



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας



Πτυχιακή εργασία

**Μελέτη - σχεδιασμός - κατασκευή
πτερύγωσης ανεμογεννήτριας**

**Παπακώστας Νικήτας (ΑΜ: 4116)
E-mail: nik_p_n64@yahoo.com**

Ηράκλειο – 2016

Επόπτης Καθηγητής: Χρηστάκης Δημήτρης

Περίληψη

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τον σχεδιασμό ενός ισοτασικού πτερυγίου το οποίο θα εφαρμοσθεί σε μια γεννήτρια η οποία θα αποδίδει ονομαστική ισχύ χιλίων watt η οποία έχει το χαρακτηριστικό να αποδίδει την ισχύ της με ταχύτητα ανέμου μόλις (2 m/s) ενώ μέσω της εφαρμογής ενός ιδιαίτερου και μελετημένου μηχανισμού δύναται να αποδώσει την μέγιστη ισχύ της σταθερά ακόμα και σε ακραία καιρικά φαινόμενα.

Τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας τον επηρέασαν πολύ παράγοντες όπως οι συντελεστές ασφάλειας και το κόστος. Το συγκεκριμένο ισοτασικό φτερό υπέστη υπολογισμούς αντοχής σε κάμψη και διάτμηση, όπως και επαληθεύτηκαν οι υπολογισμοί μετά από μια προσομοίωση στον Η/Υ.

Ο στόχος και η αρχική ιδέα της παραπάνω εφαρμογής είναι το γεγονός πως η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια μπορεί να παραχθεί βιομηχανικά, φυσικά μετά από απαραίτητες διορθώσεις που πρέπει να υποστεί αφού δοκιμαστεί και έτσι να υπάρχει η δυνατότητα διάθεσής της σε οποιονδήποτε σημείο της γης με την δυνατότητα ο αγοραστής να καταφέρει να την εγκαθιστά μόνος του χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις.

Τέλος πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του καλουπιού του πτερυγίου με την χρήση της ψηφιακά καθοδηγούμενης φρέζας και του συμβατικού τόνου.

Graduate Thesis

Design & Construction of a Wind Turbine blade

Summary

This thesis presents the drawing and the stress calculation of an isostressed blade which will be applied to a generator that delivers a rated power of 1000 watt. The reported generator has the characteristic attributes of power with wind speed only (2 m / s) and through the application of a special-studied mechanism, may yield the highest value of the constant, even in extreme weather conditions.

The design of the wind is a function of many factors such as safety and the cost. The isostressed blade, got applied to the generator after strength calculations in bending and shear, following a numerical simulation, where we verified the conceptual calculations.

The aim of the initial idea of this application is the turbine industrial production in order to produce a design concept suitable for a 'do it yourself' product. Therefore, in addition to the presentation of how to design it and the various calculations of the wing and its connections with the generator and the construction by means of a CNC milling and a traditional lathe machine.

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΔΟΜΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	4
ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΩΝ Α/Γ	4
ΘΕΩΡΙΑ	5
ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	5
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΑΥΤΗ	6
ΤΥΠΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ	12
NACA 4415	12
ΠΤΕΡΥΓΙΑ	12
ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΡΟΠΗΣ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	15
ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ	21
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΚΟΥ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑ	22
ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ & ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΤΑΣΙΚΟΥ ΦΤΕΡΟΥ	23
ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	25
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟ EXCEL	26
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ	30
ΑΕΡΟΤΟΜΗ NACA 4415	30
ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΕ SOLID WORKS	34
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ SOLIDWORKS	35
ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	36
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ	38
ΔΟΚΙΜΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	39
ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ	41
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	41
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΕ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ (FLOW SIMULATION)	44
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	50
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ	52
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	52
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΣΕ ΦΡΕΖΑ	56
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΝΩΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΜΕ Α/Γ ΣΕ ΤΟΡΝΟ	63
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	66
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

Εισαγωγή

Δομή ανεμογεννήτριας

Στις μέρες μας, ένας τύπος (με βάση τη θέση του άξονα) Α/Γ έχει κυριαρχήσει. Είναι ο τύπος του οριζόντιου άξονα. Περιλαμβάνει συνήθως 3 πτερύγια και αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

Δρομέα (ρότορας) : είναι το μέρος αυτό με το οποίο μεταφέρεται η μηχανική ισχύς, ώστε να γίνει ηλεκτρική μέσω της επαγωγής μέσα στη γεννήτρια. Μερικές φορές χρησιμοποιείται σύστημα γραναζιών για να επιτευχθεί η επιθυμητή συχνότητα περιστροφής.

Γεννήτρια : Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί το κατώφλι για την έναρξη παραγωγής ισχύος .

Κατευθυντήριο σύστημα : Το σύστημα αυτό είναι είτε ένα ουραίο πτερύγιο είτε για μεγάλες Α/Γ ,ένας μηχανισμός με γρανάζια και κινητήρα, ώστε η Α/Γ να εκμεταλλευτεί όσο γίνεται καλύτερα τον άνεμο, στην κατεύθυνση που αυτός κινείται.

Σύστημα προστασίας : Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εξοπλισμένες με μηχανισμούς για να αποτρέψουν κάποια ζημιά στους υπερβολικά δυνατούς ανέμους. Οι μεγάλες μπορούν και έχουν σύνθετες ρυθμίσεις για να διακόψουν την παραγωγή με τις ταχύτητες υψηλού αέρα. Τα μικρότερα συστήματα αλλάζουν τον προσανατολισμό των πτερυγίων ή και των λεπίδων, έτσι ώστε μειώνουν την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους, ή χρησιμοποιούν μηχανικά δισκόφρενα.

Πύργος : Ο σχεδιασμός των πύργων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς πρέπει να είναι ψιλός, γερός, να επιτρέπει την πρόσβαση στην ανεμογεννήτρια για τη συντήρησή της, και όμως να μην επιβαρύνει το κόστος του συστήματος. Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα στην άτρακτο υπάρχει και το σύστημα προσανατολισμού τους, ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου.

Τα βασικά μηχανικά μεγέθη των Α/Γ

- Η ονομαστική ισχύς (Rated Power).
- Ο συντελεστής απόδοσης, C_p . (Power Coefficient).
- Η ετήσια παραγωγή σε KWh/year (Annual Energy production).
- Διάμετρος στροφέα (Rotor Diameter) –Άνοιγμα πτερυγίων, D (Blade Span).
- Ύψος πλήμνης H (για τις κάθετες Α/Γ). (Hub Height)
- Η ταχύτητα του ανέμου όπου επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς (Rated Speed).
- Η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου ώστε να εξαχθεί ισχύς (Cut in Speed).
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανέμου (Cut off Speed).
- Ο αριθμός των πτερυγίων, z.

ΘΕΩΡΙΑ

Βασικές σχέσεις αεροδυναμικής

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που συναντάμε στην μελέτη ανεμογεννητριών είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (λ) (Tip Speed Ratio- TSR) ο οποίος βρίσκεται από τον λόγο της γραμμικής ταχύτητας εξαιτίας της περιστροφής ($R\omega_R$) προς την ταχύτητα του ανέμου (V) και αποτελεί αδιάστατο μέγεθος.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ που δίνεται από τη γωνία κλίσης (pitch) των πτερυγίων

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V}$$

Όπου,

R , η ακτίνα πτερυγίου ο

ω_R , η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

V , η ταχύτητα του ανέμου

Από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, προκύπτει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (C_p) (στο δρομέα), ο οποίος μέσω της συνολικής απόδοσης n των μηχανικών κι ηλεκτρικών μερών της Α/Γ δίνει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου μίας Α/Γ

Η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική από τον δρομέα της Α/Γ , πραγματοποιείται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \alpha) V^3 n$$

Όπου,

ο P , η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)

ο n , η συνολική απόδοση της γεννήτριας

ο ρ , η πυκνότητα του ανέμου (για το επίπεδο της θάλασσας (MSL) $\rho = 1,225$ (kg/m³) (http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/atmos/atmos.htm)

[1](http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/atmos/atmos.htm))

ο R , η ακτίνα πτερυγίου της Α/Γ (m)

ο $C_p(\lambda, \alpha)$, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

ο V , η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p εξαρτάται από δύο παράγοντες:

Ο παράγοντας α που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή είναι η τιμή της γωνίας του βήματος της έλικας των πτερυγίων (pitch control) και ο λ είναι ο λόγος της ταχύτητας των ακροπτερυγίων (tip speed ratio) προς την ταχύτητα του ανέμου.

Η παραπάνω εξίσωση της μηχανικής ισχύος της Α/Γ ισχύει όταν η ροή του ανέμου είναι σταθερή, κατάσταση η οποία δεν υφίσταται στην πράξη. Οι απότομες μεταβολές

του ανέμου είναι δυνατό να παράσχουν ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, εξαιτίας των αεροδυναμικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, η στατική αυτή σχέση δεν εκφράζει την εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή που οφείλονται στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (wind shear) και το φαινόμενο σκίασης του πύργου (tower shadow).

Οι ταλαντώσεις αυτές της αεροδυναμικής ροπής είναι θεμελιώδους συχνότητας $n \times f$, όπου n ο αριθμός των πτερυγίων (συνήθως είναι τρία) και f η συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Τα φαινόμενα αυτά, ωστόσο, δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης στην οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί ενός πτερυγίου που αναπτύσσει σταθερή μέγιστη τάση σε κάθε διατομή ανά το μήκος του.

Η μηχανική αεροδυναμική ροπή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

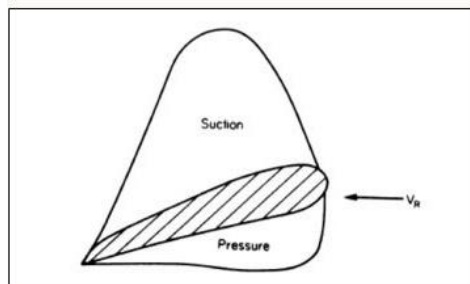
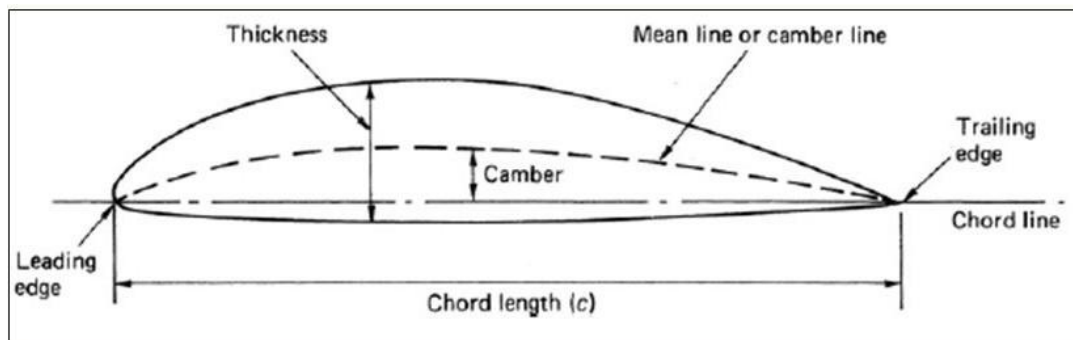
$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1}{2} \rho A R V^2 C_m$$

όπου ,

$$C_m = \frac{C_p(\lambda, \alpha)}{\lambda}$$

Θεωρείται επίσης ότι η ανεμογεννήτρια σταματάει την λειτουργία της σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 2 m/s και αντίστοιχα σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 8.3 m/s . Η έξοδος του αεροδυναμικού μοντέλου είναι η αεροδυναμική ροπή T , η οποία με τη σειρά της αποτελεί είσοδο στο μοντέλο του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΑΥΤΗ



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομής

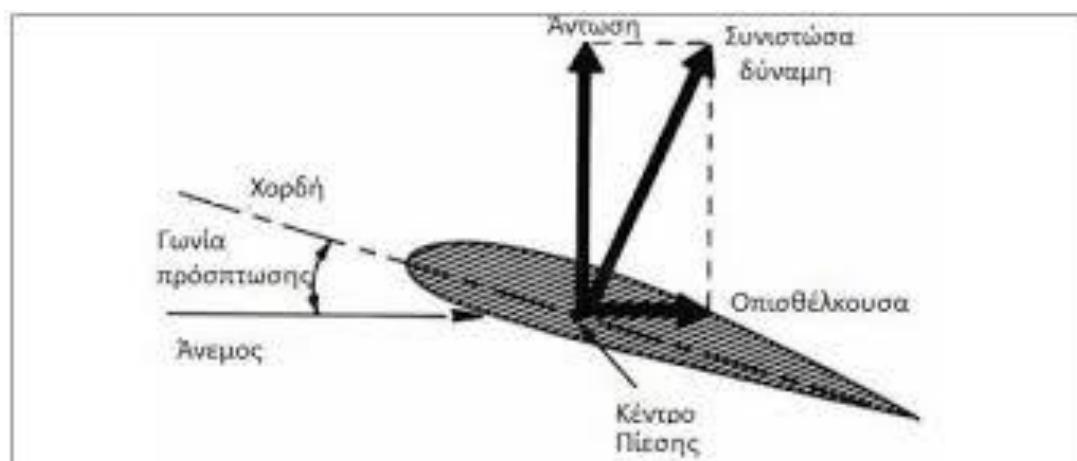
Κατανομή πίεσης αεροτομής

Εικόνα 1. Γεωμετρία αεροτομής [5.].

Όπως παρουσιάζεται και στην *Εικόνα 1*, τα κύρια χαρακτηριστικά ενός πτερυγίου είναι:

- i. Η κοίλη επιφάνεια που ονομάζεται χείλος προσβολής (leading edge)
- ii. Μια αιχμηρή ακμή διαφυγής που ακολουθείται (trailing edge)
- iii. Η χορδή, συνδέει την χείλος προσβολής (leading edge) με το χείλος εκφυγής (trailing edge)
- iv. Άνω επιφάνεια (upper surface)
- v. Κάτω επιφάνεια (lower surface)
- vi. Η μέση γραμμή (Η camber line), απέχει από την άνω και την κάτω επιφάνεια ισομερώς κατά μήκος του πτερυγίου. Είναι σημαντική παράμετρος όσον αφορά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου.
- vii. Η μέγιστη κυρτότητα (max camber) και η θέση της βοηθάει να καθοριστεί το σχήμα της μέσης γραμμής. Αυτές οι ποσότητες εκφράζονται με κλάσμα ή με ποσοστό της χορδής.
- viii. Το μέγιστο πάχος και η θέση του βοηθάει στον καθορισμό του σχήματος του πτερυγίου και εκφράζεται ως ποσοστό του μήκους της χορδής.
- ix. Ο κύκλος στην ακμή προσβολής με κέντρο στην μέση γραμμή εκφράζει την κυρτότητα της ακμής πρόσπτωσης.

Οι έννοιες: Άνωση και Οπισθέλκουσα, ονομάζονται οι δύο δυνάμεις που επενεργούν κάθε στιγμή επάνω στα πτερύγια (και σε οποιοδήποτε σώμα που διέρχεται από ένα ρεύμα αέρα) και έχουν πάρει τα σύμβολά τους (L και D) από τις αγγλικές λέξεις Lift και Drag αντίστοιχα. Η άνωση έχει διεύθυνση κάθετη σε αυτή της σχετικής ταχύτητας του ανέμου. Η οπισθέλκουσα έχει την ίδια διεύθυνση με αυτή της σχετικής ταχύτητας του ανέμου ως προς τα πτερύγια (Relative wind).



Εικόνα 2. Άνωση και οπισθέλκουσα δύναμη [6].

Η έννοια της Άνωσης είναι η δύναμη που κάνει ένα αεροπλάνο να πετάει. Η Άνωση εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης τόσο μικρότερη είναι και η άνωση. Η σχέση της Άνωσης και οπισθέλκουσας δύναμης αποτυπώνεται με μαθηματικό τρόπο, εκφραζόμενη ως εξής:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad , \quad D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D$$

όπου, C_L ο συντελεστής άνωσης (Lift Coefficient) ο οποίος περιγράφεται παρακάτω, ρ η πυκνότητα του ρευστού, A η επιφάνεια του σώματος κάθετα στη ροή, V η ταχύτητα

του σώματος ως προς το ρευστό. Η Οπισθέλκουσα δύναμη είναι μέγιστη αν η διεύθυνση του ρευστού είναι κάθετη στην επιφάνεια της αεροτομής ενώ ελάχιστη αν η διεύθυνση του ρευστού είναι παράλληλη της αεροτομής.

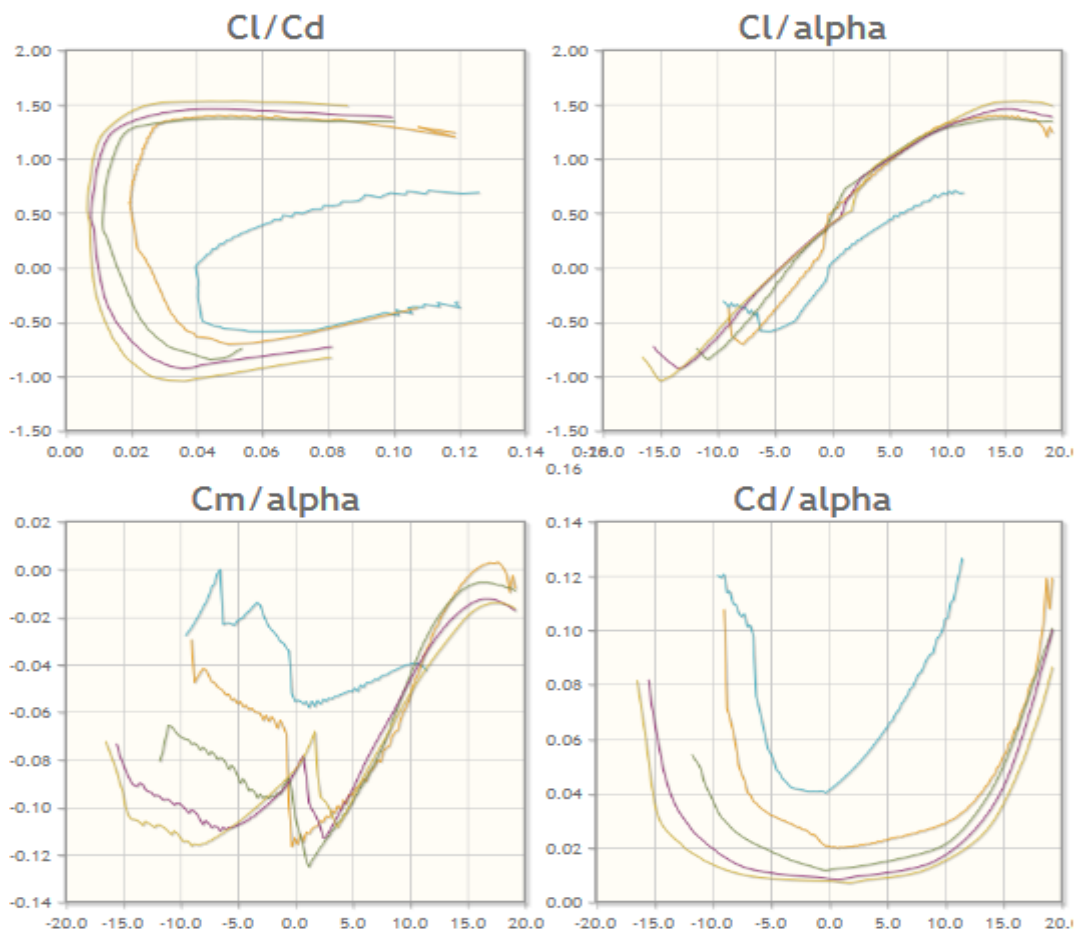
Σε κάποιες περιπτώσεις μας ενδιαφέρει η ένταση της οπισθέλκουσας δύναμης όπως (π.χ. ανεμογεννήτρια) ενώ σε άλλες θέλουμε να την μειώσουμε (π.χ. στο αεροπλάνο).

Τα χαρακτηριστικά της άνωσης και της οπισθέλκουσας περιγράφονται από τους συντελεστές άνωσης C_L και οπισθέλκουσας C_d , αντίστοιχα. Για την επιλογή τύπου αεροτομής είναι βασικό να γνωρίζουμε τους συντελεστές C_L και C_d , καθώς ο λόγος C_L/C_d θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος, ώστε να έχουμε καλή απόδοση. Η μαθηματική περιγραφή των συντελεστών C_L και C_d δίδεται στην σχέση που ακολουθεί:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad \text{και} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

όπου, L η άνοση (Nt), D οπισθέλκουσα (Nt), V η ταχύτητα (m/s), A η επιφάνεια του δρομέα (m^2) και ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

Στο διάγραμμα της *Εικόνας 3* απεικονίζεται ο συντελεστής άνωσης (C_L) ως προς τον συντελεστή οπισθέλκουσας (C_d) και (C_L), (C_d), (C_m) ως προς την γωνία προσβολής της αεροτομής Naca 4415 για διάφορους αριθμούς Reynolds.



Εικόνα 3. Γράφημα συντελεστών της NACA 4415 για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds [7].

Ο αριθμός Re μεταβάλλεται με το πλάτος χορδής C και με την προσπίπτουσα ταχύτητα V για ένα κινηματικό ιξώδες ν σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Όσο η camber μεγαλώνει σχηματίζει και μια δύναμη LIFT όπου υπολογίζεται και το ανάλογο C_L .

$$Re = \frac{CV}{\nu}$$

όπου,

V (ταχύτητα του ανέμου) (m/s)

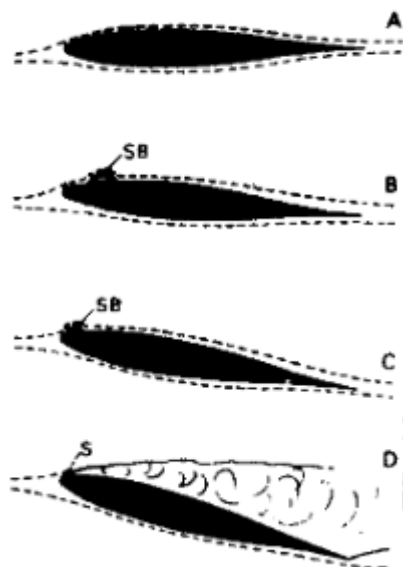
C (πλάτος πτερυγίου) (m)

ν (κινηματικό ιξώδες) (m^2/s)

Η γωνία προσβολής ή πρόσπτωσης i (angle of attack/incidence) είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη χορδή και τη σχετική ταχύτητα του ανέμου. Η άνωση είναι αποτέλεσμα της γωνίας πρόσπτωσης. Η γωνία α ονομάζεται γωνία βήματος (pitch/setting angle) και είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη χορδή και από το επίπεδο περιστροφής της έλικας της ανεμογεννήτριας. Η γωνία ροής I (flow angle) είναι το άθροισμα των γωνιών i (γωνία πρόσπτωσης) και α όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.

Τα περισσότερα πτερύγια χρειάζονται θετική γωνία πρόσπτωσης για την παραγωγή άνωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία προσβολής τόσο μεγαλύτερη είναι η άνωση, αν όμως η γωνία γίνει αρκετά μεγάλη, τότε στην πάνω επιφάνεια σχηματίζονται στροβιλισμοί και η άνωση μειώνεται απότομα (stall).

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ανέμου καθώς διέρχεται από την επιφάνεια της αεροτομής για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Όπως φαίνεται σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης η ροή είναι στρωτή καθ' όλη την διάρκεια επαφής του αέρα με την επιφάνεια της αεροτομής. Σε γωνία πρόσπτωσης ίση με 20 μοίρες έχουμε τυρβώδη ροή με αποτέλεσμα τη μείωση της άνωσης και την μεγάλη αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης όπου συναντάμε το φαινόμενο απώλειας στήριξης.

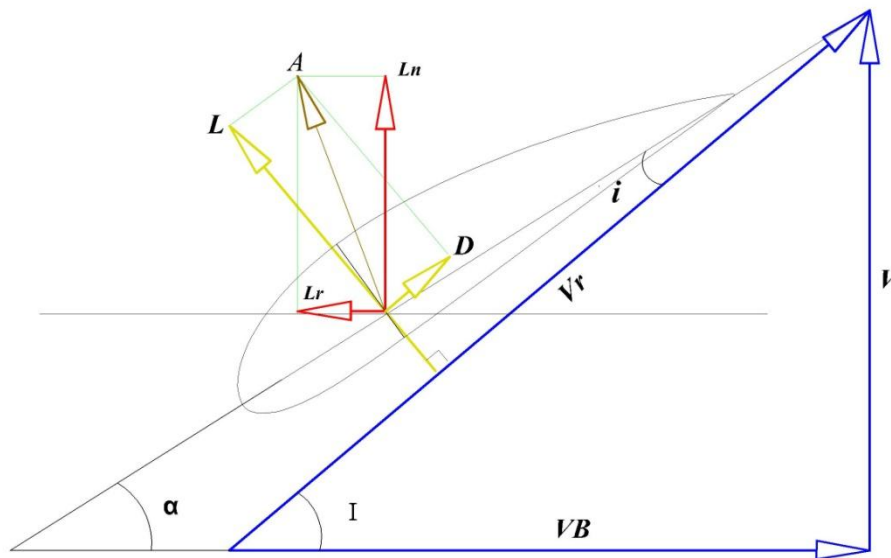


Εικόνα 4 .Συμπεριφορά ροής ανέμου για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης [8].

Θεωρία πτερύγωσης A/Γ

Η θεωρία πτερύγωσης στηρίζεται στην διαίρεση του πτερυγίου σε στοιχειώδη τμήματα και στον υπολογισμό των στοιχειωδών μεγεθών σε αυτά. Στη συνέχεια ακολουθεί ολοκλήρωση σε όλο το μήκος του πτερυγίου και προκύπτει μια αριθμητική σχέση για τον συντελεστή ισχύος C_P , όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων R (μήκος πτερυγίου), C (πλάτος πτερυγίου), τους συντελεστές C_L και C_d καθώς και από την συνεφαπτομένη της γωνίας i .

Για να κατανοήσουμε την θεωρία της πτερύγωσης είναι απαραίτητο να παραθέσουμε το παρακάτω σχήμα της αεροτομής ενός πτερυγίου,



Σχήμα 1 . Ασκούμενες δυνάμεις στην Αεροτομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας και το τρίγωνο ταχυτήτων σχηματίζοντας τις Γωνίες - πρόσπτωσης (i), βήματος (α).

Όπως φαίνεται σε ένα στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου πάχους dr , οι ασκούμενες δυνάμεις Lift και Drag, οι συνιστώσες thrust (L_n) και torque (L_r) της συνισταμένης δύναμης A (όπου μας ενδιαφέρουν ποιο πολύ), προκύπτουν από την προσπίπτουσα ταχύτητα του ανέμου V η οποία προστιθέμενη με την ταχύτητα περιστροφής $V_B = \omega R$ δίδει την σχετική ταχύτητα του ανέμου την οποία βλέπει η πτέρυγα $V_r = V - V_B$. Η σχετική ταχύτητα του ανέμου V_r είναι εκείνη που θα δημιουργήσει τις δυνάμεις LIFT & DRAG και σχηματίζει την γωνία I (flow angle) με την περιστροφική ταχύτητα V_r όπου σχηματίζεται το τρίγωνο των ταχυτήτων και ισχύει $I = i + \alpha$ και $I = \tan^{-1}(V/V_B)$.

Η γωνία i (angle of attack) είναι αυτή που καθορίζει το διάγραμμα του $C_L - i$ όπου συντελεί στην επιλογή της αεροτομής. Η ευθεία που περνά από το μέσο της χορδής (πλάτος) C του πτερυγίου σχηματίζει την γωνία βήματος (pitch/setting angle), με την γραμμική ταχύτητα περιστροφής.

Φαινόμενο απώλειας στήριξης (stall).

