



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΕΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Σπουδαστής: Σάκα Χρηστάκη ΑΜ:5454 | Εισηγητής: Κονταξάκης Κωνσταντίνος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2015

Ευχαριστίες

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

Οφείλω επίσης ένα ευχαριστώ στον καθηγητή Δρ. Πετούση Μάρκο για την παραχώρηση των τρισδιάστατων εκτυπωτών του εργαστηρίου του τμήματος, καθώς και στο προσωπικό του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθεια και την συνεργασία τους.

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

Σάκα Χρήστος

Ηράκλειο 2015

Περίληψη

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός μοντέλου πτερύγωσης μέσω ήδη υπάρχοντος προγράμματος που έχει δημιουργηθεί από το τμήμα μας με βάση γνωστούς αεροδυναμικούς κώδικες υπολογισμού πτερυγώσεων στο λογισμικό excel. Αφού επιλέχθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα, έγινε τρισδιάστατη σχεδίαση της πτερύγωσης μέσω του λογισμικού Solidworks. Στη συνέχεια αφού ελέγχθηκε το μοντέλο προχωρήσαμε στην εκτύπωση του σε πλαστικό στον 3D printer του Τμήματος. Έγινε αξιολόγηση της πτερύγωσης μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη διαδικασία σχεδιασμού της πτερύγωσης αυτής. Τέλος έγινε σύγκριση των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και καταγράφηκαν τα συμπεράσματα ως προς την αξιοπιστία του λογισμικού και της διαδικασίας κατασκευής μοντέλων στον τρισδιάστατο εκτυπωτή.

Abstract

This undergraduate project includes the development of a small wind turbine's blade through existing blade calculating software that has been created by our department based on aerodynamic formulas with the use of excel. After the appropriate data has been selected the wind turbine blade was designed through Solidworks. The selected model was built in the department's 3D printer. An evaluation of the wind turbine blades was made through measurements made in the wind tunnel of the Wind Energy Laboratory in order to reach conclusions about the design process of these blades. Finally, a comparison was made between the theoretical and experimental results so that conclusions were recorded as to the reliability of the software and also the modeling process at the 3D printer.

Keywords

wind turbine design, blade, airfoil, 3D design, development, naca4415, analysis,

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Περιεχόμενα..... | 1 |
| 1. Εισαγωγή | 5 |
| 1.1. Σκοπός της εργασίας | 5 |
| 1.2. Δομή της εργασίας | 5 |
| 2. Θεωρία ανάπτυξης και υπολογισμού των χαρακτηριστικών των πτερυγώσεων..... | 6 |
| 2.1. Υπολογισμός της χορδής της πτερύγωσης..... | 8 |
| 2.1.1. Αρχική εκτίμηση..... | 8 |
| 2.1.2. Δεύτερη εκτίμηση | 9 |
| 2.2. Η μελέτη και η απλούστευση της παραπάνω σχέσης. | 11 |
| 2.3. Υπολογισμός της χορδής των πτερυγώσεων..... | 12 |
| 2.4. Θεωρία αεροδυναμικής απόδοσης της πτερύγωσης. Βέλτιστη γωνία προσβολής. 13 | |
| 3. Η θεωρία στροβίλων του Glauert βελτιωμένη απο ερευνητές του Παν/μίου Amherst της Μασαχουσέτης. | 16 |
| 3.1. Σύστημα στροβίλων στις πτέρυγες. | 16 |
| 3.2. Ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα. Προσδιορισμός των ταχυτήτων που προκαλούνται..... | 17 |
| 3.3. Υπολογισμός των αξονικών και εφαπτομενικών δυνάμεων. Υπολογισμός ροπής. 21 | |
| 3.3.1. Πρώτος υπολογισμός..... | 21 |
| 3.3.2. Δεύτερος υπολογισμός..... | 22 |
| 3.4. Τοπικός συντελεστής ισχύος..... | 23 |
| 3.4.1. Μέγιστος τοπικός συντελεστής ισχύος ενός ιδανικού δρομέα. | 24 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5. | Βέλτιστες τιμές της γωνίας κλίσης I και του Czpl. | 25 |
| 3.6. | Συντελεστής ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί με πτέρυγες που παρουσιάζουν αντίσταση. Βέλτιστη γωνία προσβολής. | 30 |
| 3.7. | Επίδραση του αριθμού των πτερύγων. | 32 |
| 3.8. | Πρακτικός προσδιορισμός της χορδής και της γωνίας σφήνωσης. | 32 |
| 3.9. | Πρόβλεψη χαρακτηριστικών πτερύγωσης. | 34 |
| 3.10. | Σύγκριση των αποτελεσμάτων απο τις διάφορες θεωρίες. | 39 |
| 4. | Εγχειρίδιο χρήσης του ΥποlFterou2.0. | 40 |
| 4.1. | Υπολογιστικό φύλλο: Φτερό. | 40 |
| 4.2. | Υπολογιστικό φύλλο: Charts. | 43 |
| 4.3. | Υπολογιστικό φύλλο: Main | 44 |
| 4.4. | Υπολογιστικό φύλλο: I flow | 45 |
| 4.5. | Υπολογιστικό φύλλο: i attack | 45 |
| 4.6. | Υπολογιστικό φύλλο: CL | 46 |
| 4.7. | Υπολογιστικό φύλλο: ε | 47 |
| 4.8. | Υπολογιστικό φύλλο: 11 Συντελεστές | 48 |
| 4.9. | Υπολογιστικό φύλλο: λο-Cm-Cp-Cf. | 49 |
| 4.10. | Υπολογιστικό φύλλο: N-P | 50 |
| 4.11. | Υπολογιστικό φύλλο: N-M N-F | 50 |
| 4.12. | Υπολογιστικό φύλλο: CT(φ) | 51 |
| 5. | Υπολογισμός της πτερύγωσης. | 52 |
| 5.1. | Δεδομένα πτερύγωσης | 53 |
| 5.2. | Θεωρητικά διαγράμματα. | 54 |
| 6. | Σχεδίαση πτερύγωσης βήμα βήμα μέσω του Solidworks. | 58 |
| 6.1. | Δημιουργία των 10 προφίλ (αρχεία .txt) | 58 |
| 6.1.1. | Η αεροτομή NACA4415. | 59 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.2. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Βασική γεωμετρία | 61 |
| 6.3. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Ακροπτερύγιο | 70 |
| 6.4. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Η εντολή Loft | 73 |
| 6.5. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Η Πλήμνη | 76 |
| 6.6. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Διαχωρισμός πλήμνης – φτερού..... | 80 |
| 6.7. | Σχεδίαση πτερύγωσης: Δημιουργία αρχείων STL | 88 |
| 7. | Τρισδιάστατη εκτύπωση και έλεγχος της πτερύγωσης..... | 89 |
| 7.1. | 3D Printing | 89 |
| 7.2. | Έλεγχος της πτερύγωσης | 95 |
| 8. | Περιγραφή Αεροσήραγγας | 98 |
| 8.1. | Εισαγωγή..... | 99 |
| 8.2. | Τύποι αεροσηραγγών | 101 |
| 8.3. | Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες..... | 103 |
| 8.4. | Περιγραφή αεροσήραγγας εργαστηρίου | 104 |
| 8.5. | Μέτρηση ροής..... | 106 |
| 8.6. | Τύρβη | 109 |
| 9. | Μετρήσεις στην αεροσήραγγα..... | 110 |
| 9.1. | Η πειραματική εγκατάσταση..... | 110 |
| 9.1.1. | Το ροτόμετρο..... | 110 |
| 9.2. | Περιγραφή πειράματος..... | 112 |
| 9.2.1. | Βαθμονόμηση ροτόμετρου - Labview..... | 113 |
| 9.3. | Επεξεργασία μετρήσεων | 113 |
| 10. | Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα | 114 |
| 10.1. | Πειραματικά διαγράμματα | 114 |
| 10.2. | Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών..... | 117 |
| 10.3. | Συμπεράσματα..... | 120 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 10.4. | Προτάσεις | 121 |
| 11. | Βιβλιογραφία | 122 |
| 12. | Παραρτήματα..... | 123 |
| 12.1. | Παράρτημα 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Ροπόμετρου..... | 123 |
| 12.2. | Παράρτημα 2. Στροφόμετρο χειρός | 125 |
| 12.3. | Παράρτημα 3. Δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του τμήματος | 126 |

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση πτερυγώσεων μικρών ανεμογεννητριών μέσα από την βελτίωση υπάρχοντος λογισμικού για αξιόπιστους υπολογισμούς. Επιπροσθέτως η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσα από την σχεδίαση και την κατασκευή πτερύγωσης για μετρήσεις στην αεροσήραγα.

1.2. Δομή της εργασίας

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

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο υπάρχει αναλυτικά η θεωρία και το τυπολόγιο πάνω στο οποίο έχουν βασιστεί οι υπολογισμοί και γενικά η παρούσα πτυχιακή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο κρίθηκε αναγκαίο να προστεθεί κάτι σαν εγχειρίδιο χρήσης της εφαρμογής Yproflterou2.0 ώστε να καταστήσει εύκολη τη χρήση του από τρίτους. Περιέχει το αναλυτικό τυπολόγιο που χρησιμοποιείται σε κάθε υπολογιστικό φύλλο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχουν τα δεδομένα της πτερύγωσης που μελετήθηκε καθώς και τα θεωρητικά διαγράμματα ροπής, ισχύος και συντελεστή ισχύος.

Το έκτο κεφάλαιο περιέχει οδηγίες βήμα βήμα για την σχεδίαση της πτερύγωσης μέσω της εφαρμογής Solidworks.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή της τρισδιάστατης εκτύπωσης της πτερύγωσης καθώς και οι απαραίτητοι έλεγχοι στο φτερό μετά την εκτύπωση.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της Αεροσήραγγας όσον αφορά τους τύπους και τις αεροδυναμικές δοκιμές.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιγραφή της πειραματικής εγκατάστασης της Αεροσήραγγας του τμήματος, καθώς και η διαδικασία του πειράματος.

Το δέκατο κεφάλαιο περιέχει την αξιολόγηση των μετρήσεων και τη σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων καθώς και τα συμπεράσματα και τις προτάσεις.

2. Θεωρία ανάπτυξης και υπολογισμού των χαρακτηριστικών των πτερυγώσεων.

Συμβολισμοί

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

| | |
|--------------|--|
| p | αριθμός των πτερύγων |
| λ | λόγος ταχυτήτων |
| λ_0 | λόγος ταχυτήτων στο ακροπτερύγιο |
| i | γωνία σφήνωσης (°) |
| α | γωνία προσβολής (°) |
| n | αεροδυναμική απόδοση της πτερύγωσης |
| P | ισχύς που παράγεται πάνω στην πτερύγωση (W) |
| \vec{H}_C | μαγνητικό πεδίο στον κεντρικό αγωγό |
| \vec{H}_M | μαγνητικό πεδίο στο μεσημβρινό αγωγό |
| \vec{H}_D' | μαγνητικό πεδίο στο δίσκο |
| \vec{H} | μαγνητικό πεδίο στον άξονα περιστροφής |
| H_S | αξονικό μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του πηνίου |
| v_θ | εφαπτομενική επαγόμενη ταχύτητα (m/sec) |
| Ω | γωνιακή ταχύτητα στο ανάντη του δρομέα (rad/sec) |
| M | ροπή (Nt m) |
| C_p | τοπικός συντελεστής ισχύος |
| θ | βοηθητική γωνία (°) |
| k | συντελεστής αξονικής επαγωγής |
| h | συντελεστής γωνιακής επαγωγής |
| λ_e | λόγος ταχυτήτων σε βέλτιστες συνθήκες |
| η_p | υποδηλώνει την μείωση της απόδοσης του δρομέα |

| | |
|-------|--------------------------|
| D | διάμετρος του δρομέα (m) |
| C_F | συντελεστής ώσης |
| C_M | συντελεστής ροπής |

2.1. Υπολογισμός της χορδής της πτερύγωσης

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

2.1.1. Αρχική εκτίμηση

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

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

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

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

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

Η ισχύς είναι η μέγιστη όταν:

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

Τότε:

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

και , επομένως :

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

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

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

2.1.2. Δεύτερη εκτίμηση

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

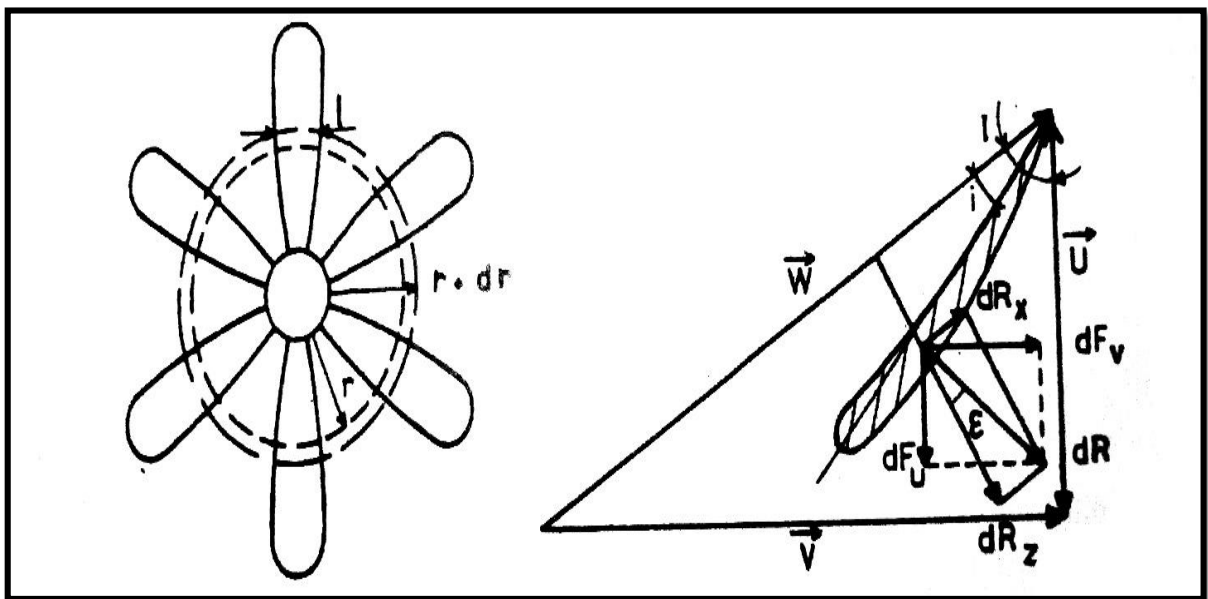
$$U = \omega r$$

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

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

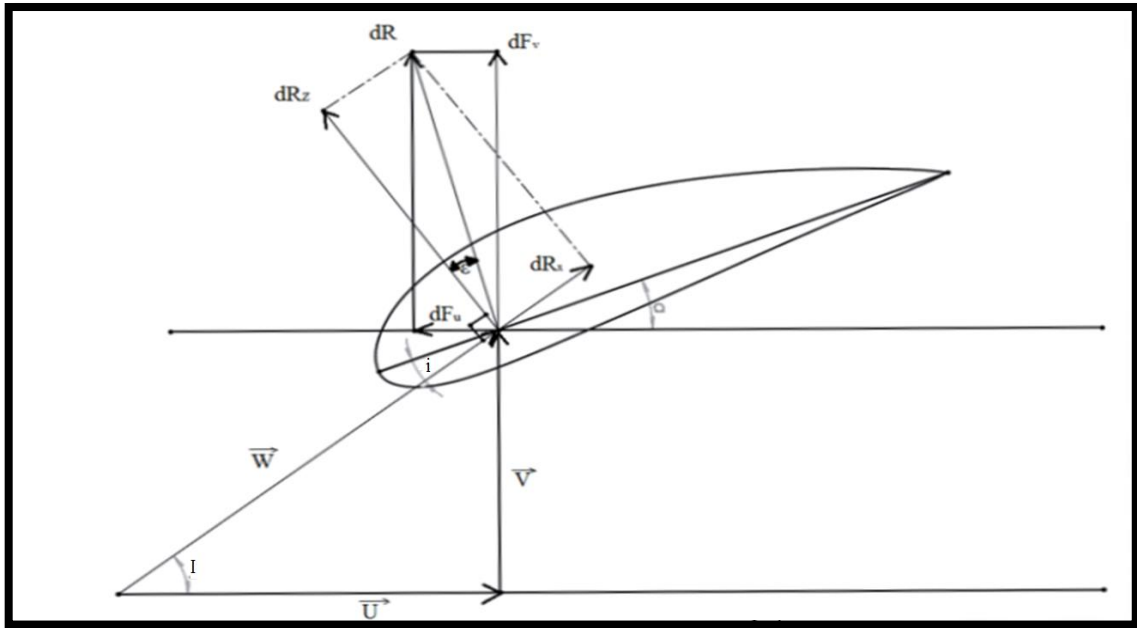
μπορεί να γραφτεί επίσης:

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



Εικόνα 2.1

Ένα στοιχείο της πτερύγωσης μήκους dR παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.2 Άνωση, αντίσταση και γωνίες που την περιβάλουν

Οπότε, μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές της άνωσης R_z , και της αντίστασης R_x , στο στοιχείο αυτό:

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

και

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

και προκύπτει η συνισταμένη δύναμη:

$$dR = dR_z / \cos \varepsilon$$

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

Επίσης διαπιστώνουμε ότι :

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

και

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

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

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

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

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

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

2.2. Η μελέτη και η απλούστευση της παραπάνω σχέσης.

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

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

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

$$V = 2/3 V_1,$$

V_1 είναι η ταχύτητα του ανέμου ανάντη του δρομέα.

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

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

Αντικαθιστώντας στην έκφραση για το $C_z pl$:

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

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

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

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

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

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

Με βάση τα παραπάνω για $C_z pl$ έχουμε :

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

2.3. Υπολογισμός της χορδής των πτερυγώσεων.

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

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

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

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

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

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

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

2.4. Θεωρία αεροδυναμικής απόδοσης της πτερύγωσης. Βέλτιστη γωνία προσβολής.

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

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

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

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

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

Εξάλλου:

$$\cotan l = U/V$$

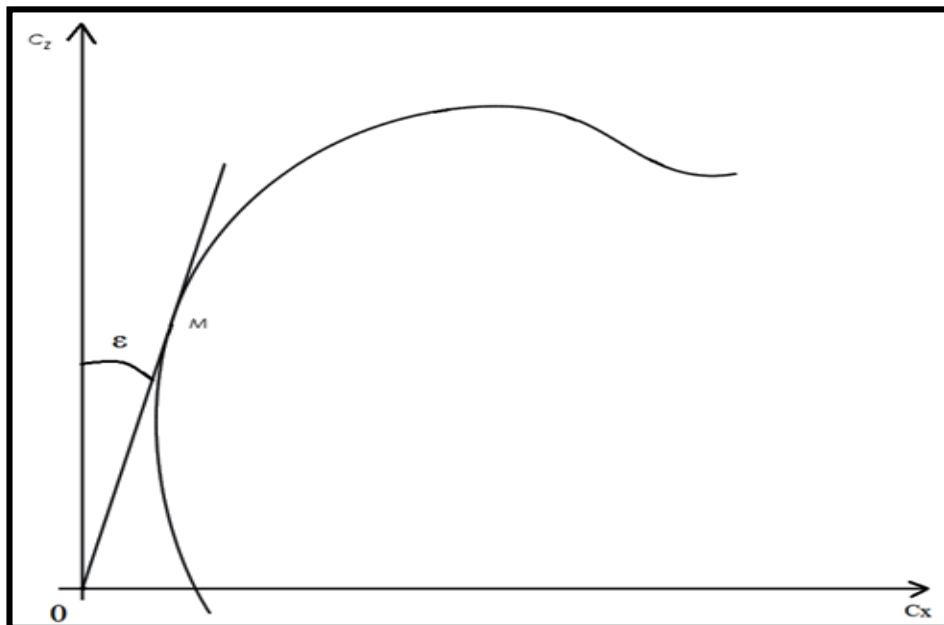
Υπό αυτές τις συνθήκες :

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

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

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

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



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα C_z - C_x

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

Στην πραγματικότητα, η τιμή της $\tan\epsilon$ καθορίζεται από την τιμή της γωνίας προσβολής, i . Το $\tan\epsilon$ έχει ελάχιστη τιμή στο σημείο που η OM εφάπτεται στο διάγραμμα C_z-C_x . (βλέπε εικόνα 2.3). Σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο, η αεροδυναμική απόδοση είναι η μέγιστη.

3. Η θεωρία στροβίλων του Glauert βελτιωμένη απο ερευνητές του Παν/μίου Amherst της Μασαχουσέτης.

Η θεωρία που αναπτύσσεται παρακάτω περιγράφεται στο βιβλίο “Les éoliennes” του D. Le Gouirières [8].

3.1. Σύστημα στροβίλων στις πτέρυγες.

Πίσω από κάθε πτέρυγα ενός ρότορα δημιουργείται μια στιβάδα δινών που αποτελείται κυρίως από δύο στροβίλους που γεννιούνται ο ένας κοντά στον άξονα του δρομέα και ο άλλος στο ακροπερύγιο κάθε πτέρυγας.

Οι περιφερειακοί στροβίλοι, που γεννιούνται στο ακροπερύγιο κάθε πτέρυγας, σχηματίζουν έλικες που αποσπώνται, κατάντη της πτερύγωσης, από τα ακροπερύγια. Η ακτίνα αυτών των ελίκων αυξάνεται κατάντη του δρομέα μέχρι να σταθεροποιηθεί σ' ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Οι στροβίλοι που γεννιούνται κοντά στον άξονα του δρομέα περιστρέφονται και αυτοί σχηματίζοντας ένα σπινάλ γύρω από τον άξονα του δρομέα.

Εξάλλου από αεροδυναμική άποψη για τον προσδιορισμό του πεδίου ταχυτήτων, τα πτερύγια μπορούν να υποκατασταθούν από στροβίλους που έχουν σαν άξονα την κάθε πτέρυγα.

Το όλο σύστημα στροβίλων φαίνεται παρακάτω στην εικόνα 3.1 (a και b).

Σε ένα δεδομένο σημείο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συνισταμένη ταχύτητα του αέρα έχει σαν συνιστώσες τη φυσική ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα που επάγεται από το σύστημα στροβίλων.

Το πεδίο ταχυτήτων που επάγονται από το σύστημα των στροβίλων μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των τριών παρακάτω συστημάτων στροβίλων:

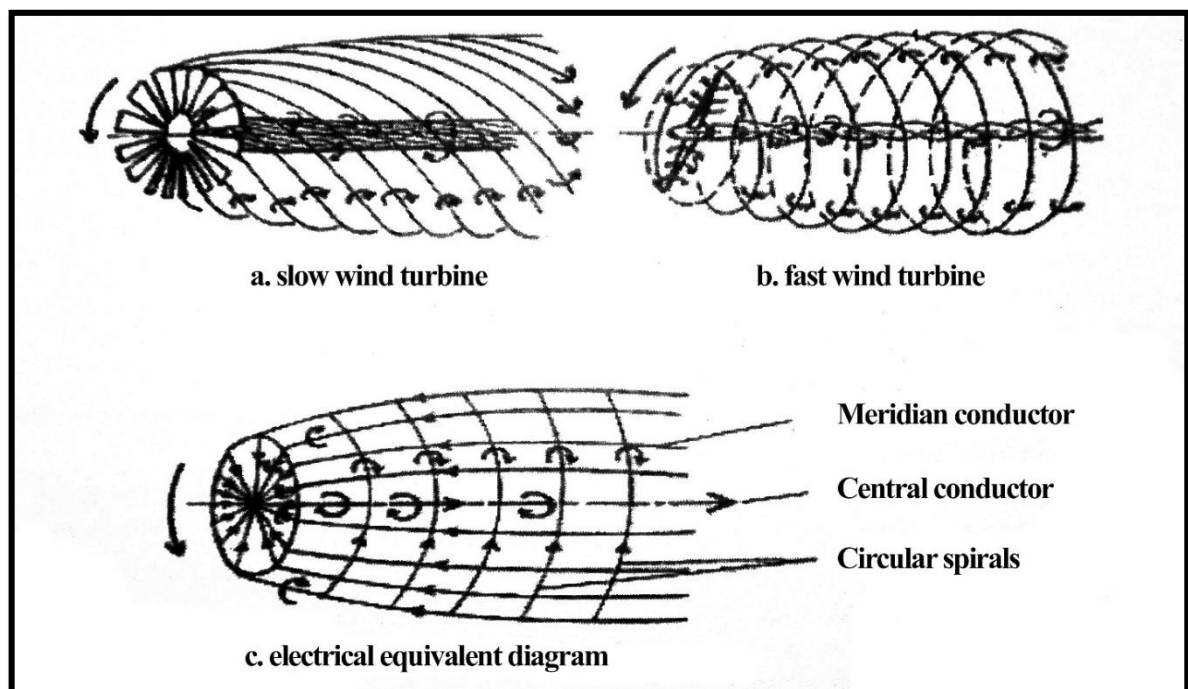
- ένα κεντρικός στροβίλος με άξονα τον άξονα του δρομέα και κυκλοφορία $p\Gamma = \Gamma_0$
(Γ : η κυκλοφορία του στροβίλου μιας πτέρυγας, p : ο αριθμός των πτερύγων)
- τους στροβίλους που αναπτύσσονται στις πτέρυγες
- μια στιβάδα περιφερειακών στροβίλων αποτελούνται κυρίως από τις δίνες που στρέφονται σχηματίζοντας μια έλικα γύρω από τον άξονα του δρομέα.

3.2. Ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα. Προσδιορισμός των ταχυτήτων που προκαλούνται.

Η ρευστομηχανική διδάσκει ότι οι επαγόμενες από το σύστημα των στροβίλων ταχύτητες μπορούν να υπολογιστούν με βάση τους νόμους των Biot και Savart ή το θεώρημα του Ampere, κατά τον ίδιο τρόπο που υπολογίζονται τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από ρεύματα που ρέουν σε κυκλώματα που έχουν την ίδια μορφή με το σύστημα των στροβίλων.

Ας αντικαταστήσουμε το σύστημα των στροβίλων με ένα ηλεκτρικό σύστημα που φαίνεται στην εικόνα 3.1 (c) και το οποίο αποτελείται από:

- Έναν κεντρικό αγωγό που διαρέεται από ρεύμα $pI = I_0$,
- Ένα σύνολο p αγωγών μήκους R τοποθετημένα σε «αστέρα», το καθένα να διαρέεται από ρεύμα I , έχοντας σα κοινό σημείο τον προηγούμενο αγωγό με ρεύμα I_0 .
- Ένα σύνολο αγωγών που περιστρέφονται σε έλικα γύρω από τον άξονα του δρομέα, παρέχοντας καθένας ένα ρεύμα I στους αγωγούς που αντιπροσωπεύουν τις πτέρυγες.



Εικόνα 3.1: Στροβιλισμοί και ισοδύναμο ηλεκτρικό σύστημα.

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, αυτή η ίδια στρώση φύλλου μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύνολο κυκλικών σπειρών με κέντρο τον άξονα της έλικας με μία πλειάδα αγωγών που βρίσκονται στο μεσημβρινό.

Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα συγκροτήματα αγωγών υπολογίζονται με την υπόθεση ότι οι πτερυγώσεις είναι άπειρες σε αριθμό, και μπορούν να αντικατασταθούν όλες από ένα πλήθος αγωγών με ένα δίσκο ρεύματος I_0 στο κέντρο. Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, αυτή η στιβάδα αγωγών μπορεί να αντικατασταθεί από κυκλικές σπείρες με κέντρο τον άξονα του δρομέα και από περιφερειακούς αγωγούς πάνω σε κάθε μεσημβρινό επίπεδο.

Προκειμένου να υπολογιστούν τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από το σύνολο των αγωγών αυτών γίνεται η υπόθεση ενός απείρου αριθμού πτερύγων που επιτρέπει να αντικατασταθεί το σύνολο των αγωγών σε «αστέρα» από ένα δίσκο που διαρρέεται στο κέντρο του από ρεύμα I_0 .

Ας προσδιορίσουμε καταρχήν το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον κεντρικό αγωγό, το δίσκο και τους μεσημβρινούς αγωγούς, σε επίπεδα κάθετα στον άξονα περιστροφής τοποθετημένα πολύ κοντά, ανάντη το ένα και κατάντη το άλλο του δίσκου που αντιπροσωπεύει την πτερύγωση. Οι γραμμές ροής του μαγνητικού πεδίου είναι κύκλοι με κέντρο πάνω στον άξονα του δρομέα, τόσο ανάντη όσο και κατάντη του δίσκου.

Μπορεί να παρατηρηθεί εξάλλου ότι τα μαγνητικά πεδία H_C και H_M όπου c συμβολίζει τον κεντρικό αγωγό και m τους μεσημβρινούς (θεωρητικά άπειρους), έχουν την ίδια τιμή για ίδια απόσταση από τον άξονα είτε ανάντη είτε κατάντη είτε πάνω στο δίσκο, λόγω της μικρής απόστασης που διαχωρίζει τα επίπεδα αυτά.

Αν εφαρμόσουμε το θεώρημα του Ampere ανάντη του δίσκου κατά μήκος ενός κύκλου με κέντρο πάνω στον άξονα του δρομέα, θα έχουμε ένα μηδενικό πεδίο αφού κανένα ρεύμα δεν διαπερνά την κυκλική αυτή περιφέρεια. Ανάντη του δίσκου το πεδίο $\overrightarrow{H_D}$ που οφείλεται στα ρεύματα που περνάνε από το δίσκο (D συμβολίζει το δίσκο και ' ότι βρισκόμαστε ανάντη του δίσκου) είναι ίσο αλλά σε αντίθετη διεύθυνση με τα πεδία που δημιουργούνται από τον κεντρικό και τους μεσημβρινούς αγωγούς.

$$\overrightarrow{H_D} = -(\overrightarrow{H_C} + \overrightarrow{H_M})$$

Αυτό το πεδίο \vec{H}_D' που ασκείται σ' ένα σημείο M' ανάντη του δίσκου είναι ίσο και αντίθετο με το πεδίο \vec{H}_D που ασκείται σ' ένα σημείο M που βρίσκεται σε απόσταση r από τον άξονα απέναντι από το σημείο M' αλλά ανάντη του δίσκου και οφείλεται και αυτό επίσης στα ρεύματα που διαρρέουν το δίσκο. Άρα:

$$\vec{H}_D = -\vec{H}_D' = \vec{H}_C + \vec{H}_M$$

Κατάντη του δίσκου, τα μαγνητικά πεδία \vec{H}_D , \vec{H}_C και \vec{H}_M προστίθενται. Το συνιστάμενο πεδίο \vec{H} , σε μια απόσταση r από τον άξονα είναι:

$$\vec{H} = \vec{H}_D + \vec{H}_C + \vec{H}_M = 2\vec{H}_D$$

Δηλαδή τα μαγνητικά πεδία από τον κεντρικό και τους μεσημβρινούς αγωγούς έχουν την ίδια τιμή εξαιτίας του ότι τα επίπεδα που περνούν από τα σημεία M και M' βρίσκονται πολύ κοντά στο δίσκο.

Πάνω στο δίσκο το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στα ρεύματα που διαρρέουν το δίσκο είναι μηδενικό αφού το πεδίο που δημιουργείται από κάθε κυκλικό τομέα αναιρείται από το αντίθετό του πάν στο δίσκο. Σαν αποτέλεσμα το πεδίο πάνω στο δίσκο σε απόσταση r από τον άξονα περιστροφής είναι:

$$\vec{H} = \vec{H}_C + \vec{H}_M = \vec{H}_D$$

Ας προσδιορίσουμε τώρα το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τις κυκλικές σπείρες που σχηματίζουν ένα πηνίο. Έστω n_1 ο αριθμός των σπειρών ανά μονάδα μήκους.

Στο κέντρο του πηνίου το αξονικό μαγνητικό πεδίο είναι:

$$H_S = n_1 I$$

και στο άκρο του πηνίου είναι:

$$H_S/2 = n_1 I/2$$

Ας επιστρέψουμε τώρα στην περυγώση για να δούμε τις αντιστοιχίες.

Κατάντη του δίσκου στο πεδίο $2\vec{H}_D$ κάθετο στον άξονα αντιστοιχεί μια εφαπτομενική επαγόμενη ταχύτητα v_θ . Παρατηρείται μια περιστροφή της ροής με γωνιακή ταχύτητα Ω και φορά αντίθετη ως προς την περιστροφή της περυγώσης.

Πάνω στο δίσκο στο πεδίο \vec{H}_D αντιστοιχεί μια εφαπτομενική ταχύτητα $v_\theta / 2$ και άρα μια γωνιακή ταχύτητα $\Omega/2$. Ανάντη του δίσκου το πεδίο είναι μηδενικό και γι' αυτό το λόγο και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ροής είναι μηδενική.

Ας ονομάσουμε v , την επαγόμενη από το σύστημα των στροβίλων, αξονική ταχύτητα κατάντη του δίσκου του δρομέα. Αυτή η επαγόμενη ταχύτητα που αντιστοιχεί στο μαγνητικό πεδίο $n_1 I$ έχει αντίθετη φορά με την ταχύτητα V_1 . Πάνω στο επίπεδο περιστροφής της πτερύγωσης η αξονική επαγόμενη ταχύτητα είναι $v/2$ που αντιστοιχεί με το μαγνητικό πεδίο $n_1 I / 2$.

Η συνισταμένη αξονική ταχύτητα είναι:

$$V = V_1 - v/2 \quad \text{πάνω στο δρομέα}$$

$$V = V_1 - v \quad \text{κατάντη του δρομέα}$$

Απαλείφοντας το v σ' αυτές τις δύο εξισώσεις, παρατηρούμε ότι η σχέση του Betz $V=(V_1+V_2)/2$ είναι σε ισχύ.

Η ταχύτητα περιστροφής της ροής σε σχέση με την περιστροφή της πτερύγωσης κατάντη του δρομέα είναι $\omega + \Omega$.

$$\text{Έστω } \omega + \Omega = h\omega.$$

$$\text{Τότε } \Omega = (h-1)\omega$$

Σ' αυτές τις συνθήκες η ταχύτητα περιστροφής της ροής σε σχέση με την περιστροφή της πτερύγωσης πάνω στο δρομέα $\omega + \Omega/2$ γίνεται

$$\omega + \frac{\Omega}{2} = (1 + h)\omega/2$$

που αντιστοιχεί σε μια απόσταση r , σε μια εφαπτομενική ταχύτητα $U' = (1+h)\omega r/2$

αν θέσουμε $V_2 = k V_1$ η αξονική ταχύτητα πάνω στο δρομέα, V μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = (1 + k)V_1/2$$

Η συνεφαπτομένη της γωνίας κλίσης I και η συνιστάμενη ταχύτητα $\vec{W} = \vec{V} + \vec{U}$, σε απόσταση r από τον άξονα δίδονται από:

$$\cotan I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r \frac{1+h}{1+k}}{V_1} = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda e$$

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2\cos I}$$

3.3. Υπολογισμός των αξονικών και εφαπτομενικών δυνάμεων. Υπολογισμός ροπής.

Έστω το στοιχείο της πτέρυγας μεταξύ των αποστάσεων r και $r + dr$. Ο υπολογισμός θα γίνει με δύο τρόπους: πρώτον, εξετάζοντας τα αεροδυναμικά φορτία και στη συνέχεια εφαρμόζοντας τα γενικά θεωρήματα της μηχανικής.

3.3.1. Πρώτος υπολογισμός

Όπως και πριν, έχουμε (βλέπε εικόνα 2.1) :

$$dR_z = \frac{1}{2}\rho C_z W^2 l dr \quad \text{και} \quad dR_x = \frac{1}{2}\rho C_x W^2 l dr$$

Με προβολή στον άξονα του δρομέα έχουμε την αξονική συνιστώσα

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I = \frac{1}{2}\rho W^2 l dr (C_z \cos I + C_x \sin I)$$

και με προβολή στο επίπεδο περιστροφής (ταχύτητα U), έχουμε την εφαπτομενική συνιστώσα:

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I = \frac{1}{2}\rho W^2 l dr (C_z \sin I - C_x \cos I)$$

Οι εκφράσεις αυτές μπορούν να γραφούν, θέτοντας:

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

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

και

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

Η συνεισφορά των στοιχείων των p πτερυγίων του δρομέα που βρίσκονται μεταξύ των αποστάσεων r και $r + dr$ αυξάνεται στην ώση καθώς και στη ροπή είναι αντίστοιχα :

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

$$dM = r p dF_u = \frac{1}{2} \rho p l r W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr$$

3.3.2. Δεύτερος υπολογισμός

Τα δύο αυτά μεγέθη (dF και dM) θα υπολογιστούν στη συνέχεια εφαρμόζοντας τα γενικά θεωρήματα της μηχανικής σε μια δακτυλιοειδή φλέβα του ρευστού που διέρχεται από το δρομέα μεταξύ της ακτίνας r και $r + dr$.

Σύμφωνα με το θεώρημα του Euler η στοιχειώδης αξονική ώση:

$$dF = \rho p r dr V^2 (1 - k^2)$$

και η στοιχειώδης ροπή:

$$dM = \rho p r^3 dr V_1 (1 - k^2) \Omega = \rho p r^3 dr \omega V_1 (1 + k) (h - 1)$$

Εξισώνοντας τα αποτελέσματα από τους δύο τρόπους υπολογισμού των αεροδυναμικών φορτίων και αν αντικαταστήσουμε την W με βάση την V_1 έχουμε:

$$C_{zpl} = 2\pi r \frac{V_1^2(1-k^2)\cos\varepsilon}{W^2\cos(I-\varepsilon)} = 8\pi r \frac{(1-k)\cos\varepsilon\sin^2 I}{(1+k)\cos(I-\varepsilon)}$$

Κάνοντας το ίδιο για το dM , παίρνουμε :

$$C_{zpl} = 2\pi r \omega \frac{V_1(1+k)(h-1)\cos\varepsilon}{W^2\sin(I-\varepsilon)} = 4\pi r \frac{(h-1)\sin 2I\cos\varepsilon}{(h+1)\sin(I-\varepsilon)}$$

Από αυτές τις ισότητες, μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_{zpl}\cos(I-\varepsilon)}{8\pi r\cos\varepsilon\sin^2 I}$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_{zpl}\sin(I-\varepsilon)}{4\pi r\sin 2I\cos\varepsilon}$$

Διαιρώντας κατά μέλη αυτό οδηγεί :

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cotan(I-\varepsilon)\cotan I$$

3.4. Τοπικός συντελεστής ισχύος.

Η ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από τη στοιχειώδη φλέβα του ρευστού που περνά μέσα από το δρομέα μεταξύ r και $r + dr$ δίνεται από την έκφραση:

$$dP_u = \omega dM = \rho\pi r^3 dr \omega^2 V_1(1+k)(h-1)$$

Αυτή η τιμή αντιστοιχεί στον τοπικό συντελεστή ισχύος :

$$C_p = \frac{dP}{\rho\pi r dr V_1^3} = \frac{\omega^2 r^2}{V_1^2} (1+k)(h-1) = \lambda^2(1+k)(h-1)$$

όπου :

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_1}$$

3.4.1. Μέγιστος τοπικός συντελεστής ισχύος ενός ιδανικού δρομέα.

Για να καθοριστεί ο μέγιστος συντελεστής ισχύος, θα εξετάσουμε ένα ιδανικό δρομέα, υποθέτοντας ότι οι αεροτομές των περύγων έχουν συντελεστή αντίστασης $C_x = 0$ και επομένως $\tan \varepsilon = C_x / C_z = 0$.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η σχέση G/E μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cotan^2 I = \lambda^2 \frac{(1+h)^2}{(1+k)^2}$$

και ακόμα

$$\lambda^2 \frac{1-k^2}{h^2-1}$$

Αν λύσουμε ως προς h :

$$h = \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}}$$

Επομένως ο συντελεστής ισχύος γίνεται :

$$C_p = \lambda^2(1+k) \left(\sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} - 1 \right)$$

Για μια δεδομένη τιμή του λ , ο συντελεστής ισχύος διέρχεται από ένα μέγιστο ως συνάρτηση του k για :

$$\frac{dC_p}{dk} = 0$$

Υπολογίζοντας αυτήν την παράγωγο προκύπτει το μέγιστο C_p το οποίο επιτυγχάνεται για μια τιμή του k τέτοια ώστε :

$$\lambda^2 = \frac{1-3k+4k^3}{3k-1}$$

Αυτή η έκφραση μπορεί επίσης να γραφτεί ως εξής :

$$4k^3 - 3k(\lambda^2 + 1) + \lambda^2 + 1 = 0$$

Έστω :

$$k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta$$

Αντικαθιστώντας το k στην προηγούμενη σχέση και διαιρώντας με το $(\lambda^2 + 1)^{3/2}$ προκύπτει:

$$4\cos^3 \theta - 3\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} = 0$$

αλλά :

$$4\cos^3 \theta - 3\cos \theta = \cos 3\theta$$

οπότε μπορεί να γραφτεί :

$$\cos 3\theta = \frac{-1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad \text{ή αλλιώς} \quad \cos(3\theta - \pi) = \frac{-1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}$$

και αυτό ισοδυναμεί με :

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}}\right) + \frac{\pi}{3} = \frac{1}{3} \arctan \lambda + \frac{\pi}{3}$$

Για κάθε τιμή του λ , μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη γωνία θ , το k και ως εκ τούτου, τη μέγιστη δυνατή τιμή του συντελεστή ισχύος C_p .

3.5. Βέλτιστες τιμές της γωνίας κλίσης I και του C_{zpl} .

Η γωνία κλίσης I και το γινόμενο C_{zpl} είναι :

$$\cotan l = \lambda_e = \lambda \frac{1+h}{1+k}$$

$$C_{zpl} = 8\pi r \frac{(1-k) \cos \varepsilon \sin^2 I}{(1+k) \cos(I-\varepsilon)}$$

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την προηγούμενη παράγραφο, ο υπολογισμός της γωνίας θ μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε τιμή του λ . Στη συνέχεια μπορούν να προσδιοριστούν οι τιμές του k , h , και κατά συνέπεια εκείνα της λ_e και I .

Για τον υπολογισμό του C_{zpl} , θεωρούμε μια ιδανική περύγωση, στο οποίο το ε ισούται με μηδέν κατά τα προηγούμενα. Έτσι η τιμή για το C_{zpl}/r είναι:

$$\frac{C_{zpl}}{r} = 8\pi \frac{(1-k)}{(1+k)} \tan^2 I \cos I$$

η οποία μπορεί να εκφραστεί επίσης λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση $\cotan I = \lambda_e$

$$\frac{C_{zpl}}{r} = 8\pi \frac{(1-k)}{(1+k)} \frac{1}{\lambda_e \sqrt{\lambda_e^2 + 1}}$$

Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών του C_{zpl}/r και I σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Η γνώση αυτών των τιμών είναι απαραίτητη ώστε να οριστεί σε κάθε σημείο της περύγωσης η χορδή l του προφίλ και της γωνίας σφήνωσης, α .

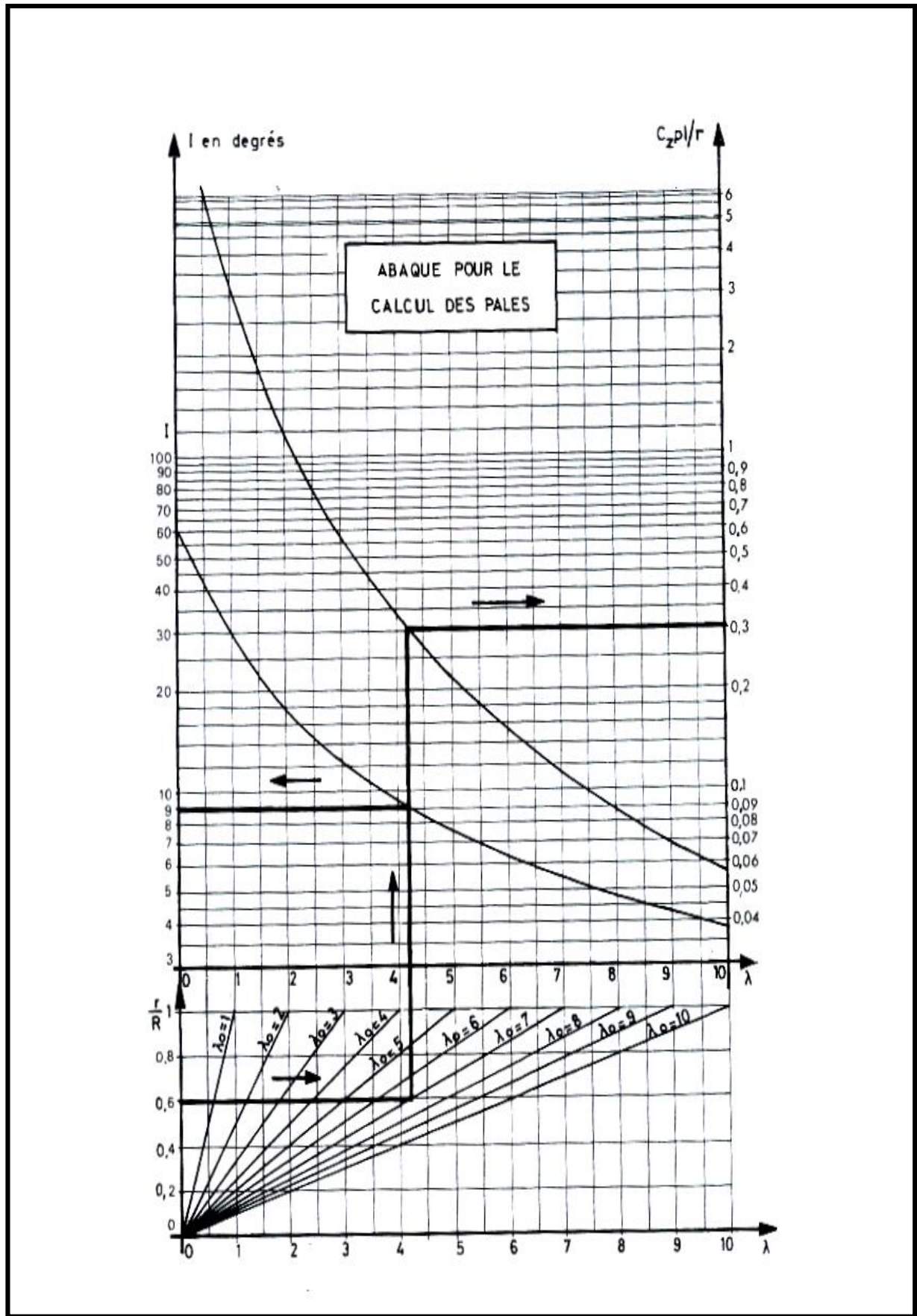
Για να διευκολυνθούν οι εφαρμογές, οι τιμές λ_e , k , h , C_p , C_{zpl}/r και l υπολογίζονται με τη βοήθεια προγράμματος (ΥροlFτερου2.0). Στον πίνακα 3.1 βλέπουμε ένα παράδειγμα με τις τιμές που ελήφθησαν.

| λ | λe | k | h | C_p | C_{zpl}/r | i | λ | λe | k | h | C_p | C_{zpl}/r | i |
|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------------|--------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| 0.100 | 0.670 | 0.473 | 8.866 | 0.116 | 11.149 | 56.193 | 5.000 | 7.555 | 0.335 | 1.018 | 0.587 | 0.217 | 7.540 |
| 0.200 | 0.768 | 0.451 | 4.574 | 0.207 | 9.819 | 52.460 | 5.100 | 7.704 | 0.335 | 1.017 | 0.588 | 0.029 | 7.396 |
| 0.300 | 0.873 | 0.432 | 3.168 | 0.279 | 8.600 | 48.867 | 5.200 | 7.853 | 0.335 | 1.016 | 0.588 | 0.201 | 7.257 |
| 0.400 | 0.984 | 0.416 | 2.483 | 0.336 | 7.506 | 45.466 | 5.300 | 8.002 | 0.335 | 1.015 | 0.588 | 0.187 | 7.123 |
| 0.500 | 1.099 | 0.403 | 2.086 | 0.381 | 6.541 | 42.290 | 5.400 | 8.151 | 0.335 | 1.015 | 0.588 | 0.174 | 6.994 |
| 0.600 | 1.219 | 0.393 | 1.830 | 0.416 | 5.700 | 39.358 | 5.500 | 8.300 | 0.335 | 1.014 | 0.588 | 0.160 | 6.870 |
| 0.700 | 1.343 | 0.384 | 1.655 | 0.444 | 4.975 | 36.672 | 5.600 | 8.449 | 0.335 | 1.014 | 0.589 | 0.148 | 6.750 |
| 0.800 | 1.470 | 0.377 | 1.530 | 0.467 | 4.353 | 34.277 | 5.700 | 8.598 | 0.335 | 1.013 | 0.589 | 0.136 | 6.634 |
| 0.900 | 1.600 | 0.371 | 1.437 | 0.485 | 3.821 | 32.009 | 5.800 | 8.747 | 0.335 | 1.013 | 0.589 | 0.124 | 6.522 |
| 1.000 | 1.732 | 0.366 | 1.366 | 0.500 | 3.367 | 30.000 | 6.000 | 9.046 | 0.335 | 1.012 | 0.589 | 0.112 | 6.308 |
| 1.100 | 1.866 | 0.362 | 1.311 | 0.512 | 2.980 | 28.183 | 6.100 | 9.195 | 0.335 | 1.012 | 0.589 | 0.100 | 6.207 |
| 1.200 | 2.002 | 0.359 | 1.267 | 0.522 | 2.648 | 26.537 | 6.200 | 9.344 | 0.335 | 1.011 | 0.589 | 0.143 | 6.108 |
| 1.300 | 2.140 | 0.356 | 1.232 | 0.531 | 2.363 | 25.046 | 6.300 | 9.494 | 0.335 | 1.011 | 0.589 | 0.138 | 6.013 |
| 1.400 | 2.279 | 0.353 | 1.203 | 0.538 | 2.118 | 23.692 | 6.400 | 9.643 | 0.335 | 1.011 | 0.589 | 0.134 | 5.920 |
| 1.500 | 2.419 | 0.351 | 1.179 | 0.544 | 1.906 | 22.460 | 6.500 | 9.792 | 0.334 | 1.010 | 0.589 | 0.130 | 5.831 |
| 1.600 | 2.560 | 0.349 | 1.159 | 0.549 | 1.723 | 21.337 | 6.600 | 9.942 | 0.334 | 1.010 | 0.590 | 0.126 | 5.744 |
| 1.700 | 2.702 | 0.348 | 1.142 | 0.553 | 1.563 | 20.310 | 6.700 | 10.091 | 0.334 | 1.010 | 0.590 | 0.122 | 5.659 |
| 1.800 | 2.844 | 0.346 | 1.128 | 0.557 | 1.423 | 19.370 | 6.800 | 10.241 | 0.334 | 1.010 | 0.590 | 0.119 | 5.577 |
| 1.900 | 2.988 | 0.345 | 1.115 | 0.560 | 1.300 | 18.506 | 6.900 | 10.390 | 0.334 | 1.009 | 0.590 | 0.116 | 5.498 |
| 2.000 | 3.132 | 0.344 | 1.105 | 0.563 | 1.191 | 17.710 | 7.000 | 10.539 | 0.334 | 1.009 | 0.590 | 0.112 | 5.420 |
| 2.100 | 3.276 | 0.343 | 1.095 | 0.565 | 1.095 | 16.976 | 7.100 | 10.689 | 0.334 | 1.009 | 0.590 | 0.109 | 5.345 |
| 2.200 | 3.421 | 0.343 | 1.087 | 0.568 | 1.010 | 16.296 | 7.200 | 10.838 | 0.334 | 1.009 | 0.590 | 0.106 | 5.271 |
| 2.300 | 3.566 | 0.342 | 1.080 | 0.570 | 0.934 | 15.666 | 7.300 | 10.988 | 0.334 | 1.008 | 0.590 | 0.103 | 5.200 |
| 2.400 | 3.711 | 0.341 | 1.074 | 0.571 | 0.865 | 15.080 | 7.400 | 11.137 | 0.334 | 1.008 | 0.590 | 0.101 | 5.131 |
| 2.500 | 3.857 | 0.341 | 1.068 | 0.573 | 0.804 | 14.534 | 7.500 | 11.287 | 0.334 | 1.008 | 0.590 | 0.098 | 5.063 |
| 2.600 | 4.003 | 0.340 | 1.063 | 0.574 | 0.749 | 14.025 | 7.600 | 11.436 | 0.334 | 1.008 | 0.590 | 0.096 | 4.997 |
| 2.700 | 4.150 | 0.340 | 1.059 | 0.576 | 0.699 | 13.549 | 7.700 | 11.586 | 0.334 | 1.007 | 0.590 | 0.093 | 4.933 |
| 2.800 | 4.296 | 0.339 | 1.055 | 0.577 | 0.654 | 13.103 | 7.800 | 11.735 | 0.334 | 1.007 | 0.590 | 0.091 | 4.871 |
| 2.900 | 4.443 | 0.339 | 1.051 | 0.578 | 0.613 | 12.684 | 7.900 | 11.885 | 0.334 | 1.007 | 0.590 | 0.088 | 4.810 |
| 3.000 | 4.590 | 0.339 | 1.048 | 0.579 | 0.586 | 12.290 | 8.000 | 12.034 | 0.334 | 1.007 | 0.591 | 0.086 | 4.750 |
| 3.100 | 4.737 | 0.338 | 1.045 | 0.580 | 0.542 | 11.919 | 8.100 | 12.184 | 0.334 | 1.007 | 0.591 | 0.084 | 4.692 |
| 3.200 | 4.884 | 0.338 | 1.042 | 0.581 | 0.511 | 11.569 | 8.200 | 12.334 | 0.334 | 1.007 | 0.591 | 0.082 | 4.635 |
| 3.300 | 5.032 | 0.338 | 1.040 | 0.582 | 0.482 | 11.239 | 8.300 | 12.483 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.080 | 4.580 |
| 3.400 | 5.180 | 0.337 | 1.038 | 0.582 | 0.456 | 10.926 | 8.400 | 12.633 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.078 | 4.526 |
| 3.500 | 5.328 | 0.337 | 1.036 | 0.582 | 0.431 | 10.630 | 8.500 | 12.782 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.077 | 4.472 |
| 3.600 | 5.476 | 0.337 | 1.034 | 0.583 | 0.409 | 10.349 | 8.600 | 12.932 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.075 | 4.422 |
| 3.700 | 5.624 | 0.337 | 1.032 | 0.583 | 0.388 | 10.083 | 8.700 | 13.082 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.073 | 4.371 |
| 3.800 | 5.772 | 0.337 | 1.030 | 0.584 | 0.369 | 9.829 | 8.800 | 13.231 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.071 | 4.322 |
| 3.900 | 5.920 | 0.336 | 1.029 | 0.584 | 0.351 | 9.588 | 8.900 | 13.381 | 0.334 | 1.006 | 0.591 | 0.070 | 4.274 |
| 4.000 | 6.068 | 0.336 | 1.027 | 0.585 | 0.334 | 9.358 | 9.000 | 13.531 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.068 | 4.227 |
| 4.100 | 6.215 | 0.336 | 1.026 | 0.585 | 0.319 | 9.138 | 9.100 | 13.680 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.067 | 4.181 |
| 4.200 | 6.365 | 0.336 | 1.025 | 0.585 | 0.305 | 8.928 | 9.200 | 13.830 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.065 | 4.136 |
| 4.300 | 6.514 | 0.336 | 1.024 | 0.586 | 0.291 | 8.728 | 9.300 | 13.980 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.064 | 4.092 |
| 4.400 | 6.662 | 0.336 | 1.023 | 0.586 | 0.278 | 8.536 | 9.400 | 14.129 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.063 | 4.048 |
| 4.500 | 6.811 | 0.336 | 1.022 | 0.586 | 0.267 | 8.353 | 9.500 | 14.279 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.061 | 4.006 |
| 4.600 | 6.960 | 0.336 | 1.021 | 0.586 | 0.255 | 8.177 | 9.600 | 14.429 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.060 | 3.965 |
| 4.700 | 7.108 | 0.336 | 1.020 | 0.587 | 0.245 | 8.008 | 9.700 | 14.578 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.059 | 3.924 |
| 4.800 | 7.257 | 0.335 | 1.019 | 0.587 | 0.235 | 7.846 | 9.800 | 14.728 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.058 | 3.884 |
| 4.900 | 7.406 | 0.335 | 1.018 | 0.587 | 0.226 | 7.690 | 9.900 | 14.878 | 0.334 | 1.005 | 0.591 | 0.057 | 3.845 |
| | | | | | | | 10.000 | 15.028 | 0.334 | 1.004 | 0.591 | 0.055 | 3.807 |

Πίνακας 3.1: Τιμές των λe , k , h , C_p , C_{zpl}/r

Διάγραμμα

Έχουμε επίσης δημιουργήσει ένα διάγραμμα, Πίνακας 3.2, με τις καμπύλες των τιμών $C_z p l / r$ και I ως συνάρτηση του λ . Αυτό το γράφημα μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε γρήγορα, ανάλογα με τη θέση του προφίλ της πτερύγωσης που καθορίζεται από το r/R , τις τιμές της γωνίας κλίσης I και το ποσό του $C_z p l / r$ έτσι ώστε μια ανεμογεννήτρια να παρουσιάζει τις καλύτερες επιδόσεις για την συγκεκριμένη ταχύτητα λ_0 που έχει επιλεγεί. Η χρήση του διαγράμματος είναι απλή. Η συγκεκριμένη ταχύτητα λ_0 που επιλέγεται για την οποία η ανεμογεννήτρια πρέπει να έχει τη μέγιστη απόδοση είναι γνωστή, αρκεί να προβεί από το σημείο τομής της λοξής γραμμής, που χαρακτηρίζεται από τη συγκεκριμένη ταχύτητα λ_0 (από την εξίσωση : $\lambda = \lambda_0 r / R$) και αντιστοιχεί στην οριζόντια θέση του προφίλ που καθορίζεται από την τιμή του r/R , η οποία είναι μια κάθετη γραμμή. Αυτή η κάθετη γραμμή βρίσκεται στην κοπή των καμπύλων $I(\lambda_0)$ και $C_z p l / r$ σε δύο σημεία των οποίων οι συντεταγμένες είναι ίσες με τις τιμές της I και $C_z p l / r$ που ψάχνουμε.



