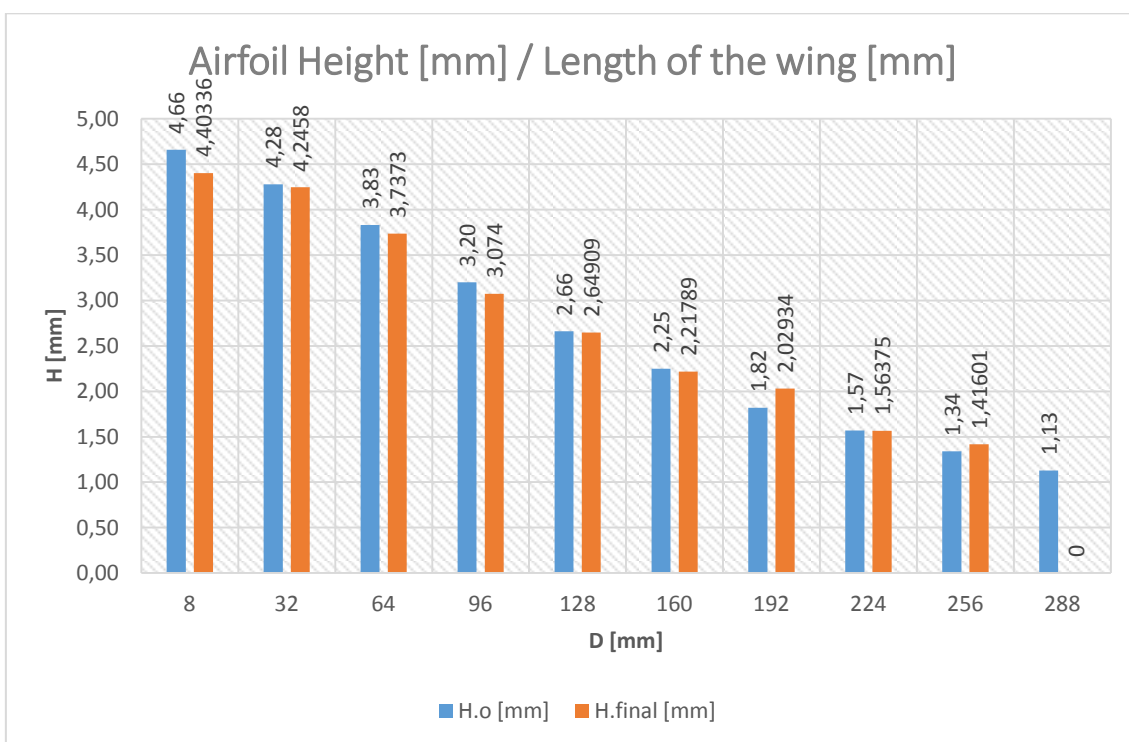
Πίνακας 8.3: Απόκλιση μετρήσεων ύστερα από σάρωση σε σύγκριση με τις μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.



Γράφημα 8.1: Γραφική παράσταση μήκους χορδής C [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερύγωσης. ($C.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερύγωσης όπου σχεδιάσθηκε στο λογισμικό "Solidworks" και $C.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.2: Γραφική παράσταση γωνίας σφήνωσης a [°] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. (a.o ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και a.final οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.3: Γραφική παράσταση ύψους αεροτομής H [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. (H.o ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και H.final οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)

8.1.1.2. Πειραματικές Μετρήσεις 3D Εκτυπωμένης Πτερύγωσης.

Ύστερα από τη πρώτη πειραματική διαδικασία κατά την οποία τέσσερις πτερυγώσεις σαρώθηκαν δίχως να εφαρμοστεί καμπτικό φορτίο κατά μήκος της εκάστοτε αεροτομής, παρήχθησαν νέφη σημείων τα οποία επεξεργάστηκαν και στην τελική τους μορφή αποτελούσαν 3D στερεή και επιφανειακή γεωμετρία πτερυγώσεων. Στόχος ήταν να μετρηθούν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων τέτοια όπως το μήκος της χορδής, το ύψος της αεροτομής και η γωνία σφήνωσης της χορδής ως προς τη πλήμνη.

Αεροτομή	$C_{(final)}$ [mm]	$a_{(final)}$ [°]	$H_{(final)}$ [mm]
1	-	-	-
2	22.8998	22.8998	4.10503
3	21.2111	15.4553	3.59003
4	18.5543	11.7932	3.02113
5	15.7017	9.5952	2.41485
6	13.4723	7.3215	2.03149
7	11.7055	6.24067	1.78012
8	10.4132	5.14762	1.59637
9	9.88631	5.36239	1.3743
10	-	-	-

Πίνακας 8.4: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων 3D εκτυπωμένης πτερύγωσης με ίσιο άξονα και ύστερα από την σάρωση με κάμερα αντίστροφης μηχανικής.

Αντίστοιχα οι μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας δίδονται στο παρακάτω πίνακα.

Αεροτομή	C_o [mm]	a_o [°]	$H_{(o)}$ [mm]
1	22.85		4.33
2	23.15	22.5	4.26
3	21.56	16.6	3.91
4	19.14	13.5	3.29
5	16.41	9.9	2.77
6	14.33	8.2	2.24

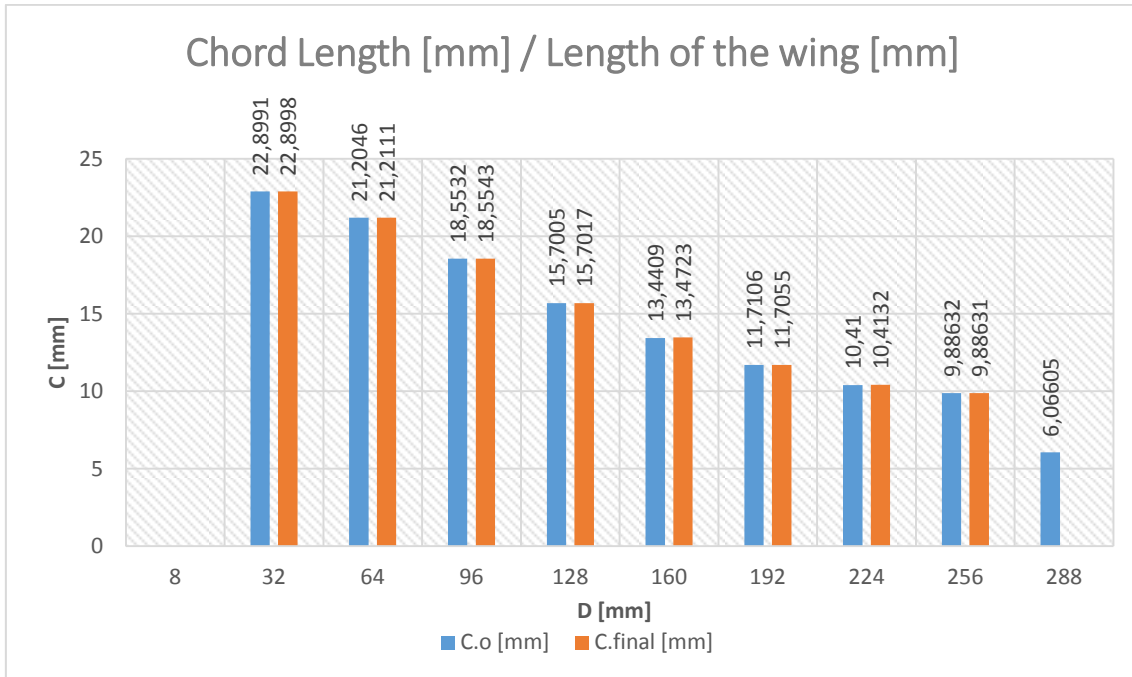
7	12.93	6.5	2.01
8	11.46	4.6	1.77
9	9.91	3.3	1.46
10	8.91	2.9	1.37

Πίνακας 8.5: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων 3D εκτυπωμένης περυγώσης με ίσιο άξονα και ύστερα από την μέτρηση στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.

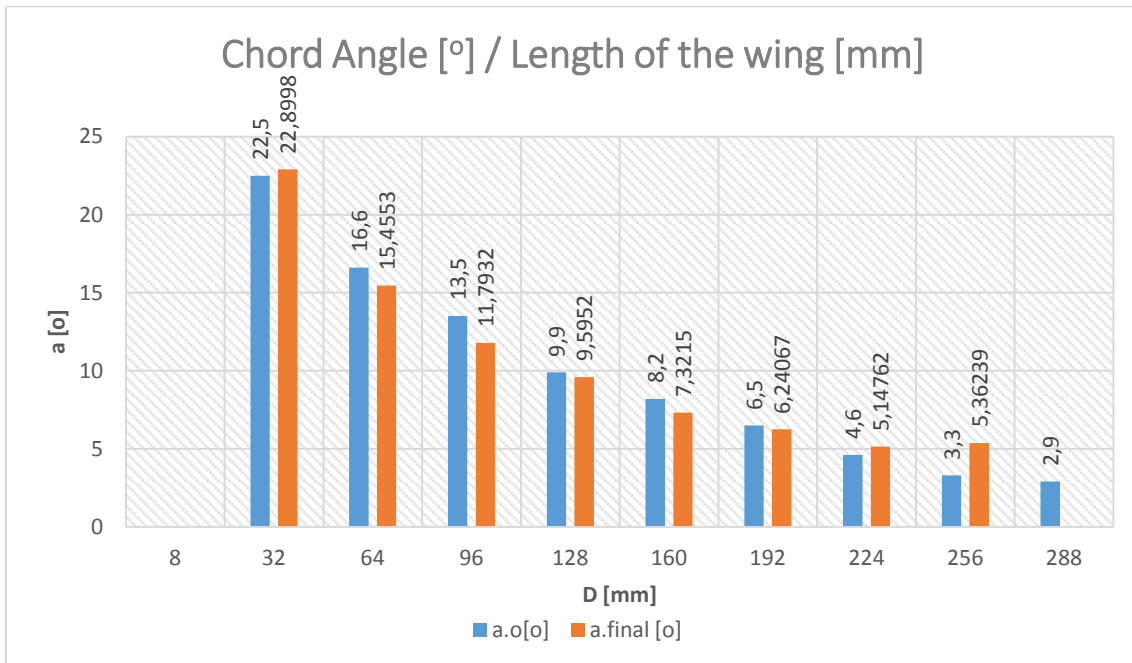
Υπολογίζοντας την μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των μετρήσεων από το εργαστήριο αιολικής ενέργειας και αυτών ύστερα από τη σάρωση με κάμερα αντίστροφη μηχανικής για την ίδια περυγώση, στο παρακάτω πίνακα δίδεται η ανάλογη ποσοστιαία τιμή. Οι αντίστοιχες τιμές αναπαρίστανται γραφικώς για το μήκος της χορδής ως προς την ανάλογη θέση τους, τη γωνία σφήνωσης αυτών ως προς την πλήμνη καθώς και το ύψος της κάθε αεροτομής.

Αεροτομή	$\Delta C_{(o,final)} \%$	$\Delta a_o \%$	$\Delta H_{(o,final)} \%$
1	-	-	-
2	1.080777538	-1.776888889	3.637793427
3	1.618274583	6.895783133	8.183375959
4	3.060083595	12.64296296	8.172340426
5	4.316270567	3.078787879	12.82129964
6	5.985345429	10.71341463	9.308482143
7	9.470224285	3.989692308	11.43681592
8	9.134380454	-11.90478261	9.80960452
9	0.239051463	-62.49666667	5.869863014
10	-	-	-

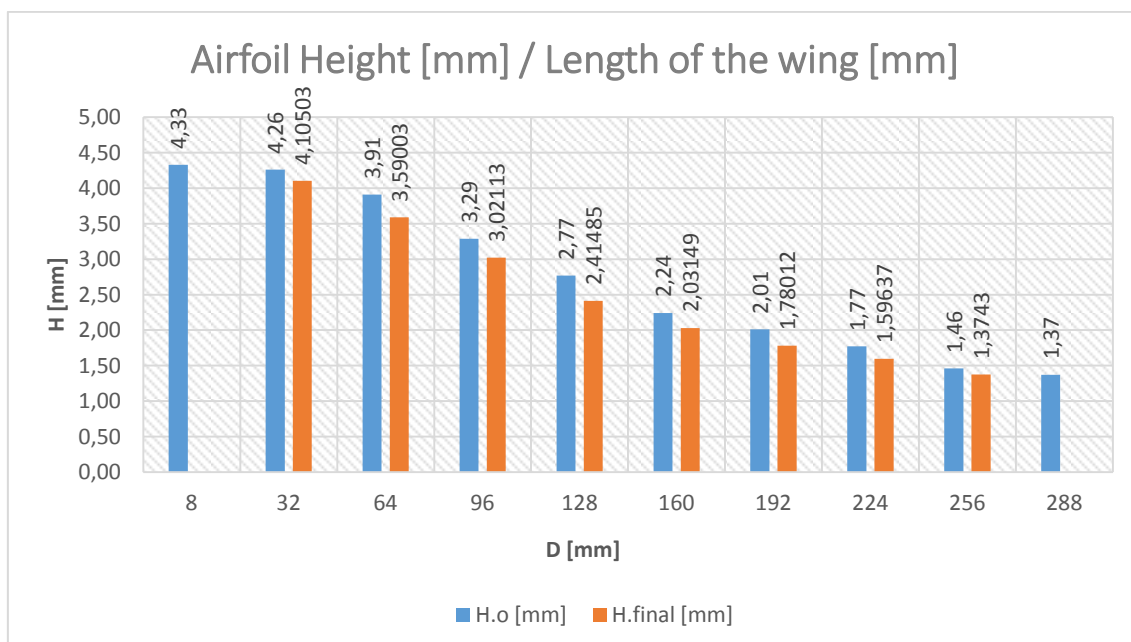
Πίνακας 8.6: Απόκλιση μετρήσεων ύστερα από σάρωση σε σύγκριση με τις μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.