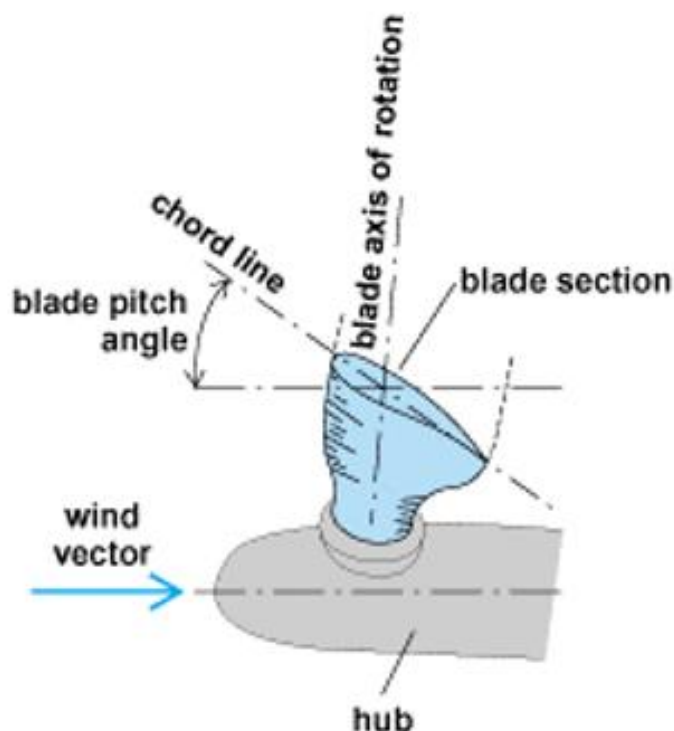
Η απώλεια στήριξης είναι το φαινόμενο κατά το οποίο σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου εμφανίζονται στα πλάγια τμήματα των πτερυγίων και αντίθετα από την πλευρά πρόσπτωσης του ανέμου, στροβιλισμοί και δίνες που αντισταθμίζουν τις

δυνάμεις άνωσης στα πτερύγια και τις περιορίζουν στο να επιδράσουν στον ρότορα. Επίσης λόγω του φαινομένου, παρατηρούνται συνεχείς αρνητικές ολισθήσεις στην ταχύτητα περιστροφής, γνωστές και ως ‘στολάρισμα’ (από τον όρο stall στα αγγλικά).

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο τα πτερύγια στρέφονται αργά κατά μήκος του άξονα τους μέχρι να χάσουν σταδιακά την απώλεια στήριξης. Πρέπει ακόμα να τονίσουμε ότι η μεταβολή της γωνίας στην απώλεια στήριξης γίνεται αντίθετα προς την γωνία βήματος πτερυγίου.

Η Γωνία βήματος πτερυγίου α (pitch angle)

Στις ανεμογεννήτριες που διαθέτουν έλεγχο γωνίας βήματος (pitch control), τα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους προς την κατεύθυνση που μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης, με αποτέλεσμα την μείωση και του συντελεστή άνωσης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή σαν βήμα πτέρωσης (pitch feathering). Ο μηχανισμός στρίβει τα πτερύγια και προσαρμόζει ανάλογα με τις αεροδυναμικές συνθήκες την γωνία βήματος πτερυγίου α κάνοντας χρήση υδραυλικών και ηλεκτρικών ενεργοποιητών.



Εικόνα 5 . Γωνία βήματος πτερυγίου (blade pitch angle) [9].

ΤΥΠΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

NACA 4415

Με βάση τη βιβλιογραφία ο τύπος της αεροτομής που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του πτερυγίου ανήκει στην οικογένεια προτύπων NACA. Τα αρχικά της έννοιας NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) σημαίνουν <<Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή για την Αεροναυπηγική>>, η οποία ιδρύθηκε το 1915 με σκοπό την έρευνα. Η NACA παρουσίασε σειρές αεροτομών που βρίσκουν εφαρμογές μέχρι σήμερα σε αεροσκάφη, ανεμογεννήτριες, ελικόπτερα, αντλίες νερού κ.α. Το σχήμα των αεροτομών αυτών περιγράφεται από ακολουθούμενα ψηφία μετά τη λέξη NACA, τα οποία εισάγονται σε συγκεκριμένες εξισώσεις και δίνουν με ακρίβεια τη γεωμετρία της αεροτομής.

Επειδή αποτελούν την οικογένεια των αεροτομών που έχουν μελετηθεί περισσότερο και η συμπεριφορά τους είναι η πλέον καταγεγραμμένη στη βιβλιογραφία, η επιλογή του προτύπου του πτερυγίου θα ανήκει σε αυτή την οικογένεια.

Πτερύγια

Πρακτικός υπολογισμός της μορφής του φτερού αεροκινητήρα

Ξεκινώντας την σχεδίαση της ανεμογεννήτριας τα πρώτα βήματα για την υλοποίηση της είναι να γνωρίζουμε :

- την ισχύ που θέλουμε να παράγει (1000 watt) ,
- ένα επιθυμητό λ_0 (λόγος ταχυτήτων = 7) ,
- την κλίση των φτερών (pitch control) ,
- τον αριθμό των φτερών,
- μια ταχύτητα άνεμου ίση με 8,3 (m/s) ,
- ένα συντελεστή ισχύς C_p εκτιμώμενο 0,4

Χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του προγράμματος Excel ‘Φτερό στον άνεμο’ του εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης [3] και σύμφωνα με την θεωρία του **Glauert** [2] θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω τύποι. Για τον αριθμητικό υπολογισμό το πτερύγιο χωρίζεται σε δέκα κομμάτια που καθορίζονται από τις παρακάτω ακτίνες r_i :

$$r_i = i \frac{R}{10} , \text{ όπου } i = 1,2...10$$

ο λόγος ταχυτήτων λ_i :

$$\lambda_i = \lambda_0 \frac{r_i}{R}$$

η γωνία θ_i :

$$\theta_i = \frac{1}{3} \tan^{-1} (\lambda_i) + \frac{\pi}{3}$$

το K_i :

$$K_i = \sqrt{\lambda_i^2 + 1} \cos\theta_i$$

το h :

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

το λ_{ε_i} :

$$\lambda_{\varepsilon_i} = \lambda_i \frac{1+h}{1+K}$$

Flow angle :

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{\varepsilon_i}} \right) \frac{180}{\pi}$$

πολλαπλασιάζουμε με $\frac{180}{\pi}$ για να μετατρέψουμε τα ακτίνια σε μοίρες

Γωνία βήματος (Angle of attack):

$$i = i(r) = 5 \sqrt{\frac{R}{r_i}}$$

$i = i_0 - 5 + \frac{5}{R}$, το i εκλέγεται από το διάγραμμα $C_L - C_D$ έτσι ώστε $\tan \varepsilon = \frac{C_D}{C_L}$ για την NACA4415 $i_0=5$

Γωνία σφήνωσης (Setting angle) :

$$a = I - i(r)$$

C_L :

$$C_L = 0.4 + \frac{0.9}{11} i \quad \text{αν } i < 11 \text{ ή } C_L = 1.3 \text{ αν } i > 11$$

Ο συντελεστής άνωσης C_L σε αυτό το σημείο είναι ο θεωρητικός που χρειάζεται ώστε να βρεθούν τα μήκη των χορδών. Στην σελίδα 15 παρακάτω υπολογίζεται το πραγματικό C_L (με μια πολυωνυμική σχέση) το οποίο εξάγεται από το διάγραμμα $C_L - i$ της NACA 4415.

Μήκος χορδής C :

$$C = \frac{r_i (1 - K) 8\pi}{C_L P \left(\lambda_{\varepsilon_i} \sqrt{\lambda_{\varepsilon_i}^2 + 1} \right) (1 + K)}$$

Από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, προκύπτει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (στο δρομέα) C_p , όπως είδαμε παραπάνω, και ο οποίος μέσω της συνολικής απόδοσης (η) των μηχανικών και ηλεκτρικών μερών της Α/Γ δίνει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου μίας Α/Γ:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 R^2 \pi C_p \eta$$

Όπου,

ο P , η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)

ο η , η συνολική απόδοση της γεννήτριας (ηλεκτρική και μηχανική)

ο ρ , η πυκνότητα του ανέμου (για το επίπεδο της θάλασσας (MSL) $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$)

ο R , η ακτίνα πτερυγίου της Α/Γ (m)

ο C_p , ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

ο V , η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Λύνοντας ως προς R θα έχουμε:

$$R = \sqrt{\frac{2 * P}{n * C_p * \pi * V^3}}$$

χρησιμοποιώντας τα επιθυμητά αποτελέσματα θα έχουμε τα εξής δεδομένα:

- υπόθεση: το φτερό έχει μηδενική αντίσταση $\frac{C_D}{C_L} = 0$
- C_p επιθυμητό βέλτιστο ίσο με 0,4
- ακτίνα φτερού $R=1609$ mm
- τον επιθυμητό αριθμό των φτερών $P=3$
- και τον επιθυμητό λόγο ταχυτήτων στα ακροπερύγια $\lambda_0 = 7$
από $\lambda_0 = \left(\frac{\omega R}{V}\right)$

Ταχύτητα εκκίνησης :

$$\sqrt{\frac{2 \text{ Cogging Torque}}{C_{m(0)} 0.6 \pi R^3}}$$

Όπου,

Cogging Torque : Ροπή εκκίνησης 0,336 (Ntm)

$C_{m(0)}$: το πρώτο C_m του θετικού λ_0 που θα βρεθεί στο παρακάτω Πίνακα 2

Υπολογισμός με το φτερό στον άνεμο [3] :

	i(r)		a		C (chord size)	
	r	i-flow angle	(angle of attack)	(setting angle)	CL	
1	0,161	36,672	15,811	20,861	1,300	0,178
2	0,322	23,692	11,180	12,511	1,300	0,146
3	0,483	16,976	9,129	7,847	1,147	0,124
4	0,644	13,103	7,906	5,197	1,047	0,104
5	0,805	10,630	7,071	3,559	0,979	0,089
6	0,966	8,928	6,455	2,473	0,928	0,077
7	1,126	7,690	5,976	1,714	0,889	0,067
8	1,287	6,750	5,590	1,160	0,857	0,060
9	1,448	6,013	5,270	0,742	0,831	0,054
10	1,609	5,420	5,000	0,420	0,809	0,049

Πίνακας 1 (φτερό στον άνεμο [3], γωνία πρόσπτωσης) αποστάσεις σε μέτρα (m), γωνίες σε μοίρες (C°), r: ακτίνα, C: μήκος χορδής

λ	θ	κ	h	λ_{ei}
0,700	1,251	0,384	1,655	1,343
1,400	1,364	0,353	1,203	2,279
2,100	1,423	0,343	1,095	3,276
2,800	1,456	0,339	1,055	4,296
3,500	1,478	0,337	1,036	5,328
4,200	1,493	0,336	1,025	6,365
4,900	1,504	0,335	1,018	7,406
5,600	1,512	0,335	1,014	8,449
6,300	1,518	0,335	1,011	9,494
7,000	1,523	0,334	1,009	10,539

Βοηθητικός πίνακας για την εύρεση του μήκους των χορδών από την θεωρία του Glauert [3].

ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΣ ΤΟΥΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΡΟΠΗΣ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

$$\lambda_0 - C_p - C_m - C_f$$

Υπολογίζοντας το c_f (αντίστασης πτερυγίου), c_m (ροπή), των λ_0 (λόγος ταχυτήτων) για τιμές του λ_{0-58} (από 0 έως 58) (στις γραμμές) σε πίνακα για κάθε τομέα χωριστά (δέκα συνολικά) με ακτίνα r_{1-10} (στις στήλες) όπου εξάγετε ο τελικός παρακάτω Πίνακας 2 και τα αντιστίχια διαγράμματα .

Ο συντελεστής ισχύος C_p είναι το γινόμενο των C_m και λ_0 για λ_{0-58} από την σχέση:

$$C_p = \lambda_0 * C_m$$

Για να υπολογιστούν τα $\lambda_0 - c_m - c_f$ όλου του πτερυγίου για κάθε λ_{0-58} χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

- Για λ_0 (λόγο ταχύτητας) :

Το πρώτο που υπολογίζεται είναι οι γωνία I (flow angle) και στην συνέχεια η γωνία προσβολής i (angle of attack) γνωρίζοντας την γωνία βήματος α (pitch) από τον Πίνακα 1.

$$\lambda_0 = r/R * [(\lambda_{01} + \lambda_{02})/2 + (\lambda_{02} + \lambda_{03})/2 + (\lambda_{03} + \lambda_{04})/2 + \dots + (\lambda_{08} + \lambda_{09})/2]$$

όπου ,

$$\lambda_{01-10} = ((R/r) * (1+k)) / ((1+h) * \tan(\pi * I / 180))$$

r ακτίνα τμήματος πτερυγίου

R ακτίνα πτερυγίου

όπου ,

$$k = (1-G) / (1+G)$$

όπου ,

$$G = A * \cos(\pi / 180 * (I - \epsilon)) / (2 * (\sin(\pi * I / 180))^2)$$

όπου ,

$$I = 180 / \pi * \text{ATAN}(R / (r * \lambda_0))$$

όπου ,

λ_0 το λ_{0-58} (από 0 έως 58)

$$\epsilon = 180 / \pi * \text{atan}((-6,5 * 10^{-6}) * i^3 + 0,0009 * i^2 - 0,0027 * i + 0,00239) / CL$$

όπου ,

$$i = I - \alpha$$

Ο συντελεστής άνωσης CL υπολογίζετε από πωλυωνυμικές σχέσεις οι οποίες εξήχθησαν από το διάγραμμα της αεροτομής της NACA:

Για $i < -65$

$$CL = 373 * 10^{-4} * i - 3.5224$$

Για $i < 30$

$$CL = 7 * 10^{-5} * i^3 - 4 * 10^{-4} * i^2 + 0.0962 * i + 0.242$$

Για $i > 30$

$$CL = 7 * 10^{-6} * i^3 - 18 * 10^{-4} * i^2 + 0.119 * i - 1.196$$

$$h = (1+E) / (1-E)$$

- Για C_m (ροπή):

$$C_m = 2 \cdot r/R \cdot [(mr_1+mr_2)/2 + (mr_2+mr_3)/2 + (mr_3+mr_4)/2 + \dots + (mr_8+mr_9)/2]$$

όπου ,

$$mr = ((1+k)^2) \cdot E \cdot (r/R)^2 / \tan(\pi \cdot I/180)$$

όπου,

$$E = A \cdot \sin(\pi \cdot (I-\varepsilon)/180) / (\sin(2 \cdot \pi \cdot I/180))$$

όπου,

$$A = CL^3 \cdot C / (4 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos(\pi \cdot \varepsilon/180))$$

- Για C_f (αντίσταση):

$$C_f = 2 \cdot r/R \cdot [(fr_1+fr_2)/2 + (fr_2+fr_3)/2 + (fr_3+fr_4)/2 + \dots + (fr_8+fr_9)/2]$$

όπου

$$fr = (1-k^2) \cdot r/R$$

Αποτελέσματα (για pitch = 0) :

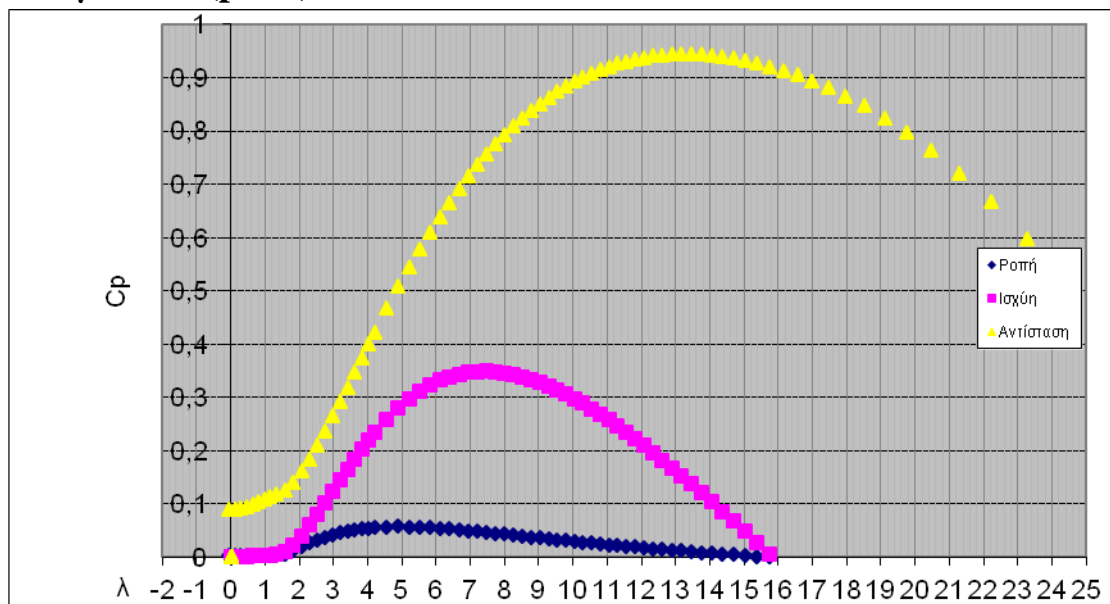
	λ_0	C_m	C_p	C_f
1	-0,05558	0,003495	-0,00019	0,089155
2	0,11708	0,003476	0,000407	0,089636
3	0,28951	0,00352	0,001019	0,091771
4	0,46159	0,00351	0,00162	0,0952
5	0,63323	0,003435	0,002175	0,099519
6	0,80438	0,003353	0,002697	0,104343
7	0,97502	0,003354	0,003271	0,109339
8	1,14515	0,003537	0,00405	0,114231
9	1,31481	0,003996	0,005254	0,1188
10	1,56806	0,006277	0,009842	0,126184
11	1,81701	0,012746	0,02316	0,140868
12	2,06139	0,019499	0,040194	0,160985
13	2,30080	0,02614	0,060143	0,184535
14	2,53571	0,031671	0,080308	0,210077
15	2,76399	0,037182	0,102771	0,237656
16	2,98806	0,041708	0,124626	0,26465
17	3,20524	0,045406	0,145537	0,293209
18	3,42271	0,04802	0,164359	0,319379
19	3,62549	0,050988	0,184857	0,347301
20	3,82669	0,052962	0,202668	0,374164
21	4,02616	0,054382	0,218949	0,399504
22	4,22614	0,055311	0,233751	0,423177
23	4,55516	0,056964	0,259479	0,467208
24	4,88045	0,057446	0,280363	0,507702
25	5,20124	0,05724	0,29772	0,544674
26	5,51736	0,05656	0,31206	0,578573
27	5,82982	0,055546	0,323821	0,609732
28	6,10920	0,054412	0,332413	0,63908
29	6,38756	0,053059	0,338919	0,666394
30	6,66358	0,051572	0,343655	0,69169
31	6,93704	0,049991	0,34679	0,715146
32	7,20782	0,048345	0,348464	0,736914
33	7,47592	0,046657	0,348802	0,757124
34	7,74137	0,044942	0,347912	0,77589
35	8,00428	0,043213	0,345891	0,79331
36	8,26480	0,04148	0,342823	0,80947
37	8,52313	0,039749	0,338787	0,824449
38	8,77946	0,038027	0,333853	0,838315

39	9,03407	0,036316	0,328082	0,851128
40	9,28720	0,034621	0,321533	0,862946
41	9,53916	0,032944	0,314256	0,873817
42	9,79027	0,031286	0,306297	0,883787
43	10,04085	0,029648	0,297696	0,892897
44	10,29126	0,028032	0,28849	0,901184
45	10,54189	0,026438	0,278708	0,90868
46	10,79313	0,024866	0,268379	0,915416
47	11,04542	0,023315	0,257521	0,921417
48	11,29920	0,021785	0,246153	0,926706
49	11,55498	0,020276	0,234284	0,931301
50	11,81327	0,018786	0,221922	0,935219
51	12,07465	0,017314	0,209066	0,938469
52	12,33972	0,01586	0,195709	0,94106
53	12,60915	0,014421	0,181839	0,942993
54	12,88369	0,012996	0,167435	0,944266
55	13,16411	0,011582	0,152469	0,944871
56	13,45133	0,010177	0,136899	0,944791
57	13,74632	0,008779	0,120676	0,944004
58	14,05018	0,007383	0,103734	0,942477
59	14,36416	0,005987	0,085992	0,940165
60	14,68966	0,004585	0,067348	0,93701
61	15,02829	0,003172	0,047675	0,932938
62	15,38187	0,001743	0,026817	0,927852
63	15,75255	0,00029	0,004575	0,921629
64	16,14278	-0,0012	-0,0193	0,914113
65	16,55549	-0,00273	-0,04512	0,9051
66	16,99413	-0,00431	-0,07328	0,894333
67	17,46282	-0,00597	-0,10431	0,881475
68	17,96657	-0,00773	-0,13888	0,866083
69	18,51151	-0,00961	-0,17789	0,847574
70	19,10522	-0,01165	-0,22255	0,825162
71	19,75726	-0,0139	-0,27456	0,797774
72	20,47984	-0,01642	-0,33627	0,763918
73	21,28885	-0,01931	-0,41112	0,721473
74	22,20539	-0,02271	-0,50421	0,667342
75	23,25822	-0,02681	-0,62347	0,596875

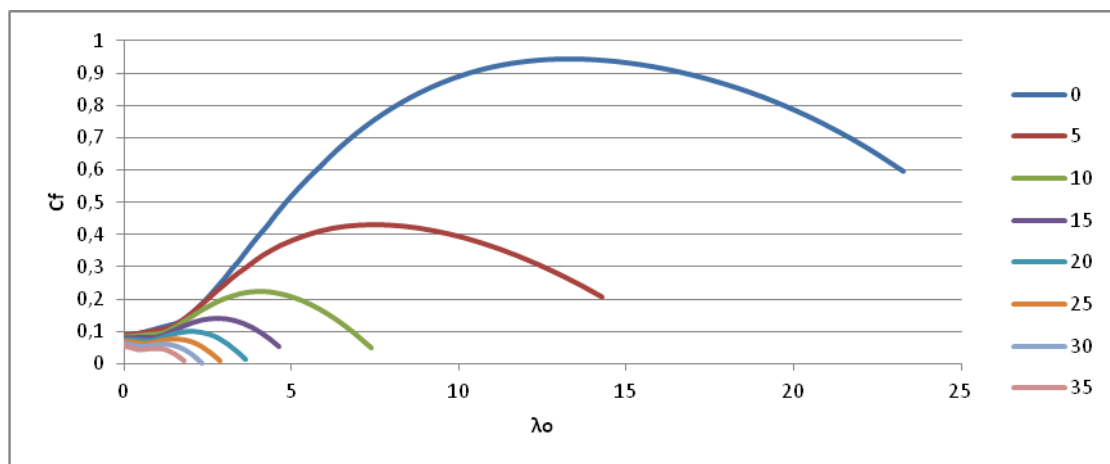
Πινάκας 2 (πτερό στον άνεμο[3], C_p - C_m - λ)

Ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται από τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου και αυτό φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα όπου η μέγιστη τιμή του C_p λαμβάνεται για συγκεκριμένη τιμή του λ , την βέλτιστη.

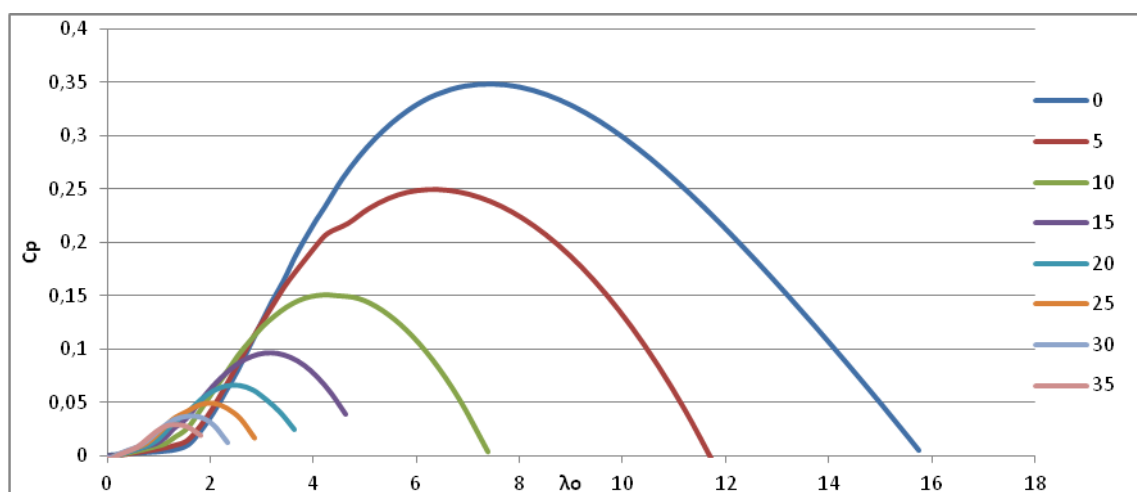
Για γωνία α (pitch) = 0



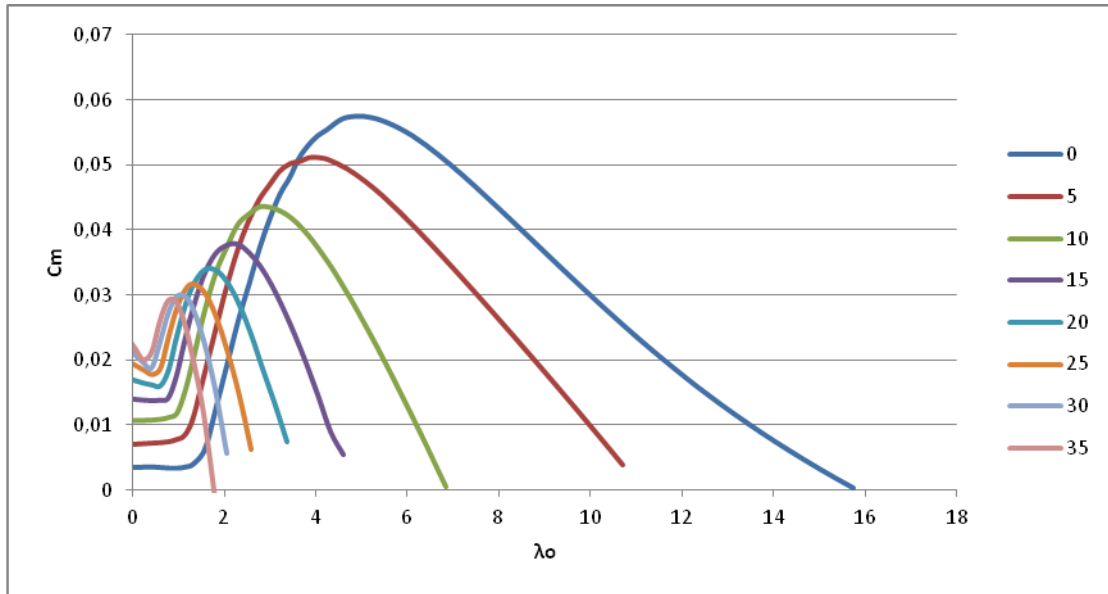
Διάγραμμα C_p - λ



Διάγραμμα C_f - λ για διάφορες γωνίες pitch



Διάγραμμα C_p - λ για διάφορες γωνίες pitch



Διάγραμμα $C_m - \lambda$ για διάφορες γωνίες pitch

Στο παρακάτω διάγραμμα διακρίνεται η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα του άνεμου. Τα αποτελέσματα διαμορφώθηκαν από δυο εξισώσεις που παράχθηκαν από την καμπύλη του συντελεστή ισχύος C_p σε σχέση με το λόγο ταχυτήτων λ και χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις, δημιουργούνται τρεις πίνακες για κάθε σχέση χωριστά.