Πίνακας 3.2: Διάγραμμα

Η εφαρμογή των κανόνων εργασίας οδηγεί στα ακόλουθα αποτελέσματα :

$$I = 9^\circ \quad C_z p l / r = 0,3$$

Αυτές οι τιμές μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από τον Πίνακα 3.1. Για αυτήν την ενότητα με συγκεκριμένη ταχύτητα λ θεωρείται ίση με 4,2 ($\lambda = \lambda_0 r / R$). Για αυτή τη τιμή του λ , ο πίνακας δείχνει :

$$I = 8^\circ,93 \quad \text{και} \quad C_z p l / r = 0,305$$

Με την επανάληψη της λειτουργίας για άλλες τιμές του r λαμβάνεται η γωνία κλίσης I και η ποσότητα $C_z p l / r$ σε όλο το μήκος της πτέρυγας. Εν συνεχεία, μπορούμε να καθορίσουμε τις χορδές των διαφόρων προφίλ και τις γωνίες σφήνωσης. Το ίδιο ισχύει και για την γωνία σφήνωσης α όπου συνδέεται με τη γωνία προσβολής με τη σχέση $\alpha = I - i$. Για την επίλυση του προβλήματος, πρέπει να επιλεγθεί και η γωνία προσβολής.

3.6. Συντελεστής ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί με πτέρυγες που παρουσιάζουν αντίσταση. Βέλτιστη γωνία προσβολής.

Έστω τα στοιχεία των πτερύγων μεταξύ r και $r+dr$. Όπως αποδείχτηκε προτύτερα ο συντελεστής ισχύος C_p δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{\omega dM}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{\omega dM}{V dF} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{U dF_u}{V dF_v}$$

Εφόσον $dF = p dF_v$ και $dM = p r dF_u$

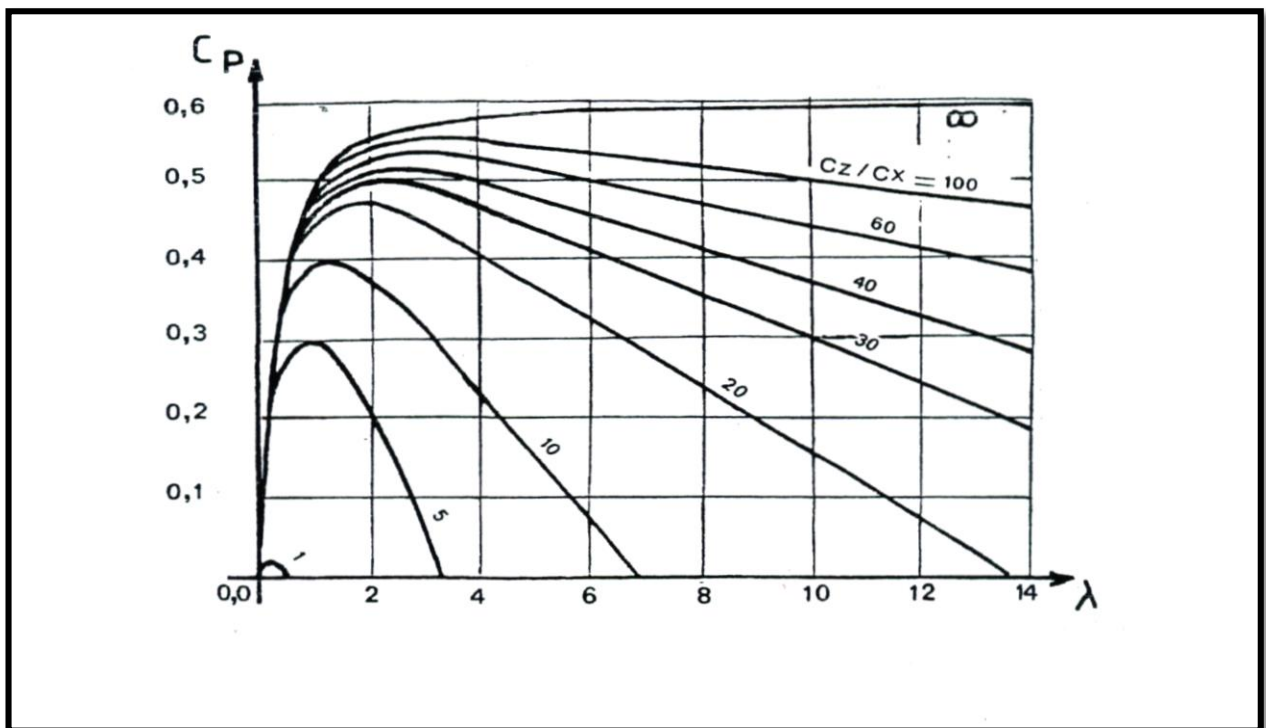
Αντικαθιστώντας τα dF_u , dF_v και V και παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις :

$$\cotan I = \lambda \frac{1+h}{1+k} \quad \text{και} \quad \tan \varepsilon = \frac{C_x}{C_z} \quad \text{έχουμε:}$$

$$C_p = \frac{(1+k)(1-k^2)}{(1+h)} \frac{1 - \tan \varepsilon \cotan I}{1 + \tan \varepsilon \tan I}$$

Όταν το $\tan \varepsilon = 0$, ο πρώτος παράγοντας του δευτέρου μέλους της παραπάνω σχέσης (ο δεύτερος γίνεται ίσος με τη μονάδα) εκφράζει το συντελεστή ισχύος σε μια απόσταση r από τον άξονα, ενός δρομέα με πτέρυγες που δεν παρουσιάζουν αντίσταση. Ο συντελεστής ισχύος C_p μεγιστοποιείται για τις συνθήκες του πίνακα.

Υποθέτοντας ότι το $\tan \varepsilon$ δεν είναι μηδέν (πτέρυγες με μη μηδενικό συντελεστή αντίστασης), η εικόνα 3.2 δείχνει τις μέγιστες τιμές του συντελεστή αντίστασης που είναι δυνατόν να επιτευχθούν σε συνάρτηση με το συντελεστή λ και για διάφορες τιμές του λόγου C_z/C_x . Στο διάγραμμα φαίνεται ότι για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση, σε μεγάλο λ , είναι απαραίτητο οι πτέρυγες να παρουσιάζουν το μέγιστο δυνατό C_z/C_x που οδηγεί στην κατασκευή των πτερύγων με τέλεια αεροδυναμικά προφίλ. Για ένα δεδομένο λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου, λ , ο συντελεστής ισχύος, C_p , είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μικρότερο είναι το $\tan \varepsilon$. Ο συντελεστής ισχύος γίνεται μέγιστος για μια γωνία προσβολής που καθιστά το $\tan \varepsilon$ ελάχιστο, δηλαδή για μια γωνία προσβολής που αντιστοιχεί στο σημείο επαφής της εφαπτομένης με την καμπύλη στο διάγραμμα C_z-C_x . Ξαναβρίσκουμε έτσι το αποτέλεσμα στο οποίο είχαμε οδηγηθεί με την απλουστευμένη θεωρία.



Εικόνα 3.2: Γραφική παράσταση C_p , λ και καμπύλες C_z/C_x .

3.7. Επίδραση του αριθμού των πτερύγων.

Η θεωρία που περιγράφηκε προηγουμένως υποθέτει ένα άπειρο αριθμό πτερύγων. Αυτό δεν είναι αληθινό. Προκύπτουν έτσι απώλειες ενέργειας που οφείλονται σε μια μεγαλύτερη πύκνωση των στροβίλων. Αυτή η απώλεια ενέργειας μελετήθηκε ειδικά από τους Rohrbach, Worobel, Goldstein και Prandtl.

Κατά τον Prandtl η μείωση της απόδοσης που προκύπτει για ένα δρομέα με p πτέρυγες δίνεται από τη σχέση:

$$n_p = \left(1 - \frac{1,39}{p} \sin I\right)^2$$

όπου I είναι η γωνία κλίσης στο ακροπτερύγιο κάθε πτέρυγας.

Υποθέτοντας ότι ο δρομέας λειτουργεί στην περιοχή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας:

$$\sin I = \frac{1}{\sqrt{1 + \cotan^2 I}} = \frac{2}{3\sqrt{\lambda_0^2 + 4/9}}$$

Υποθέτοντας ότι σ' αυτές τις συνθήκες ισχύει η σχέση του Prandtl, εξάγεται :

$$n_p = \left(1 - \frac{0,93}{p\sqrt{\lambda_0^2 + 0,445}}\right)^2$$

Επισημαίνεται ότι η σχέση του Prandtl ισχύει για δρομείς με χαμηλή φόρτιση. Πρακτικά η χρήση της σχέσης αυτής στα προγράμματα υπολογισμού για δρομείς που δοκιμάστηκαν σε αεροσήραγγα, υπό κανονική φόρτιση, οδηγεί σε συντελεστές ροπής και ισχύος που βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.

3.8. Πρακτικός προσδιορισμός της χορδής και της γωνίας σφήνωσης.

Δεν υπάρχει μια καθιερωμένη και μοναδική μέθοδος για την επιλογή των γωνιών κλίσης και κατά συνέπεια για τον υπολογισμό μιας πτέρυγας.

Οι πτέρυγες μπορούν να υπολογίζονται επιλέγοντας σαν γωνία προσβολής, σε κάθε τομή τους, τη γωνία προσβολής που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση.

Έχοντας υπολογίσει το γινόμενο $C_z pl$, ο υπολογισμός της χορδής, l , δεν παρουσιάζει καμιά δυσκολία αφού το C_z και το p είναι επίσης γνωστά. Η γνώση της γωνίας κλίσης I καθώς και της γωνίας προσβολής i_0 επιτρέπει τον υπολογισμό της γωνίας σφήνωσης α ($\alpha = I - i_0$).

Στην πραγματικότητα αυτή η μέθοδος δεν εφαρμόζεται ποτέ ολοκληρωμένα. Αν μια γωνία προσβολής κοντά στη βέλτιστη είναι απαραίτητη για τα προφίλ που βρίσκονται κοντά στα ακροπτερύγια όπου η επιφάνεια σάρωσης ανά μονάδα μήκους είναι μέγιστη, μια τέτοια γωνία στα προφίλ που βρίσκονται κοντά στον άξονα περιστροφής έχει σαν αποτέλεσμα πολύ μεγάλες χορδές και άρα πλάτη των πτερυγών και πολλές φορές απαγορευτικά. Η τιμή του C_z για μια βέλτιστη γωνία προσβολής είναι σχετικά χαμηλή για τα συνήθη προφίλ και η τιμή του γινομένου $C_z pl$ πολύ μεγάλη στην περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής σαν αποτέλεσμα των χαμηλών τιμών του λ που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Έτσι όταν προσεγγίζεται η περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής της πτερυγώσης επιλέγονται γωνίες προσβολής όλο και μεγαλύτερες, μένοντας όμως πάντα στην περιοχή ανόδου (περιοχή αριστερά της μέγιστης τιμής) του διαγράμματος του C_z και πέρα από το $i = i_0$, που αντιστοιχεί σε τιμές του $\tan \epsilon$ μικρότερες από 0,02 έτσι ώστε να μην μειωθεί υπερβολικά η αεροδυναμική απόδοση.

Μπορεί να υιοθετηθεί σαν κατανομή της γωνίας προσβολής σαν συνάρτηση της απόστασης, r , από τον άξονα περιστροφής, η σχέση $i = i_0 - 5 + 5 \sqrt{(R/r)}$. Αυτή η σχέση δίνει καλά αποτελέσματα για την πλειοψηφία των αεροδυναμικών προφίλ και στην απόσταση R (ακροπτερύγιο) η γωνία προσβολής $i = i_0$. Για τις υπόλοιπες θέσεις, r , οι γωνίες προσβολής, i αυξάνονται παραμένοντας όμως σε μέτρια επίπεδα.

Αυτό έχει μόνο μικρή επίδραση στην απόδοση. Αν κοιτάξει κανείς τα χαρακτηριστικά των αεροδυναμικών προφίλ, θα παρατηρήσει ότι ο λόγος C_z/C_x που είναι αντίστροφος με το $\tan \epsilon$, παραμένει πολύ ψηλός και πέρα του i_0 , όσο περιοριζόμαστε σε 5 ή 6 μοίρες. Παραδείγματος χάρη για ένα προφίλ NACA 4412 η τιμή του C_z/C_x που φθάνει το 85 για $i = i_0 = 5^\circ$, γίνεται 70 για $i = 11^\circ$ και 60 για $i = 13^\circ$. Επίσης η επιφάνεια σάρωσης ανά μονάδα μήκους μικραίνει όλο και περισσότερο όσο πλησιάζουμε κοντά στον άξονα περιστροφής. Η αεροδυναμική απόδοση αυτών των πτερυγών είναι πολύ καλή.

Μερικοί σχεδιαστές, επιλέγουν γωνίες προσβολής στο ακροπτερύγιο μερικές μοίρες μεγαλύτερες από τη βέλτιστη με σκοπό να ελαττώσουν τις χορδές κοντά στο ακροπτερύγιο. Το γινόμενο $C_z pl$ είναι σταθερό για ένα δεδομένο λόγο ταχυτήτων, λ , το C_z αυξάνεται με τη γωνία προσβολής και κατά συνέπεια η χορδή μειώνεται. Γι αυτές τις πτέρυγες η απόδοση δεν είναι τόσο υψηλή όσο για εκείνες που έχουν υπολογιστεί με $i = i_0$ στο ακροπτερύγιο, αλλά η μείωση

της απόδοσης παραμένει αποδεκτή όσο δεν ξεπερνιέται υπερβολικά η τιμή του i_0 . Είναι εξάλλου δυνατό να ισοσκελιστεί αυτό το μειονέκτημα αυξάνοντας λίγο τη διάμετρο του δρομέα. Υπολογίζεται ότι για να ισοσκελιστεί μια μείωση του συντελεστή ισχύος κατά 1%, χρειάζεται να αυξηθεί η διάμετρος D του δρομέα κατά $\Delta D = 0,005D$. Η μείωση της ροπής εκκίνησης που προκύπτει από την ταυτόχρονη μείωση των χορδών και της γωνίας σφήνωσης στην περιοχή κοντά στον άξονα περιστροφής, μπορεί να αποδειχτεί περισσότερο ενοχλητική. Αλλά συχνά η ανεμογεννήτρια ξεκινά, μόλις η ταχύτητα ανέμου περάσει το όριο της παραγωγικότητας, με τη βοήθεια της γεννήτριας που λειτουργεί σαν κινητήρας. Πολλές φορές υιοθετείται αυτή η λύση γιατί έχει σαν αποτέλεσμα πιο ελαφρούς δρομείς. Είναι ενδιαφέρονσα λύση κυρίως για ανεμογεννήτριες μεγάλων διαμέτρων γιατί τότε οι καμπτικές ροπές γίνονται κύριες σε σχέση με τις υπόλοιπες ροπές. Η μεταβολή τους κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής της πτερύγωσης είναι μια πηγή εναλλασσόμενης κόπωσης.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να πάρει υπόψη του ο σχεδιαστή μιας πτερύγωσης είναι η ευκολία της κατασκευής των πτερύγων.

Συχνά για ευκολία της κατασκευής της πτέρυγας χρειάζεται τα χείλη προσβολής και εκφυγής της να είναι ίσια (ευθεία). Η πτερύγωση υπολογίζεται με την κλασική μέθοδο. Στη συνέχεια παίρνονται υπόψη μόνο δύο-τρία προφίλ σαν προφίλ αναφοράς. Οι χορδές και οι γωνίες σφήνωσης των ενδιάμεσων προφίλ σχεδιάζονται ευθυγραμμίζοντας τα χείλη προσβολή και εκφυγής των προφίλ αναφοράς. Ο υπολογισμός της ροπής και ισχύος δείχνει ότι η διόρθωση των εξωτερικών ακμών της πτέρυγας οδηγεί σε μείωση της απόδοσης αλλά αυτή η μείωση είναι πολύ μικρή αν τα προφίλ αναφοράς έχουν επιλεγεί σωστά.

3.9. Πρόβλεψη χαρακτηριστικών πτερύγωσης.

Η πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών μιας πτερύγωσης (καμπύλες των συντελεστών αντίστασης, ροπής και ισχύος) μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου, πριν την κατασκευή της είναι πολύ σημαντικό. Η γνώση αυτών των χαρακτηριστικών της πτερύγωσης πριν την κατασκευή της μπορεί να επιτρέψει τις διορθώσεις στον αρχικό σχεδιασμό με σκοπό να επιτευχθεί μια καλύτερη απόδοση ή να γίνει πιο οικονομική.

Στις προηγούμενες παραγράφους αποδείχτηκε ότι η στοιχειώδης ώση, dF και η στοιχειώδης ροπή, dM , που οφείλονται στα αεροδυναμικά φορτία που αξασκούνται πάνω στα στοιχεία των πτερύγων σε απόσταση μεταξύ r και $r+dr$ από τον άξονα εκφράζεται από τις σχέσεις:

$$dF = \rho \pi r V_1^2 (1 - k^2) dr$$

$$dM = \rho \pi r^3 \omega V_1 (1 + k)(h - 1) dr$$

Στη συνέχεια καθορίσαμε τα G και E , παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις που συνδέουν τα I και W με τα V_1 , k και h :

$$W = \frac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2\cos I}$$

$$\cotan I = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_0 \frac{r}{R} \frac{1+h}{1+k}$$

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_z p l \cos(I - \varepsilon)}{8\pi r \cos \varepsilon \sin^2 I}$$

και

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_z p l \sin(I - \varepsilon)}{4\pi r \sin 2I \cos \varepsilon}$$

Για να υπολογιστεί η ώση και η ροπή αρκεί να ολοκληρωθούν οι σχέσεις που δίνουν τα dF και dM :

$$F = \int_0^R \rho \pi V_1^2 (1 - k^2) r dr$$

και

$$M = \int_0^R \rho \pi V_1 \omega (1 + k)(h - 1) r^3 dr$$

Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στους παρακάτω συντελεστές ώσης και ροπής:

$$C_F = \frac{2F}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 (1 - k^2) \frac{r}{R} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

$$C_M = \frac{2M}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 \lambda (1 + k)(h - 1) \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Παίρνοντας υπόψη τις σχέσεις:

$$\lambda = \frac{1+k}{1+h} \cotan l \quad \text{και} \quad E = \frac{h-1}{h+1}$$

ο συντελεστής ροπής γίνεται:

$$C_M = 2 \int_0^1 (1+k)^2 E \cotan l \frac{r^2}{R^2} d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Θέτοντας:

$$f_r = (1-k^2) \frac{r}{R} \quad \text{και} \quad m_r = (1+k)^2 E \cotan l \frac{r^2}{R^2}$$

Οι συντελεστές ώσης και ροπής γράφονται σαν:

$$C_F = 2 \int_0^1 f_r d\left(\frac{r}{R}\right) \quad \text{και} \quad C_M = 2 \int_0^1 m_r d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας τα k και h είναι γνωστά για κάθε αεροτομή πάνω στην πτέρυγα. Έτσι ο υπολογισμός της αξονικής ώσης, της ροπής, της ισχύος καθώς και των αντίστοιχων συντελεστών δεν παρουσιάζουν καμία δυσκολία.

Αν ο δρομέας στρέφεται με ένα λόγο ταχυτήτων, λ_0 , διαφορετικό από αυτόν για τον οποίο υπολογίστηκε τότε η γωνία προσβολής αλλάζει τιμή όπως και τα k και h , η ώση, η ροπή και οι αντίστοιχοι συντελεστές επίσης.

Πρακτικά, για τον προσδιορισμό των C_p και C_M , θεωρούνται διάφορες τιμές της σχέσης r/R (παραδείγματος χάρη 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1). Στις αντίστοιχες αποστάσεις από τον άξονα περιστροφής, θα μεταβάλλεται η γωνία προσβολής αυθαίρετα κατά μια μοίρα και θα υπολογίζονται για κάθε r/R και κάθε γωνία προσβολής, σύμφωνα με τον πίνακα 3.3 τα παρακάτω:

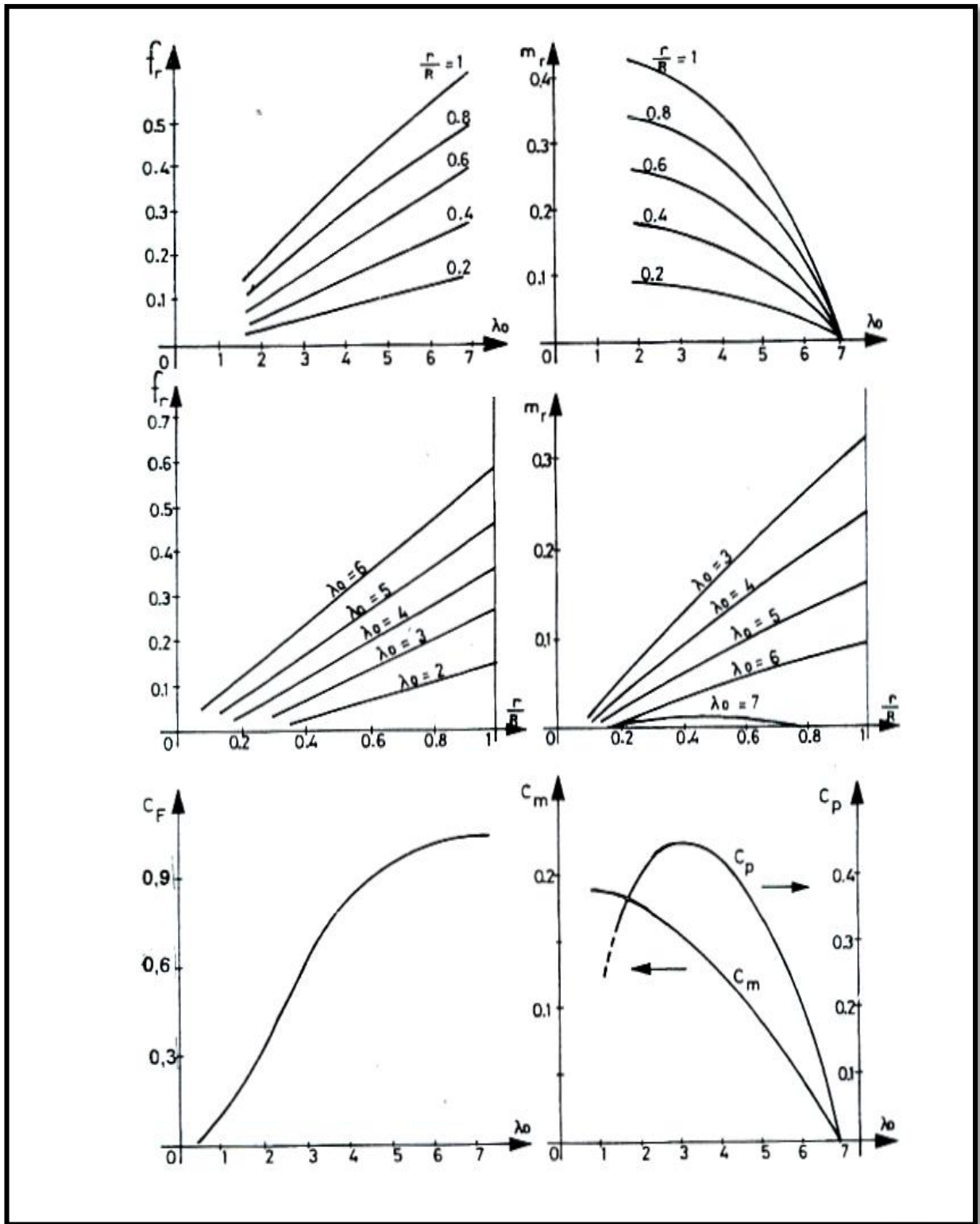
- η γωνία κλίσης l προσθέτοντας τη γωνία προσβολής στη γωνία σφήνωσης του στοιχείου που υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραπάνω μεθόδους,
- το C_Z και η γωνία ε
- οι τιμές των G , E , k , h , λ_0 , f_r και m_r από τις αντίστοιχες σχέσεις.

| r/R | r_1/R_1 | | | | | r_2/R_2 |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| α | α_1 | | | | | α_2 |
| I | I_1 | | | | | I_2 |
| i | i_1 | i_2 | i_3 | i_4 | i_5 | |
| C_z | | | | | | |
| $\text{tg } \varepsilon$ | | | | | | |
| $I = \alpha + i$ | | | | | | |
| $G = \frac{1-k}{1+k} - \frac{C_z p l \cos(I-\varepsilon)}{8 \pi r \cos \varepsilon \sin^2 I}$ | | | | | | |
| $k = \frac{1-G}{1+G}$ | | | | | | |
| $E = \frac{h-1}{h+1} - \frac{C_z p l \sin(I-\varepsilon)}{4 \pi r \sin 2I \cos \varepsilon}$ | | | | | | |
| $h = \frac{1+E}{1-E}$ | | | | | | |
| $\lambda_0 = \frac{R}{r} \frac{1+k}{1+h} \cotg I$ | | | | | | |
| $f_r = (1-k^2) \frac{r}{R}$ | | | | | | |
| $m_r = (1+k)^2 E \cotg I \frac{r^2}{R^2}$ | | | | | | |

Πίνακας 3.3: C_z , I και οι τιμές των G, E, k, h, l_0, f_r και m_r

Αφού έχουν γίνει οι υπολογισμοί χαράζονται οι καμπύλες των f_r και m_r σαν συνάρτηση του λ_0 , μια καμπύλη για κάθε r/R . Στη συνέχεια σε νέα διαγράμματα χαράζονται ξανά οι καμπύλες των f_r και m_r σαν συνάρτηση του r/R με τις τιμές των προηγούμενων διαγραμμάτων που αντιστοιχούν στις ίδιες τιμές του λ_0 . Αρκεί στη συνέχεια να μετρηθεί η επιφάνεια των επιφανειών μεταξύ του άξονα των X , την κάθετη που περνά από το $X=1$ και τις διάφορες καμπύλες που αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές του λ_0 , για να υπολογιστούν μετά διπλασιασμό οι συντελεστές της ώσης και της ροπής συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων, λ_0 .

Ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από την καμπύλη C_M (λ_0) πολλαπλασιάζοντας τις τεταγμένες της καμπύλης με τις αντίστοιχες τετμημένες της: $C_P = C_M \lambda$.



Εικόνα 3.3: Υπολογισμός συντελεστή ισχύος ($C_P = C_M \lambda$)

3.10. Σύγκριση των αποτελεσμάτων απο τις διάφορες θεωρίες.

Υπάρχουν πολλές άλλες θεωρίες σαν αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω όπως των Stefaniak, Hutter και Sabinin. Για να γίνουν αντιληπτές οι διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα κάθε μιας, υπολογίστηκε η ποσότητα $C_z p l / r = f(\lambda)$ για κάθε τιμή του λ και οι αντίστοιχες γωνίες κλίσης I σε βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (βλέπε πίνακες 3.4 και 3.5).

| λ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Méthode simplifiée | 4,65 | 1,32 | 0,608 | 0,345 | 0,222 | 0,155 | 0,114 | 0,087 | 0,069 | 0,056 |
| Hütter | 3,5 | 1,20 | 0,58 | 0,32 | 0,215 | 0,155 | 0,12 | 0,08 | 0,07 | 0,055 |
| Stéfaniak | 3,37 | 1,19 | 0,572 | 0,33 | 0,216 | 0,152 | 0,114 | 0,088 | 0,069 | 0,056 |
| Sabinin | 3,71 | 1,31 | 0,63 | 0,363 | 0,237 | 0,167 | 0,125 | 0,097 | 0,076 | 0,062 |
| Théorie tourb. de Glauert, d'Amherst | 3,37 | 1,19 | 0,576 | 0,334 | 0,217 | 0,152 | 0,112 | 0,086 | 0,068 | 0,056 |

Πίνακας 3.4 : Τιμές $C_z p l / r$.

| λ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|------|------|-------|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Méthode simplifiée | 33,7 | 18° | 12° | 9,5 | 7,6 | 6,3 | 5,5 | 4,8 | 4,2 | 3,8 |
| Hütter | 30° | 18° | 12° | 9,2 | 7,6 | 6,3 | 5,5 | 4,5 | 4,2 | 3,8 |
| Stéfaniak | 30° | 17,7 | 12,3 | 9,36 | 7,54 | 6,3 | 5,5 | 4,5 | 4,2 | 3,8 |
| Sabinin | 30° | 17,5 | 12° | 9,5 | 7,6 | 6,3 | 5,5 | 4,5 | 4,2 | 3,8 |
| Théorie tourb. de Glauert, d'Amherst | 30° | 17,7 | 12,29 | 9,36 | 7,54 | 6,3 | 5,42 | 4,75 | 4,23 | 3,8 |

Πίνακας 3.5 : Τιμές της γωνίας κλίσης I σε μοίρες.

Οι πίνακες δείχνουν ότι οι διαφορές είναι ελάχιστες. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τη ποσότητα $C_z p l / r$ με τη θεωρία του Sabinin είναι μεγαλύτερες κατά 10% από τις τιμές που υπολογίζονται με τις άλλες μεθόδους. Η απλουστευμένη μέθοδος οδηγεί για μικρά λ σε τιμές για τη ποσότητα $C_z p l / r$ λίγο πιο αυξημένες από τις τιμές που υπολογίζονται με τη βοήθεια των υπολοίπων θεωριών.

4. Εγχειρίδιο χρήσης του ΥποFterou2.0.

Η εφαρμογή ΥποFterou2.0 είναι μία εφαρμογή σε πρόγραμμα excel το οποίο βασίστηκε πάνω σε παρόμοια παλαιότερη έκδοση. Έγινε επανεξέταση ως προς την αξιοπιστία των υπολογισμών της εφαρμογής, επίσης έγινε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός απλούστερου και φιλικότερου προς τον χρήστη “περιβάλλοντος”. Κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς για προφίλ πτερύγωσης **NACA4415** σύμφωνα με τα δεδομένα που εισάγουμε και με βάση το τυπολόγιο το οποίο αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια μας δίνει την γεωμετρία και τα στοιχεία που μας είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό της φτερωτής .

Παρακάτω παρουσιάζεται η τεκμηρίωση της εφαρμογής ΥποFterou2.0 με τους τύπους που βασίζονται στο βιβλίο “Les éoliennes” του D. Le Gourières [8].

4.1.Υπολογιστικό φύλλο: Φτερό



Στην πρώτη καρτέλα έχουμε τα εξής δεδομένα:

- την ακτίνα του φτερού **R** σε (m)
- τον αριθμό των φτερών **P**
- τον λόγο ταχυτήτων λ_0 (η τιμή μπορεί να μεταβληθεί)
- τον αριθμό των κομματιών **i**
- την κλίση του φτερού **pitch** σε (°)
- την ροπή εκκίνησης **cogging torque** σε (Ntm)
- τον αρχικό συντελεστή ροπής **Cm_o**
- την ταχύτητα εκκίνησης **Vsu** σε (m/s) η οποία προκύπτει:

$$\blacksquare V_{su} = \sqrt{\frac{2 * cogging\ torque}{Cm_o * 0,6 * \pi * R^3}}$$

- την ροπή βραχυκυκλώματος της γεννήτριας **Tshortcirc** σε (Ntm)
- την ταχύτητα ξεφρεναρίσματος **V_{ξεφρ}** σε (m/s) η οποία προκύπτει:

$$\blacksquare V_{ξεφρ} = \left(\sqrt{\frac{Cm_o * 0,61 * \pi * R^2}{T_{shortcirc}}} \right)^{-1}$$

Στη συνέχεια περνάμε στις πράξεις για εύρεση ακτίνας προτεινόμενου φτερού όπου μπορούμε να εισάγουμε τα δικά μας στοιχεία (κελιά με κόκκινο χρώμα γραμμάτων):

- την επιθυμητή ισχύ **P** σε (W)
- το συντελεστή ισχύος **C_p**
- την πυκνότητα του αέρα **ρ** σε (kg/m³)
- την ηλεκτρική απόδοση **η_{ηλ}**
- την ονομαστική ταχύτητα του αέρα **V_{ον}** σε (m/s)
- και τέλος στο πράσινο κελί μας εμφανίζει την προτεινόμενη ακτίνα φτερού **R** σε (m) η οποία προκύπτει:

$$R = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\eta_{\eta\lambda} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot V_{ον}^3}}$$

Επίσης θεωρούμε ως σταθερά την αρχική γωνία προσβολής *i₀* και τον συντελεστή *A*:

- *i₀* = 5
- *A* = 5

Ο παρακάτω πίνακας (εικόνα 4.1) χωρίζει το φτερό σε 10 ίσα κομμάτια και μας δίνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την γεωμετρία του κάθε κομματιού. Οπότε έχουμε:

| Τομή Πτερυγίου | r (m) | l flow angle | ir (angle of attack) | a (setting angle) | CL=Cz | c chord (m) | δ% | δ (mm) |
|----------------|---------|--------------|----------------------|-------------------|-------|-------------|--------|--------|
| | | | | | | | | 0.25 |
| 1 | 0.01596 | 42.906 | 15.811 | 27.095 | 1.300 | 0.0238 | 23.094 | 5.50 |
| 2 | 0.03192 | 30.779 | 11.180 | 19.599 | 1.300 | 0.0242 | 21.666 | 5.23 |
| 3 | 0.04789 | 23.185 | 9.129 | 14.057 | 1.147 | 0.0227 | 20.326 | 4.62 |
| 4 | 0.06385 | 18.341 | 7.906 | 10.436 | 1.047 | 0.0202 | 19.069 | 3.84 |
| 5 | 0.07981 | 15.080 | 7.071 | 8.009 | 0.979 | 0.0177 | 17.889 | 3.16 |
| 6 | 0.09577 | 12.765 | 6.455 | 6.310 | 0.928 | 0.0156 | 16.783 | 2.61 |
| 7 | 0.11174 | 11.049 | 5.976 | 5.073 | 0.889 | 0.0138 | 15.745 | 2.17 |
| 8 | 0.12770 | 9.731 | 5.590 | 4.141 | 0.857 | 0.0123 | 14.771 | 1.82 |
| 9 | 0.14366 | 8.689 | 5.270 | 3.418 | 0.831 | 0.0111 | 13.857 | 1.54 |
| 10 | 0.15962 | 7.846 | 5.000 | 2.846 | 0.809 | 0.0101 | 13.000 | 1.31 |

Εικόνα 4.1

- Η στήλη **Τομή Πτερυγίου** εμφανίζει τον αριθμό της τομής ανάλογα με τις τομές τις οποίες έχουμε ορίσει να χωριστεί η φτερωτή. (Προτειν. τιμή: 10)

- Η στήλη **r** υπολογίζει την ακτίνα σε (m) της κάθε τομής πτερυγίου απο την αρχή (κέντρο) της φτερωτής σύμφωνα με τον τύπο:

$$\bullet \quad r = \text{Τομή Πτερυγίου} * \frac{R}{i}$$

Όπου i είναι ο συνολικός αριθμός κομματιών/τομών.

- Η στήλη **I flow angle** υπολογίζει την γωνία μεταξύ της συνισταμενης ταχύτητας W και της περιφερειακής ταχύτητας ωr στο τρίγωνο ταχυτήτων σε (°) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad I = \arctan\left(\frac{1}{\lambda e}\right) * \frac{180}{\pi}$$

- Η στήλη **ir (angle of attack)** υπολογίζει την γωνία προσβολής σε (°) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad ir = A * \sqrt{\frac{R}{r}}$$

- Η στήλη **a (setting angle)** υπολογίζει την γωνία σφήνωσης σε (°) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad a = (I - ir) + pitch$$

- Η στήλη **CL=Cz** υπολογίζει τον συντελεστή άνωσης με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad \text{εάν } ir < 11 \text{ τότε } CL = 0,4 + \left(\frac{0,9}{11}\right) * ir \text{ αλλιώς } CL = 1,3$$

- Η στήλη **c chord** υπολογίζει την χορδή της φτερωτής σε (m) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad c = \frac{Q * r * (1 - k) * 8 * \pi}{Cl * 3 * (1 - k) * (\lambda e * \sqrt{\lambda e^2 + 1})}$$

- Η στήλη **δ%** υπολογίζει το πάχος της χορδής σε (%) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad \delta\% = 0,1 * \delta / C$$

- Η στήλη **δ** υπολογίζει το πάχος της φτερωτής σε (mm) με βάση τον τύπο:

$$\bullet \quad \delta = C * 0,13 * 1000 * e^{\left(\frac{R-r}{r}\right)}$$

Το γ είναι μεταβλητή τιμή και επηρεάζει το πάχος.

4.2. Υπολογιστικό φύλλο: Charts



Στο συγκεκριμένο φύλλο εμφανίζονται συνολικά όλα τα διαγράμματα τα οποία προκύπτουν από τα επόμενα φύλλα εργασίας για λόγους διευκόλυνσης. Τα διαγράμματα είναι τα εξής:

- Προφίλ φτερού
- Ποσοστό πάχους δ (%)
- Μετατόπιση Γωνίας α
- I Flow Angle/λο
- i Angle of attack/λο
- $C_m - C_p - C_f$
- Ισχύς από 3 m/s έως 15 m/s
- Ισχύς από 2 m/s έως 20 m/s
- Ροπή από 3 m/s έως 15 m/s
- Ροπή από 2 m/s έως 20 m/s
- Αντίσταση από 3 m/s έως 15 m/s
- Αντίσταση από 2 m/s έως 20 m/s

4.3.Υπολογιστικό φύλλο: Main



Σε αυτό το φύλλο γίνονται οι υπολογισμοί των παραμέτρων λ , θ , κ , h , και $\lambda\varepsilon$. Προκύπτουν αντίστοιχα απο τους τύπους:

- Ο λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου λ (tip speed ratio/TSR) απο τον τύπο:

- εάν $\lambda_0 * \frac{r}{R} \leq \lambda_0$ τότε $\lambda = \lambda_0 * r/R$

- Η γωνία βελτιστοποίησης θ :

- $\theta = \frac{1}{3} * \arctan \lambda + \frac{\pi}{3}$

- Ο συντελεστής ταχυτήτων ανάντι και πάνω στο δρομέα* κ :

- $\kappa = \cos \theta * \sqrt{\lambda^2 + 1}$

- Ο λόγος γωνιακών ταχυτήτων h :

- $h = \sqrt{1 + \frac{1-\kappa^2}{\lambda^2}}$

- Ο λόγος βελτιστοποίησης $\lambda\varepsilon$:

- $\lambda\varepsilon = \lambda * \frac{1+h}{1+\kappa}$

Επίσης γίνονται και οι πράξεις για να απεικονιστεί το προφίλ του φτερού σε διάγραμμα με βαση την απόσταση κάθε κομματιού και την χορδή του.