Γράφημα 8.4: Γραφική παράσταση μήκους χορδής C [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. (Η.ο ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και H.final οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.4: Γραφική παράσταση γωνίας σφήνωσης a [°] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. (a.o ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και a.final οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.5: Γραφική παράσταση ύψους αεροτομής H [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. ($H.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και $H.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)

8.1.2. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης με Κυρτό Άξονα Κατασκευασμένη.

8.1.2.1. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσης Κατασκευασμένη σε CNC φρέζα.

Ύστερα από τη πρώτη πειραματική διαδικασία κατά την οποία τέσσερις πτερυγώσεις σαρώθηκαν δίχως να εφαρμοστεί καμπτικό φορτίο κατά μήκος της εκάστοτε αεροτομής, παρήχθησαν νέφη σημείων τα οποία επεξεργάστηκαν και στην τελική τους μορφή αποτελούσαν 3D στερεή και επιφανειακή γεωμετρία πτερυγώσεων. Στόχος ήταν να μετρηθούν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων τέτοια όπως το μήκος της χορδής, το ύψος της αεροτομής και η γωνία σφήνωσης της χορδής ως προς τη πλήμνη.

Αεροτομή	$C_{(final)}$ [mm]	$a_{(final)}$ [°]	$H_{(final)}$ [mm]
1	-	-	-
2	22.944	19.6319	3.52803
3	21.6735	15.4792	3.10813
4	19.2056	13.9494	2.63382
5	17.0452	16.0998	2.04086
6	14.5921	17.6516	1.59854
7	13.1039	18.8267	0.807049

8	11.3348	17.0785	1.01938
9	10.5475	13.0889	0.904356
10	-	-	-

Πίνακας 8.7: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων κατασκευασμένης περυγώσης με κυρτό άξονα και ύστερα από την σάρωση με κάμερα αντίστροφης μηχανικής.

Αντίστοιχα οι μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας δίδονται στο παρακάτω πίνακα.

Αεροτομή	C_o [mm]	a_o [°]	$H_{(o)}$ [mm]
1	23.57	27.8	4.29
2	24.36	21.9	4.07
3	23.33	16.8	3.86
4	21.32	14.5	3.24
5	18.35	15.6	2.98
6	15.79	17.7	2.27
7	14.68	19.4	2.14
8	13.35	18.5	1.81
9	12.13	15.5	1.71
10	9.84	14.2	1.85

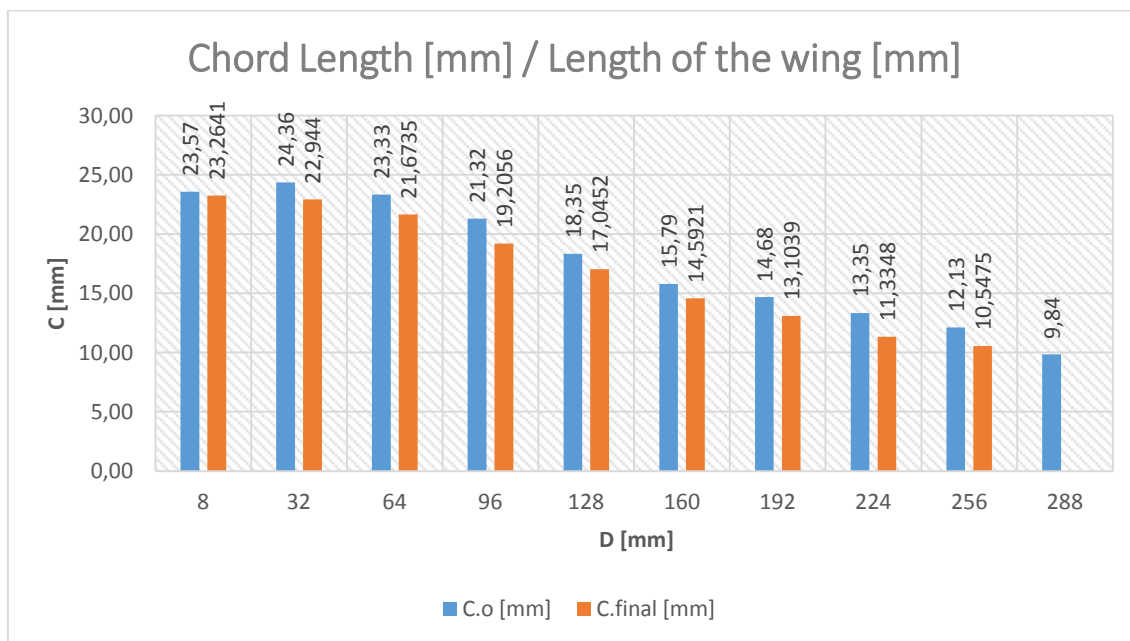
Πίνακας 8.8: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων περυγώσης με κυρτό άξονα, κατασκευασμένη σε CNC φρέζα και ύστερα από την μέτρηση στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.

Υπολογίζοντας την μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των μετρήσεων από το εργαστήριο αιολικής ενέργειας και αυτών ύστερα από τη σάρωση με κάμερα αντίστροφη μηχανικής για την ίδια περυγώση, στο παρακάτω πίνακα δίδεται η ανάλογη ποσοστιαία τιμή. Οι αντίστοιχες τιμές αναπαρίστανται γραφικώς για το μήκος της χορδής ως προς την ανάλογη θέση τους, τη γωνία σφήνωσης αυτών ως προς την πλήμνη καθώς και το ύψος της κάθε αεροτομής.

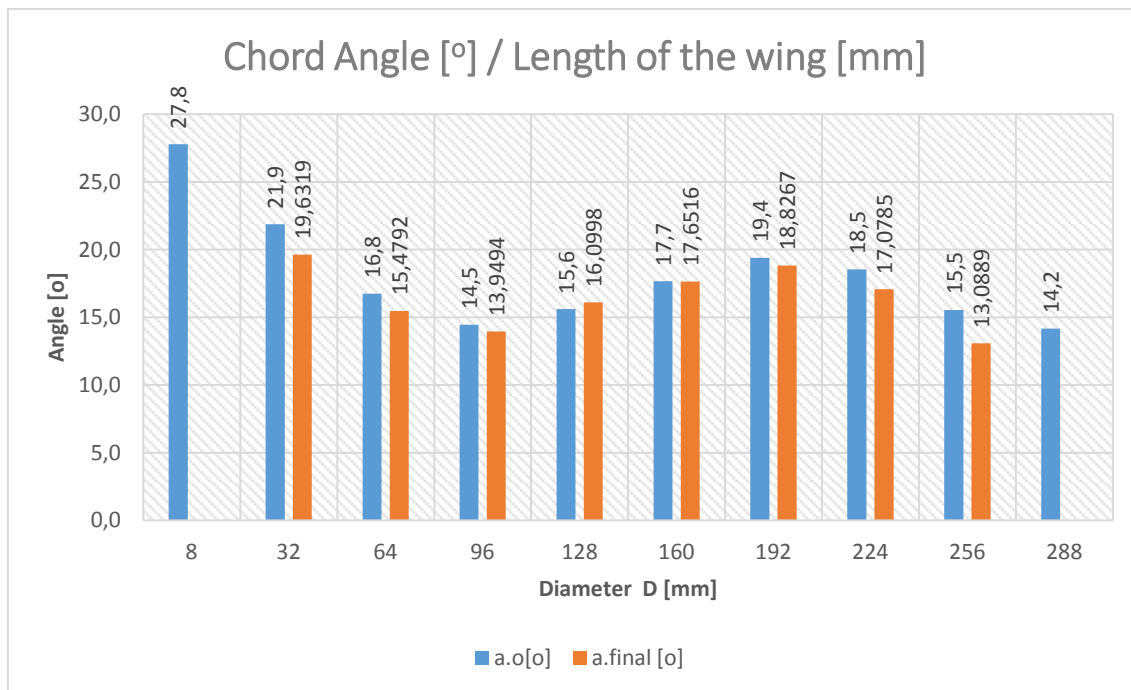
Αεροτομή	$\Delta C_{(o,final)}$ %	Δa_o %	$\Delta H_{(o,final)}$ %
1	-	-	-
2	5.812807882	10.22563211	13.31621622

3	7.100300043	7.631160496	19.47849741
4	9.917448405	3.555425037	18.70925926
5	7.110626703	-3.194263448	31.5147651
6	7.586447118	0.094027891	29.57973568
7	10.73637602	2.909549204	62.28742991
8	15.09513109	7.861058914	43.68066298
9	13.04616653	15.72627494	47.11368421
10	-	-	-

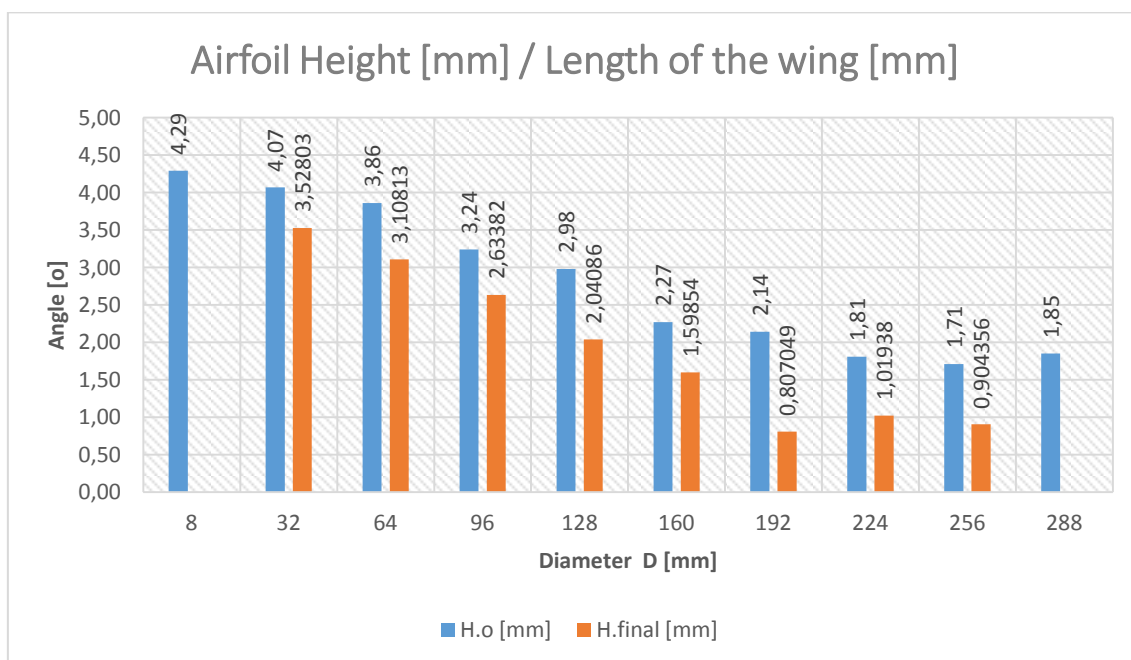
Πίνακας 8.9: Απόκλιση μετρήσεων ύστερα από σάρωση σε σύγκριση με τις μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αεροδυναμικής ενέργειας.



Γράφημα 8.7: Γραφική παράσταση μήκους χορδής C [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. ($C.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό "Solidworks" και $C.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.8: Γραφική παράσταση γωνίας σφήνωσης a [°] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. ($a.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και $a.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.9: Γραφική παράσταση ύψους αεροτομής H [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. ($H.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και $H.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)

8.1.2.2. Πειραματικές Μετρήσεις 3D Εκτυπωμένης Πτερύγωσης.