$0,0044*\lambda(V-N) \ \& \ 0,0004*\lambda(V-N)^3 - 0,0163*\lambda(V-N)^2 + 0,1845*\lambda(V-N) - 0,2765$

$\lambda = \frac{2\pi NR}{60V}$	50	100	.....	800	V	50	100	.....	800
	N1	N2	.....			N1	N2	N3	
V	$\lambda-(V-N)1$	$\lambda-(V-N)2$	$\lambda-(V-N)3$	$\lambda-(V-N)4$	V	$C_p-(V-N)1$	$C_p-(V-N)2$	$C_p-(V-N)3$	$C_p-(V-N)4$
0,5	0	0	..	0	0,5	0,00	0,00	..	0,00
1	8	0	..	0	1	0,36	0,00	..	0,00
1,5	6	11	..	0	1,5	0,32	0,31	..	0,00
2	4	8	..	0	2	0,24	0,36	..	0,00
..
31.5	0	1	..	6	31.5	0,00	0,00	..	0,25

Αναλυτικοί πίνακες του λ και Πολυωνομική σχέση του $C_p(\lambda, \alpha)$

Τέλος η σχέση μηχανικής ισχύος της Α/Γ όπου εξάγονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

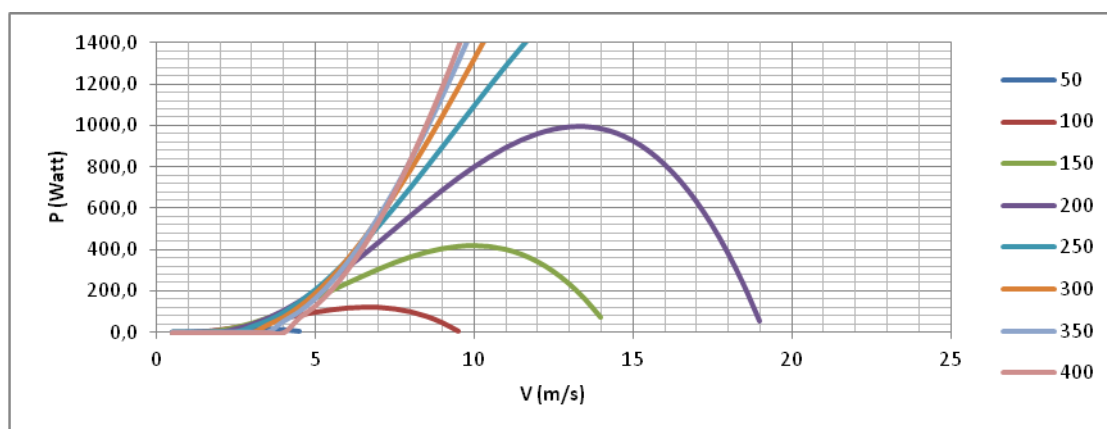
$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \alpha) V^3 n$$

Αποτελέσματα :

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
V	P(N1)	P(N2)	P(N3)	P-N4	P-N5	P-N6	P-N7	P-N8	P-N9
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	4,9	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	8,8	13,1	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,5	12,5	24,8	23,9	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	15,0	38,8	44,2	37,6	25,5	0,0	0,0	0,0	0,0
3,5	15,4	54,3	69,5	67,4	54,6	37,6	0,0	0,0	0,0
4	12,7	70,2	98,7	104,8	94,8	75,4	53,1	0,0	0,0
4,5	6,0	85,7	131,1	148,7	145,1	126,8	100,3	72,2	0,0
5	-5,7	99,7	165,5	198,3	204,6	190,9	163,8	129,8	0,0
5,5	-23,2	111,4	201,1	252,6	272,4	266,8	242,6	206,2	164,2
6	-47,6	119,7	237,0	310,7	347,4	353,6	335,8	300,6	254,5
6,5	7,1	123,9	272,1	371,6	428,8	450,2	442,4	411,9	365,2
7	8,3	122,8	305,6	434,4	515,6	555,8	561,5	539,2	495,5
7,5	9,5	115,6	336,5	498,1	606,8	669,3	692,1	681,6	644,4
8	10,8	101,3	363,8	561,8	701,6	789,9	833,3	838,1	811,0
8,5	12,2	79,1	386,7	624,5	799,0	916,7	984,1	1007,8	994,3
9	13,6	47,8	404,1	685,4	898,0	1048,6	1143,7	1189,7	1193,3
9,5	15,2	6,7	415,2	743,4	997,7	1184,7	1311,0	1383,0	1407,2
10	16,9	-45,3	419,0	797,6	1097,2	1324,2	1485,1	1586,5	1635,0

Πίνακας 3 (Ισχύς)

Θεωρητικά η μηχανική ισχύς της Α/Γ στις 400 στροφές το λεπτό με 8,5 m/s άνεμο θα αποδίδει περίπου 1000 watt.



Διάγραμμα ισχύος - ταχύτητας ανέμου σε διάφορες στροφές σε (rpm)

Υλικό κατασκευής πτερύγωσης

Τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από πολυαστέρα (fiberglass) , το οποίο είναι πολύ ελαφρύ και εύκαμπτο υλικό.

Το Fiberglass GFRP είναι ένας τύπος πλαστικού ενισχυμένου με ίνες, όπου η ίνα-οπλισμός είναι **ειδικές ίνες υάλου**. Το γυαλί μπορεί να διαταχθεί τυχαία, διασκορπισμένο σε ένα φύλλο από αυτές τις ίνες ή σε ένα ύφασμα.

Το πλαστικό πλέγμα είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πλαστικό , τις περισσότερες φορές εποξική, **πολυεστερική ρητίνη** - ή βινυλεστέρας, ή ένα θερμοπλαστικό.

- Αντοχή στις χημικές και περιβαλλοντικές προσβολές.
- Πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές.
- Ελάχιστη συντήρηση.
- Μεγάλη αντοχή σε σχέση με μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση.
- Ανθεκτικότητα στην παρατεταμένη υγρασία.

Επίσης, η εύκολη και γρήγορη διαδικασία χρήσης του υλικού καθώς και η μεταφορά και αποθήκευση του, το καθιστούν προτιμητέο έναντι πάρα πολλών άλλων πρώτων υλών. Με τις πολυεστερικές ρητίνες κατασκευάζουμε, ενισχύουμε και διαμορφώνουμε προϊόντα χωρίς να χρειαζόμαστε πολύπλοκα εργαλεία, ειδικούς χώρους ή εξειδικευμένο προσωπικό. Η εκμάθηση της χρήσης τους είναι απλή και ευχάριστη. Στην περίπτωση του καλουπιού που σχεδιαστικέ αρχικά θα περαστεί μια στρώση για τον χαλυβδούχο άξονα και έπειτα θα περαστούν και οι επόμενες στο κάθε μέρος του πριν αυτό ενωθεί και συσφιχτεί .

Χαρακτηριστικά του θιξοτροπικού πολυεστέρα

Table 1. Tensile properties of the polyester resin ($\pm 95\%$ confidence limits)

Tensile Parameters		
Stress at failure σ_f (MPa)	Modulus E (GPa)	Strain at failure ε_f (%)
63 \pm 2.0	1.0 \pm 0.40	4.7 \pm 0.20

Table 2. Flexural properties of the polyester resin ($\pm 95\%$ confidence limits)

Flexural Parameters		
Stress at failure σ_f (MPa)	Modulus E (GPa)	Strain at failure ε_f (%)
78 \pm 1.4	4.0 \pm 0.5	1.8 \pm 0.30

Table 3. Fracture properties of the polyester resin ($\pm 95\%$ confidence limits)

Fracture Toughness	Fracture Energy
K_{Ic} (MPa m ^{0.5})	G_{Ic} (J m ⁻²)
0.30	90

Πίνακας χαρακτηριστικών πολυεστέρα [10].

Table of some common fiberglass types

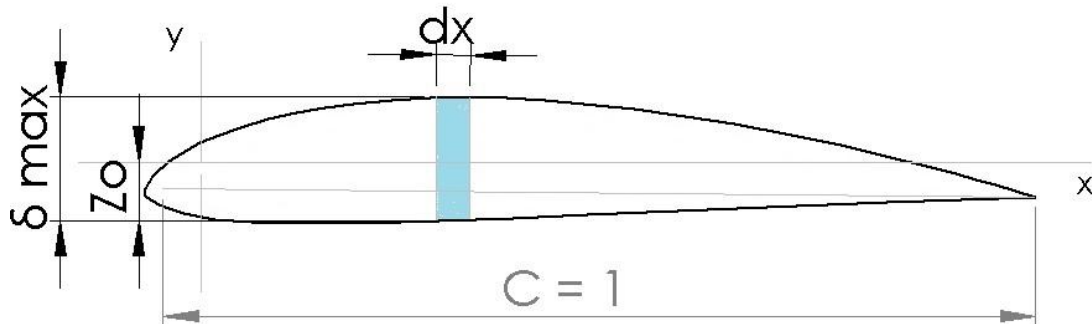
Material	Specific gravity	Tensile strength MPa (ksi)	Compressive strength MPa (ksi)
Polyester resin (Not reinforced) ^[12]	1.28	55 (7.98)	140 (20.3)
Polyester and Chopped Strand Mat Laminate 30% E-glass ^[12]	1.4	100 (14.5)	150 (21.8)
Polyester and Woven Rovings Laminate 45% E-glass^[12]	1.6	250 (36.3)	150 (21.8)
Polyester and Satin Weave Cloth Laminate 55% E-glass^[12]	1.7	300 (43.5)	250 (36.3)
Polyester and Continuous Rovings Laminate 70% E-glass ^[12]	1.9	800 (116)	350 (50.8)
E-Glass Epoxy composite ^[13]	1.99	1,770 (257)	
S-Glass Epoxy composite ^[13]	1.95	2,358 (342)	

Πίνακας διαφόρων τύπων πολυεστέρα απεικονίζοντας το yield strength [11].

Οι τιμές της επιτρεπόμενης τάσης που μετρήθηκαν στο εργαστήριο αντοχής των υλικών του ΤΕΙ Κρήτης είναι μεταξύ 170 και 210MPa. Επελέγη ένας συντελεστής ασφαλείας 1,7 για να αποτρέψουμε την επενέργεια σφαλμάτων από τον κατασκευαστή οφειλόμενων σε κακοτεχνία ή λανθασμένου θερμοκρασιακού περιβάλλοντος ή άλλη οφειλόμενη στα υλικά κατασκευής.

Μελέτη αντοχής & Υπολογισμός Ισοτασικού φτερού

Ένα περιστρεφόμενο πτερύγιο, με μια γωνιακή ταχύτητα λόγω της περιστροφής από τον άνεμο, καταπονείται σε διάτμηση, κάμψη και φυγόκεντρο δύναμη. Στις επόμενες παραγράφους και σύμφωνα με την θεωρία του καθ. Δ.Γ. Χρηστάκη [4] για τον σχεδιασμό του ισοτασικού φτερού, υπολογίζονται οι διαστάσεις και η όλη γεωμετρία του φτερού ώστε τα μέρη του να δέχονται την ίδια τάση σε όλο το μήκος του πτερυγίου.



$$dI' = \frac{(y_U - y_L)^3}{12} dx, \quad I' = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^n \delta_i^3 b_i$$

όπου,

dI' : ροπή αδράνειας τμήματος αεροτομής

I' : ροπή αδράνειας της αεροτομής. Προκύπτει από την ολοκλήρωση της σχέσης (dI')

Ο ουδέτερος άξονας της διατομής του φτερού (εκεί όπου οι τάσεις μηδενίζονται) περνά από το $Z_0 = z_0 / \delta_{max}$ του μέγιστου πάχους δ_{max} . Υπολογίστηκε αριθμητικά [4] ότι:

$$Z_0 = 0,567684 \text{ για την αδιάστατη NACA 4415 .}$$

θεώρημα : $I'_{yy} = \left(\frac{yy}{xx} \right)^3 I'_{xx}$

όπου: xx : το % μέγιστο πάχος της αεροτομής NACA44XX

και yy : το % μέγιστο πάχος της αεροτομής NACA44YY

Έστω $\alpha = \frac{yy}{xx}$,

όπου,

$$xx \text{ μέγιστο σχετικό πάχος } xx = \frac{\delta_{max}}{c},$$

$$xx = 0.15 (15\%), \quad I'_{15} = 1.3208475 \cdot 10^{-4} m^4$$

όπου,

I'_{15} : ροπή αδράνειας της αδιάστατης αεροτομής NACA4415

$$W'_{yy} = \frac{I'_{yy}}{z_0} = \frac{I'_{yy}}{0,567684 * \delta'_{yy \max}} \quad \text{και} \quad W'_{15} = \frac{I'_{15}}{z} = \frac{1,3208 * 10^{-4}}{0,567684 * 0,15} = 1,5511 \cdot 10^{-3}$$

όπου,

W'_{15} : ροπή αντίστασης της αεροτομής NACA4415

$$A'_{15} = 2,2880435 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Αδιάστατο Εμβαδόν της NACA4415})$$

$$W'_{yy} = \frac{I'_{yy}}{z_0},$$

$$W'_{yy} = \frac{I'_{15} * \alpha^3}{0,567684 * \alpha * \delta'_{xx}} = \frac{I'_{xx} * \alpha^2}{0,567684 * \delta'_{xx}} = \alpha^2 * W'_{xx} = W'_{yy}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} \Rightarrow W = \frac{M}{\sigma}$$

$$I_{yy} = I'_{xx} C^4 \alpha^3$$

$$W_{yy} = \frac{I_{yy}}{z} = \frac{I'_{xx} * C^4}{0,567684 * yy * C} = \frac{I'_{xx} * C^4 * \alpha^3}{0,567684 * yy * C} = \frac{yy^3 * I'_{xx} * C^4}{0,567684 * yy * C * xx^3} = \frac{I'_{xx} * yy^2 * C^3}{0,567684 * xx^3}$$

$$(\delta = yy * C)$$

$$= W_{yy} = \frac{M}{W} \Rightarrow \frac{I'_{xx} * yy^2 * C^3}{0,567684 * xx^3} = \frac{M}{\sigma * C} \Rightarrow \delta = \sqrt{\frac{M * 0,567684 * xx^3}{I'_{xx} * \sigma * C}}$$

$$\text{Το πάχος του πτερυγίου είναι : } \delta = A_{\delta} * \sqrt{\frac{M}{\sigma * C}} \quad , \text{ όπου } A_{\delta} = \sqrt{\frac{0,567684 * xx^3}{I'_{xx}}}$$

Περίληπτικά Μετά την επιλογή του τύπου της αεροτομής (μέση γραμμή και ονομαστική κατανομή πάχους, στην περίπτωση μας NACA44xx επιλέγουμε ένα τυπικό πάχος (15%) για να χρησιμοποιήσουμε ενδεικτικές σχέσεις των συντελεστών άνωσης και αντίστασης στον αεροδυναμικό υπολογισμό και να είναι συμβατά τα αεροδυναμικά φορτία με την κατανομή των τάσεων. Με αυτή την ονομαστική τιμή του πάχους γίνεται η διόρθωση των παχών των αεροτομών σε όλο το εκπέτασμα του φτερού. Με την κατανομή του μέγιστου πάχους επιδιώκεται, σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία [4] η ισοκατανομή των μέγιστων σε κάθε αεροτομή, τάσεων. Η κατανομή των τάσεων στην αεροτομή είναι συνάρτηση της κατανομής του υλικού μέσα στην αεροτομή. Για να γίνει πλήρως ισοτασικό το φτερό πρέπει να διαμορφωθεί η αεροτομή με την ίδια λογική της κατανομής του πάχους της στο εκπέτασμα. Έτσι, για πλήρως ισοτασικό φτερό χρειάζεται μια τρισδιάστατη κατανομή του υλικού, στο εκπέτασμα, στη χορδή και στο πάχος της χορδής. Στην εργασία αυτή υποθέτομε, σε πρώτη προσέγγιση μόνο την κατανομή στο εκπέτασμα και ο υπολογισμός μας είναι μονοδιάστατος. Με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων επαληθεύομε τον παραπάνω αναλυτικό υπολογισμό. Στην εργασία αυτή ο υπολογισμός που έγινε (τα

αποτελέσματα του φαίνονται στον πίνακα Πίνακα 4) συμφωνεί με τα αποτελέσματα των υπολογισμών του Solid Works που φαίνονται στον Σχέδιο 27

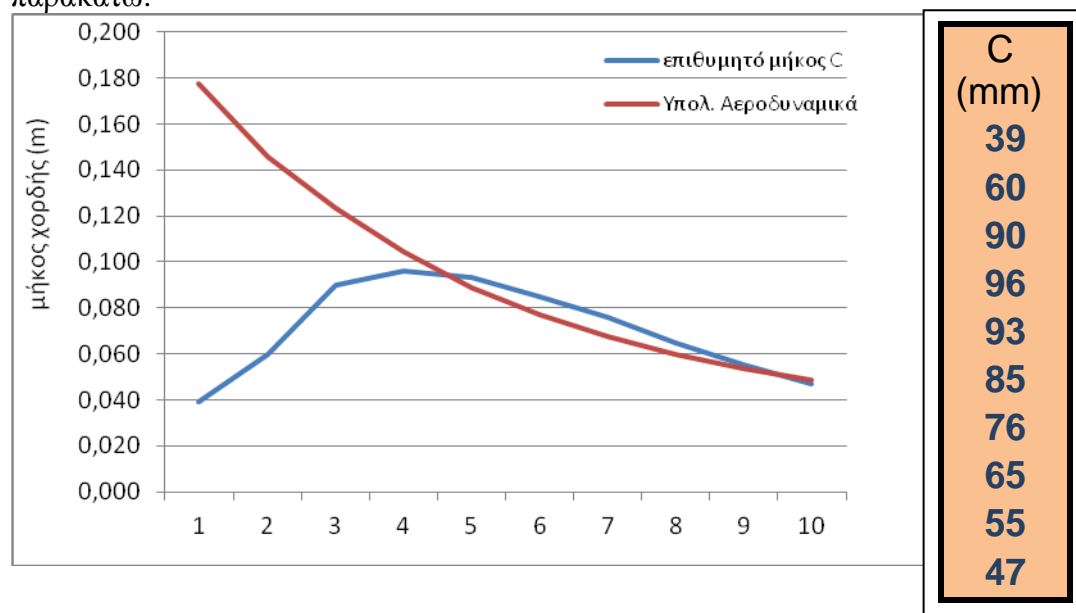
ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Η Αεροδυναμική αποτελεί κλάδο της Μηχανικής των ρευστών με αντικείμενο την έρευνα και μελέτη των νόμων που διέπουν τη ροή του αέρα. Σκοπός σε αυτό το σημείο είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων που ασκούνται έτσι ώστε να είναι πιο άμεση η κίνησή τους, όπως και να επιτυγχάνεται η καλύτερη σχεδίαση και βελτιστοποίηση των μεγεθών προς τον επιδιωκόμενο σκοπό. Η δε βελτιστοποίηση αυτή μπορεί να σχετίζεται είτε με την επίτευξη μείωσης της αντίστασης στη κίνηση του σώματος, είτε με την επίτευξη μέγιστης άωσης με ελάχιστη οπισθέλκουσα δύναμη.

Υπολογίζοντας το (C) πάχος των χορδών στην τελευταία στήλη του Πίνακα 1, είναι αυτό που θα δώσει την μέγιστη αεροδυναμική στο φτερό. Στην προκειμένη περίπτωση δεν μας ενδιαφέρει να πετυχαίνει μεγάλες ταχύτητες, αρκεί το πτερύγιο να ξεκινά την περιστροφή με μικρό άνεμο και να αποδίδει ισχύ με χαμηλές ταχύτητες.

Όπως φαίνεται και παρακάτω στην γραφική παράσταση, μας ενδιαφέρουν οι τιμές των χορδών των τμημάτων πέντε ως δέκα γιατί τα πάχη αυτά θα αποτρέψουν την δημιουργία θορύβων κατά την περιστροφή των πτερυγίων.

Συνεπώς στην γραφική παράσταση και την κόκκινη γραμμή θα απεικονίζονται τα αποτελέσματα σε πλάτος χορδής κάθε τομέα χωριστά ενώ στην μπλε γραμμή τα υπολογιζόμενα πάχη των χορδών, τα οποία εξάγονται μέσω του Πίνακα 4 παρακάτω:



Διάγραμμα, μήκους χορδής κάθε καμπύλης και τα υπολογιζόμενα μήκη των χορδών στον δεξιό πίνακα

Όσο τα ηλεκτρολογικά μέρη της Α/Γ (μαγνήτες, ηλεκτρικές απολήξεις, αρ. πηνίων, τυλίγματα και η ποιότητα των μηχανικών μερών όπως ρουλεμάν, υλικά, αρθρώσεις, η ακρίβεια στην κατασκευή και στην απόσταση των μαγνητών στο ρότορα, αριθμό κοχλιών), έτσι και τα πτερύγια συμβάλλουν στην επίτευξη του επιθυμητού μας στόχου, δηλαδή την κατασκευή ενός ελαφρού και πολύ λεπτού πτερυγίου έτσι ώστε να λειτουργήσει σε χαμηλές ταχύτητες αέρα. Γίνεται κατανοητό πως είναι σημαντικό τα πτερύγια να κατασκευάζονται με υψηλή ακρίβεια με στόχο την αποφυγή θορύβου, την μέγιστη ροπή σε μικρές ταχύτητες ανέμου και υψηλές αποδόσεις σε ισχύ.

Υπολογισμός δυνάμεων στο excel

Ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται πάνω στο φτερό έγινε με τη χρήση δυο πακέτων λογισμικού, το φτερό στον άνεμο [3] και το λογισμικό υπολογισμού της γεωμετρίας του ισοτασικού φτερού[4].

Οι δυνάμεις που δέχονται τα πτερύγια είναι λόγω του ανέμου (όπου έχουμε την επισθέλκουσα και την δύναμη άνωσης) και λόγω της φυγοκέντρου.

Με τα μήκη των χορδών που υπολογιστήκαν νωρίτερα [3] και με την βοήθεια του λογισμικού [4] χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω τύποι. Επιδιώκουμε το πτερύγιο να αντέχει σε ακραία καιρικά φαινόμενα γι' αυτό οφείλουμε να ανεβάσουμε τους συντελεστές ασφαλείας έτσι ώστε οι τιμές στην γωνιακή ταχύτητα και την ταχύτητα του ανέμου που θα χρησιμοποιηθούν ως ονομαστικές, να είναι 52 rad/s και 35 m/s αντίστοιχα.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση για τον πολυεστέρα που θα χρησιμοποιηθεί είναι στα 95 MPa, πολύ πιο κάτω από την επιτρεπόμενη τάση του πολυεστέρα (150 MPa) για λόγους ασφαλείας.

Για να επιτευχθεί ο συντελεστής ασφαλείας πάνω από την μονάδα (sf) χρησιμοποιείται ένας συντελεστής (Σασφ.) στον υπολογισμό του πάχους της χορδής (δ), γνωρίζοντας ότι εκτός από την καμπτική δύναμη υπάρχει και η διάτμηση και η φυγόκεντρος καταπόνηση, οι οποίες σε σχέση με την κάμψη είναι πολύ μικρές και στην προκείμενη περίπτωση αγγίζουν το ποσοστό του 18%.

		115= 0,00013 <small>1,3e-04</small>		$\omega(\text{RPM})= 500,00$				T/3(Nt)= 631,40				Σασφ. 1,09											
		Aδ= 3,80859		Mb= 230		$\omega(r/s)= 52,36$		V(m/s)= 35,00		T/3(Nt)= 210,47		R(m)= 1,64		διατμηση-καμψη-φυγοκεντρος									
		$\sigma_{\text{καμψη}}= 95$ Mpa		a= 0,6		T/3(Nt)= 210,47		D/55(Nt) 3,83		AM= 156,50		CT= 0,10		$\sigma_{\text{επ}}= 95$ Mpa		φυγοκεντρος διατμηση							
πάχος	Πάχος	C°	section	δ	Z	δ%	A	I	r	r	ΔV	Δm	Δθ1=Δm	ΔT	T	σm	M	ΔC =	C=	σc=	στ=	σολ=	sf=
s/c	mm			(mm)	(mm)		(cm2)	mm4	(m)	(cm)	(Cm3)	(kg)	kg.m	Nt	Nt	(Mpa)	N.m	Nt	Nt	Mpa	Mpa	Mpa	σεπ/σολ
0,6	10,2	36,0	0	34,1	19,3	94,6	5,331	48421,1	0,00	0,0	80,0	0,144	0,011	0,0		91,9	230,1	29,6	2121,8	4,0	0,0	92,0	1,033
0,6	9,1	39,0	1	30,4	17,3	77,9	5,156	37308,8	0,15	15,0	51,6	0,093	0,019	3,8	252,6	91,9	198,6	50,9	2092,2	4,1	0,5	92,0	1,033
0,6	7,0	60,0	2	23,2	13,2	38,7	6,052	25496,1	0,25	25,0	60,5	0,109	0,033	7,7	248,7	91,9	177,9	89,6	2041,3	3,4	0,4	91,9	1,033
0,6	5,3	90,0	3	17,8	10,1	19,8	6,976	17352,1	0,35	35,0	69,8	0,126	0,050	11,5	241,1	91,9	157,6	137,7	1951,7	2,8	0,3	91,9	1,034
0,6	4,8	96,0	4	16,1	9,2	16,8	6,737	13737,6	0,45	45,0	107,8	0,194	0,103	15,3	229,6	91,9	137,8	281,9	1814,1	2,7	0,3	91,9	1,034
0,6	4,3	93,0	5	14,5	8,2	15,6	5,861	9639,1	0,61	61,0	93,8	0,169	0,116	19,1	214,3	91,9	107,6	319,3	1532,1	2,6	0,4	91,9	1,034
0,6	3,9	85,0	6	13,1	7,4	15,4	4,829	6454,7	0,77	77,0	77,3	0,139	0,118	23,0	195,2	91,9	80,0	324,1	1212,8	2,5	0,4	91,9	1,034
0,6	3,4	76,0	7	11,5	6,5	15,1	3,799	3932,2	0,93	93,0	60,8	0,109	0,111	26,8	172,2	91,9	55,4	303,0	888,7	2,3	0,5	91,9	1,034
0,6	2,9	65,0	8	9,8	5,6	15,1	2,773	2090,2	1,09	109,0	44,4	0,080	0,093	30,6	145,4	91,9	34,5	256,2	585,7	2,1	0,5	91,9	1,034
0,6	2,3	55,0	9	7,7	4,4	14,0	1,842	855,1	1,25	125,0	29,5	0,053	0,071	34,4	114,8	91,9	18,0	193,4	329,6	1,8	0,6	91,9	1,034
0,8	2,0	47,0	10	5,0	2,8	10,6	1,022	199,9	1,41	141,0	16,3	0,029	0,044	38,3	80,4	91,9	6,5	120,2	136,2	1,3	0,8	91,9	1,034
1,0	0,8	39,0	11	1,7	1,0	4,4	0,288	6,5	1,57	157,0	2,0	0,004	0,006	42,1	42,1	91,9	0,6	16,0	16,0	0,6	1,5	91,9	1,034
									1,64	164	693,62	Θ1(kg.m)		252,56									
									Σύνολο: 0,69		1,249	0,763	kg.m										

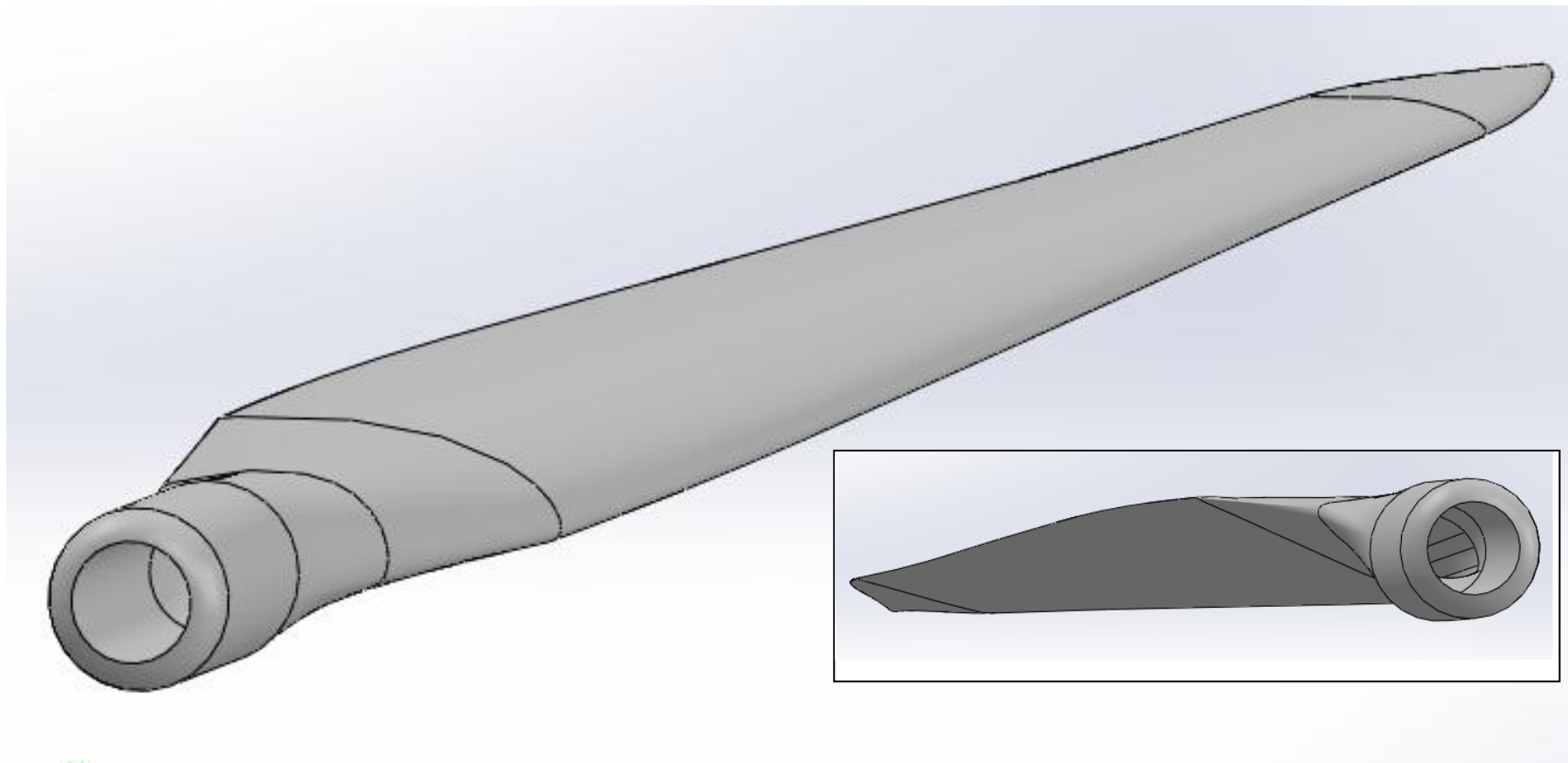
Πίνακας 4 (Φιλήρις, υπολογισμός τάσεων)
 Οι καμπύλες 0,1,11 αεροδυναμικά ,στο σχεδιαστικό πρόγραμμα δεν θα συμπεριληφθούν [4].