4.4.Υπολογιστικό φύλλο: I flow



Γίνεται υπολογισμός του **I** για κάθε κομμάτι της πτερύγωσης και για διαφορετικές τιμές του λ (απο 0 έως 58,85). Προκύπτει απο τον τύπο:

$$I = \frac{180}{\pi} * \arctan\left(\frac{R}{r * \lambda_0}\right)$$

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | κομμάτι | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3 | | r | 0.016 | 0.033 | 0.049 | 0.065 | 0.081 | 0.098 | 0.114 | 0.130 | 0.146 | 0.163 | |
| 4 | | λ ₀ | I Flow Angle | | | | | | | | | | Chart |
| 5 | | 1E-11 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | 90.00 | |
| 6 | | 0.2 | 88.85 | 87.71 | 86.57 | 85.43 | 84.29 | 83.16 | 82.03 | 80.91 | 79.80 | 78.69 | |
| 7 | | 0.4 | 87.71 | 85.43 | 83.16 | 80.91 | 78.69 | 76.50 | 74.36 | 72.26 | 70.20 | 68.20 | |
| 8 | | 0.6 | 86.57 | 83.16 | 79.80 | 76.50 | 73.30 | 70.20 | 67.22 | 64.36 | 61.63 | 59.04 | |
| 9 | | 0.8 | 85.43 | 80.91 | 76.50 | 72.26 | 68.20 | 64.36 | 60.75 | 57.38 | 54.25 | 51.34 | |
| 10 | | 1 | 84.29 | 78.69 | 73.30 | 68.20 | 63.43 | 59.04 | 55.01 | 51.34 | 48.01 | 45.00 | |
| 11 | | 1.2 | 83.16 | 76.50 | 70.20 | 64.36 | 59.04 | 54.25 | 49.97 | 46.17 | 42.80 | 39.81 | |
| 12 | | 1.4 | 82.03 | 74.36 | 67.22 | 60.75 | 55.01 | 49.97 | 45.58 | 41.76 | 38.44 | 35.54 | |
| 13 | | 1.6 | 80.91 | 72.26 | 64.36 | 57.38 | 51.34 | 46.17 | 41.76 | 38.00 | 34.78 | 32.01 | |
| 14 | | 1.9 | 79.24 | 69.19 | 60.32 | 52.77 | 46.47 | 41.26 | 36.94 | 33.34 | 30.32 | 27.76 | |

Εικόνα 4.2

4.5.Υπολογιστικό φύλλο: i attack



Γίνεται υπολογισμός της γωνίας προσβολής **i** για κάθε κομμάτι μεταβάλλοντας το λ (απο 0 έως 58,85) και χρησιμοποιώντας τις τιμές του I που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Ο τύπος είναι:

$$i = I - a$$

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | κομμάτι | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3 | | r | 0.016 | 0.033 | 0.049 | 0.065 | 0.081 | 0.098 | 0.114 | 0.130 | 0.146 | 0.163 | |
| 4 | | λ ₀ | i Angle of attack | | | | | | | | | | Chart |
| 5 | | 1E-11 | 60.35 | 66.95 | 72.59 | 76.57 | 79.36 | 81.38 | 82.87 | 84.02 | 84.92 | 85.64 | |
| 6 | | 0.2 | 59.20 | 64.66 | 69.16 | 71.99 | 73.65 | 74.53 | 74.90 | 74.93 | 74.72 | 74.33 | |
| 7 | | 0.4 | 58.06 | 62.38 | 65.75 | 67.48 | 68.05 | 67.88 | 67.23 | 66.28 | 65.12 | 63.84 | |
| 8 | | 0.6 | 56.91 | 60.11 | 62.39 | 63.07 | 62.66 | 61.58 | 60.09 | 58.38 | 56.55 | 54.68 | |
| 9 | | 0.8 | 55.77 | 57.86 | 59.10 | 58.82 | 57.56 | 55.73 | 53.62 | 51.40 | 49.17 | 46.98 | |
| 10 | | 1 | 54.64 | 55.64 | 55.89 | 54.77 | 52.80 | 50.41 | 47.88 | 45.36 | 42.93 | 40.64 | |
| 11 | | 1.2 | 53.50 | 53.46 | 52.79 | 50.93 | 48.40 | 45.62 | 42.84 | 40.19 | 37.72 | 35.45 | |

Εικόνα 4.3

4.6.Υπολογιστικό φύλλο: CL



Γίνεται υπολογισμός του συντελεστή άνωσης **CL** για κάθε κομμάτι της πτερύγωσης μεταβάλλοντας το λ (απο 0 έως 58,85) και χρησιμοποιώντας τις τιμές του i που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Προκύπτει ως εξής:

Εάν $i < -10$

εάν $i < -65$

$$CL = -0,0373 * i - 3,5224$$

αλλιώς

εάν $i < -10$

$$CL = -0,95$$

αλλιώς

εάν $i < 30$

$$CL = -7 * 10^{-5} * i^3 - 0,0004 * i^2 + 0,0962 * i + 0,242$$

αλλιώς

$$CL = -7 * 10^{-5} * i^3 - 0,0004 * i^2 + 0,0962 * i + 0,242$$

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | κομμάτι | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3 | | γ | 0.016 | 0.032 | 0.048 | 0.064 | 0.080 | 0.096 | 0.112 | 0.128 | 0.144 | 0.160 | |
| 4 | | λ ₀ | CL | | | | | | | | | | |
| 5 | | 1E-11 | 0.91 | 0.70 | 0.53 | 0.40 | 0.32 | 0.26 | 0.22 | 0.18 | 0.16 | 0.14 | |
| 6 | | 0.2 | 0.94 | 0.77 | 0.64 | 0.56 | 0.51 | 0.50 | 0.49 | 0.50 | 0.51 | 0.53 | |
| 7 | | 0.4 | 0.96 | 0.83 | 0.74 | 0.70 | 0.69 | 0.71 | 0.74 | 0.77 | 0.81 | 0.85 | |
| 8 | | 0.6 | 0.99 | 0.89 | 0.84 | 0.83 | 0.85 | 0.88 | 0.93 | 0.97 | 1.01 | 1.05 | |
| 9 | | 0.8 | 1.01 | 0.95 | 0.92 | 0.94 | 0.97 | 1.02 | 1.06 | 1.09 | 1.12 | 1.14 | |
| 10 | | 1 | 1.03 | 1.00 | 0.99 | 1.02 | 1.06 | 1.10 | 1.13 | 1.15 | 1.15 | 1.15 | |
| 11 | | 1.2 | 1.05 | 1.04 | 1.05 | 1.08 | 1.12 | 1.14 | 1.15 | 1.15 | 1.13 | 1.10 | |

Εικόνα 4.4

4.7.Υπολογιστικό φύλλο: ε



Σε αυτό το φύλλο εργασίας γίνεται υπολογισμός του ε για κάθε κομμάτι της περύγωσης μεταβάλλοντας το λ (απο 0 έως 58,85) και χρησιμοποιώντας τις τιμές του i και του CL που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Προκύπτει ως εξής:

Εάν $i < -5$

$$\epsilon = \frac{180}{\pi * CL} * \arctan(3 * 10^{-5} * i^2 - 0,037 * i - 0,218)$$

αλλιώς

εάν $i < 29$

$$\epsilon = \frac{180}{\pi * CL} * \arctan(7 * 10^{-8} * i^4 + 2 * 10^{-6} * i^3 + 0,0003 * i^2 + i + 0,0159)$$

αλλιώς

$$\epsilon = \frac{180}{\pi * CL} * \arctan(2,5 * 10^{-8} * i^4 - 6,0513 * 10^{-6} * i^3 + 0,0001018693 * i^2 + 0,05811877 * i - 1,2164)$$

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | κομμάτι | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3 | | r | 0.016 | 0.033 | 0.049 | 0.065 | 0.081 | 0.098 | 0.114 | 0.130 | 0.146 | 0.163 | |
| 4 | | λo | ε | | | | | | | | | | |
| 5 | | 1E-11 | 59.79 | 66.15 | 71.69 | 75.65 | 78.44 | 80.45 | 81.95 | 83.09 | 83.99 | 84.70 | |
| 6 | | 0.2 | 58.70 | 63.93 | 68.31 | 71.10 | 72.74 | 73.62 | 73.99 | 74.01 | 73.80 | 73.42 | |
| 7 | | 0.4 | 57.61 | 61.74 | 64.98 | 66.67 | 67.22 | 67.06 | 66.42 | 65.50 | 64.38 | 63.14 | |
| 8 | | 0.6 | 56.53 | 59.57 | 61.74 | 62.40 | 62.01 | 60.97 | 59.55 | 57.92 | 56.19 | 54.41 | |
| 9 | | 0.8 | 55.45 | 57.43 | 58.60 | 58.34 | 57.14 | 55.41 | 53.42 | 51.31 | 49.17 | 47.06 | |
| 10 | | 1 | 54.37 | 55.33 | 55.56 | 54.50 | 52.63 | 50.36 | 47.93 | 45.47 | 43.03 | 40.64 | |
| 11 | | 1.2 | 53.30 | 53.26 | 52.63 | 50.86 | 48.43 | 45.73 | 42.94 | 40.15 | 37.40 | 34.67 | |

Εικόνα 4.5

4.8.Υπολογιστικό φύλλο: 11 Συντελεστές

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|------|--------|----------|----|---|-----------------------|-------------|-----|---------|-------|
| Φτερό | Charts | Main | I flow | i attack | CL | ε | 11 Συντελεστές | λο-Cm-Cp-Cf | N-P | N-M N-F | CT(φ) |
|-------|--------|------|--------|----------|----|---|-----------------------|-------------|-----|---------|-------|

Σε αυτό το φύλλο εργασίας γίνονται υπολογισμοί για κάθε κομμάτι μεταβάλλοντας το λ (απο 0 έως 58,85) και προκύπτουν οι εξής 11 συντελεστές:

$$A = \frac{CL * 3 * C}{4\pi * r * \cos\left(\frac{\pi * \varepsilon}{180}\right)}$$

$$G = \frac{A * \cos\left(\frac{\pi}{180 * (I - \varepsilon)}\right)}{2 * \sin\left(\frac{\pi * I}{180}\right)^2}$$

$$h = \frac{1 + E}{1 - E}$$

$$k = \frac{1 - G}{1 + G}$$

$$fr = \frac{(1 - k^2) * r}{R}$$

$$mr = \frac{(1 + k)^2 * E * \left(\frac{r}{R}\right)^2}{\tan\left(\frac{\pi * I}{180}\right)}$$

$$E = \frac{A * \sin\left(\frac{\pi * (I - \varepsilon)}{180}\right)}{\sin\left(\frac{2 * \pi * I}{180}\right)}$$

$$\lambda_o = \frac{\left(\frac{R}{r}\right) * (1 + k)}{(1 + h) * \tan\left(\frac{\pi * I}{180}\right)}$$

Ολοκλήρωμα του συντελεστή ώσης **Cf**:

$$Cf = \frac{2 * r}{R} * \left[\frac{fr_1 + fr_2}{2} + \frac{fr_2 + fr_3}{2} + \frac{fr_3 + fr_4}{2} + \dots \right]$$

Ολοκλήρωμα του συντελεστή ροπής **Cm**:

$$Cm = \frac{2 * r}{R} * \left[\frac{mr_1 + mr_2}{2} + \frac{mr_2 + mr_3}{2} + \frac{mr_3 + mr_4}{2} + \dots \right]$$

Ολοκλήρωμα του λόγου ταχυτήτων στο ακροπτερύγιο **λo**:

$$\lambda o = \frac{r}{R} * \left[\frac{\lambda o_1 + \lambda o_2}{2} + \frac{\lambda o_2 + \lambda o_3}{2} + \frac{\lambda o_3 + \lambda o_4}{2} + \dots \right]$$

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M |
|----|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | κομμάτι | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3 | | r | 0.016 | 0.033 | 0.049 | 0.065 | 0.081 | 0.098 | 0.114 | 0.130 | 0.146 | 0.163 | |
| 4 | | λo | A | | | | | | | | | | |
| 5 | | 1E-11 | 0.7654 | 0.4413 | 0.2985 | 0.2072 | 0.1490 | 0.1109 | 0.0851 | 0.0670 | 0.0539 | 0.0442 | |
| 6 | | 0.2 | 0.7599 | 0.4372 | 0.2958 | 0.2053 | 0.1475 | 0.1097 | 0.0841 | 0.0662 | 0.0532 | 0.0435 | |
| 7 | | 0.4 | 0.7539 | 0.4324 | 0.2922 | 0.2025 | 0.1453 | 0.1078 | 0.0824 | 0.0646 | 0.0517 | 0.0421 | |
| 8 | | 0.6 | 0.7475 | 0.4268 | 0.2876 | 0.1988 | 0.1420 | 0.1048 | 0.0796 | 0.0619 | 0.0491 | 0.0396 | |
| 9 | | 0.8 | 0.7406 | 0.4204 | 0.2821 | 0.1939 | 0.1375 | 0.1006 | 0.0756 | 0.0581 | 0.0455 | 0.0361 | |
| 10 | | 1 | 0.7333 | 0.4131 | 0.2754 | 0.1878 | 0.1319 | 0.0954 | 0.0707 | 0.0535 | 0.0412 | 0.0321 | |
| 11 | | 1.2 | 0.7255 | 0.4050 | 0.2676 | 0.1805 | 0.1252 | 0.0891 | 0.0650 | 0.0483 | 0.0365 | 0.0280 | |

Εικόνα 4.6

4.9. Υπολογιστικό φύλλο: λo-Cm-Cp-Cf



Σε αυτό το υπολογιστικό φύλλο υπάρχουν 4 στήλες με τα ολοκληρώματα των **λo**, **Cm** και **Cf** που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο φύλλο. Γίνεται επίσης και υπολογισμός του συντελεστή ισχύος **Cp** ο οποίος προκύπτει ως εξής:

$$Cp = Cm * \lambda o$$

4.10. Υπολογιστικό φύλλο: N-P



Σε αυτό το φύλλο εργασίας γίνεται ο υπολογισμός των στροφών του ρότορα **N** (rpm) για κάθε λ που υπολογίζεται στο προηγούμενο φύλλο εργασίας “λο-Cm-Cp-Cf” και για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου V (απο 1 έως 20 m/s). Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο παρακάτω:

$$N = \frac{\lambda * 60 * V}{2 * \pi * R}$$

Γίνεται επίσης υπολογισμός της ισχύος **P** (W) για κάθε Cp που υπολογίζεται στο προηγούμενο φύλλο εργασίας “λο-Cm-Cp-Cf” και για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου V (απο 1 έως 20 m/s). Ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο παρακάτω:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * Cp * \pi * R^2 * V^3$$

| | B | C | D | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
|----|-------|---|---------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | | | | | | | | | | | N=λ*60*u / (2*π*R) | | | | | | |
| 2 | Βήμα | | u | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 3 | 1 | | λ | N (ταχύτητα ρότορα) | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | -0.1349 | -7.92696 | -15.8539 | -23.7809 | -31.7078 | -39.6348 | -47.5618 | -55.4887 | -63.4157 | -71.3427 | -79.2696 | -87.1966 | -95.1235 | -103.051 | -110.977 |
| 5 | Chart | | 0.0313 | 1.838792 | 3.677584 | 5.516377 | 7.355169 | 9.193961 | 11.03275 | 12.87155 | 14.71034 | 16.54913 | 18.38792 | 20.22671 | 22.06551 | 23.9043 | 25.74309 |
| 6 | | | 0.1971 | 11.581 | 23.16201 | 34.74301 | 46.32402 | 57.90502 | 69.48603 | 81.06703 | 92.64803 | 104.229 | 115.81 | 127.391 | 138.9721 | 150.5531 | 162.1341 |
| 7 | | | 0.3624 | 21.28688 | 42.57377 | 63.86065 | 85.14754 | 106.4344 | 127.7213 | 149.0082 | 170.2951 | 191.582 | 212.8688 | 234.1557 | 255.4426 | 276.7295 | 298.0164 |
| 8 | | | 0.5268 | 30.94958 | 61.89916 | 92.84875 | 123.7983 | 154.7479 | 185.6975 | 216.6471 | 247.5967 | 278.5462 | 309.4958 | 340.4454 | 371.395 | 402.3446 | 433.2942 |
| 9 | | | 0.6906 | 40.56891 | 81.13783 | 121.7067 | 162.2757 | 202.8446 | 243.4135 | 283.9824 | 324.5513 | 365.1202 | 405.6891 | 446.2581 | 486.827 | 527.3959 | 567.9648 |
| 10 | | | 0.8537 | 50.15109 | 100.3022 | 150.4533 | 200.6043 | 250.7554 | 300.9065 | 351.0576 | 401.2087 | 451.3598 | 501.5109 | 551.662 | 601.813 | 651.9641 | 702.1152 |
| 11 | | | 1.0164 | 59.70793 | 119.4159 | 179.1238 | 238.8317 | 298.5396 | 358.2476 | 417.9555 | 477.6634 | 537.3714 | 597.0793 | 656.7872 | 716.4951 | 776.2031 | 835.911 |
| 12 | | | 1.1782 | 69.21569 | 138.4314 | 207.6471 | 276.8628 | 346.0785 | 415.2941 | 484.5098 | 553.7255 | 622.9412 | 692.1569 | 761.3726 | 830.5883 | 899.804 | 969.0197 |
| 13 | | | 1.4119 | 82.94373 | 165.8875 | 248.8312 | 331.7749 | 414.7187 | 497.6624 | 580.6061 | 663.5499 | 746.4936 | 829.4373 | 912.3811 | 995.3248 | 1078.269 | 1161.212 |
| 14 | | | 1.6320 | 95.87532 | 191.7506 | 287.626 | 383.5013 | 479.3766 | 575.2519 | 671.1272 | 767.0025 | 862.8779 | 958.7532 | 1054.628 | 1150.504 | 1246.379 | 1342.254 |
| 15 | | | 1.8407 | 108.1334 | 216.2668 | 324.4002 | 432.5336 | 540.667 | 648.8005 | 756.9339 | 865.0673 | 973.2007 | 1081.334 | 1189.468 | 1297.601 | 1405.734 | 1513.868 |
| 16 | | | 2.0380 | 119.7261 | 239.4521 | 359.1782 | 478.9042 | 598.6303 | 718.3564 | 838.0824 | 957.8085 | 1077.535 | 1197.261 | 1316.987 | 1436.713 | 1556.439 | 1676.165 |

Εικόνα 4.7

4.11. Υπολογιστικό φύλλο: N-M N-F



Σε αυτό το φύλλο εργασίας εμφανίζονται οι στροφές του ρότορα **N** (rpm) που υπολογίστηκαν στο φύλο εργασίας “N-P”. Υπολογίζεται η ροπή **M** (Ntm) για κάθε Cm που υπολογίστηκε σε προηγούμενο φύλλο εργασίας “λο-Cm-Cp-Cf” και για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου V (απο 1 έως 20 m/s). Προκύπτει απο τον παρακάτω τύπο:

$$M = \frac{1}{2} * \rho * Cm * V^2 * \pi * R^3$$

Γίνεται άλλη μια φορά υπολογισμός της ισχύος αυτή τη φορά μέσω της σχέσης:

$$P = M * \omega$$

Όπου $\omega = \frac{2*\pi*N}{60}$

Επίσης υπολογίζεται η Αντίσταση/Ωση **F** (Nt) για κάθε Cf που υπολογίζεται σε προηγούμενο φύλλο εργασίας “λο-Cm-Cp-Cf” και για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου V (απο 1 έως 20 m/s).

Προκύπτει απο την σχέση:

$$F = \frac{1}{2} * \rho * Cf * V^2 * \pi * R^2$$

| C | D | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | |
|----|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| 47 | | | | | | | | | M=Cm*0,6*υ^2*π*R^3 | | | | | | | | |
| 48 | υ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| 49 | Cm | Ροπή | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50 | 0.0193 | 0.000156 | 0.000625 | 0.001406 | 0.002499 | 0.003904 | 0.005622 | 0.007653 | 0.009995 | 0.01265 | 0.015618 | 0.018897 | 0.02249 | 0.026394 | 0.030611 | 0.03514 | |
| 51 | 0.0193 | 0.000156 | 0.000626 | 0.001408 | 0.002502 | 0.00391 | 0.00563 | 0.007663 | 0.010009 | 0.012668 | 0.01564 | 0.018924 | 0.022521 | 0.026431 | 0.030654 | 0.035189 | |
| 52 | 0.0195 | 0.000158 | 0.000631 | 0.00142 | 0.002525 | 0.003945 | 0.005681 | 0.007732 | 0.010099 | 0.012781 | 0.015779 | 0.019093 | 0.022722 | 0.026667 | 0.030927 | 0.035504 | |
| 53 | 0.0196 | 0.000159 | 0.000634 | 0.001427 | 0.002537 | 0.003964 | 0.005708 | 0.007769 | 0.010147 | 0.012843 | 0.015855 | 0.019185 | 0.022832 | 0.026795 | 0.031076 | 0.035674 | |
| 54 | 0.0197 | 0.000159 | 0.000637 | 0.001433 | 0.002547 | 0.003979 | 0.00573 | 0.007799 | 0.010187 | 0.012893 | 0.015917 | 0.019259 | 0.02292 | 0.026899 | 0.031197 | 0.035813 | |
| 55 | 0.0200 | 0.000162 | 0.000646 | 0.001454 | 0.002585 | 0.004038 | 0.005815 | 0.007915 | 0.010338 | 0.013084 | 0.016154 | 0.019546 | 0.023261 | 0.027299 | 0.031661 | 0.036345 | |
| 56 | 0.0208 | 0.000168 | 0.000673 | 0.001513 | 0.00269 | 0.004204 | 0.006053 | 0.008239 | 0.010761 | 0.01362 | 0.016814 | 0.020345 | 0.024213 | 0.028416 | 0.032956 | 0.037833 | |
| 57 | 0.0224 | 0.000182 | 0.000726 | 0.001634 | 0.002905 | 0.00454 | 0.006537 | 0.008898 | 0.011622 | 0.014709 | 0.018159 | 0.021972 | 0.026149 | 0.030688 | 0.035591 | 0.040857 | |
| 58 | 0.0270 | 0.000219 | 0.000874 | 0.001967 | 0.003497 | 0.005465 | 0.007869 | 0.010711 | 0.01399 | 0.017706 | 0.021859 | 0.02645 | 0.031477 | 0.036942 | 0.042844 | 0.049183 | |
| 59 | 0.0457 | 0.00037 | 0.001478 | 0.003326 | 0.005914 | 0.00924 | 0.013306 | 0.018111 | 0.023655 | 0.029938 | 0.036961 | 0.044723 | 0.053224 | 0.062464 | 0.072444 | 0.083162 | |
| 60 | 0.0669 | 0.000542 | 0.002166 | 0.004874 | 0.008666 | 0.01354 | 0.019498 | 0.026539 | 0.034663 | 0.04387 | 0.054161 | 0.065535 | 0.077992 | 0.091532 | 0.106155 | 0.121862 | |

Εικόνα 4.8

4.12. Υπολογιστικό φύλλο: CT(φ)



Σε αυτό το φύλλο γίνεται υπολογισμός των δυνάμεων **T** (Nt) (πάνω στην πλήμνη και τον άξονα της φτερωτής. Προκύπτει απο την σχέση:

$$T = \frac{1}{2} * \rho * CT * R^2 * \pi * V_{amax}^2$$

5. Υπολογισμός της περύγωσης.

Η εφαρμογή ΥροIFterου2.0 η οποία αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο μας δίνει χρήσιμα δεδομένα για την περύγωση αφού πρώτα εισάγουμε ορισμένα στοιχεία στο πρώτο υπολογιστικό φύλλο “Φτερό”. Τα στοιχεία αυτά για την περύγωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω (κόκκινα γράμματα):

| ΔΕΔΟΜΕΝΑ | |
|---|---------|
| R (ακτίνα φτερού) (m) | 0.160 |
| P (αριθμός φτερών) | 3 |
| λ_0 (λόγος ταχυτήτων) | 4.8 |
| i (αριθμός κομματιών) | 10 |
| pitch (κλίση φτερού) (°) | 0 |
| Cogging torque (Ntm) | 0.0005 |
| Cmo | 0.01167 |
| Vsu (m/s) | 3.344 |
| Tshortcirc (Ntm) | 500 |
| $V_{\xi\epsilon\phi\rho}$ (m/s) | 936.81 |
| Πράξεις για εύρεση ακτίνας προτεινόμενου φτερού | |
| επιθυμητή ισχύς P (W) | 10 |
| C_p | 0.4 |
| ρ (πυκνότητα αέρα) | 1.22 |
| ηλεκτρική απόδοση $\eta_{\eta\lambda}$ | 1 |
| Ονομ. ταχύτητα αέρα V_{ov} | 8 |
| προτεινόμενη ακτίνα R (m) | 0.160 |

Πίνακας 5.1

5.1. Δεδομένα περύγωσης

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς του ΥποFterου2.0 μερικά από τα οποία είναι απαραίτητα για την σχεδίαση της γεωμετρίας της περύγωσης μας, όπως η απόσταση της κάθε τομής από την αρχή της περύγωσης r , η γωνία σφήνωσης a , η χορδή c και το πάχος επί τοις εκατό $\delta\%$.

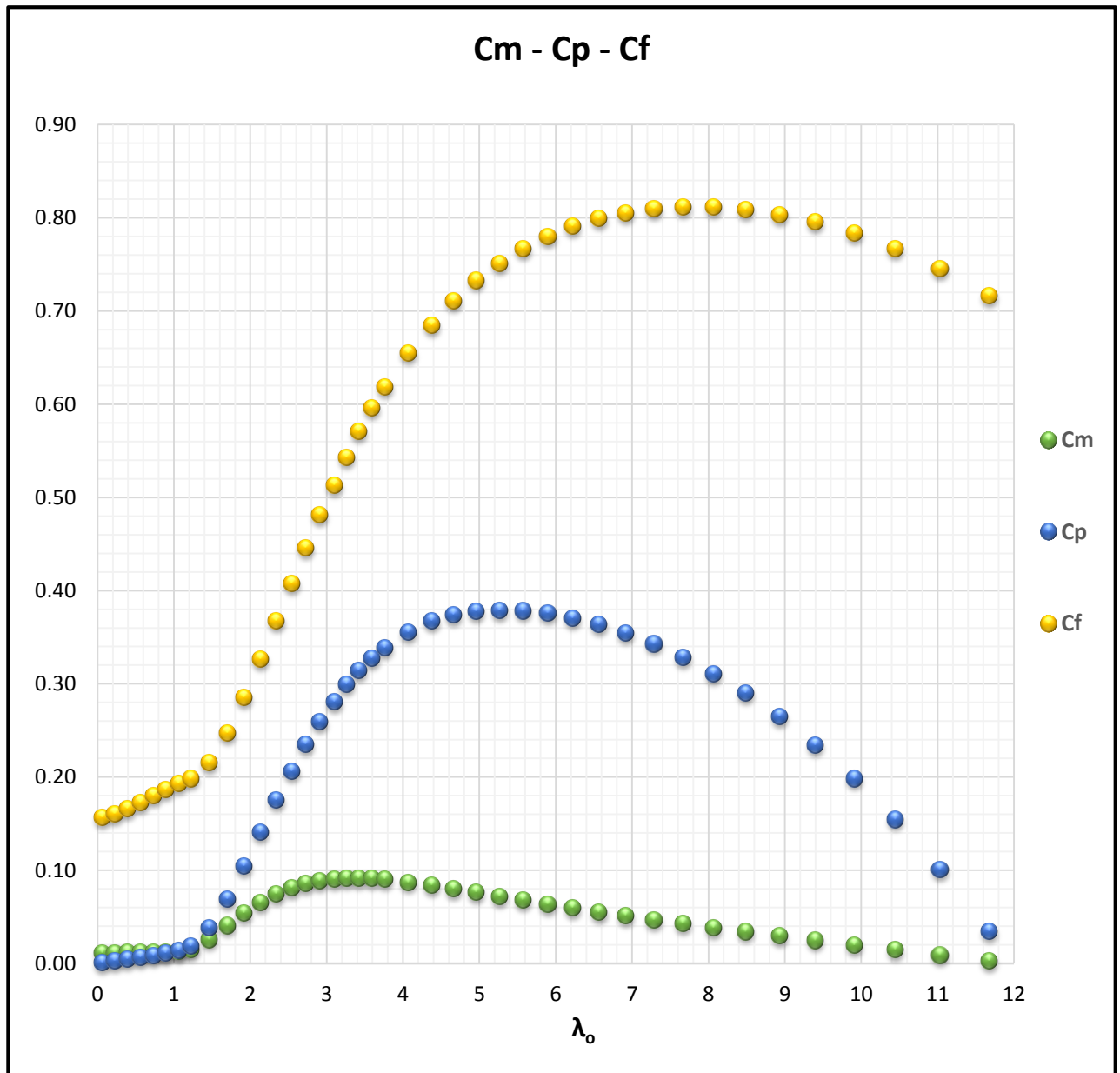
| Τομή Πτερυγίου | r (m) | l flow angle | ir (angle of attack) | a (setting angle) | CL=Cz | C chord (m) | $\delta\%$ | δ (mm) |
|----------------|---------|--------------|----------------------|-------------------|-------|-------------|------------|---------------|
| | | | | | | | | 0.25 |
| 1 | 0.01596 | 42.906 | 15.811 | 27.095 | 1.300 | 0.0238 | 23.094 | 5.50 |
| 2 | 0.03192 | 30.779 | 11.180 | 19.599 | 1.300 | 0.0242 | 21.666 | 5.23 |
| 3 | 0.04789 | 23.185 | 9.129 | 14.057 | 1.147 | 0.0227 | 20.326 | 4.62 |
| 4 | 0.06385 | 18.341 | 7.906 | 10.436 | 1.047 | 0.0202 | 19.069 | 3.84 |
| 5 | 0.07981 | 15.080 | 7.071 | 8.009 | 0.979 | 0.0177 | 17.889 | 3.16 |
| 6 | 0.09577 | 12.765 | 6.455 | 6.310 | 0.928 | 0.0156 | 16.783 | 2.61 |
| 7 | 0.11174 | 11.049 | 5.976 | 5.073 | 0.889 | 0.0138 | 15.745 | 2.17 |
| 8 | 0.12770 | 9.731 | 5.590 | 4.141 | 0.857 | 0.0123 | 14.771 | 1.82 |
| 9 | 0.14366 | 8.689 | 5.270 | 3.418 | 0.831 | 0.0111 | 13.857 | 1.54 |
| 10 | 0.15962 | 7.846 | 5.000 | 2.846 | 0.809 | 0.0101 | 13.000 | 1.31 |

Πίνακας 5.2

5.2. Θεωρητικά διαγράμματα

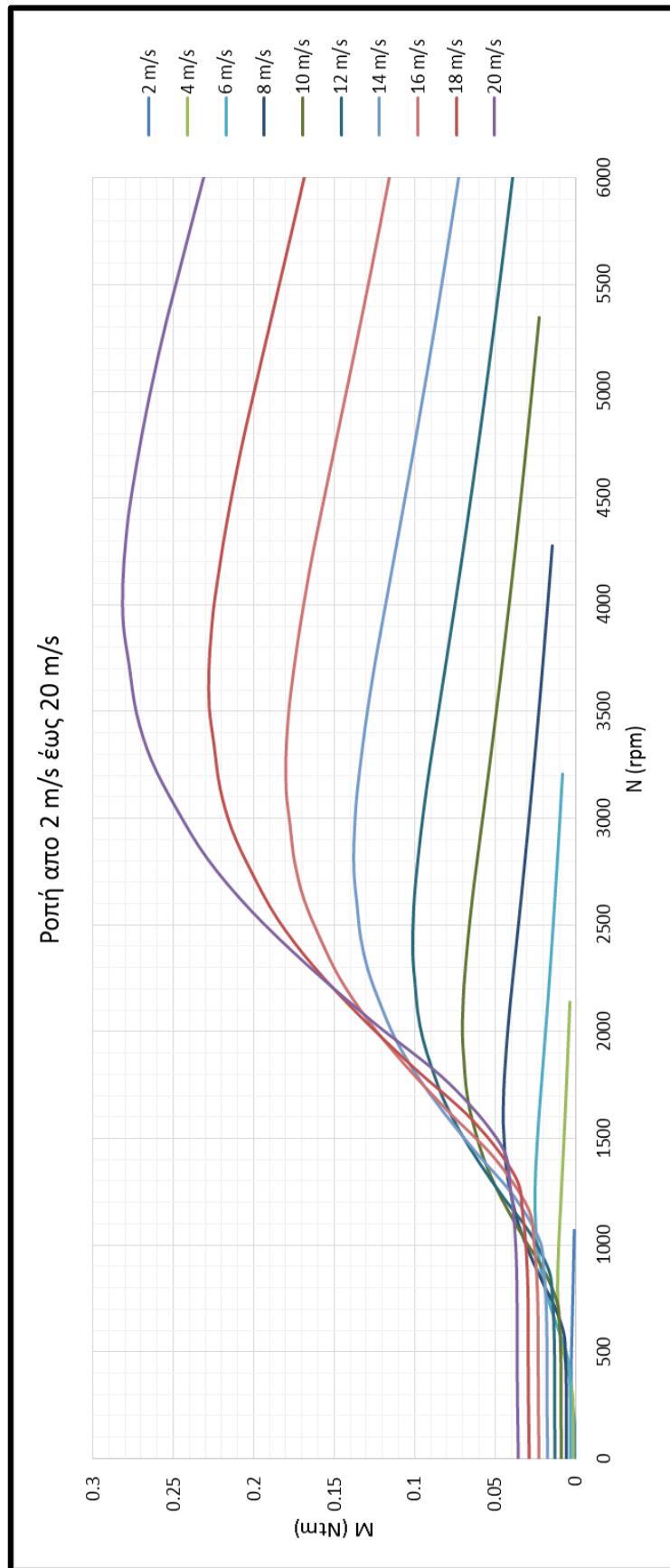
Η εφαρμογή ΥροIFterou2.0 μέσα από τις απαραίτητες πράξεις μας εμφανίζει διάφορα διαγράμματα στο 2^ο υπολογιστικό φύλλο “Charts”. Παρακάτω εμφανίζονται τα σημαντικότερα θεωρητικά διαγράμματα που αφορούν την πτερύγωση μας.

Η μεταβολή των συντελεστών ισχύος, ροπής και αντίστασης συναρτήσει του λ_0 :



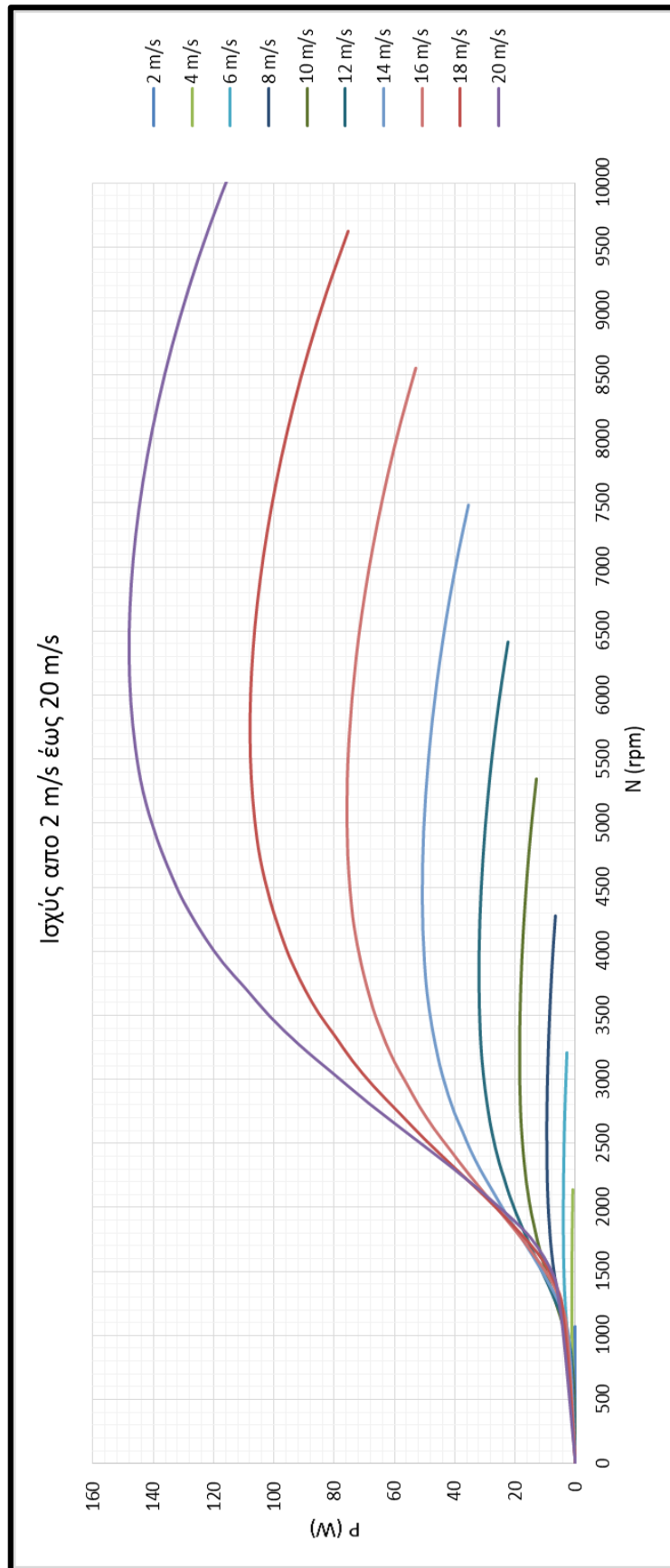
Διάγραμμα 5.1

Η μεταβολή της ροπής σε διαφορετικές ταχύτητες αέρα συναρτήση των στροφών του ρότορα:



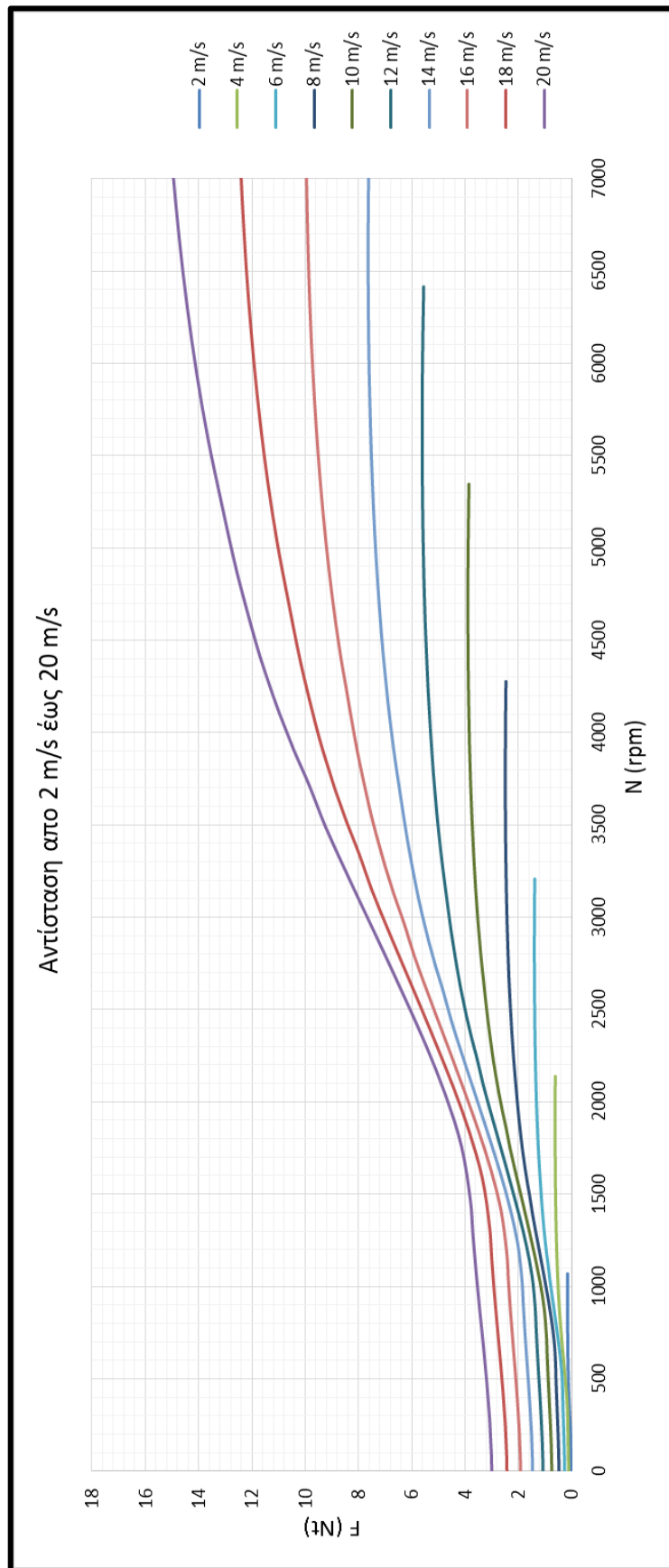
Διάγραμμα 5.2

Η μεταβολή της ισχύος σε διαφορετικές ταχύτητες αέρα συναρτήση των στροφών του ρότορα:



Διάγραμμα 5.3

Η μεταβολή της αντίστασης σε διαφορετικές ταχύτητες αέρα συναρτήση των στροφών του ρότορα:



Διάγραμμα 5.4

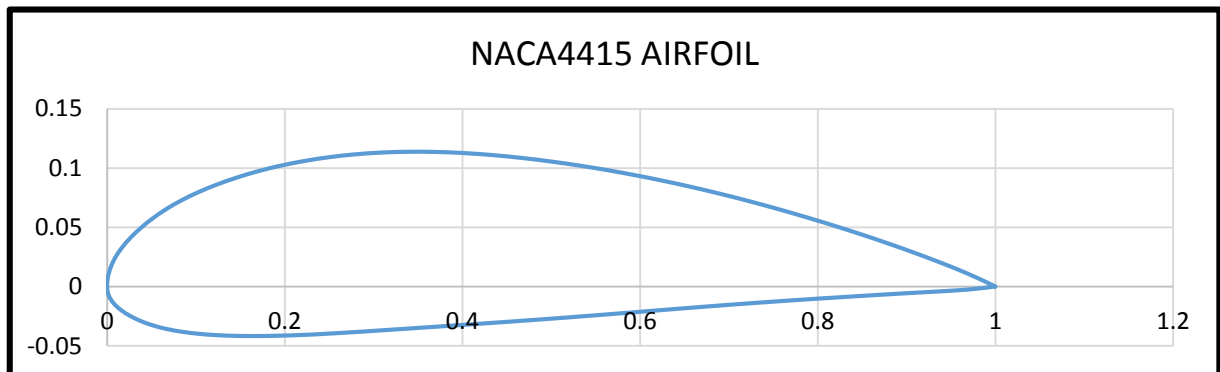
6. Σχεδίαση πτερύγωσης βήμα βήμα μέσω του Solidworks.

Βασική προϋπόθεση για να περάσουμε στην τρισδιάστατη σχεδίαση της πτερύγωσης είναι η χρήση της εφαρμογής **Ypofterou2.0** ώστε να πάρουμε τα απαραίτητα δεδομένα για το κάθε κομμάτι της πτερύγωσης καθώς επίσης και η δημιουργία των 10 αρχείων .txt τα οποία περιέχουν την γεωμετρία των επιμέρους προφίλ. Να σημειωθεί ότι έχει γίνει ανάρτηση βίντεο στο YouTube με την παρούσα διαδικασία σχεδίασης το οποίο σε συνδυασμό με το παρών κεφάλαιο καθιστά ευκολότερη την κατανόηση των βημάτων.

Σύνδεσμος: <https://www.youtube.com/watch?v=0n87iA3YuFc>

6.1.Δημιουργία των 10 προφίλ (αρχεία .txt)

Για να σχεδιάσουμε την πτερύγωση που έχουμε υπολογίσει, βασική προϋπόθεση είναι να έχουμε την γεωμετρία κάποιας γνωστής αεροτομής. Έγινε επιλογή της αεροτομής **NACA4415** από τον ιστότοπο http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html όπου υπάρχει μια βάση δεδομένων με περίπου 1600 αεροτομές (airfoils) σε αλφαβητική σειρά. Από την ιστοσελίδα κατεβάζουμε ένα αρχείο σε μορφή .dat το οποίο το ανοίγουμε με το λογισμικό excel και περιέχει τις συντεταγμένες (άξονες x και y) του προφίλ της αεροτομής **NACA4415** με μήκος χορδής 1 μονάδα. Οι συντεταγμένες αυτές μας δίνουν την παρακάτω γεωμετρία:



Εικόνα 6.1

Σκοπός μας είναι να δημιουργήσουμε 10 προφίλ αποθηκευμένα σε μορφή .txt όπου το καθένα θα αποτελείται από 3 στήλες x, y, z και είναι αντίστοιχα η χορδή c και το πάχος δ του κάθε προφίλ της πτερύγωσης μας. Ο άξονας z χρειάζεται μόνο για να γίνει η εισαγωγή των συντεταγμένων αποδεκτή από το Solidworks οπότε προσθέτουμε μηδενικά.

Συνδυάζοντας τα δεδομένα του ΥποFτερου (c , $\delta\%$) και τις συντεταγμένες της αεροτομής **NACA4415** δημιουργούμε τον νέο άξονα x' πολλαπλασιάζοντας τα σημεία του άξονα x της αεροτομής με την χορδή c του κομματιού. Για τον νέο άξονα y' πολλαπλασιάζουμε τα σημεία του άξονα y της αεροτομής επί το $\delta\%$ επί το C και διαιρούμε με το 15. Προσθέτουμε ισάριθμα μηδενικά στη στήλη z . Η παραπάνω διαδικασία γίνεται συνολικά 10 φορές όσα και τα κομμάτια στα οποία έχουμε χωρίσει την πτερύγωση μας. Στη συνέχεια περνάμε στην τρισδιάστατη σχεδίαση της πτερύγωσης η οποία περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.1.1. Η αεροτομή NACA4415

Οι αεροτομές NACA είναι σχήματα αεροτομών κυρίως για φτερά αεροσκαφών που αναπτύχθηκαν από την Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυτικής (National Advisory Committee for Aeronautics - NACA). Το σχήμα των αεροτομών NACA περιγράφεται χρησιμοποιώντας μια σειρά από 4 ψηφία μετά τη λέξη “NACA”.

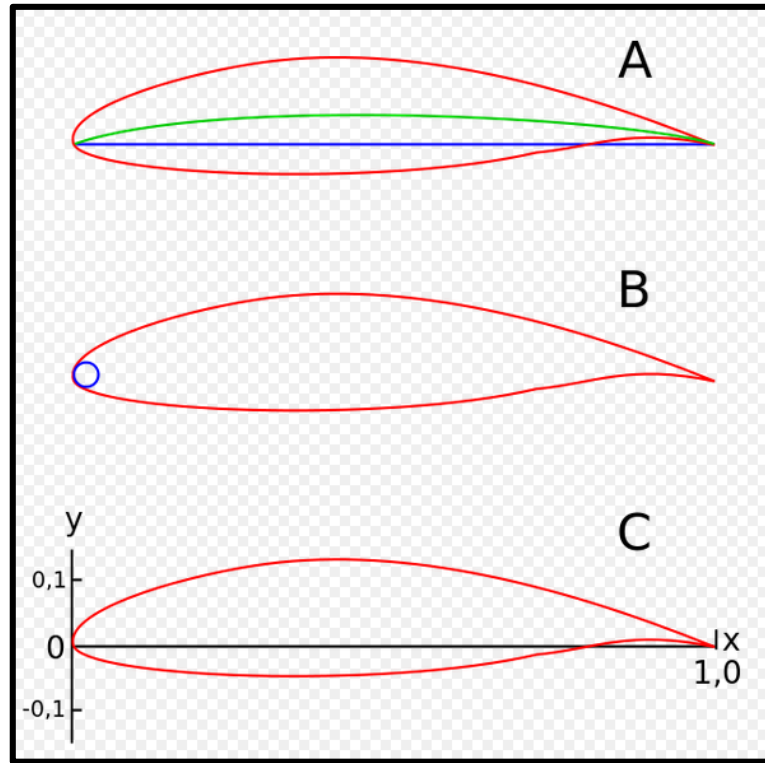
Το πρώτο ψηφίο περιγράφει την μέγιστη καμπυλότητα ως ποσοστό της χορδής.

Το δεύτερο ψηφίο περιγράφει την απόσταση της μέγιστης καμπυλότητας από την προπορευόμενη ακμή σε δεκάδες επί τοις εκατό της χορδής.

Τα δύο τελευταία ψηφία περιγράφουν το μέγιστο πάχος της αεροτομής ως επί τοις εκατό της χορδής.

Η αεροτομή NACA 4415 (βλέπε παραπάνω εικόνα 6.1) έχει μέγιστη καμπυλότητα του 4% που βρίσκεται στο 40,2% (0,402 χορδές) από την προπορευόμενη ακμή. Έχει μέγιστο πάχος 15% που βρίσκεται στο 30,9% της χορδής.

Στην εικόνα παρακάτω φαίνονται μερικά χαρακτηριστικά των αεροτομών:



Εικόνα 6.2

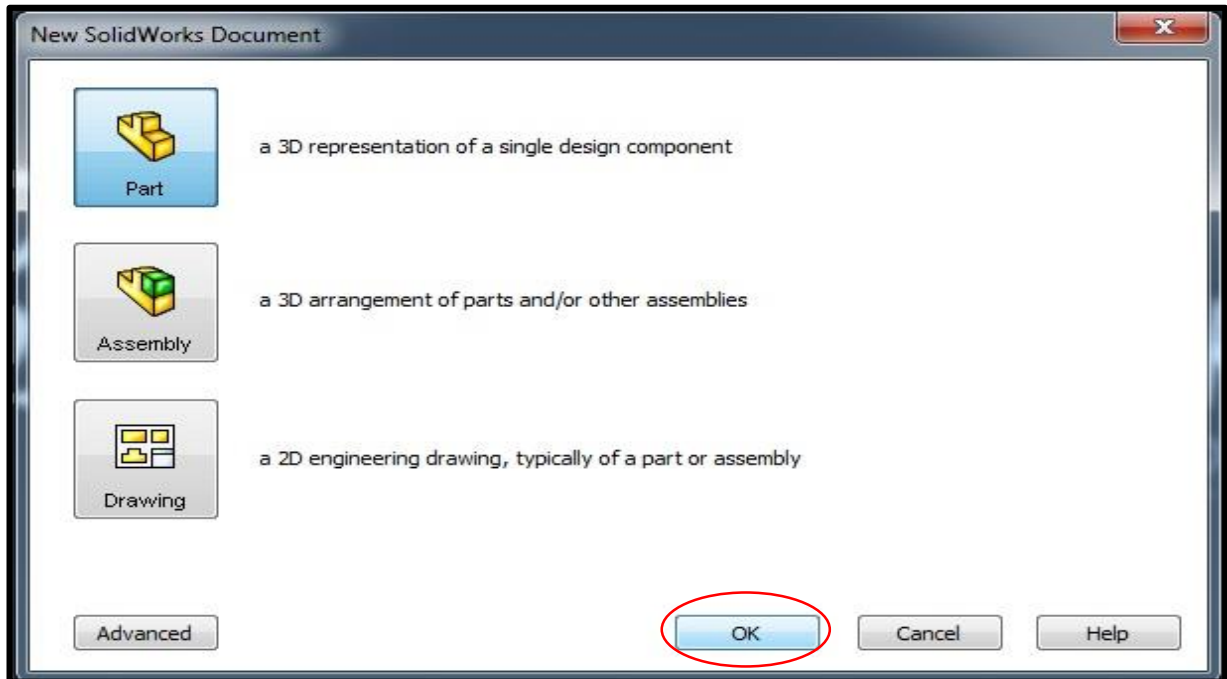
A: Μπλέ γραμμή = χορδή, πράσινη γραμμή = μέσον καμπυλότητας

B: Ακτίνα προπορευόμενης ακμής

C: x-y συντεταγμένες για την γεωμετρία του προφίλ

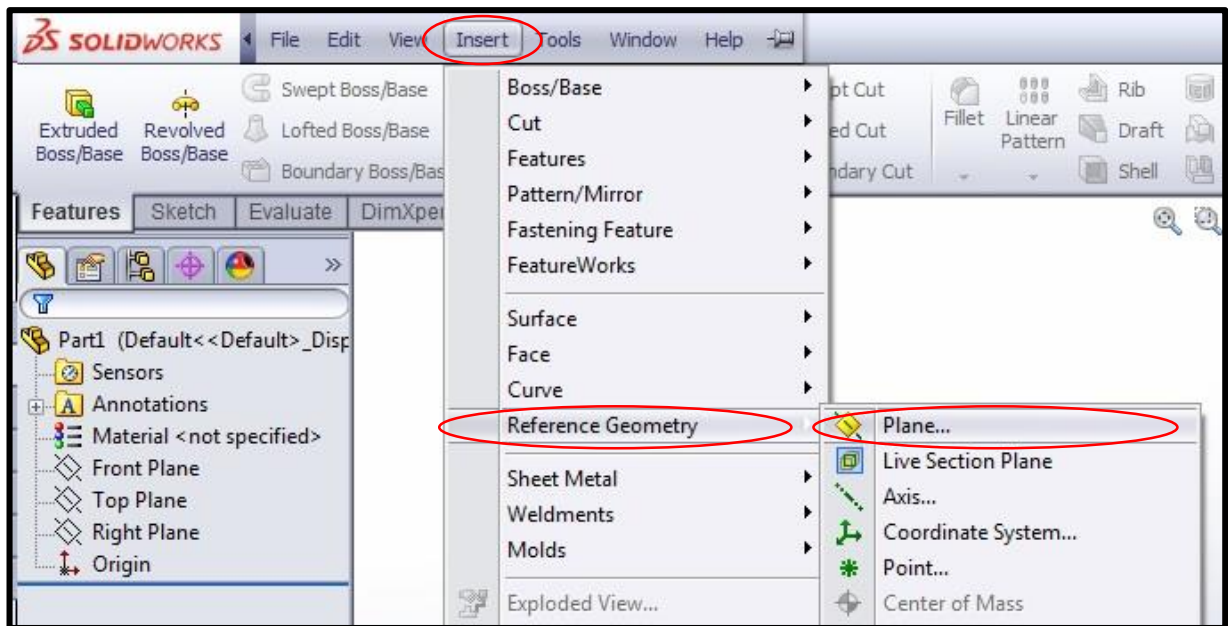
6.2.Σχεδίαση πτερύγωσης: Βασική γεωμετρία

Ανοίγουμε το σχεδιαστικό πρόγραμμα **Solidworks** περνώντας το ποντίκι στην πάνω αριστερά γωνία απο το μενού που εμφανίζεται επιλέγουμε **File, New** κάνουμε κλικ στο κουτί **Part** και πατάμε **OK** (βλέπε εικόνα).



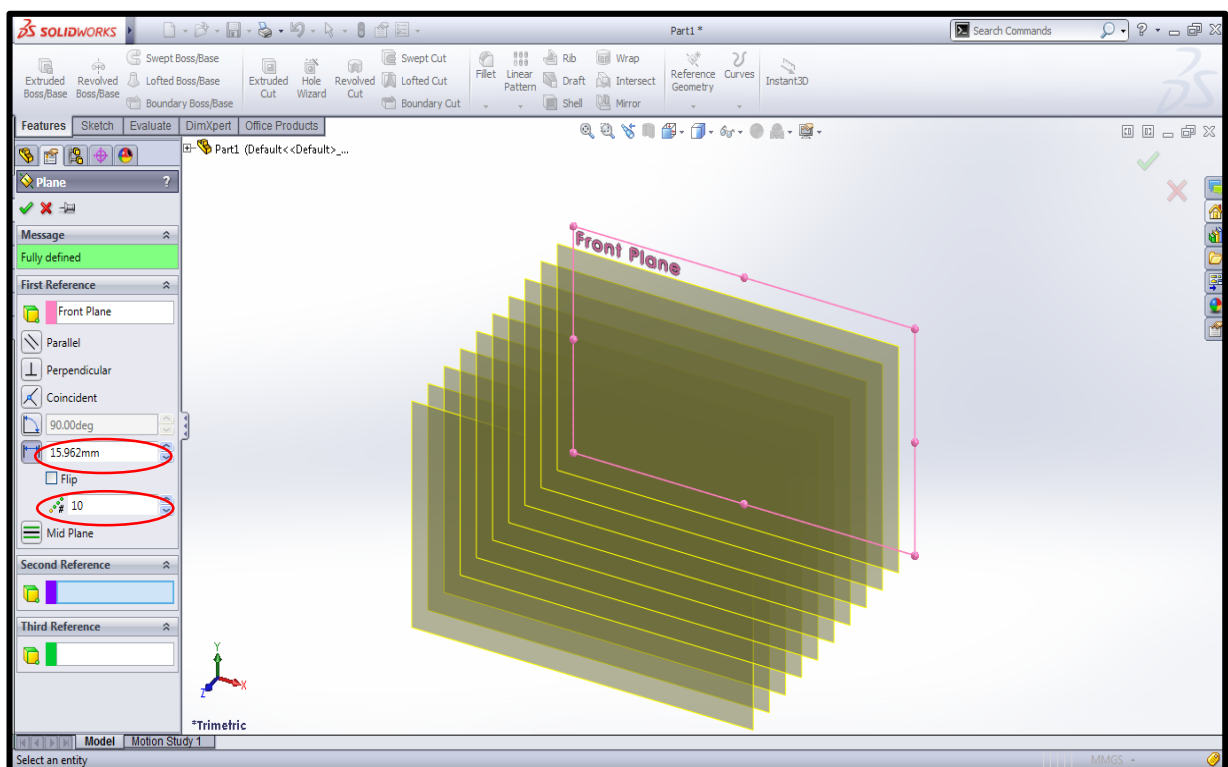
Εικόνα 6.3

Στην στήλη στα αριστερά μας δείχνει τα 3 βασικά πλαίσια σχεδίασης (Front, Top, Right). Κάνουμε κλικ στο **Front Plane** και απο την λωρίδα των βασικών εργαλείων ανοίγουμε την καρτέλα **Insert**, στη συνέχεια περνάμε το ποντίκι πάνω απο την επιλογή **Reference Geometry** και στην καρτέλα που εμφανίζετε κάνουμε κλικ στην επιλογή **Plane** (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.4).



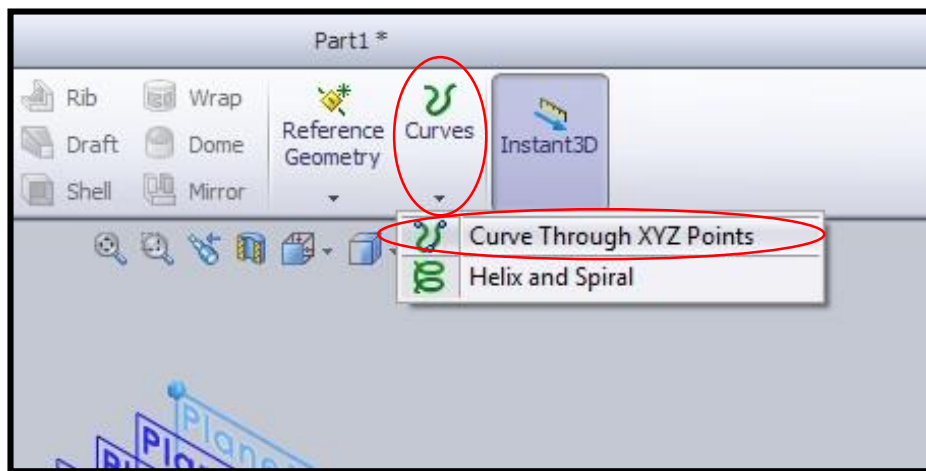
Εικόνα 6.4

Η εντολή αυτή εμφανίζει νέα πλαίσια σχεδίασης παράλληλα τοποθετημένα στην αρχική μας επιλογή. Στο μενού που εμφανίζετε στη θέση του αριθμού **1** πληκτρολογούμε **10** (είναι ο αριθμός των προφίλ που θα χρειαστούν για την γεωμετρία της πτερύγωσης). Επίσης πληκτρολογούμε και την απόσταση ανάμεσα τους η οποία είναι η ίδια για όλα τα planes. Στην περίπτωσή μας: **15,962 mm** (βλέπε εικόνα 6.5). Κάνουμε κλικ στο ✓.