Ύστερα από τη πρώτη πειραματική διαδικασία κατά την οποία τέσσερις πτερυγώσεις σαρώθηκαν δίχως να εφαρμοστεί καμπτικό φορτίο κατά μήκος της εκάστοτε αεροτομής, παρήχθησαν νέφη σημείων τα οποία επεξεργάστηκαν και στην τελική τους μορφή αποτελούσαν 3D στερεή και επιφανειακή γεωμετρία πτερυγώσεων. Στόχος ήταν να μετρηθούν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού των πτερυγώσεων τέτοια όπως το μήκος της χορδής, το ύψος της αεροτομής και η γωνία σφήνωσης της χορδής ως προς τη πλήμνη.

Αεροτομή	$C_{(final)}$ [mm]	$a_{(final)}$ [°]	$H_{(final)}$ [mm]
1	-	-	-
2	22.7938	16.8787	4.15424
3	21.2053	13.4977	3.88492
4	18.9679	14.18	3.31225
5	16.8514	15.1146	2.63162
6	14.7495	15.0431	2.05351
7	12.7056	16.272	1.67218
8	11.0259	16.3788	1.38289
9	9.75769	16.5693	1.20691
10	-	-	-

Πίνακας 8.10: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων 3D εκτυπωμένης πτερύγωσης με κυρτό άξονα και ύστερα από την σάρωση με κάμερα αντίστροφης μηχανικής.

Αντίστοιχα οι μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας δίδονται στο παρακάτω πίνακα.

Αεροτομή	$C_{(final)}$ [mm]	$a_{(final)}$ [°]	$H_{(final)}$ [mm]
1	-	-	-
2	22.7938	16.8787	4.15424
3	21.2053	13.4977	3.88492
4	18.9679	14.18	3.31225
5	16.8514	15.1146	2.63162
6	14.7495	15.0431	2.05351

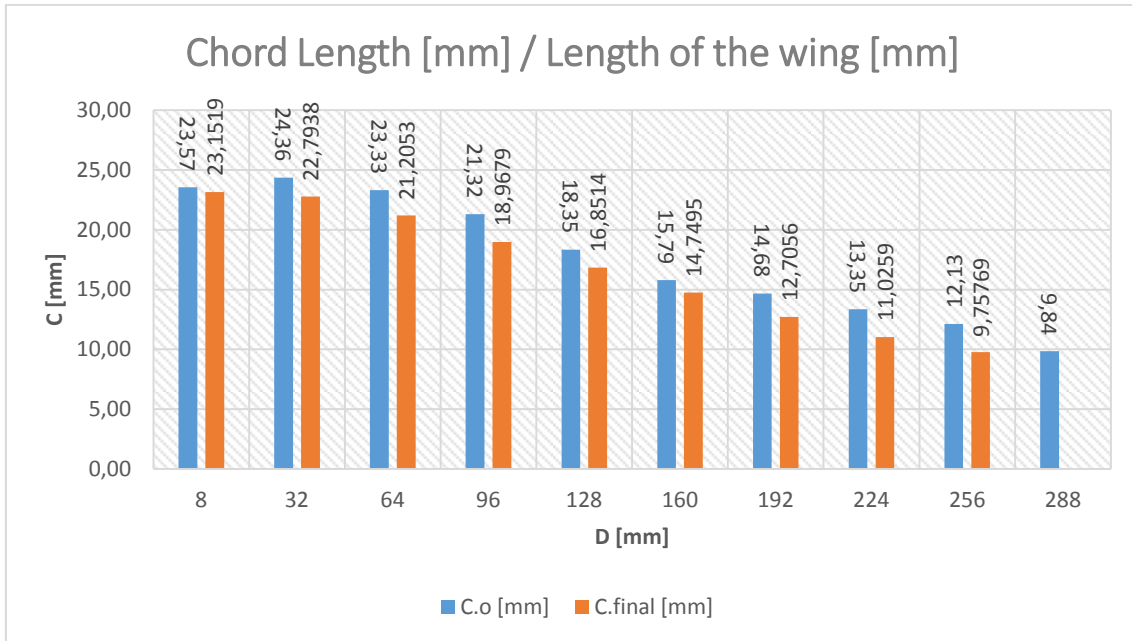
7	12.7056	16.272	1.67218
8	11.0259	16.3788	1.38289
9	9.75769	16.5693	1.20691
10	-	-	-

Πίνακας 8.11: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων 3D εκτυπωμένης περυγώσης με κυρτό άξονα, και ύστερα από την μέτρηση στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.

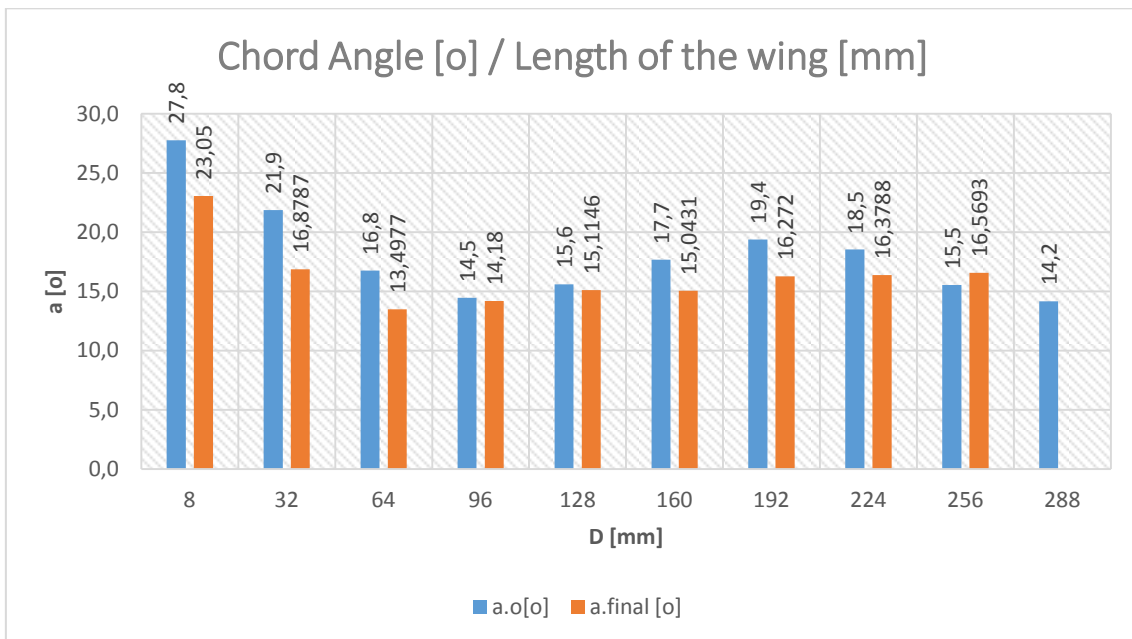
Υπολογίζοντας την μέση τιμή της απόκλισης μεταξύ των μετρήσεων από το εργαστήριο αιολικής ενέργειας και αυτών ύστερα από τη σάρωση με κάμερα αντίστροφη μηχανικής για την ίδια περυγώση, στο παρακάτω πίνακα δίδεται η ανάλογη ποσοστιαία τιμή. Οι αντίστοιχες τιμές αναπαρίστανται γραφικώς για το μήκος της χορδής ως προς την ανάλογη θέση τους, τη γωνία σφήνωσης αυτών ως προς την πλήμνη καθώς και το ύψος της κάθε αεροτομής.

Αεροτομή	$\Delta C_{(o,final)} \%$	$\Delta a_o \%$	$\Delta H_{(o,final)} \%$
1	-	-	-
2	6.429392447	22.81569164	-2.06977887
3	9.107158165	19.45534104	-0.645595855
4	11.03236398	1.961082701	-2.229938272
5	8.166757493	3.12053477	11.69060403
6	6.58961368	14.85782994	9.537004405
7	13.44959128	16.08429436	21.86074766
8	17.40898876	11.63595818	23.59723757
9	19.5573784	-6.682504459	29.42046784
10	-	-	-

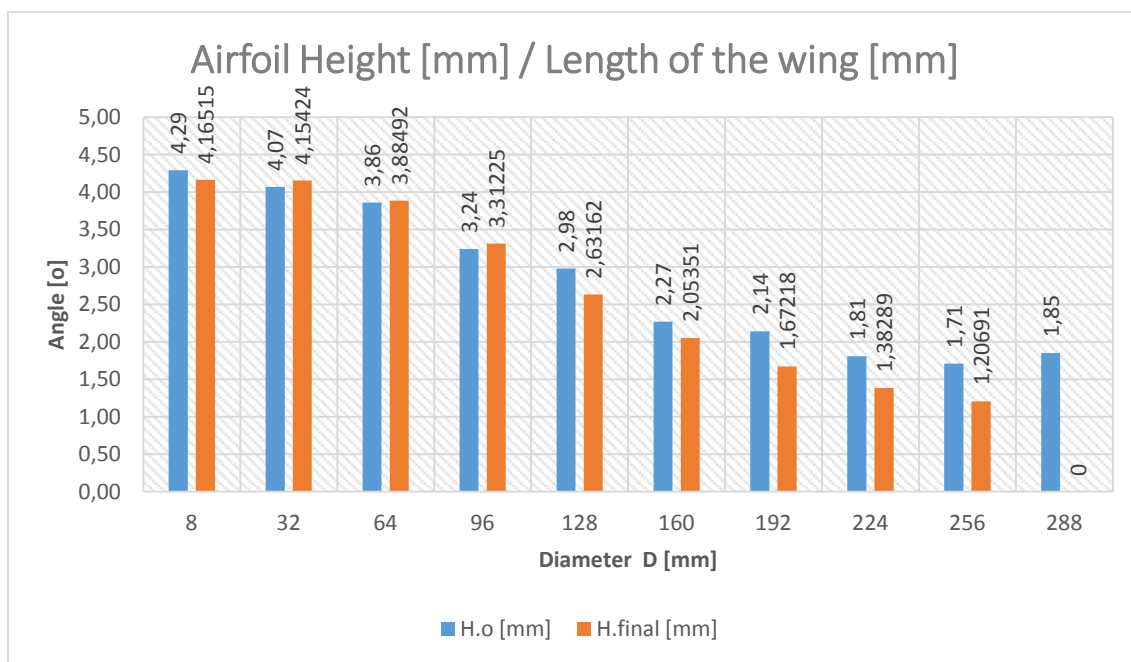
Πίνακας 8.12: Απόκλιση μετρήσεων ύστερα από σάρωση σε σύγκριση με τις μετρήσεις όπου έγιναν στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας.



Γράφημα 8.10: Γραφική παράσταση μήκους χορδής C [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερύγωσης. ($C.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερύγωσης όπου σχεδιάσθηκε στο λογισμικό "Solidworks" και $C.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.11: Γραφική παράσταση γωνίας σφήνωσης a [o] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερύγωσης. ($a.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερύγωσης όπου σχεδιάσθηκε στο λογισμικό "Solidworks" και $a.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)



Γράφημα 8.12: Γραφική παράσταση ύψους αεροτομής H [mm] ως προς την ανάλογη θέση της D [mm] κατά μήκος της πτερυγώσης. ($H.o$ ορίζεται ως οι τιμές της πτερυγώσης όπου σχεδιάστηκε στο λογισμικό “Solidworks” και $H.final$ οι αντίστοιχες τιμές από τα 3D μοντέλα που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση.)

8.1.3. Πειραματικές Μετρήσεις Πτερυγώσεων με Προσθήκη Καμπτικού Φορτίου.

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία σαρώθηκαν οι ίδιες πτερυγώσεις προσθέτοντας κατά μήκος κάθε αεροτομής και σε κάθε πτερυγώση ορισμένο καμπτικό φορτίο. Με το πέρας των σαρώσεων ελήφθησαν μετρήσεις μόνο για την γωνία σφήνωσης της εκάστοτε αεροτομής ως προς την πλήμνη της πτερυγώσης. Οι πειραματικές μετρήσεις, δίδονται στον παρακάτω πίνακα:

Αεροτομή	3D Printed Straight Blade	3D Printed Curved Blade	CNC (Manufactured) Straight Blade	CNC (Manufactured) Curved Blade
	a_o [°]	a_o [°]	a_o [°]	a_o [°]
1	25.2264	24.4852	22.8907	25.4703
2	19.8754	16.6303	16.0378	18.417
3	13.2374	9.58836	10.2586	11.3158
4	9.70538	8.54194	9.08041	8.59498
5	5.16597	3.22029	4.94499	3.63661
6	2.76274	0.632728	2.57145	9.8267

7	8.0173	1.96001	4.49458	4.39441
8	2.90247	4.47131	5.40542	7.48079
9	2.0399	6.71626	7.53727	3.48181
10	4.20488	-	2.82732	3.89246

Πίνακας 8.13: Πειραματικές μετρήσεις των γωνιών σφήνωσης της εκάστοτε χορδής στη πλήμνη της εκάστοτε πτερυγώσης.