Αρ. Στήλης	Σχέση	Επεξήγηση
1η	(s/c)	Επιθυμητό πάχος κελύφους αεροτομής
2η	$\frac{(s/c) \delta}{2}$	πάχος εσωτερικής καμπύλης
3η	Υπολογίστηκε στον Πινάκα 1 και τροποποιήθηκε με βάση του παραπάνω διαγράμματος	μήκος χορδής
4η		θέση αεροτομής
5η	$A_{\delta} \Sigma_{ασφ} \sqrt{\frac{1000 M}{C \sigma_{κάμψης}}}$	πάχος εξωτερικής καμπύλης
6η	$0,567684 \delta$ (Υστερα από υπολογισμούς) [1]*	μήκος Z κεντρικού άξονα
7η	$(\delta/c) 100$	πάχους (επί της εκατό) κάθε καμπύλης
8η	$\frac{(1 - \alpha^2) \left(\frac{\sum_{i=1}^y (x_{i+1} - x_i) \delta_{15\% i}}{0,15} \right) C \delta}{100}$ Όπου, $\delta_{15\%} = Y_{upper} - Y_{lower}$	Επιφάνεια τμήματος
9η	$(1 - \alpha^4) C^4 \delta \left(\frac{\delta\%}{15} \right)^3$	αδράνεια τμήματος επιφάνειας
10η & 11η		απόσταση κάθε καμπύλης από την αρχή των αξόνων σε m & cm (άξονας z)
12η	$(r_2 - r_1) A_1 100$	όγκος τομέα
13η	$\frac{\Delta V 1,8}{1000}$	μάζα τομέα
14η	$\frac{(r_1 + r_2) \Delta m}{2}$	ροπή αδράνειας περυγίου
15η	$\frac{D}{55} * section$ Όπου,	Δύναμη λόγο κάμψης τομέα

	$D = \frac{T}{3} = \frac{\frac{1}{2} \rho C T V^2 \pi R^2}{3}$	
16η	$\sum_{11-i} \Delta c_{11} + \Delta c_i$	δύναμη λόγο κάμψης
17η	$1000 M \delta \frac{0,567684}{l}$	τάση κάμψης
18η	$\frac{AM \frac{R^3 - 3 R^2 \frac{r}{2} + r^3}{2}}{3}$	ροπή λόγο κάμψης
19η	$\frac{(r_2 - r_1) \Delta m \omega^2}{2}$	δύναμη λόγο φυγόκεντρου τμήματος
20η	$\sum_{11-i} \Delta c_{11} + \Delta c_i$	δύναμη λόγο φυγόκεντρης δύναμης
21η	$\frac{C_{\text{στήλης 20}}}{100 A}$	ροπή λόγο φυγόκεντρης δύναμης
22η	$\frac{T}{100 A}$	ροπή λόγο διάτμησης
23η	$\sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_C^2 + 3 \sigma_T^2}$	ολική τάση
24η	$\frac{\sigma_{\varepsilon\pi}}{\sigma_{\text{ολ}}}$	συντέλεσης ασφάλειας

Σχεδιασμός Πτερυγίου

Αεροτομή NACA 4415



Σχέδιο 1 Χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη της NACA 4415 και τα παρακάτω σημεία ελήφθησαν από το επίσημο site .

X	NACA 4415	
	Yupper	Ylower
1,00	0,00	0,00
0,99	0,00	0,00
0,98	0,01	0,00
0,97	0,01	0,00
0,96	0,01	0,00
0,95	0,02	0,00
0,93	0,02	0,00
0,92	0,03	-0,01
0,89668	0,03171	-0,00583
0,87592	0,03717	-0,00674
0,85355	0,04283	-0,00775
0,82967	0,04863	-0,00886
0,80438	0,05453	-0,01006
0,77779	0,06048	-0,01136
0,75	0,06642	-0,01277
0,72114	0,07227	-0,0143
0,69134	0,07795	-0,01596
0,66072	0,08341	-0,01772
0,62941	0,08858	-0,01958
0,59755	0,09341	-0,02149
0,56526	0,09785	-0,0234
0,5327	0,10185	-0,02529

0,5	0,10538	-0,02713
0,4673	0,10837	-0,02891
0,43474	0,11076	-0,03063
0,40245	0,11248	-0,03229
0,37059	0,11345	-0,0339
0,33928	0,11361	-0,03547
0,30866	0,11294	-0,037
0,27886	0,11141	-0,03845
0,25	0,10903	-0,03974
0,22221	0,10584	-0,04078
0,19562	0,1019	-0,04147
0,17033	0,09726	-0,04177
0,14645	0,09195	-0,04166
0,12408	0,08607	-0,04106
0,10332	0,0797	-0,03991
0,08427	0,07283	-0,03817
0,06699	0,06541	-0,03582
0,05156	0,05753	-0,03281
0,03806	0,04937	-0,02915
0,02653	0,04118	-0,02502
0,01704	0,03303	-0,02061
0,00961	0,02489	-0,0159
0,00428	0,01654	-0,01102
0,00107	0,00825	-0,00566

Με την βοήθεια του excel χρησιμοποιώντας τα παραπάνω x , y υπολογίζονται τα αναλόγως επιθυμητά σε σχέση με το μήκος και το πάχος της χορδής.

Συγκεκριμένα ,για κάθε έναν τομέα υπολογίζονται τα x πολλαπλασιάζοντας το μήκος της χορδής (C) με τα x που μου δίνει η NACA .

Για τα y upper πολλαπλασιάζω το μήκος της χορδής με τα y upper της NACA και με το πάχος της (επί %) που υπολογίστηκε από τον Πινάκα 4 , διαιρώντας με το 15% όπου είναι ο άξονας x της καμπύλης.

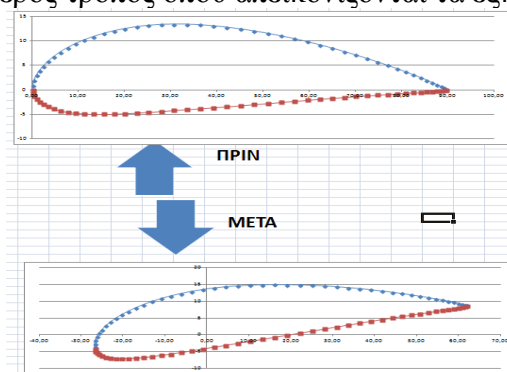
Για τα y lower πολλαπλασιάζονται τα μήκη της χορδής με τα y lower της NACA και με το πάχος της (επί %) που υπολογίστηκε από τον Πινάκα 4 , διαιρώντας με το 15% όπου είναι ο άξονας x της καμπύλης.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα χρησιμοποιήσα τους τομείς 2 έως 10 στην παρακάτω διαδικασία στον κάθε έναν χωριστά ενώ ακολουθεί μόνο ο υπολογισμός του τμήματος 3:

section 3		
c=	90,0	mm
δ%	19,8	%
X	Yupper	Ylower
89,61	0,185328	-0,0499
89,14	0,414612	-0,1093
88,47	0,72468	-0,18533
87,61	1,107216	-0,26968
86,57	1,547964	-0,35284
85,36	2,038608	-0,43243
83,97	2,573208	-0,51203
82,42	3,150576	-0,59638
80,70	3,767148	-0,6926
78,83	4,415796	-0,80071
76,82	5,088204	-0,9207
74,67	5,777244	-1,05257
72,39	6,478164	-1,19513
70,00	7,185024	-1,34957
67,50	7,890696	-1,51708
64,90	8,585676	-1,69884
62,22	9,26046	-1,89605
59,46	9,909108	-2,10514
56,65	10,5233	-2,3261
53,78	11,09711	-2,55301
50,87	11,62458	-2,77992
47,94	12,09978	-3,00445

45,00	12,51914	-3,22304
42,06	12,87436	-3,43451
39,13	13,15829	-3,63884
36,22	13,36262	-3,83605
33,35	13,47786	-4,02732
30,54	13,49687	-4,21384
27,78	13,41727	-4,3956
25,10	13,23551	-4,56786
22,50	12,95276	-4,72111
20,00	12,57379	-4,84466
17,61	12,10572	-4,92664
15,33	11,55449	-4,96228
13,18	10,92366	-4,94921
11,17	10,22512	-4,87793
9,30	9,46836	-4,74131
7,58	8,652204	-4,5346
6,03	7,770708	-4,25542
4,64	6,834564	-3,89783
3,43	5,865156	-3,46302
2,39	4,892184	-2,97238
1,53	3,923964	-2,44847
0,86	2,956932	-1,88892
0,39	1,964952	-1,30918
0,10	0,9801	-0,67241
0,00	0,0891	0

Τώρα έχοντας τα σημεία της κάθε καμπύλης που χρειαζόμαστε, και περνώντας στο επόμενο στάδιο που είναι η σχεδίαση (Solid Works) υπάρχουν δυο επιλογές, α) να επεξεργαστούν από το σχεδιαστικό πρόγραμμα οι γωνίες και τα κέντρα κάθε καμπύλης και β) να υπολογιστούν από το excel με μερικές πράξεις ώστε να είναι έτοιμες στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος τρόπος όπου απεικονίζονται τα εξής:



Σχέδιο2, Γραφικό αποτέλεσμα βρίσκοντας τα κέντρα και την γωνία (α) προσβολής της καμπύλης.

X, Y Upper:

κλίση αεροτομής α = 7,85						
X	Yupper	r	φ4	φ2==φ+α	X'	Yupper'
62,61	0,185328	62,61507	0,00296	0,139913	62,00	8,732123
62,14	0,414612	62,13648	0,006673	0,143626	61,50	8,893769
61,47	0,72468	61,47067	0,011789	0,148743	60,79	9,109639
60,61	1,107216	60,62241	0,018265	0,155219	59,89	9,371986
59,57	1,547964	59,59471	0,025978	0,162931	58,81	9,666935
58,36	2,038608	58,3952	0,034918	0,171871	57,53	9,987106
56,97	2,573208	57,02898	0,045136	0,18209	56,09	10,32711
55,42	3,150576	55,50519	0,056792	0,193746	54,47	10,68674
53,70	3,767148	53,83317	0,070035	0,206989	52,68	11,06347
51,83	4,415796	52,02056	0,084988	0,221941	50,74	11,45096
49,82	5,088204	50,07866	0,10178	0,238733	48,66	11,8422
47,67	5,777244	48,0191	0,120604	0,257557	46,44	12,23137
45,39	6,478164	45,85412	0,141752	0,278705	44,08	12,61498
43,00	7,185024	43,59724	0,16556	0,302513	41,62	12,9885
40,50	7,890696	41,26152	0,192421	0,329375	39,04	13,3461
37,90	8,585676	38,86285	0,22276	0,359714	36,38	13,67996
35,22	9,26046	36,41767	0,257108	0,394062	33,63	13,98227
32,46	9,909108	33,94339	0,296245	0,433198	30,81	14,2486
29,65	10,5233	31,45916	0,341082	0,478035	27,93	14,47233
26,78	11,09711	28,98771	0,392848	0,529802	25,01	14,64929
23,87	11,62458	26,55316	0,453134	0,590087	22,06	14,77507
20,94	12,09978	24,18706	0,523897	0,660851	19,09	14,84574
18,00	12,51914	21,92553	0,607705	0,744658	16,12	14,85938
15,06	12,87436	19,81066	0,707413	0,844367	13,16	14,80948
12,13	13,15829	17,89399	0,826178	0,963132	10,22	14,69067
9,22	13,36262	16,23507	0,966799	1,103752	7,31	14,49634
6,35	13,47786	14,90015	1,130311	1,267265	4,45	14,21902
3,54	13,49687	13,95217	1,314624	1,451577	1,66	13,85314
0,78	13,41727	13,43989	1,512772	1,649726	-1,06	13,39805
-1,90	13,23551	13,37156	-1,42802	-1,29107	-3,69	12,85182
-4,50	12,95276	13,71219	-1,23643	-1,09947	-6,23	12,21712
-7,00	12,57379	14,39151	-1,06275	-0,92579	-8,65	11,50023
-9,39	12,10572	15,32317	-0,91085	-0,7739	-10,96	10,70982
-11,67	11,55449	16,42261	-0,78041	-0,64346	-13,14	9,853002
-13,82	10,92366	17,61547	-0,66889	-0,53194	-15,18	8,934659
-15,83	10,22512	18,84756	-0,57343	-0,43648	-17,08	7,967789
-17,70	9,46836	20,07442	-0,49118	-0,35422	-18,83	6,963034
-19,42	8,652204	21,25629	-0,41921	-0,28226	-20,42	5,920447
-20,97	7,770708	22,36431	-0,35486	-0,21791	-21,84	4,83488
-22,36	6,834564	23,38082	-0,29665	-0,15969	-23,08	3,717908
-23,57	5,865156	24,29325	-0,24384	-0,10689	-24,15	2,591699
-24,61	4,892184	25,0938	-0,19621	-0,05926	-25,05	1,486164
-25,47	3,923964	25,76694	-0,15288	-0,01593	-25,76	0,410403
-26,14	2,956932	26,30184	-0,11266	0,024292	-26,29	-0,63887
-26,61	1,964952	26,68724	-0,0737	0,063258	-26,63	-1,68705
-26,90	0,9801	26,92155	-0,03641	0,10054	-26,79	-2,70212
-27,00	0,0891	27,00015	-0,0033	0,133653	-26,76	-3,59793

Y Lower :

r	φ4	φ2==φ+α	X'	Ylower
62,61482	-0,0008	0,136157	62,04	8,499102
62,1352	-0,00176	0,135194	61,57	8,374767
61,46668	-0,00302	0,133938	60,92	8,208152
60,6129	-0,00445	0,132504	60,08	8,007987
59,57564	-0,00592	0,131031	59,06	7,783933
58,3612	-0,00741	0,129544	57,87	7,539203
56,9732	-0,00899	0,127966	56,51	7,270759
55,41891	-0,01076	0,126192	54,98	6,974876
53,70567	-0,0129	0,124057	53,29	6,645476
51,83898	-0,01545	0,121507	51,46	6,283296
49,82801	-0,01848	0,118475	49,48	5,889564
47,68192	-0,02208	0,114877	47,37	5,46551
45,40993	-0,02632	0,110632	45,13	5,013538
43,02227	-0,03137	0,105579	42,78	4,533825
40,5284	-0,03744	0,099512	40,33	4,026421
37,94065	-0,04479	0,092162	37,78	3,491747
35,2716	-0,05378	0,083172	35,15	2,930223
32,53298	-0,06475	0,0722	32,45	2,346856
29,73801	-0,0783	0,058654	29,69	1,743241
26,90092	-0,09505	0,041906	26,88	1,126984
24,03471	-0,11592	0,021031	24,03	0,505443
21,15741	-0,14249	-0,00553	21,16	-0,11706
18,28628	-0,17718	-0,04023	18,27	-0,7354
15,44374	-0,22426	-0,08731	15,38	-1,34668
12,66079	-0,29152	-0,15457	12,51	-1,94918
9,986637	-0,39425	-0,2573	9,66	-2,5413
7,522047	-0,56498	-0,42803	6,84	-3,12225
5,500368	-0,87275	-0,7358	4,08	-3,69173
4,464164	-1,39531	-1,25835	1,37	-4,24803
4,948255	1,176131	1,313085	-1,26	-4,78484
6,522185	0,809372	0,946326	-3,81	-5,29127
8,513881	0,605327	0,742281	-6,27	-5,75513
10,60767	0,483003	0,619956	-8,63	-6,16306
12,68149	0,402045	0,538998	-10,88	-6,50911
14,67901	0,343901	0,480855	-13,01	-6,78958
16,56719	0,298862	0,435816	-15,02	-6,99384
18,32519	0,261709	0,398662	-16,89	-7,11358
19,9382	0,22944	0,366394	-18,61	-7,14288
21,3983	0,200202	0,337155	-20,19	-7,07864
22,6968	0,17259	0,309544	-21,62	-6,91399
23,82759	0,145853	0,282807	-22,88	-6,64913
24,79113	0,120186	0,257139	-23,98	-6,30476
25,58383	0,09585	0,232804	-24,89	-5,90236
26,20327	0,07215	0,209103	-25,63	-5,43935
26,64698	0,04915	0,186104	-26,19	-4,93052
26,9121	0,024988	0,161941	-26,56	-4,33916

Έπειτα , αντιστρέψαμε τα στοιχεία του Y έτσι ώστε να αποτυπωθεί η γραφική παράσταση στο Excel .

Τροποποίηση για εξαγωγή σε Solid Works

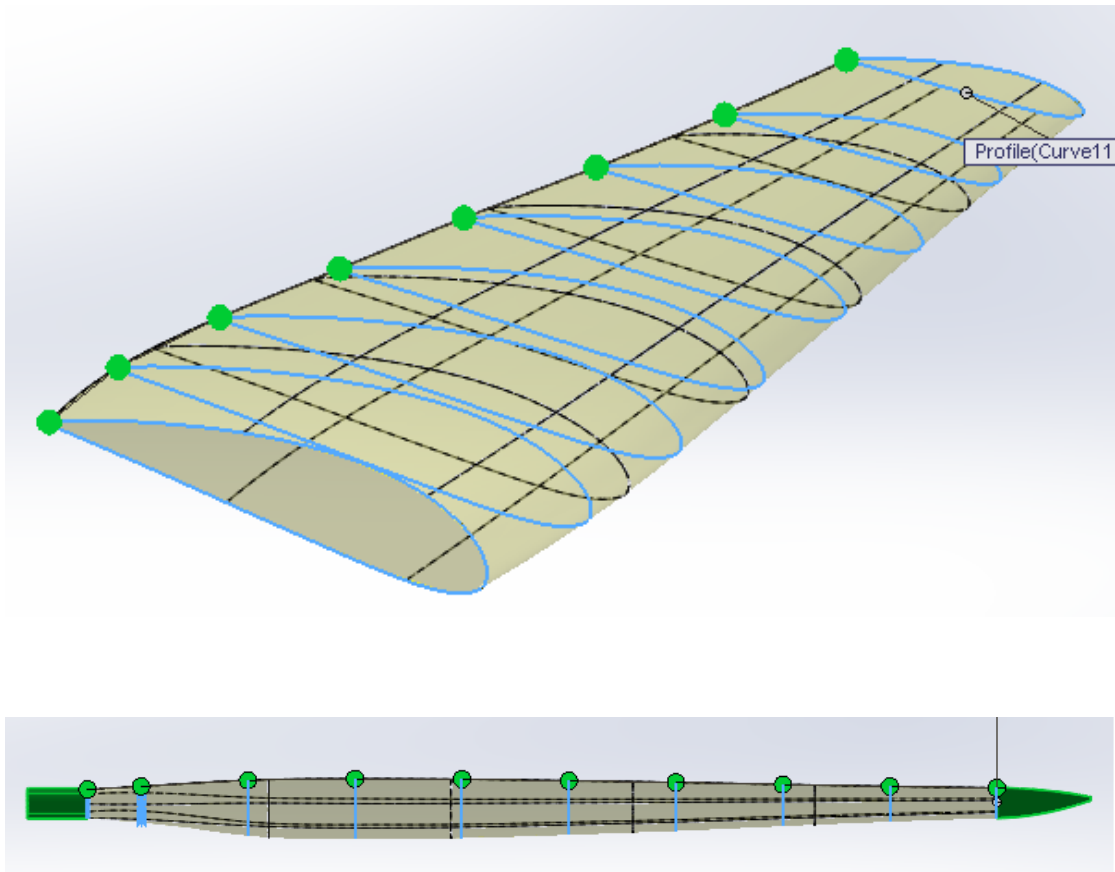
Χρησιμοποιούνται τα x, y upper&Lower που έχουν υπολογιστεί και μαζί με το υπολογιζόμενο z (Πίνακας 4) κάνουμε επικόλληση σε ένα text file (txt.) Ωστόσο ,πρέπει να γίνει προσεκτικά αντικατάσταση της υποδιαστολής με τελεία στο (επεξεργασία/ αντικατάσταση) text file.

x	y	z	x	y	z	x	y	z
62.003	8.732	610	-10.959	10.710	610	1.372	-4.248	610
61.497	8.894	610	-13.139	9.853	610	4.077	-3.692	610
60.792	9.110	610	-15.181	8.935	610	6.843	-3.122	610
59.894	9.372	610	-17.081	7.968	610	9.658	-2.541	610
58.805	9.667	610	-18.828	6.963	610	12.510	-1.949	610
57.535	9.987	610	-20.415	5.920	610	15.385	-1.347	610
56.086	10.327	610	-21.835	4.835	610	18.271	-0.735	610
54.467	10.687	610	-23.083	3.718	610	21.157	-0.117	610
52.684	11.063	610	-24.155	2.592	610	24.029	0.505	610
50.745	11.451	610	-25.050	1.486	610	26.877	1.127	610
48.658	11.842	610	-25.764	0.410	610	29.687	1.743	610
46.435	12.231	610	-26.294	-0.639	610	32.448	2.347	610
44.085	12.615	610	-26.634	-1.687	610	35.150	2.930	610
41.618	12.989	610	-26.786	-2.702	610	37.780	3.492	610
39.043	13.346	610	-26.759	-3.598	610	40.328	4.026	610
36.376	13.680	610	-26.560	-4.339	610	42.783	4.534	610
33.627	13.982	610	-26.187	-4.931	610	45.132	5.014	610
30.808	14.249	610	-25.632	-5.439	610	47.368	5.466	610
27.933	14.472	610	-24.894	-5.902	610	49.479	5.890	610
25.014	14.649	610	-23.976	-6.305	610	51.457	6.283	610
22.063	14.775	610	-22.881	-6.649	610	53.293	6.645	610
19.095	14.846	610	-21.618	-6.914	610	54.978	6.975	610
16.122	14.859	610	-20.194	-7.079	610	56.507	7.271	610
13.158	14.809	610	-18.615	-7.143	610	57.872	7.539	610
10.217	14.691	610	-16.888	-7.114	610	59.065	7.784	610
7.310	14.496	610	-15.019	-6.994	610	60.082	8.008	610
4.454	14.219	610	-13.014	-6.790	610	60.916	8.208	610
1.659	13.853	610	-10.884	-6.509	610	61.568	8.375	610
-1.060	13.398	610	-8.634	-6.163	610	62.035	8.499	610
-3.692	12.852	610	-6.274	-5.755	610	62.003	8.732	610
-6.226	12.217	610	-3.813	-5.291	610			
-8.652	11.500	610	-1.261	-4.785	610			

Πίνακας 6 (Υπολογισμοί καμπύλων)

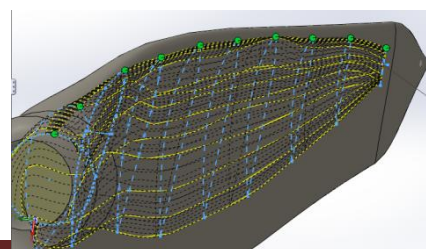
Σχεδιασμός πτερυγίου σε SOLIDWORKS

Ο σχεδιασμός του πτερυγίου είναι σχετικά μια εύκολη διαδικασία αφού μεταφερθούν οι καμπύλες μέσω της εντολής < curve through XYZ points > και αφού πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες μετατροπές αν χρειαστεί, τότε χρησιμοποιείται η εντολή < Loft > όπου εξάγεται η γεωμετρία της πτερύγωσης. Όσο αναφορά τις εσωτερικές καμπύλες του πτερυγίου ,τις σχεδιάζω στα Plane κάθε καμπύλης που έχουν δημιουργηθεί, χρησιμοποιώντας την εντολή < offset > και τοποθετώντας τις αποστάσεις που υπολογίστηκαν από τον Πίνακα 4 (1η στήλη) .Σε αυτές τις καμπύλες θα χρησιμοποιηθεί η εντολή < lofted cut > όπου και αφαιρείται υλικό από το ήδη υπάρχον. Η βάση του πτερυγίου είναι στα 45 χιλιοστά διάμετρο με πάχος 15 χιλιοστά τα οποία υπολογίστηκαν παρακάτω στους συντελεστές ασφάλειας .



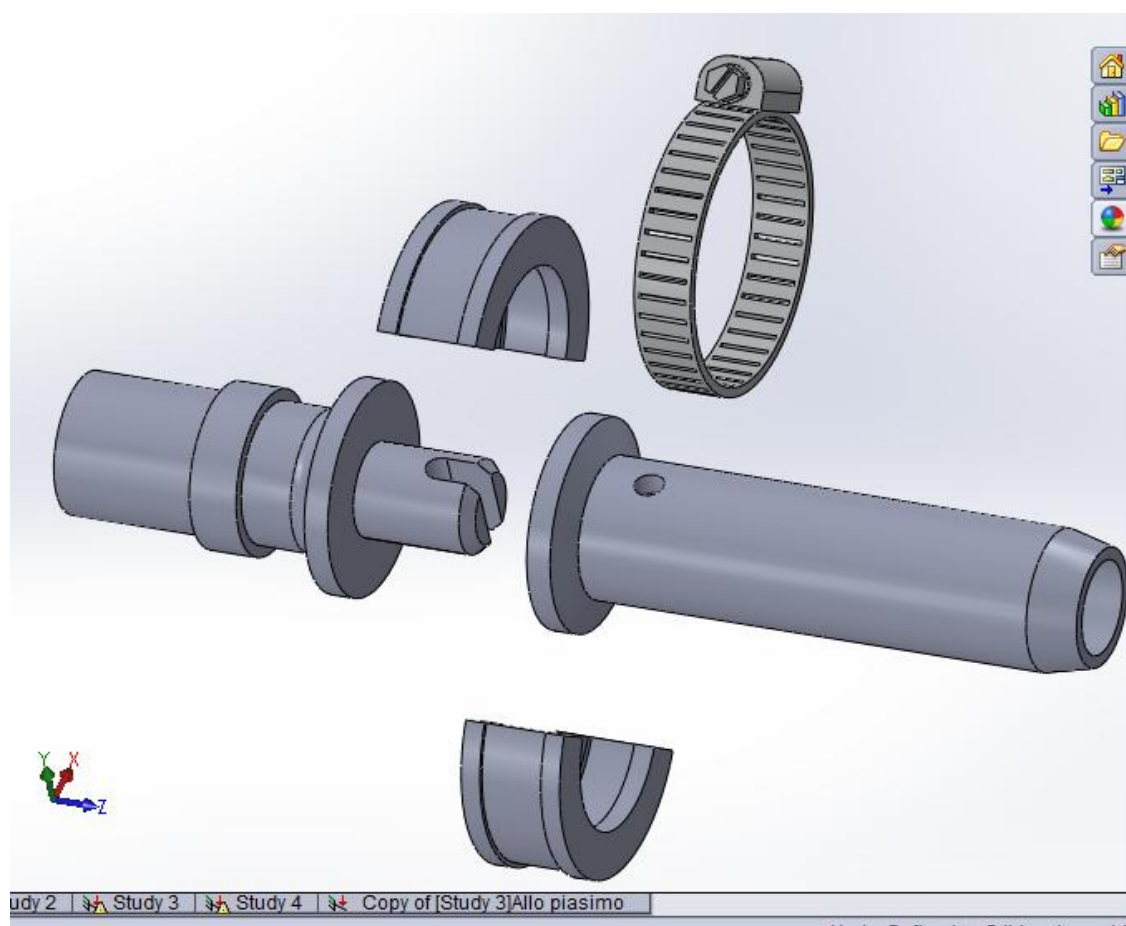
Σχέδιο 3, Εντολή loft κατά τον σχεδιασμό

Σχέδιο 4, Εντολή cut - loft για την δημιουργία του εσωτερικού τοιχώματος



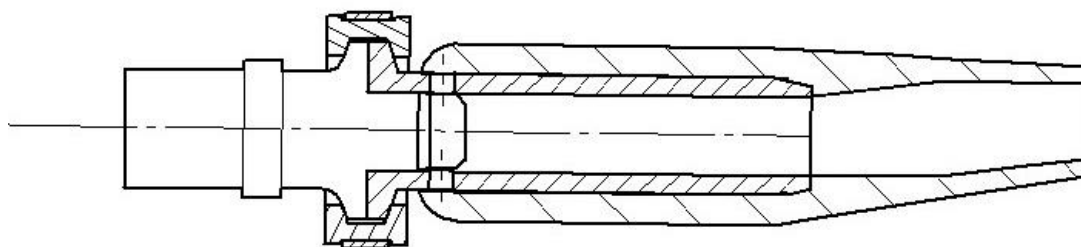
Τρόπος Σύνδεσης πτερυγίου με την ανεμογεννήτρια

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να προσθέσω την επιλογή μέσα σε τρεις διαφορετικούς τρόπους που σκεφτήκαμε για την εύρεση της καλύτερης και ασφαλέστερης λύσης για την κατασκευή . Τελικά επιλέχθηκε ο ακόλουθος αφού έχει χρησιμοποιηθεί πάλι στο παρελθόν και έχει δοκιμαστεί από το εργαστήριο επιτυγχάνοντας προένταση .