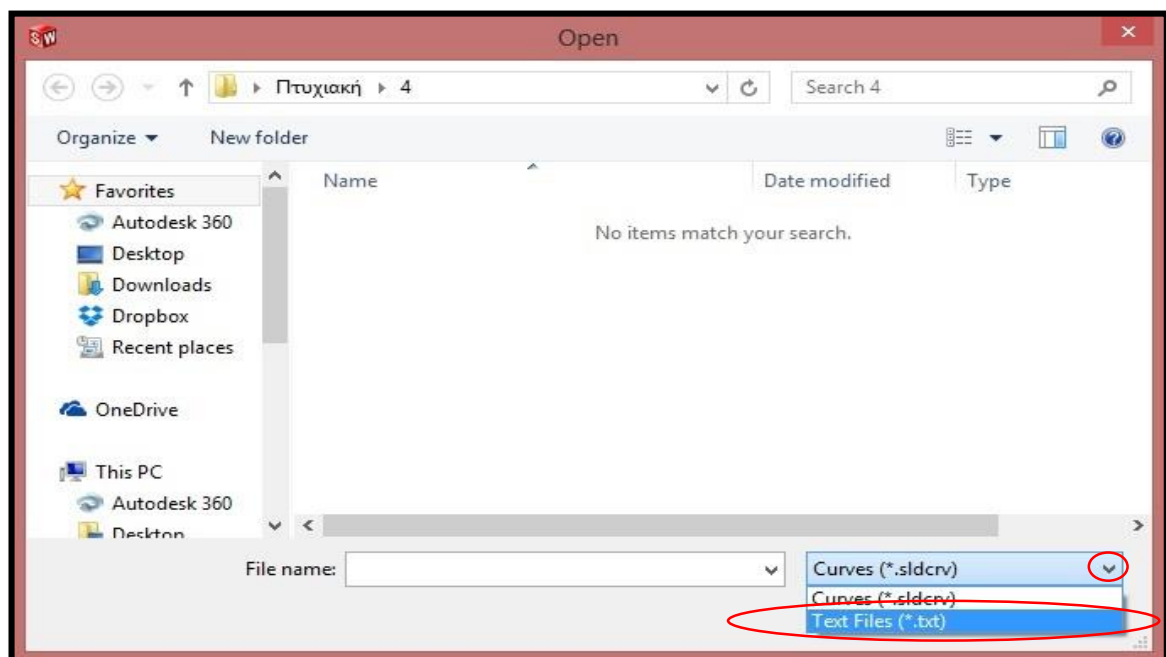
Εικόνα 6.5

Απο την καρτέλα **Features** κάνουμε κλικ στην επιλογή **Curves** και αμέσως μετά κλικ στο **Curve Through XYZ Points** (βλέπε εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6

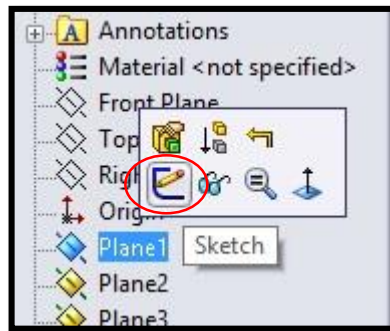
Στο παραθυράκι που εμφανίζεται πατάμε **Browse...** για να επιλέξουμε και να εισάγουμε το πρώτο αρχείο .txt με τα σημεία της γεωμετρίας της πτερύγωσης απο το φάκελο όπου το έχουμε αποθηκεύσει. Σε περίπτωση που δέν μας εμφανίζει τα αρχεία κειμένου αλλάζουμε την επιλογή **Curves (*.sldcrv)** σε **Text Files (*.txt)** όπως φαίνεται παράκατω:



Εικόνα 6.7

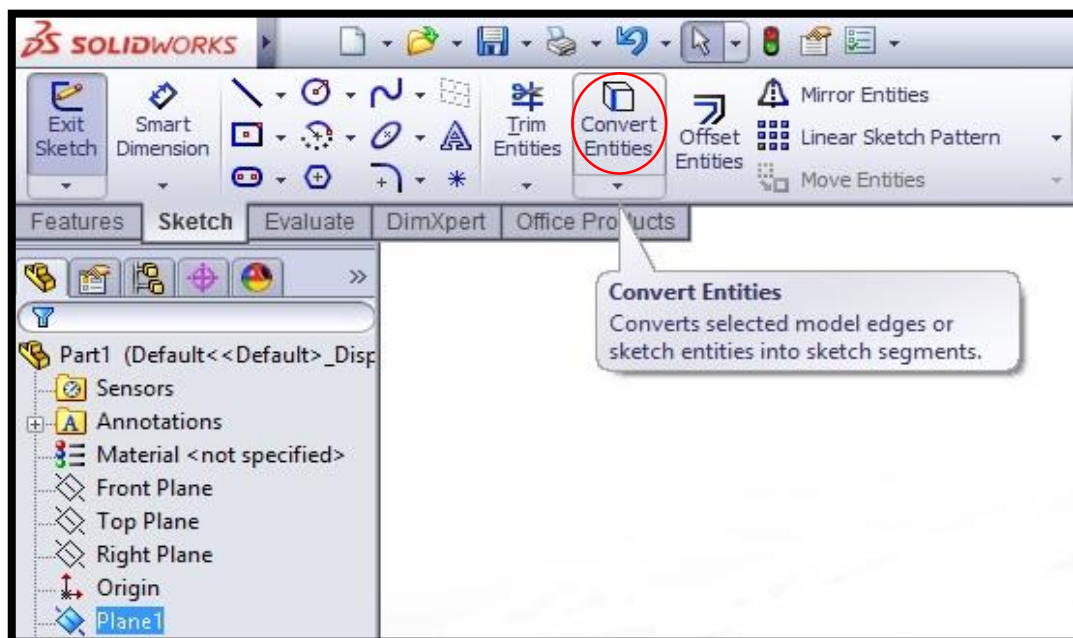
Αφού επιλέξουμε το αρχείο πατάμε το **Open** και μετά το **OK**.

Επιλέγουμε το **Plane 1** και πατάμε το εικονίδιο **Sketch** (βλέπε εικόνα 6.8).



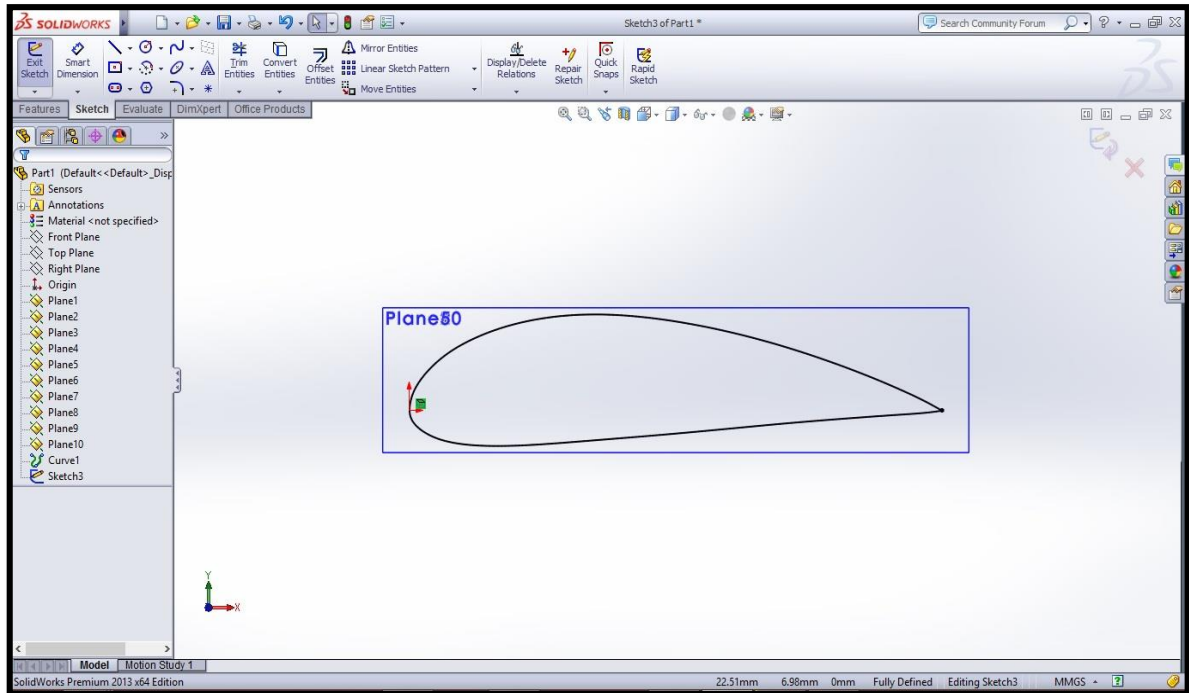
Εικόνα 6.8

Απο την γραμμή εντολών της καρτέλας **Sketch** κάνουμε κλικ στο εικονίδιο **Convert Entities** (βλέπε εικόνα 6.9)



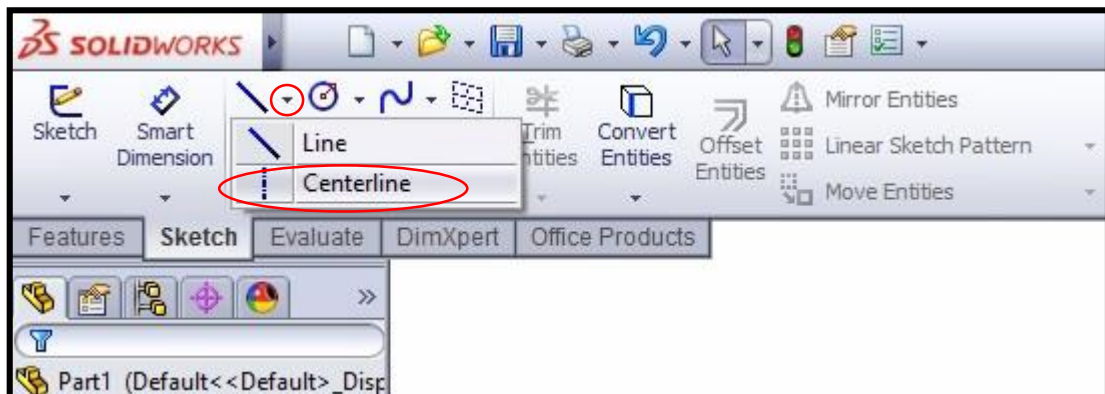
Εικόνα 6.9

Στη συνέχεια επιλέγουμε με κλικ το προφίλ που εισάγαμε προηγουμένως και δεξί κλικ ή αλλιώς κλικ στο **✓**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το προφίλ να εμφανιστεί πάνω στο **Plane 1** σαν σκίτσο και πλέον μπορούμε να το επεξεργαστούμε (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.10).



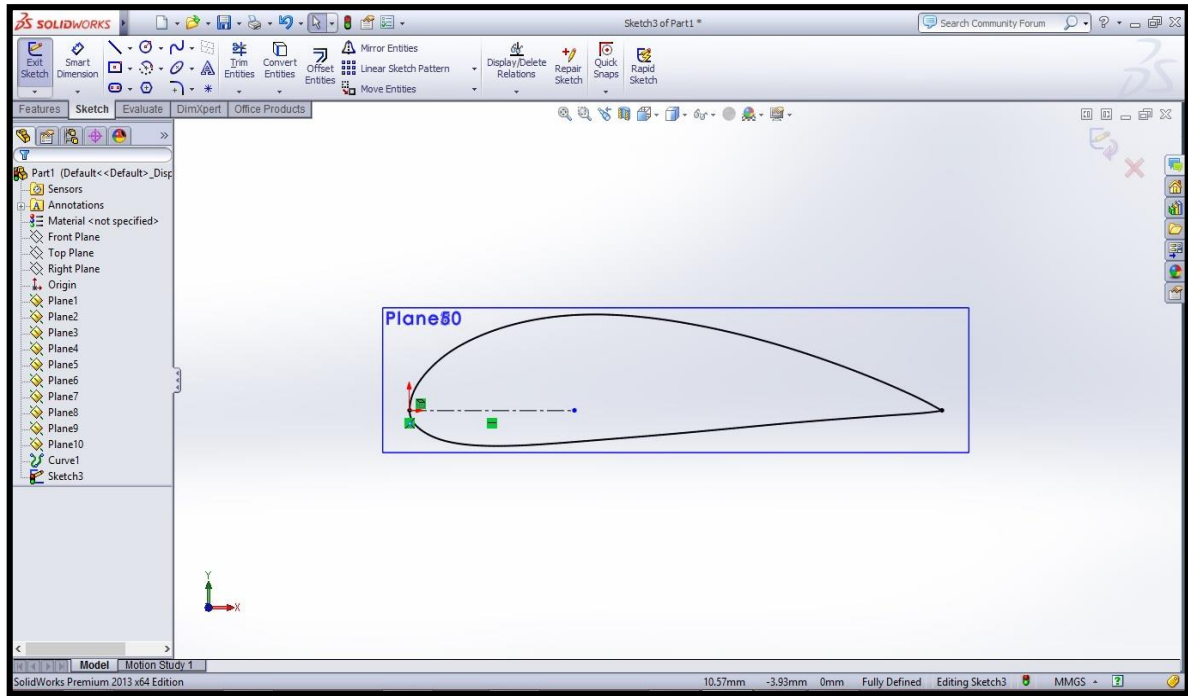
Εικόνα 6.10

Απο τη γραμμή εργαλείων της καρτέλας **Sketch** επιλέγουμε **Centerline** (βλέπε εικόνα 6.11).



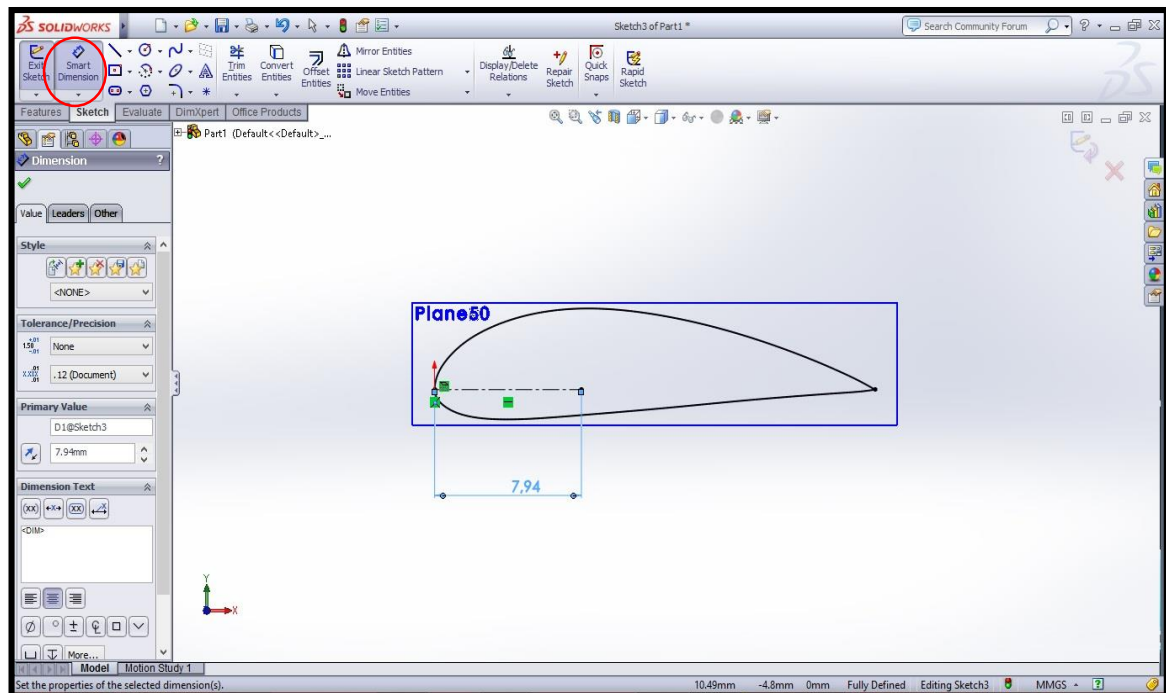
Εικόνα 6.11

Σχεδιάζουμε μια αξονική γραμμή πάνω στο προφίλ ξεκινώντας από τα αριστερά (σημείο 0,0 του προφίλ) και επεκτείνουμε οριζόντια προς τα δεξιά έως περίπου τα μισά της χορδής (το ακριβές μήκος δεν μας απασχολεί σ αυτό το βήμα), πατάμε το πλήκτρο **escape** αφού έχουμε τραβήξει τη γραμμή (βλέπε εικόνα 6.12).



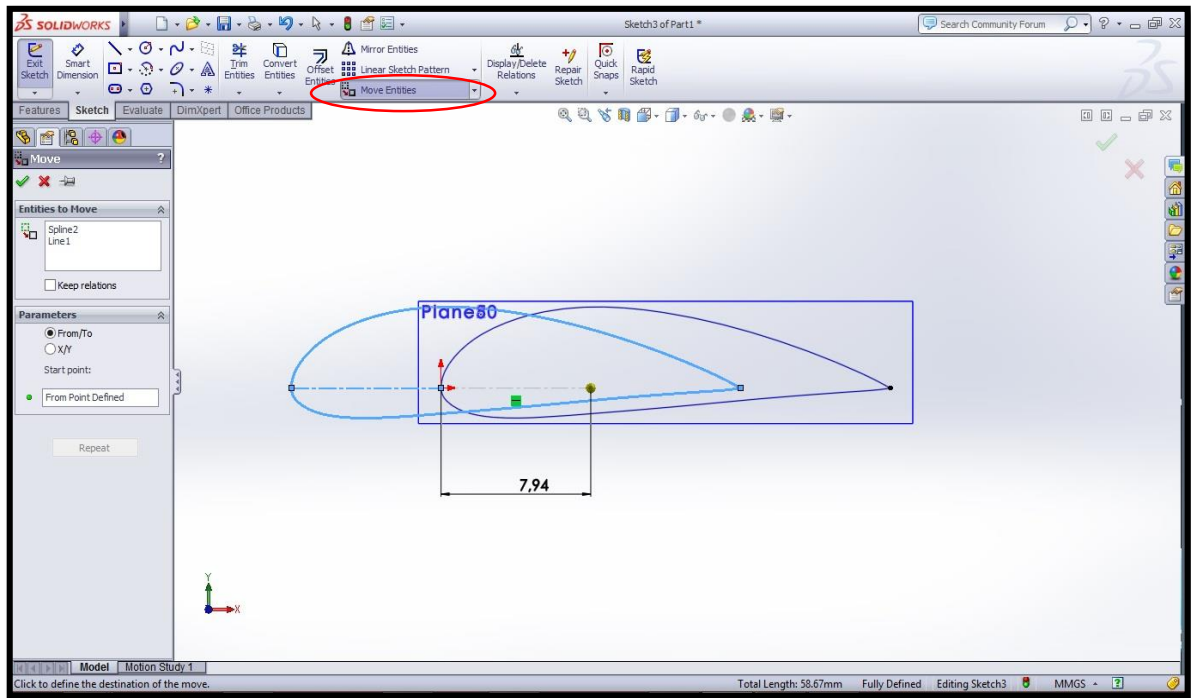
Εικόνα 6.12

Το μήκος δεν μας αφορά εξαρχής διότι το δηλώνουμε επιλέγοντας **Smart Dimension** και στη συνέχεια επιλέγουμε την αξονική γραμμή για να το εισάγουμε, και είναι το 1/3 της χορδής το οποίο το έχουμε υπολογίσει απο πριν. Στην περίπτωση μας: **7,938 mm**. (Βλέπε παρακάτω εικόνα 6.13). Κάνουμε κλικ στο ✓.



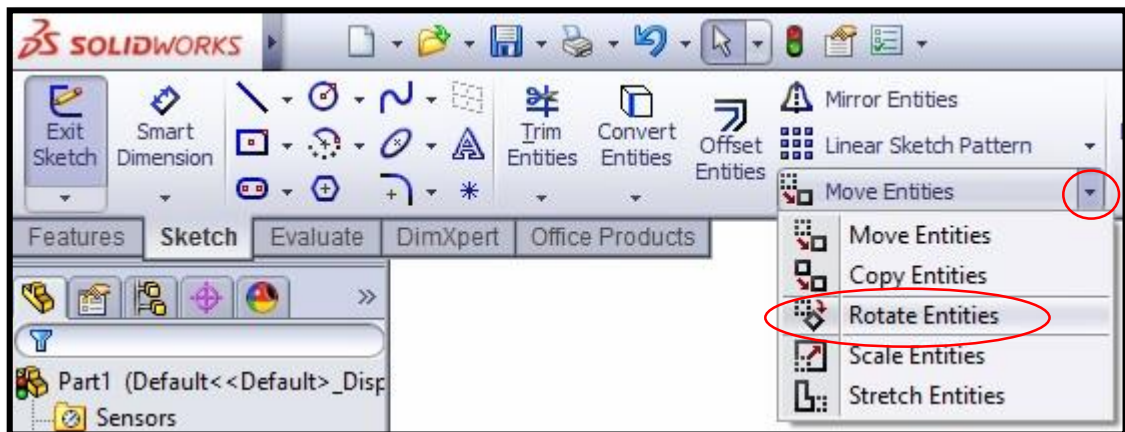
Εικόνα 6.13

Απο την γραμμή εντολών του **Sketch** επιλέγουμε **Move Entities** για να μετακινήσουμε το σχέδιο μας. Προσέχουμε το κουτάκι **Keep relations** να μην είναι επιλεγμένο. Επιλέγουμε το προφίλ και την αξονική γραμμή και αφού κάνουμε κλικ στο παραθυράκι **Start point:** δηλώνουμε το σημείο απο το οποίο θα ξεκινήσει η μετακίνηση το οποίο είναι το δεξιά σημείο της αξονικής. Τα σέρνουμε προς τα αριστερά έως ότου το σημείο πατήσει πάνω στην αρχή των αξόνων. Βλέπε εικόνα παρακάτω:



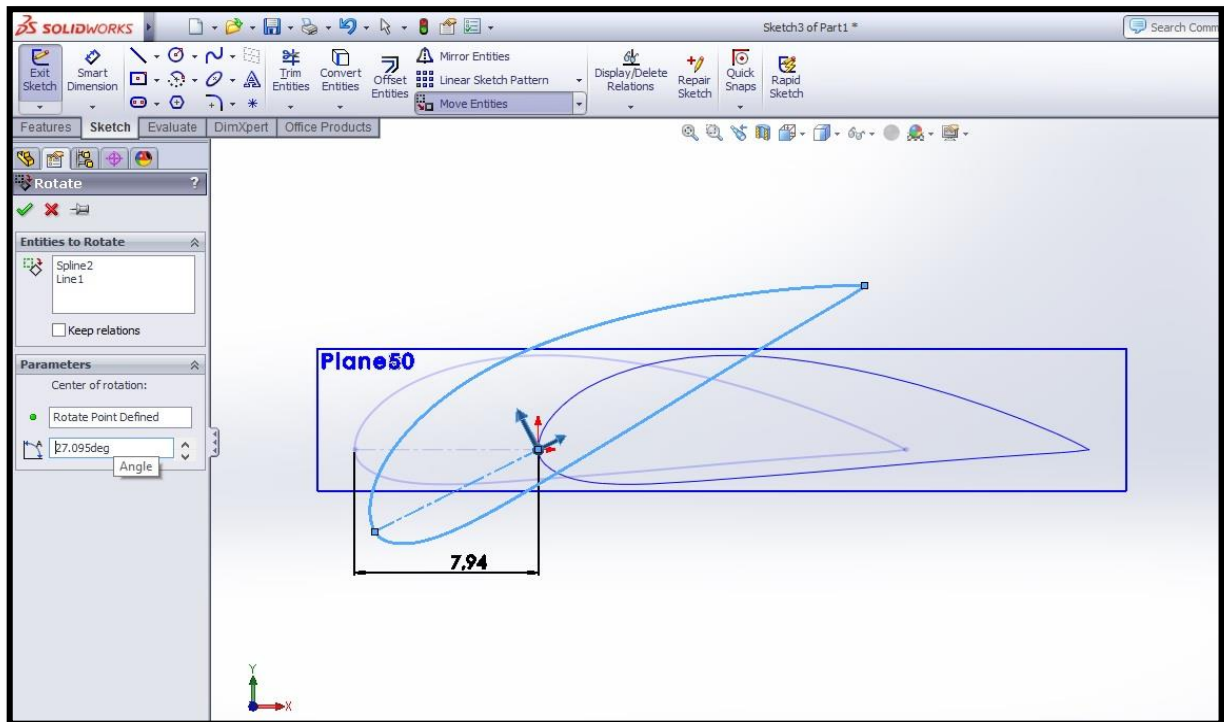
Εικόνα 6.14

Για να δώσουμε την σωστή κλίση στο προφίλ της περύγωσης πατάμε να μας εμφανίσει το υπομενού της εντολής **Move Entities** και επιλέγουμε το **Rotate Entities** όπως φαίνεται παρακάτω:



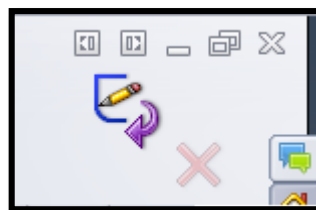
Εικόνα 6.15

Επιλέγουμε το προφίλ της περυγώσης και την αξονική και κάνουμε κλικ στο κουτί **Center of rotation**: για να προσδιορίσουμε το σημείο ως προς το οποίο θα περιστραφούν οι επιλογές μας το οποίο είναι ξανά το δεξί άκρο της αξονικής . Στη συνέχεια πληκτρολογούμε την γωνία σε μοίρες ($^{\circ}$) κατα την οποία θα περιστραφεί το πρώτο προφίλ μας (βλέπε εικόνα παρακάτω) με βάση τους υπολογισμούς που έγιναν στο **Υπολfterou2.0**. Στην περίπτωση μας: **27.095 $^{\circ}$** . Τέλος κάνουμε κλικ στο **✓**.



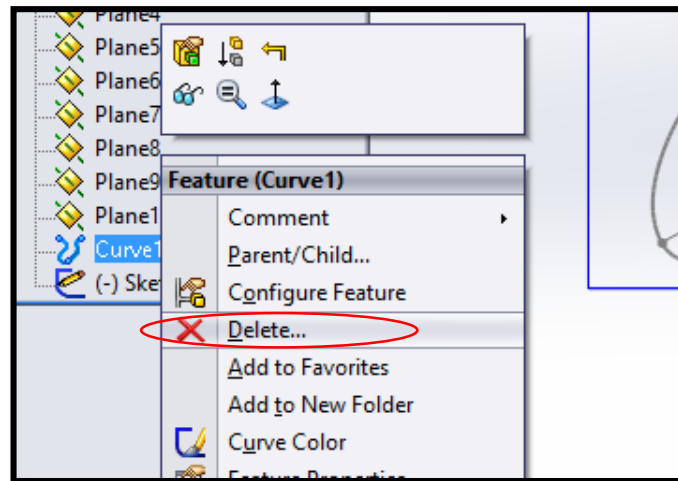
Εικόνα 6.16

Τελειώσε η διαδικασία για το πρώτο προφίλ, κάνουμε κλικ στο **Exit Sketch** ή στο εικονίδιο:



Εικόνα 6.17

Μπορούμε αν θέλουμε να διαγραφουμε το **Curve1** κάνοντας δεξί κλικ πανω του και κλικ στο Delete, (βλέπε εικόνα παρακάτω) διότι δεν μας χρειάζεται πλέον.



Εικόνα 6.18

Για να συνεχίσουμε στο δεύτερο προφίλ ξανακάνουμε την διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω επιλέγοντας **Curves**, **Curve Through XYZ Points** (βλέπε εικόνα 6.6), **Browse** (βλέπε εικόνα 6.7), αυτή τη φορά εισάγουμε το δεύτερο αρχείο .txt, **Open** και μετά **OK**.

Στο μενού αριστερά κάνουμε κλικ στο **Plane 2** και **Sketch**, στη συνέχεια **Convert Entities** (βλέπε εικόνα 6.9) επιλέγουμε το 2^ο προφίλ που εισάγαμε και κλικ στο ✓. Ξανά **Centerline** για να σχεδιάσουμε την οριζόντια αξονική (βλέπε εικόνα 6.11) και **Smart Dimension** για να εισάγουμε το μήκος της που όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι το 1/3 της εκάστοτε χορδής. Στην περίπτωση του 2^{ου} προφίλ μας είναι: **8 mm**. Κλικ στο ✓.

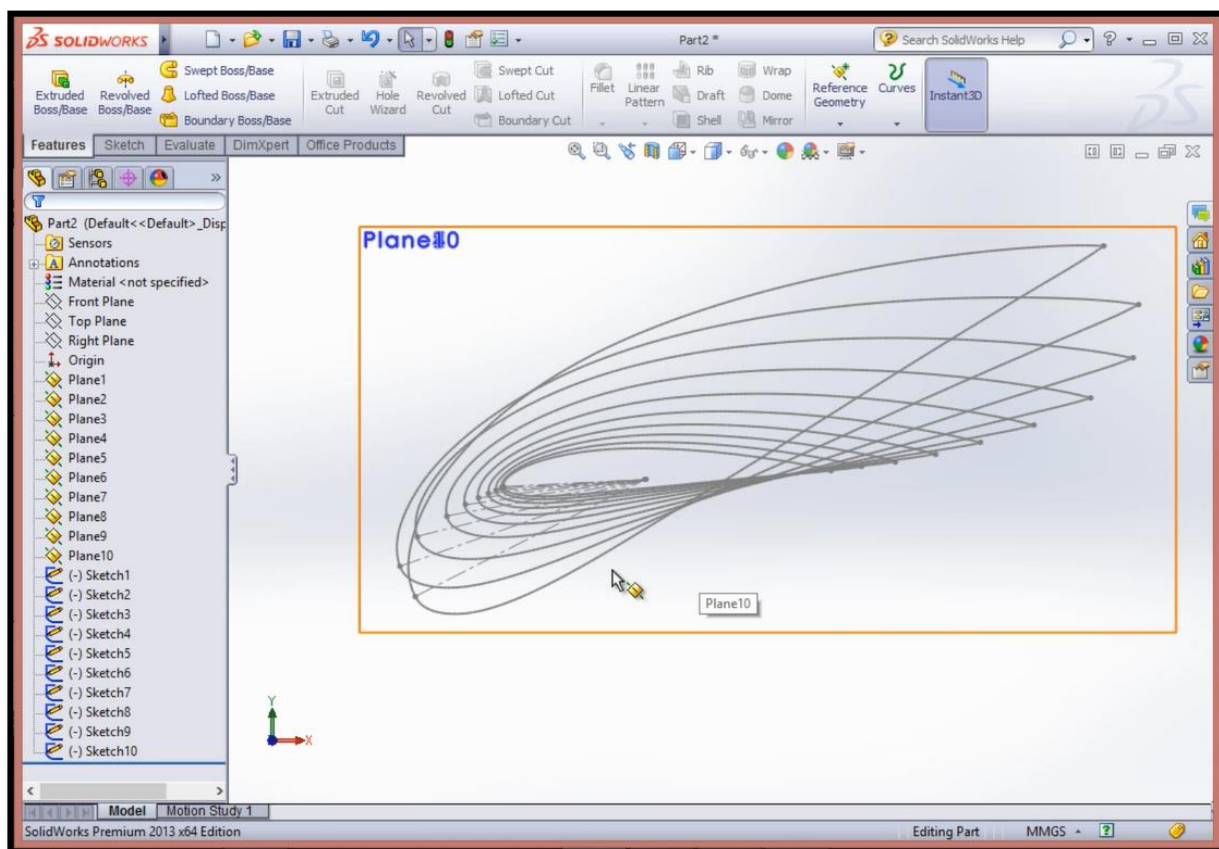
Τα μετακινούμε στην αρχή των αξόνων με την εντολή **Move Entities** (βλέπε εικόνα 6.14) και τα περιστρέφουμε με την εντολή **Rotate Entities** (βλέπε εικόνα 6.15). Εισάγουμε την γωνία περιστροφής (βλέπε εικόνα 6.16). Στην περίπτωση του 2^{ου} προφίλ μας είναι η γωνία είναι: **19,599°**. Κλικ στο ✓.

Πατάμε το εικονίδιο **Exit Sketch** (βλέπε εικόνα 6.17) και τελειώσαμε την διαδικασία και για το 2^ο προφίλ.

Διαγράφουμε το **Curve 2**.

Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται για άλλες **8** φορές εφόσον τα προφίλ μας για την δημιουργία της πτερύγωσης είναι **10** με μόνη αλλαγή τα διαφορετικά αρχεία .txt για το κάθε προφίλ, τις τιμές που εισάγουμε κάθε φορά για το μήκος του 1/3 της χορδής και της γωνίας περιστροφής.

Μετά το πέρας των παραπάνω διαδικασιών θα πρέπει τα 10 προφίλ σε μπροστινή όψη (Front View) να έχουν την παρακάτω όψη:

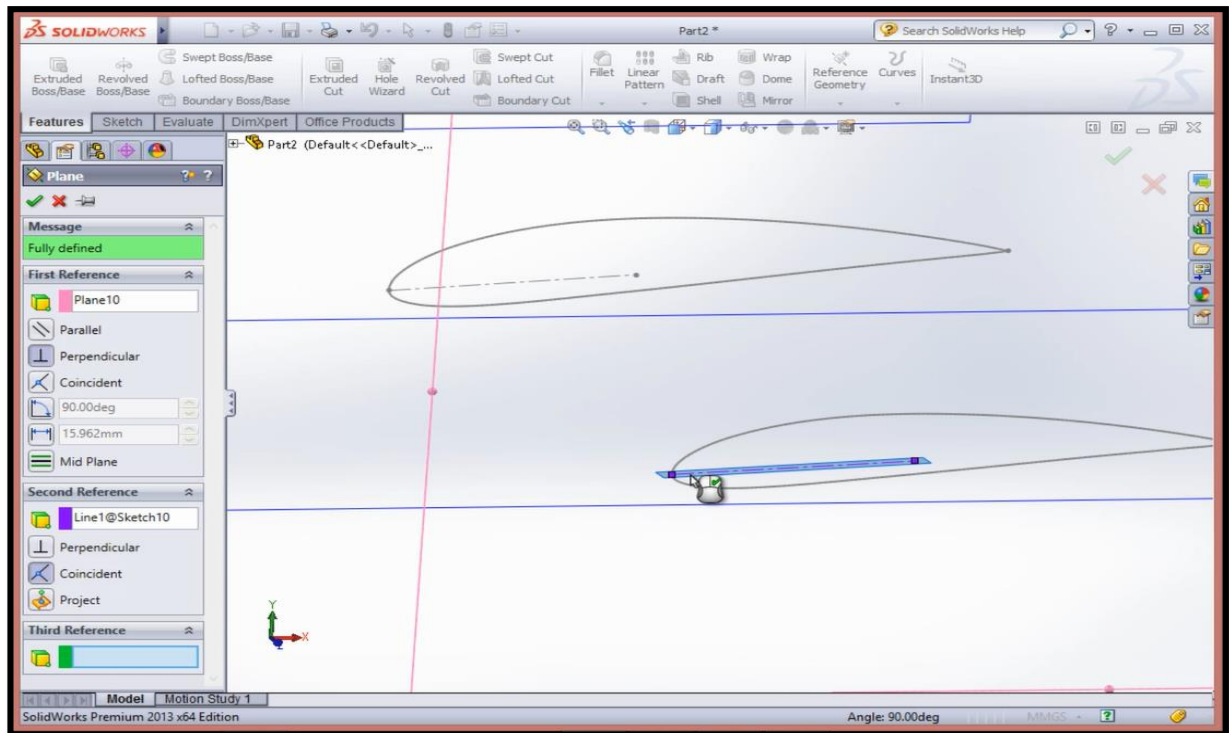


Εικόνα 6.19

6.3.Σχεδίαση περύγωσης: Ακροπερύγιο

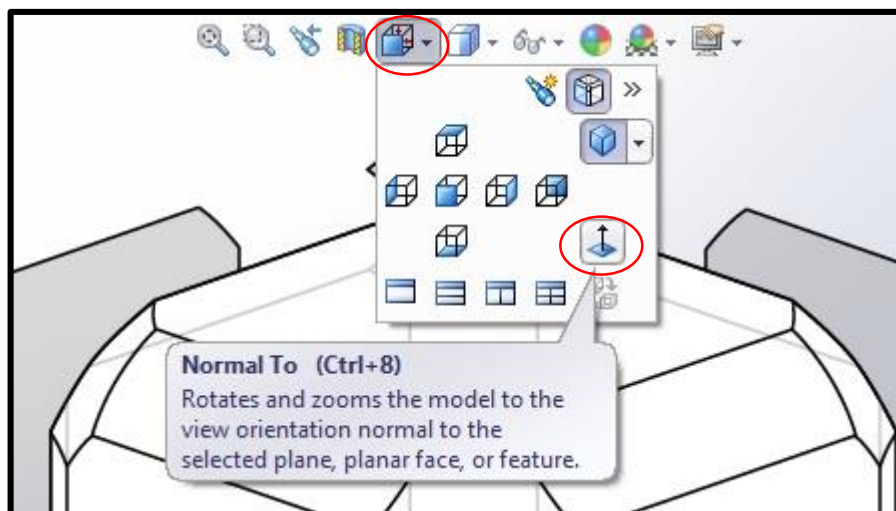
Για τον σχεδιασμό του ακροπερυγίου θα χρειαστεί να προσθέσουμε πλαίσιο σχεδίασης οπότε επιλέγουμε με κλικ απο την στήλη αριστερά το **Plane 10** και απο την βασική γραμμή εργαλείων πατάμε **Insert**, στη συνέχεια περνάμε το ποντίκι πάνω απο την επιλογή **Reference Geometry** και στην καρτέλα που εμφανίζετε κάνουμε κλικ στην επιλογή **Plane** (βλέπε εικόνα 6.4). Στη συνέχεια αφού εμφανιστεί το μενού αριστερά και είναι αυτόματα επιλεγμένο το πλαίσιο **Second Reference**, επιλέγουμε με κλικ την αξονική γραμμή του 10^{ου} προφίλ και στη συνέχεια κλικ στο ✓ (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.20).

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νέο πλαίσιο να εμφανιστεί κάθετο και με την ίδια κλίση στο 10^ο προφίλ και έχουμε την δυνατότητα τραβώντας οποιαδήποτε απο τις άκρες του να το επιμυκνήνουμε για να μας διευκολύνει οπτικά.



Εικόνα 6.20

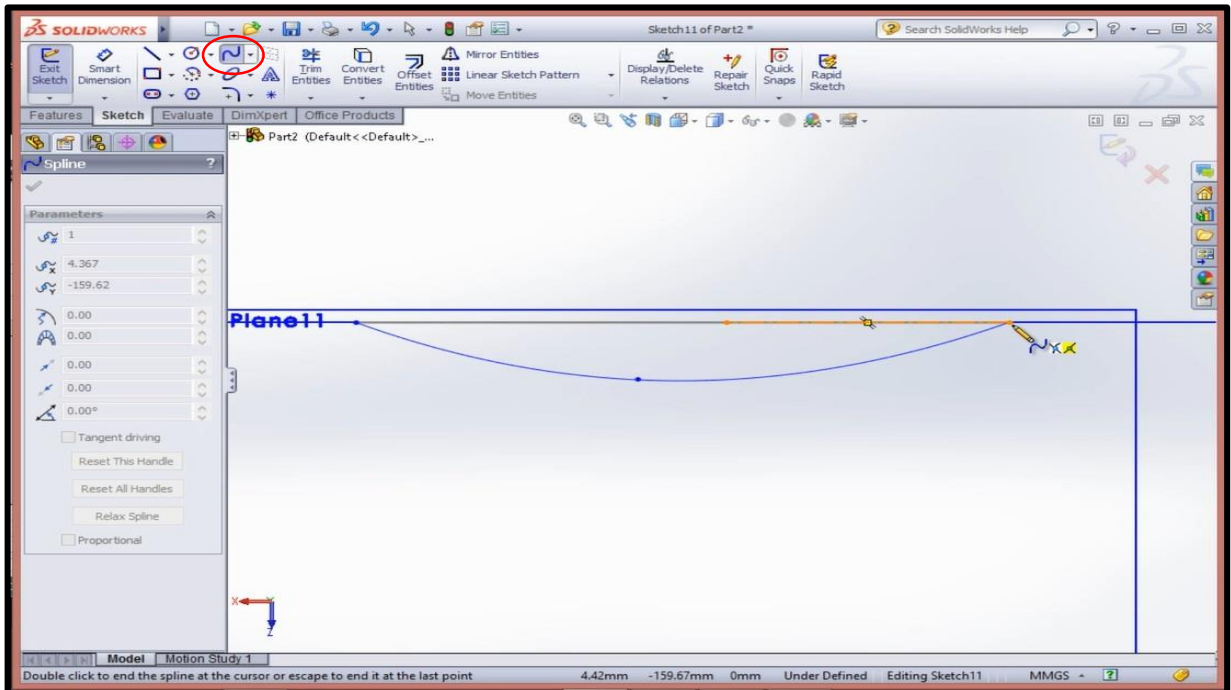
Για να εργαστούμε πάνω στο καινούριο πλαίσιο **Plane11** (εφόσον είναι ήδη επιλεγμένο) κάνουμε κλικ στο εικονίδιο **View Orientation** και στη συνέχεια κλικ στο **Normal To** (βλέπε εικόνα).



Εικόνα 6.21

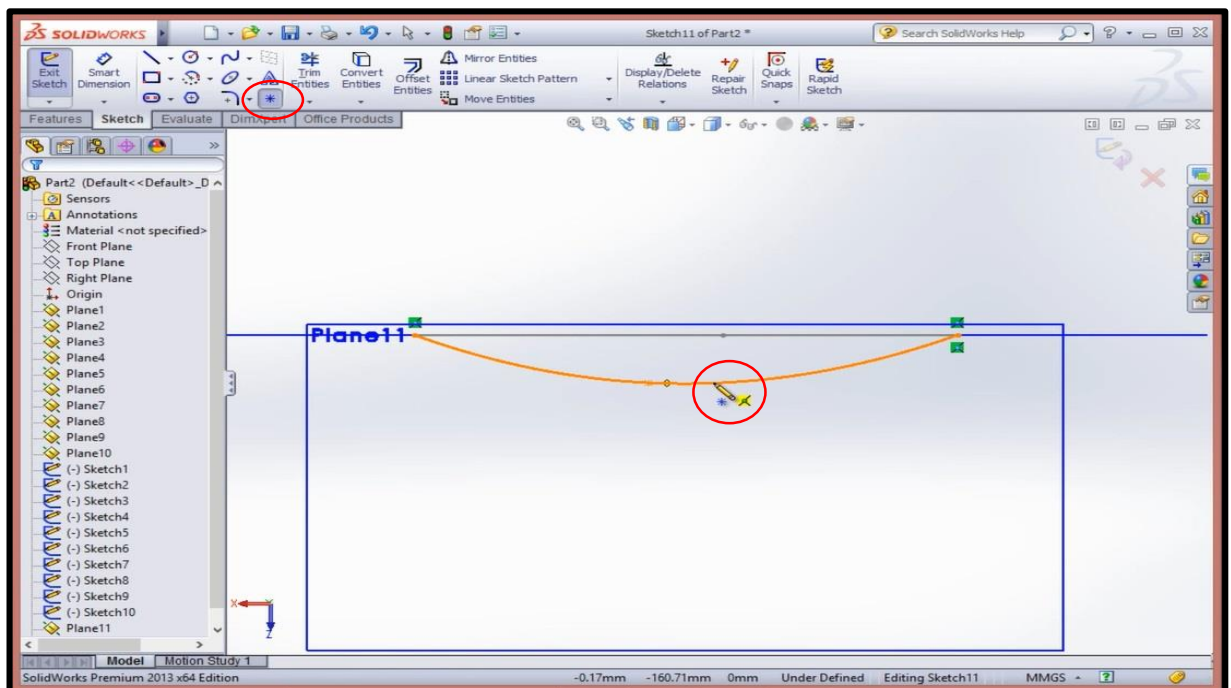
Απο την καρτέλα **Sketch** επιλέγουμε **Spline** και πάμε να σχεδιάσουμε την καμπύλη η οποία θα δημιουργήσει το ακροπτερύγιο, αυτό θα το πετύχουμε με 3 σημεία. Το πρώτο κλικ το κάνουμε στην αριστερή άκρη του τελευταίου προφίλ (που σε αυτή την όψη είναι απλά ένα ευθύγραμμο τμήμα), το δεύτερο κλικ το κάνουμε περίπου στα μισά του προφίλ αλλά σε κάποια απόσταση

εξωτερικά του προφίλ και τέλος το τρίτο κλικ το κάνουμε στην άλλη ακρη του προφίλ (βλέπε εικόνα 6.22), ολοκληρώθηκε η καμπύλη οπότε πατάμε **escape** απο το πληκτρολόγιο.



Εικόνα 6.22

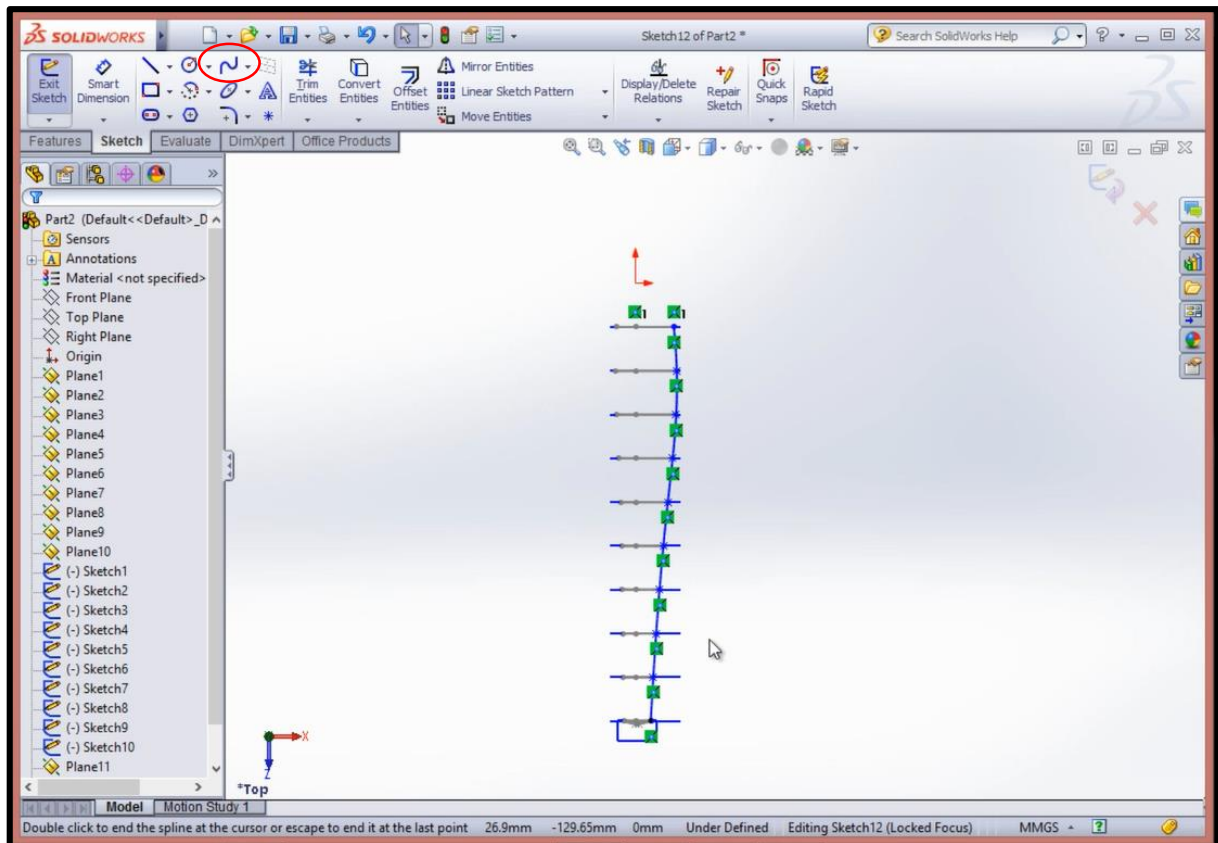
Αφού έχουμε την καμπύλη, απο την καρτέλα **Sketch** κάνουμε κλικ στην εντολή **Point** για να τοποθετήσουμε ένα σημείο πάνω στο μέσον της καμπύλης που δημιουργήσαμε (βλέπε εικόνα 6.23). Στη συνέχεια κλικ στο **✓** και **Exit Sketch**.



Εικόνα 6.23

6.4.Σχεδίαση περύγωσης: Η εντολή Loft

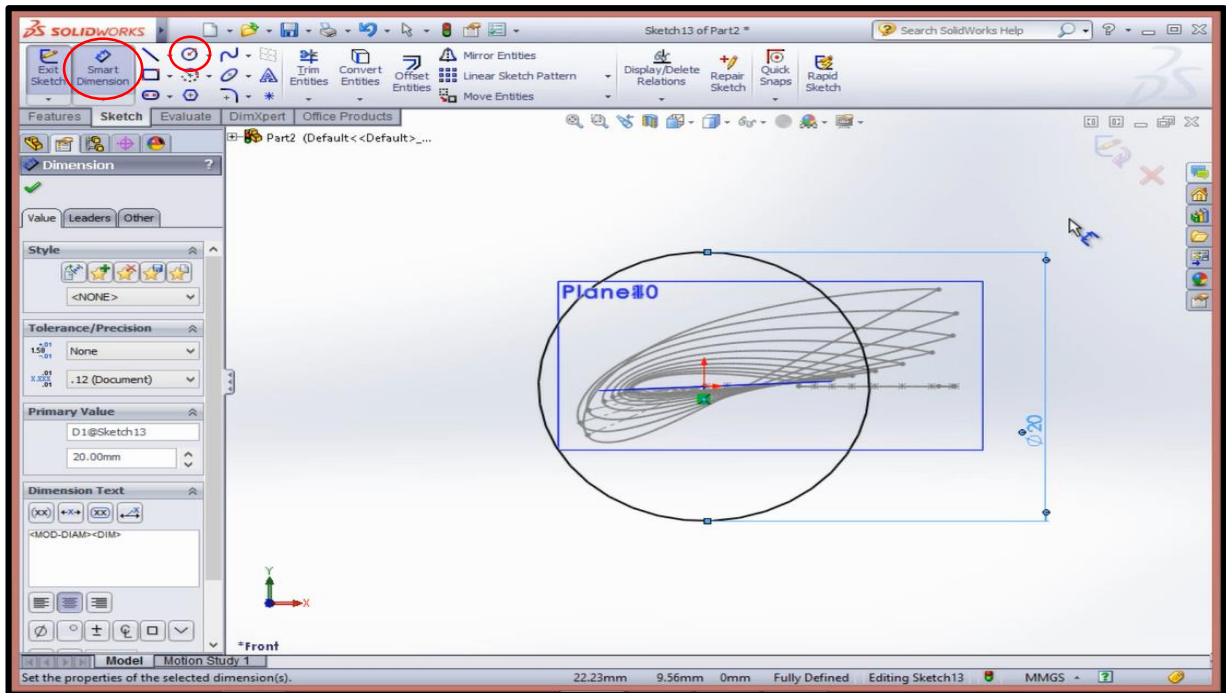
Δημιουργία (**Guiding curve**) βοηθητικής καμπύλης για την τρισδιάστατη ένωση των προφίλ της περύγωσης. Επιλέγουμε **Top Plane** απο το μενού αριστερά στη συνέχεια **Normal To** (βλέπε εικόνα 6.21) και κλικ στο **Sketch**. Απο την καρτέλα εργαλείων του **Sketch** επιλέγουμε **Spline** και ξεκινάμε να ενώνουμε με κλικ ένα ένα τα δεξιά ακραία σημεία όλων των προφίλ (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.24), escape στο τελευταίο σημείο και **Exit Sketch**.



Εικόνα 6.24

Για να σχεδιάσουμε το κομμάτι που ενώνει την βάση με το πρώτο προφίλ επιλέγουμε **Front Plane**, **Sketch** και κλικ στην εντολή **Circle**. Επιλέγουμε **Normal To** για να μας διευκολύνει στην σχεδίαση. Ξεκινώντας τον κύκλο απο την αρχή των αξόνων επιμυκνόμε και αφήνουμε. Με το **Smart Dimension** επιλέγουμε τον κύκλο και πληκτρολογούμε **20 mm** (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.25). Κλικ στο **Exit Sketch**.

Μπορούμε να επιλέξουμε τα **Plane1** έως **Plane10** και με δεξί κλικ να πατήσουμε **Hide** διότι δεν θα μας χρειαστούν τα πλαίσια παρακάτω.

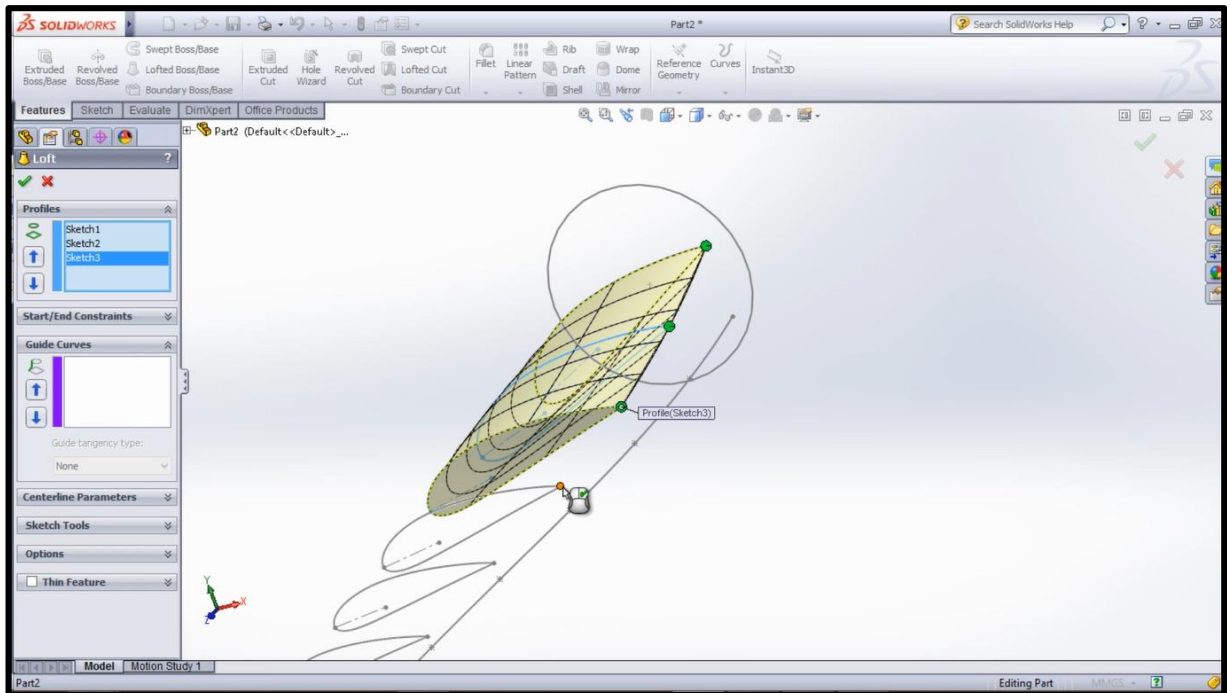


Εικόνα 6.25

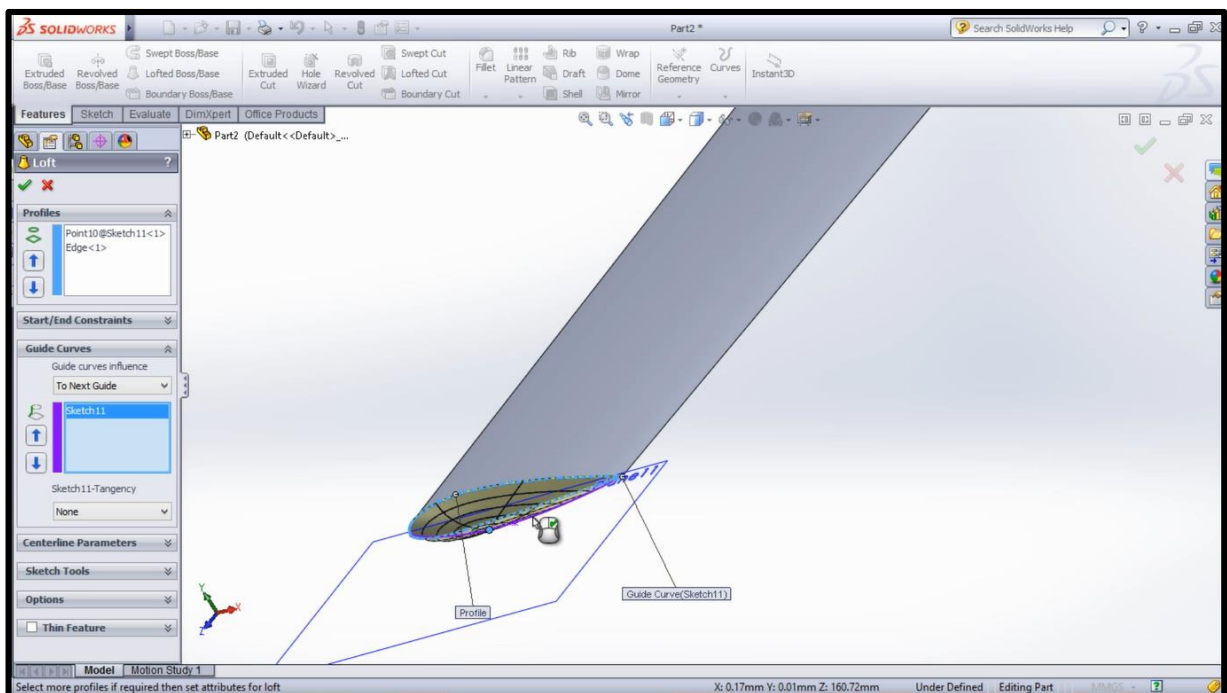
Για να πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη σχεδίαση της περύγωσης επιλέγουμε από την καρτέλα **Features** την εντολή **Lofted Boss/Base** και ξεκινάμε με κλικ στο γωνιακό σημείο του 1^{ου} προφίλ και συνεχίζουμε ένα ένα μέχρι και το 10^ο προφίλ (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.26). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το αυτόματο τρισδιάστατο γέμισμα ανάλογα με το εκάστοτε προφίλ. Από την καρτέλα στα αριστερά με τις ρυθμίσεις της εντολής **Loft** κάνουμε κλικ εσωτερικά στο κουτί **Guide Curves** για να δηλώσουμε την βοηθητική καμπύλη που σχεδιάσαμε παραπάνω την οποία επιλέγουμε με κλικ πάνω της. Κλικ στο ✓.

Μπορούμε να μετονομάσουμε στο Model Tree το Loft1 σε wing για να γνωρίζουμε σε τι αναφέρεται.

Συνεχίζουμε επιλέγοντας ξανά την εντολή **Lofted Boss/Base** και επιλέγουμε με κλικ το περίγραμμα του 10^{ου} προφίλ αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πρόγραμμα να επιλέγει ως άλλο άκρο το σημείο που είχαμε προσθέσει στην καμπύλη του ακροπτερυγίου (εάν δέν το κάνει επιλέγουμε μόνοι μας με κλικ το σημείο/point που είχαμε προσθέσει). Κάνουμε κλικ στο παραθυράκι **Guide Curves** και επιλέγουμε με κλικ την καμπύλη του ακροπτερυγίου (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.27) και κλικ στο ✓.



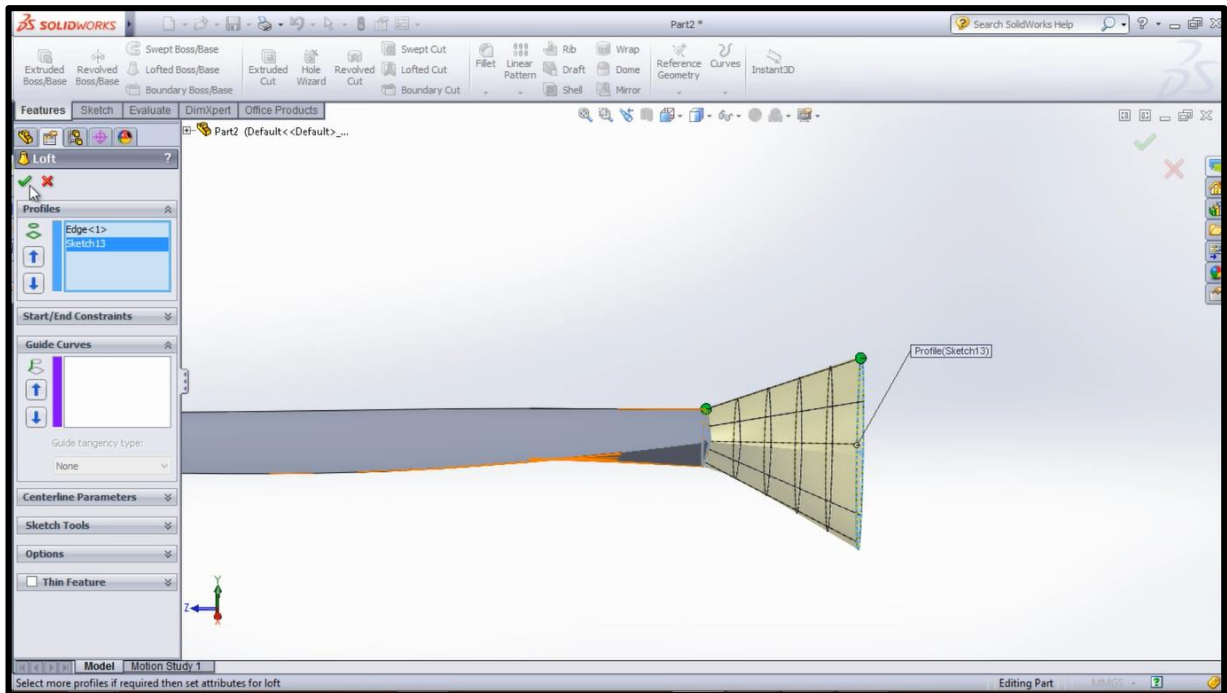
Εικόνα 6.26



Εικόνα 6.27

Μπορούμε να μετονομάσουμε το **Loft2** σε “tip”.

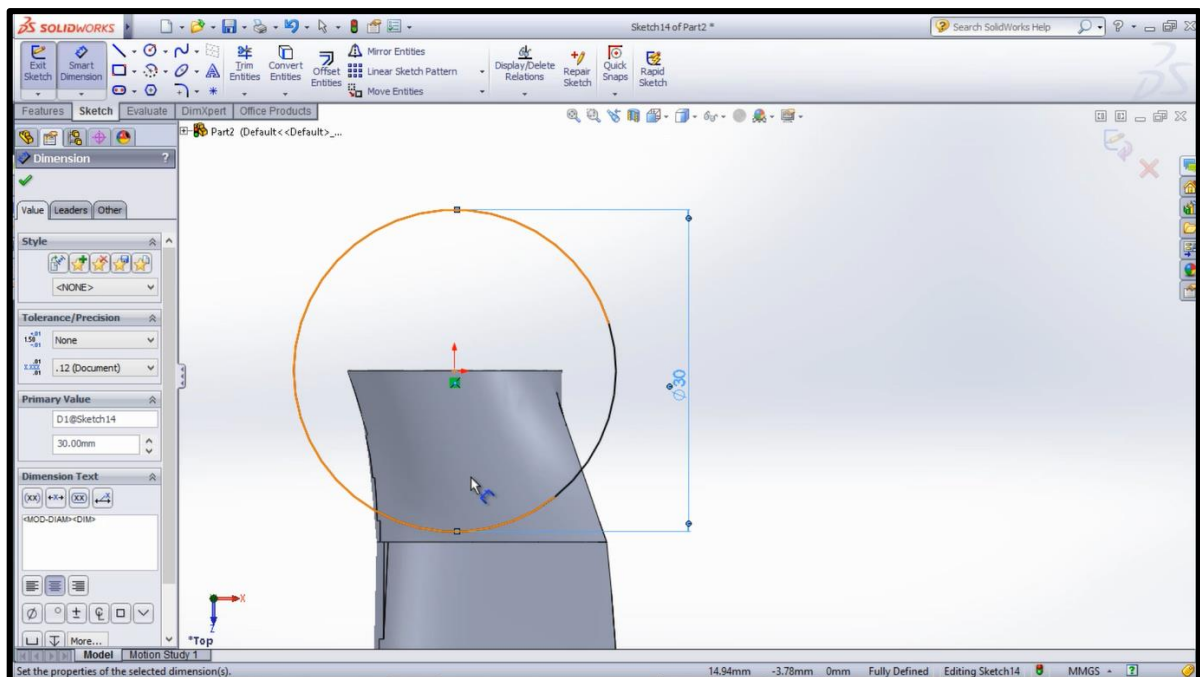
Επιλέγουμε για ακόμη μία φορά την εντολή **Lofted Boss/Base** και κάνουμε κλικ στο περίγραμμα του 1^{ου} προφίλ και στη συνέχεια κλικ στον κύκλο των 20 mm (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.28). Φροντίζουμε η γραμμή που τα ενώνει να ακολουθεί την πορεία του φτερού. Κάνουμε κλικ στο ✓.



Εικόνα 6.28

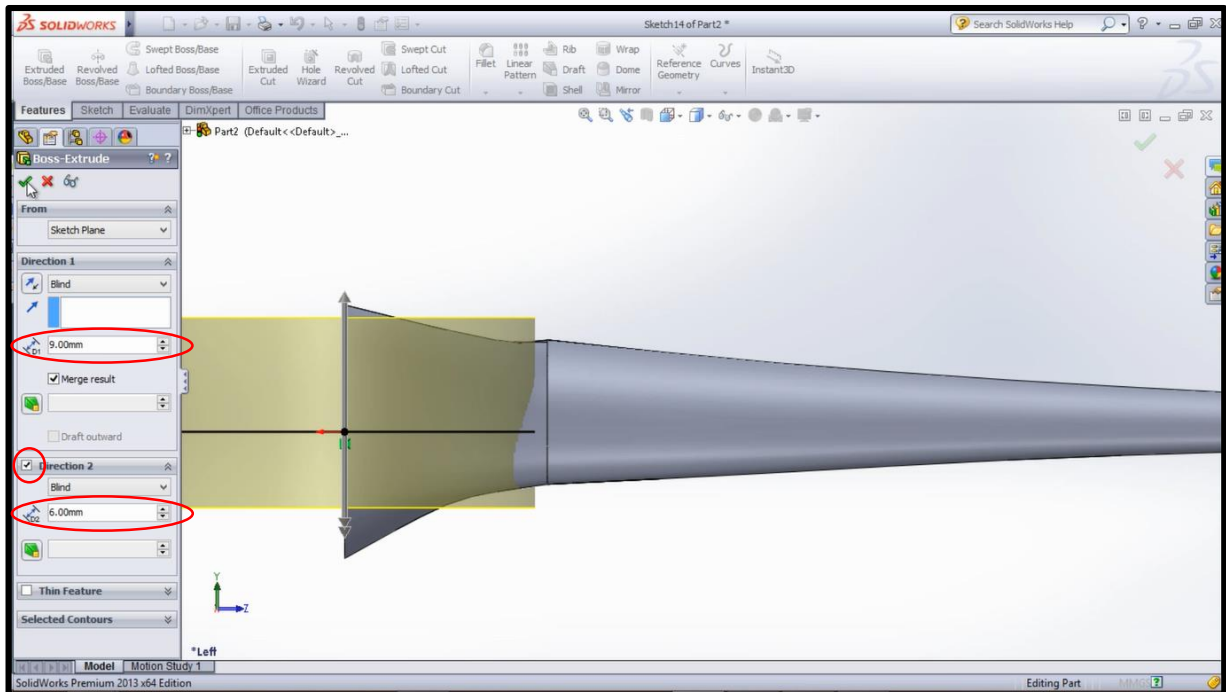
6.5.Σχεδίαση περύγωσης: Η Πλήμνη

Για να σχεδιάσουμε την πλήμνη πάνω στην οποία θα 'κουμπώνουν' τα 3 φτερά επιλέγουμε το **Top Plane** και **Normal To** στη συνέχεια επιλέγουμε να σχεδιάσουμε κύκλο **Circle**. Ξεκινάμε τον κύκλο από την αρχή των αξόνων. Αφού τον σχεδιάσουμε πατάμε **Smart Dimension** για να του δώσουμε διάσταση, τον επιλέγουμε με κλικ και πληκτρολογούμε **30 mm** (βλέπε εικόνα παρακάτω). Κάνουμε κλικ στο ✓.



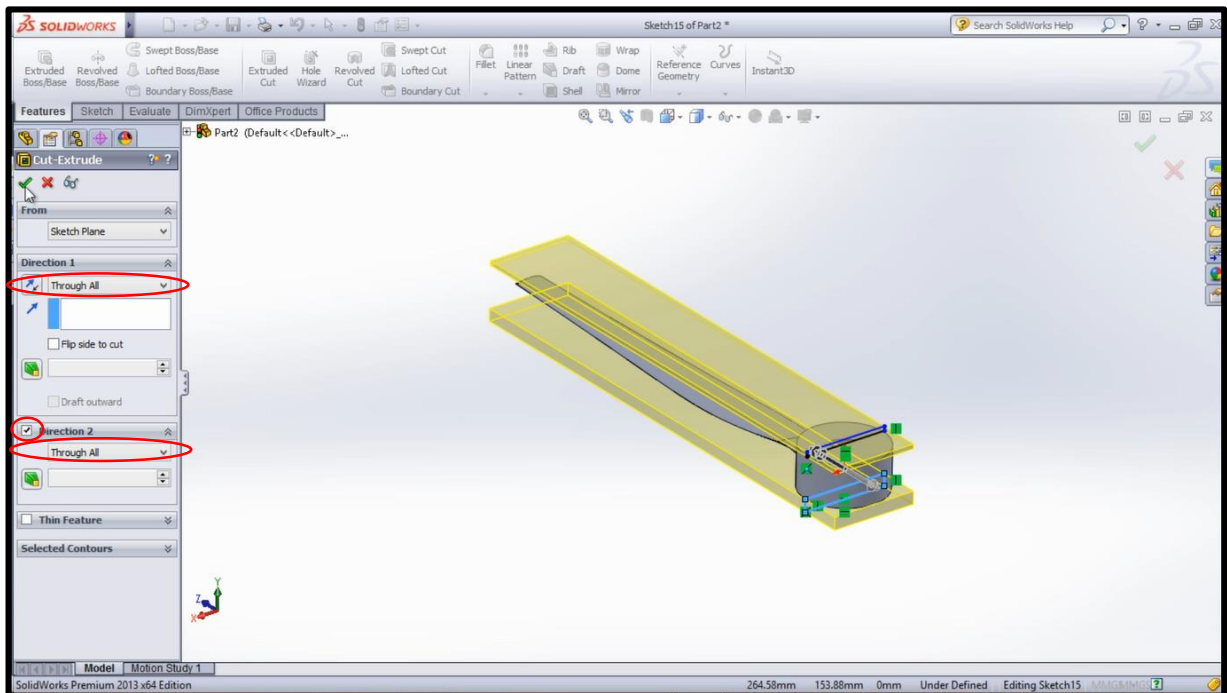
Εικόνα 6.29

Πηγαίνουμε στην καρτέλα **Features** επιλέγουμε **Extruded Boss/Base** και απ τις επιλογές που μας εμφανίζει στο μενού αριστερά κάνουμε κλικ στο κουτάκι που λέει **Direction 2**, στο πλαίσιο που εμφανίζεται απο κάτω πληκτρολογούμε την απόσταση **5 mm**. Επιλέγουμε πλάγια όψη για να μας βοηθάει οπτικά στο σχεδιασμό. Στο μενού του **Direction 1** στο κουτί της απόστασης πληκτρολογούμε **10 mm** (βλέπε εικόνα 6.30). Κάνουμε κλικ στο **✓**. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανιστεί η πλήμνη.



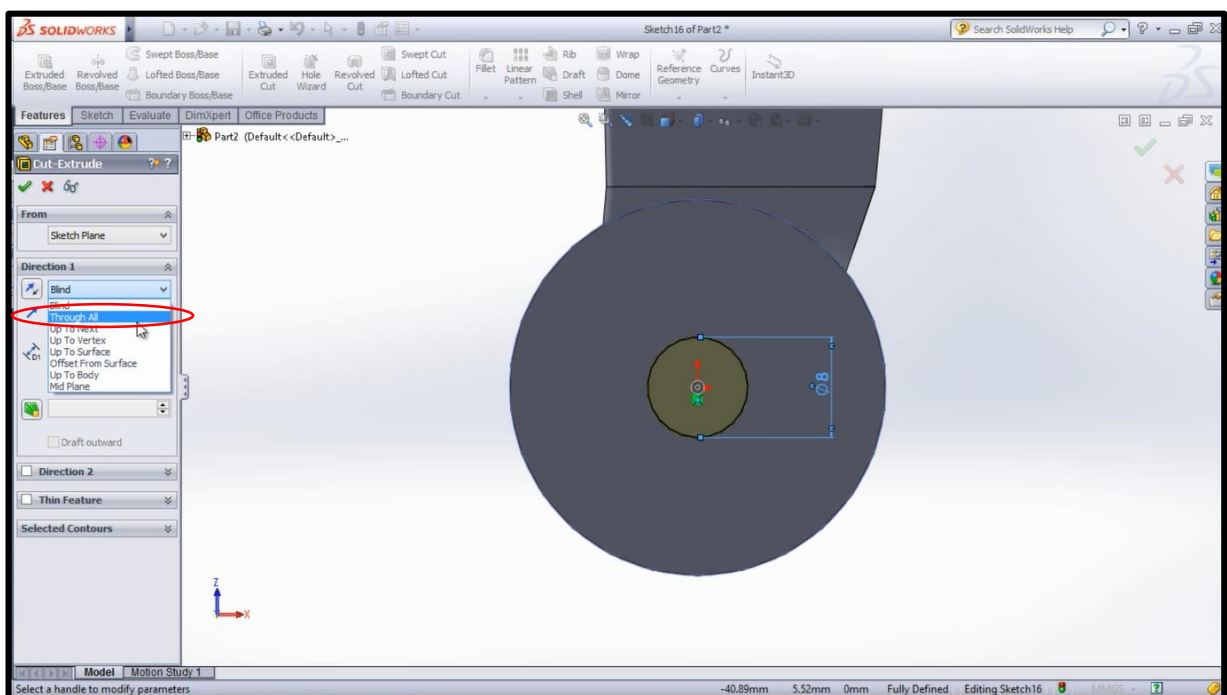
Εικόνα 6.30

Μετονομάζουμε το **Boss-Extrude1** σε “**Φ30 Hole**”. Στη συνέχεια πρέπει να γίνει διόρθωση των ατελειών δηλαδή να αφαιρεθεί το υλικό που περισσεύει πάνω και κάτω απο την πλήμνη. Επιλέγουμε **Front Plane** και **Normal To**, πατάμε **Sketch** και στη συνέχεια επιλέγουμε **Corner Rectangle** για να σχεδιάσουμε τετράγωνο. Σχεδιάζουμε ένα τετράγωνο που θα ξεκινάνει απ το πάνω μέρος της πλήμνης και θα είναι αρκετα ψηλό για να καλύπτει ότι περισσεύει. Άλλο ένα τετράγωνο στο κάτω μέρος παρόμοιο με το πάνω. Απ την καρτέλα **Features** επιλέγουμε **Extruded Cut** και απο το μενού που εμφανίζεται αριστερά κάτω απ το **Direction 1** επιλέγουμε **Through All**. Κάνουμε κλικ και στο τετραγωνάκι του **Direction2** και επιλέγουμε επίσης **Through All** (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.31). Με αυτό τον τρόπο επιμηκύνουμε τα δύο ορθογώνια ώστε να αφαιρούν το υλικό που περισσεύει. Κάνουμε κλικ στο **✓**.



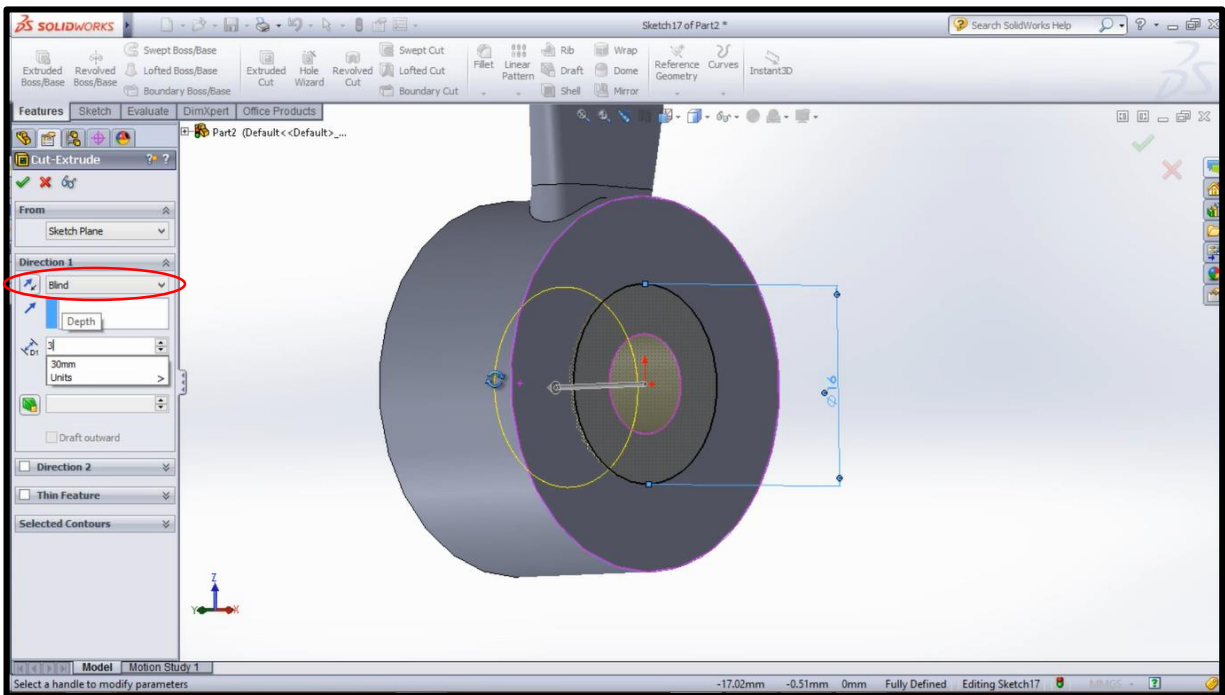
Εικόνα 6.31

Σε **Top View** επιλέγουμε με κλικ την πάνω πλευρά της πλήμνης και **Sketch**. Επιλέγουμε **Circle** για να σχεδιάσουμε κύκλο στο κέντρο της πλήμνης (αρχή αξόνων). Με το **Smart Dimension** δίνουμε διάμετρο **8.1 mm** θα είναι η οπή για τον άξονα της πειραματικής εγκατάστασης. Επιλέγουμε **Extruded Cut** και απο το μενού επιλέγουμε **Through All** (βλέπε εικόνα 6.32). Κάνουμε κλικ στο **✓**. Μετονομάζουμε το **Cut-Extrude2** σε “**Φ8 hole**”.



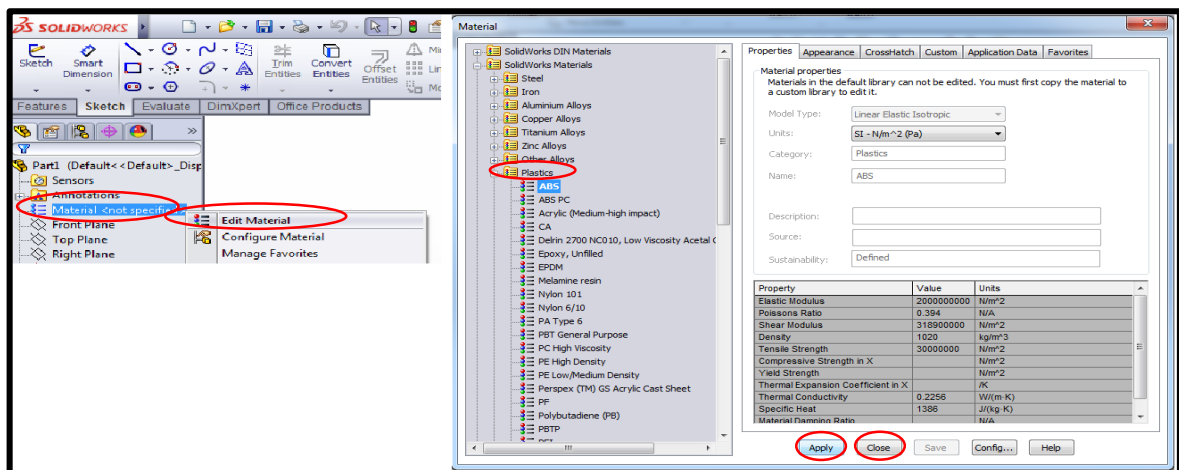
Εικόνα 6.32

Επιλέγουμε ξανά την πάνω πλευρά της πλήμνης και ξανά **Sketch** και **Circle**. Σχεδιάζουμε κύκλο με αρχή πάλι το κέντρο της πλήμνης και με το **Smart Dimension** δηλώνουμε διάμετρο **16 mm**. Απο την καρτέλα **Features** επιλέγουμε **Extruded Cut** για να δημιουργήσουμε την εγκοπή για την ροδέλα. Στο μενού αριστερά στο πλαίσιο της απόστασης πληκτρολογούμε **3 mm** (βλέπε εικόνα παρακάτω). Κάνουμε κλικ στο **✓**. Μετονομάζουμε το Cut-Extrude3 σε “Φ16 hole”.



Εικόνα 6.33

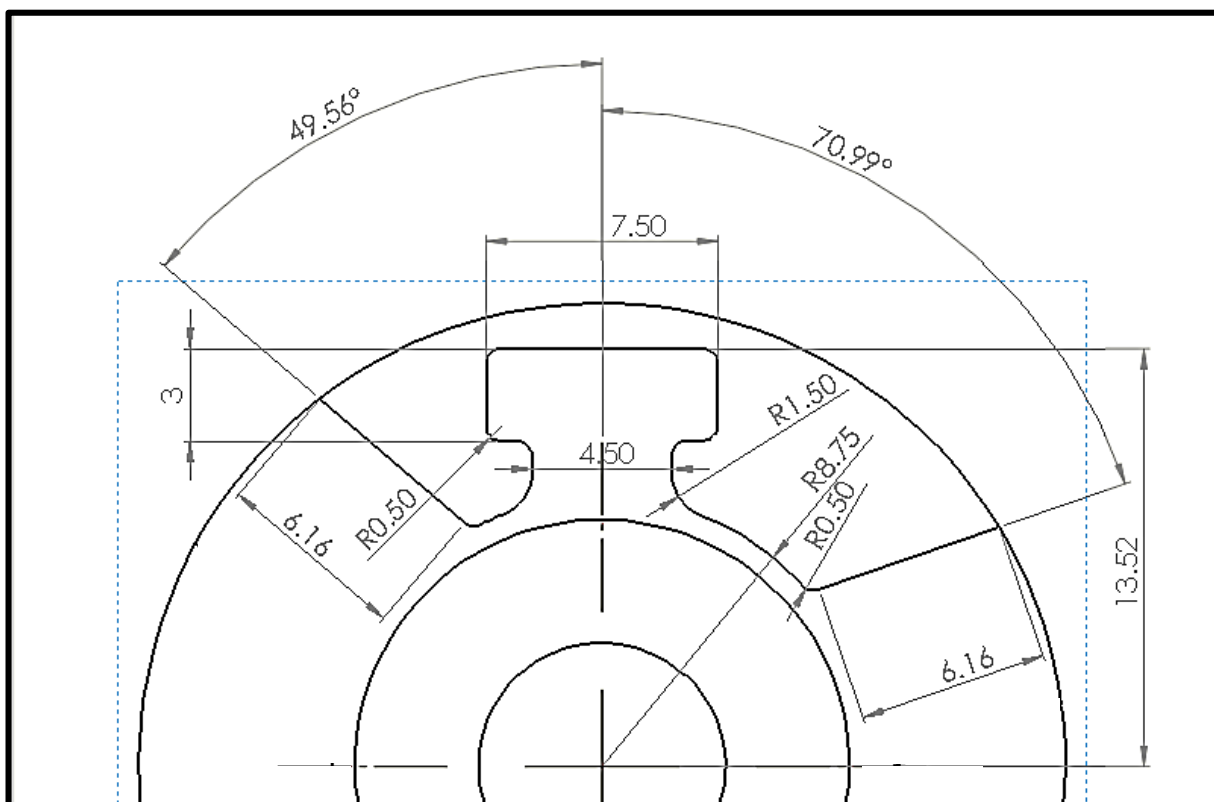
Για να εισάγουμε το υλικό της κατασκευής μας (βλέπε εικόνα παρακάτω) κάνουμε δεξιά κλικ στην καρτέλα αριστερά, εκεί που γράφει **Material <not specified>** επιλέγουμε **Edit Material**. Στην καρτέλα που εμφανίζεται επιλέγουμε με διπλό κλικ **Plastics** και στην συνέχεια την πρώτη επιλογή **ABS**, **Apply** και **Close**.



Εικόνα 6.34

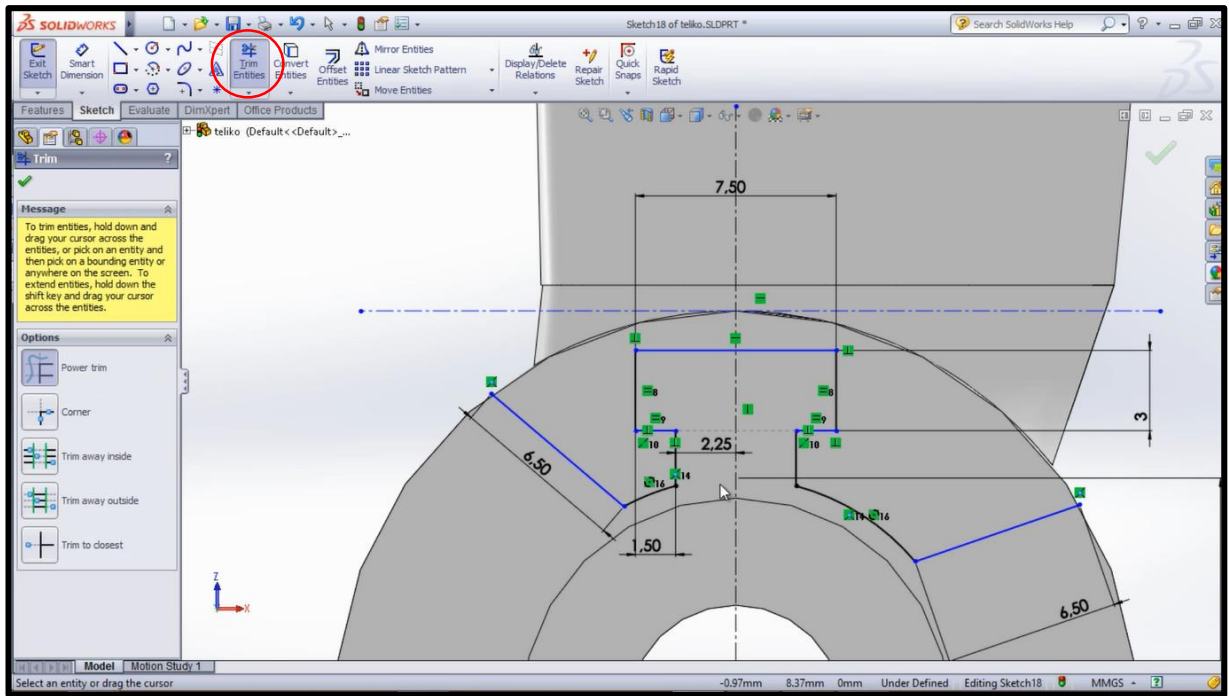
6.6.Σχεδίαση πτερύγωσης: Διαχωρισμός πλήμνης – φτερού

Για να γίνει ο διαχωρισμός του φτερού από την πλήμη και για να μπορέσουν να εκτυπωθούν σαν ξεχωριστά κομμάτια πρέπει να σχεδιάσουμε την γεωμετρία κατά την οποία θα αποκοπούν τα κομμάτια. Επιλέγουμε **Top Plane** και **Normal To**, στη συνέχεια κλικ στο **Sketch** και ξεκινάμε να σχεδιάζουμε στην επιφάνεια της πλήμνης την παρακάτω γεωμετρία:

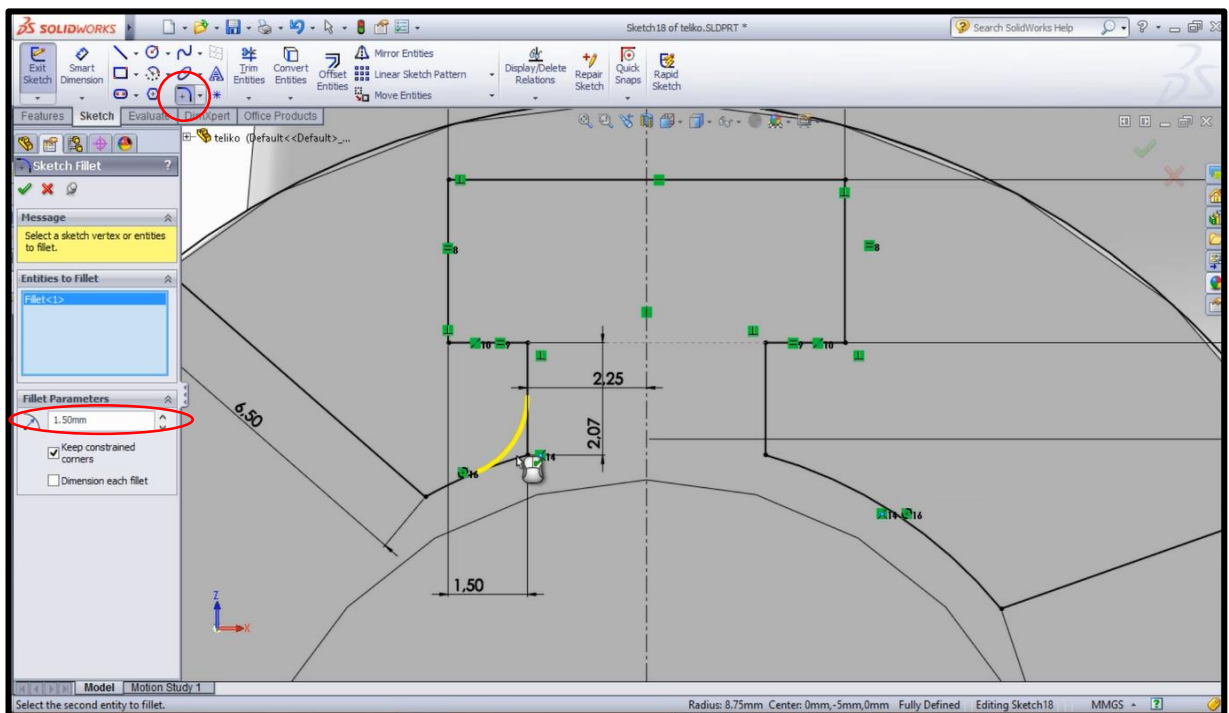


Εικόνα 6.35

Για το παραπάνω σχέδιο έχει γίνει η χρήση αξονικής γραμμής (**Centerline**), γραμμής (**Line**) και κύκλου (**Circle**). Είναι πολύ σημαντικό το σχέδιο να αποτελείται από **κλειστό** περίγραμμα οπότε θα χρειαστεί να ξανασχεδιάσουμε τον εξωτερικό κύκλο των **30 mm**. Για να “κόψουμε” τις περιττές γραμμές ώστε να παραμείνει το παραπάνω περίγραμμα πηγαίνουμε στην καρτέλα **Sketch** και επιλέγουμε την εντολή **Trim Entities** στη συνέχεια διασχίζουμε με το ποντίκι και το αριστερο κλικ πατημένο τις γραμμές που δεν χρειαζόμαστε (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.36). Για την ομαλοποίηση των γωνιών ($R=1.50$ στην παραπάνω εικόνα) επιλέγουμε από την καρτέλα **Sketch** την εντολή **Sketch Fillet** και πληκτρολογούμε στο παράθυρο αριστερά κάτω από το **Fillet Parameters: 1,5 mm** επιλέγουμε με κλικ της 2 γωνίες στις οποίες θέλουμε να το εφαρμόσουμε (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.37). Κάνουμε κλικ στο **✓**.



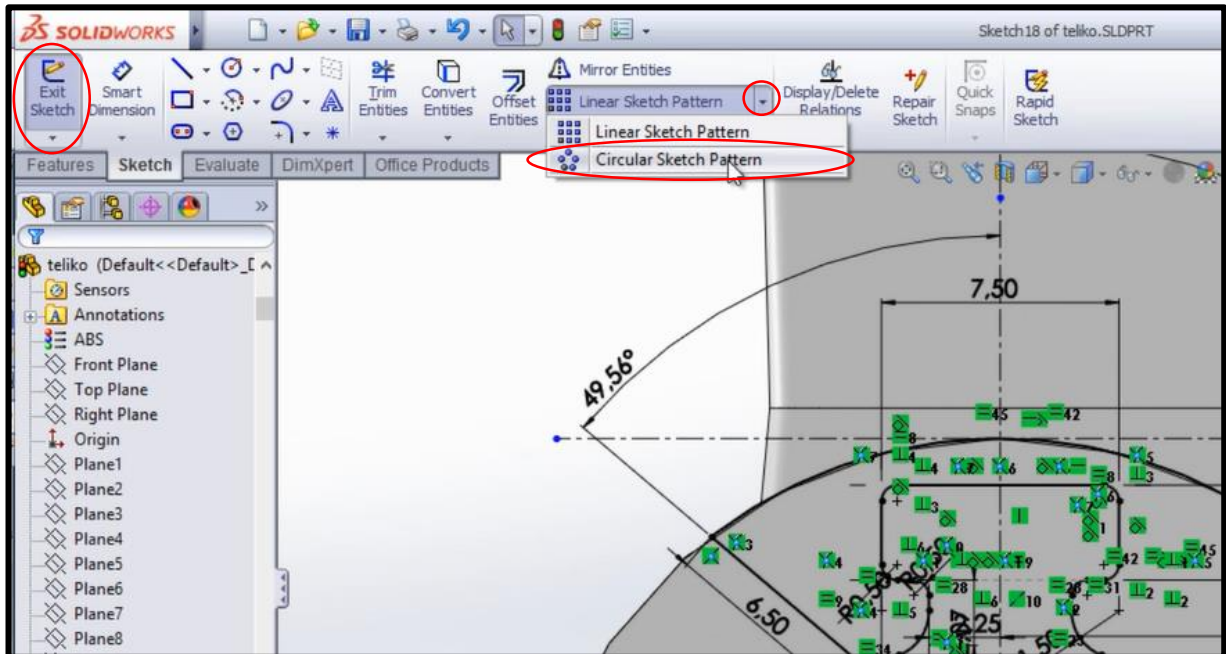
Εικόνα 6.36



Εικόνα 6.37

Τις υπολοιπες μικρότερες γωνίες ($R=0.50$ στην εικόνα 6.35) τις κάνουμε **Sketch Fillet** με ακτίνα **0,5 mm**. Παραμένουμε στο συγκεκριμένο sketch.

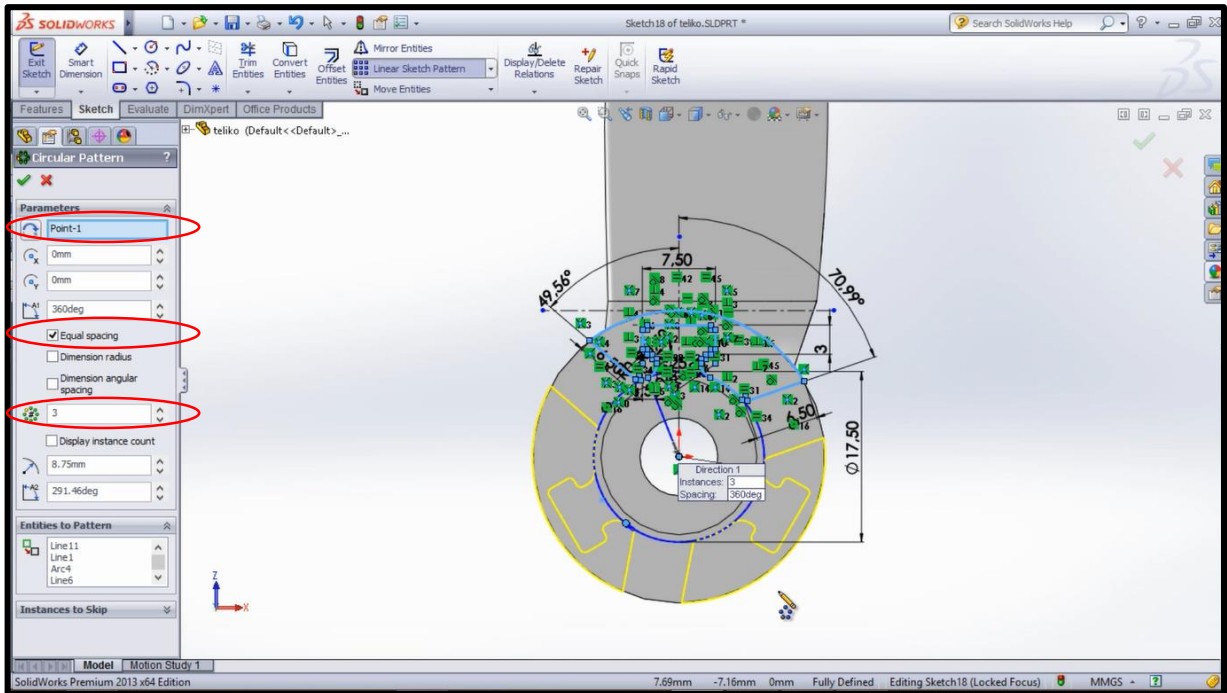
Εφόσον έχουμε ολοκληρώσει την γεωμετρία κοπής του πρώτου φτερού η διαδικασία για την δημιουργία των υπόλοιπων δύο είναι πολύ ευκολότερη. Απο την καρτέλα **Sketch** κάνουμε κλικ να εμφανιστεί το υπομενού της εντολής **Linear Sketch Pattern** και επιλέγουμε **Circular Sketch Pattern** (βλέπε εικόνα παρακάτω).



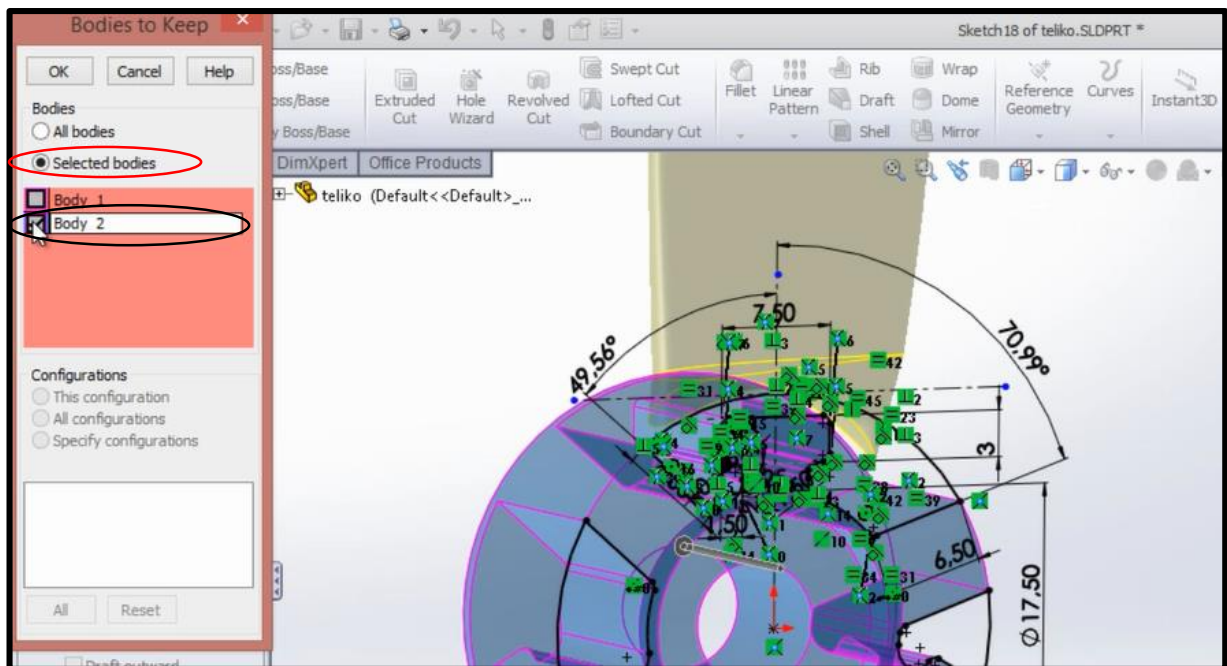
Εικόνα 6.38

Στο μενού που μας εμφανίζει αριστερά στο πρώτο πλαίσιο δηλώνουμε το κέντρο της βάσης (αρχή αξόνων). Το κουτάκι **Equal Spacing** πρέπει να είναι επιλεγμένο και στο πλαίσιο # (Number of Instances) πληκτρολογούμε **3**. Ξεκινάμε και επιλέγουμε κομμάτι κομμάτι όλη την γεωμετρία της κοπής που σχεδιάσαμε προηγουμένως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανιστούν συμμετρικά και κυκλικά συνολικά τρεις πανομοιότυπες γεωμετρίες κοπής (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.39). Κάνουμε κλικ στο ✓.

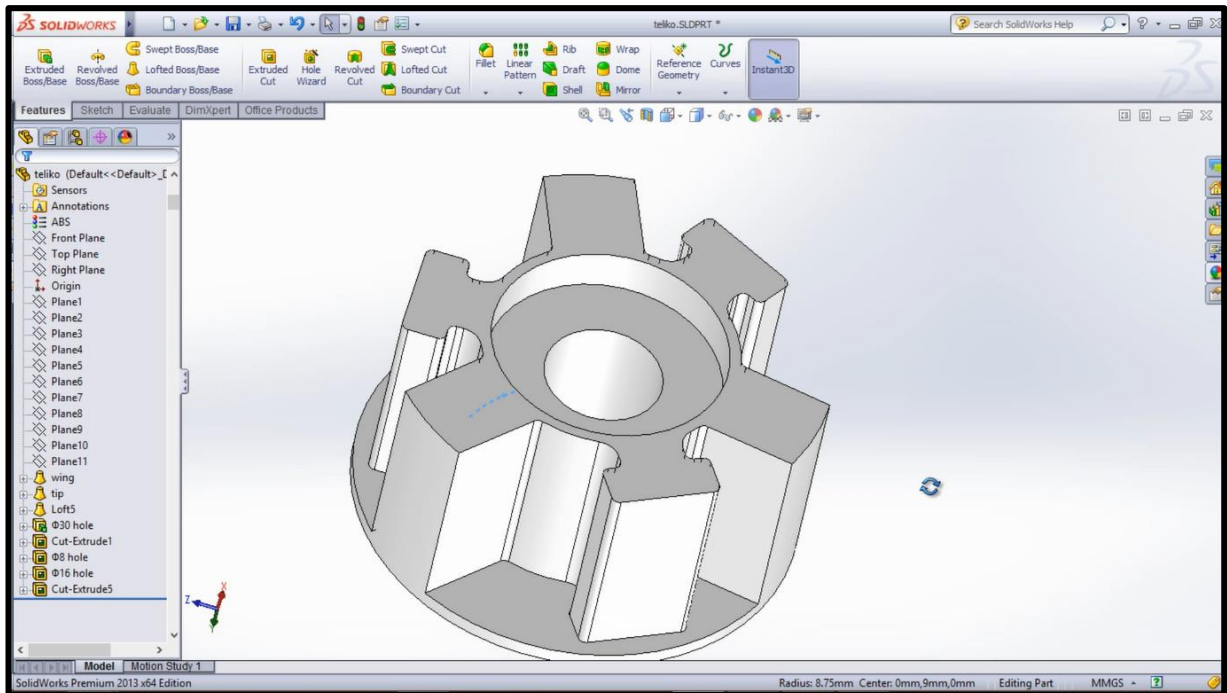
Απο την καρτέλα **Features** επιλέγουμε την εντολή **Extruded Cut** και πληκτρολογούμε την διάσταση κοπής **14 mm**. Κάνουμε κλικ στο ✓. Θα μας εμφανίσει ένα παράθυρο με τίτλο **Bodies to Keep**, κάνουμε κλικ στο **Selected bodies** και στη συνέχεια κλικ στο τετραγωνάκι **Body 2**. Το πρόγραμμα θα επιλέξει την βάση και θα αφαιρέσει το κομμάτι της περυγώσης (βλέπε εικόνα 6.40). Κλικ στο **OK**. Μετονομάζουμε στο Model tree το **Cut-Extrude5** σε “**hub**”. Πλέον βλέπουμε την τελική μορφή της πλήμνης (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.41). Σε αυτό το σημείο αποθηκεύουμε ένα ξεχωριστό αρχείο (π.χ **hub.sldprt**) το οποίο θα περιέχει την πλήμνη μόνη της.