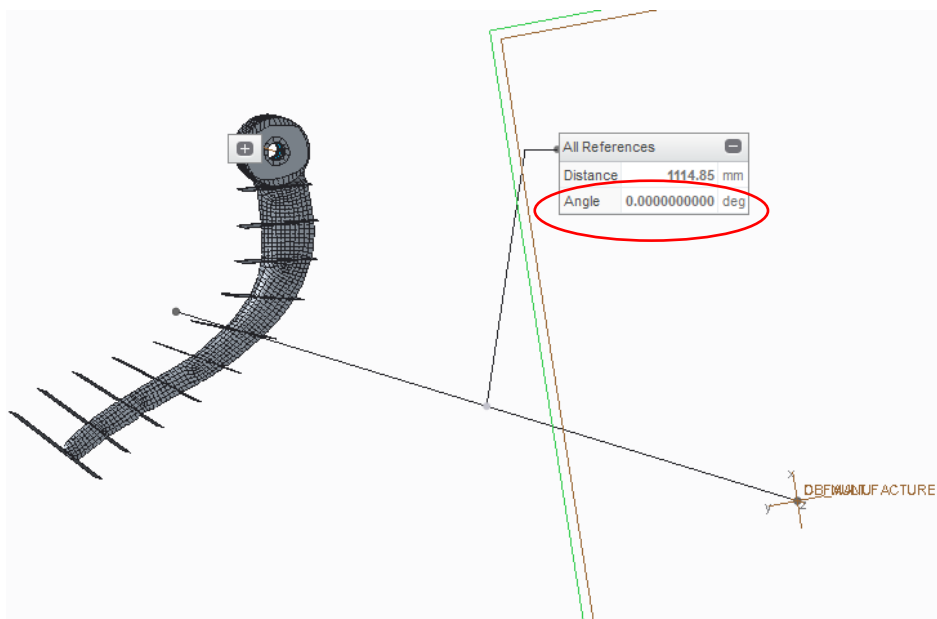
9. Παράρτημα

9.1. Βελτιστοποίηση του Χώρου Κατά την Σάρωση με Επιπρόσθετο Φορτίο

Για την μελέτη των πτερυγώσεων υπό καμπτικό φορτίο ήταν απαραίτητο να προστεθούν βαρίδια κατά μήκος των χορδών της εκάστοτε πτερυγώσης και ύστερα να σαρωθούν και να μελετηθεί η γεωμετρία τους βάσει της κάμψης όπου έχουν υποστεί. Σε αυτή την περίπτωση θα προέκυπταν σφάλματα τα οποία θα οποία μπορούσαν απαλειφθούν ύστερα από την αναπροσαρμογή του χώρου και με την βοήθεια ανάλογης κατασκευής όπου θα καθιστούσε δυνατή μια οποιαδήποτε σάρωση.

Συγκεκριμένα, υπό τις υπάρχουσες συνθήκες και όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο ήταν αδύνατη η αποτύπωση της γεωμετρίας των πτερυγώσεων όταν το χείλος προσβολής ή και το χείλος εκφυγής παρουσίαζαν παραλληλία ως προς το φακό της κάμερας, άσχετα από το σχετικό ύψος ως προς τον άξονα ($Z'Z$). Επομένως, όπως και στην αρχική πειραματική διαδικασία ήταν απαραίτητο τα «σώματα» των πτερυγώσεων να τοποθετηθούν κάθετα στο φακό της κάμερας, εξασφαλίζοντας την ανάλογη παραλληλία – συγραμμικότητα των αντίστοιχων καρτεσιανών αξόνων.

Δηλαδή, λαμβάνοντας υπόψη τα νοητά καρτεσιανά επίπεδα XY, YZ, ZX του ίδιου του δοκιμίου ήταν απαραίτητη η ακριβής αλλά ανεξάρτητα από το είδος, ταύτιση των εν λόγω επιπέδων με τα αντίστοιχα της κάμερας και κατ' επέκταση του χώρου (WCS) του προγράμματος επεξεργασίας. Σημείο αναφοράς όπου τέθηκε για την μελέτη όλων των μεγεθών στη παρούσα πτυχιακή εργασία ήταν η πλήμνη της πτερυγώσης, επομένως επιπρόσθετη παραλληλία εντός των παραπάνω επιπέδων έπρεπε να φέρει και μια από τις δύο επιφάνειες της πλήμνης. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατή ο ακριβής προσδιορισμός των σφαλμάτων που οφείλονται στην εκτύπωση, την σάρωση και κατά κύριο λόγο τον προσδιορισμό της κλίσης όπου φέρει η πτερυγώση λόγω του επιπρόσθετου καμπτικού φορτίου.



Σχήμα 9.1: Παραλληλία επιπέδων και μίας τουλάχιστον επιφάνειας της πλήμνης.

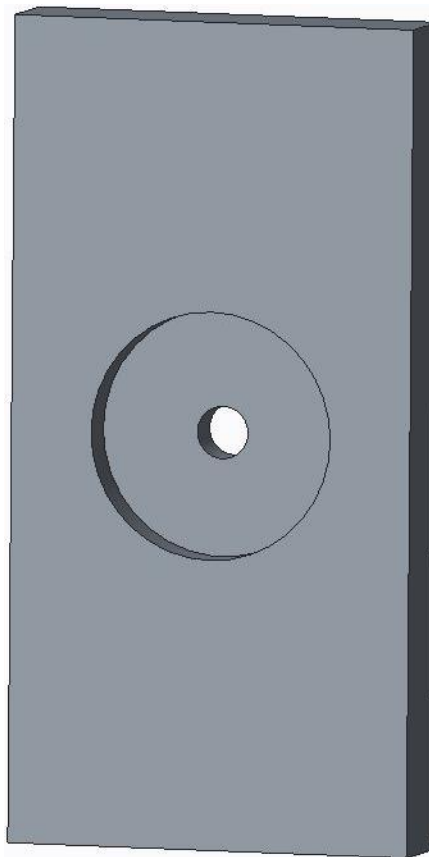
Για τον λόγο αυτό μελετήθηκαν και προτάθηκαν δύο βάσεις για την σάρωση του αντικειμένου υπό καμπτικό φορτίο. Και οι δύο βάσεις μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν βάση της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser όπου βρισκόταν εντός του χώρου του εργαστηρίου μηχανολογίας, ακριβείας αντίστροφης μηχανικής και ρομποτικής.



Σχήμα 9.2: Ρομποτική τράπεζα κοπής με Laser.

Η λογική με την οποία μελετήθηκαν και σχεδιάστηκαν βασίζεται στην δυνατότητα μεταφοράς του τρίτου άξονα της ρομποτικής τράπεζας, όπου επάνω σε αυτήν θα διαμορφωνόταν και θα τοποθετούταν η κάμερα ώστε να είναι δυνατή η σάρωση και των δύο «σωμάτων» της κάθε πτερυγώσης υπό καμπτικό φορτίο. Συγκεκριμένα, η κάμερα φέρει δύο κυλινδρικές διαμορφώσεις στα άκρα της με σπείρωμα στο κέντρο αυτών για την τοποθέτηση της σε ειδικό τρίποδο ώστε να είναι δυνατή η σάρωση οποιασδήποτε γεωμετρίας υπό κλίση.

Στην παρούσα διάταξη θα εξασφαλιζόταν η ακινησία της κάμερας κατά την διαδικασία της σάρωσης επάνω σε λάμα ορθογωνικής διατομής όπου θα έφερε την αντίστοιχη κυλινδρική διαμόρφωση καθώς και οπή για την πρόσδεση της κάμερας εντός αυτής. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατή η περιστροφή και πρόσδεση της στην ανάλογη επιθυμητή θέση ώστε να είναι δυνατή η σάρωση και των δύο σωμάτων των πτερυγώσεων.



Σχήμα 9.3: Κυλινδρική διαμόρφωση για την πρόσδεση της κάμερας επάνω στην λάμα ορθογωνικής διατομής.

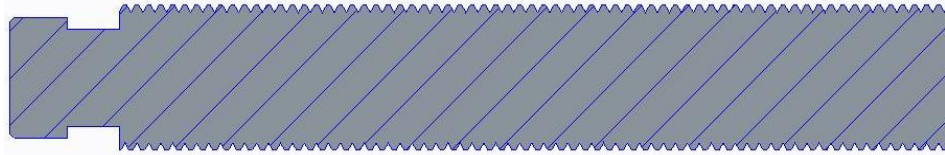
9.1.1. Πρώτη Βάση Τοποθέτησης της Πτερύγωσης

Η παρούσα διάταξη μελετήθηκε και σχεδιάστηκε με στόχο το εκάστοτε σώμα των πτερυγώσεων να βρίσκεται κάθετα στο φακό, να είναι μεταβαλλόμενο το ύψος της για την προσαρμογή της πληροφορίας εντός του πλαισίου λήψης σύμφωνα και με τον φακό όπου έχει επιλεγεί καθώς και όσο το δυνατόν να μην υπάρχουν περιττές πληροφορίες – γεωμετρίες εντός του πλαισίου λήψης κατά την διαδικασία της σάρωσης.

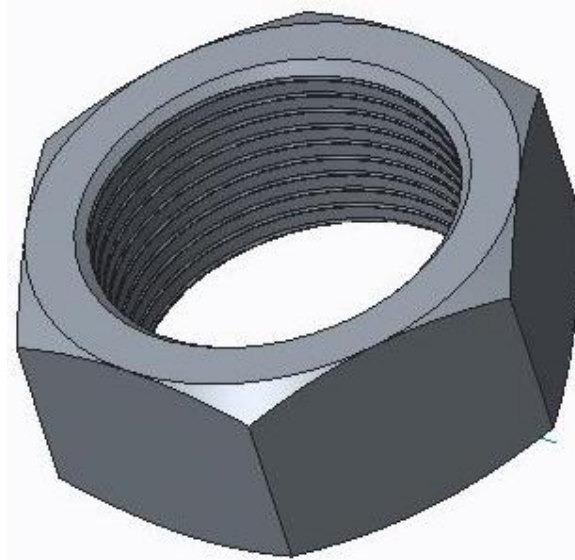
Η παρούσα βάση αποτελείται από δέκα τέσσερα (14) μέρη όπου το κάθε ένα σχεδιάστηκε βάση των πραγματικών διαστάσεων της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser. Η μεταβολή του ύψους της εκάστοτε πτερύγωσης εξασφαλίστηκε μέσω της περιστροφής του ατέρμονα κοχλίας και με στόχο την όσο το δυνατόν ελάττωση των βαθμών ελευθερίας όλης της συναρμογής. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι διαστάσεις των αντικειμένων όπου σχεδιάστηκαν για τη βάση αυτή.



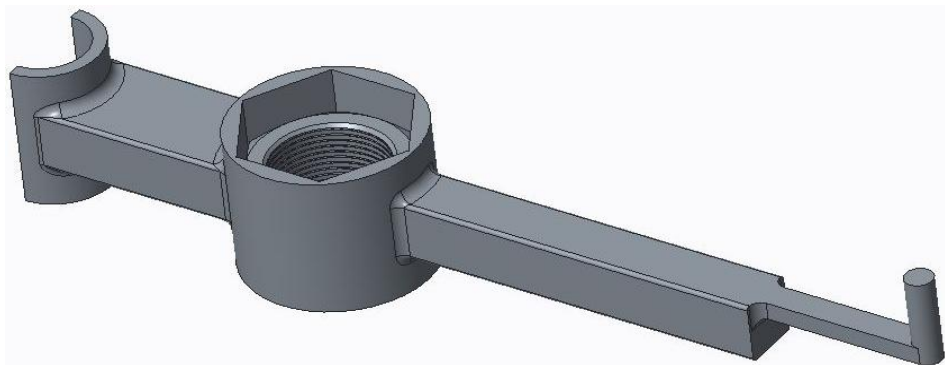
Σχήμα 9.4: Ατέρμονας κοχλίας (ντίτζα) κυλινδρικής διατομής για την μεταβολή του ύψους της πτερύγωσης.



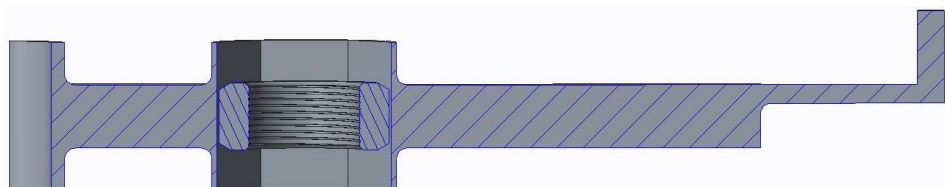
Σχήμα 9.5: Ντίζα κυλινδρικής διατομής για την μεταβολή του ύψους της περυγώσης σε τομή.



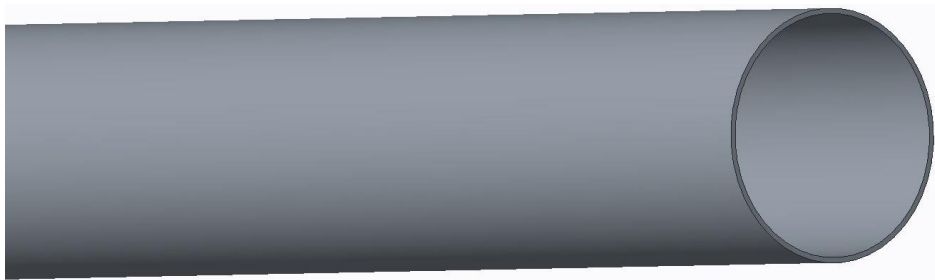
Σχήμα 9.6: Περικόχλιο όπου τοποθετήθηκε εντός της βάσης στήριξης των περυγώσεων για την μεταβολή του ύψους των περυγώσεων καθώς και στην κορυφή της βάσης για την περιστροφή της ντίζας.



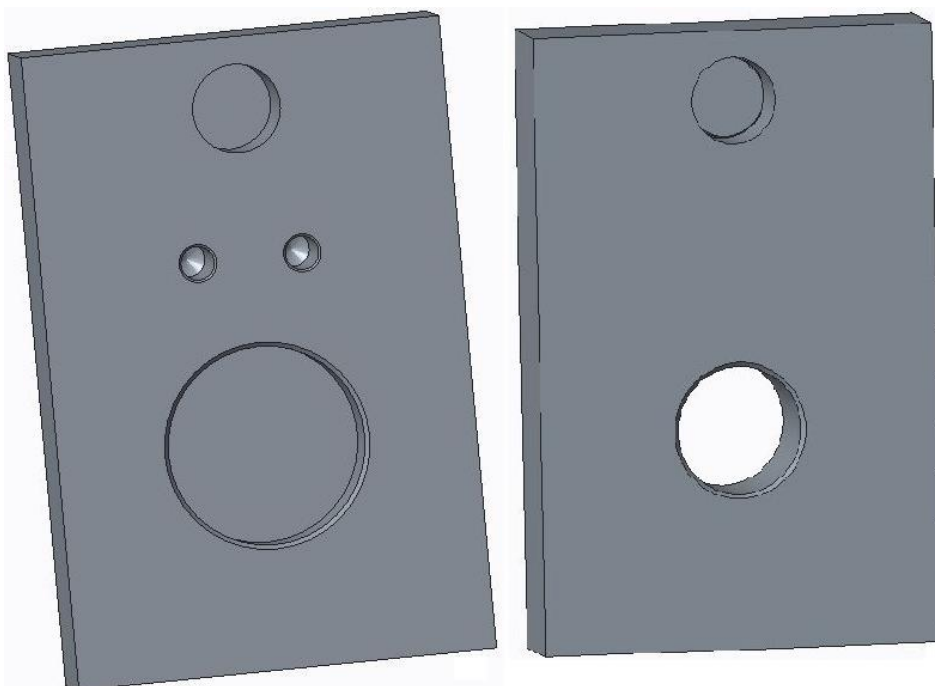
Σχήμα 9.7: Βάση τοποθέτησης και βαθμονόμησης των περυγώσεων.



Σχήμα 9.8: Βάση τοποθέτησης και βαθμονόμησης των πτερυγώσεων σε τομή.



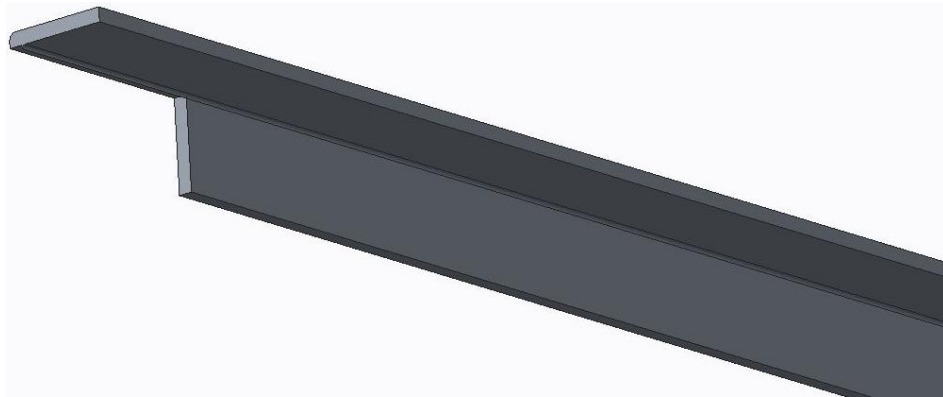
Σχήμα 9.9: Άξονας στήριξης βάσης για την αποφυγή της περιστροφής του κατά την περιστροφή της ντίζας.



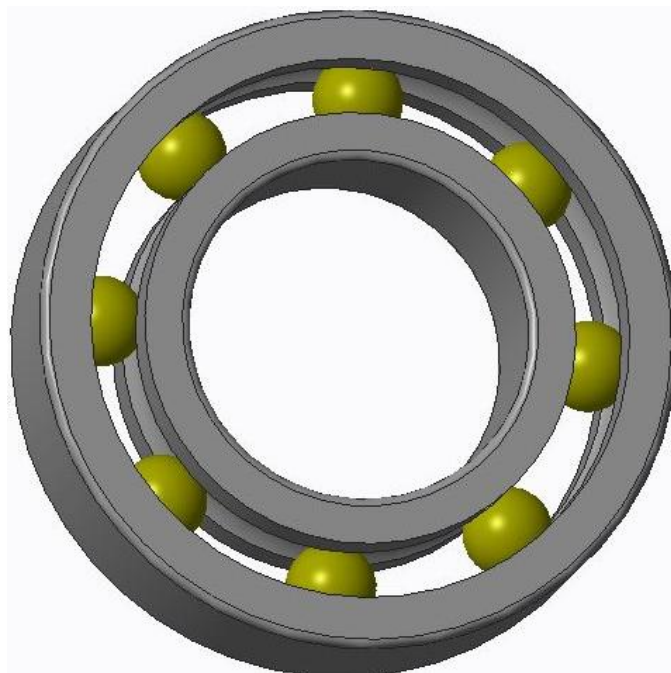
Σχήμα 9.10: Ειδικά διαμορφωμένες λάμες για την συναρμολόγηση των επιμέρους τμαχίων και τη στήριξη της βάσης.

Η αρχή λειτουργίας της πρώτης βάσης - όπως προτάθηκε για να κατασκευαστεί έχοντας στόχο την ακριβή σάρωση και των δύο επιφανειών της εκάστοτε πτερυγώσης - ορίζεται σύμφωνα με τις πραγματικές συνθήκες όπου επρόκειτο να λειτουργήσει και πάντα με γνώμονα την ελάττωση της πολυπλοκότητας της κατασκευής.

Συγκεκριμένα, η ντίζα θα ήταν τοποθετημένη σε ένσφαιρο ρουλεμάν για την εξασφάλιση της περιστροφής της και μέσω εκτυπωμένου 3D printer μοχλού στην κορυφή της φάσης θα εξασφαλιζόταν η χειροκίνητη περιστροφή. Κατ' αυτή την λογική ήταν δυνατό να τοποθετηθεί οποιοσδήποτε κινητήρας εργαστηριακού χώρου για τον ακριβή έλεγχο της περιστροφής, εξασφαλίζοντας την πληροφορία της θέσης του αντικειμένου ή και των μοιρών περιστροφής της ντίζας.



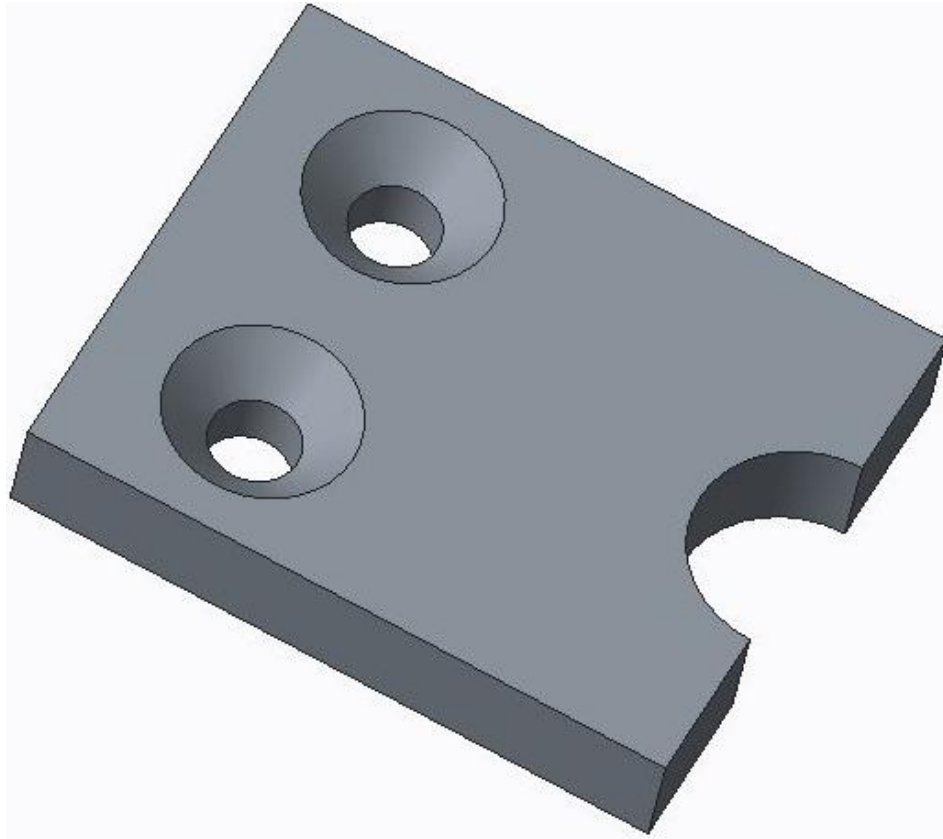
Σχήμα 9.11: Γωνιά για την στήριξη όλης της κατασκευής επάνω στην ρομποτική τράπεζα.



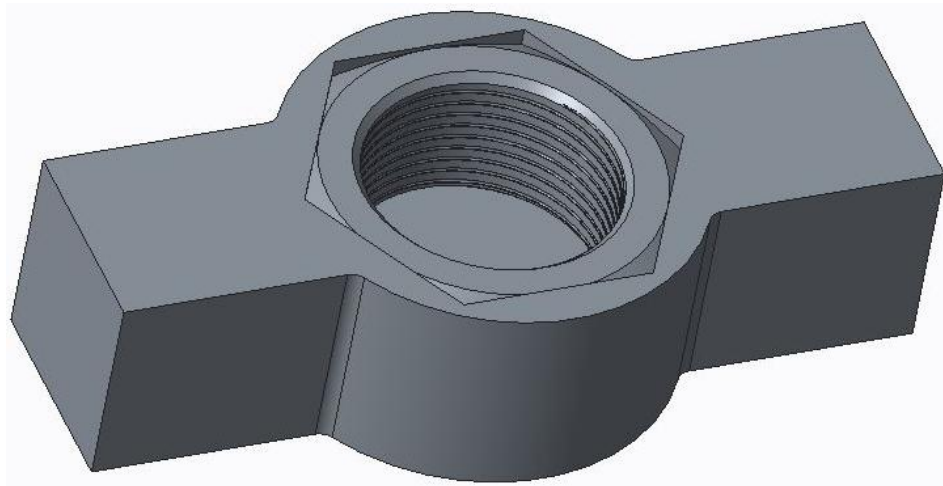
Σχήμα 9.12: Ένσφαιρο ρουλεμάν για την περιστροφή της ντίζας.

Η πρόσδεση και εξασφάλιση του μηδενισμού των βαθμών ελευθερίας της βάσης αυτής γινόταν ύστερα από την συναρμογή της κατασκευής, όπου η αποσυναρμολόγηση ξεκινούσε από την αφαίρεση του περικολίου κίνησης όπου βρίσκεται στην κορυφή της βάσης.

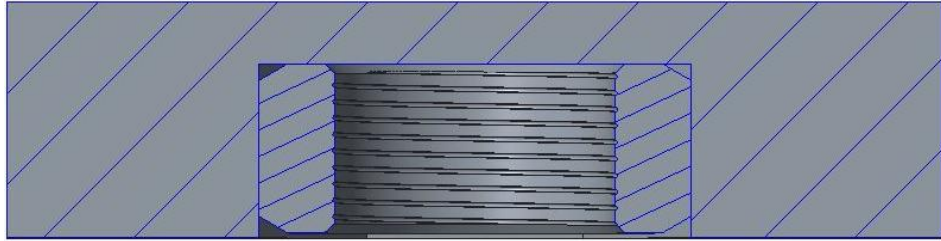
Η βάση βαθμονόμησης των πτερυγώσεων σχεδιάστηκε με στόχο να εκτυπωθεί σε 3D Printer φέροντας ένας κύλινδρο με εσωτερικό περικόχλιο για την εξασφάλιση της μεταφορικής κίνησης της καθώς και δεύτερο κύλινδρο σε τομή για την εξασφάλιση της ακινησίας του κατά την περιστροφή της ντίζας.



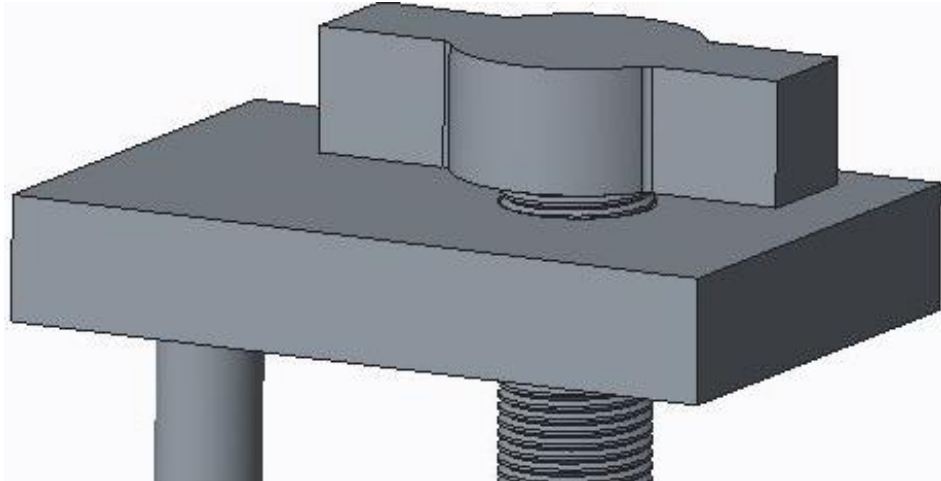
Σχήμα 9.13: Λάμα στήριξης του ρουλεμάν και της ντίζας.



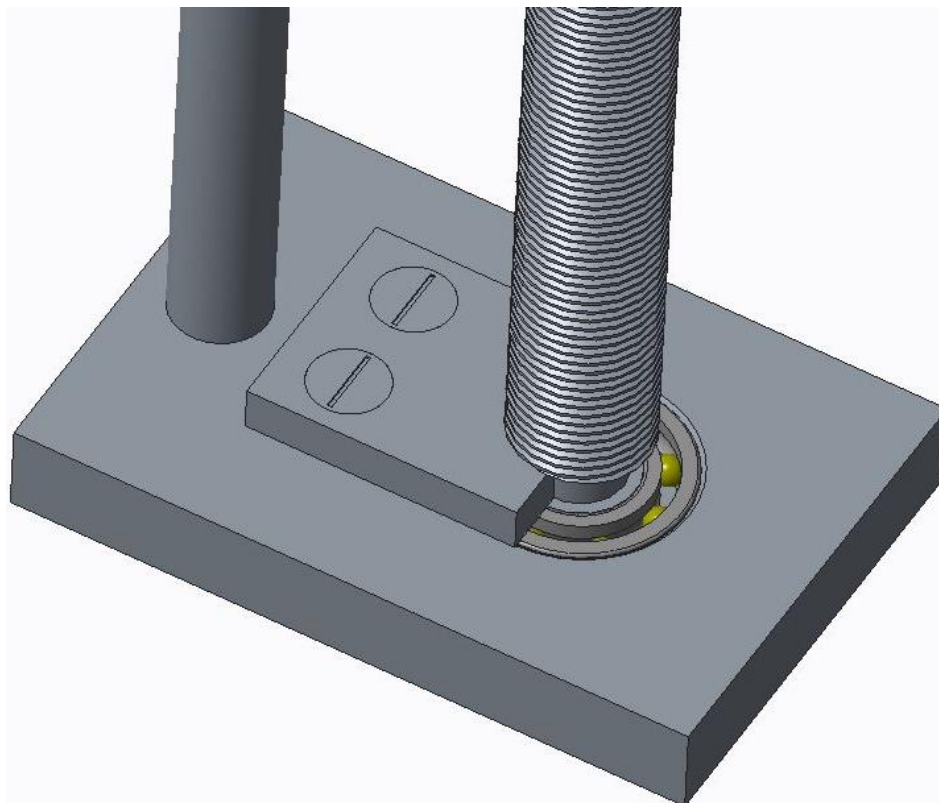
Σχήμα 9.14: Καπάκι για την περιστροφή της ντίζας.



Σχήμα 9.15: Καπάκι για την περιστροφή της ντίζας σε τομή.



Σχήμα 9.16: Συναρμολογημένη διάταξη της ντίζας, του χειριστηρίου περιστροφής ντίζας και της λάμας στήριξης.



Σχήμα 9.17: Συναρμολογημένη διάταξη της ντίζας, του ρουλεμάν, ασφάλειας για την μεταφορά της ντίζας και της λάμας στήριξης.

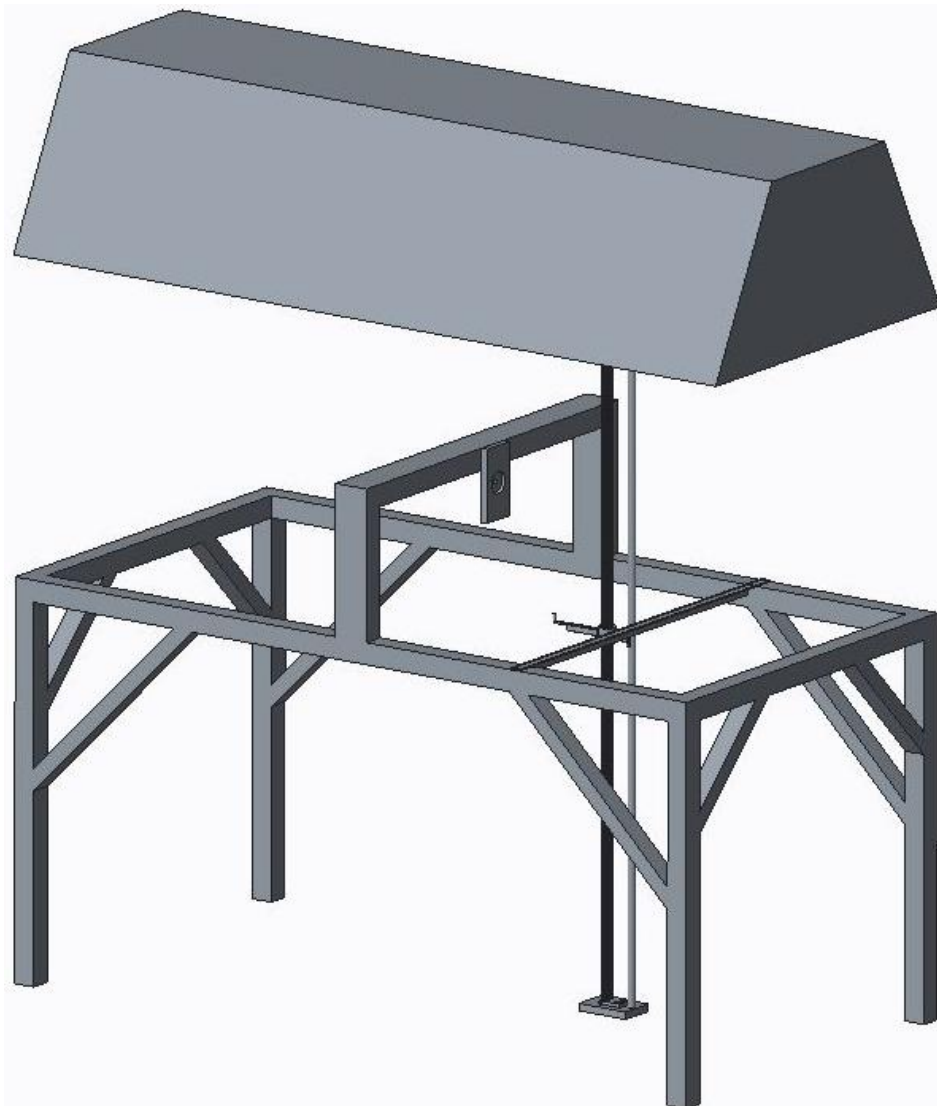


Σχήμα 9.18: Συναρμολογημένη διάταξη της ντίζας, της βάσης βαθμονόμησης των πτερυγώσεων και των γωνιών.

Με την παρούσα διάταξη στόχος ήταν οι δύο διαδοχικές σάρωσεις για την ολοκληρωμένη αποτύπωση της γεωμετρίας μιας πτερύγωσης. Αρχικά στην πρώτη σάρωση οι φακοί της κάμερας θα ήταν στραμμένοι προς τα πάνω και η θέση της πτερύγωσης σχετικά υψηλότερη με στόχο να εφαρμόζει όλη η πτερύγωση αλλά και η πλήμνη στο πλάνο της κάμερας. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιζόταν η σάρωση της μιας πλευράς της πτερύγωσης.

Για τη σάρωση και της δεύτερης επιφάνειας της πτερύγωσης η κάμερα θα περιστρεφόταν κατά 180ο και η βάση βαθμονόμησης μαζί με την πτερύγωση θα μεταφερόταν σε ανάλογη θέση όπως και στην πρώτη

σάρωση μέσω της περιστροφής της ντίζας, προσαρμόζοντας την θέση της από το φακό της κάμερας με σχετική ακρίβεια.

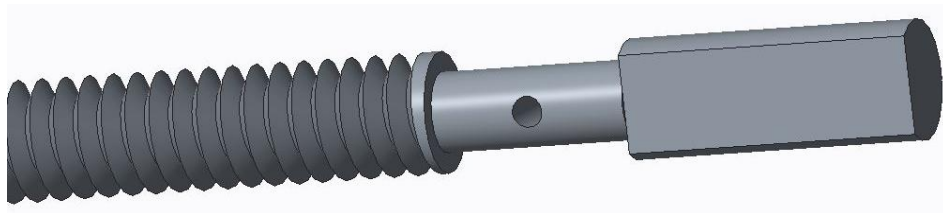


Σχήμα 9.19: Προσομοίωση χώρου συναρμολογημένης διάταξης.

9.1.2. Δεύτερη Βάση Τοποθέτησης της Πτερύγωσης

Η παρούσα διάταξη μελετήθηκε και σχεδιάστηκε με στόχο το εκάστοτε σώμα των πτερυγώσεων να βρίσκεται κάθετα στο φακό, να είναι μεταβαλλόμενο το ύψος της για την προσαρμογή της πληροφορίας εντός του πλαισίου λήψης σύμφωνα και με τον φακό όπου έχει επιλεγεί καθώς και όσο το δυνατόν να μην υπάρχουν περιττές πληροφορίες – γεωμετρίες εντός του πλαισίου λήψης κατά την διαδικασία της σάρωσης.

Η παρούσα βάση αποτελείται από εννέα (9) μέρη όπου το κάθε ένα σχεδιάστηκε βάση των πραγματικών διαστάσεων της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser. Η μεταβολή του ύψους της εκάστοτε πτερύγωσης εξασφαλίστηκε μέσω της περιστροφής του περικοχλίου όπου έχει τοποθετηθεί επάνω στην βάση και με στόχο την όσο το δυνατόν ελάττωση των βαθμών ελευθερίας όλης της συναρμογής. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι διαστάσεις των αντικειμένων όπου σχεδιάστηκαν για τη βάση αυτή.

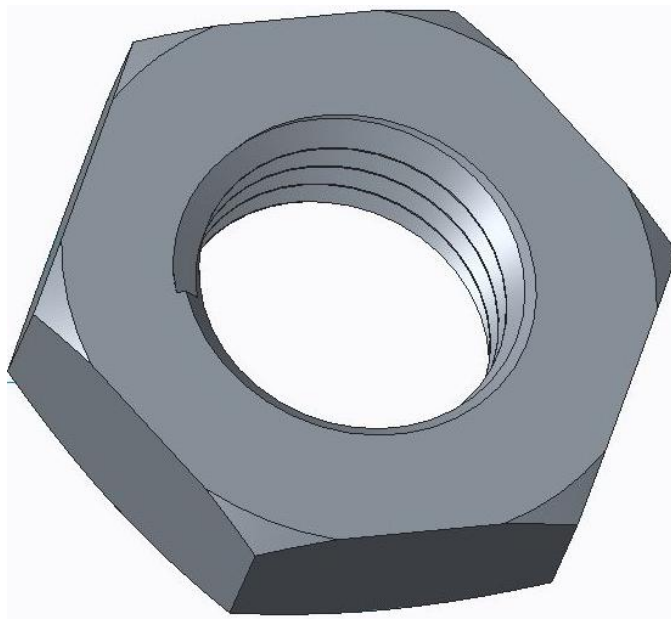


Σχήμα 9.20: Ντίζα κυλινδρικής διατομής για την μεταβολή του ύψους της πτερυγώσης.

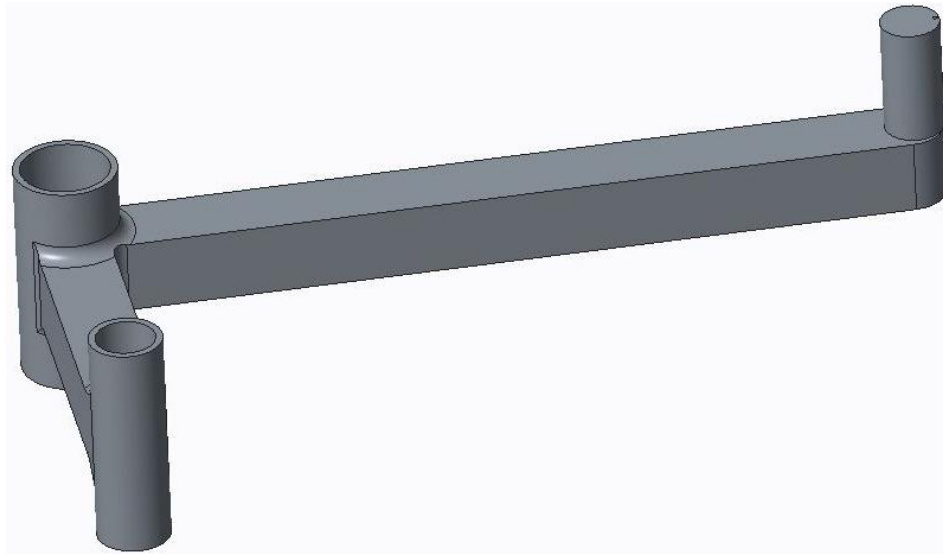
Η αρχή λειτουργίας της βάσης αυτής βασίζεται στην ανάγκη σάρωσης των πτερυγώσεων υπό καμπτικό φορτίο το οποίο θα τοποθετούνταν μέσω νημάτων κατά μήκος των χορδών της. Αρχικώς, ήταν αδύνατη η πραγματοποίηση σαρώσεων με το χείλος εκφυγής ή προσβολής να είναι κάθετα στο φακό, όπως περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκε βάση για την τοποθέτηση και βαθμονόμηση της εκάστοτε πτερυγώσης ομόροπα στους αντίστοιχους νοητούς άξονες του αντικειμένου και της κάμερας.

Μια ολοκληρωμένη σάρωση με καμπτικό φορτίο χωρίστηκε σε δύο βασικά στάδια. Αρχικά στόχος ήταν η σάρωση του αντικειμένου με την κάμερα να έχει στραμμένους τους φακούς της προς τα πάνω, όπου και για αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η κοιλοδοκός ώστε να στηριχτεί η ντίζα φέροντας την πτερυγώση στο ανάλογο ύψος. Έπειτα η κάμερα περιστράφηκε κατά 180° ώστε να φέρει τους φακούς της προς τα κάτω έχοντας την επάνω επιφάνεια της πτερυγώσης κάθετα στο φακό.

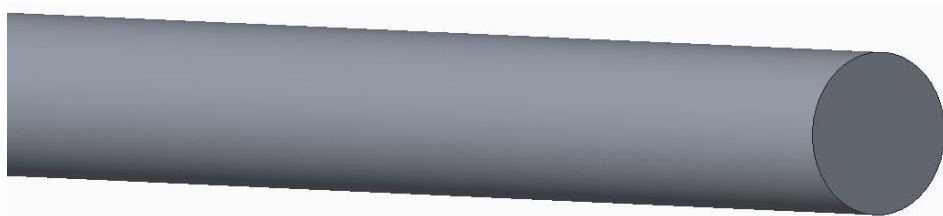
Όπως προαναφέρθηκε, η μεταφορά κατά τον καρτεσιανό άξονα ($Z'Z'$) της εν λόγω βάσης γίνεται μέσω περικοχλίου όπου έχει τοποθετηθεί εντός του βασικού κυλίνδρου της βάσης διαμέτρου $D = 12 [mm]$, ενώ για το μηδενισμό του βαθμού ελευθερίας περιστροφής της βάσης στον ίδιο άξονα σχεδιάστηκε δεύτερος άξονας διαμέτρου $d = 8 [mm]$.



Σχήμα 9.21: Περικόχλιο όπου τοποθετήθηκε ενδιάμεσα της βάσης στήριξης των πτερυγώσεων για την μεταβολή του ύψους των πτερυγώσεων καθώς και στην κορυφή της βάσης για την περιστροφή της ντίζας.



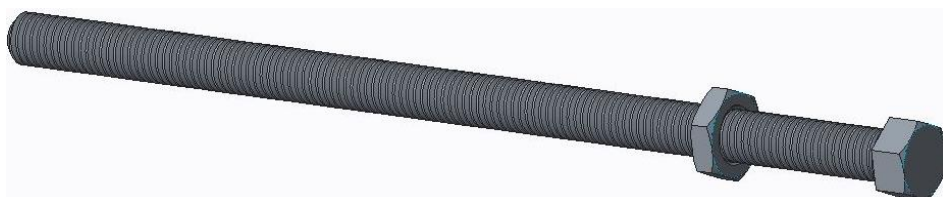
Σχήμα 9.22: Βάση τοποθέτησης και βαθμονόμησης των πτερυγώσεων.



Σχήμα 9.23: Άξονας στήριξης βάσης για την αποφυγή της περιστροφής του κατά την περιστροφή της ντίζας.



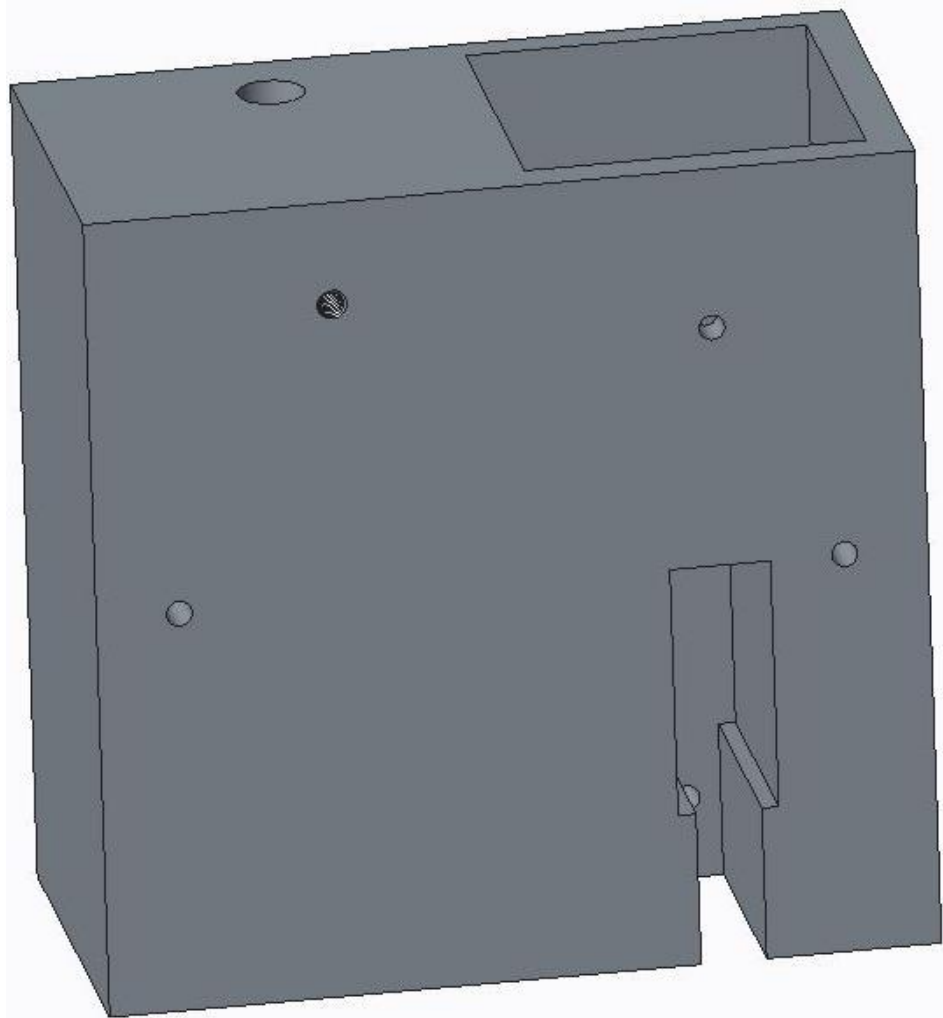
Σχήμα 9.24: Γωνιές για την στήριξη όλης της κατασκευής επάνω στην ρομποτική τράπεζα.



Σχήμα 9.25: Κοχλίας και περικόχλια για την στήριξη των επιμέρους τεμαχίων και τη συναρμογή της κατασκευής.

Κάθε τεμάχιο της κατασκευής αυτής κοχλιοσυνδέθηκε μέσω ζεύγους κοχλιών – περικοχλίου με διάμετρο σπειρώματος $M5$. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν γωνίες διαστάσεων 30×3 [mm] για την κατασκευή

του σκελετού της βάσης όπου θα τοποθετούνταν κύβος με τις κατάλληλες διαμορφώσεις, η κοιλοδοκός τετραγωνικής διατομής διαστάσεων $40 \times 40 \times 3$ [mm] και ο βοηθητικός άξονας.

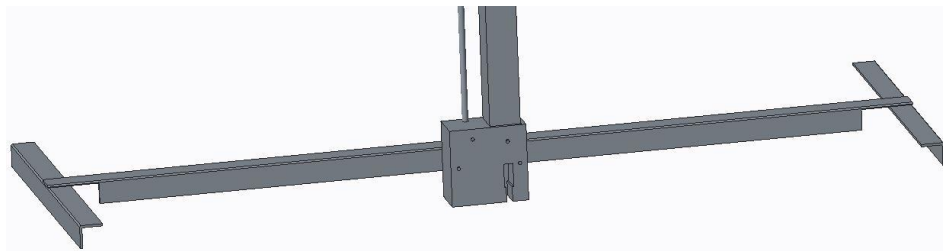


Σχήμα 9.26: Κύβος στήριξης της κοιλοδοκού και της ντίζας κατά την σάρωση του αντικειμένου με τον φακό της κάμερας να έχει προσανατολισμό προς τα κάτω.

Η δεύτερη διαμόρφωση όπου έφερε ο κύβος διαστάσεων $100 \times 100 \times 50$ [mm], όμοια με αυτή του κοιλοδοκού τετραγωνικής διατομής, αφορούσε την τοποθέτηση της ντίζας στο σημείο εκείνο για την σάρωση της πτερυγώσης όταν η κάμερα έχει τους φακούς της στραμμένους προς τα κάτω, δίχως να χρειαστεί να αφαιρεθεί η βάση βαθμονόμησης της πτερυγώσης ούτε και να περιστραφεί η ντίζα για την επανατοποθέτησης για τις νέες σαρώσεις.



Σχήμα 9.27: Συναρμογή βάσης για την σάρωση των πτερυγώσεων με τους φακούς της κάμερας στραμμένους προς τα πάνω.



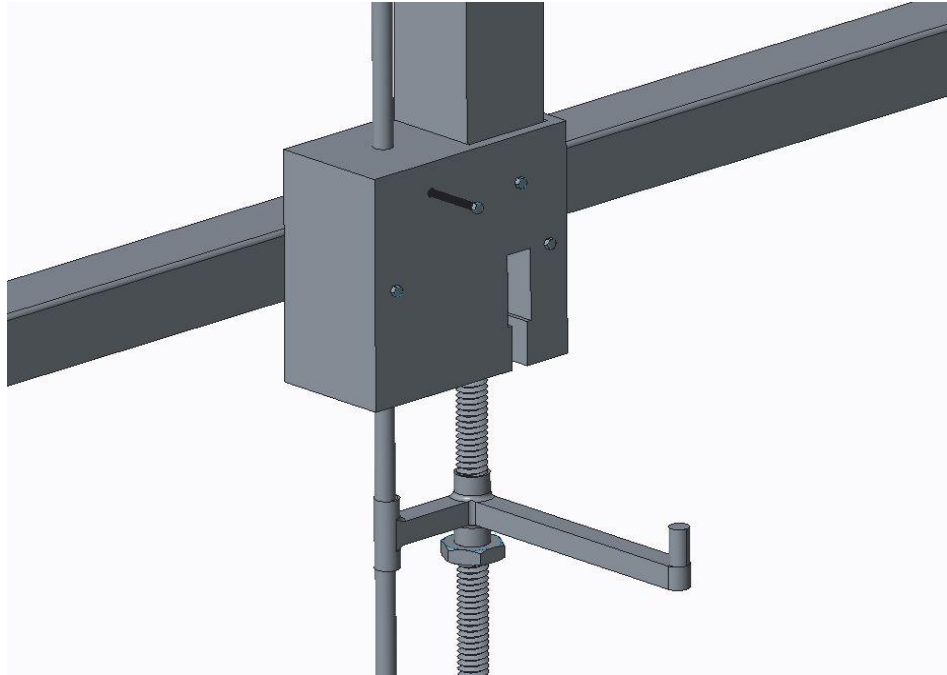
Σχήμα 9.28: Συναρμογή κύβου, γωνιών και δοκών για την σάρωση των πτερυγώσεων με τους φακούς της κάμερας στραμμένους προς τα πάνω.



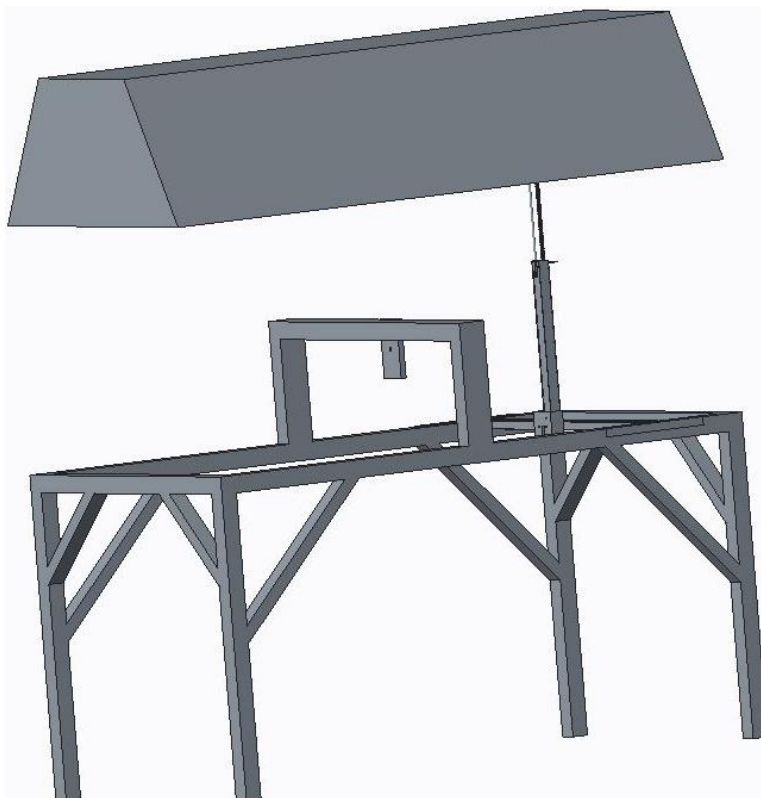
Σχήμα 9.29: Συναρμογή δοκών, ντίζας και βάσης βαθμονόμησης για την σάρωση των πτερυγώσεων με τους φακούς της κάμερας στραμμένους προς τα πάνω.



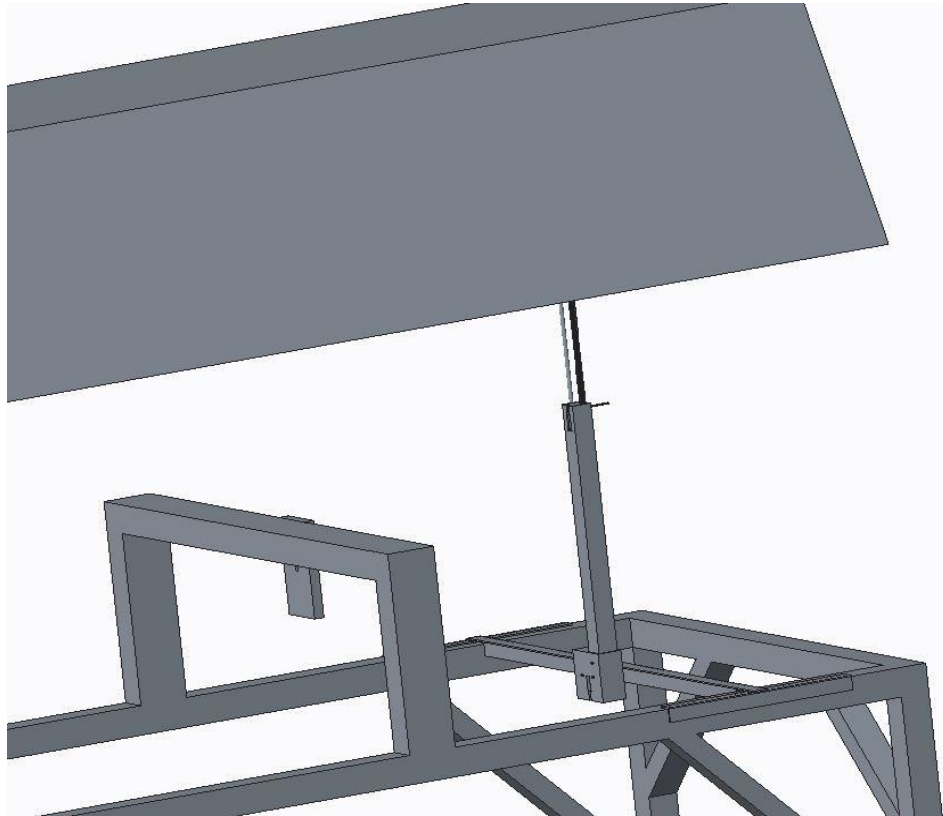
Σχήμα 9.30: Συναρμογή βάσης για την σάρωση των πτερυγώσεων με τους φακούς της κάμερας στραμμένους προς τα κάτω.



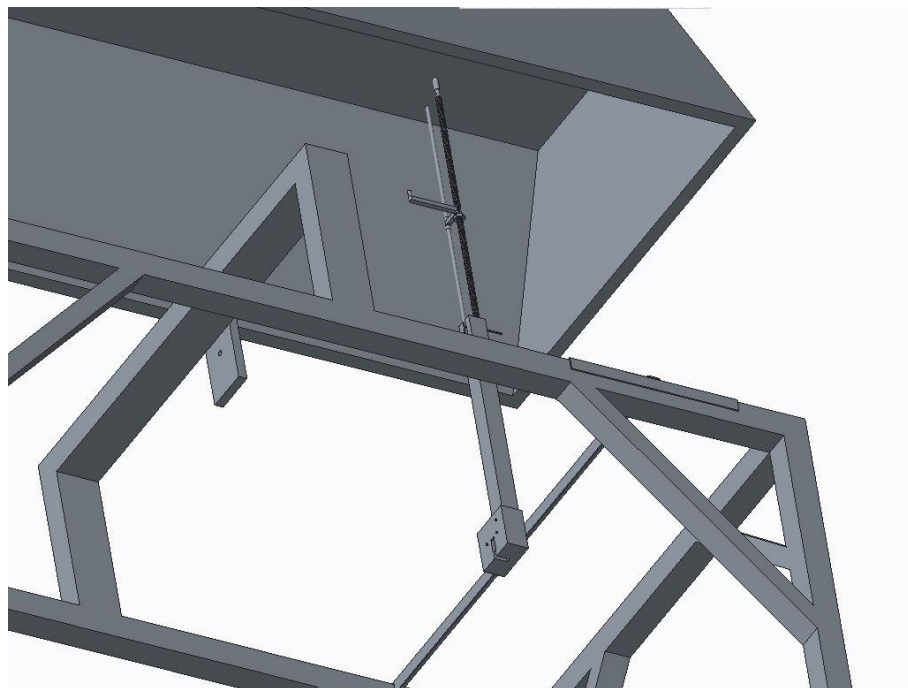
Σχήμα 9.31: Συναρμογή κύβου, ντίζας, άξονα στήριξης και βάσης βαθμονόμησης για την σάρωση των πτερυγώσεων με τους φακούς της κάμερας στραμμένους προς τα κάτω.



Σχήμα 9.32: Συναρμογή βάσης εντός της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser.



Σχήμα 9.33: Συναρμογή βάσης εντός της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser.



Σχήμα 9.34: Συναρμογή βάσης εντός της ρομποτικής τράπεζας κοπής με Laser.

10. Επίλογος - Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, με την παρούσα πτυχιακή εργασία στόχος ήταν ανάλυση και η εμβάθυνση των γνώσεων του φοιτητή στις μεθόδους παραμετρικής μοντελοποίησης και σε μεθόδους αντίστροφης μηχανικής. Χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα για την οριοθέτηση της πειραματικής διαδικασίας καθώς και χρησιμοποιήθηκαν θεωρητικές αρχές σχεδιασμού ώστε να γίνει αποδοτικότερη η μελέτη των μεθόδων αντίστροφης μηχανικής, το οποία πάρθηκαν από το εργαστήριο “Αιολικής Ενέργειας και Σύνθεσης Συστημάτων”.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε σάρωση της γεωμετρίας πτερυγώσεων με μεθόδους αντίστροφης μηχανικής ώστε να γίνει μελέτη, υπολογισμός και εξακρίβωση της διαφοράς μεταξύ των παραμετρικά τρισδιάστατων γεωμετριών έναντι των τρισδιάστατα γεωμετριών από μεθόδους αντίστροφης μηχανικής. Τόσο ο τεχνολογικός εξοπλισμός όσο και οι πειραματικές διατάξεις οροθετήθηκαν προσαρμόστηκαν εντός του εργαστηρίου “Εργαστήριο Μηχανολογίας Ακρίβειας και Αντίστροφης Μηχανικής” του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης (ΤΕΙ Κρήτης) σύμφωνα με τις παραμέτρους όπου έφεραν η γεωμετρία των πτερυγώσεων, το υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν αλλά και τις συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου όπου πραγματοποιήθηκαν οι σαρώσεις.

Παράλληλα, στη δεύτερη φάση των πειραματικών διαδικασιών για την σάρωση των τεσσάρων πτερυγώσεων στο πλήθος, όπου τοποθετήθηκε καμπτικό φορτίο κατά μήκος της πτερυγώσης, κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός βάσης ώστε να γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια η σάρωση και κατ’ επέκταση η μέτρηση των ανάλογων μεγεθών.

Τελικώς, με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας και του σχεδιασμού των αεροτομών, μετρήθηκε το μήκος της χορδής, το ύψος της κάθε αεροτομής και η γωνία σφήνωσης τους και συγκρίθηκαν με τις ανάλογες τιμές από το τρισδιάστατα μοντέλα όπου σχεδιάστηκαν στο “Solidworks”. Οι ποσοστιαίες αποκλίσεις παρουσιάστηκαν στους παραπάνω πίνακες καθώς και αποδόθηκαν οι ανάλογες τιμές σε μορφή γραφικής παράστασης. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ύστερα από τη σάρωση και φέρουν τις ανάλογες ποσοστιαίες αποκλίσεις οφείλονται τόσο στο πρόγραμμα σχεδιασμού όπου κατά την επεξεργασία των νεφών και του αντίστοιχου πολυγωνικού προφίλ ήταν αναγκαία η απαλοιφή και η ανακατανομή του προσανατολισμού αυτών στο χώρο.

Επιπρόσθετα, κατά την σάρωση ήταν αδύνατη η πλήρης αποτύπωση των λεπτομερειών της γεωμετρίας των πτερυγώσεων λόγω της μεγάλης διαφοράς διαστάσεων στους ανάλογους άξονες. Παράλληλα, ήταν αδύνατη η εστιασμένη σάρωση κατά μήκος των πτερυγώσεων και τελικών να συντεθούν και να ορίσουν μια ολοκληρωμένη γεωμετρία οι επιμέρους σαρώσεις γιατί ακόμα και με “Σημεία Αναγνώρισης - (Marker Points)” η ακρίβεια προσανατολισμού των πολυγώνων στα όρια χανόταν.

11. Βιβλιογραφία

- [1]. Beom-SooKang, NaksooKim, S.Kobayashi. Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade (1990).
- [2]. Karthik Balasubramanian, Mark G. Turner and Kiran Siddappaji. Novel Curvature-Based Airfoil Parameterization for Wind Turbine Application and Optimization.
- [3]. Mojtaba Tahani, Ghazale Kavari, Mehran Masdari, Mojtaba Mirhosseini. Aerodynamic design of horizontal axis wind turbine with innovative local linearization of chord and twist distributions.
- [4]. Bumsuk Kim, Woojune Kim, Sungyoul Bae, Jaehyung Park, Manneung Kim. Aerodynamic design and performance analysis of multi-MW class wind turbine blade.
- [5]. Robert Howell, Ning Qin, Jonathan Edwards, Naveed Durrani. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine.
- [6]. C. Konga, J. Banga, Y. Sugiyamab. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life.
- [7]. Χρυσουλάκης Χρίστος. Τρισδιάστατη μοντελοποίηση άρθρωσης γονάτου και μελέτη τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
- [8]. Κωνσταντίνος Κονταξάκης. Αιολικά Συστήματα. Σημειώσεις Εργαστηρίου.
- [9]. Σαρπετσιδάκης Μιχάλης. Βιβλιοθήκη Πτερυγώσεων.
- [10]. Wikipedia. Η ιστορία της αεροδυναμικής.
- [11]. Wikipedia. Airfoil.
- [12]. Wikipedia. Bird Flight.
- [13]. Youtube. Airfoil Design.
- [14]. Airfoil Tools.