Σχέδιο 5, Τμήματα υλικών για κατασκευή από σχεδιαστικό πρόγραμμα

Ο πρώτος άξονας είναι αυτός που έρχεται από την γεννήτρια και φωλιάζει μέσα στον δεύτερο άξονα ,ο οποίος θα είναι πακτωμένος από την αρχή με το πτερύγιο μέσα στον πολυάστερα όπως αυτός αποκολληθεί από το καλούπι. Το τελείωμα του δευτέρου άξονα έχει chamfer με κλίση 15 % για αποφυγή φθοράς του πολυάστερα από τα φορτία που θα δέχεται, γνωρίζοντας ότι ο πολυεστέρας είναι ψαθυρό υλικό και έχει μικρότερο όριο διαρροής (yield strange). Τέλος ένας πήρος 6 mm είναι αυτός που αποτρέπει την κίνηση τού άξονα που είναι πακτωμένος με το πτερύγιο από την θέση του .

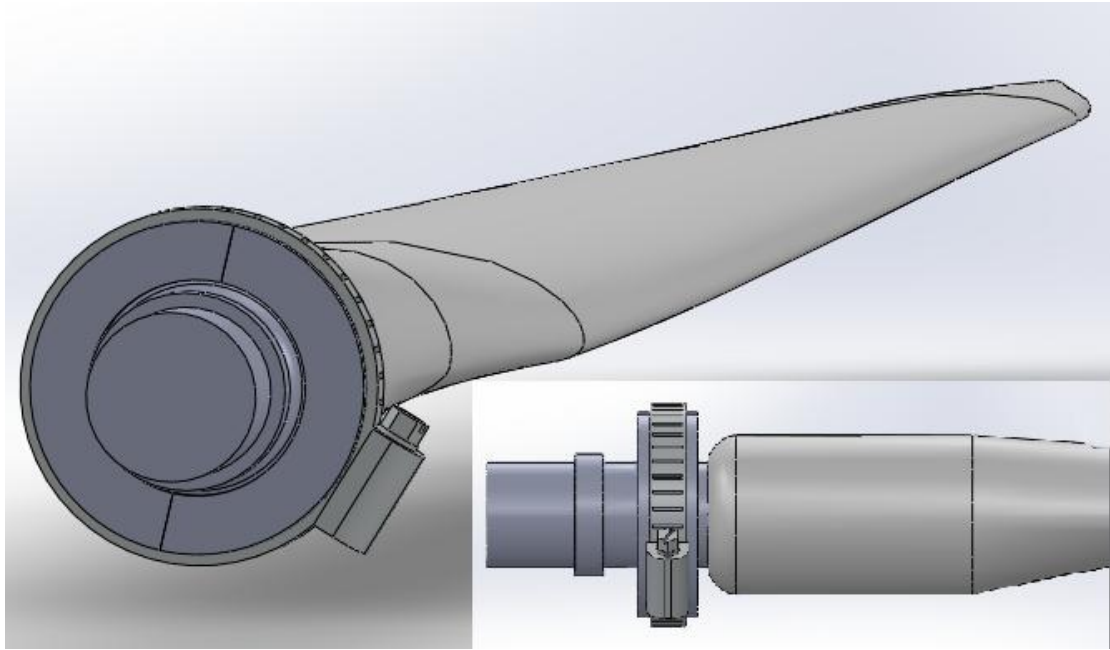


SECTION F-F

Σχέδιο 6, Δεξιά όψη σε τομή σύνδεσης πτερυγίου

Η διάτρηση στο δεύτερο κομμάτι γίνεται αφενός για να κρατά σταθερά την κλίση του πτερυγίου, αφετέρου για να ρυθμιστεί η κλίση του όταν αυτό βρίσκεται μέσα στο καλούπι πριν στεγνώσει ο πολυεστέρας , ενώ αυτό θα χρησιμοποιηθεί αργότερα κατά την διαδικασία χύτευσης του.

Στην συνέχεια θα εφαρμοστούν δυο ημικύκλιοι δακτύλιοι σύνδεσμοι, οι οποίοι θα είναι από το ίδιο υλικό (μολυβδούχος χάλυβας) και θα παίρνουν όλα τα φορτία κρατώντας ενωμένο το πτερύγιο με τον άξονα της μηχανής και ακόμη ένα δαχτυλίδι σύσφιξης το οποίο θα συσφίγγει το δακτύλιο σύνδεσμο με την επίτευξη της προέντασης του συνδέσμου της πτερύγωσης.



Σχέδιο 7, 3D αποϊκόνιση του συνδέσμου περυγίου με μηχανή

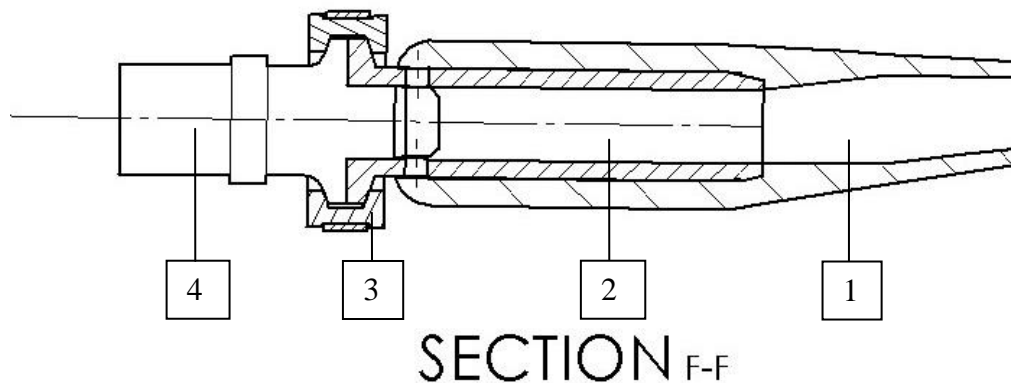
Συντελεστές Ασφαλείας για την σύνδεση

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι μολυβδούχος χάλυβας για τα μέταλλα και όπως αναφέρθηκε Fiberglass (πολυεστέρας) για το περύγιο. Το υλικό του χάλυβα με το πράσινο χρώμα θα είναι πακτωμένο μέσα στο περύγιο κατά την διαδικασία χύτευσης του πολυάστερα και θα έχει μια κλίση στην ακμή του προς αποφυγή πρόκλησης φθοράς του.

		M Ntm	Ntmm	1 κατάσταση	d mm	Dmm
		220	220000		35	55
				2 κατάσταση	d	D
					20	35
				3 κατάσταση	d	D
					45	52
				4 κατάσταση	D mm	
					30	
	W mm4	σ Mpa	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ			
1	13655,218	16,11106	5,0			
2	3760,4443	58,50372	3,8			
3	6062,2751	36,29001	6,8			
4	5301,4376	41,49818	5,9			

Πίνακας συντελεστών ασφαλείας υλικών

στην τέταρτη (4) όπου ο σωλήνας είναι (massif), χρησιμοποιείται ο : $W = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot 2}{32 \cdot D}$



Σχέδιο 8, Αποϊκόνιση των υλικών σε τομή για τον υπολογισμό των συντελεστών ασφάλειας

Τα πάχη επιλέχθηκαν πριν την παραγγελία τους έπειτα από εκτίμηση που έγινε στον **συντελεστή ασφάλειας** , ενώ ο **λόγος του ορίου διαρροής** του χάλυβα υπολογίζεται στα 245 (MPa) , του πολυεστέρα 80 (MPa) (ακόμα πιο μικρή τιμή για μέγιστη ασφάλεια) σε σχέση με την **τάση** που υπολογίστηκε : $\sigma = \frac{M}{W}$.

Η ροπή είναι 220 (Ntm) στο σύνδεσμο, λίγο πιο κάτω σε σχέση με τα 230 Ntm που υπολογίστηκαν στον Πίνακα 4 ανάλυσης δυνάμεων παραπάνω.

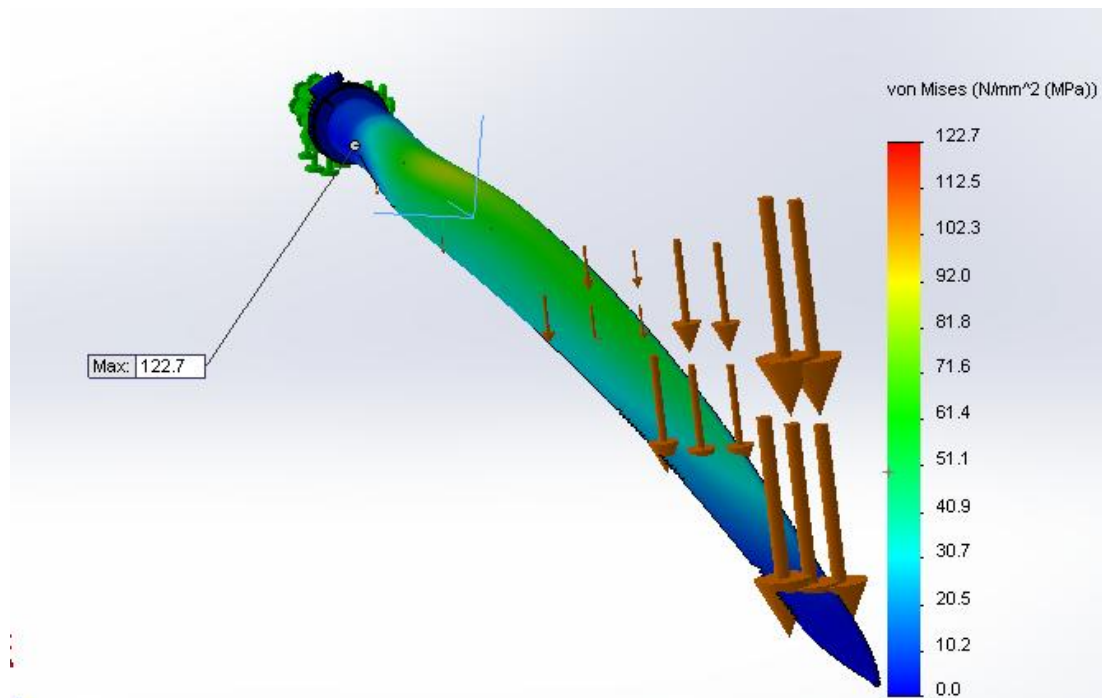
Τα κριτήρια όπως αναφέρθηκε νωρίτερα για την επιλογή των παχών του κάθε τμήματος δημιουργήθηκαν ύστερα από τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας για το κάθε ένα από αυτά. Όπως παρατηρήθηκε από τον παραπάνω πίνακα, η κατάσταση που βρίσκονται οι δακτύλιοι σύνδεσμοι (κόκκινο χρώμα) έχουν και τον μεγαλύτερο συντελεστή από τις υπόλοιπες, για το λόγο ότι εκεί θα αναπτυχθούν τάσεις λόγω διάτμησης, φυγόκεντρου και κάμψης. Υπολογίζονται οι τάσεις Von Mises.

Δοκιμή πτερυγίου σε Κάμψη

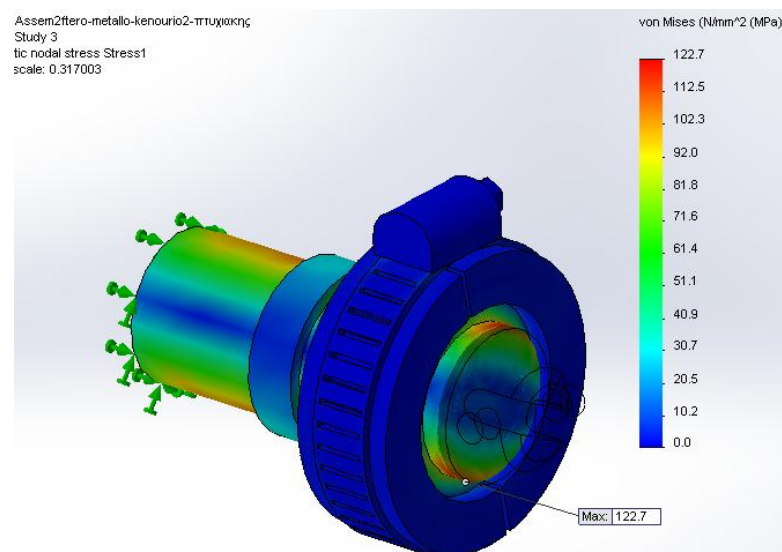
Η αντοχή της όλης κατασκευής για να δοκιμασθεί σε κάμψη πριν ακόμα περάσουμε στο κατασκευαστικό μέρος , πραγματοποιείται στο solid works προσομοίωση σε καμπτική καταπόνηση από κατανεμημένο φορτίο (το μέγιστο 250 NT , που υπολογίστηκε στον παραπάνω Πίνακα στο σύνολο των καμπτικών δυνάμεων).

Αυτό εφαρμόζεται μετά από την ολοκλήρωση του *Assembly* και των τεσσάρων μερών της όλης σύνδεσης , επιλέγοντας *simulation / New study* και έπειτα επιλογή *material* στα οποία οι χάλυβες θα είναι *plain carbon steel* (όπου τα χαρακτηριστικά του είναι πιο κοντά στα πραγματικά με yield strength 250) ενώ στο πτερύγιο δημιουργήθηκε μια νέα λίστα στα υλικά όπου :

Elastic modulus - 16 (GP)
Mass density - 1800 (kg/m³)
Yield strength - 175 (N/mm²)
Thermal expansion coefficient - 6.9597e-008 (/K)



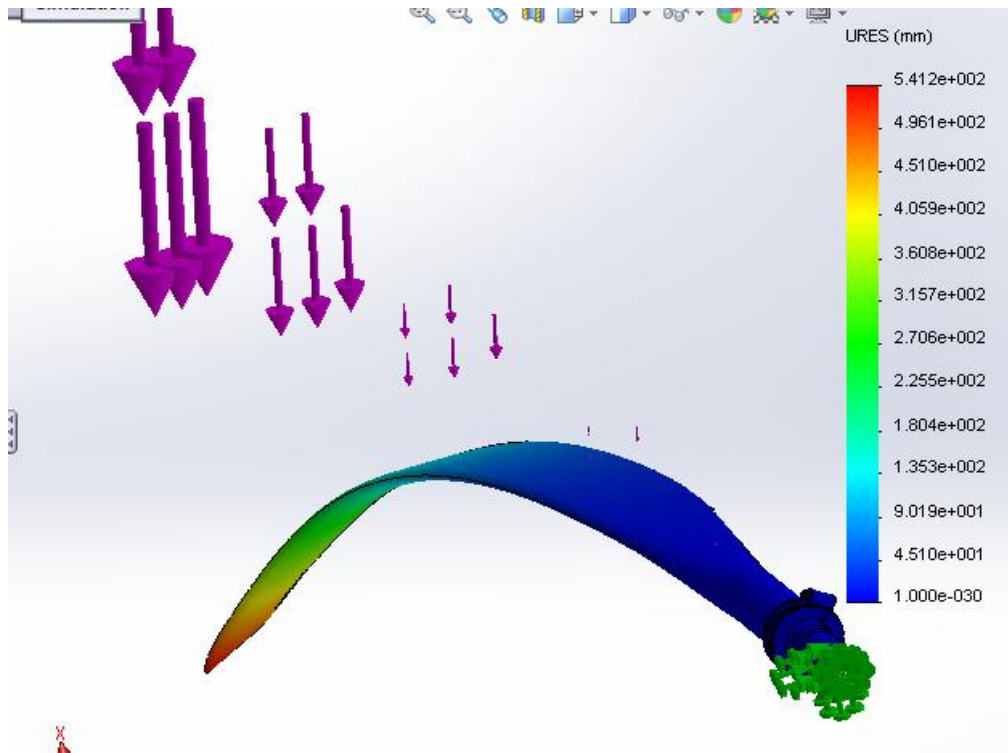
Σχέδιο 9 , Αποϊκόνιση προσομοίωσης δυνάμεων σε κάμψη



Τα 122 (MPa) τάση είναι σχεδόν τα μισά από το όριο θραύσης που έχει ο μολυβδούχος χάλυβας στα 250 (MPa) .

Σχέδιο 10, Μεγίστη τάση κάμψης σε τομή

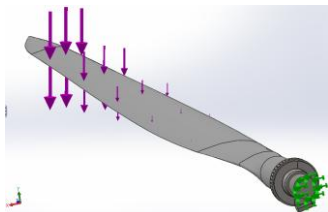
Μεγίστη μετατόπιση πτερυγίου κατά την προσομοίωση (250 Nt)



Σχέδιο 11 , Αποϊκόνιση προσομοίωσης μετατόπισης στα 50 εκατοστά εξαιτίας της κάμψης

Κατανεμημένο φορτίο

Το πτερύγιο δέχεται δύναμη σύμφωνα με τους υπολογισμούς 250 (Nt) και ροπή 230 (Ntm) στην πιο δυσχερή κατάσταση που θα μπορούσε να βρεθεί.

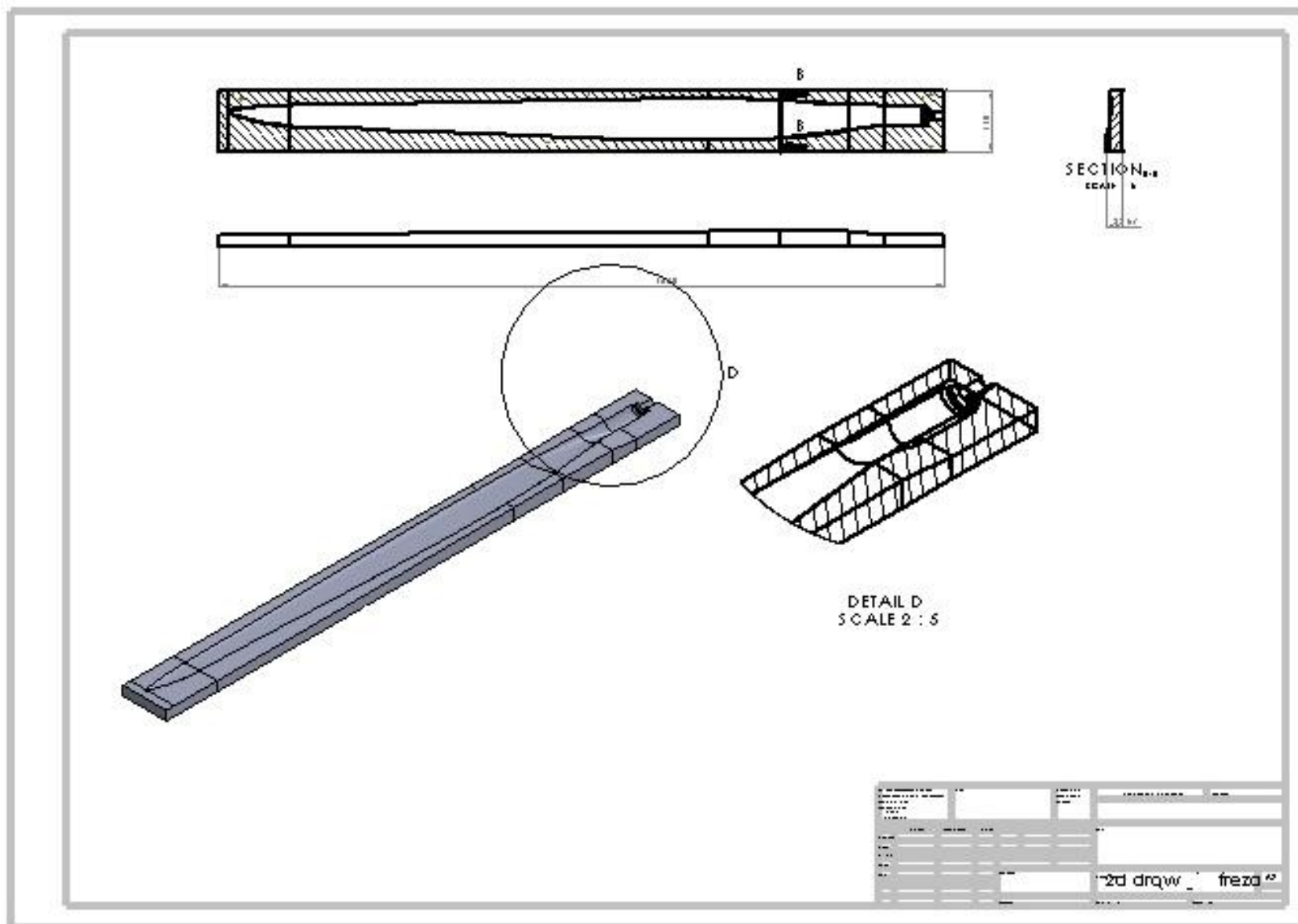


Σχέδιο 12, Τριγωνικά κατανεμημένο φορτίο

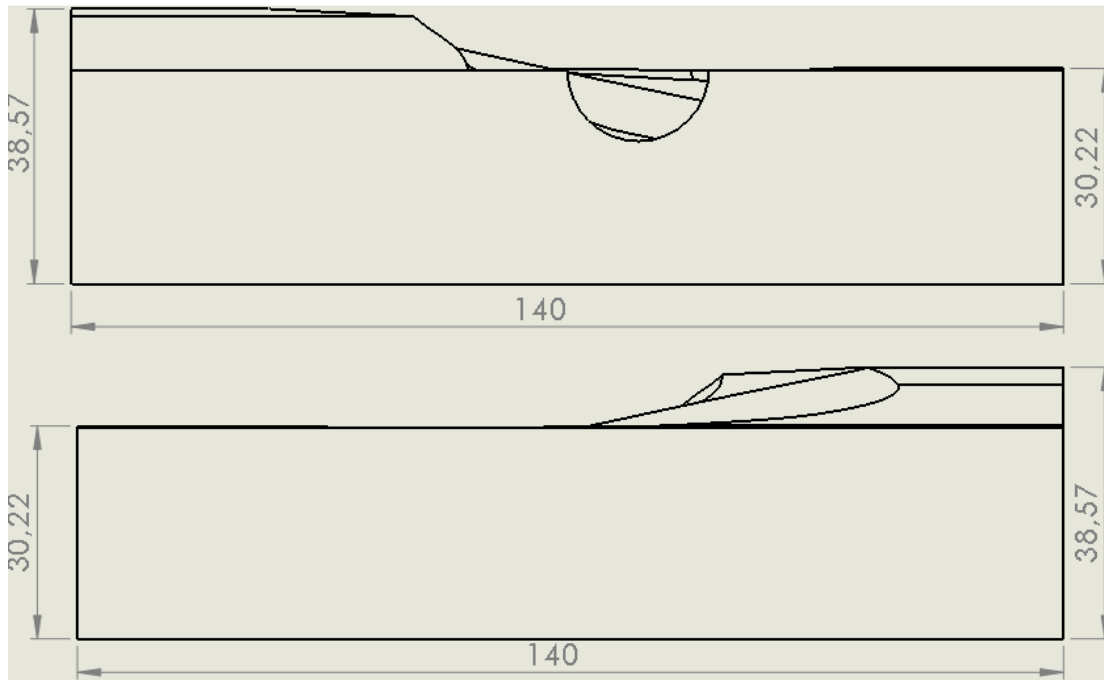
Αυτό επιτυγχάνεται στο *simulation / external load / nonuniform Distribution* .

Σχεδιασμός καλουπιού

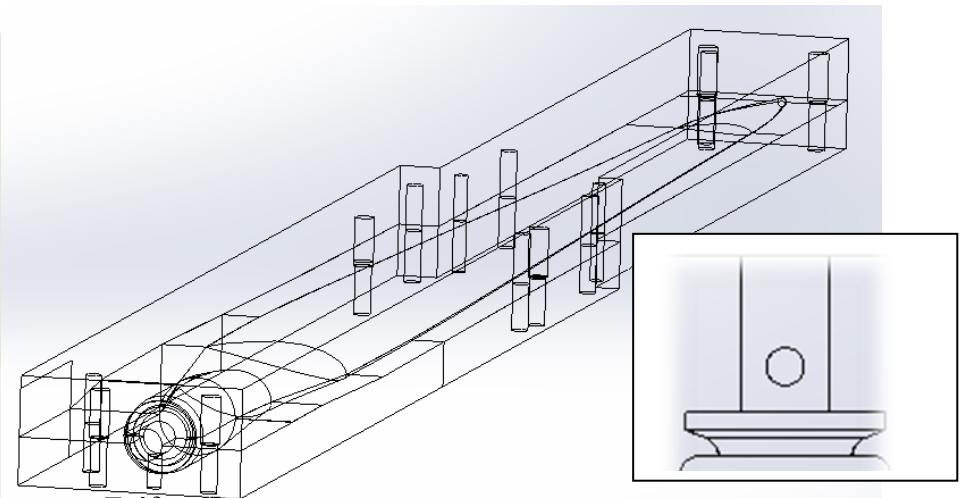
Το καλούπι για να σχεδιαστεί στο SolidWorks θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εντολή *combine* που βρίσκεται στα *features* σε δύο ορθογώνια πλαίσια με 140 μμ πλάτος , 40 μμ πάχος και 1660 μήκος ώστε να δημιουργηθεί το επάνω και κάτω μέρος του. Η εντολή χρησιμοποιείται εύκολα , το μόνο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι το επίπεδο της επιφάνειας κάθε καμπύλης πρέπει να αρχίζει από τις ακμές του για το λόγο ότι οι καμπύλες είναι υπό γωνία. Ακολούθως, θα χρησιμοποιηθεί μια γραμμή που θα ενώσει όλες τις ακμές των καμπυλών και από τις δύο μεριές (*leading edge - tailing edge*) και έπειτα θα αφαιρεθεί το περίσσιο υλικό με την εντολή *Cut-loft*.



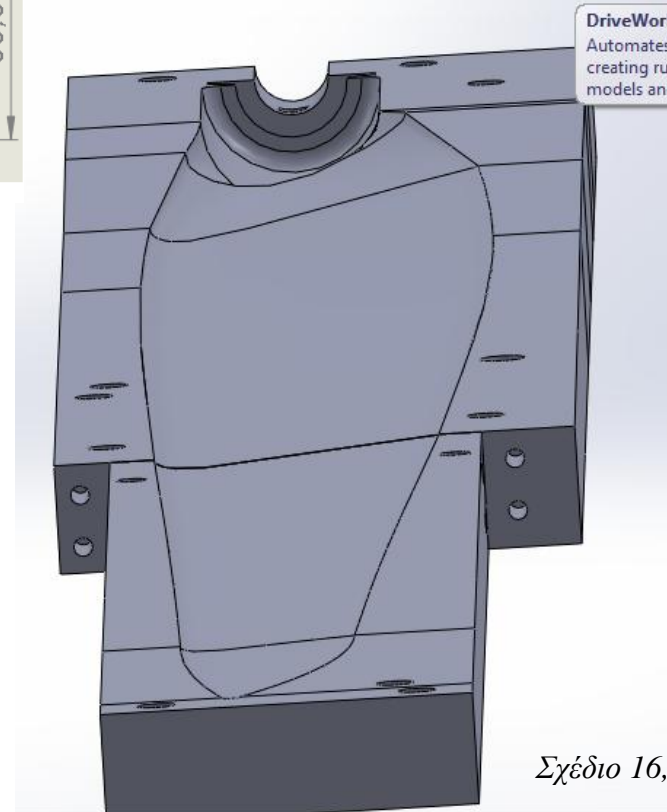
Σχέδιο 13, 2D σχέδιο καλουπιού κάτω μέρος



Σχέδιο 14, Πίσω και μπροστά όψη
 Παρατήρηση αλλαγής επίπεδων στη κατεργαζόμενη πλευρά λόγω κλίσεις των καμπυλών



Σχέδιο 15, 3D σχέδιο από SolidWorks για τον τρόπο σύσφιξης των δυο κομματιών



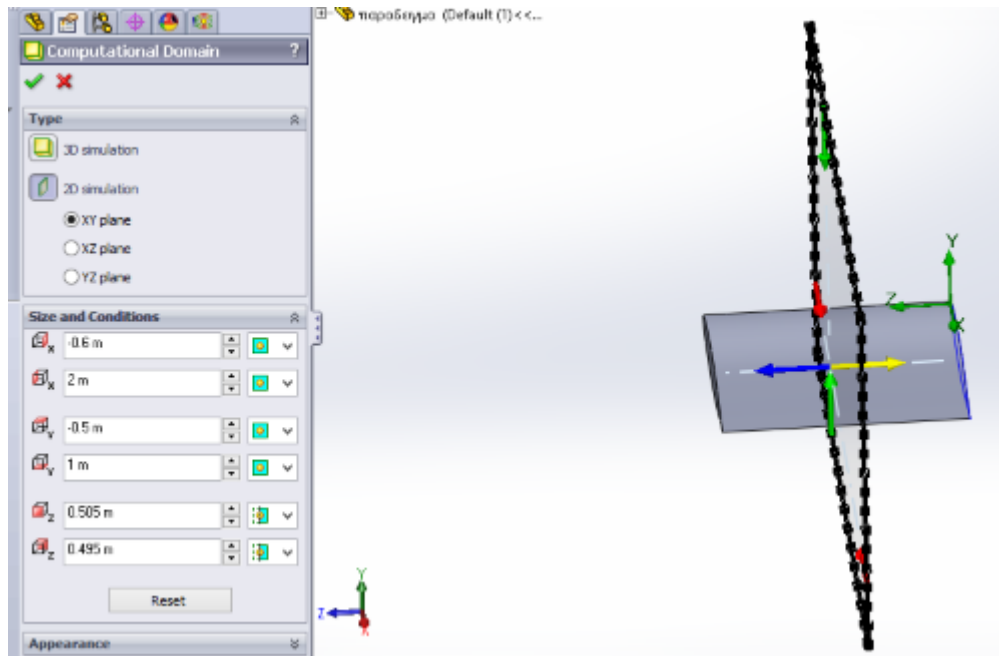
Σχέδιο 16, 3D σχέδιο καλουπιού
 κάτω μέρος

Προσομοίωση πτερυγίων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα (flow simulation)

Δοκιμή προσομοίωσης

Σε αυτό το σημείο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί προσομοίωση ανέμου στο solidworks στις αντίστοιχες γωνίες βήματος (pitch angle) που χρησιμοποιεί η NACA ,σε τμήμα ενός μέτρου (1m) σε (2D) ανάλυση στο δωμάτιο του flow και να συγκριθούν με αυτές της Εικόνας 3 που υπάρχουν στην ηλεκτρονική διεύθυνση της NACA, με μια ταχύτητα ανέμου π.χ. $V=9,35\text{m/s}$ όπου ο αριθμός $Re=1\cdot 10^6$ άρα συγκρίνεται με το διάγραμμα της γραφικής παράστασης με το πορτοκαλί χρώμα.