Εικόνα 6.39

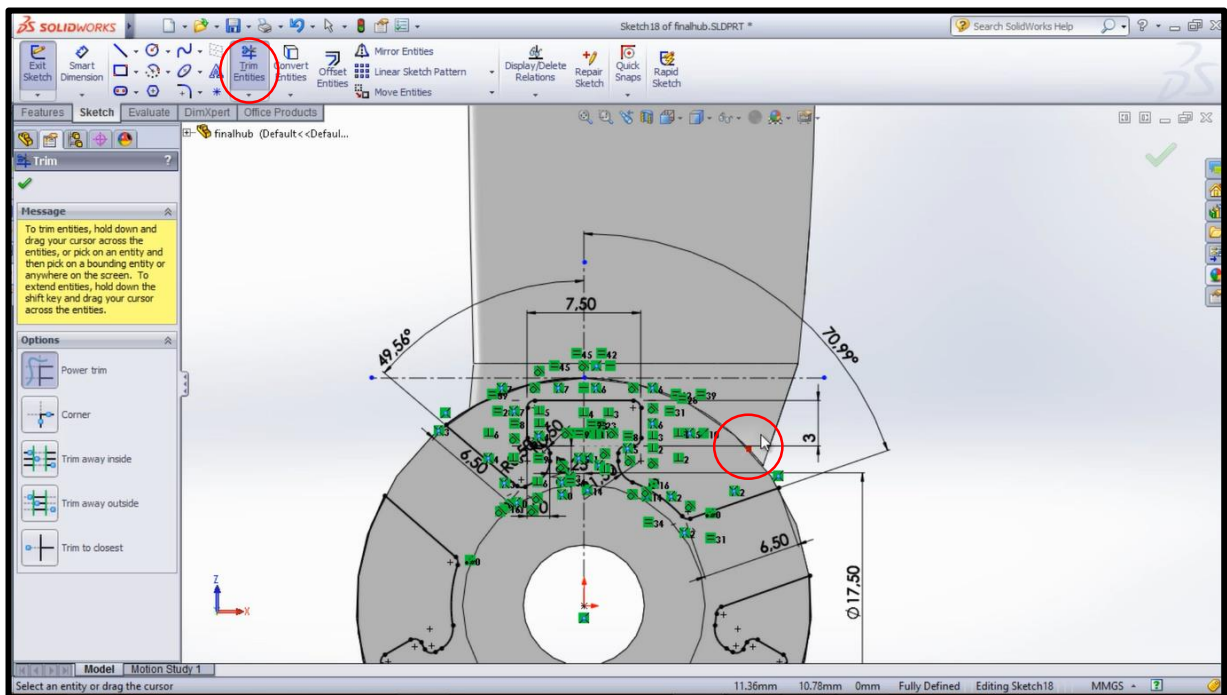


Εικόνα 6.40



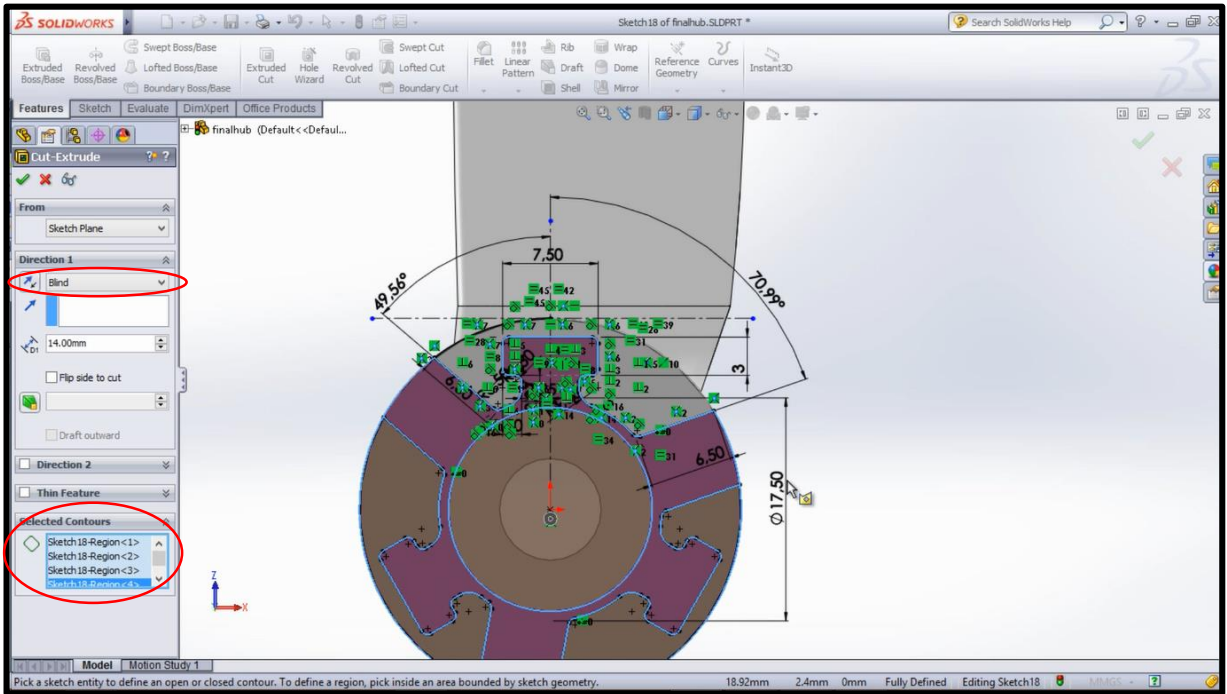
Εικόνα 6.41

Επιλέγοντας Undo ή πληκτρολογώντας Ctrl+Z πηγαίνουμε πίσω στο σημείο πριν την αποκοπή (Extruded Cut) των κομματιών και απο την καρτέλα **Sketch** κάνουμε κλικ στην εντολή **Trim Entities** και περνάμε το ποντίκι με αριστερό κλικ πατημένο πάνω απ την καμπύλη του κύκλου των 30 mm που θέλουμε να αφαιρέσουμε όπως φαίνεται παρακάτω και τέλος Κλικ στο ✓.



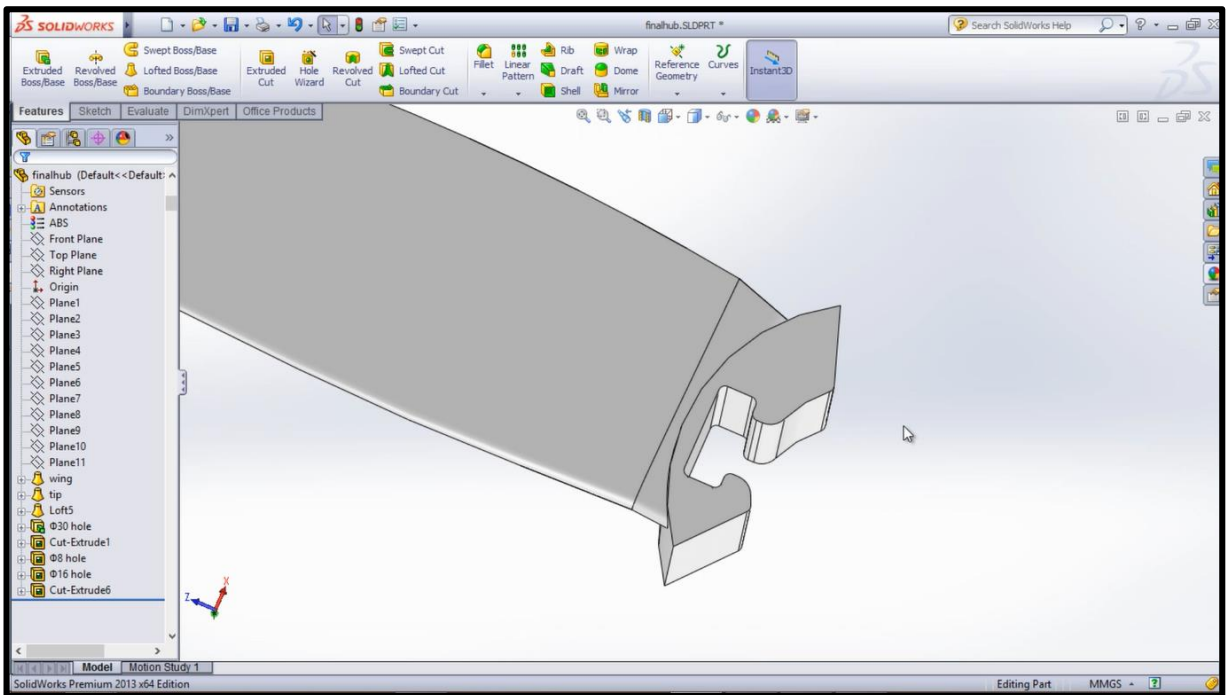
Εικόνα 6.42

Απο την καρτέλα **Features** επιλέγουμε **Extruded Cut** και στο μενού αριστερά αλλάζουμε την επιλογή **Blind** σε **Through All**. Κάνουμε κλικ στο πλαίσιο **Selected Contours** και επιλέγουμε όλες τις επιφάνειες εκτός απο το κούμπωμα του φτερού.όπως φαίνεται παρακάτω:



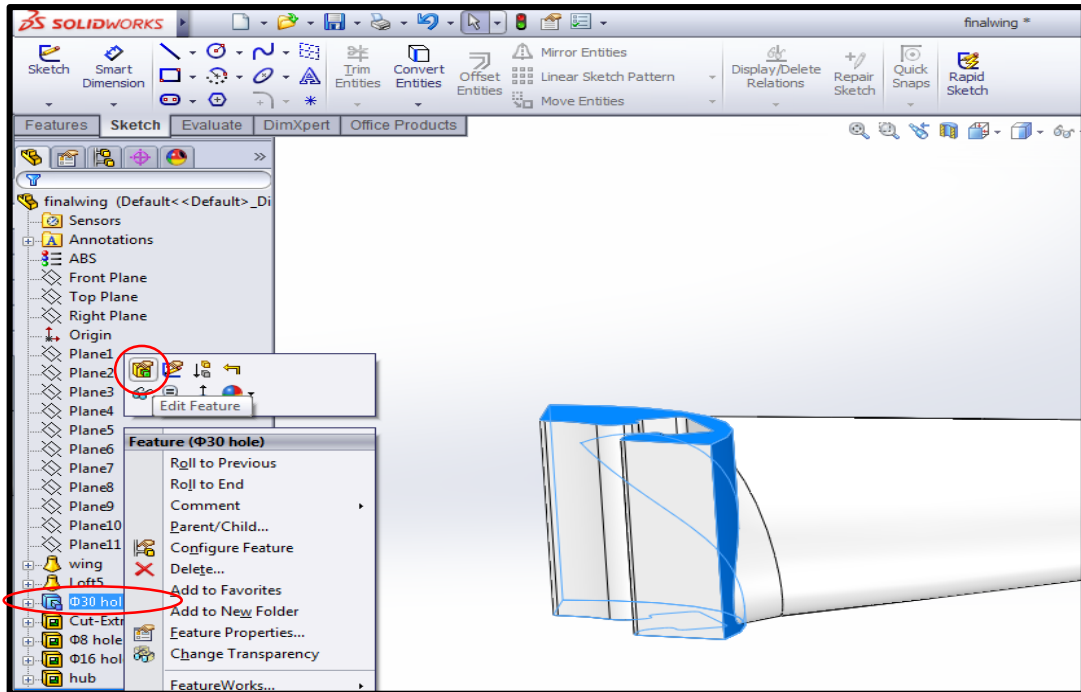
Εικόνα 6.43

Στη συνέχεια κλικ στο **✓**. Το πρόγραμμα θα κρατήσει μόνο την περύγωση με το κούμπωμα της όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω:



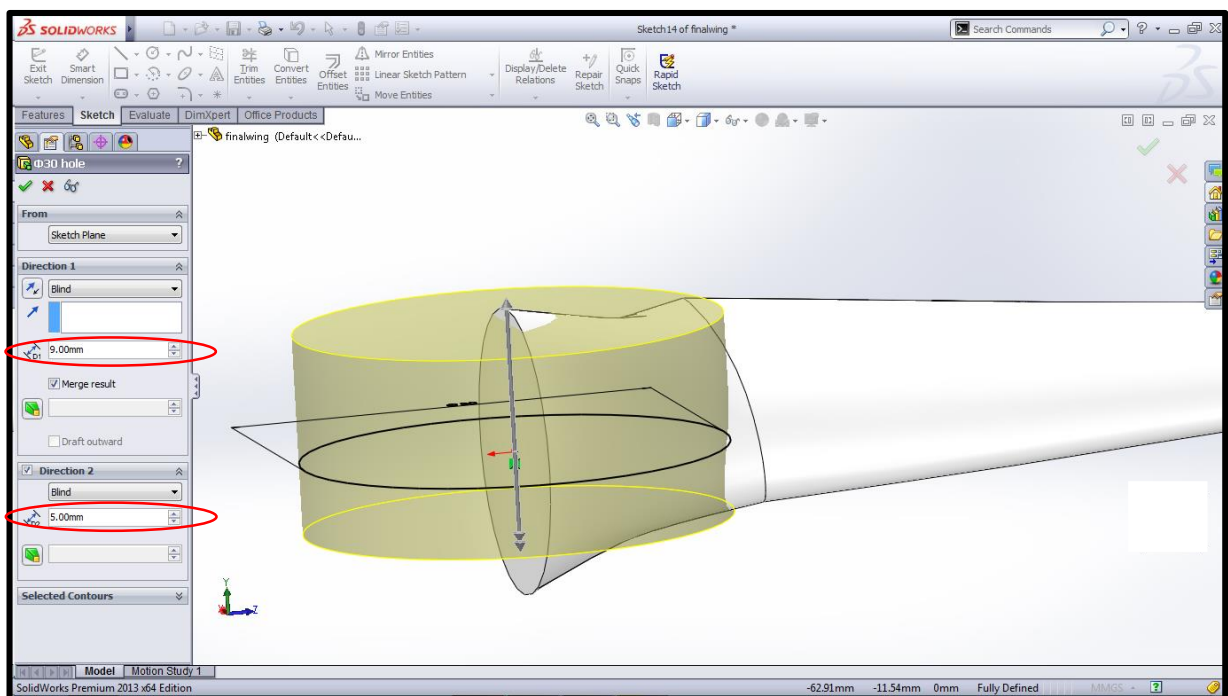
Εικόνα 6.44

Μετονομάζουμε το **Cut-Extrude6** σε “**hub**”. Είναι απαραίτητο να ελλατώσουμε το ύψος του κουμπώματος για να μην περισσεύει απο πάνω όταν προσαρμοστεί στην πλήμνη. Για να το κάνουμε αυτό απο το Model Tree αριστερά κάνουμε αριστερό κλικ στο **Φ30 hole** και στην καρτέλα που εμφανίζει κλικ στο **Edit Feature** για να το επεξεργαστούμε (βλέπε εικόνα).



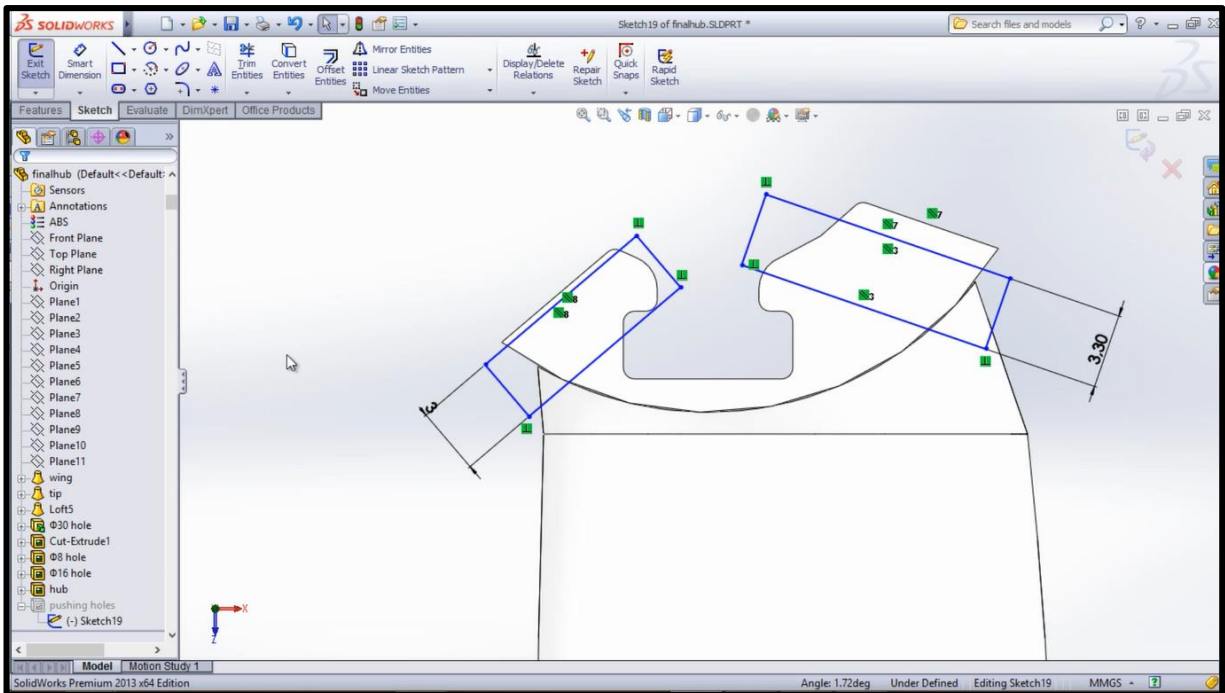
Εικόνα 6.45

Στην μενού που εμφανίζεται πληκτρολογούμε στο Direction 1: **9mm** ενώ στο Direction 2: **5mm** όπως φαίνεται παρακάτω. Κλικ στο ✓.



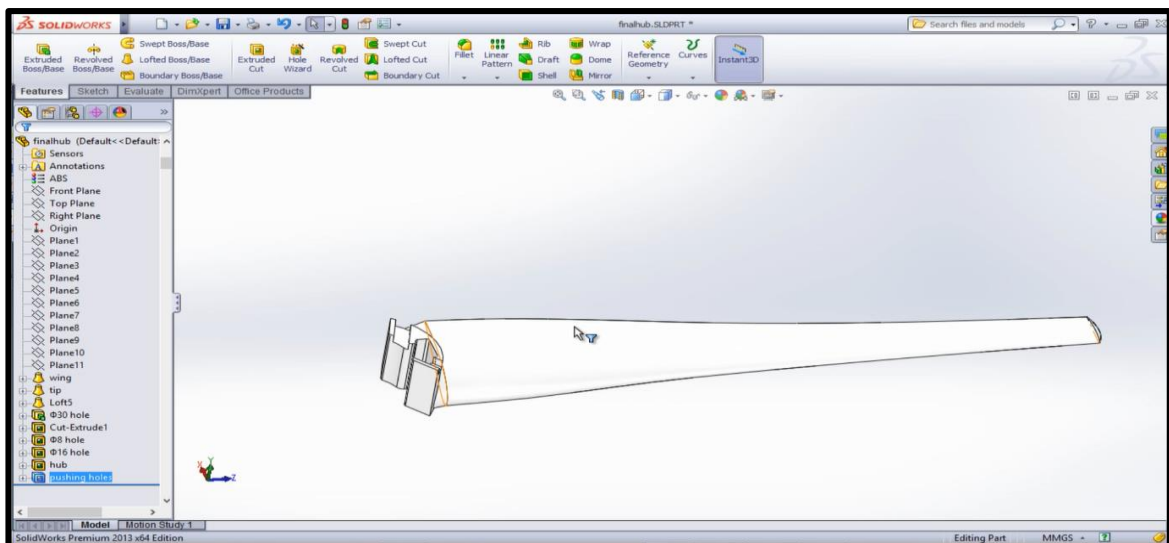
Εικόνα 6.46

Είναι αναγκαία η δημιουργία οπών στο κάτω μέρος του κουμπώματος της πτερύγωσης για να έχουμε την δυνατότητα αφού τα εκτυπώσουμε και τα ενώσουμε σε περίπτωση που κάποιο φτερό σπάσει να είναι εύκολη η αντικατάσταση με άλλο. Για τον σκοπό αυτό επιλέγουμε την κάτω πλευρά του κουμπώματος κλικ στο **Sketch** και σχεδιάζουμε την παρακάτω γεωμετρία (βλέπε εικόνα), στη συνέχεια κλικ στο **Extruded Cut** όπου πληκτρολογούμε βάθος **1,5 mm**.



Εικόνα 6.47

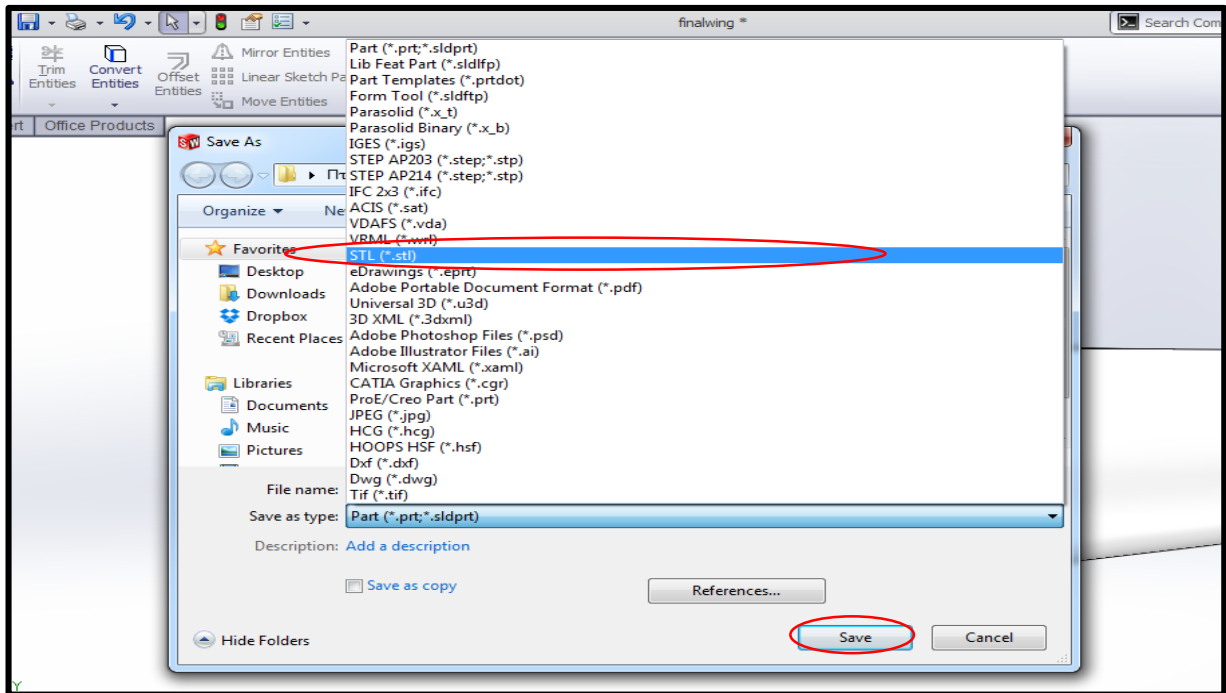
Κάνουμε κλικ στο ✓. Πλέον βλέπουμε την τελική μορφή της πτερύγωσης (βλέπε παρακάτω εικόνα 6.48). Σε αυτό το σημείο αποθηκεύουμε ένα ξεχωριστό αρχείο (π.χ **wing.sldprt**) το οποίο θα περιέχει το φτερό μόνο του.



Εικόνα 6.48

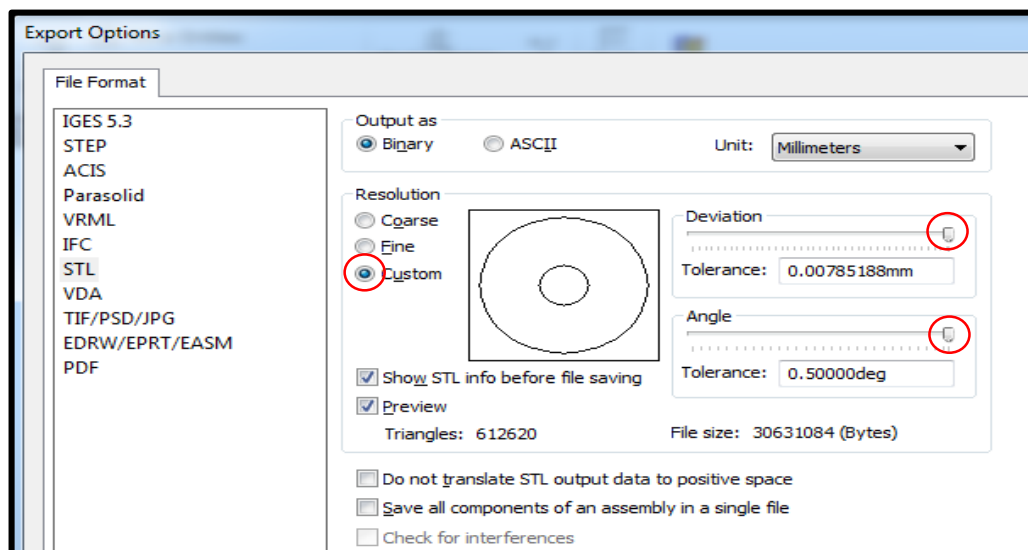
6.7.Σχεδίαση πτερύγωσης: Δημιουργία αρχείων STL

Το τελικό βήμα για να είναι σε θέση να εκτυπωθούν τα κομμάτια που σχεδιάσαμε (το φτερό και η πλήμνη) είναι η μετατροπή των αρχείων σε μορφή .stl η οποία μπορεί να διαβαστεί απο 3D εκτυπωτές. Ανοίγουμε το κάθε αρχείο χωριστά (hub.sldprt και wing.sldprt) πάμε **File, Save As** και στο παράθυρο που μας εμφανίζει κάνουμε κλικ στην επιλογή **Save as Type** όπου επιλέγουμε **STL** όπως φαίνετε στην εικόνα παρακάτω:



Εικόνα 6.49

Τέλος πριν πατήσουμε Save επιλέγουμε **Options** και στο νέο παράθυρο που μας εμφανίζει εφαρμόζουμε τις ρυθμίσεις που απεικονίζονται στην εικόνα παρακάτω για μέγιστη ποιότητα. Κλικ στο **OK** και μετά στο **Save**.



Εικόνα 6.50

7. Τρισδιάστατη εκτύπωση και έλεγχος της πτερυγώσης.

7.1.3D Printing

Η εκτύπωση των πτερυγώσεων και της πλήμνης έγιναν στους τρισδιάστατους εκτυπωτές (3D printers) του τμήματος μας. Οι δύο εκτυπωτές που έχουμε στην διαθεσή μας είναι της εταιρίας STRATASYS και τα μοντέλα είναι το Dimension Elite (βλέπε εικόνα) και το Dimension BST 768. Είναι πανομοιότυποι με μόνη διαφορά ότι ο Dimension Elite υποστηρίζει τη χρήση υδατοδιαλυτών στηριγμάτων.



Εικόνα 7.1 3D printer Dimension Elite

Η επικοινωνία μας με τον εκτυπωτή γίνεται μέσω του λογισμικού Catalyst EX 4.2 στο οποίο αρχικά εισάγουμε το αντικείμενο μας σε μορφή .stl και γίνεται μετατροπή σε μορφή .cmb για να γίνει η εκτύπωση. Μέσα από το πρόγραμμα μπορούμε να καθορίσουμε την θέση εκτύπωσης όπως και τον προσανατολισμό του αντικειμένου μας. Μπορεί επίσης να μας δώσει πληροφορίες για τον υπολοιπό χρόνο εκτύπωσης καθώς και το ποσοστό του υλικού εκτύπωσης και υποστήριξης που απομένει.

Το υλικό που χρησιμοποιούν οι συγκεκριμένοι εκτυπωτές είναι πλαστικό πολυμερές τύπου ABS (αποτελείται από Ακρυλονατρίλιο, Βουταδιένιο και Στυρένιο) και ABS Plus αντίστοιχα το οποίο έχει 40% μεγαλύτερη αντοχή. Τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών φαίνονται παρακάτω. Ωστόσο έχει εκπονηθεί πτυχιακή από το τμήμα μας στην οποία υπάρχουν οι πειραματικές τιμές για αντοχή σε εφέλκυσμό των υλικών. Βιβλιογραφία [11].

| Μηχανικές Ιδιότητες | Πρότυπο Δοκιμής | Τιμές |
|--------------------------------------|-----------------|------------|
| Αντοχή Εφέλκυσμού, Τύπος 1, 0.125 | ASTM D638 | 22 MPa |
| Μέτρο Ελαστικότητας, Τύπος 1, 0.125 | ASTM D638 | 1,627 MPa |
| Ποσοστό Επιμήκυνσης, Τύπος 1, 0.125 | ASTM D638 | 6% |
| Αντοχή σε Κάμψη | ASTM D790 | 41 MPa |
| Μέτρο Ελαστικότητας σε Κάμψη | ASTM D790 | 1,834 MPa |
| Αντοχή σε κρούση, IZOD, με εγκοπή | ASTM D256 | 106.78 J/a |
| Αντοχή σε κρούση, IZOD, χωρίς εγκοπή | ASTM D256 | 213.56 J/a |
| Θερμικές Ιδιότητες | Πρότυπο Δοκιμής | Τιμές |
| Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 66 psi | ASTM D648 | 90°C |
| Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 264 psi | ASTM D648 | 76°C |
| Θερμοκρασία Υαλώδους Μετάπτωσης (Tg) | DMA (SSYS) | 104°C |
| Συντελεστής Θερμικής Διαστολής | ASTM D696 | |
| Άλλα | Πρότυπο δοκιμής | Τιμές |
| Ειδικό Βάρος | ASTM D792 | 1.05 |
| Σκληρότητα κατά Rockwell | ASTM D785 | R105 |
| Διάδοση Φλόγας | UL 94 | HB |
| Διηλεκτρική Αντοχή kV/mm | IEC 60112 | 32 |
| Διηλεκτρική Σταθερά @60 Mhz | IEC 60250 | 2.4 |

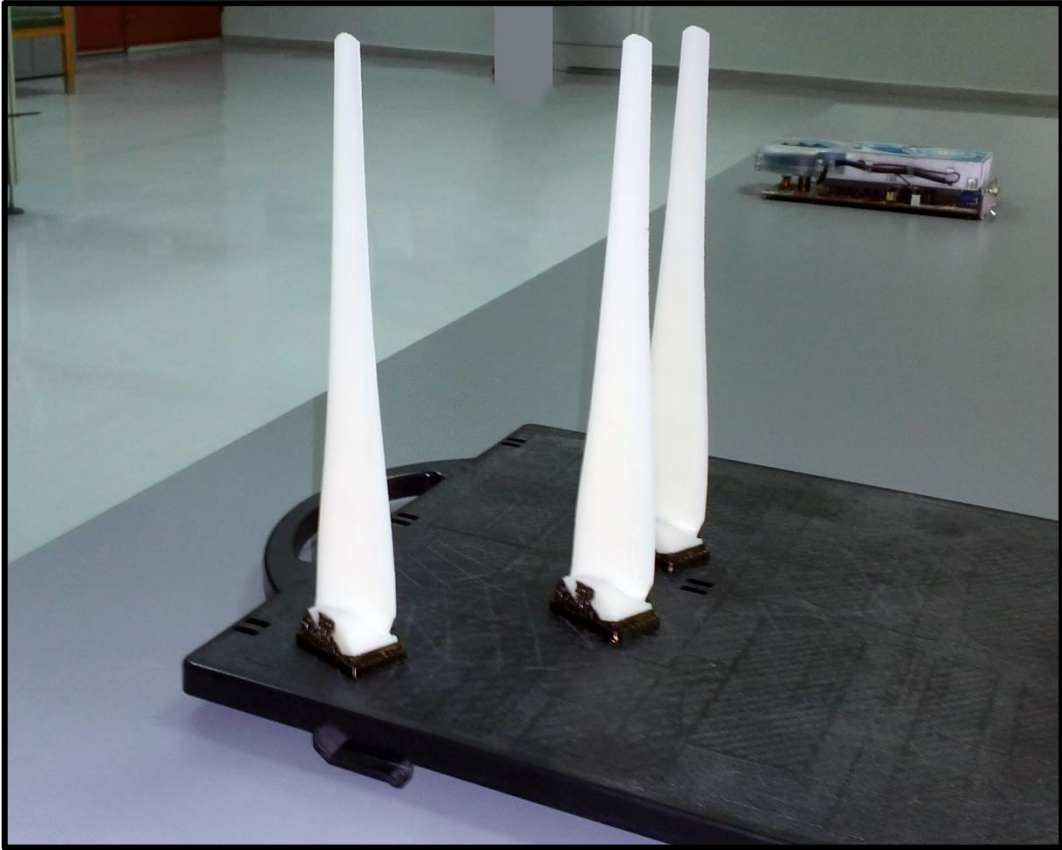
Εικόνα 7.2 Ιδιότητες ABS σύμφωνα με τον κατασκευαστή

| Μηχανικές Ιδιότητες | Πρότυπο δοκιμής | Τιμές |
|--|-----------------|-------------------|
| Αντοχή Εφελκυσμού, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min | ASTM D638 | 37 MPa |
| Μέτρο Ελαστικότητας, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min | ASTM D638 | 2,320 MPa |
| Ποσοστό Επιμήκυνσης, Τύπος 1, 0.125, 0.2*/min | ASTM D638 | 3% |
| Αποκόλληση λόγω Καμπτικών Ρωγμών | ASTM D790 | 31 MPa |
| Αντοχή σε Κάμψη, Μέθοδος 1, 0.05*/min | ASTM D790 | 53 MPa |
| Μέτρο Ελαστικότητας σε Κάμψη, Μέθοδος 1, 0.05*/min | ASTM D790 | 2,250 MPa |
| Αντοχή σε κρούση, IZOD, με εγκοπή, Μέθοδος A 23°C | ASTM D256 | 106 J/m |
| Θερμικές Ιδιότητες | Πρότυπο δοκιμής | Τιμές |
| Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 66 psi | ASTM D648 | 96°C |
| Θερμοκρασιακή Αντοχή @ 264 psi | ASTM D648 | 82°C |
| Θερμοκρασία Υαλώδους Μετάπτωσης (Tg) | DMA (SSYS) | 108°C |
| Συντελεστής Θερμικής Διαστολής | ASTM D831 | 4.90E-05 in/in/°F |
| Άλλα | Πρότυπο δοκιμής | Τιμές |
| Ειδικό Βάρος | ASTM D792 | 1.04 |
| Διάδοση Φλόγας | UL 94 | HB |
| Διηλεκτρική Αντοχή kV/mm | IEC 60112 | 28 kV/mm |
| Διηλεκτρική Σταθερά | ASTM D150-98 | 2.9 - 2.6 |

Εικόνα 7.3 Ιδιότητες ABS Plus σύμφωνα με τον κατασκευαστή

Η εκτύπωση γίνεται πάνω σε ειδική πλαστική πλάκα η οποία αφαιρείται εύκολα από τον εκτυπωτή. Υπάρχουν δύο έξοδοι υλικού στην κινητή κεφαλή εκτύπωσης η μία εκτυπώνει το υλικό κατασκευής του αντικειμένου και η άλλη το υλικό υποστήριξης support (πλαστικό χαμηλότερης ποιότητας). Ο χώρος στον οποίο μπορούμε να εκτυπώσουμε έχει διαστάσεις 20x20x30 cm (πλάτος x μήκος x ύψος).

Έγιναν πολλές και διαφορετικές εκτυπώσεις και καταλήξαμε στην βέλτιστη δυνατή ποιότητα επιφάνειας όταν εκτυπώνουμε το κάθε φτερό με κατακόρυφο προσανατολισμό και το κούμπωμα του φτερού στην κάτω πλευρά η οποία πατάει στην υποστήριξη (βλέπε εικόνα 7.4). Αντιθέτως η πλήμνη είναι ένα κομμάτι το οποίο εκτυπώνεται εύκολα χωρίς κάποια ιδιαιτερότητα (βλέπε εικόνα 7.5).



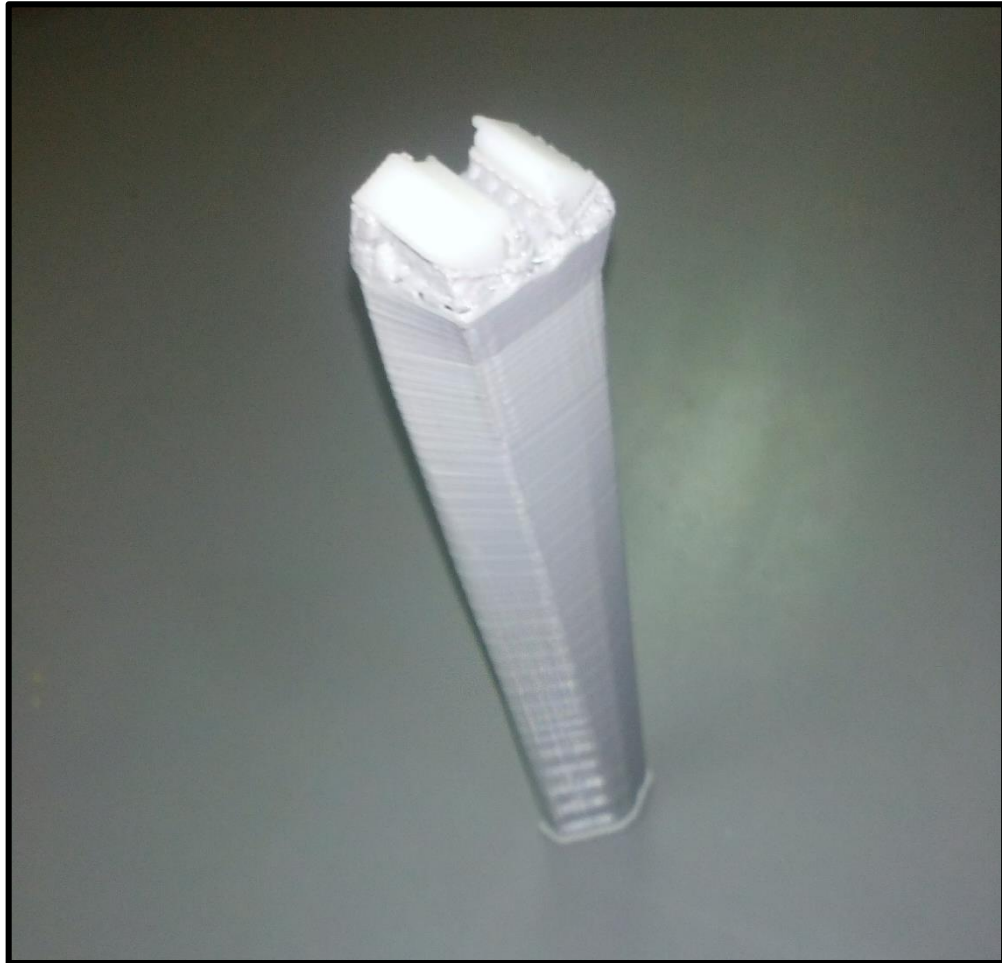
Εικόνα 7.4 Τρισδιάστατα εκτυπωμένα φτερά.

Το σκούρο υλικό που φαίνεται στην βάση του κάθε φτερού είναι η υποστήριξη και αφαιρείται εύκολα (πάνω εικόνα).



Εικόνα 7.5 Η εκτυπωμένη πλήμνη τοποθετημένη στην πειραματική εγκατάσταση.

Άλλος ένας τρόπος εκτύπωσης του φτερού που δοκιμάστηκε είναι με την υποστήριξη να καλύπτει όλο το φτερό όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω:



Εικόνα 7.6 Φτερό εκτυπωμένο με πλήρη υποστήριξη

Ο τρόπος αυτός δεν συνίσταται διότι κατά την αποκόλληση της υποστήριξης από το φτερό δημιουργούνται ορισμένες ανωμαλίες στην επιφάνεια, επίσης είναι προφανές ότι απαιτείται πολύ περισσότερο υλικό υποστήριξης απ'ότι στην εικόνα 7.4.

Μετά την εκτύπωση των κομματιών και τον έλεγχο των φτερών σειρά έχει η συναρμολόγηση. Το φτερό έχει σχεδιαστεί να εφαρμόζει χωρίς καθόλου ανοχές οπότε χρειάζεται μερικά ελαφρά χτυπήματα με σφυρί σε κάποια επίπεδη επιφάνεια για να πατήσει στη βάση της πλήμνης (βλέπε εικόνα 7.8). Στην εικόνα 7.9 φαίνεται η τελική μορφή της πτερύγωσης.



Εικόνα 7.7 Πλήμνη με τα φτερά πριν την συναρμολόγηση



Εικόνα 7.8 Πλήμνη με τα φτερά συναρμολογημένα



Εικόνα 7.9 Τελική μορφή πτερύγωσης

7.2. Έλεγχος της πτερύγωσης

Μετά την εκτύπωση ακολουθεί ο έλεγχος των φτερών ως προς την ποιότητα της επιφάνειας τους, το βάρος τους και την αντοχή τους σε κάμψη.

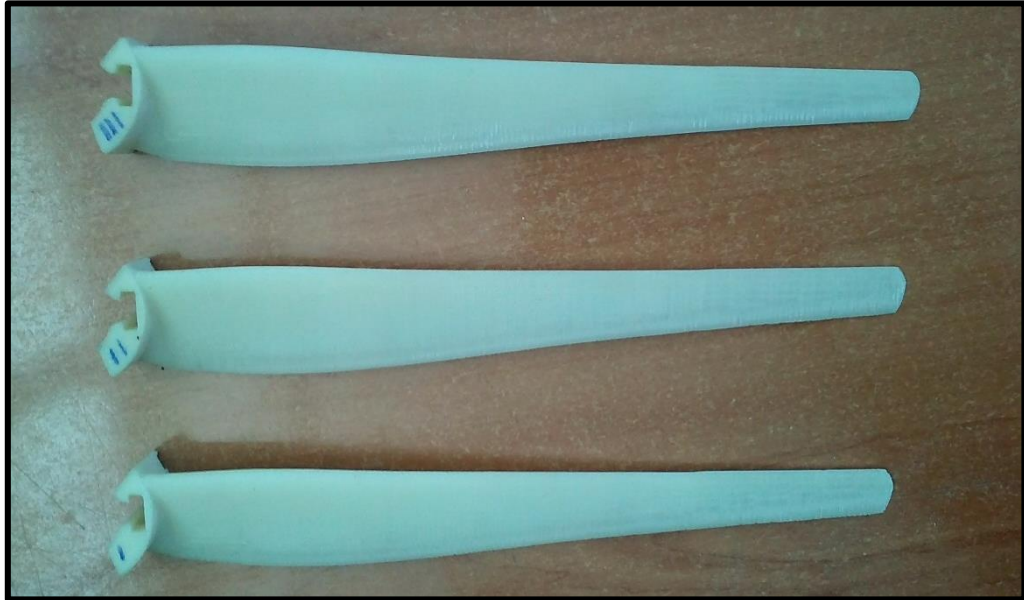
- Έλεγχος επιφάνειας:

Είναι απαραίτητο να τρίψουμε με πολύ λεπτό σμυριδόχαρτο την επιφάνεια κάθε φτερού. Με αυτό τον τρόπο αφαιρούνται τυχόν εξογκώματα και ατέλειες, επίσης αυτό καθιστά την επιφάνεια πιο λεία άρα και πιο αεροδυναμική (βλέπε παρακάτω εικόνα 7.10).

- Ζυγοστάθμιση:

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την πτερύγωση μας είναι η ζυγοστάθμιση της. Αν και θα περίμενε κανείς ότι εφόσον τα φτερά εκτυπώνονται απο το ίδιο αρχείο να έχουν όλα ακριβώς το ίδιο βάρος, αυτό όμως δεν συμβαίνει. Ζυγίζουμε το κάθε φτερό σε ζυγαριά ακριβείας και στη συνέχεια προσπαθούμε τρίβοντας με το σμυριδόχαρτο να “φέρουμε” τρία φτερά σε παρόμοιο βάρος με αρκετά καλή ακρίβεια. Ταυτόχρονα ελέγχουμε το κέντρο βάρους να είναι στο 1/3 του φτερού. Τοποθετούμε όμοια φτερά στην πλήμνη και με την βοήθεια της κατασκευής στην εικόνα 7.11 κάνουμε τον έλεγχο και παρατηρούμε περιστρέφοντας ελάχιστα

τον άξονα που είναι περασμένος απο την πλήμνη. Εάν η πτερύγωση σταματάει συνέχεια στο ίδιο σημείο αυτό σημαίνει πως το σημείο εκείνο είναι βαρύτερο οπότε του αφαιρούμε ελάχιστα βάρος εως ότου να μην παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο. Πετυγχάνουμε έτσι την βέλτιστη συμμετρικότητα της πτερύγωσης. Προσέχουμε η κατασκευή να είναι τοποθετημένη σε επίπεδη επιφάνεια, ελέγχουμε με το αλφάδι.



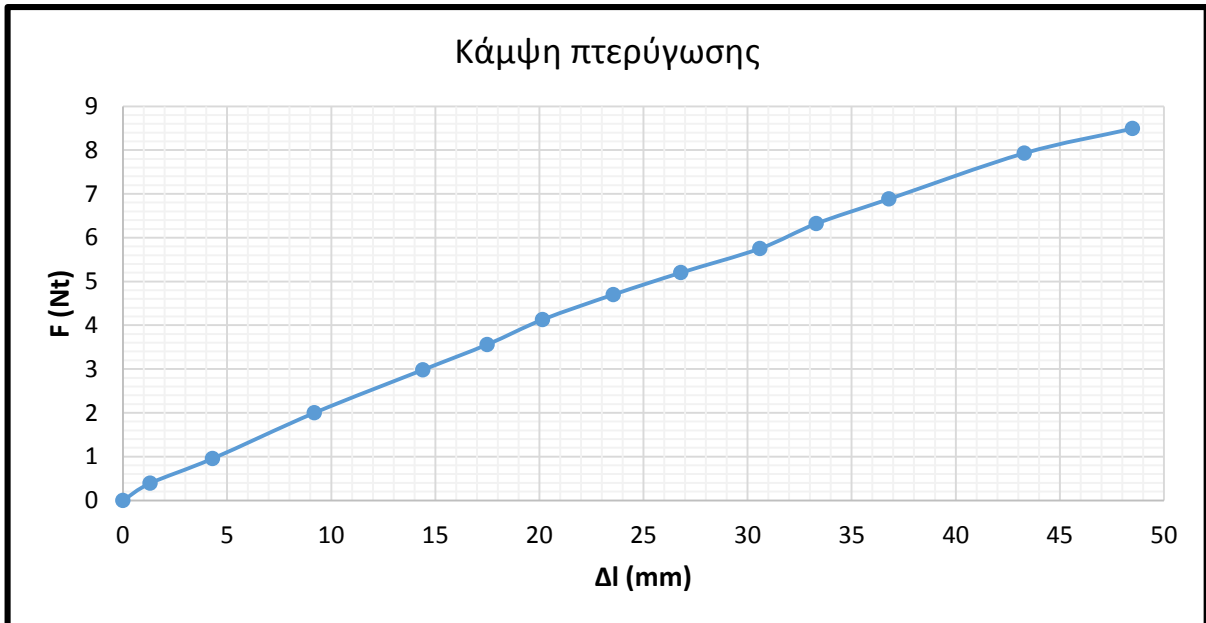
Εικόνα 7.10 Επιφάνεια φτερών μετά απο τρίψιμο



Εικόνα 7.11 Έλεγχος συμμετρίας

- Αντοχή σε κάμψη:

Έγινε επίσης δοκιμή της αντοχής του φτερού σε κάμψη. Με σταθερή συγκράτηση της πλευράς που περιέχει το κούμπωμα, κρεμάμε σε απόσταση 10 cm από την αρχή του φτερού ένα νήμα στο οποίο προστέθηκε βάρος το οποίο αυξήθηκε σταδιακά (βλέπε εικόνα 7.12). Το φτερό άντεξε βάρος έως 865 gr με παραμόρφωση 48,5 mm και μετά από μικρό χρονικό διάστημα έσπασε. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

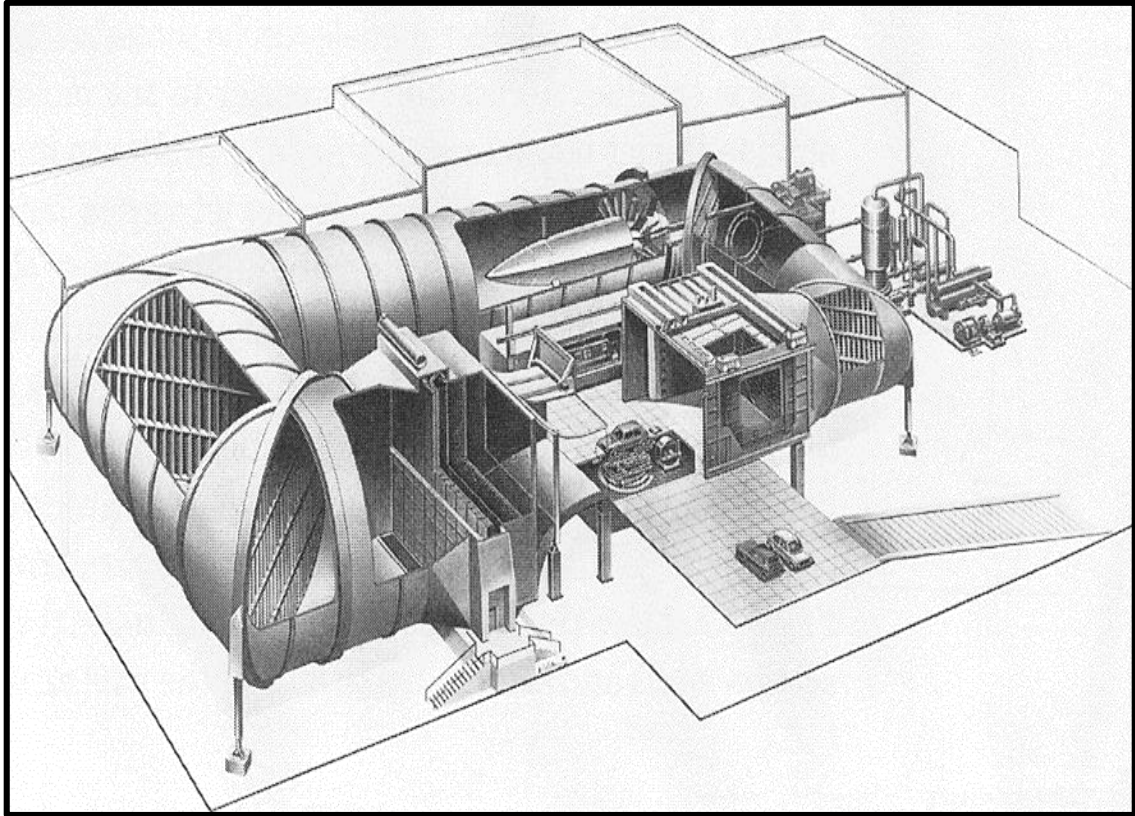


Διάγραμμα 7.1 Τέστ φτερού σε κάμψη



Εικόνα 7.12 Δοκιμή φτερού σε κάμψη

8. Περιγραφή Αεροσήραγγας



Αεροσήραγγα Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας

8.1.Εισαγωγή

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

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

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

όπου

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

V : η ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

l : μία διάσταση αναφοράς (m)

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

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



Εικόνα 8.1 Κατασκευή μοντέλου για αεροδυναμικές μετρήσεις.



Εικόνα 8.2 Τελική μορφή μοντέλου.

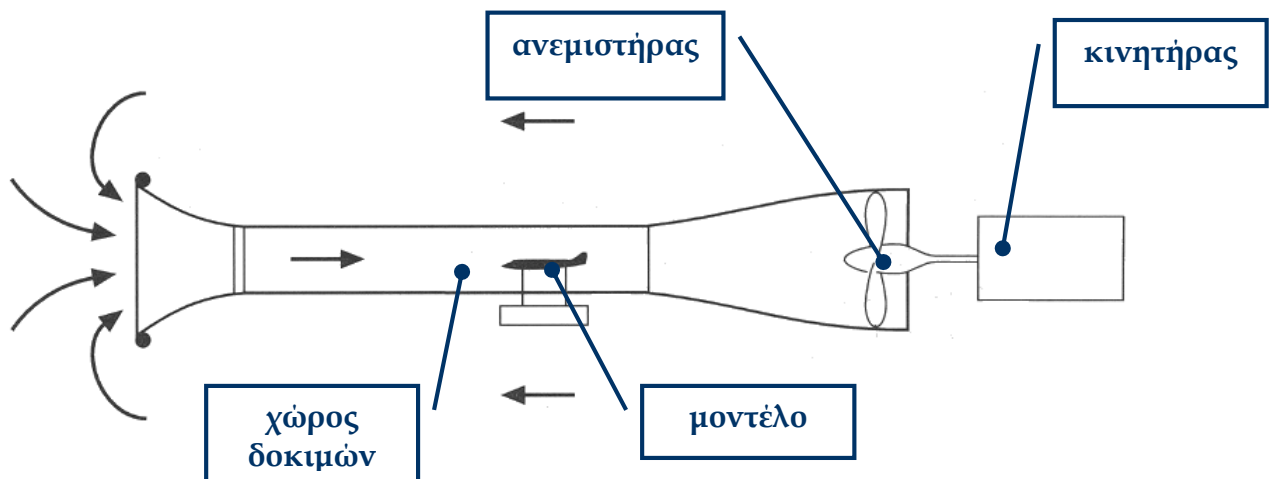
Βασικό ρόλο στη κατασκευή ενός μοντέλου έχει η ακρίβεια με την οποία κατασκευάζεται. Επίσης η επιφάνεια αυτού οφείλει να έχει όσο το δυνατόν πιο λεία υφή για την αποφυγή μεγάλου οριακού στρώματος.

8.2. Τύποι αεροσήραγγών

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

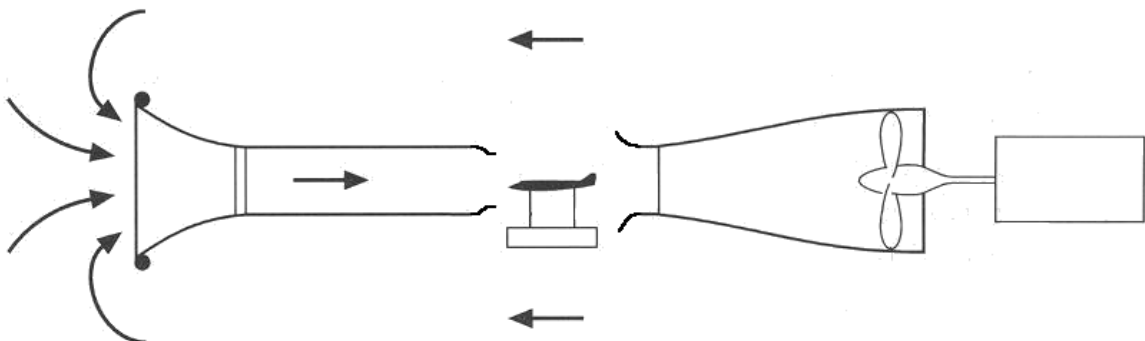
- Η αεροσήραγγα **ανοικτού κυκλώματος** (open circuit) χαρακτηρίζεται από την ευθύγραμμη κίνηση που ο αέρας πραγματοποιεί εντός αυτής και την εισαγωγή του από τον περιβάλλοντα χώρο, όπου και εξέρχεται.

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



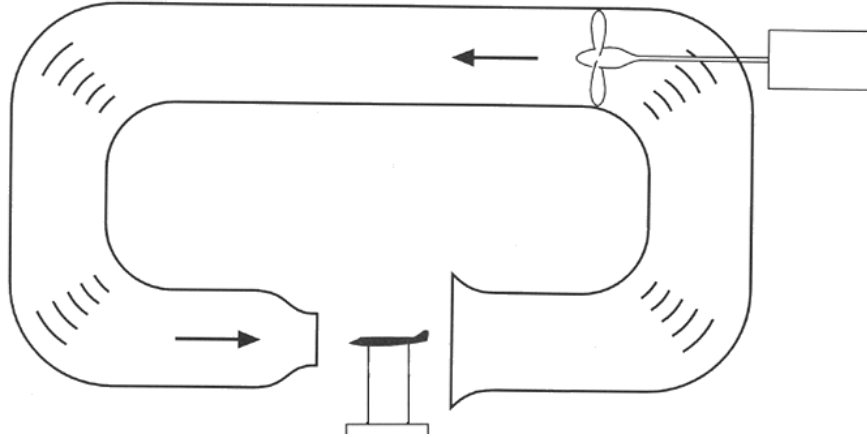
Εικόνα 8.3 Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών (closed jet - open circuit wind tunnel).

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



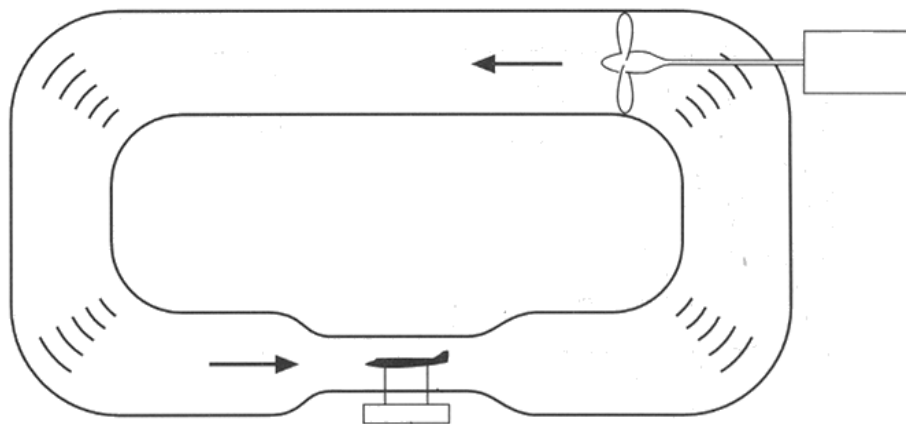
Εικόνα 8.4 Αεροσήραγγα ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών (open jet - open circuit wind tunnel).

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



Εικόνα 8.5 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών (open jet - closed type wind tunnel).

ή κλειστό χώρο δοκιμών.



Εικόνα 8.6 Αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος με κλειστό χώρο δοκιμών (closed jet - closed type wind tunnel).

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

8.3. Αεροδυναμικές δοκιμές σε αεροσήραγγες

Σε αεροσήραγγα μπορούν να πραγματοποιηθούν οι παρακάτω βασικές δοκιμές:

- Μέτρηση *αεροδυναμικών φορτίων*.

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

- *Απεικόνιση των γραμμών ροής γύρω από αντικείμενο.*

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

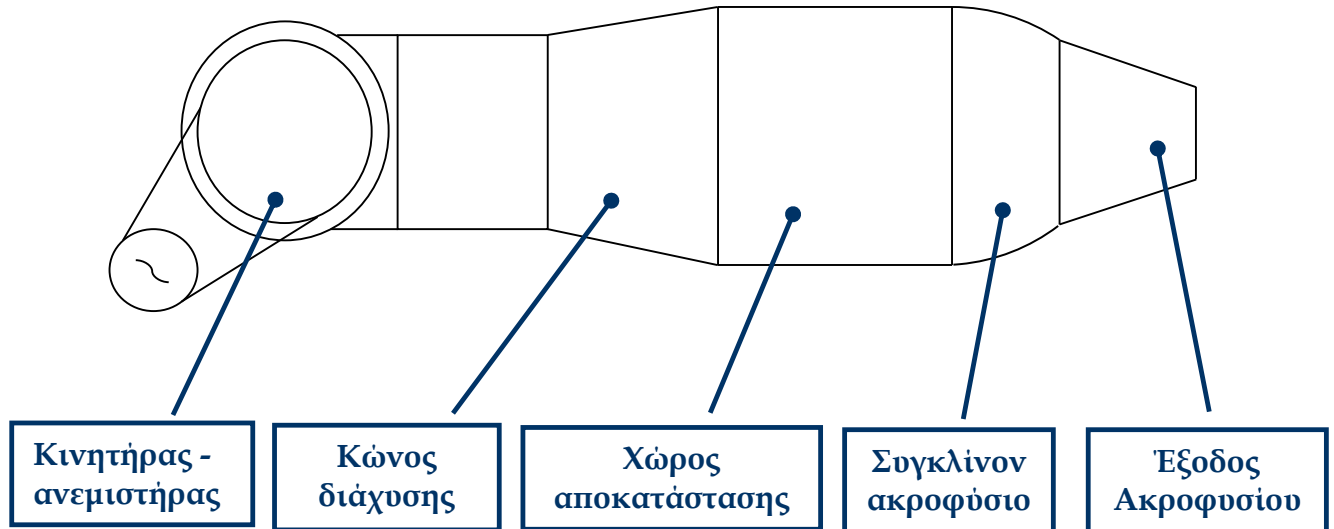


Εικόνα 8.7 Εμφάνιση γραμμών ροής με χρήση καπνού.

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

8.4. Περιγραφή αεροσήραγγας εργαστηρίου

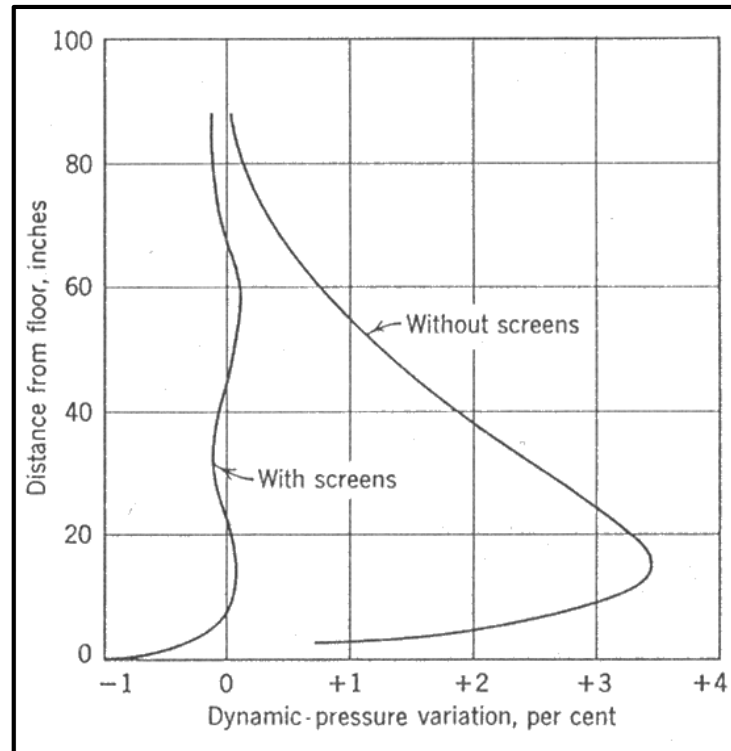
Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου είναι ανοικτού κυκλώματος με ανοικτό χώρο δοκιμών. Η επιφάνεια του ακροφυσίου είναι 600mm × 600mm. Η γεωμετρία της φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 8.8 Περιγραφή της αεροσήραγγας του εργαστηρίου.

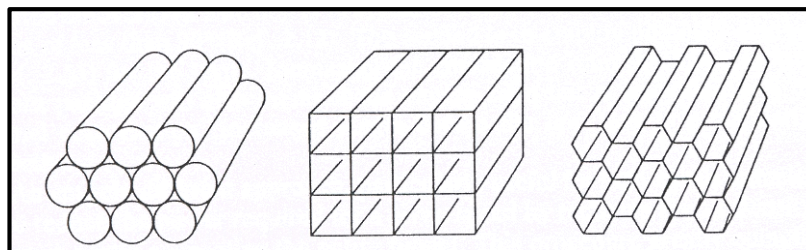
1. Ο ανεμιστήρας είναι μία φυγόκεντρη αντλία που οδηγείται από ένα τριφασικό κινητήρα 19kW, με ονομαστική περιστροφική ταχύτητα 1410rpm. Ο κινητήρας ελέγχεται μέσω ενός Inverter που μεταβάλλει μέσω της συχνότητας τις στροφές του. Η μέγιστη ταχύτητα εξόδου του αέρα από το ακροφύσιο φτάνει τα 25m/sec.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

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



Εικόνα 8.9 Μεταβολή του προφίλ ταχύτητας με χρήση ή όχι σήτας.

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



Εικόνα 8.10 Κυψέλες διαφόρων μορφών

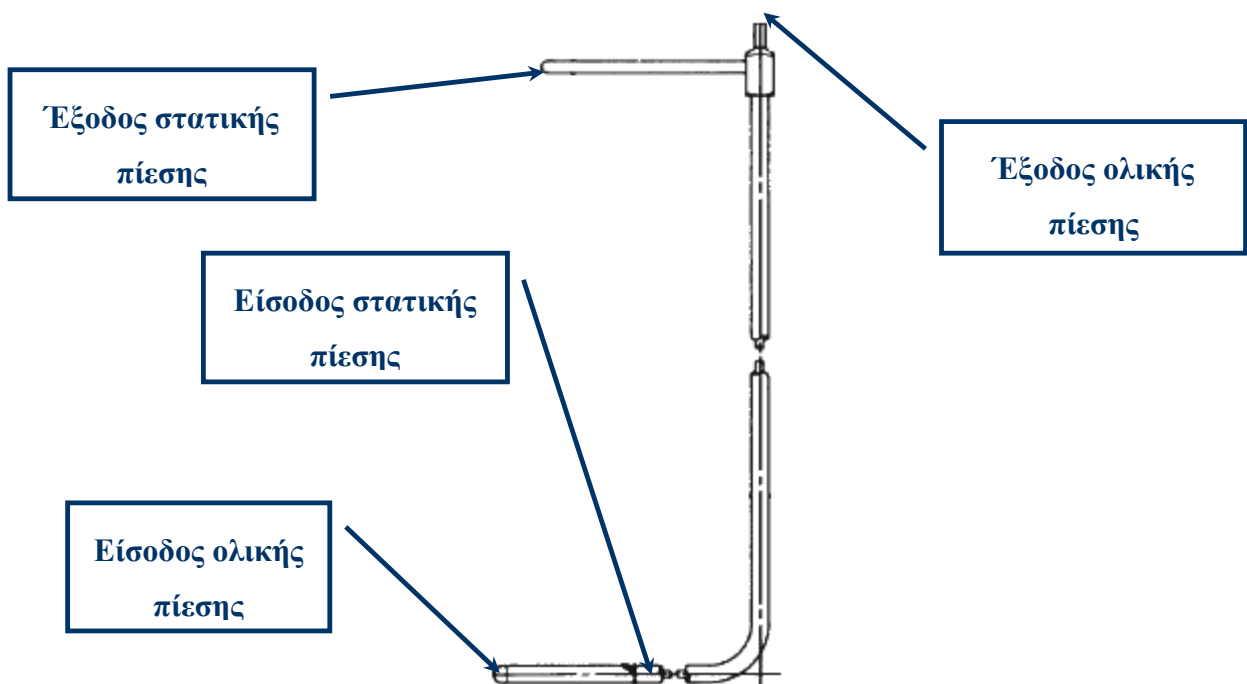
Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου έχει δύο σήτες και μία διάταξη κυψελών κυλινδρικής μορφής.

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

8.5.Μέτρηση ροής

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

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

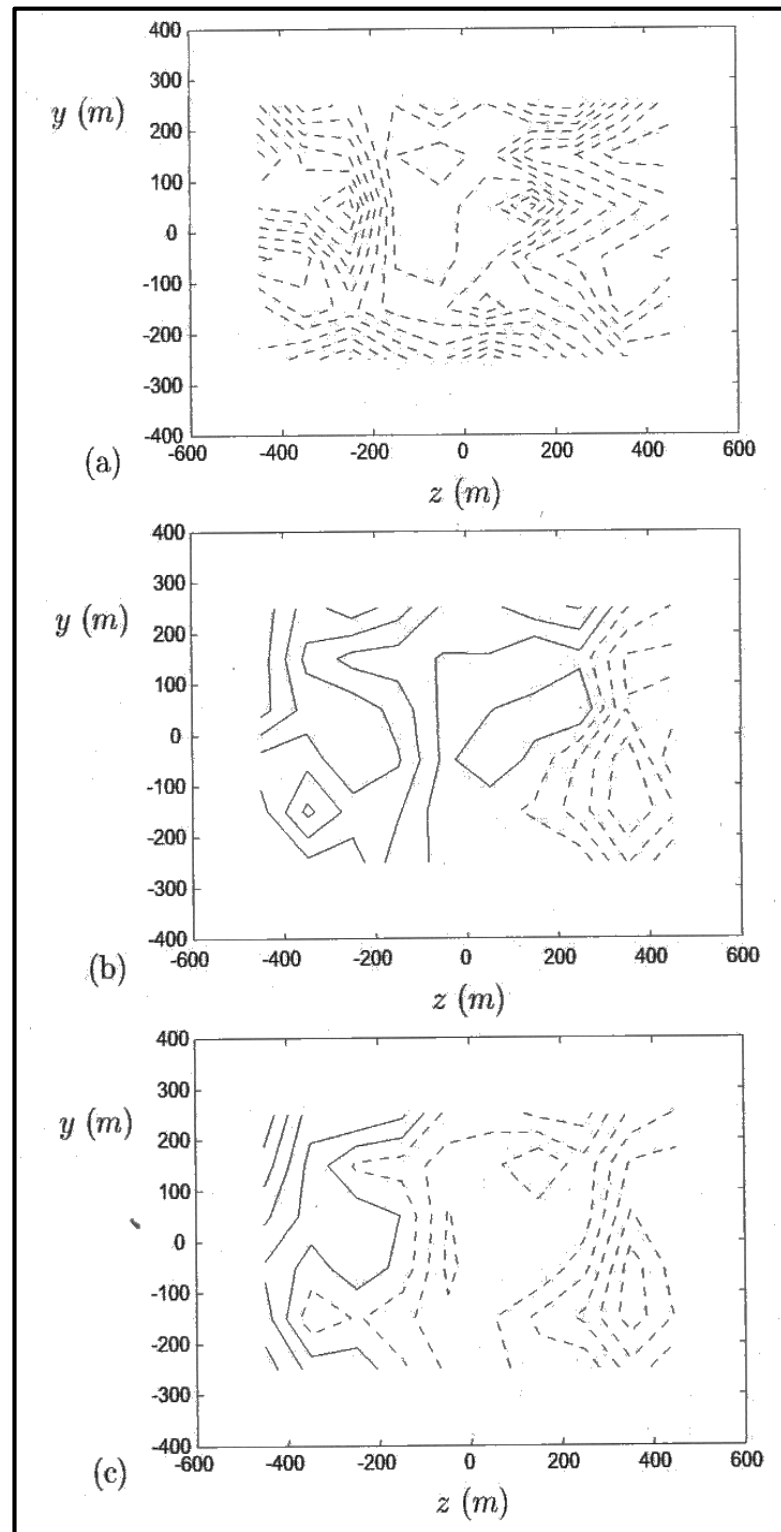


Εικόνα 8.11 Περιγραφή σωλήνα pitot.

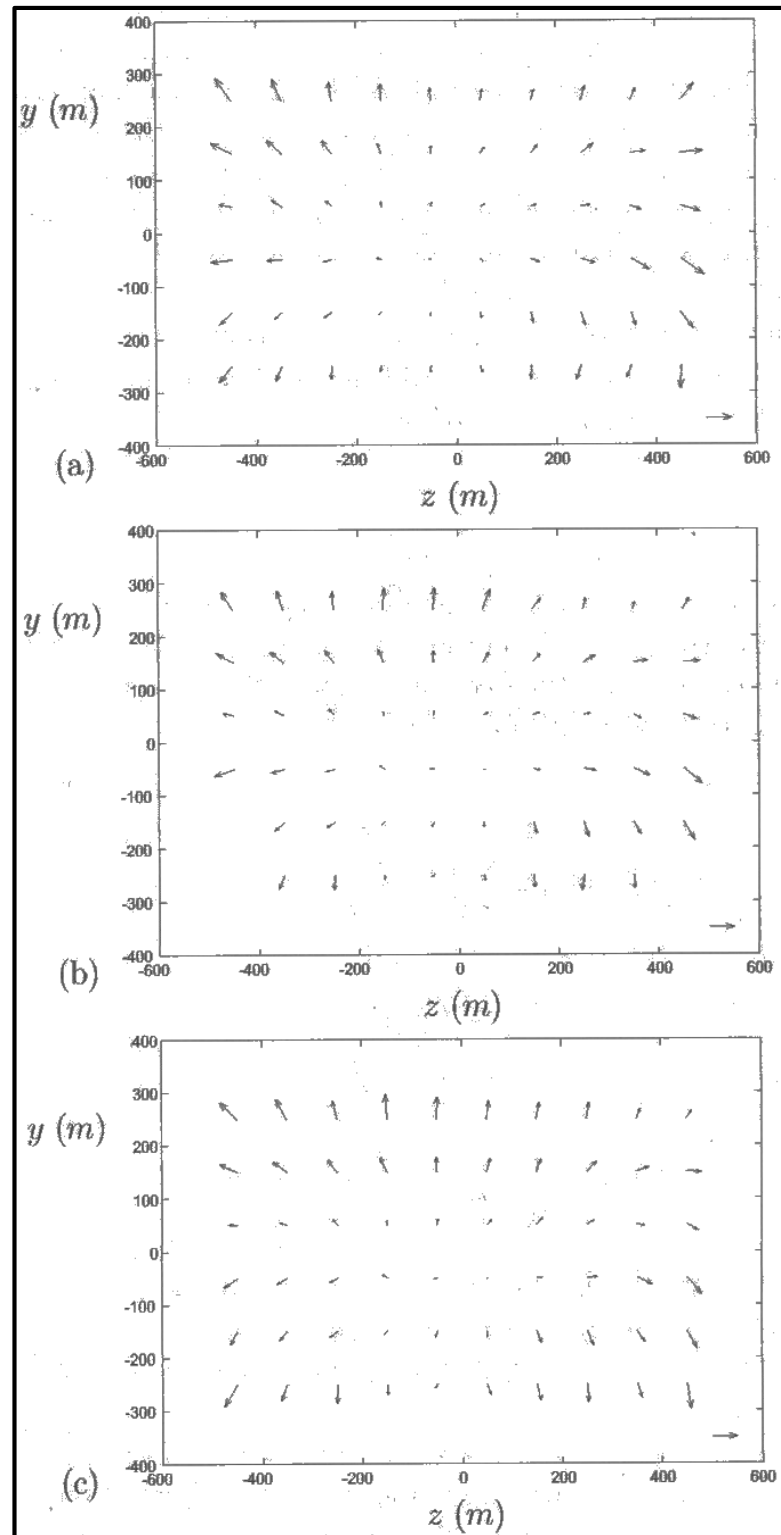
Ο σωλήνας pitot έχει μια εμπρόσθια είσοδο απ' όπου παίρνουμε την ολική πίεση και 8 μικρές εισόδους στην κυλινδρική του επιφάνεια που αποτελούν την είσοδο της στατικής πίεσης. Η δυναμική πίεση αποτελεί τη διαφορά των δύο. Η πίεση μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα μέσω ενός pressure transducer. Το σήμα αυτό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

Με τη χρήση του σωλήνα pitot σαρώνεται ο όγκος του χώρου δοκιμών σε διάφορες ταχύτητες λειτουργίας, ώστε να υπάρχουν οι συνθήκες ροής σε όλο το εύρος ταχυτήτων λειτουργίας.

Παρακάτω παρατίθενται δεδομένα ροής σε μία αεροσήραγγα (MTL Wind Tunnel, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden).



Εικόνα 8.12 Κατανομή ολικής πίεσης σε ταχύτητες αέρα (a) 10 m/sec, (b) 25 m/sec, (c) 40 m/sec. Κάθε γραμμή αντιπροσωπεύει αύξηση 0.01%. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν αρνητικές τιμές.

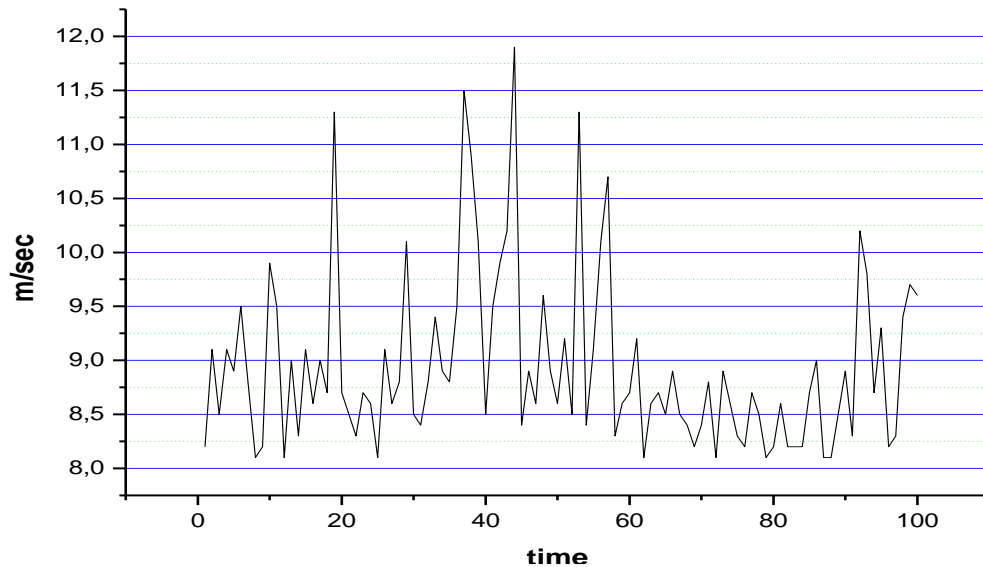


Εικόνα 8.13 Μεταβολή γωνίας ροής στην επιφάνεια μετά το συγκλίνον ακροφύσιο σε ταχύτητες αέρα (a) 10 m/sec, (b) 25 m/sec, (c) 40 m/sec. Το οριζόντιο βέλος κάτω δεξιά αντιπροσωπεύει γωνία 0.25° .

Στο Παράρτημα 3 παρουσιάζονται τα δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του τμήματος μας.

8.6. Τύρβη

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



Εικόνα 8.14 Διακύμανση αέρα.

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

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

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

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

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

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

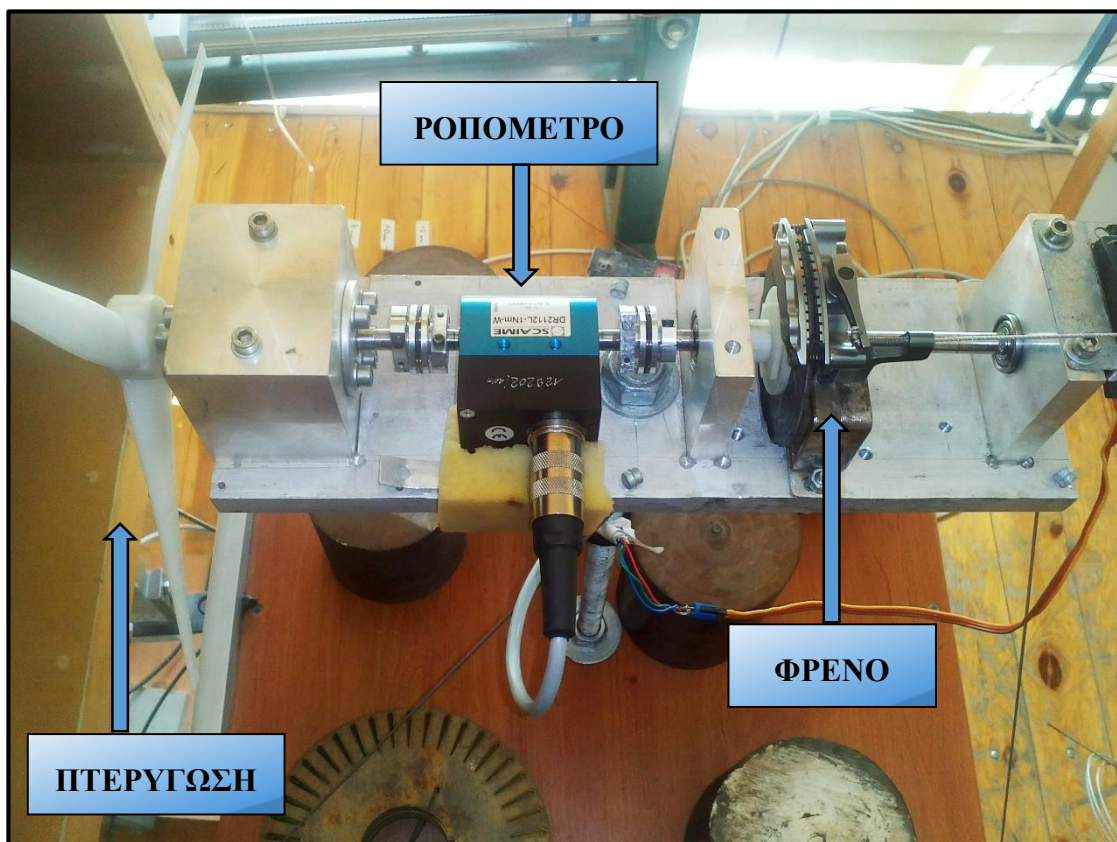
$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}$$

9. Μετρήσεις στην αεροσήραγγα.

Τα απαραίτητα πειράματα και οι μετρήσεις έγιναν στην πειραματική εγκατάσταση της αεροσήραγγας του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας και σύνθεσης ενεργειακών συστημάτων του τμήματος μας.

9.1. Η πειραματική εγκατάσταση

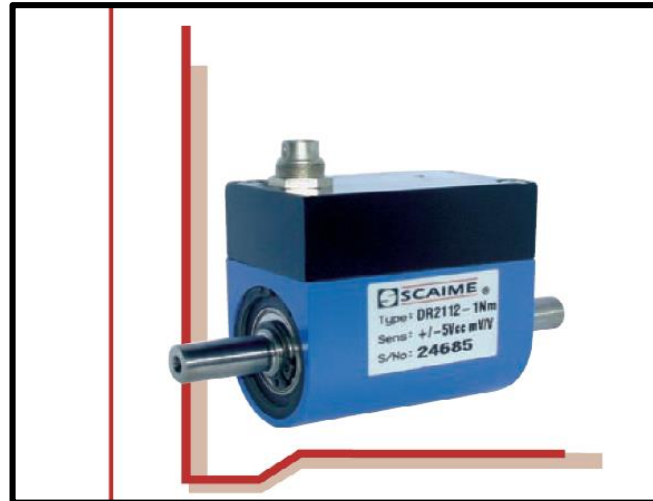
Η πειραματική εγκατάσταση μπροστά από την αεροσήραγγα όπου τοποθετούμε την πτερύγωση (βλέπε εικόνα 9.1) αποτελείται από έναν κεντρικό άξονα, από ένα ροπόμετρο και ένα σύστημα φρεναρίσματος το οποίο ελέγχεται μέσω Η/Υ.



Εικόνα 9.1 Πειραματική εγκατάσταση

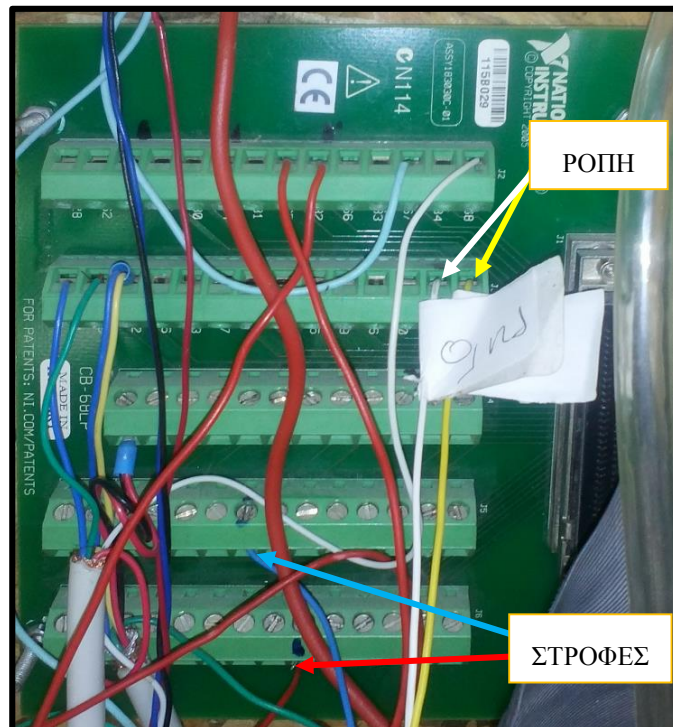
9.1.1. Το ροπόμετρο.

Το ροπόμετρο είναι αρκετά μεγάλης ακρίβειας της κλίμακας του 1Nm (βλέπε εικόνα παρακάτω). Το ίδιο όργανο μετράει επίσης και τις στροφές του άξονα. Τροφοδοτείται με τάση 5V. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ροπόμετρου αναφέρονται στα Παραρτήματα 1 και 2 στο τέλος.



Εικόνα 9.2 Ροπόμετρο

Οι έξοδοι απο το ροπόμετρο οδηγούνται σε μία πλακέτα όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω. Μέσω δύο καλωδίων (angle a, angle b) η συχνότητα (Hz) φτάνει στην πλακέτα (υποδοχές 45, 37) και αφού μετατραπεί μέσω του λογισμικού Labview μας εμφανίζει στην οθόνη τις στροφές (rpm). Εναλλάσσοντας τα καλώδια αντιστρέφεται η φορά περιστροφής για τις θετικές τιμές. Μέσω δύο άλλων καλωδίων μεταφέρεται τάση (V) στην πλακέτα (υποδοχές 27, 61) και μετατρέπεται στο Labview σε ροπή (mNm).



Εικόνα 9.3 Πλακέτα

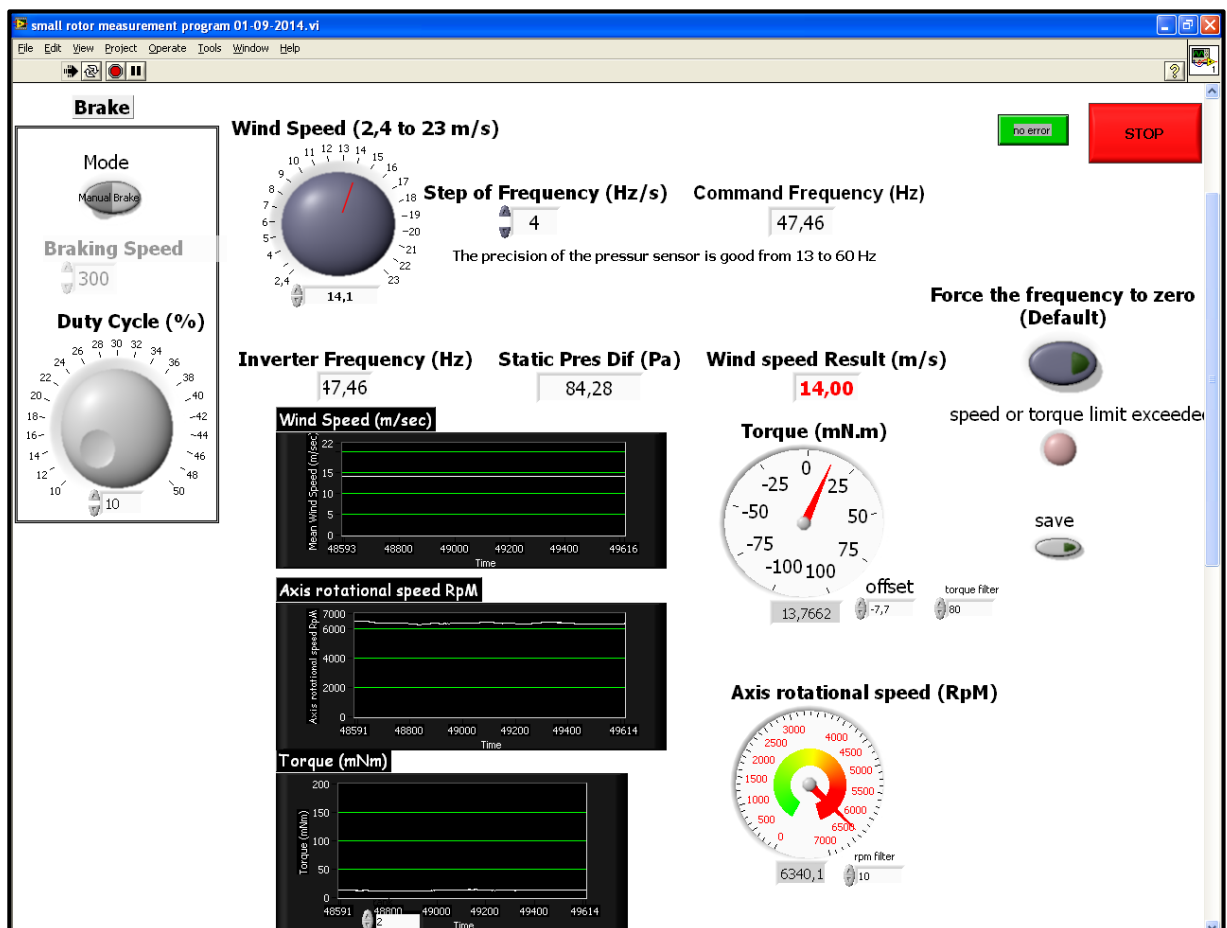
9.2. Περιγραφή πειράματος

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

Μεσα απο αυτό το πρόγραμμα μπορούμε σε πραγματικό χρόνο:

- να ρυθμίσουμε την ταχύτητα του αέρα στην έξοδο της αεροσήραγγας
- να δούμε την ροπή στον άξονα με την περύγωση
- τις στροφές ανα λεπτό του άξονα
- να φρενάρουμε τον άξονα με την περύγωση
- να αποθηκεύσουμε τις μετρήσεις αυτές σε αρχείο .txt

Στην εικόνα φαίνεται το παράθυρο του προγράμματος LabVIEW:



Εικόνα 9.4 Παράθυρο LabVIEW

Τρέχουμε το πρόγραμμα και αυξάνουμε σταδιακά την ταχύτητα του αέρα. Αφού σταθεροποιηθεί η ταχύτητα του αέρα (κόκκινοι αριθμοί) στην επιθυμητή ταχύτητα, πατάμε το

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

9.2.1. Βαθμονόμηση ροπόμετρου - Labview

Για να βεβαιωθούμε για την σωστή ένδειξη των στροφών στο Labview πρίν ξεκινήσουμε την καταγραφή έγινε έλεγχος με ένα στροφόμετρο (εικόνα παρακάτω) στις στροφές του άξονα για να δούμε εάν συμφωνούν μεταξύ τους.



Εικόνα 9.5 Στροφόμετρο

Για τον έλεγχο της ροπής τοποθετήθηκαν με νήμα σε κάποια απόσταση του φτερού βαρίδια και υπολογίστηκε η ροπή και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με την ένδειξη του Labview. Στο παράθυρο του προγράμματος στο πλαίσιο του **offset** πληκτρολογούμε την διαφορά έτσι ώστε το πλαίσιο του ροπόμετρου να μας δείχνει μηδέν με σταματημένο και ελεύθερο άξονα. Με βάση τους υπολογισμούς που έγιναν η τιμή του **offset** είναι **-7,7**.

9.3.Επεξεργασία μετρήσεων

Έχοντας τις μετρήσεις της ροπής και των στροφών μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ με

βάση τον τύπο: $P = M * \omega$ όπου $\omega = \frac{2*\pi*N}{60}$

Τέλος υπολογίζουμε τον συντελεστή ισχύος με βάση τον τύπο:

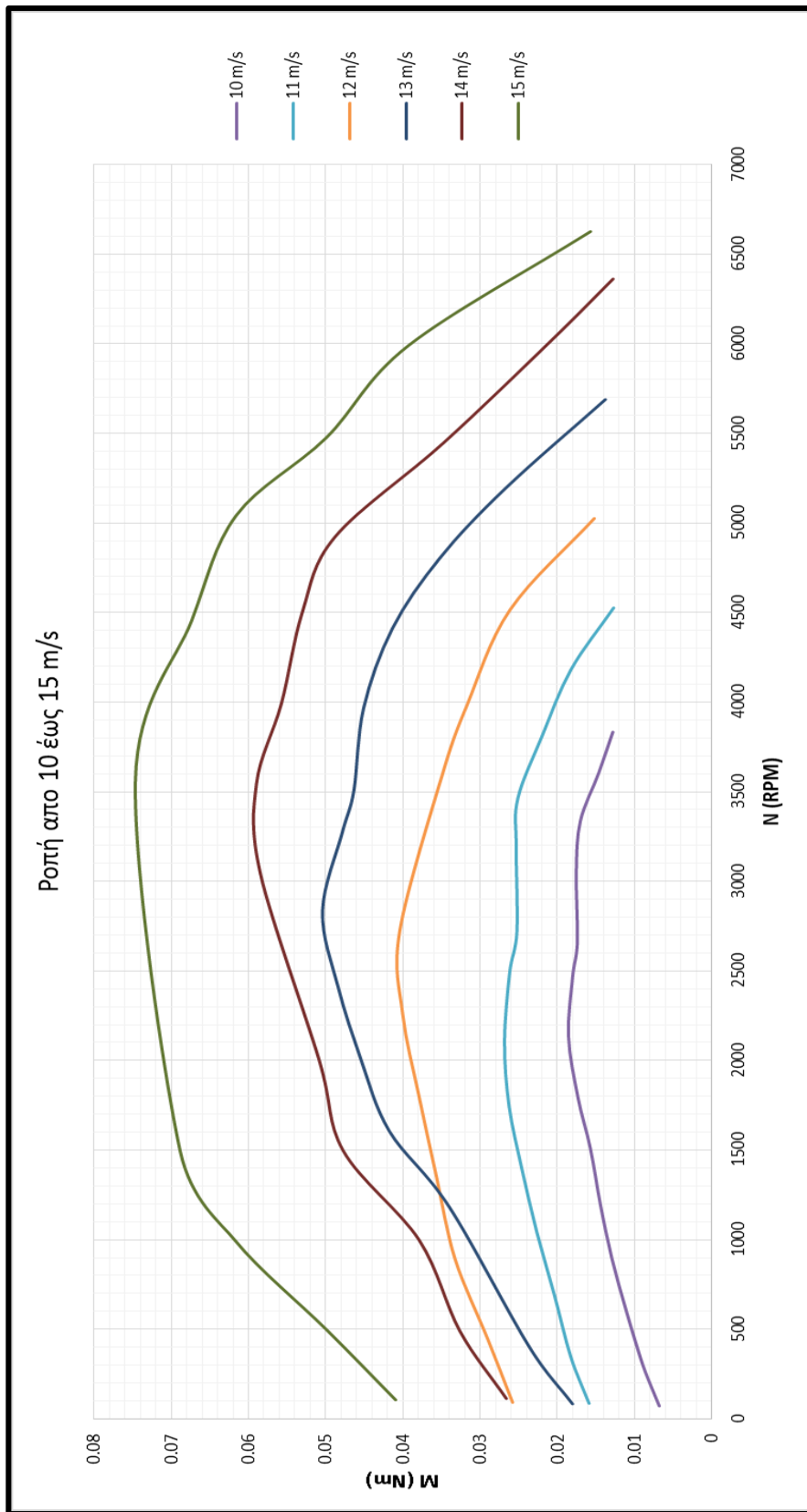
$$Cp = \frac{2P}{\rho * A * V^3}$$

10. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

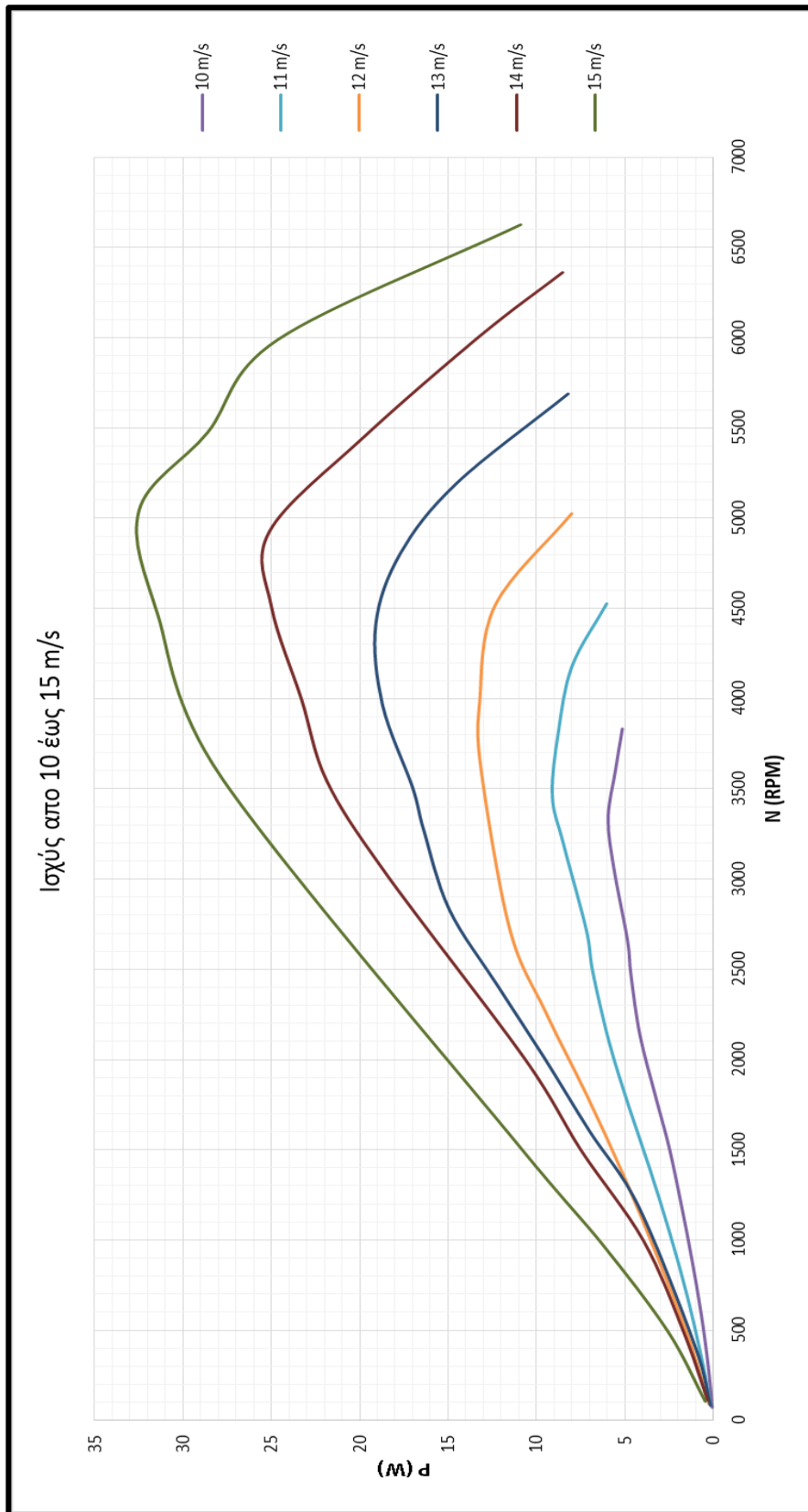
Με το πέρας αρκετών πειραμάτων και με την κατάλληλη επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν τα πειραματικά διαγράμματα. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα αυτά με τα θεωρητικά που περιέχονται στο κεφάλαιο 5 (5.2) μπορούμε να καταλήξουμε ως προς την αξιολόγηση της εφαρμογής ΥροIFterου2.0, καθώς και να βγάλουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα για την διαδικασία της σχεδίασης της περύγωσης, για την τρισδιάστατη εκτύπωση της και για την διαδικασία του πειράματος.

10.1. Πειραματικά διαγράμματα

Η ταχύτητα εκκίνησης της περύγωσης που μελετήθηκε είναι τα 6 m/s αλλά από 10 m/s και άνω κρίθηκαν ποιοτικές οι μετρήσεις. Ακολουθούν τα διαγράμματα ροπής (Nm) και ισχύος (W) συναρτήση των στροφών του άξονα (Rpm), για ταχύτητες αέρα από 10 έως 15 m/s.



Διάγραμμα 10.2



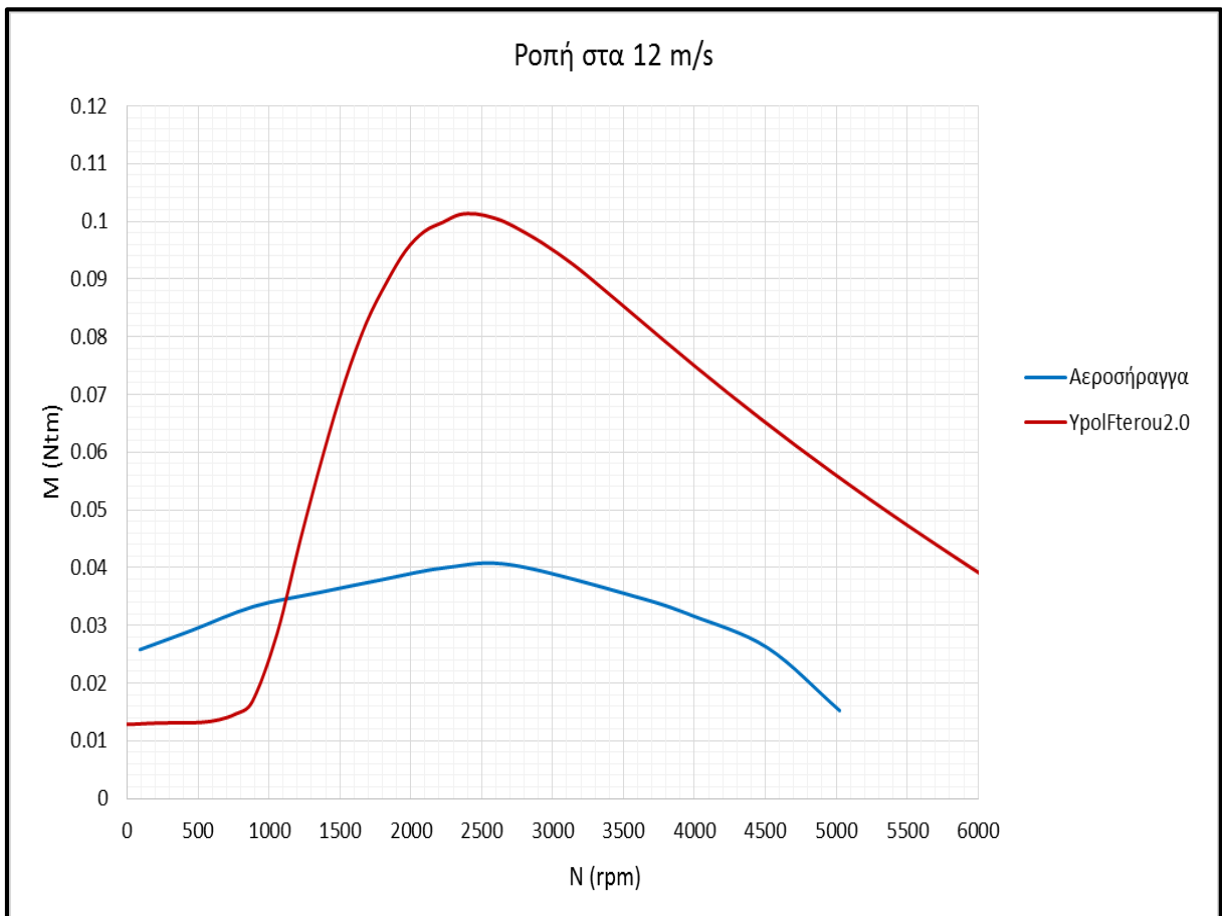
Διάγραμμα 10.3

10.2. Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών τιμών

Ακολουθεί η σύγκριση μεταξύ των τιμών του ΥpolFterou2.0 και των μετρήσεων στην αεροσήραγγα για τις ταχύτητες αέρα 12 και 15 m/s.