Οι γωνίες του πτερυγίου μπορούν να ελεγχθούν από την εντολή *Move/Copy Bodies*. Στο χώρο της προσομοίωσης (*Computation Domain*) οι αποστάσεις θα πρέπει να είναι οι εξής:



στον x'

από -0,6m έως 2m (0,6 m πριν το χείλος προσβολής και 2 m μετά την ακμή διαφυγής)

στον y'

από -0,5m έως 1m

στον z'

από -0,005m έως +0,005m από το μέσο της πτέρυγας.

Αυτό θα βοηθήσει (ανάλογα ποσό κοντά θα πέσουν με τις τιμές της NACA) να χρησιμοποιήσω τις τελικές ρυθμίσεις για τον χώρο της προσομοίωσης του επόμενου σταδίου ,που είναι η προσομοίωση με περιστροφή των τριών πτερυγίων πάνω στην εικονική γεννήτρια ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις.

Ο Αριθμός Re υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

$$Re = \rho u d_h / \mu$$

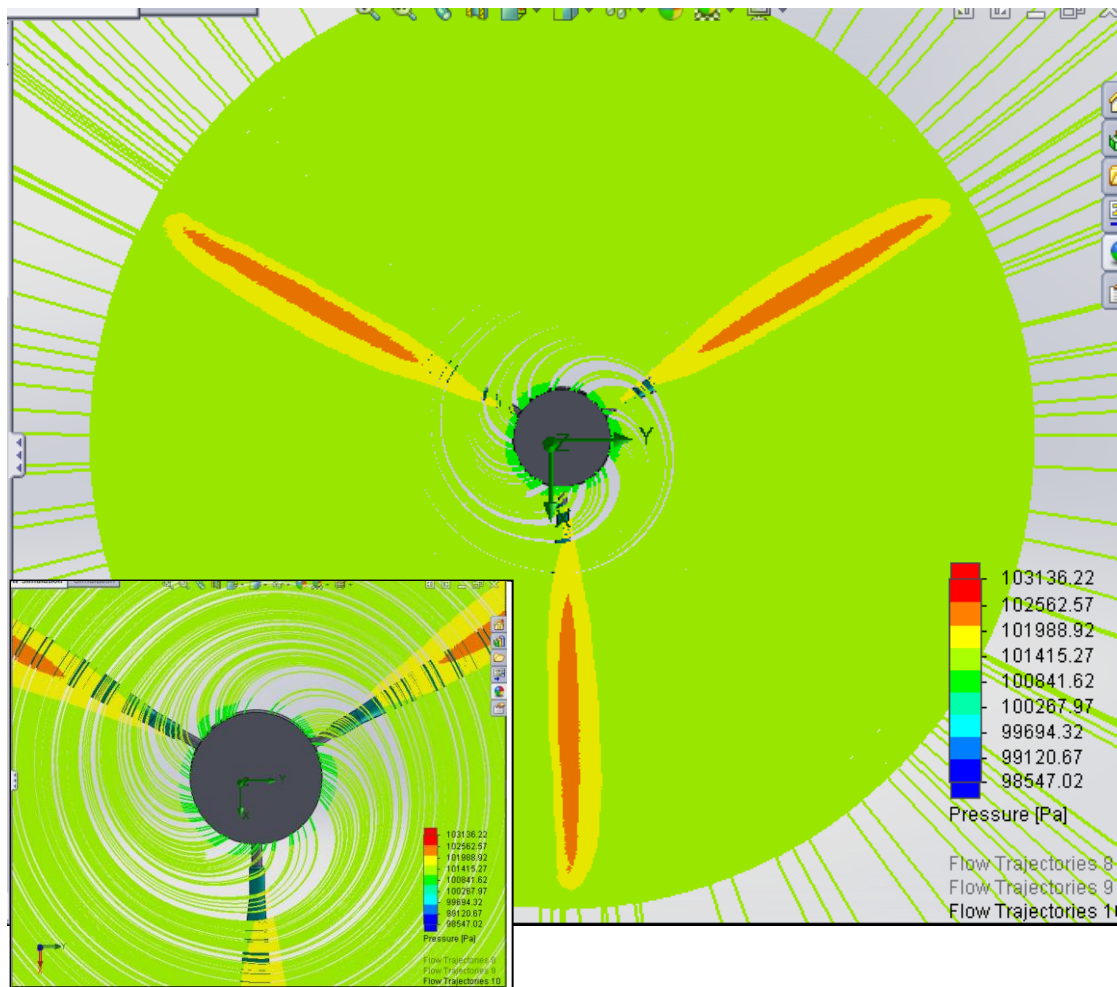
Βασική προσομοίωση ολόκληρης Α/Γ

Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση θα χρειαστεί ένας αρκετά καλής κατασκευής Η/Υ, για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα που υπολογίστηκαν από το excel στο προηγούμενο κεφάλαιο και η κοπτική τάση λόγω περιστροφής.

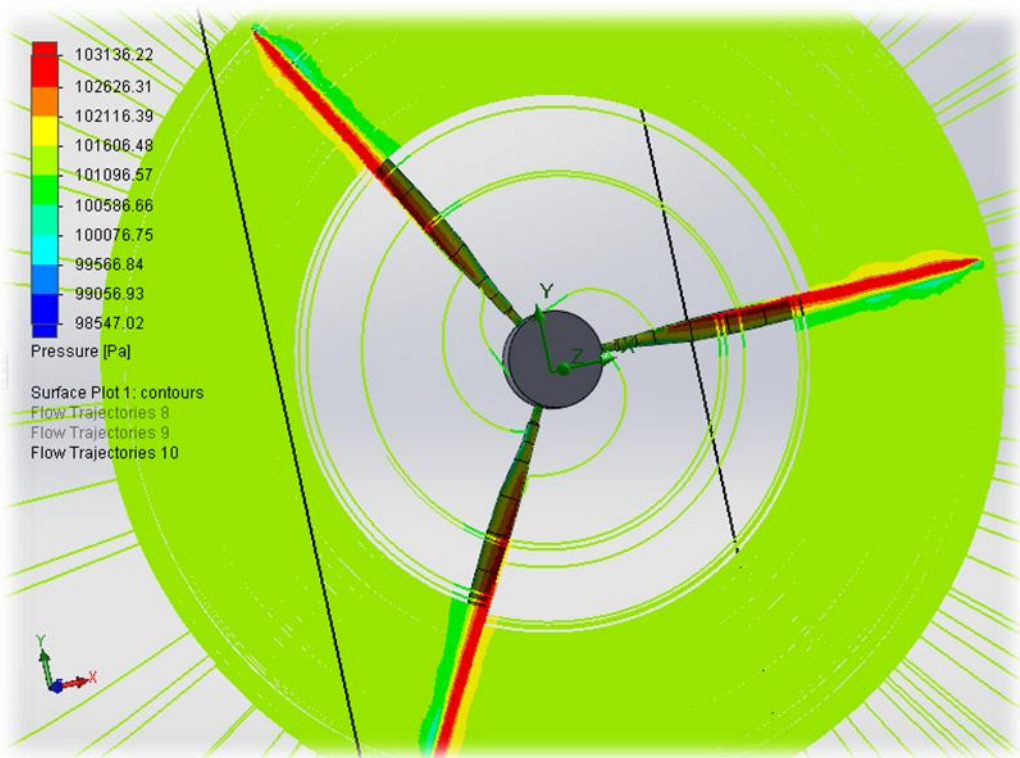
Αφού έγινε ο σχεδιασμός της γεννήτριας κατά προσέγγιση σε διαστάσεις αλλά και ο άξονας όπου θα περιστρέφεται , αποφεύγοντας να τοποθετήσουμε την εικονική γεννήτρια που σχεδιάστηκε από συνεργάτη στο εργαστήριο και αυτό για λόγους διευκόλυνσης - ελάφρυνσης προσομοίωσης σε υπολογιστικό χρόνο, και ήδη γνωρίζοντας ότι μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία να αναδειχθεί περισσότερο η συμπεριφορά των πτερυγίων και όχι τα στοιχεία της υπόλοιπης γεννήτριας .

Σε περίπτωση που δεν εμφανίζεται η επιλογή του *flow simulation* θα χρειαστεί να ενεργοποιηθεί από το *options / add ins*.

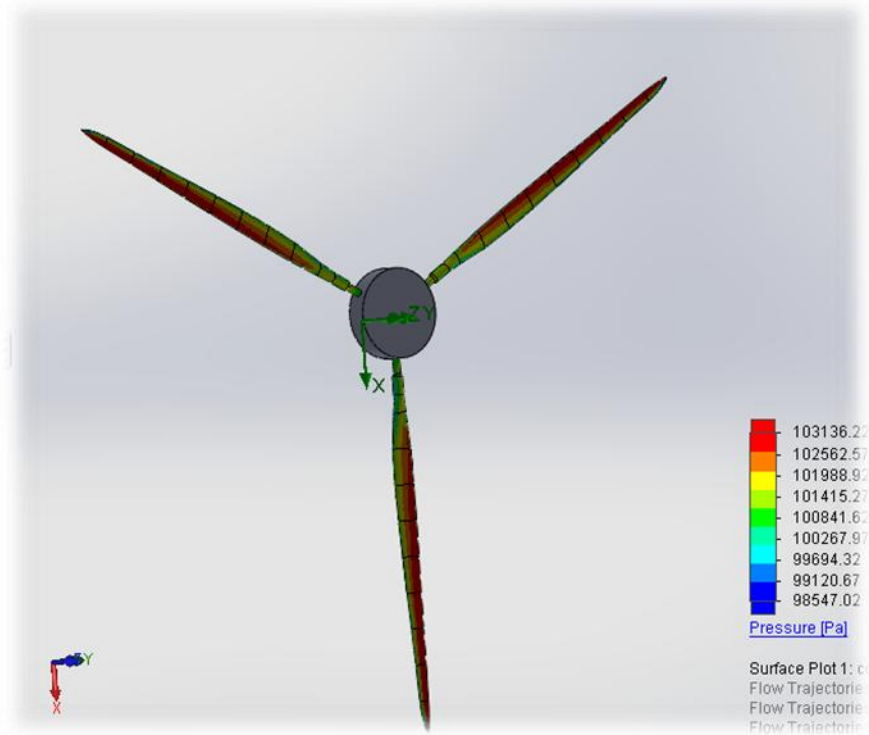
Ενεργοποιώντας την επιλογή *wizard* δημιουργείται καινούργια μελέτη όπου χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα $V=35$ m/s όσο και η περιστροφή 52 rad/s.



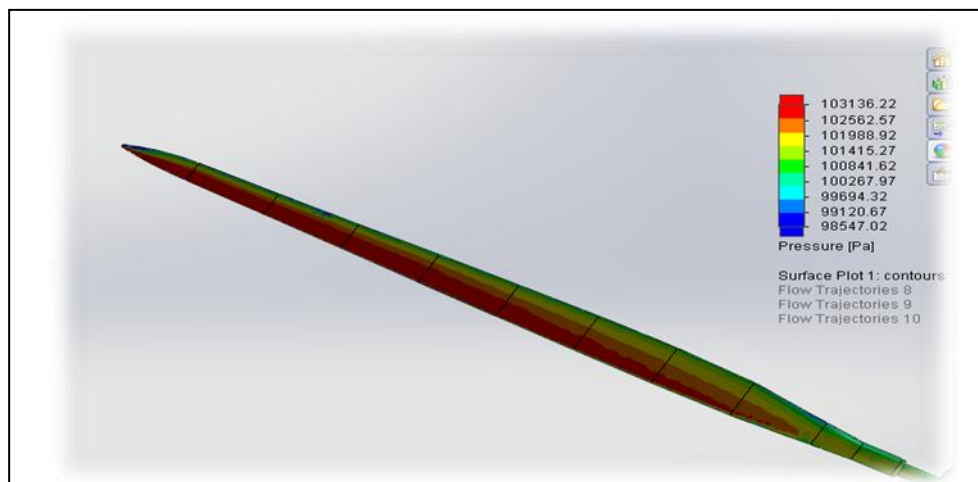
Σχέδιο 17, Κατανομή πίεσης πτερυγίων κατά την περιστροφή τους και τομή σε πρόσοψη των ροών ανέμου.



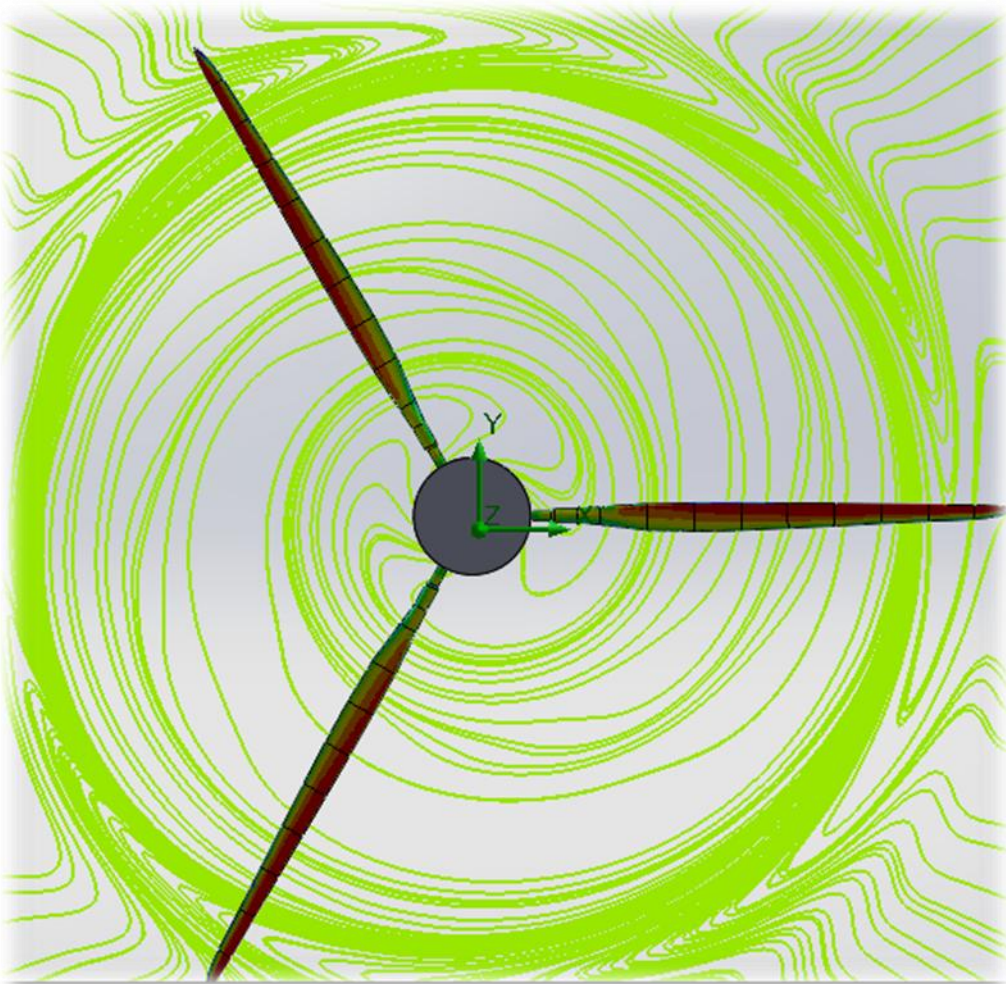
Σχέδιο 18, Κατανομή πίεσης πτερυγίων κατά την περιστροφή τους και τομή σε πρόσοψη των ροών ανέμου στο ακροπτερύγιο.



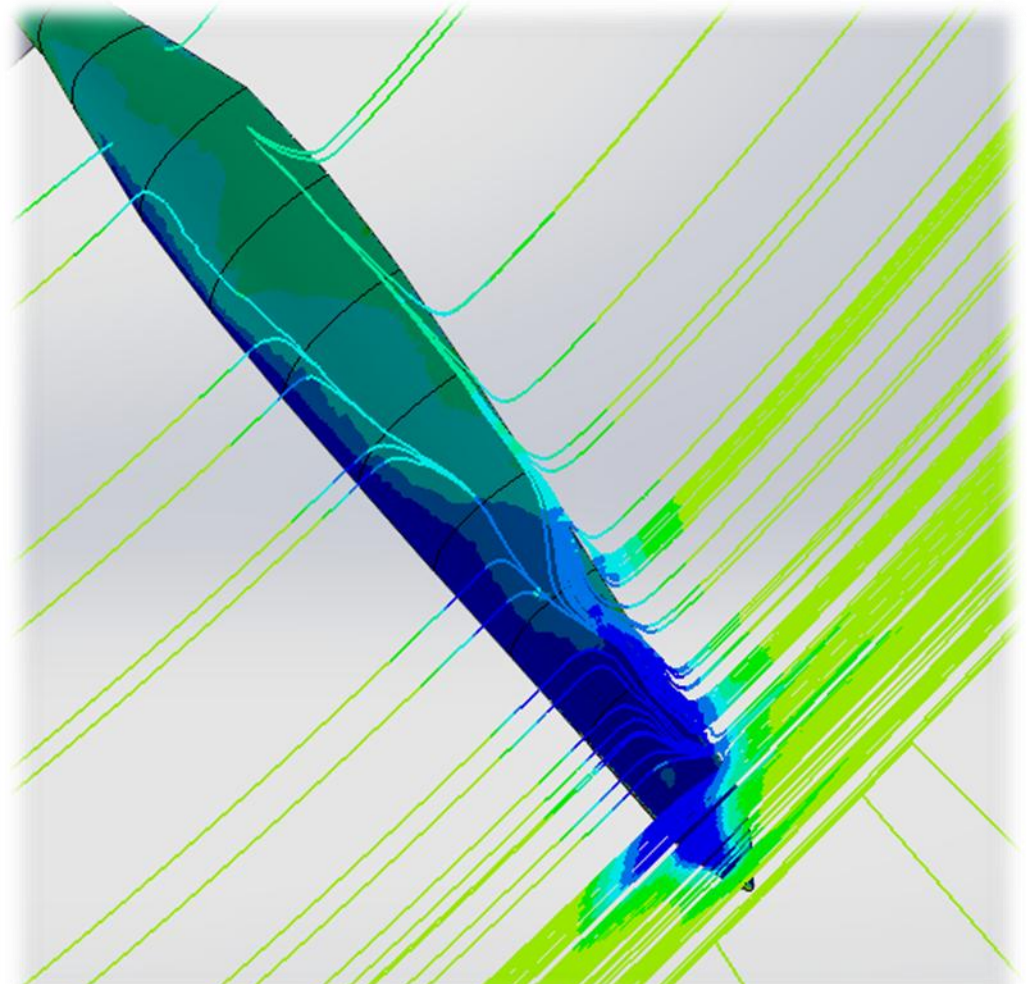
Σχέδιο 20, Κατανομή πίεσης πτερυγίων κατά την περιστροφή τους



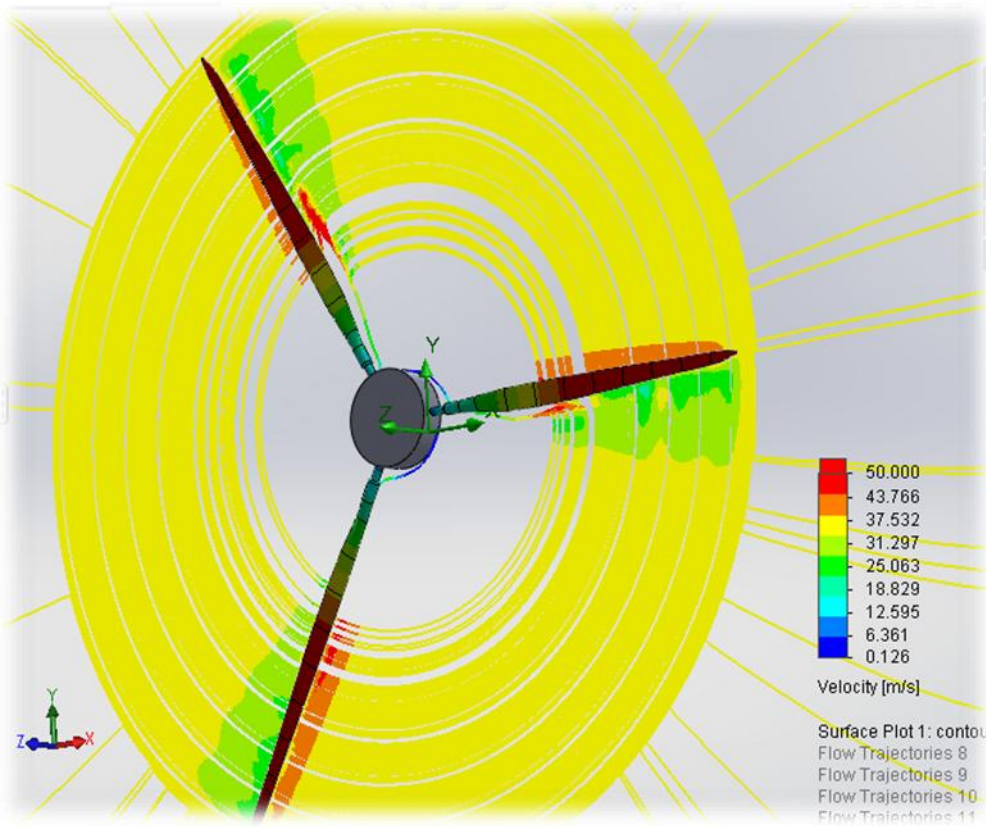
Σχέδιο 19, Κατανομή πίεσης στο πτερύγιο



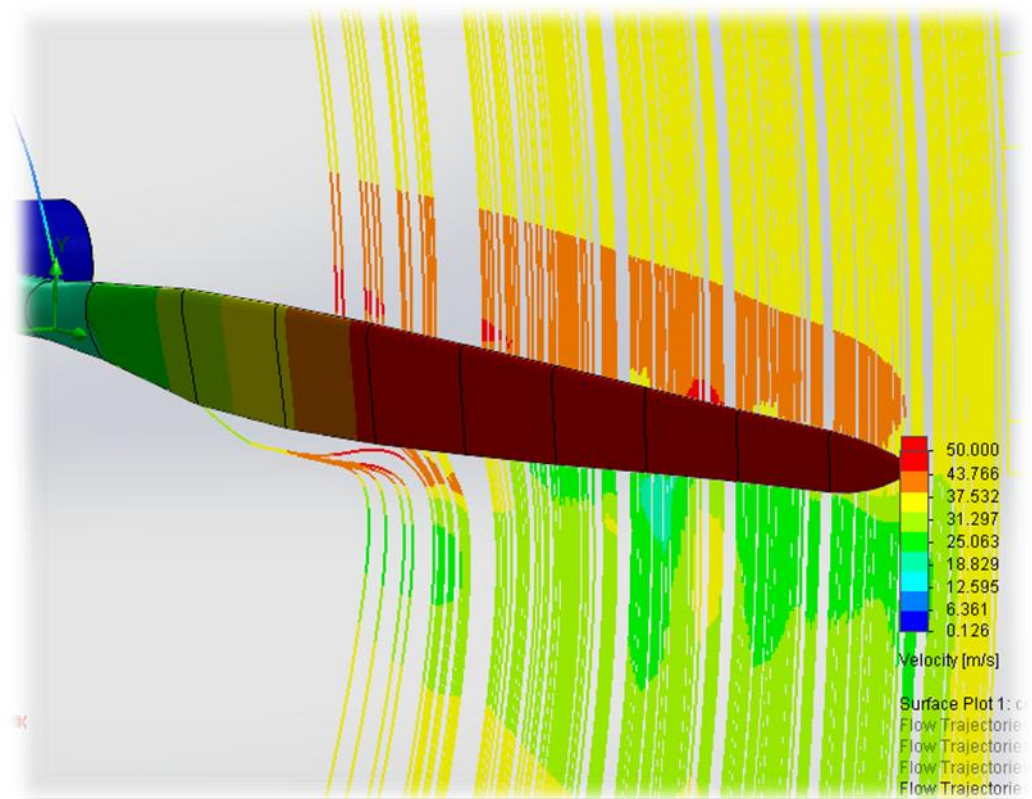
Σχέδιο 21, Ροές ανέμου πίεσης ένα μέτρο μετά



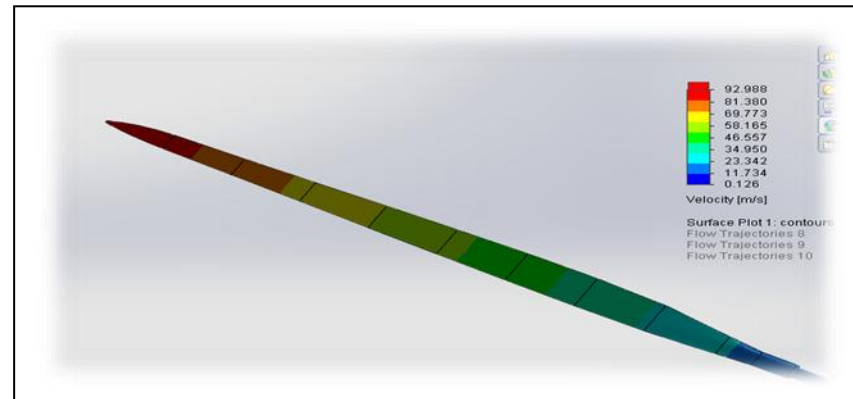
Σχέδιο 22, Κατανομή πίεσης περυγίων κατά την περιστροφή τους πίσω όψη



Σχέδιο 23, Κατανομή ταχύτητας ανέμου περηνγίων κατά την περιστροφή τους και τομή σε πρόσωση των ροών πίσω από αυτήν.

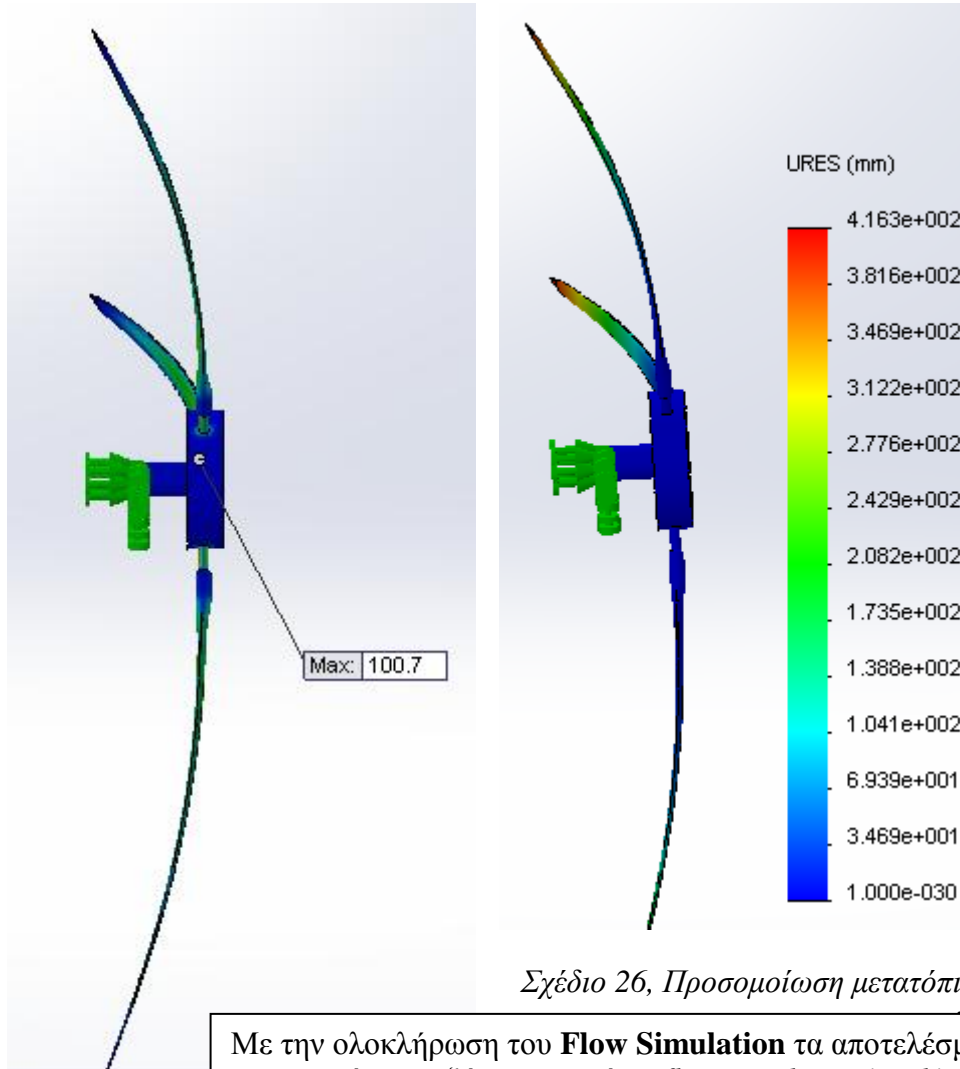


Σχέδιο 25, Κατανομή ταχύτητας ανέμου στο περύνιο κατά την περιστροφή τους και τομή σε πρόσωση των ροών πάνω σε αυτήν.



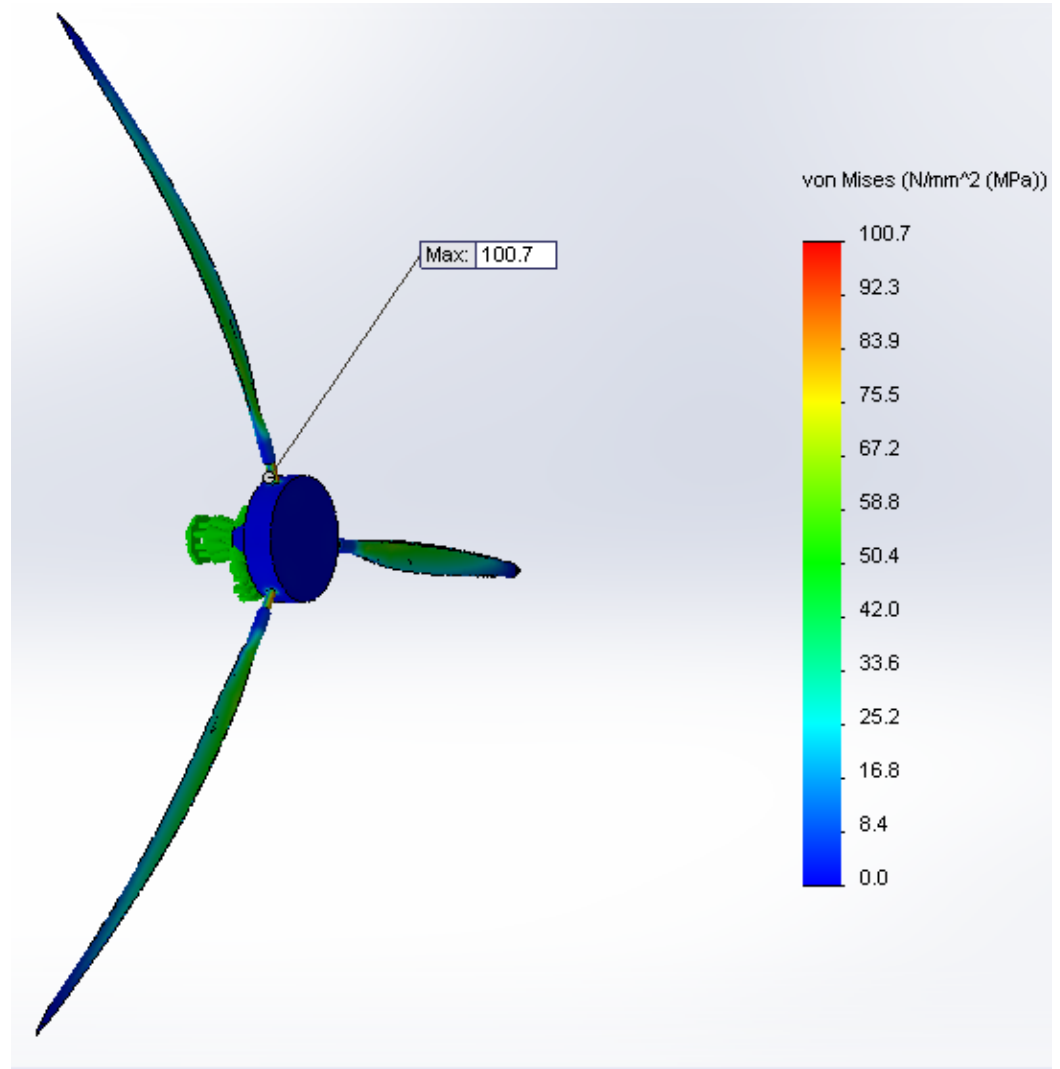
Σχέδιο 24, Κατανομή ταχύτητας ανέμου στο περύνιο

Αποτελέσματα σε καταπονήσεις :



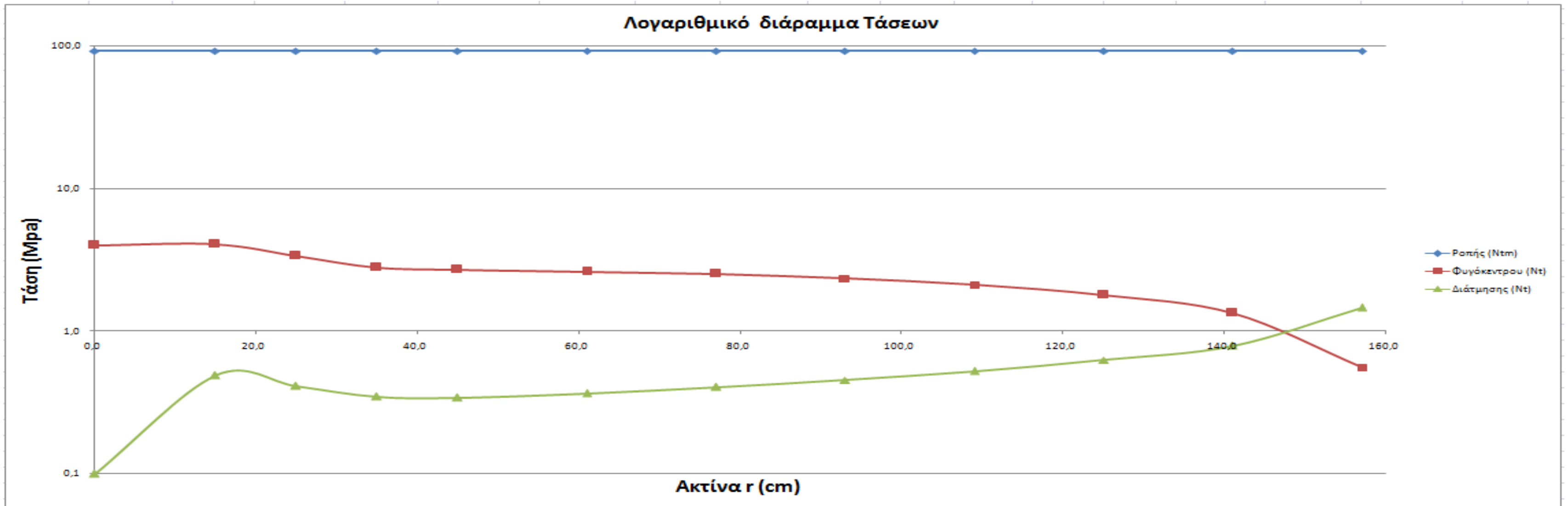
Σχέδιο 26, Προσομοίωση μετατόπισης σε

Με την ολοκλήρωση του **Flow Simulation** τα αποτελέσματα των φορτίσεων εξάγονται από το *flow simulation/ tool/ export simulation results* . Στη συνέχεια δημιουργείτε καινούριο study όπου συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα στο low pressure options από την καρτέλα *flow /thermal effects* στα *properties* του study .



Σχέδιο 27, Αποτελέσματα σε Stress με περιστροφή 52 rad/s και 35 m/s ταχύτητα ανέμου. Με έναν μεγαλύτερο H/Y τα αποτέλεσμα θα ήταν ποιο κοντά στα υπολογιζόμενα της σελίδας 36

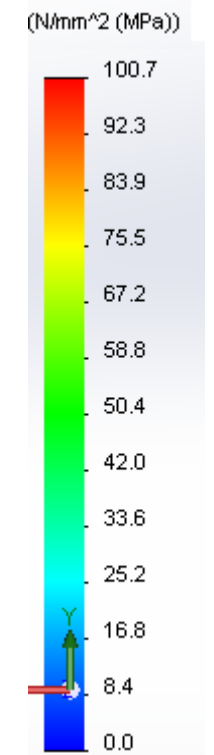
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

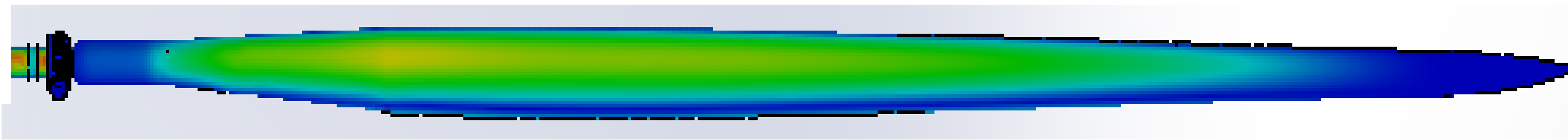


flow Simulation αποτέλεσμα επάνω όψη πτερυγίου



flow Simulation αποτέλεσμα κάτω όψη πτερυγίου

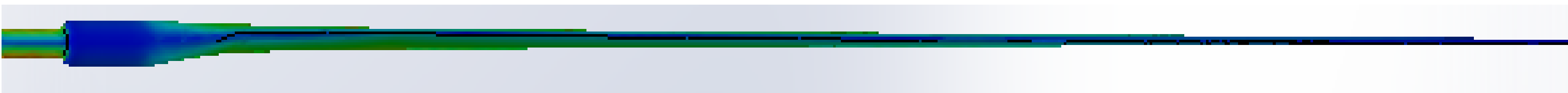




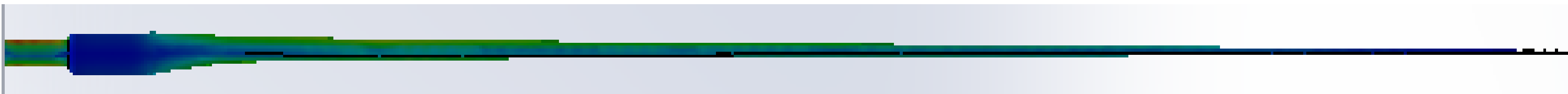
Stress Simulation αποτέλεσμα επάνω όψη



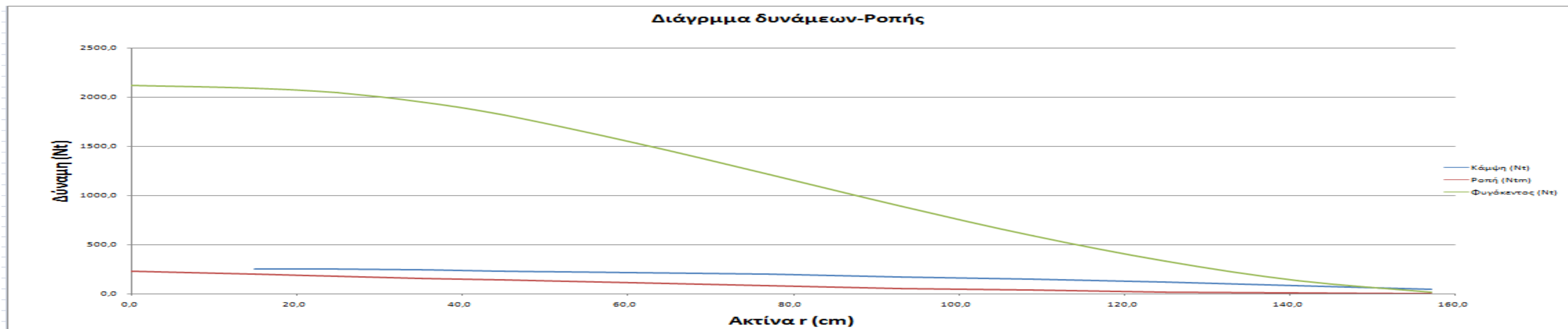
Stress Simulation αποτέλεσμα κάτω όψη



flow Simulation αποτέλεσμα πλάγια αριστερή όψη πτερυγίου



flow Simulation αποτέλεσμα πλάγια δεξιά όψη πτερυγίου



Κατασκευαστικό μέρος Πτερύγωσης

Έχοντας σχεδιάσει το καλούπι όπου θα αποκολληθεί αργότερα το πτερύγιο από πολυεστέρα και ενώ έχουν γίνει οι απαραίτητες προσομοιώσεις στον Η/Υ ,είμαστε έτοιμοι να περάσουμε στην αγορά των απαραίτητων υλικών για την κατασκευή του ιδίου του καλουπιού αλλά και του συνδέσμου με την Α/Γ.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Το καλούπι της κατασκευής είναι από πολυαιθυλένιο (*low density*)

Χρησιμοποιείται για να βρεθεί η πυκνότητα του ώστε να προσομοιωθεί αργότερα στο Η/Υ

Πολυαιθυλένιο (συντόμευση στα αγγλικά **PE**) ή **πολυαιθένιο** (όνομα κατά [IUPAC](#) **πολυαιθένιο** ή **πολυ(μεθυλένιο)**) είναι το πιο κοινό **πλαστικό**.

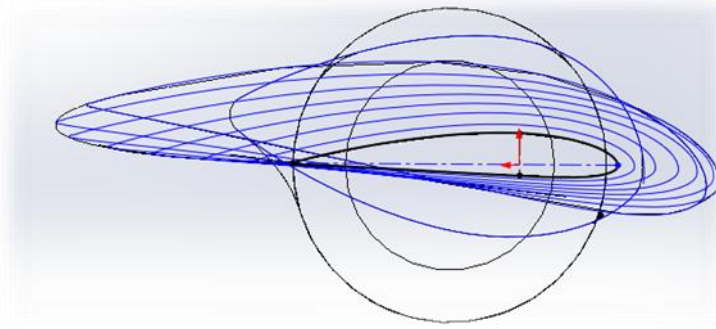
Πολλά είδη πολυαιθυλενίου είναι γνωστά, με τα περισσότερα να έχουν τον χημικό τύπο $(C_2H_4)_nH_2$. Συνεπώς το PE είναι συνήθως ένα μείγμα παρόμοιων οργανικών ενώσεων που διαφέρουν στην τιμή του n.

Το **Πολυαιθυλένιο (PE)** είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που αποτελείται από μακριές αλυσίδες υδρογονανθράκων. Είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πλαστικά στον κόσμο και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους της αγοράς και σε διάφορες εφαρμογές.

Χαρακτηριστικά: Πολύ καλή χημική αντίσταση, καλή σταθερότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, καλή συγκολλητότητα, ιδιότητες ολίσθησης, πολύ χαμηλή απορρόφηση υγρασίας.

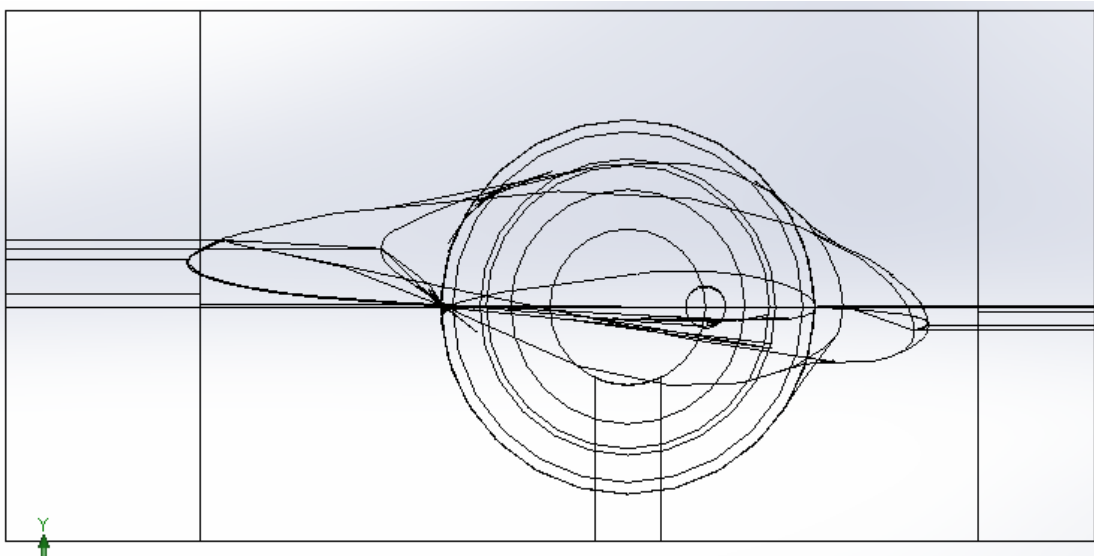
Το υλικό επιλέχτηκε για τον λόγο ότι αφενός είναι οικονομικό, αφετέρου μπορεί να επεξεργαστεί στην CNC και να επιτύχουμε μια καλή ταχύτητα. Έχει την ιδιότητα να μην κολλάει με τον πολυεστέρα που θα χρησιμοποιηθεί στο πτερύγιο ,πράγμα που μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα κατά την αποκόλληση του με το καλούπι

Αγοράστηκαν τέσσερα κομμάτια του ενός μέτρου , δύο με 100 χιλιοστά πλάτος και 40 χιλιοστά πάχος ενώ τα άλλα δύο με 140 χιλιοστά πλάτος και 40 χιλιοστά πάχος και αυτό κυρίως για λόγους οικονομίας.



Αυτό που παρατηρείται είναι πρωτίστως ότι το καλούπι θα αποτελείται από δυο βασικά μέρη, από τα όποια το κάτω μέρος τους θα είναι επίπεδο ενώ στο επάνω μέρος τους δεν θα είναι. Για το λόγο ότι οι καμπύλες της

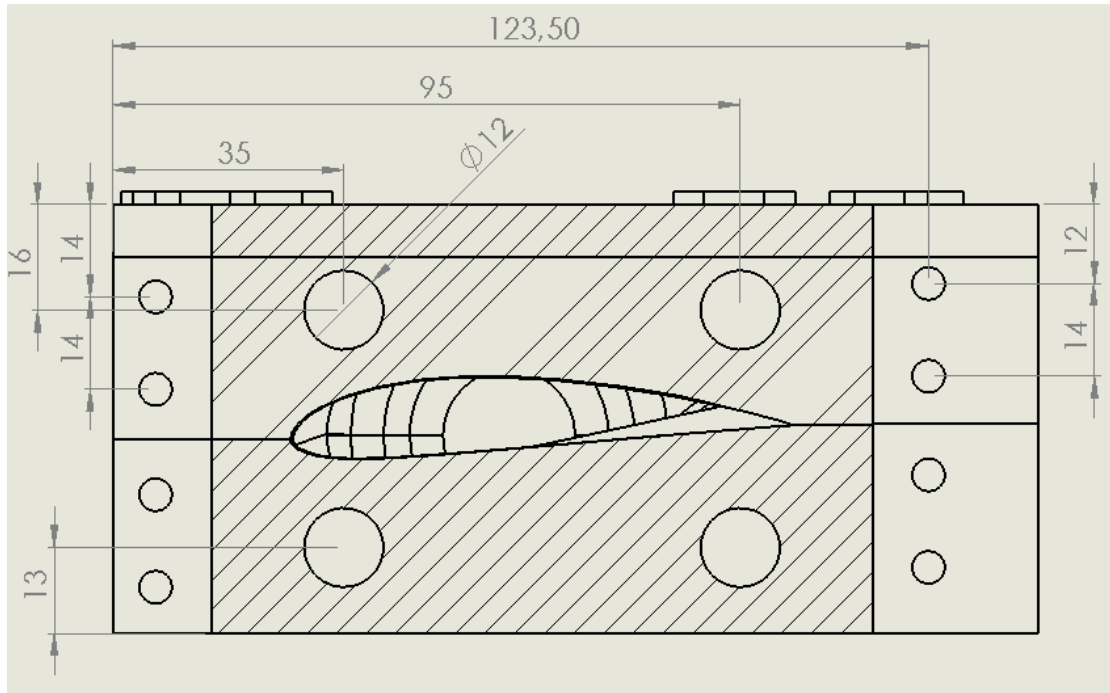
πτερύγωσης είναι υπό γωνία και φυσικά όπως καταλαβαίνουμε τα δυο μέρη όταν ενωθούν θα έχουν κάποιες διαμορφώσεις στην επιφάνεια τους όπως φαίνεται παρακάτω:



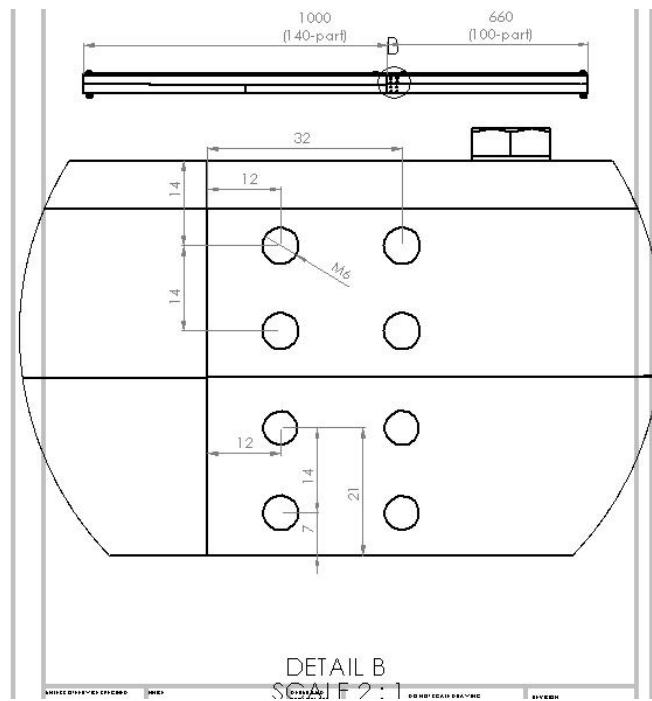
Σχέδιο 28, Πάνω και κάτω μέρος καλουπιού στο assembly με ορατή την αλλαγή των επιπέδων λόγω κλίσης των καμπύλων σε μπροστινή όψη.

Στα σημεία του χείλους πρόσπτωσης και του χείλους εκφυγής, τα επίπεδα κατανέμονται σε διαφορετικό ύψος μεταξύ κάθε καμπύλης. Η ακρίβεια παίζει σημαντικό ρόλο κατά την διάρκεια του σχεδιασμού αλλά και της κατασκευής, ώστε να καταφέρει το κοπτικό εργαλείο της φρέζας να κάνει την κατεργασία σε όλα τα σημεία αλλά και να βγει το πτερύγιο στις σωστές διαστάσεις στις οποίες έγινε η μελέτη. Τα κομμάτια του (PE) είναι ένα μέτρο (1m) τα οποία θα πρέπει να ενωθούν τέσσερα από αυτά σαν συνέχεια τους για να κατασκευαστούν δυο μέρη.

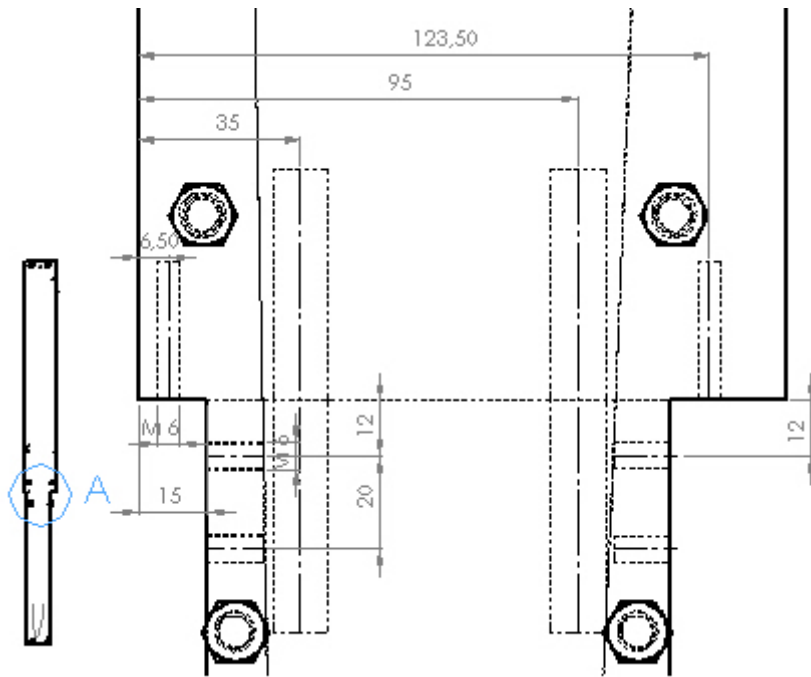
Τα συγκεκριμένα διαθέτουν τέσσερις άξονες μήκους 80 χιλιαστών και διάμετρο Φ12 στο εσωτερικό και παράλληλα των τεμαχίων από το ίδιο υλικό, όπου οι αντίστοιχες διατρήσεις έγιναν σε συμβατική φρέζα χρησιμοποιώντας τον εγκάρσιο άξονα. Στα πλαϊνά μέρη τοποθετήθηκε αλουμινένια λάμα μία σε κάθε μεριά με τέσσερις βίδες και με δυο (Allen) βίδες η κάθε μια.