Στο Διάγραμμα 10.4 παρατηρούμε ότι για ταχύτητα αέρα **12 m/s** η εφαρμογή ΥpolFterou2.0 μας δίνει μέγιστη ροπή **0,101 Ntm** στις **2461 στροφές ανα λεπτό** ενώ οι μετρήσεις στην αεροσήραγγα εμφανίζουν μέγιστη ροπή **0,040 Ntm** στις **2724 στροφές ανα λεπτό**.

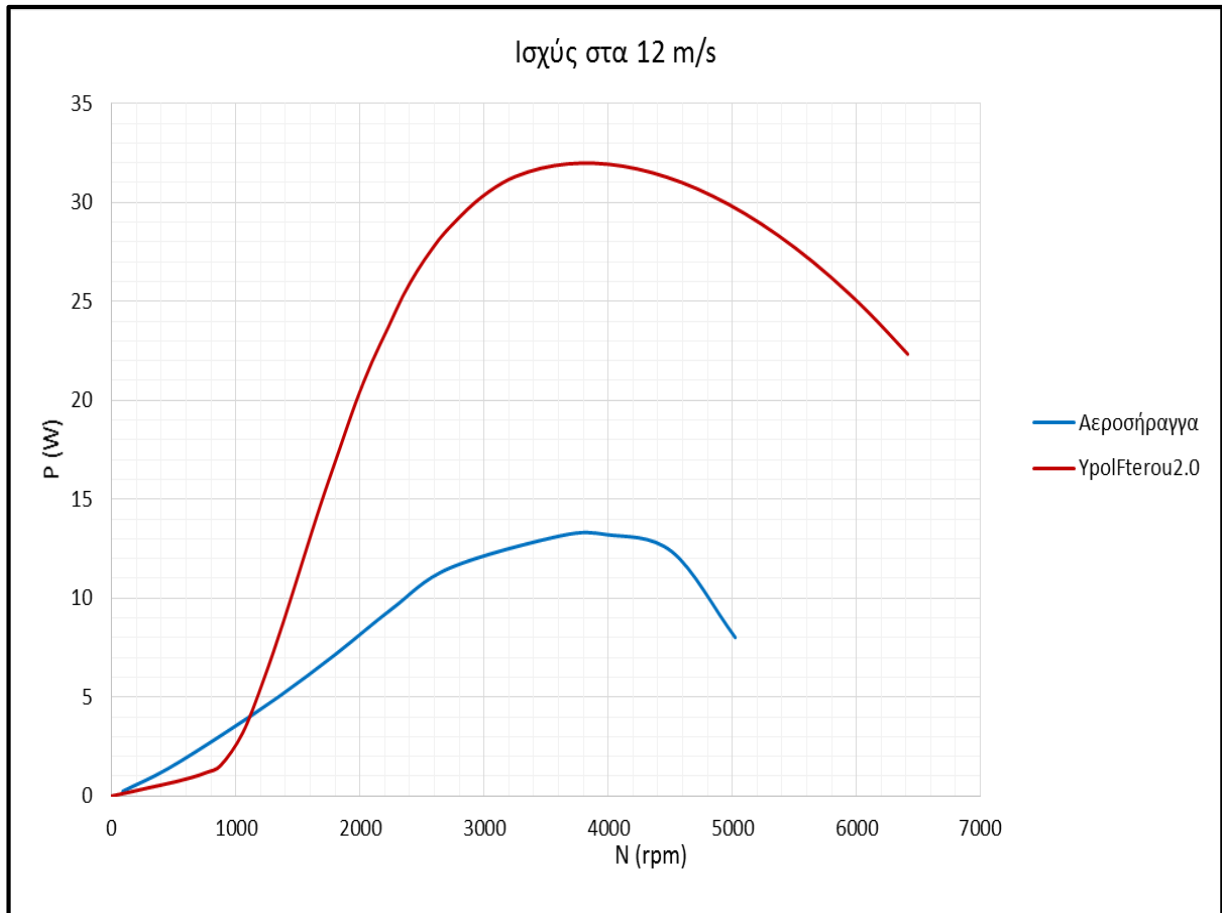
Έχουμε σχετική απόκλιση 60,4%.



Διάγραμμα 10.4

Στο Διάγραμμα 10.5 παρακάτω εμφανίζεται η ισχύς στην ίδια ταχύτητα αέρα όπου η εφαρμογή ΥpolFterou2.0 μας δίνει μέγιστη ισχύ **31,98 Watt** στις **3782 στροφές ανα λεπτό** ενώ οι μετρήσεις στην αεροσήραγγα εμφανίζουν μέγιστη ισχύ **13,2 Watt** στις **3989 στροφές ανα λεπτό**.

Έχουμε σχετική απόκλιση 58,7%.



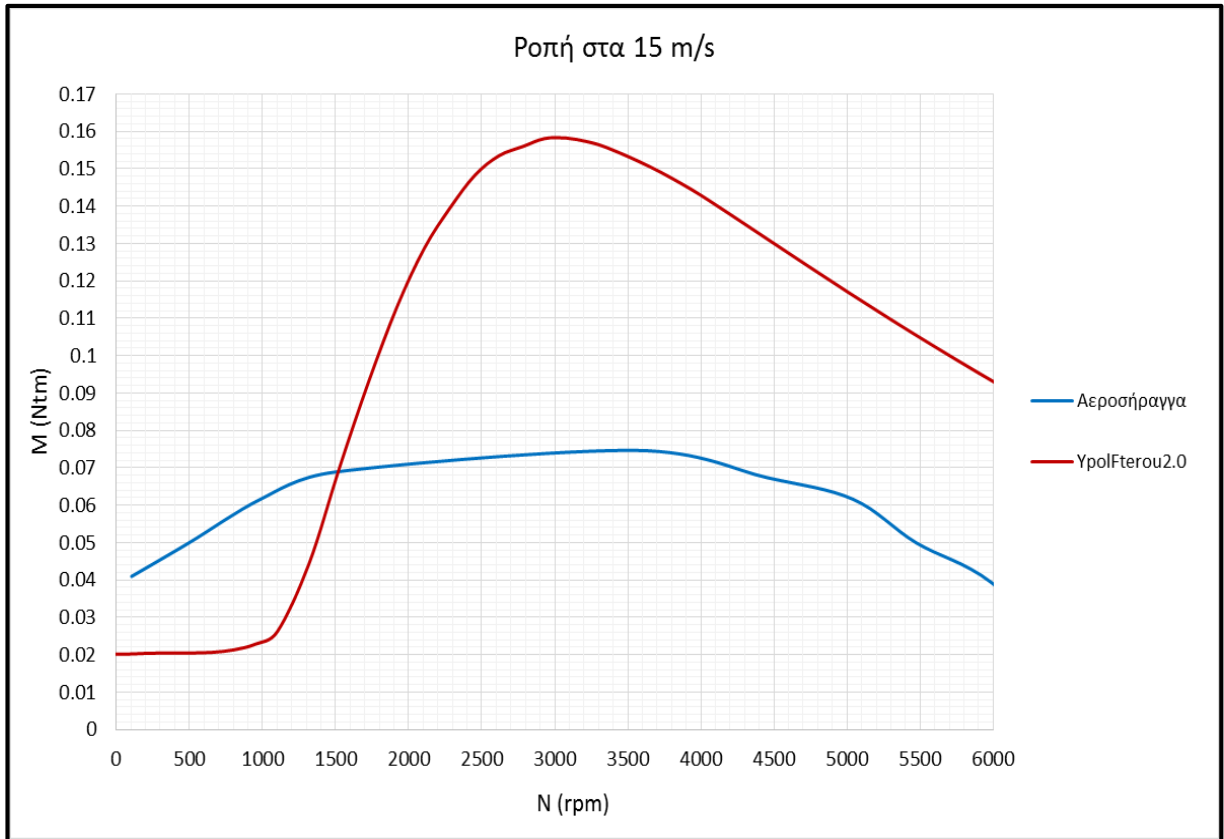
Διάγραμμα 10.5

Για ταχύτητα αέρα **15 m/s** στο Διάγραμμα 10.6 παρακάτω, η εφαρμογή ΥποFτερου2.0 μας δίνει μέγιστη ροπή **0,158 Ntm** στις **3076 στροφές ανά λεπτό** ενώ οι μετρήσεις στην αεροσήραγγα εμφανίζουν μέγιστη ροπή **0,074 Ntm** στις **3556 στροφές ανα λεπτό**.

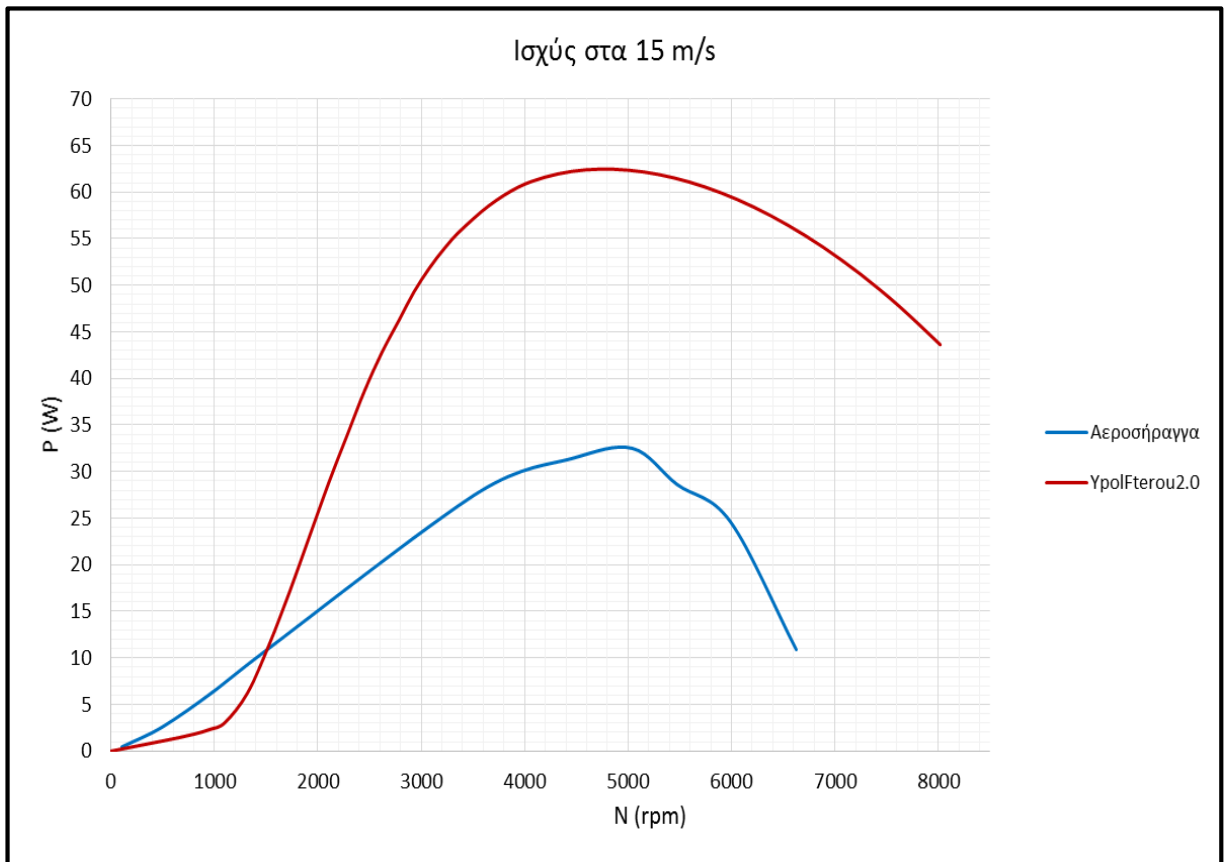
Έχουμε σχετική απόκλιση 53,16%.

Στην ίδια ταχύτητα αέρα παρατηρούμε στο Διάγραμμα 10.7 ότι η εφαρμογή ΥποFτερου2.0 μας δίνει μέγιστη ισχύ **62,47 Watt** στις **4727 στροφές ανα λεπτό** ενώ οι μετρήσεις στην αεροσήραγγα εμφανίζουν μέγιστη ισχύ **32,5 Watt** στις **5040 στροφές ανα λεπτό**.

Έχουμε σχετική απόκλιση 47,98%.



Διάγραμμα 10.6



Διάγραμμα 10.7

10.3. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με την σύγκριση των θεωρητικών και των πειραματικών διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές ροπής και ισχύος επιτυγχάνονται περίπου στην ίδια περιστροφική ταχύτητα (rpm) του άξονα. Ωστόσο υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών ροπής και ισχύος. Οι θεωρητικές τιμές είναι κατα μέσο όρο διπλάσιες από τις πειραματικές τιμές. Είναι αρκετά τα προβλήματα που επηρέασαν την ορθότητα του πειράματος και δημιούργησαν ανακρίβειες στις μετρούμενες τιμές.

Αυτά πιθανόν να οφείλονται κυρίως σε:

- Προβλήματα της μετρητικής διάταξης.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από πολλά διαφορετικά κομμάτια όπου το καθένα από αυτά έχει τοποθετηθεί μετά από διάφορες τροποποιήσεις. Αυτό καθιστά προβληματική τη διαδικασία συναρμολόγησης η οποία επηρεάζει την ευθυγραμμία του άξονα όπως και τον συνολικό προσανατολισμό της διάταξης. Επίσης η τριβή πάνω στον άξονα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καθυστερεί την εκκίνηση περιστροφής της πτερύγωσης.

- Προβλήματα της πτερύγωσης.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που χρειάστηκε να αντιμετωπίσουμε ήταν η ποιότητα εκτύπωσης της πτερύγωσης. Μέσα από διάφορες δοκιμές εκτυπώσεων επιτεύχθηκε μεγάλη βελτίωση της επιφάνειας του φτερού. Παρόλα αυτά παραμένει το πρόβλημα της τραχύτητας και αυτό οφείλεται στην μέγιστη λεπτομέρεια που μπορεί να αποδώσει ο τρισδιάστατος εκτυπωτής. Επίσης παραμένουν θέματα αντοχής του υλικού διότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου (άνω των 15 m/s) υπήρξε θράυση φτερού.

- Προβλήματα κατά την διαδικασία μέτρησης.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων σε μεγάλη ταχύτητα αέρα, η αεροσήραγγα προκαλεί ταλαντώσεις στην μετρητική διάταξη με αποτέλεσμα να επηρεάζει τις μετρήσεις του ροπόμετρου. Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επηρέασε αρνητικά την μέτρηση ήταν η διαδικασία φρεναρίσματος η οποία έγινε αναγκαστικά χειροκίνητα με τη χρήση γαντιού διότι το σύστημα πέδης δεν ήταν σε θέση να φρενάρει τον άξονα με τον επιθυμητό ρυθμό.

10.4. Προτάσεις

Για την βελτίωση των μελλοντικών μετρήσεων και την ορθότερη διεξαγωγή των πειραμάτων προτείνονται ορισμένες απαραίτητες αλλαγές όπως:

- Η ανακατασκευή της μετρητικής διάταξης ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η ευθυγράμμιση του άξονα, η καθετότητα της πτερύγωσης ως προς τον άξονα και η μέγιστη δυνατή μείωση των τριβών.
- Η εκτύπωση πτερύγωσης μεγαλύτερου μεγέθους θα οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα επιφάνειας λόγω της ακριβέστερης εκτύπωσης της από τον 3D printer. Το μεγαλύτερο πάχος του φτερού θα αυξήσει σημαντικά την αντοχή του.
- Η τοποθέτηση ειδικών σφουγγαριών στην βάση της διάταξης για την απορρόφηση των κραδασμών που δημιουργούνται από τις ταλαντώσεις της αεροσήραγγας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την σωστή λειτουργία του ροτόμετρου.
- Η τοποθέτηση νέου συστήματος πέδης με σερβοκινητήρα σημαντικά μεγαλύτερης ροπής ο οποίος θα αποτελείται από μεταλλικά γρανάζια αντί για πλαστικά. Η σωστή βαθμονόμηση του συστήματος φρεναρίσματος είναι απαραίτητη για σωστό και αργό φρενάρισμα σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων.
- Τέλος είναι απαραίτητο να γίνουν περαιτέρω μετρήσεις ώστε εάν υπάρχει επαναληψιμότητα στην απόκλιση των πειραματικών τιμών από τις θεωρητικές να προστεθεί στην εφαρμογή ΥποΠτερου2.0 κάποια παράμετρος η οποία θα αντισταθμίζει την διαφορά. Εκ νέου σχεδίαση πτερύγωσης και μετρήσεις για την σύγκριση.

11. Βιβλιογραφία

- [1] http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil
- [3] <http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/dimension-elite>
- [4] <http://www.wel.teicrete.gr/>
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=0n87iA3YuFc>
- [6] <http://sciencespec.com.tw/userfiles/file/DR2112-DR2112L.pdf>
- [7] http://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ENG.pdf
- [8] D. Le Gourières. « *Les éoliennes* » : *Théorie, conception et calcul pratique*. 2008, Editions du Moulin Cadiou, Diffusion EYROLLES-GEODIF/SODIS, ISBN: 978-2-9530041-0-6.
- [9] Σημειώσεις μαθήματος Αιολικά συστήματα
- [10] Παράρτημα 3 : JAN Zoé. « *Realization of a wind profile on a wind tunnel* ». 2011, Internship report.
- [11] Γ. Κοζώρης, « *Ανάλυση και τεκμηρίωση δεδομένων για την αντοχή σε εφελκυσμό δοκιμίων κατασκευασμένων από υλικό Acrylonitrile Butadiene Styrene και Acrylonitrile Butadiene Styrene Plus σε τριδιάστατο εκτυπωτή* ». Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Ηράκλειο, 2014.

12. Παραρτήματα

12.1. Παράρτημα 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Ροτόμετρου



| DR2112-DR2112L 0.1 Nm ... 20 000 Nm | | Capteurs de Couple - Rotatif <i>Rotatif Torque Sensor</i> | | | |
|---|--|---|---|---|--|
| Caractéristiques Techniques - Technical specifications | | | | | |
| Couple Nominal (C.N.) <i>Nominal Torque</i> | Vitesse de rotation max. <i>Max. Speed</i> | Raideur <i>Springrate</i> | Moment d'inertie <i>Moment of inertia</i> | | Charge axiale max. <i>Max. thrust load</i> |
| [Nm] | [tr/min] | [Nm/rad] | J en [kg m ²] | | [N] |
| | | | Côté entrainant <i>Drive side</i> | Côté résistant <i>Test side</i> | |
| 0.1 | 15 000 | 1.0 | 1.9 x 10 ⁻⁶ | 0.28 x 10 ⁻⁶ | 15 |
| 0.2 | 15 000 | 1.0 | 1.9 x 10 ⁻⁶ | 0.28 x 10 ⁻⁶ | 20 |
| 0.5 | 15 000 | 9.9 | 1.9 x 10 ⁻⁶ | 0.28 x 10 ⁻⁶ | 30 |
| 1 | 15 000 | 9.9 | 1.9 x 10 ⁻⁶ | 0.28 x 10 ⁻⁶ | 40 |
| 2 | 15 000 | 360 | 1.9 x 10 ⁻⁵ | 0.29 x 10 ⁻⁶ | 50 |
| 5 | 15 000 | 650 | 1.9 x 10 ⁻⁶ | 0.30 x 10 ⁻⁶ | 50 |
| 10 | 15 000 | 850 | 2.1 x 10 ⁻⁶ | 0.39 x 10 ⁻⁶ | 50 |
| 15 | 15 000 | 850 | 2.1 x 10 ⁻⁶ | 0.39 x 10 ⁻⁶ | 100 |
| 20 | 15 000 | 4 500 | 12 x 10 ⁻⁶ | 9.9 x 10 ⁻⁶ | 300 |
| 30 | 15 000 | 4 500 | 12 x 10 ⁻⁶ | 9.9 x 10 ⁻⁶ | 1 000 |
| 50 | 15 000 | 8.5 x 10 ³ | 13 x 10 ⁻⁶ | 12 x 10 ⁻⁶ | 1 600 |
| 100 | 12 000 | 8.5 x 10 ³ | 13 x 10 ⁻⁶ | 12 x 10 ⁻⁶ | 2 600 |
| 200 | 10 000 | 67 x 10 ³ | 100 x 10 ⁻⁶ | 90 x 10 ⁻⁶ | 3 200 |
| 500 | 10 000 | 78 x 10 ³ | 100 x 10 ⁻⁶ | 92 x 10 ⁻⁶ | 7 500 |
| 1 000 | 7 000 | 310 x 10 ³ | 1.6 x 10 ⁻³ | 1.1 x 10 ⁻³ | 10 000 |
| 2 000* | 5 500 | 0.72 x 10 ⁶ | 5.3 x 10 ⁻³ | 4.3 x 10 ⁻³ | 18 000 |
| 5 000* | 5 500 | 0.8 x 10 ⁶ | 5.4 x 10 ⁻³ | 4.3 x 10 ⁻³ | 32 000 |
| 10 000* | 5 000 | 1.2 x 10 ⁶ | 41 x 10 ⁻³ | 39 x 10 ⁻³ | 125 000 |
| 20 000* | 5 000 | 2.1 x 10 ⁶ | 41 x 10 ⁻³ | 43 x 10 ⁻³ | 200 000 |

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

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

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

Παράρτημα 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Ροτόμετρου σελ. 1

| DR2112-DR2112L | | Capteurs de Couple - Rotatif | |
|---|--|---|---|
| 0.1 Nm ... 20 000 Nm | | Rotatif Torque Sensor | |
| Caractéristiques - Specifications | | | |
| MÉCANIQUES | | MECHANICAL | |
| Couple Nominal (C.N.) | Nominal Torque (C.N.) | Voir page - See page 3 | Nm |
| Couple de travail admissible | Service torque** | 150 | % C.N. |
| Couple ultime avant rupture | Ultimate torque | > 300 | % C.N. |
| PRÉCISIONS | | ACCURACY | |
| Classe de précision | Accuracy class | 0.1 / 0.2* | % C.N. |
| Répétabilité | Repeatability | ±0.02 / ±0.04* | % C.N. |
| Fréquence de rafraîchissement | Refreshing rate | 10 | KHz |
| Bande passante (-3 dB) | Cut off frequency (-3 dB) | 1 | KHz |
| ÉLECTRIQUES | | ELECTRICAL | |
| Tension d'alimentation | Supply voltage | 12 ... 28 | Vcc |
| Courant d'alimentation | Supply current | < 60 | mA |
| Signal de sortie | Output signal | ±5 | V |
| Courant de sortie max. | Output current max | 5 | mA |
| Principe de connexion | Connection type | C.N. ≤ 15Nm : 8p - C.N. ≥ 15Nm : 12p | |
| GÉNÉRALES | | GENERAL | |
| Plage de température compensée | Nominal temperature range | +5 ... +45 | °C |
| Plage de température opérationnelle | Service temperature range | 0 ... +60 | °C |
| Dérive thermique de sensibilité | Temperature coefficient of sensitivity | ±0.01 / ±0.02* | % C.N./°C |
| Dérive thermique de zéro | Temperature coefficient of zero signal | ±0.02 / ±0.03* | % C.N./°C |
| Degré de protection (DIN 40 050) | Protection level (DIN 40 050) | IP50 | |
| Temps de réponse | Response time | 200 | µs |
| * pour DR2112L seulement - only available for DR2112L | | | |
| ** Attention : le signal de sortie sera en saturation en dessus de 110 % the output signal will be saturated above 110 % | | | |
| Options - Options | | | |
| Signal de sortie | Output signal | ±10 | V |
| Mesure d'angle et de vitesse | Angle-speed control | -W : 2x360 impulsions - pulses 5V TTL 2 signaux à 90° (C.N. ≥ 2 000 Nm : -D : 1 signal : 60 pulses) | Sens horaire - CW-turn Voie A  Voie B  |
| C.N. spéciales | Special ranges | | |
| Sortie numérique | Digital output | RS485 | |
| Principe de connexion | Connection type | Connecteur 12p (C.N. ≤ 15Nm) | |
| Classe de précision DR2112 | Accuracy class DR2112 | 0.05 | % C.N. |

Παράρτημα 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά Ροτόμετρου σελ. 2

12.2. Παράρτημα 2. Στροφόμετρο χειρός


www.compactinstruments.co.uk

Digital Chronometer
CT6/CR

Time interval measurement:
The CT6/CR Digital Chronometer is designed to measure time (reciprocal motion), using time intervals between 2 fixed reflective marks. The time range of the CT6/CR is from 0.0001 sec to 9.9999sec.

Laser beam visibility:
The Red Spot beam of intense light improves the accuracy of measurement of this digital chronometer.

Typical applications:

- Automotive-door closing mechanisms
- Cycle machine time setting-Production rates
- Single shot motion rate- Physics application
- Pulse interval- Repetition rates



Concorde Range
Handheld Chronometer

| General Specification | |
|-----------------------|------------------------------|
| RPM Overall range | 0.001-99.999 sec |
| Resolution | max 0.001 sec |
| On target ind. | Yes |
| Low battery | Yes |
| Power | 4 X AAA batteries (supplied) |
| Carrycase | Supplied |

Tel: +44(0)1204 532544

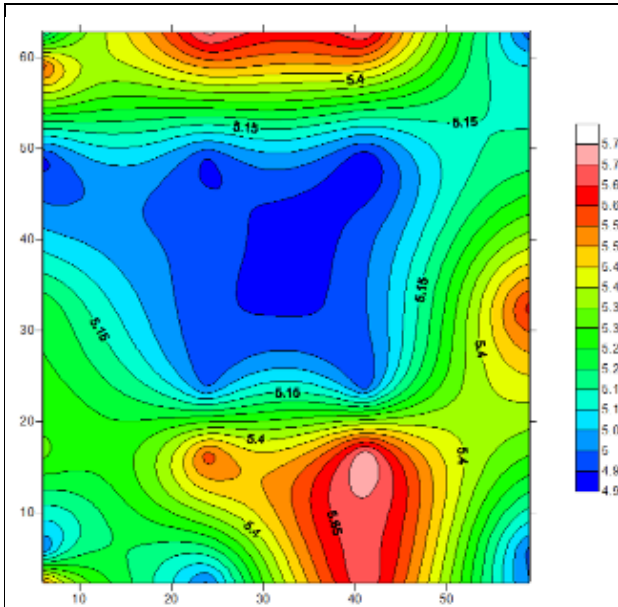
Fax: +44(0)1204 522285

E-mail: sales@compactinstruments.co.uk

Παράρτημα 2. Στροφόμετρο χειρός

12.3. Παράρτημα 3. Δεδομένα ροής της αεροσήραγγας του τμήματος

Ταχύτητα 5m/s

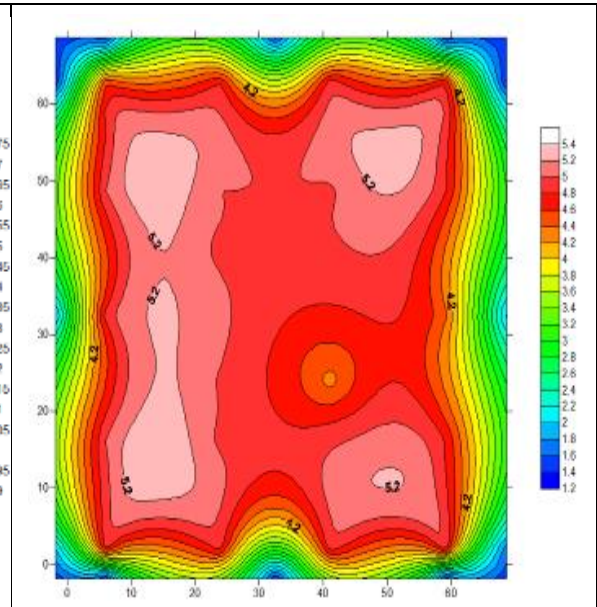


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.1%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

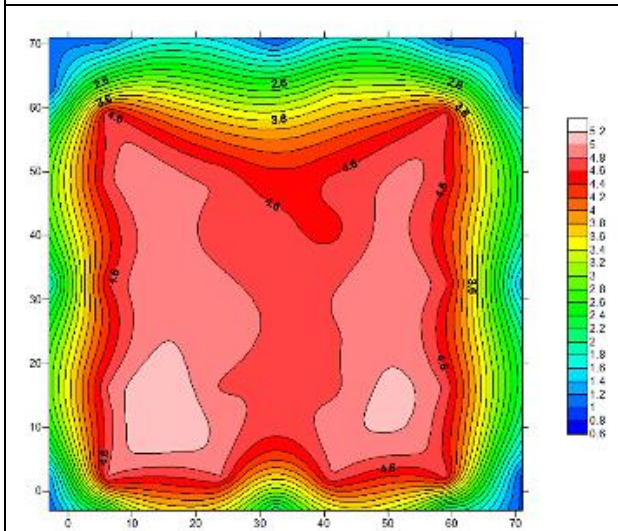


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

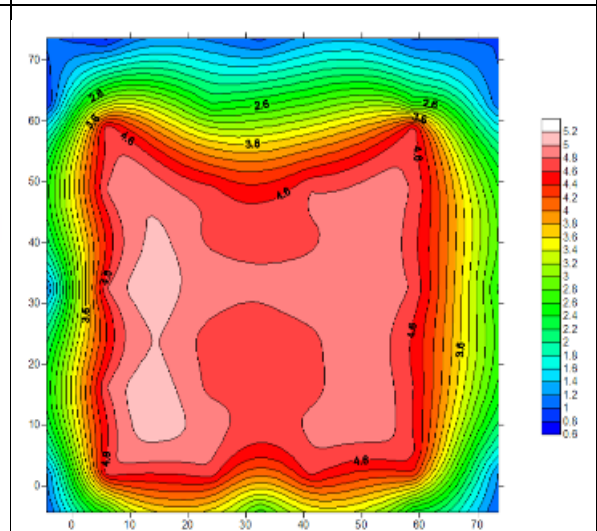


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 6.3%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.7%

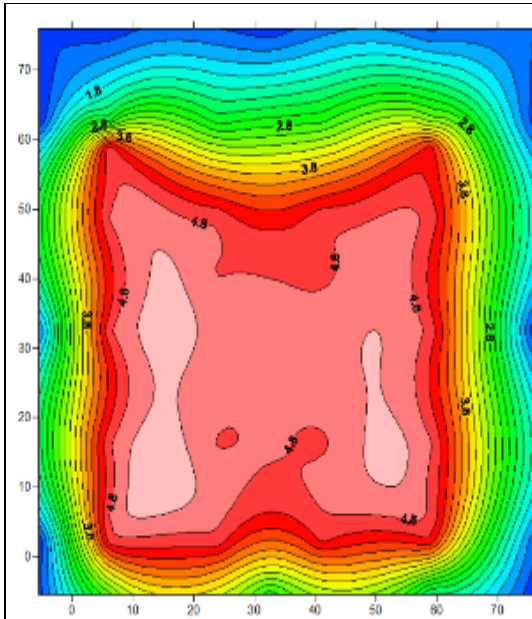


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 7.1%

Κοντά στα τοιχώματα : 5.5%

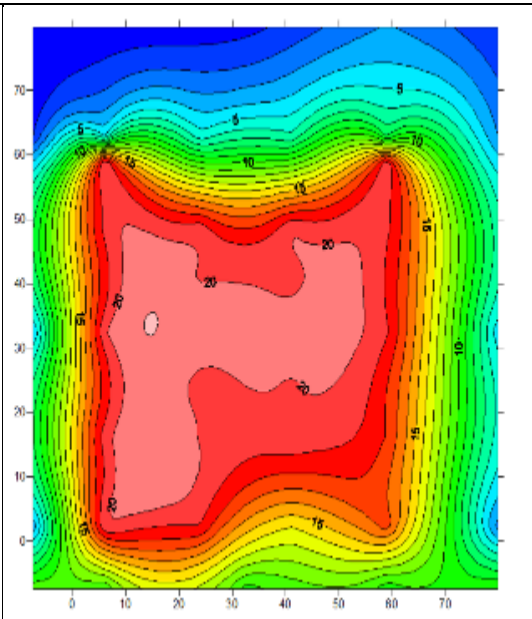


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 5.9%

Κοντά στα τοιχώματα : 5.7%



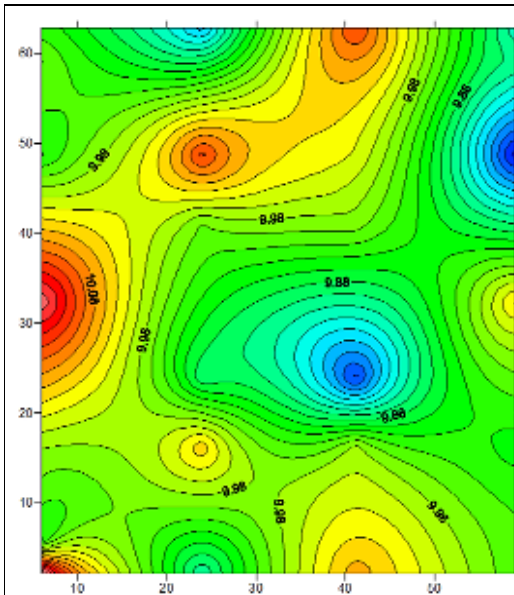
60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 5.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 7%

Ταχύτητα 10m/s

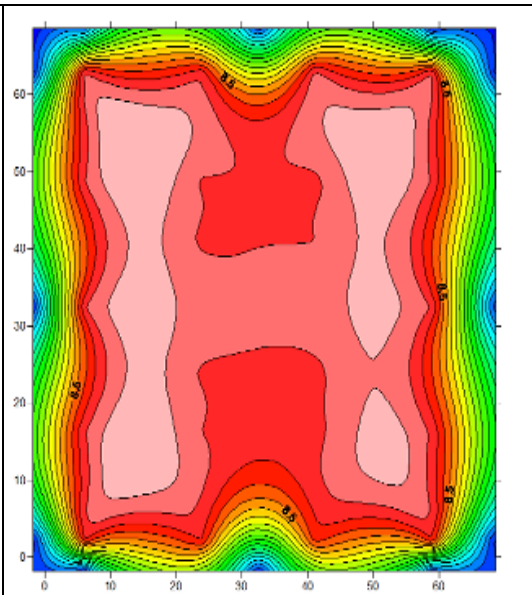


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.2%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.4%

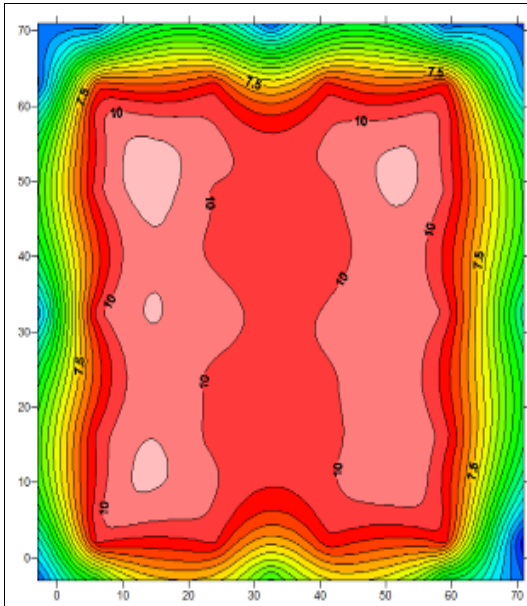


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.4%

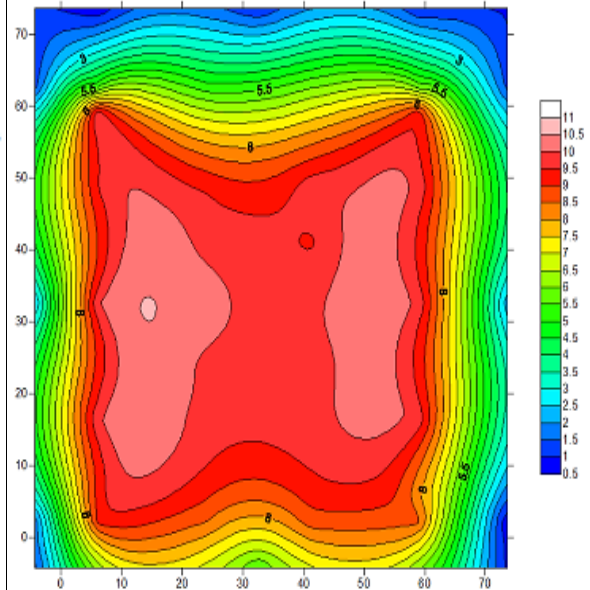


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.2%

Κοντά στα τοιχώματα : 6.7%

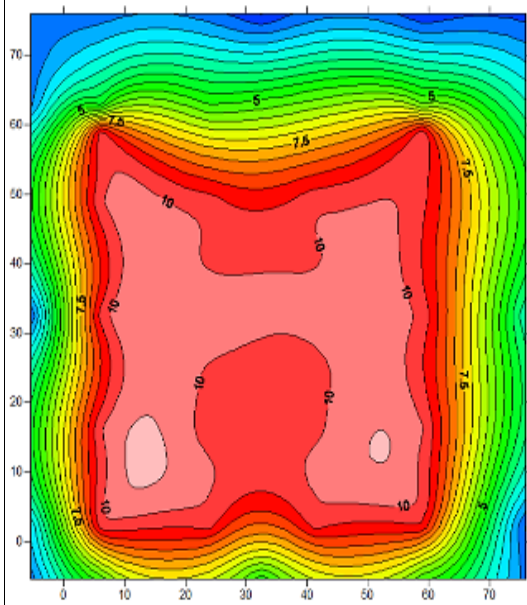


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.2%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.8%

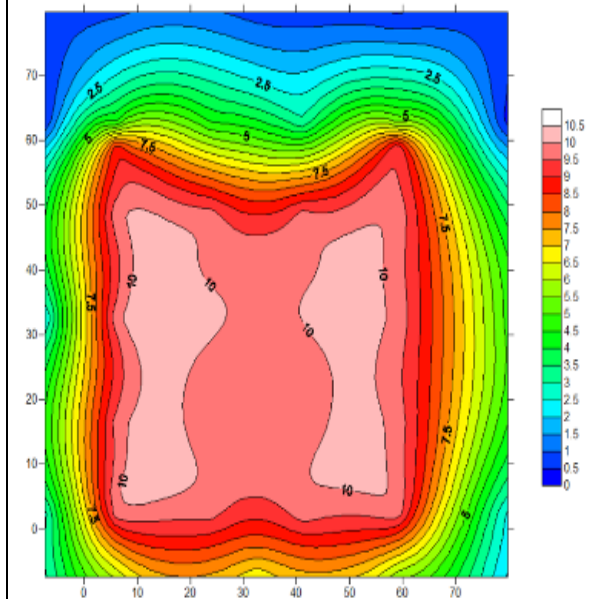


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.7%



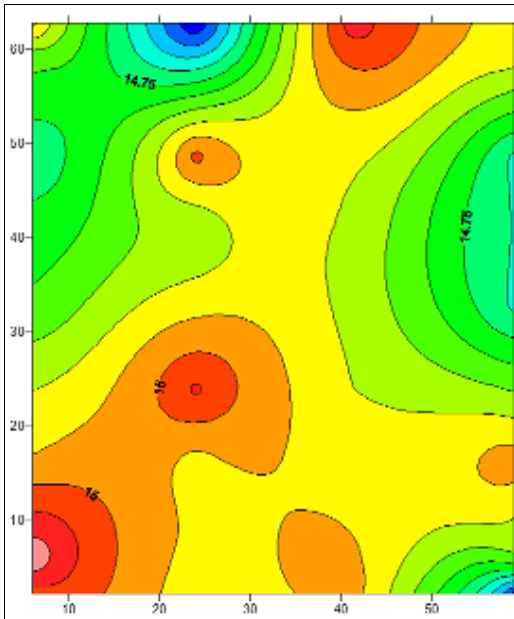
60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 2.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 4.3%

Ταχύτητα 15m/s

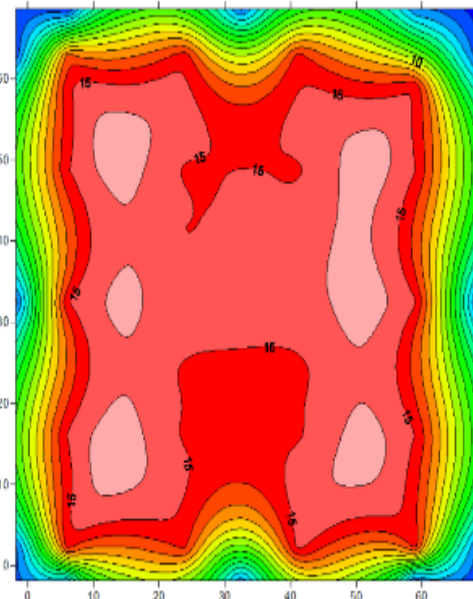


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.6%

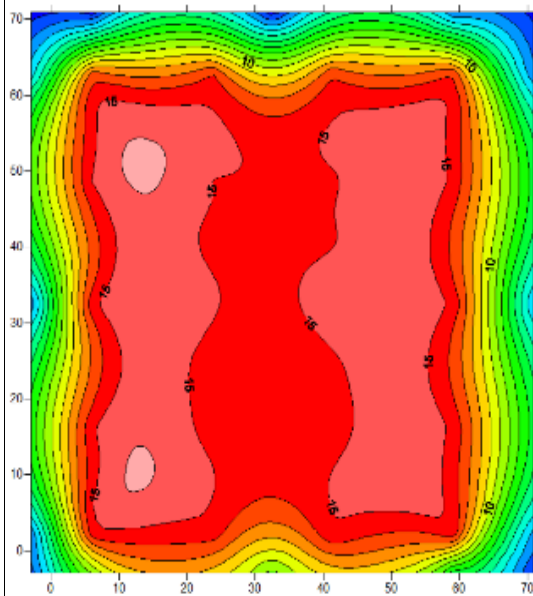


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

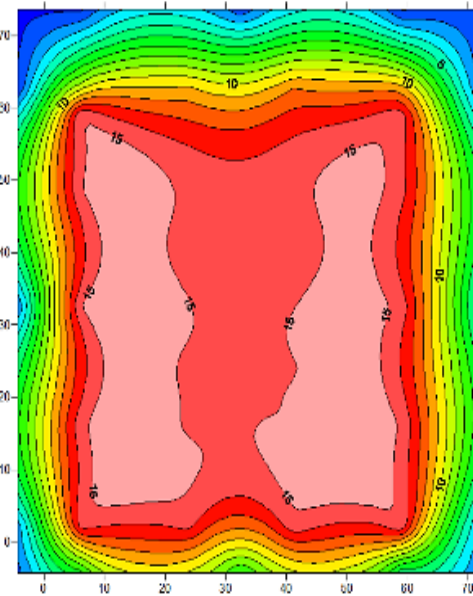


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

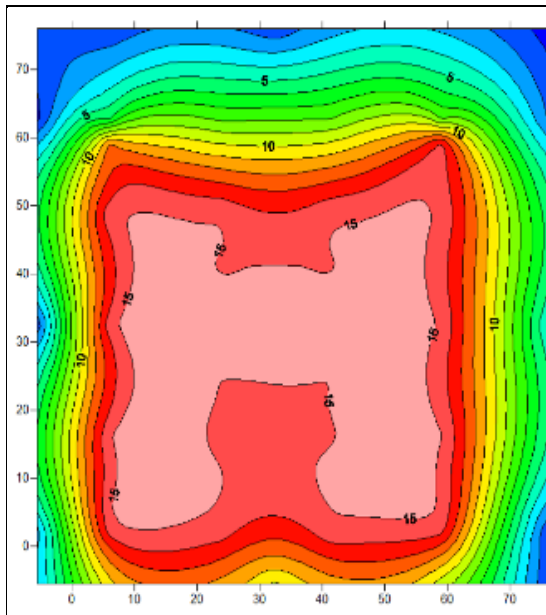


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.5%

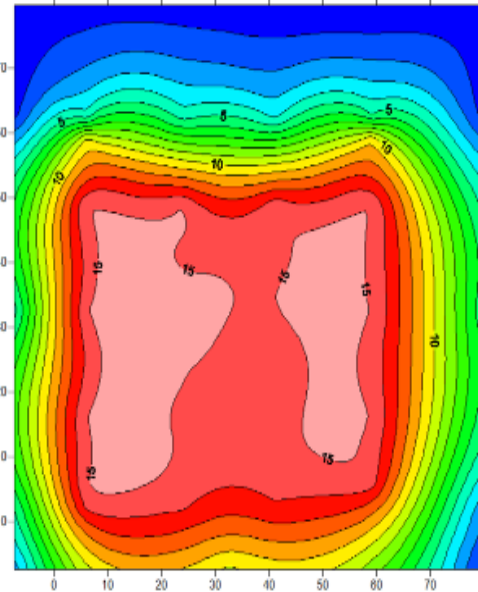


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.7%



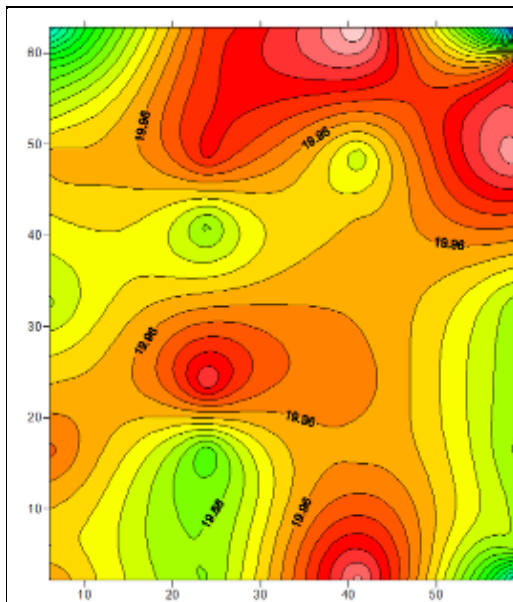
60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 3.3%

Ταχύτητα 20m/s

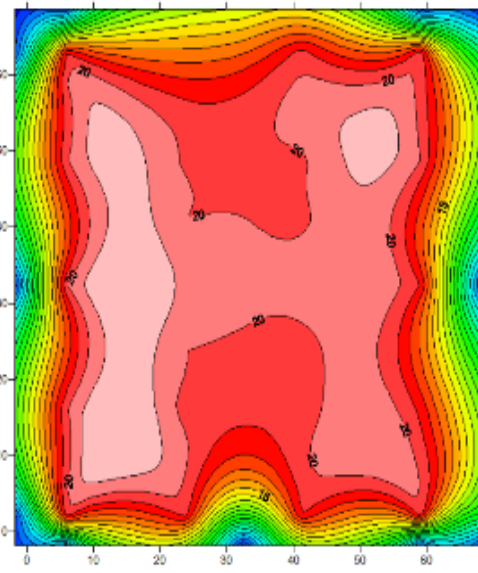


5cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.1%

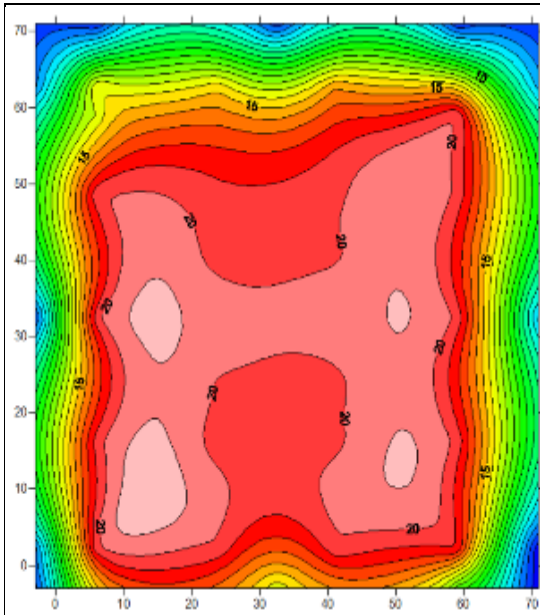


15cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.6%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.7%

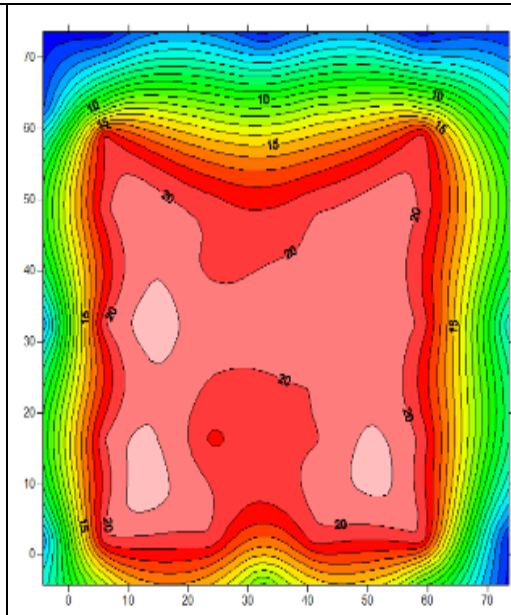


25cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.6%

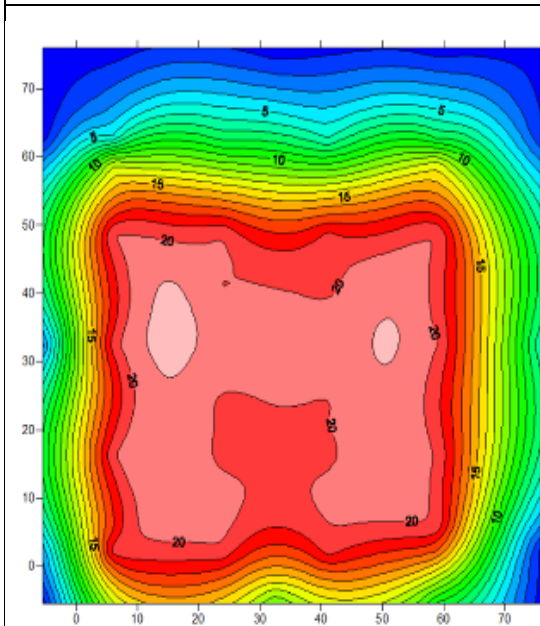


35cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.8%

Κοντά στα τοιχώματα : 1.8%

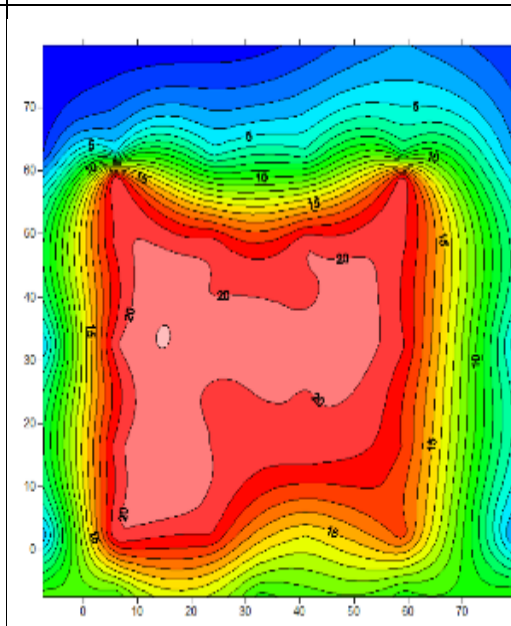


45cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.5%

Κοντά στα τοιχώματα : 2.0%



60cm

Ένταση Τύρβης :

Στο κέντρο : 1.7%

Κοντά στα τοιχώματα : 3.3%