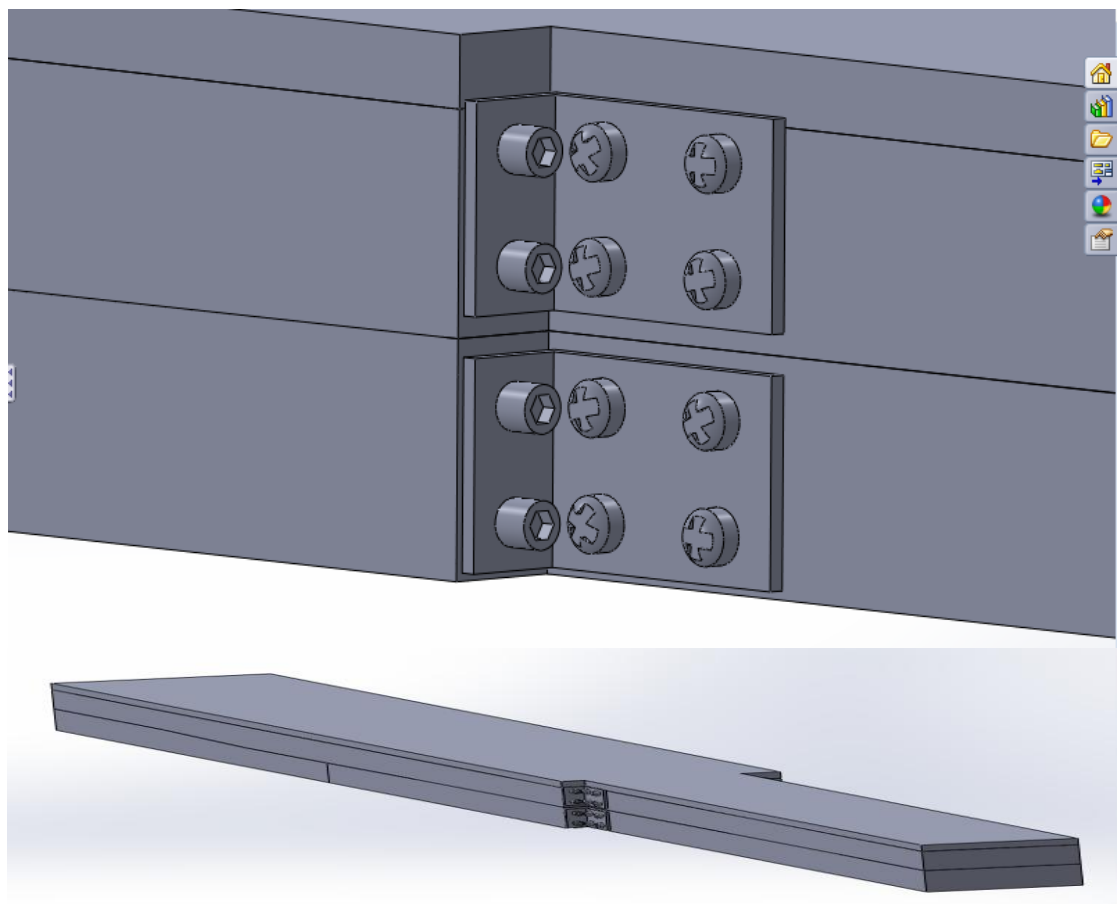
Σχέδιο 29, Πίσω όψη καλουπιών με ορατές της διατρήσεις για την σύνδεση των τεσσάρων τεμαχίων από PE



Σχέδιο 30, Πλαϊνή δεξιά όψη καλουπιών και οι διατρήσεις για την υποδοχή της λάμας από αλουμίνιο



Σχέδιο 31, Κάτοψη καλουπιών και διαστάσεις των διατρήσεων



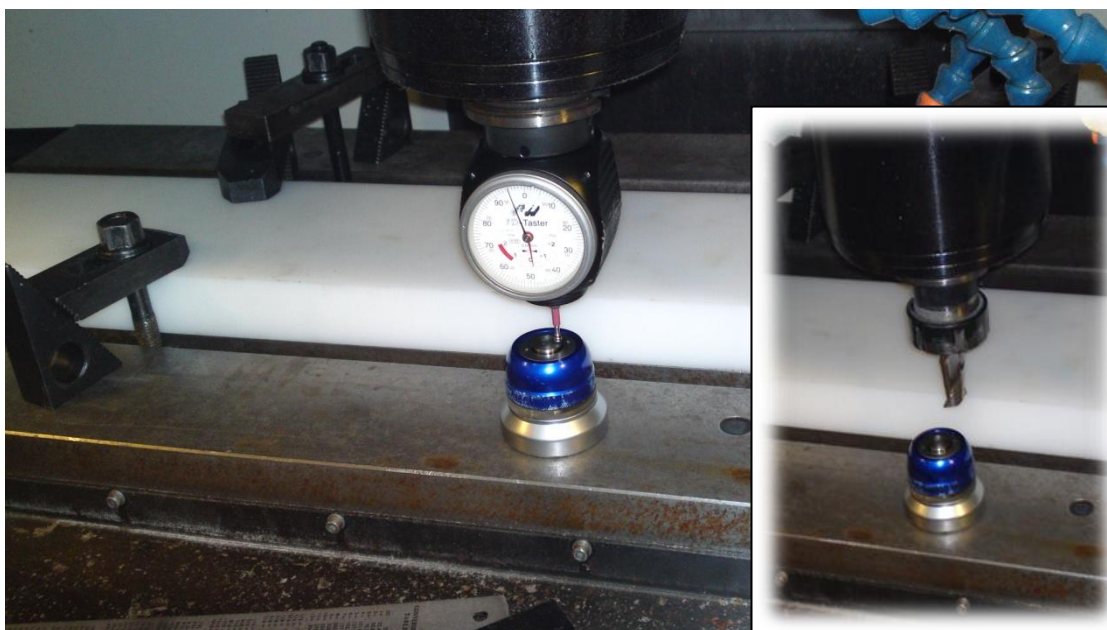
Σχέδιο 32, 3D απεικόνιση πλαιϊνής συγκράτησης

Κατεργασία καλουπιού σε Φρέζα

Η CNC του εργαστηρίου μπορεί να κατεργαστεί μέχρι 80 cm υλικό , για το λόγο αυτό θα χρειαστεί να γίνουν τρία δεσίματα του ακατέργαστου τεμαχίου με δυο διαφορετικά σημεία στήριξης για το κάθε καλούπι. Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι το Creo parametric 2.0 στο οποίο πριν εξαχθεί από αυτό ο κώδικας G θα γίνουν και οι απαραίτητες προσομοιώσεις. Αυτό φυσικά θα γίνει και στην ίδια την μηχανή πριν αυτή αρχίσει την κατεργασία για λόγους ασφάλειας της μηχανής, των κοπτικών εργαλείων αλλά και του τεμαχίου.

Στο λογισμικό του **Creo** θα χρησιμοποιηθεί ένα ακατέργαστο κομμάτι στις ίδιες διαστάσεις και το κατεργαζόμενο που σχεδιάστηκε στο **Solidworks** αφού έγινε η μετατροπή του πρώτα σε *STEP file* για να μπορεί να επεξεργαστεί στο **Creo**.

Οι κατεργασίες που θα χρειαστεί να γίνουν είναι οι εξής: ξεχόνδρισμα- φινίρισμα - διάτρηση , και για την κάθε μια θα χρειαστεί ένα κοπτικό εργαλείο με συνθήκες κοπής όπως φαίνεται παρακάτω. Αφού γίνουν οι απαραίτητοι μηδενισμοί της τράπεζας και των κοπτικών εργαλείων, η διαδικασία της κατεργασίας είναι έτοιμη να ξεκινήσει.



Εικόνα 6 . Raster και μηδενισμό κοπτικού εργαλείου.

Κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και συνθήκες κοπής

1ο dormer c 159 (ξεχόνδρισμα)

Παράμετροι Τιμές

Φρεζάρισμα (volume milling)

βάθος κοπής (step depth)	2mm
Πρόωση (cut feed rate)	996 mm/min
Ταχύτητα περιστροφής (Spindle speed)	1130rpm
Πάχος κοπής (Cut width)	10mm
Αριθμός εργαλείου (tool number)	3
Διάμετρος εργαλείου (tool diameter)	20mm

2ο dormer s 501 (φινίρισμα)

Παράμετροι Τιμές

Φρεζάρισμα (surface milling)

βάθος κοπής (step depth)	0,1mm
Πρόωση (cut feed rate)	2000 mm/min
Ταχύτητα περιστροφής (Spindle speed)	7500rpm
Πάχος κοπής (Cut width)	0,1mm
Αριθμός εργαλείου (tool number)	2
Διάμετρος εργαλείου (tool diameter)	8mm

Χρησιμοποιήθηκε για τις οπές το ίδιο κοπτικό εργαλείο με διαφορετικές συνθήκες κοπής.

Παράμετροι Τιμές (διατρήσεων)

Φρεζάρισμα (profile milling)

βάθος κοπής (step depth)	0,5mm
Πρόωση (cut feed rate)	2000 mm/min
Πρόωση βουτήγματος (plunge feed)	100 mm/min
Ταχύτητα περιστροφής (Spindle speed)	7500 rpm
Αριθμός εργαλείου (tool number)	2
Διάμετρος εργαλείου (tool diameter)	8mm

3ο dormer c 135 (επιφανειακό φινίρισμα)

Φρεζάρισμα (surface milling)

βάθος κοπής (step depth)	0,5mm
Πρόωση (cut feed rate)	180 mm/min
Πρόωση βουτήγματος (plunge feed)	80 mm/min
Ταχύτητα περιστροφής (Spindle speed)	7500 rpm
Αριθμός εργαλείου (tool number)	4
Διάμετρος εργαλείου (tool diameter)	2 mm

Πίνακας 7. Τιμές παραμέτρων κοπής.



Εικόνα 7. Κοπτικά εργαλεία CNC φρέζας

Οι κατεργασίες στο Creo που θα χρησιμοποιηθούν είναι :volume-surface και profile milling , οι οποίες για την σύσφιξη και κεντράρισμα του καλουπιού όπως και ρύθμιση της θέσης του πετυργίου στον άξονα σύνδεσης και συγκράτησης πραγματοποιήθηκαν με profile milling. Οι συνθήκες κοπής πάρθηκαν από την σελίδα selectortoolsdormer.com όπου δόθηκε στην αρχή το υλικό της κατεργασίας , οι διαστάσεις και παραμέτρους των κοπτικών εργαλείων.

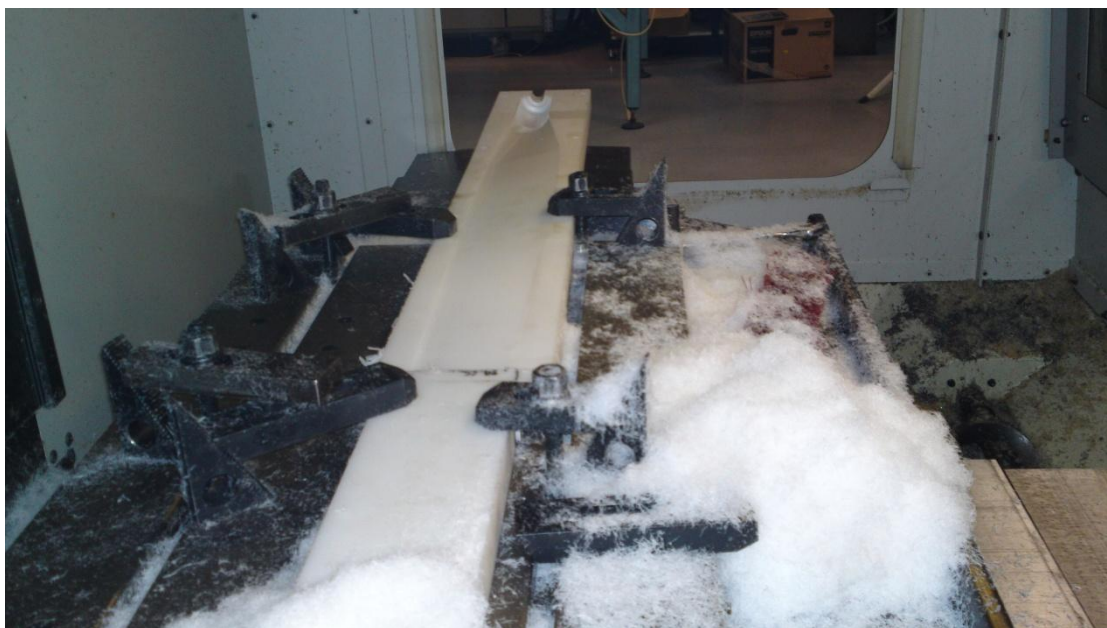


Εικόνα 8 . Τρόπος συγκράτησης ακατέργαστου τεμαχίου



Εικόνα 9 . 1ο δέσιμο τεμαχίου

Το κοπτικό (Φ20) χρησιμοποιήθηκε μόνο στο πρώτο δέσιμο όπου υπήρχε πολύ υλικό για το ξεχόνδρισμα, από εκεί και ύστερα το κοπτικό Νο1 (Φ8) έκανε την περισσότερη κατεργασία υλικού (ξεχόνδρισμα και φινίρισμα).

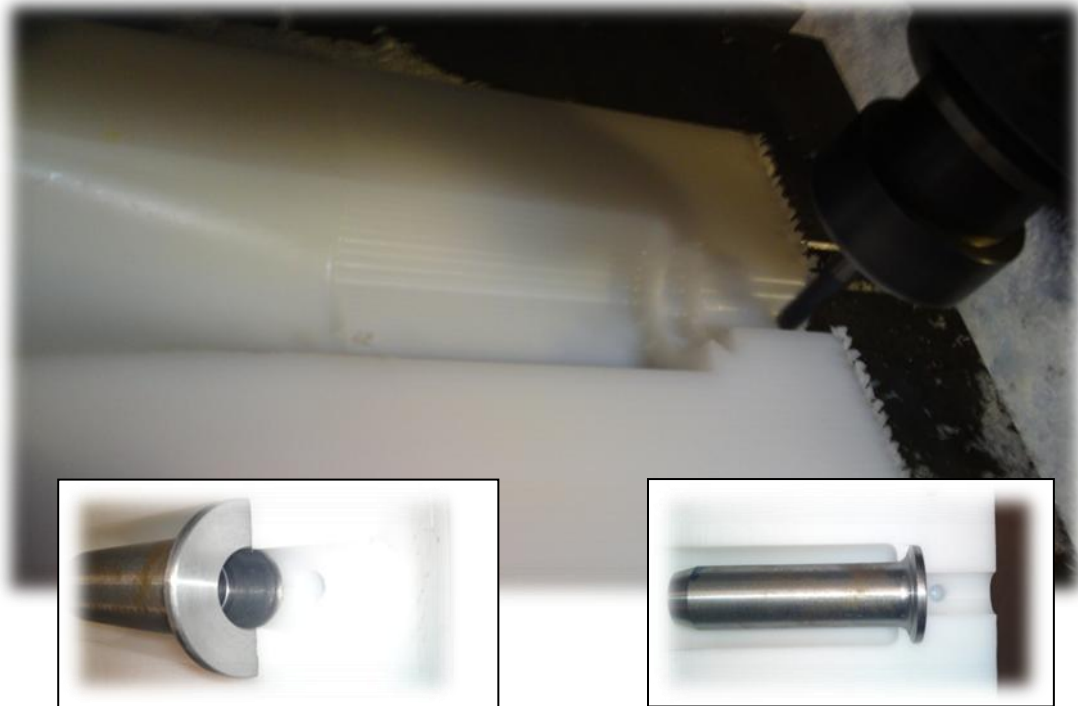


Εικόνα 10 . 2ο δέσιμο τεμαχίου



Εικόνα 11 . 3ο δέσιμο τεμαχίου

Το κοπτικό (Φ2) χρησιμοποιήθηκε στην αρχή της κατεργασίας στο πρώτο δέσιμο για την υποδοχή του χαλύβδινου τμήματος το οποίο θα κολλήσει αργότερα με τον πολυεστέρα πάνω στο πτερύγιο.



Εικόνα 12 . Όψεις από την κατεργασία με κοπτικό διαμέτρου $\Phi 2$ και δοκιμή ακρίβειας

Κατά την μεταφορά του τεμαχίου στα αριστερά για το καινούριο δέσιμο , γίνεται μηδενισμός στον άξονα x' (και -4 mm πιο μέσα λόγω του κοπτικού) όπου είναι ο μονός άξονας που αλλάζει.



Εικόνα 13 . Λήψη κατά την κατεργασία φρεζαρίσματος στην CNC

Τελικό αποτέλεσμα μετά την κατεργασία



Κατεργασία ένωσης πτερυγίου με Α/Γ σε τόρνο

Τα κύρια κατεργαζόμενα υλικά που κατασκευάστηκαν στον τόρνο του εργαστηρίου ήταν από μολυβδόυχο χάλυβα , προβαίνοντας σε παραγγελία των εξής:

τεμάχιο 1 - Φ50 , μήκος 120 mm

τεμάχιο 2 - Φ60 , μήκος 70 mm

τεμάχιο 3 - Φ20 , μήκος 80 mm

Οι κατεργασίες έγιναν από συμβατικό τόρνο με τα συνηθισμένα κοπτικά εργαλεία πλην του τεμαχίου 2, όπου θα κατασκευαστούν οι δακτύλιοι ημικύκλιοι σύνδεσμοι ,και έτσι χρειάστηκε να κατασκευαστεί ακόμα ένα ιδικό κοπτικό εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για τις εσωτερικές αυλακώσεις τους.



Εικόνα 14 . Αυτοσχέδιο κοπτικό εργαλείο για τις εσωτερικές αυλακώσεις δακτυλίων συνδέσμων πριν την κατασκευή τους.

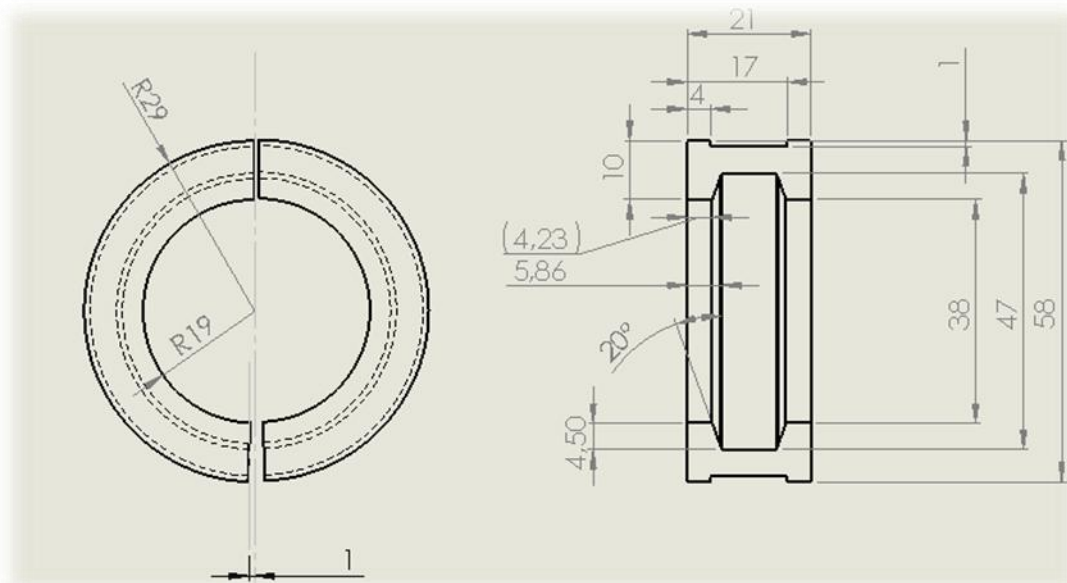


Εικόνα 15 . Λήψη από επιδαπέδιο δράπανο και κατεργασία με δίσκο κοπής.

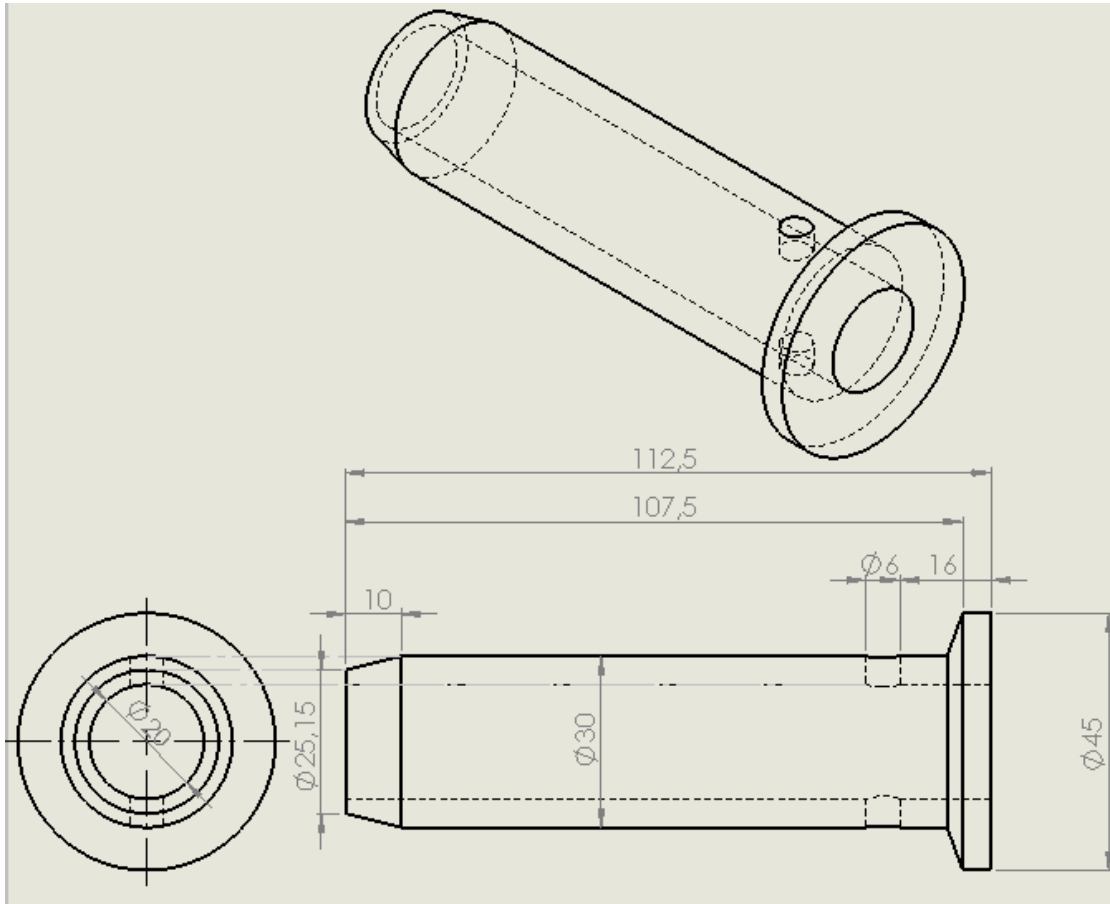


Εικόνα 16 . Αποτέλεσμα από την κατασκευή συνδέσεων των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

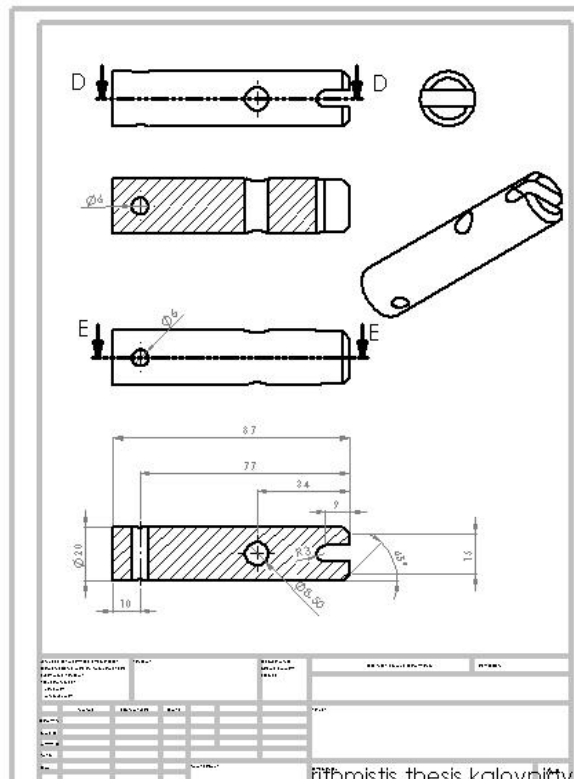
Σχέδια 2D κατασκευής των αξόνων



Σχέδιο 33 , Δακτύλιος σύνδεσμος



Σχέδιο 34 , Χαλύβδινος άξονας σύνδεσης



Σχέδιο 35 , 2D σχέδιο κατασκευής ρυθμιστή θέσης φτερού κατά την διάρκεια κατασκευής του πολυεστέρα μέσα στο καλούπι.

Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η εργασία αυτή οδήγησε στον σχεδιασμό και στην κατασκευή του φτερού μιας μικρής Ανεμογεννήτριας με τη χρήση δοκιμασμένου θεωρητικού μοντέλου [2] και λογισμικού [3,4]. Ο όλος σχεδιασμός ήταν προσαρμοσμένος σε ένα εσωτερικό πρόγραμμα του εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας για την παραγωγή τεχνολογίας μικρών Ανεμογεννητριών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα συμπεράσματα από αυτήν την εργασία είναι:

1. Σύμφωνα με τα διεθνή κριτήρια για την επάρκεια των φτερών των μικρών Α/Γ αποδείχτηκε υπολογιστικά ότι το φτερό αυτό είναι αεροδυναμικά και στατικά επαρκές.
2. Η κατασκευή του φτερού με το καλούπι που κατασκευάστηκε είναι εφικτή, σύμφωνα με την αξιολόγησή του από τον έμπειρο τεχνίτη κατασκευής αεροδυναμικών εφαρμογών κο Ατζολετάκη Αγαπητό.

Οι παρατηρήσεις είναι:

1. Δεν έγιναν δοκιμές κόπωσης ούτε και σχετικές εκτιμήσεις και πρέπει να γίνουν.
2. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια αεροτομή διαφορετική της NACA 4415 για να επιτευχτεί καλύτερη απόδοση στην Α/ Γ και αυτό γιατί για τον αριθμό Reynolds που ισχύει (στην συγκεκριμένη περιπτώσει) :

$$Re = \frac{V C}{\nu} = \frac{8,5 \cdot 0,06}{15 \cdot 10^{-6}} = 34000$$

το διάγραμμα $C_l - \alpha^\circ$ είναι κοντά στο 0,5, ενώ υπάρχουν αεροτομές με C_l μεγαλύτερο του 1,1 στον ίδιο αριθμό Re.

3. Το φτερό θα πρέπει να δοκιμαστεί σε στατική καταπόνηση και κόπωση προτού δοθεί ως αντικείμενο άξιο για βιομηχανική παραγωγή. Ούτως ή άλλως για την δοκιμή του εργαστηριακού πρωτοτύπου απαιτείται η στατική δοκιμή του.

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος μιας συνεχιζόμενης ανάπτυξης τεχνογνωσίας μικρών Ανεμογεννητριών στο Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας στο Τ.Ε.Ι Κρήτης με την συνεργασία μεταξύ των συμφοιτητών και με την υποστήριξη και την εποπτεία του καθηγητή Χρηστάκη Δ.

Η μελέτη της λειτουργίας των μικρών Α/Γ μέσω της αεροδυναμικής και η εξοικείωση με υπολογιστικά προγράμματα του βασίστηκε και αποτελεί συνέχεια των γνώσεων που αποκτήθηκαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο Τμήμα της Μηχανολογίας.

Στο σημείο αυτό, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας μου κύριο Δημήτρη Χρηστάκη για την μετάδοση των επιστημονικών γνώσεων του τόσο σε επαγγελματικό επίπεδο όσο και σε προσωπικό καθότι μου παρείχε άριστη υποστήριξη και βοήθεια για την περάτωση αυτής της έρευνας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το αρμόδιο προσωπικό του εργαστηρίου καθώς και τους συναδέλφους μου για το ομαδικό πνεύμα τους κατά την διάρκεια της κοινής πορείας μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά το Εργαστήριο του Κ. Νεκτάρου Βιδάκη το οποίο στεγάζεται στο Α.Τ.Ε.Ι και τον Γεώργιο Κόντε ,συνάδελφο και φοιτητή του Τμήματος, για το αποτέλεσμα της κατεργασίας των καλουπιών στην ψηφιακά καθοδηγούμενη μηχανή- φρέζα.

Βιβλιογραφία

1. I. Abbott E. & A.Von Doenhoff, ' **Theory of wind sections**', Dover publications inc, N.Y.1958
2. D. Le Gourieres '**Les Eoliennes**', () Edition Eurolles, Paris 1983 ISBN:
3. Νίκος Σιμισιρόγλου, '**Ένα φτερό στον άνεμο**', Λογισμικό υπολογισμού πτερυγώσεων Ανεμογεννητριών. Email: nikolaos.simisiroglou@geo.uu.se
4. Χρηστάκης Δημ. '**Υπολογισμός ισοτασικού φτερού**', προσωπική επικοινωνία, πρόγραμμα Excel Φιληρίς και σημειώσεις.
5. Πηγή εικόνας από το διαδίκτυο
(https://www.google.gr/search?q=%CE%93%CE%95%CE%A9%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%91+%CE%91%CE%95%CE%A1%CE%9F%CE%A4%CE%9F%CE%9C%CE%97%CE%A3&source=lnms&tbm=isch&a=X&ved=0ahUKEwjz3suD5LTPAhVMWhQKHTcTAOYQ_AUICCGB&biw=1366&bih=610#imgrc=4ZcVG2m_1X1JTM%3A)
6. Νικόλαος Γ. Φιάλα, πτυχιακή εργασία 2013
7. Πηγή εικόνας απο το διαδίκτυο
(<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4415-il>)
8. ANEMOΛΕΣΣΧΗ ΑΘΗΝΩΝ, 2012 Κ. ΚΑΝΑΚΗΣ
9. Απόστολου Μπουλούκο, Διπλωματική Εργασία 2013
10. International Journal of ChemTech Research, ISSN : 0974-4290, Mechanical Properties of Unsaturated, M. Davallo, H. Pasdar, M. Mohseni, Department of Chemistry, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran
11. Πηγή πίνακα απο διαδίκτυο
<https://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass>