

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*“Μοντελοποίηση και κατασκευή συναρμολογήματος καλουπιού πτερυγίου
ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα”*

Νικόλαος Γ. Φιάλα

Επιβλέπων Καθηγητής
Δρ. Βασίλειος Δημητρίου, Καθηγητής Εφαρμογών

ΧΑΝΙΑ 2013



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον Βασίλη Δημητρίου, Καθηγητή Εφαρμογών για τη συνεχή βοήθειά του στην ολοκλήρωση της εργασίας, το Θεόδωρο Παπαδουλή, Ζωγράφο Πέτρο και Βασιλείου Τάσο, για την αμέριστη βοήθειά τους στο κατασκευαστικό μέρος της εργασίας που χωρίς αυτούς δε θα είχε πραγματοποιηθεί. Ευχαριστώ τους φίλους και τους γονείς μου, ιδιαίτερα τη Μητέρα μου για τη συμπαράσταση στις καλές αλλά κυρίως τις δύσκολες στιγμές. Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην Κατερίνα.

Χανιά, 2013



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	7
1.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	8
1.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.....	8
1.2.2 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα	12
1.3 ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ Α/Γ	16
2. ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ.....	19
2.1 ΡΟΗ ΑΕΡΑ.....	19
2.2 Η ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΒΕΡΝΟΥΛΛΙ ΣΕ ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ	20
2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΑΥΤΗ	21
2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ	25
2.4.1 Τετραψήφια αεροτομή ΝΑCΑ.....	26
2.4.2 Πενταψήφια αεροτομή ΝΑCΑ.....	27
2.4.3 Εξαψήφια αεροτομή ΝΑCΑ.....	28
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ	33
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ.....	36
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ (PARTS) ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ	40
3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ (ASSEMBLY) ΣΚΕΛΕΤΟΥ	45
4. ΓΕΝΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΓΙΑ ΚΟΠΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ (PARTS) ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ (ASSEMBLY) ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ - CAM	50
4.1 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ CNC ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ CAM.....	51
4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΩΔΙΚΑ G.....	51
5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΦΙΛ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	58
5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ	58
5.2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC HAAS VF-1	59
5.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ	62
5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ G-CODE ΣΤΗ CNC ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ.....	65
5.3 ΨΗΦΙΑΚΑ ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ.....	68
5.4 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ.....	70



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μέρος καθολικής κατασκευής ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα με στόχο τη χρήση σε αστικό ή μη περιβάλλον χωρίς περιορισμούς. Συγκεκριμένα επικεντρώνεται στην επιλογή, τη μοντελοποίηση και κατασκευή του καλουπιού των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής καλουπιού για την χύτευση των πτερύγιων της ανεμογεννήτριας και με βάση τις υπάρχουσες τεχνικές, επιλέχθηκε η κατασκευή καλουπιού που βασίζεται στην χρήση συναρμολογήματος (Assembly) σκελετού. Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει τη δυνατότητα πλήρωσης των κενών του σκελετού του συναρμολογήματος με αδρανές υλικό χαμηλού κόστους επιφέροντας το τελικό αποτέλεσμα.

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων του πτερυγίου πραγματοποιήθηκε ανάλυση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη γεωμετρία τύπου πτερυγίου. Με βάση τη μελέτη αυτή, επιλέχθηκε το πρότυπο της αεροτομής και προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας και ακολούθως του πτερυγίου.

Για την μοντελοποίηση του συναρμολογήματος του καλουπιού ήταν απαραίτητη η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του πτερυγίου σε περιβάλλον Computer Aided Design (CAD). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη μοντελοποίηση του συναρμολογήματος του σκελετού του καλουπιού σύμφωνα με τις διαστάσεις του πτερυγίου. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα τμήματα του προφίλ του συναρμολογήματος της πάνω και της κάτω πλευράς. Επίσης έγινε τρισδιάστατη μοντελοποίηση των αποστατών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση των ελασμάτων και για την τήρηση των αποστάσεων. Σε περιβάλλον Assembly έγινε συναρμολόγηση του σκελετού με εισαγωγή 68 ελασμάτων και 66 αποστατών. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική σχεδίαση του συναρμολογήματος του καλουπιού είναι το Autodesk Inventor®.

Τα τμήματα της πάνω και της κάτω πλευράς εισήχθησαν σε πρόγραμμα κύκλων κατεργασίας (CAM) με σκοπό την εξαγωγή κώδικα G και την κοπή των ελασμάτων στο ψηφιακά καθοδηγούμενο κέντρο κατεργασίας τριών αξόνων (CNC) VF1 της εταιρίας HAAS. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του κώδικα G είναι το Cambam®. Για την επισκόπηση του κώδικα G χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Ncplot®.

Στο κατασκευαστικό μέρος της εργασίας, από μία πλάκα αλουμινίου κόπηκαν 68 ελάσματα πάχους 10mm τα οποία κατεργάστηκαν στην εργαλειομηχανή CNC για να αποκτήσουν τη γεωμετρία της αεροτομής NACA0015 σύμφωνα με την αεροδυναμική μελέτη. Τέλος κόπηκαν και 66 αποστάτες από κοίλο άξονα αλουμινίου υψηλής ακρίβειας και έγινε η ένωση του συναρμολογήματος του σκελετού του καλουπιού.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Διατμηματικό Εργαστήριο του Τ.Ε.Ι Κρήτης, του Παραρτήματος Χανίων, Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών - SMM, στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος.



ABSTRACT

This thesis is the first part of a manufacturing project focusing to the construction of a vertical axis wind turbine (V.A.W.T), aiming to the use in urban environment. Specifically the project is focused in the choice, the modeling and the construction of a mold for the V.A.W.T blades. Because of the high material cost of the mold's construction and according to the existing techniques, the construction is based in the manufacturing of the assembly of its frame. With this technique the frame's gaps can be filled with a lower cost inert material to get the final mold with lower cost and without loss of functionality and accuracy.

For the calculation of the blades dimensions, an aerodynamic analysis was made. Based on this analysis the airfoil geometry was chosen and the wind turbine's dimensions were calculated. According to the dimensions of the wind turbine the blades dimensions were specified.

The first step of the modeling was the 3D design of the blade in a CAD environment. According to the 3D design of the blade, the 3D model of the mold's frame was designed. Initially the upper and then the lower parts of the frame's profile where designed. After that the spacers where designed, which are needed to keep the profiles in a steady and in a fixed distance. In the same CAD environment the assembly of all of the parts was constructed. The CAD software used for the modeling is the Autodesk Inventor®. The upper and the lower parts where imported in a CAM software to generate the G-code for the cut in the 3 axis CNC milling machine VF1 of the HAAS company. The CAM software used for the G-code generation was the Cambam®.

For the construction of the full assembly, 68 laminates were cut from aluminum stock, and 66 spacers from an aluminum tube. The laminates where CNC machined to get the shape of the chosen airfoil profile. Finally the mold's frame was assembled.

This thesis took place in the laboratory of Simulations Machining & Manufacturing at the section of Renewable Energies in the Department of Natural Recourses and Environment of the Technical Educational Institute of Crete, Branch of Chania.



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η αλλοίωση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής από τη χρήση κλασικών πηγών ενέργειας (υγρών καυσίμων, λιγνίτη κλπ.) έχει ως αποτέλεσμα το ενδιαφέρον του ανθρώπου για ενέργεια να στραφεί προς τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον και ουσιαστικά ανεξάντλητες.

Οι ήπιες μορφές ενέργειας βασίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση τη γεωθερμία και την ενέργεια από τις παλίρροιες. Οι βασιζόμενες στην ηλιακή ακτινοβολία ήπιες μορφές ενέργειας είναι ανανεώσιμες, μιας και δεν πρόκειται να εξαντληθούν όσο υπάρχει ο ήλιος, δηλαδή για μερικά ακόμα δεκαετομμύρια χρόνια. Η βιομάζα είναι ηλιακή ενέργεια δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης, η αιολική εκμεταλλεύεται τους ανέμους που προκαλούνται απ' τη θέρμανση του αέρα ενώ αυτές που βασίζονται στο νερό εκμεταλλεύονται τον κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης του νερού και την κυκλοφορία του. Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας ανακινήθηκε τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα κυρίως των πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής. Στην αρχή ήταν πολύ ακριβές και σε πειραματικό στάδιο, σήμερα όμως μπορούν να συναγωνιστούν της συμβατικές μορφές ενέργειας και λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια. Στην ευρωπαϊκή ένωση είναι υποχρεωτικό σε κάθε κράτος, ένα ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Στο πρώτο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών, αναφέρονται τα είδη και τα μέρη τους και δίδεται έμφαση στις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα. Στο δεύτερο Κεφάλαιο ακολουθεί η μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς αεροτομών, των δυνάμεων που επιδρούν σε αυτές και πως οι δυνάμεις αυτές συμπεριφέρονται. Παρουσιάζεται η εξέλιξη των αεροτομών και οι σειρές των προτύπων αεροτομών της οικογένειας NACA και πραγματοποιείται η επιλογή του πτερυγίου. Ακολουθεί η διαστάσιολόγηση της ανεμογεννήτριας και με βάση αυτή του πτερυγίου. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του πτερυγίου και η δημιουργία του συναρμολογήματος του σκελετού του καλουπιού με τη βοήθεια της μεθόδου Computer Aided Design (CAD). Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες γένεσης του κώδικα G για κάθε ένα από τα μέρη με τη βοήθεια της μεθόδου Computer Aided Manufacturing (CAM). Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή του συναρμολογήματος του καλουπιού. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο άνεμος (αιολική ενέργεια) δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη.

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος εκμεταλλευόταν την δύναμη του ανέμου. Η παλαιότερη αναφορά είναι τα ιστία των караβιών που χρησιμοποιούσαν την δύναμη του ανέμου για την κίνησή τους (Εικόνα 1). Μεταγενέστερα η εκμετάλλευση του ανέμου γινόταν από τους ανεμόμυλους που χρησιμοποιούνταν για την άλεση σιτηρών, την άντληση νερού και σε άλλες εργασίες. Επίσημες αναφορές επιβεβαιώνουν πως ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τους αρχαίους μόλις χρόνια. Χώρες όφειλαν τον πλούτο και την ναυτιλιακή ικανότητά τους στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα πλοία τους αλλά και τους ανεμόμυλους άντλησης νερού ή άλεσης σιτηρών.



Εικόνα 1. Ανεμόμυλοι στην Ίο και εκμετάλλευση ανέμου από ιστία πλοίων.

Στις μέρες μας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια πραγματοποιείται με ανεμογεννήτριες. Αν υπήρχε η δυνατότητα, με την σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5.1m/sec, σε ύψος 10m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

1.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Με βάση την ταχύτητα περιστροφής τους, οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε πολύστροφες και αργόστροφες, ή ακριβέστερα ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου λ (Tip Speed Ratio) που ορίζεται από την εξίσωση 1.1:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_w} \quad 1.1$$

όπου, R η ακτίνα της πτερωτής, ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και V_w η ταχύτητα του ανέμου. Πιο συνήθης είναι η κατάταξή τους ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του δρομέα των πτερυγίων σε ανεμογεννήτρια κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα. Οι ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι και οι πλέον διαδεδομένες καθώς επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας τόσο ως προς το βαθμό απόδοσης, όσο και ως προς το κόστος παραγωγής. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται πρότυπο θαλάσσιο αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα στη Δανία.



Εικόνα 2. Θαλάσσιο αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα στη Δανία.

1.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα είναι ευρέως γνωστές και είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διότι έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα περιστροφής. Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τους λέγεται δρομέας και μπορεί να αποτελείται από ένα πτερύγιο (μονόπτερος) ή και περισσότερα (πολύπτερος) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.



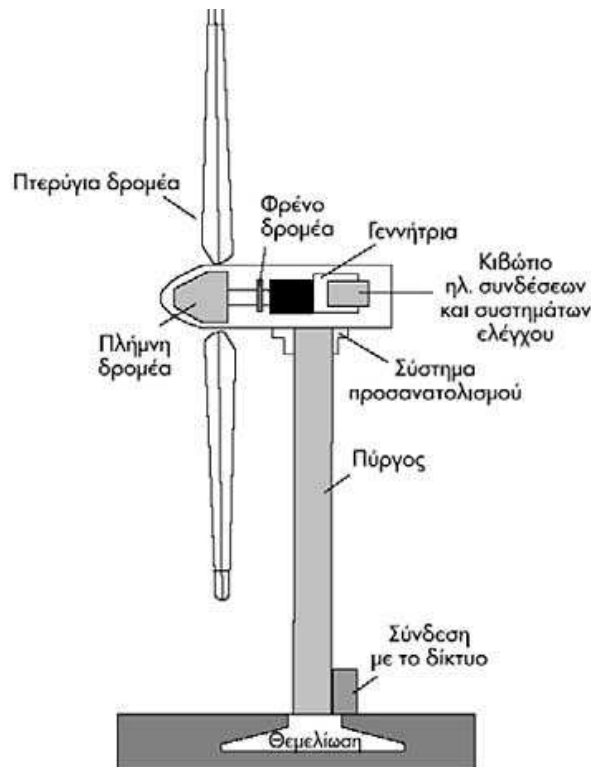
Εικόνα 3. Μονόπτερη, δίπτερη και τρίπτερη ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.

Το πιο συνηθισμένο είναι ο δρομέας να αποτελείται από τρία πτερύγια. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου μπορεί να έχουν τον δρομέα μπροστά από τον πύργο, ανάντη ή πίσω από τον πύργο, κατάντη όπως και παρουσιάζονται και στην Εικόνα 4 αριστερά και δεξιά αντίστοιχα.



Εικόνα 4. Ανεμογεννήτρια με δρομέα ανάντη και κατάντη αντίστοιχα.

Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης πρέπει το επίπεδο του δρομέα να είναι παράλληλο στην κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στις μικρές ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου, υπάρχει ειδικό πτερύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα ως προς τον άνεμο. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες υπάρχει ειδικός μηχανισμός που ονομάζεται σύστημα προσανατολισμού όπως και διακρίνεται στην Εικόνα 5.



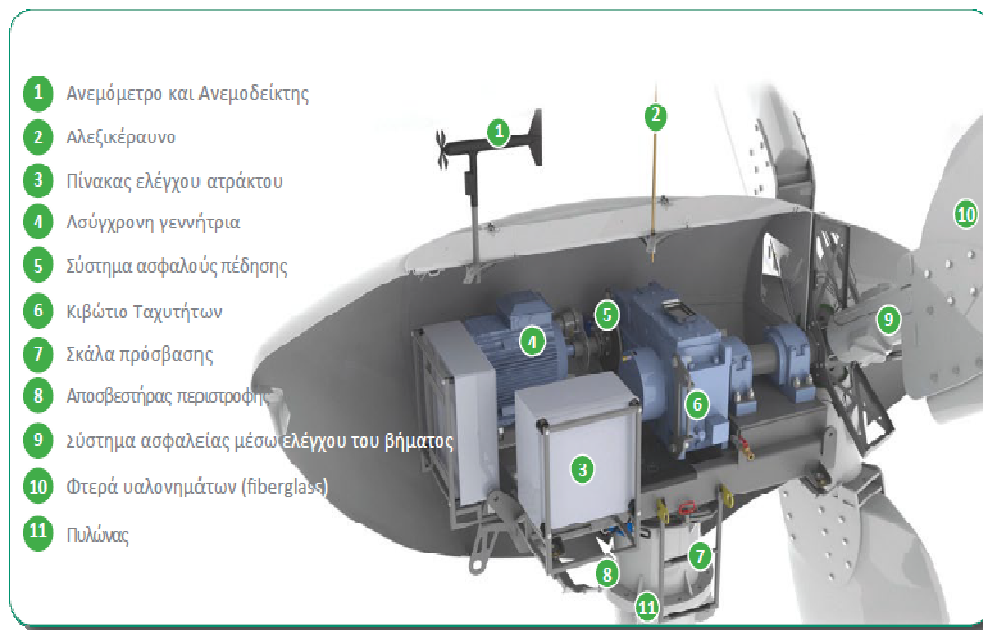
Εικόνα 5. Βασικά μέρη ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5. Ο **δρομέας** αποτελείται συνήθως από δύο ή τρία πτερύγια κατασκευασμένα συνήθως από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα **πτερύγια** προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη **άξονα** τους μεταβάλλοντας το βήμα. Τα πτερύγια, «συλλαμβάνουν» τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Η αεροδυναμική των πτερυγίων είναι σχεδόν ίδια με αυτή στα φτερά των αεροπλάνων. Ο **πύργος** στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το **σύστημα μετάδοσης της κίνησης**, αποτελείται από τον κύριο **άξονα**, τα **έδρανα** του και το **κιβώτιο** πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής. Η ηλεκτρική **γεννήτρια**, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους, συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει επίσης το **σύστημα πέδης** το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας [1]. Η ακινητοποίηση του δρομέα μπορεί να γίνει με:

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει σε διαφορετική κατεύθυνση από αυτήν του ανέμου
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης
- Πέδηση του άξονα που πραγματοποιείται με δισκόφρενο τύπου ασφάλειας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα

Το **σύστημα προσανατολισμού**, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου. Ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου, είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει.

Στην Εικόνα 6 φαίνεται η άτρακτος μιας ανεμογεννήτριας η οποία είναι εξοπλισμένη εκτός των προαναφερθέντων με το ανεμόμετρο-ανεμοδείκτη που μετράει την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου για να ελέγχει την έναρξη και διακοπή της κίνησης, το αλεξικέραυνο, τον πίνακα ελέγχου της ατράκτου που στεγάζει τα ηλεκτρονικά μέρη της ατράκτου σε περιβάλλον προστατευμένο από τις καιρικές συνθήκες για μέγιστη αξιοπιστία, τη σκάλα πρόσβασης και τον αποσβεστήρα περιστροφής ο οποίος εξομαλύνει την κίνηση για να μειωθούν τα φορτία στον πύργο και τον ρότορα.



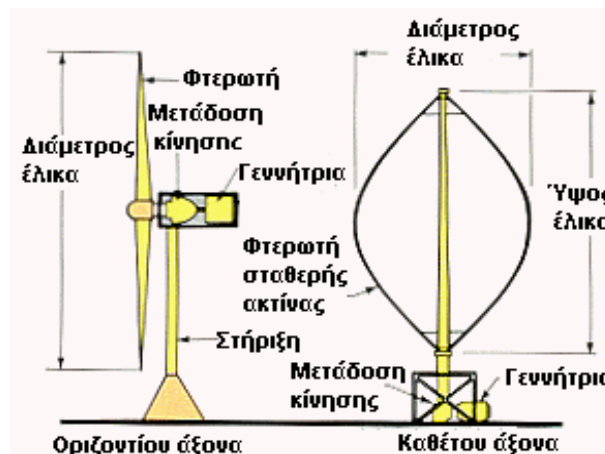
Εικόνα 6. Άτρακτος ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

1.2.2 Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα περιστροφής έχουν συνήθως χαμηλότερη απόδοση σχετικά με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, γι' αυτό δεν είναι και ιδιαίτερα διαδεδομένες. Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερο αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον, ενώ είναι πιο αποτελεσματικές στο αστικό περιβάλλον, καθώς έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τους ανέμους διαφορετικών κατευθύνσεων. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστροφής είναι πιο αθόρυβες και επηρεάζονται λιγότερο από τις αναταράξεις και τις δονήσεις, συγκριτικά πάντα με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, επειδή δεν χρειάζονται άνεμο συγκεκριμένης διεύθυνσης για να περιστραφούν.

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα αποτελούνται από τα ίδια μέρη με τις ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα, όμως η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται στο έδαφος οπότε η συντήρησή τους είναι πιο εύκολη. Στην Εικόνα 7 φαίνονται τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (αριστερά) σε αντιστοιχία με τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα (δεξιά).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, η Savonius και η Darrieus. Η Savonius έχει σχήμα S στην κάτοψη, ενώ η Darrieus είναι σαν καλάθι. Ωστόσο, υπάρχουν και ανεμογεννήτριες που είναι συνδυασμός των δύο αυτών τύπων (βλ. Εικόνα 7).



Εικόνα 7. Βασικά μέρη ανεμογεννητριών.

❖ Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα τύπου Darrieus

Ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα Darrieus έγινε από έναν Γάλλο αεροναυπηγό τον George Jean Marie Darrieus το 1931. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus αποτελούνται από καμπτόμενα πτερύγια και λειτουργούν με τη χρήση των δυνάμεων της άντωσης που ασκούνται πάνω στα πτερύγια. Ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι δύο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8, τρία ή και περισσότερα. Ο λόγος που τα πτερύγια είναι καμπτόμενα είναι οι μεγάλες καμπτικές τάσεις που προκαλούνται λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων από την περιστροφή. Οι καμπτικές τάσεις μειώνονται σημαντικά εάν τα πτερύγια έχουν τη μορφή που θα έπαιρνε ένα χαλαρό σχοινί κατά την περιστροφή του. Αυτό συμβαίνει σε μεγάλες

ανεμογεννήτριες. Σε μικρότερες, όπου οι φυγοκεντρικές δυνάμεις δεν είναι τόσο μεγάλες, τα πτερύγια είναι κατακόρυφα ή έχουν διάφορες μορφές ανάλογα με τις παραλλαγές του δρομέα.



Εικόνα 8. Ανεμογεννήτρια Darrieus.

Τα πτερύγια τοποθετούνται σε διάταξη 180 ή 120 μοιρών. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς ο διπτέρυγος δρομέας έχει έντονη μεταβολή της ροπής με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή. Αντίθετα η αεροδυναμική του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη την περιοχή λειτουργίας του. Επίσης η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη από αυτής του διπτέρυγου. Βέβαια είναι προφανές ότι ο διπτέρυγος είναι πιο οικονομικός.

Η απόδοση της ανεμογεννήτρια Darrieus είναι καλή σε σχετικά υψηλές ταχύτητες αέρα, όμως κατά την εκκίνηση δεν αναπτύσσεται ικανοποιητική ροπή με αποτέλεσμα να μην εκκινεί χωρίς «βοήθεια». Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού είναι η εξωτερική διέγερση, δηλαδή η γεννήτρια να χρησιμοποιείται σαν κινητήρας περιστροφής του δρομέα. Μόλις ο δρομέας αποκτήσει την κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής ώστε να αρχίσει να αποδίδει ενέργεια η γεννήτρια επαναφέρεται στην αρχική της κατάσταση.

Άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση στον άξονα περιστροφής ενός μικρού δρομέα Savonius (περιγράφονται σε ακόλουθη παράγραφο) που χάρη στη μεγάλη ροπή εκκίνησης εξασφαλίζει εκκίνηση χωρίς προβλήματα. Μια τέτοια ανεμογεννήτρια παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Ανεμογεννήτρια Darrieus με βοηθητική Savonius

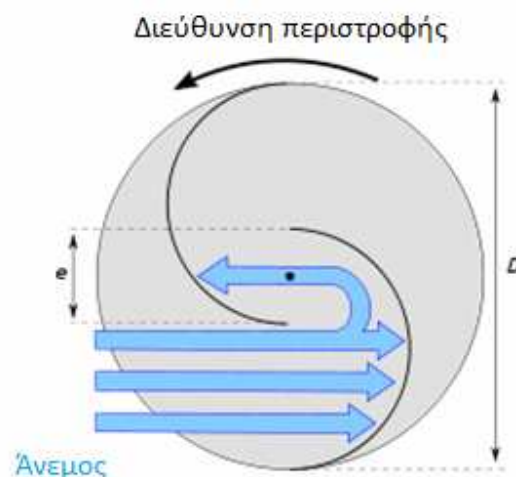
Παραλλαγή της ανεμογεννήτρια Darrieus είναι η Darrieus-H (βλ. Εικόνα 10), που έχει πάρει το όνομα της από το σχήμα της που θυμίζει το Η. Η διαφορά με την κλασική Darrieus είναι τα πτερύγια τα οποία είναι κάθετα σε αυτήν την περίπτωση. Λόγω των κάθετων πτερυγίων η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να είναι μεγαλύτερη άρα η απόδοση είναι καλύτερη. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι με την σωστή επιλογή πτερυγίων, μπορεί να επιτευχτεί εκκίνηση χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας ή τη χρήση βοηθητικής Savonius.



Εικόνα 10. Ανεμογεννήτριες Darrieus τύπου-H

❖ **Ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα τύπου Savonius**

Στις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα τύπου Savonius, ο δρομέας ονομάζεται τύπου S λόγω του σχήματος της κάτοψης των πτερυγίων. Όπως παρουσιάζεται και στις Εικόνες 11 και 12. Η περιστροφή του δρομέα από τον άνεμο δεν οφείλεται μόνο στη διαφορά του συντελεστή αντιστάσεως του κοίλου και του κυρτού πτερυγίου, αλλά και στο διάκενο (e), χάρη στο οποίο ο αέρας περνάει μέσα από αυτό και αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας έτσι τη ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα.



Εικόνα 11. Λειτουργία ανεμογεννήτριας Savonius

Ο δρομέας Savonius λόγω του ότι είναι κατακόρυφου άξονα και παρουσιάζει συμμετρία προσανατολίζεται αυτόματα κατά τη διεύθυνση του ανέμου και δεν έχει

συνεπώς την ανάγκη των ακριβών διατάξεων προσανατολισμού του οριζοντίου άξονα. Επίσης το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα απ' ευθείας στο έδαφος όπου βρίσκεται και η γεννήτρια. Έτσι μειώνεται το κόστος σε σχέση με του οριζοντίου άξονα που τα όργανα βρίσκονται στον πύργο. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι το ότι εκκινεί μόνος του και παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης και λειτουργίας. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν ωθήσει σε μία σειρά ερευνών με σκοπό την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού για χρήση σε μικρές ισχύς, κυρίως σε οικιακά περιβάλλοντα παρά την αρκετά χαμηλή απόδοσή τους. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται μία τυπική ανεμογεννήτρια Savonius για οικιακή χρήση αλλά και παραλλαγές που μπορούν να έχουν οι ανεμογεννήτριες αυτές για χρήση σε αστικό περιβάλλον [2].



Εικόνα 12. Ανεμογεννήτρια Savonius και παραλλαγές σε αστικό περιβάλλον.

1.3 ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ Α/Γ

Με βάση τα όσα παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε πλέον, στηριζόμενοι στις προϋποθέσεις που θα τεθούν για τη χρήση της ανεμογεννήτριας που θα κατασκευαστεί, να κρίνουμε και να καθορίσουμε τον τύπο της. Η επιλογή αυτή δύναται να πραγματοποιηθεί σωστά και ευκολότερα έχοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζοντίου και καθέτου άξονα συγκεντρωμένα, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν για την επιλογή τύπου ανεμογεννήτριας που θα κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών – SMM περιλαμβάνουν:

- τη χρήση σε αστικό περιβάλλον
- το ελέγχιμο του μεγέθους για ερευνητικούς σκοπούς, μετρήσεις και βελτιστοποίηση
- όσο το δυνατό οικονομικότερη κατασκευή, αφού θα υλοποιηθεί με ίδια χρηματοδότηση και υφιστάμενο εξοπλισμό, αλλά και εφόσον θα απευθύνεται στο μέσο πολίτη για οικιακή χρήση με προσιτό κόστος
- μέγεθος ικανό για την υλοποίηση κατεργασιών στις διατιθέμενες εργαλειομηχανές

	Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα	Ανεμογεννήτριες Καθέτου Άξονα
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα. Λόγω του ύψους του πύργου μεγάλες ταχύτητες ανέμων. Μεταβλητού βήματος πτερύγια με βέλτιστο έλεγχο της γωνίας προσβολής με αποτέλεσμα την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. 	<ul style="list-style-type: none"> Δεν απαιτείται μηχανισμός προσανατολισμού ως προς τον άνεμο. Χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές όπου δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση ψηλού πύργου και σε περιοχές χαμηλότερου αιολικού δυναμικού όπως αστικές περιοχές. Είναι καλύτερες για περιοχές με μεγάλη τύρβη. Δηλαδή για ανέμους διαφορετικών κατευθύνσεων. Οικονομικότερη κατασκευή.
Μειονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> Το μεγάλο μήκος των ιστών και των πτερυγίων δυσκολεύει την μεταφορά που μπορεί να κοστίζει και το 20% του συνολικού κόστους του εξοπλισμού. Απαιτούνται γερανοί και ειδικά μηχανήματα για την εγκατάσταση. Ο θόρυβος λόγω των υψηλών στροφών, ο οποίος προέρχεται από τα μηχανικά μέρη και την κίνηση των πτερυγίων της Α/Γ 	<ul style="list-style-type: none"> Μειωμένη απόδοση σε σχέση με ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανεμογεννητριών καθέτου και οριζοντίου άξονα.

Η χρήση σε αστικό περιβάλλον συνεπάγεται λειτουργία σε χαμηλής έντασης ανέμους της τάξεως των 5 με 10 m/s, με έντονους στροβιλισμούς λόγω των εμποδίων που συναντά ο άνεμος, όπως κτίρια και άλλα εμπόδια. Δεδομένου του ότι η ανέγερση ανεμογεννητριών μεγάλων διαστάσεων, όπως απαιτούν οι του οριζοντίου άξονα, δεν επιτρέπεται από την πολεοδομία και των προϋποθέσεων που τέθηκαν, επιλέχθηκε η κατασκευή ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα που λειτουργεί σε χαμηλούς και διαφορετικών κατευθύνσεων ανέμους. Επίσης οι σχετικά μικρές απαιτήσεις σε διαστάσεις μπορούν να καλυφθούν από τις υποδομές που το Εργαστήριο Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών διαθέτει και παράλληλα θα υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης σε ταράτσες, οροφές κτιρίων είτε στο έδαφος.

Η ανεμογεννήτρια που θα κατασκευαστεί θα είναι Darrieus τύπου-H μιας και αυτή αποτελεί το βασικό τύπο ανεμογεννητριών καθέτου άξονα. Επίσης προσφέρει τη δυνατότητα αναβάθμισης και προσθήκης μικρότερης, τύπου Savonius όπως



Νικόλαος Φιάλα

παρουσιάστηκε παραπάνω και δίνει πολλαπλές επιλογές διερεύνησης χαρακτηριστικών, που επιδέχονται μελέτη και βελτιστοποίηση.

Την επιλογή αυτή θα ακολουθήσει η συγκεκριμενοποίηση του ανεμοπτερυγίου που θα κατασκευαστεί καθώς αποτελεί το βασικότερο μέρος της ανεμογεννήτριας αφού καθορίζει την αεροδυναμική συμπεριφορά της.



2. ΡΟΗ ΑΕΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Η Αεροδυναμική αποτελεί κλάδο της Μηχανικής των ρευστών με αντικείμενο έρευνας και μελέτης τους νόμους που διέπουν τη ροή του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από διάφορα σώματα καθώς και τη κίνηση αυτών στη ροή του αέρα. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι ή έρευνα των δυνάμεων που ασκούνται έτσι ώστε να είναι αφενός προβλέψιμη η κίνησή τους αφετέρου η καλλίτερη σχεδίαση και βελτιστοποίηση των μεγεθών τους 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 άντωσης με ελάχιστη οπισθέλκουσα δύναμη.

2.1 ΡΟΗ ΑΕΡΑ

Τα βασικά είδη ροής ενός ρευστού είναι η στρωτή και η τυρβώδης. Κατά τη στρωτή ροή οι γειτονικές στρώσεις του ρευστού κινούνται σχηματίζοντας λείες (όχι απαραίτητα ευθείες) γραμμές ροής (γραμμή ροής είναι η γραμμή στην οποία είναι επαπτόμενο το άνωσμα της ταχύτητας ροής), χωρίς να πραγματοποιείται ανάμιξη μακροσκοπικής κλίμακας μεταξύ δυο γειτονικών στρώσεων. Η στρωτή ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις συνεκτικότητας (εξαιτίας των διατμητικών τάσεων, δηλαδή οι δυνάμεις τριβών που οφείλονται στην παρουσία στερεών τοιχωμάτων) είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις αδράνειας. Οι στρωτές ροές αποτελούν θεωρητική περίπτωση και πολύ σπάνια συμβαίνουν στη φύση.

Στην τυρβώδη ροή τα ρευστά σωματίδια έχουν ακανόνιστη, σχεδόν τυχαία, διακυμαινόμενη κίνηση. Η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο τόσο κατά μέγεθος, όσο και κατά διεύθυνση. Η ροή κατά στρώσεις με λείες γραμμές ροής που παρατηρείται στη στρωτή ροή, διασπάται πλήρως και συμβαίνει έντονη μακροσκοπική ανάμιξη μεταξύ δυο γειτονικών στρώσεων. Η τυρβώδης ροή πραγματοποιείται όταν οι δυνάμεις αδράνειας είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας.

Σημαντική παράμετρος που καθορίζει τη ροή, είναι ο αριθμός Reynolds που δίνεται από τη σχέση 2.1:

$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad 2.1$$

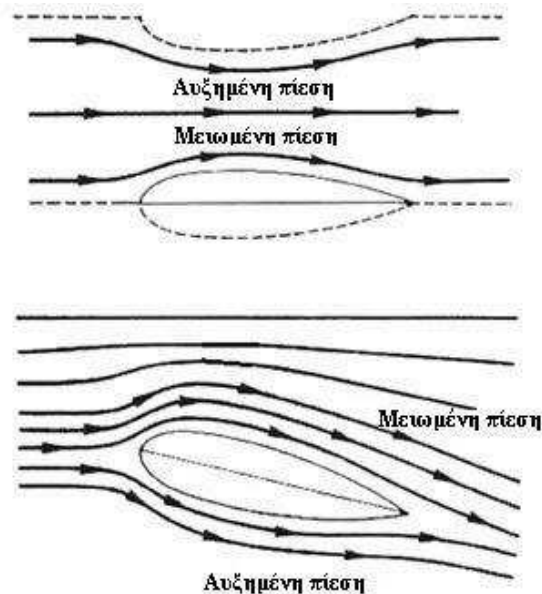
όπου, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού (kg/m), V είναι η μέση ταχύτητα του αντικειμένου σε σχέση με το υγρό (m/s), L είναι το χαρακτηριστικό μήκος του σώματος (επιφάνεια που ταξιδεύει το ρευστό), μ το δυναμικό ιξώδες (Pa·s ή N·s / m ή kg / (m · s))

και ν το κινηματικό ιξώδες ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$) (m²/s) [3]. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, σε ροή

ρευστού μέσα σε κυλινδρικό αγωγό η ροή είναι στρωτή για αριθμούς Reynolds κάτω από περίπου 4000, για 2000<Re<4000 η ροή είναι μεταβατική ενώ για αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους από 4000 η ροή μετατρέπεται σε τυρβώδη.

2.2 Η ΑΡΧΗ ΤΟΥ BERNOULLI ΣΕ ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ

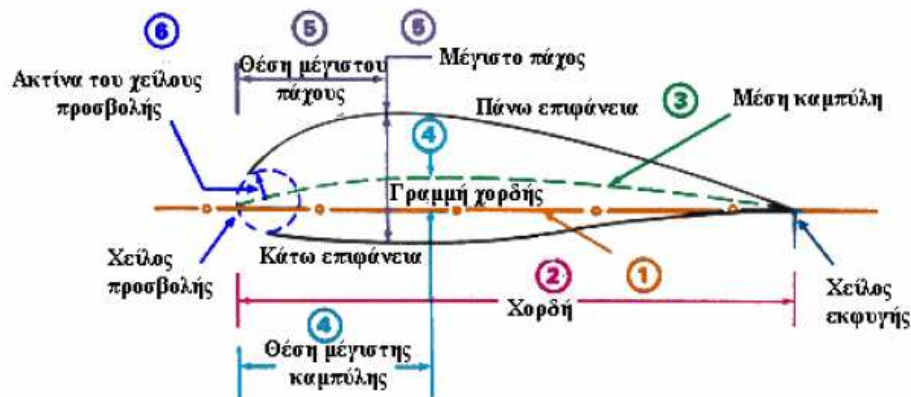
Τα πτερύγια είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε στο πάνω μέρος της επιφάνειας η ροή αέρα να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι στην κάτω πλευρά. Αυτό συμβαίνει διότι ο αέρας έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση στην άνω απ' ότι στη κάτω πλευρά, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13. Ροή αέρα την επιφάνεια αεροτομής.

Η αρχή του Bernoulli λέει ότι η συνολική ενέργεια ενός ρευστού σε κίνηση παραμένει σταθερή, άρα η πίεση στην πάνω επιφάνεια του φτερού είναι μικρότερη διότι η ροή αέρα είναι ταχύτερη ενώ στην κάτω επιφάνεια όπου η ροή είναι πιο αργή, η πίεση αυξάνεται. Λόγω της διαφοράς πίεσης δημιουργείται μια δύναμη η οποία σπρώχνει το φτερό προς τα πάνω. Η δύναμη αυτή ονομάζεται άντωση. Τα πτερύγια είναι αεροδυναμικά σχήματα τα οποία είναι φτιαγμένα με σκοπό να επιτυγχάνουν την καλύτερη δυνατή άντωση με όσο το δυνατόν λιγότερες τριβές και αντίσταση αέρα.

2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΑΥΤΗ

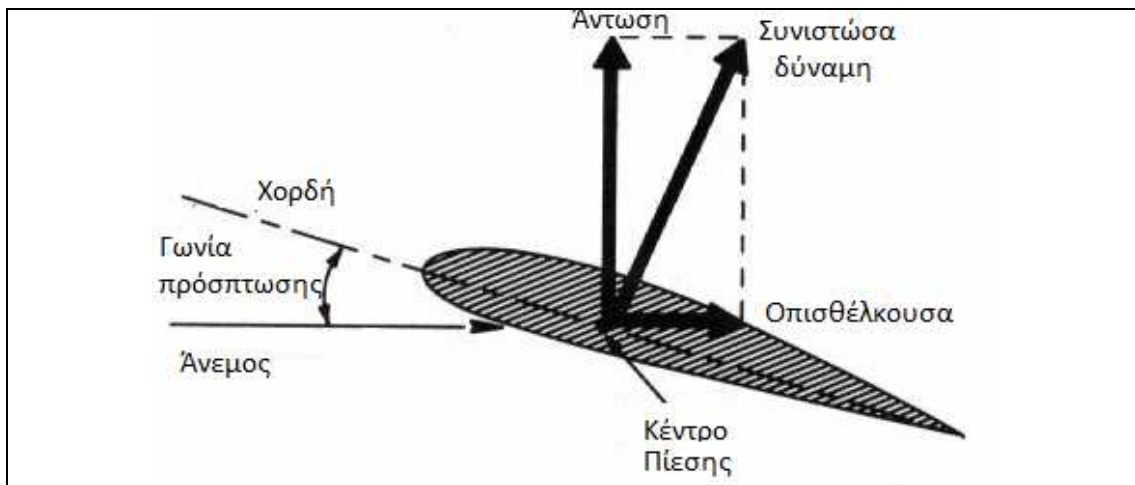


Εικόνα 14. Γεωμετρία αεροτομής.

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 14, τα κύρια χαρακτηριστικά ενός πτερυγίου είναι:

- i. Η κοίλη επιφάνεια που ονομάζεται χέιλος πρόσπτωσης(leading edge)
- ii. ακολουθούμενη απο μια αιχμηρή ακμή διαφυγής (trailing edge)
- iii. Η χορδή, συνδέει την ακμή πρόσβολής(leading edge) με τη ακμή εκφυγής(trailing edge)
- iv. Άνω επιφάνεια(upper surface)
- v. Κάτω επιφάνεια(lower surface)
- vi. Η μέση γραμμή(Η camber line), ισαπέχει απο την άνω και την κάτω επιφάνεια κατα μήκος του πτερυγίου. Επίσης είναι σημαντική παράμετρος ως αναφορά τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του φτερού
- vii. Η μέγιστη κυρτότητα(max camber), η θέση της μέγιστης κυρτότητας βοηθάει να καθοριστεί το σχήμα της μέσης γραμμής. Αυτές οι ποσοτικές εκφράζονται με κλάσμα η 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 πρόσβολής με κέντρο στην μέση γραμμή εκφράζει την κυρτότητα της ακμής πρόσπτωσης.

Άντωση 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 άντωση 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 15. Άντωση και οπισθέλκουσα δύναμη.

Άντωση είναι η δύναμη που κάνει ένα αεροπλάνο να πετάει εξού και το όνομα τις. Η άντωση εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης, όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης τόσο μικρότερη είναι και η άντωση. Μαθηματικά η δυναμική άντωση εκφράζεται ως:

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_L \quad 2.2$$

όπου, C_L ο συντελεστής άντωσης (Lift Coefficient) ο οποίος περιγράφεται παρακάτω, ρ η πυκνότητα του ρευστού, A η επιφάνεια του σώματος κάθετα στη ροή, U ταχύτητα του σώματος ως προς το ρευστό.

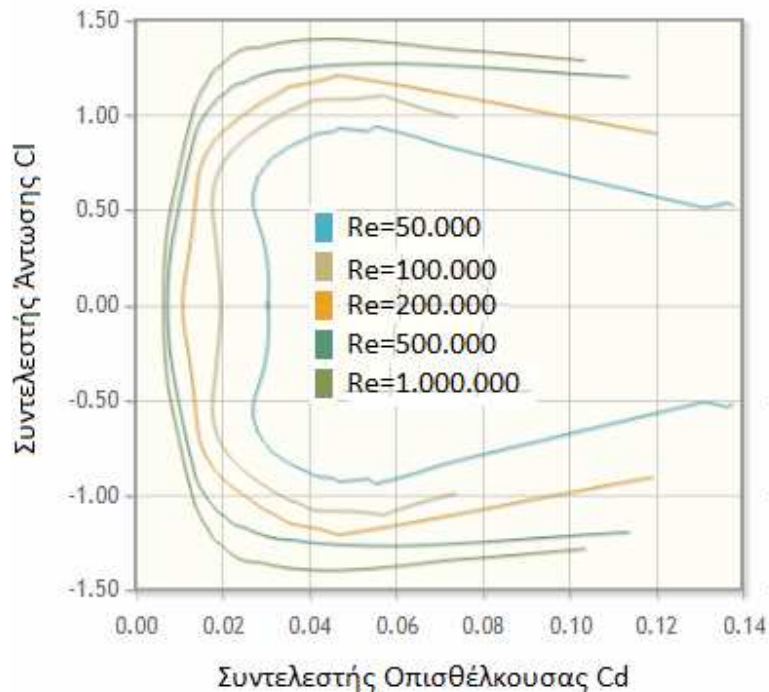
Οπισθέλκουσα είναι μέγιστη αν η διεύθυνση του ρευστού είναι κάθετη στην επιφάνεια τις αεροτομής ενώ ελάχιστη αν η διεύθυνση του ρευστού είναι παράλληλη της αεροτομής. Σε άλλες περιπτώσεις μας ενδιαφέρει η οπισθέλκουσα (π.χ. ανεμογεννήτρια Savonius) και σε άλλες θέλουμε να την μειώσουμε (π.χ. στο αεροπλάνο).

Τα χαρακτηριστικά της άντωσης και της οπισθέλκουσας περιγράφονται από τους συντελεστές άντωσης 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 2.3 που ακολουθεί:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad \text{και} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad 2.3$$

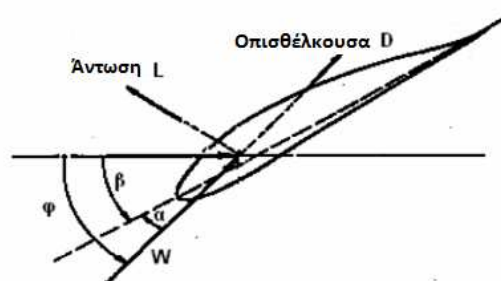
όπου, L η άντωση (N), D οπισθέλκουσα (N), V η ταχύτητα, A , (m^2) η επιφάνεια του δρομέα και ρ η πυκνότητα του ρευστού.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 16 απεικονίζεται ο συντελεστής άντωσης (C_l) ως προς τον συντελεστή οπισθέλκουσας (C_d) της αεροτομής Naca0015 για διάφορους αριθμούς Reynolds.



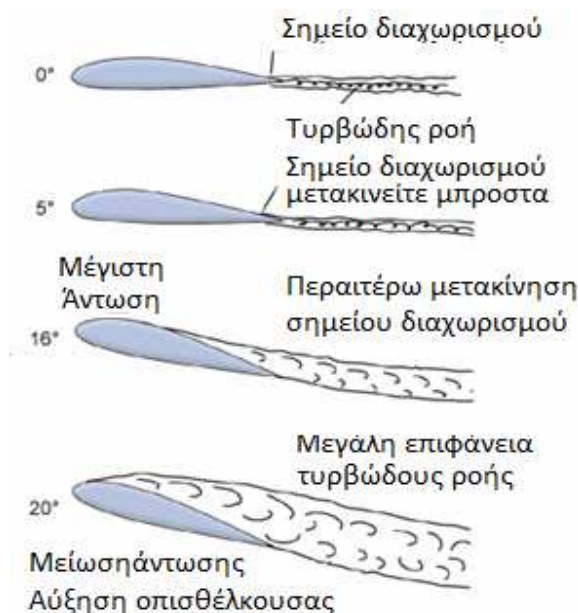
Εικόνα 16. Γράφημα συντελεστή άντωσης ως προς συντελεστή οπισθέλκουσας για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.

Η γωνία προσβολής ή πρόσπτωσης (angle of attack/incidence) είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη χορδή και τη σχετική ταχύτητα του ανέμου. Η άντωση είναι αποτέλεσμα της γωνίας πρόσπτωσης. Η γωνία β 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 ϕ (flow angle) είναι το άθροισμα των γωνιών α (γωνία πρόσπτωσης) και β όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 17.



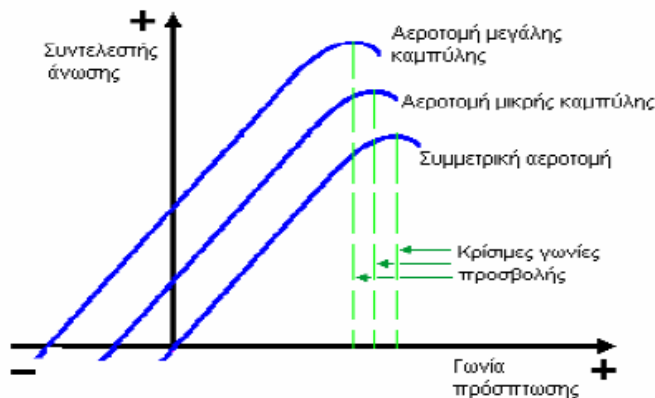
Εικόνα 17. Γωνίες α -πρόσπτωσης, β -βήματος και ϕ ($=\alpha+\beta$).

Τα περισσότερα πτερύγια χρειάζονται θετική γωνία πρόσπτωσης για την παραγωγή άντωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία προσβολής τόσο μεγαλύτερη είναι η άντωση, αν όμως η γωνία γίνει αρκετά μεγάλη, τότε στην πάνω επιφάνεια σχηματίζονται στροβιλισμοί και η άντωση μειώνεται απότομα (stall). Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ανέμου καθώς διέρχεται από την επιφάνεια της αεροτομής για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα, για μηδενική γωνία πρόσπτωσης η ροή είναι στρωτή καθ' όλη την διάρκεια επαφής του αέρα με την επιφάνεια της αεροτομής. Στο χείλος εκφυγής υπάρχει ένα σημείο που η στρωτή ροή γίνεται τυρβώδης. Για γωνία πρόσπτωσης ίση με 5 μοίρες το σημείο αυτό μεταφέρεται ελαφρά προς την επιφάνεια της αεροτομής, ενώ για γωνία πρόσπτωσης ίση με 16 μοίρες το σημείο διαχωρισμού της ροής μεταφέρεται ακόμα πιο μπροστά στην επιφάνεια της αεροτομής με αποτέλεσμα να υφίσταται μέγιστη άντωση. Τέλος για γωνία πρόσπτωσης ίση με 20 μοίρες έχουμε τυρβώδη ροή με αποτέλεσμα τη μείωση της άντωσης και μεγάλη αύξηση της οπισθέλκουσας δύναμης.



Εικόνα 18 .Συμπεριφορά ροής ανέμου για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 19, απεικονίζονται η κρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης για αεροτομές μεγάλης καμπύλης, μικρής καμπύλης και συμμετρικής καμπύλης.



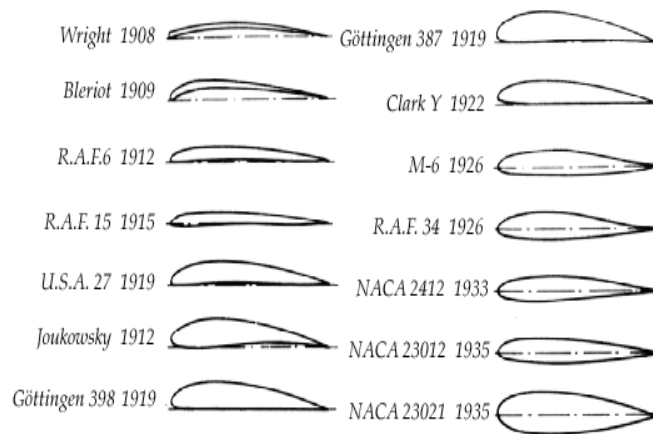
Εικόνα 19. Γράφημα συντελεστή άνωσης για αεροτομές διαφορετικής καμπύλης.

2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ

Οι πρώτες μελέτες αεροτομών ξεκίνησαν το 1800. Βέβαια από τότε ήταν γνωστό ότι αν τοποθετηθεί μία επίπεδη επιφάνεια σε γωνία ως προς μία ροή ανέμου παράγεται άνωση. Επίσης έγινε τότε γνωστό ότι οι καμπύλες επιφάνειες είναι πολύ πιο αποδοτικές. Από τις πρώτες καταγεγραμμένες έρευνες στο σχήμα των αεροτομών είναι του H.F Philips, ο οποίος αποτύπωσε το σχήμα των φτερών των πουλιών για την δημιουργία μιας σειράς αεροτομών και η έρευνα έγινε σε μία από τις πρώτες αεροσύρραγγες. Ακολούθησαν έρευνες πολλών ετών ώστε οι αεροτομές να πάρουν την μορφή που έχουν σήμερα. Η ιστορική εξέλιξη των αεροτομών παρουσιάζεται στην Εικόνα 20.

Σημαντικό άλμα στη βελτίωση και εξέλιξη των αεροτομών αποτέλεσε η εμφάνιση της θεωρίας των αεροτομών Joukowski. Η θεωρία αυτή επέτρεψε τη συστηματική και ανεξάρτητη μελέτη της επίδρασης του πάχους της αεροτομής και της μέσης γραμμής της πάνω στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της αεροτομής, όπως αυτά εκφράζονται με τους συντελεστές άνωσης C_l και ροπής C_m .

Οι αεροτομές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις συμμετρικές και στις μη συμμετρικές. Οι συμμετρικές έχουν την πάνω και την κάτω επιφάνεια ίδιες. Οι αεροτομές αυτές είναι πολύ διαδεδομένες και συχνά συναντιόνται σε ελικόπτερα σε αντλίες νερού και σε ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα. Η άλλη μεγάλη κατηγορία αεροτομών είναι οι μη συμμετρικές όπου η πάνω με την κάτω επιφάνεια ποικίλουν ως προς τον σχεδιασμό τους. Η άνωση που επιτυγχάνεται με τις αεροτομές αυτές είναι πολύ μεγάλη και πολλές φορές με μηδενική γωνία προσβολής, ανάλογα την αεροτομή. Οι πιο συνήθεις χρήσεις τους είναι στα αεροσκάφη αλλά και σε ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 20. Ιστορική εξέλιξη αεροτομών.

Με βάση τη βιβλιογραφία οι τύποι των αεροτομών που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε ανεμογεννήτριες ανήκουν στην οικογένεια προτύπων NACA. Τα αρχικά NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) σημαίνουν Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή για την Αεροναυτική, 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 περυγίου θα ανήκει σε αυτή την οικογένεια. Οι σειρές των αεροτομών NACA περιγράφονται παρακάτω.

2.4.1 Τετραψήφια αεροτομή NACA

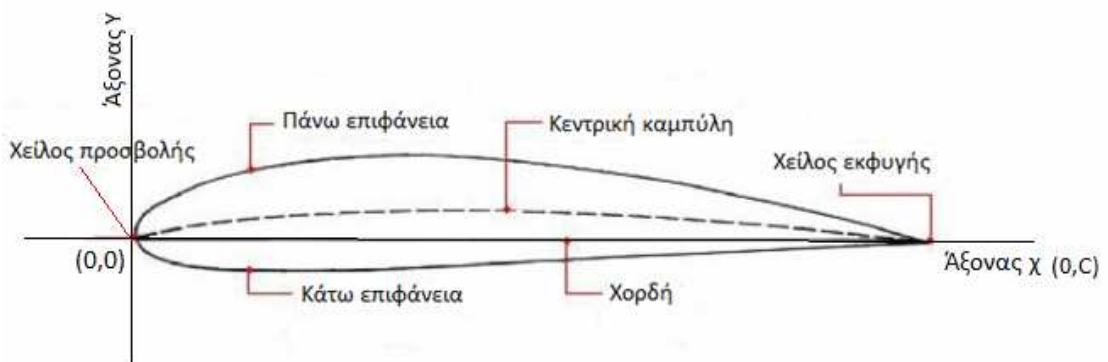
Οι τετραψήφιες αεροτομές NACA ακολουθούνται από τέσσερα ψηφία μετά τη λέξη NACA (Naca mpxX). Το πρώτο ψηφίο συμβολίζεται με m και είναι η μέγιστη τιμή της καμπύλης (max camber) σε % της χορδής, το δεύτερο ψηφίο συμβολίζεται με p και μας δίνει τη θέση της μέγιστης καμπύλης σε δέκατα της χορδής από το χείλος προσβολής. Τα δύο τελευταία ψηφία μας δίνουν το μέγιστο πάχος της αεροτομής σε % της χορδής. Η πλέον γνωστή αεροτομή της οικογένειας αυτής είναι η αεροτομή 4412, η οποία έχει μέγιστο πάχος 12% της χορδής, η θέση της μέγιστης τιμής της καμπύλης (max camber) είναι το 40% της χορδής και το μέγιστο πλάτος είναι το 4% της χορδής. Για την κατασκευή της αεροτομής πρώτα ορίζονται οι ακραίες τιμές του x από 0 έως c, όπου c το μήκος της χορδής. Η κεντρική καμπύλη (βλ. Εικόνα 21) ορίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Yc = \frac{M}{p^2}(2px - x^2), 0 \leq x \leq p \quad \text{και} \quad Yc = \frac{M}{(1-p^2)}(1-2p) + (2px - x^2), p \leq x \leq c \quad 2.4$$

Η κατανομή του πάχους πάνω(+) και κάτω(-) απο την κεντρική γραμμή υπολογίζεται απο την εξίσωση:

$$Yt = \frac{T}{0,2} (0,2969\sqrt{x} - 0,1260x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4) \quad 2.5$$

Τέλος για τον υπολογισμό της πάνω και της κάτω επιφάνειας της αεροτομής χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις $Xu = X - yt \sin \theta$, $Yu = Yc + Yt \cos \theta$, για την πάνω επιφάνεια και $Xl = X + Yt \sin \theta$, $Yl = Yc - Yt \cos \theta$ για την κάτω επιφάνεια. Οι δείκτες u και l δηλώνουν την πάνω και την κάτω επιφάνεια.



Εικόνα 21.Κεντρική καμπύλη, πάνω και κάτω επιφάνεια αεροτομής.

2.4.2 Πενταψηφία αεροτομή NACA

Βελτίωση των αεροτομών 4 ψηφίων της NACA αποτέλεσε η εμφάνιση των αεροτομών 5 ψηφίων. Στις αεροτομές αυτές η θέση της μέγιστης κυρτότητας της μέσης γραμμής μεταφέρθηκε κατά το δυνατό μπροστά για να αυξηθεί ο μέγιστος συντελεστής άντωσης της αεροτομής.Το πρώτο ψηφίο όταν πολλαπλασιαστεί με 0,15 δίνει τον συντελεστή άνωσης C_l , το δεύτερο και το τρίτο ψηφίο όταν διαιρεθούν με το 2 δίνουν την απόσταση του σημείου μέγιστης καμπύλης από το χείλος προσβολής σε % της χορδής. Το τέταρτο και πέμπτο ψηφίο εκφράζουν το μέγιστο πάχος σε % της χορδής.Για παράδειγμα η αεροτομή NACA12045 έχει συντελεστή άνωσης 0,15, το μέγιστο πάχος είναι 45% της χορδής και βρίσκεται στη θέση 10% της χορδής από το χείλος προσβολής. Για τον υπολογισμό της αεροτομής πρώτα ορίζονται οι ακραίες τιμές του x απο 0 εως c, όπου c το μήκος της χορδής(Εικόνα 21). Η κεντρική καμπύλη ορίζεται από τις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$Yc = \frac{K1}{6} [x^3 - 3mx^2 + m^2(3-m)x] \quad \text{για } 0 < x < p, \quad Yc = \frac{K1m^3}{6} (1-x) \quad \text{για } p < x < 1 \quad 2.6$$

Γνωρίζοντας το p υπολογίζονται οι τιμές του m και K1 οι οποίες φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 2:

Κεντρική Καμπύλη	Θέση μέγιστης καμπύλης (ρ)	M	K1
210	0,5	0,0580	361,400
220	0,10	0,1260	51,640
230	0,15	0,2025	15,957
240	0,20	0,2900	6,643
250	0,25	0,3910	3,230

Πίνακας 2. Τιμές m και K1 για διάφορες τιμές της κεντρικής καμπύλης.

Ο υπολογισμός της διανομής του πάχους γίνεται με την ίδια εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την τετραψήφια αεροτομή. Ο υπολογισμός των συντεταγμένων της άνω και της κάτω επιφάνειας γίνεται επίσης όπως στην τετραψήφια αεροτομή.

2.4.3 Εξαψήφια αεροτομή NACA

Όλες οι αεροτομές που αναφέρθηκαν είναι αποτέλεσμα εμπειρικής σχεδίασης και εκτεταμένων πειραμάτων σε αεροδυναμικές σήραγγες. Οι αεροτομές 6 ψηφίων της NACA αποτελούν τις πρώτες αεροτομές που σχεδιάστηκαν θεωρητικά, ώστε να έχουν δεδομένη κατανομή πίεσης. Η κατανομή πίεσης είναι τέτοια, ώστε να διατηρείται κατά το δυνατό στρωτή ροή γύρω από την αεροτομή, άρα και χαμηλός συντελεστής αντίστασης της αεροτομής. Έτσι, οι αεροτομές αυτές έχουν το μέγιστο πάχος τους λίγο προς τα πίσω σχετικά με τις αεροτομές άλλων σειρών με σκοπό την καθυστέρηση της μετάβασης της στρωτής ροής σε τυρβώδη. Για σταθερή τιμή φόρτισης των αεροτομών αυτών κατά τη χορδή, η εξίσωση της μέσης γραμμής δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{Yc}{c} = -\frac{Cl_i}{4} \left[\left(1 - \frac{x}{c}\right) \ln\left(1 - \frac{x}{c}\right) + \frac{x}{c} \ln\left(\frac{x}{c}\right) \right] \quad 2.7$$

Είναι φανερό ότι η εκλογή του συντελεστή Cl_i καθορίζει τη μέση γραμμή, άξιο δε παρατήρησης είναι ότι οι τεταγμένες της μέσης γραμμής είναι ανάλογες του συντελεστή Cl_i , γι' αυτό και συνήθως στη βιβλιογραφία αναφέρεται η μέση γραμμή για Cl_i μονάδα. Οι αεροτομές αυτής της οικογένειας χαρακτηρίζονται από 5 ψηφία. Στην αεροτομή 64-212 για παράδειγμα, το πρώτο ψηφίο δηλώνει ότι ανήκει στις αεροτομές 6-ψηφίων. Το δεύτερο ψηφίο καθορίζει τη θέση της μέγιστης πίεσης σαν ποσοστό της χορδής, το τρίτο ψηφίο καθορίζει τον συντελεστή άνωσης στην ιδανική γωνία πρόσπτωσης και τα δύο τελευταία δίνουν το μέγιστο πάχος ως ποσοστό της χορδής. Άλλες οικογένειες αεροτομών που έχουν αναπτυχθεί από τη NACA είναι η σειρά 1, σειρά 16, σειρά 7, των οποίων τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3 [4]:



NACA	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
4-Ψηφίων	<ol style="list-style-type: none"> 1. Καλά χαρακτηριστικά αποκόλλησης 2. Μικρή μετατόπιση του κέντρου πίεσης για μεγάλο εύρος ταχυτήτων 3. Μικρή επίδραση της τραχύτητας 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Χαμηλός μέγιστος συντελεστής άνωσης 2. Σχετικά υψηλή αντίσταση 3. Υψηλή ροπή πρόνευσης
5-Ψηφίων	<ol style="list-style-type: none"> 1. Υψηλός μέγιστος συντελεστής άνωσης 2. Χαμηλή ροπή πρόνευσης Μικρή επίδραση της τραχύτητας 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μέτρια χαρακτηριστικά αποκόλλησης 2. Σχετικά υψηλή αντίσταση
Σειρά-16	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αποτρέπει κορυφές χαμηλών πιέσεων 2. Μικρή αντίσταση σε υψηλές ταχύτητες 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Σχετικά μικρή άνωση
Σειρά-6	<ol style="list-style-type: none"> 1. Υψηλός μέγιστος συντελεστής άνωσης 2. Πολύ χαμηλή αντίσταση σε ένα μικρό εύρος συνθηκών λειτουργίας 3. Έχει βελτιστοποιηθεί για υψηλές ταχύτητες 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Υψηλή αντίσταση έξω από την περιοχή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας 2. Υψηλή ροπή πρόνευσης 3. Μέτρια χαρακτηριστικά αποκόλλησης 4. Έντονη ευαισθησία στην τραχύτητα
Σειρά-7	<ol style="list-style-type: none"> 1. Πολύ χαμηλή αντίσταση σε μικρό εύρος συνθηκών λειτουργίας 2. Χαμηλή ροπή πρόνευσης 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μειωμένος μέγιστος συντελεστής άνωσης 2. Υψηλή αντίσταση έξω από την περιοχή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας 3. Μέτρια χαρακτηριστικά αποκόλλησης 4. Έντονη ευαισθησία στην τραχύτητα

Πίνακας 3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σειρών αεροτομών NACA.



Για την επιλογή της αεροτομής και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μελετήθηκε η ροή του ανέμου γύρω από τις αεροτομές. Σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli η πίεση στις συμμετρικές αεροτομές είναι ίδια στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια, λόγω του ότι η ροή του αέρα είναι ίδια, ενώ στις ασύμμετρες, λόγω της καμπυλότητας, η ροή του αέρα είναι διαφορετική με συνέπεια η κατανομή της πίεσης να αλλάζει. Δεδομένου ότι η ανεμογεννήτρια που θα κατασκευαστεί θα δύναται να τοποθετηθεί και σε αστικό περιβάλλον, με άγνωστες κατευθύνσεις ανέμων, η επιλογή του προτύπου πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει τη διεξαγωγή συμπερασμάτων ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Στόχος λοιπόν είναι η διεξαγωγή μετρήσεων της απόδοσης της ανεμογεννήτριας σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της αεροτομής ως προς τον άνεμο, ώστε να βρεθούν οι βέλτιστες γωνίες για μέγιστη απόδοση της ανεμογεννήτριας που θα κατασκευαστεί. Πρέπει να επιλεγθεί λοιπόν πρότυπο με τις ελάχιστες δυνατών άγνωστες παραμέτρους επιρροής στην αεροδυναμική συμπεριφορά του. Εφόσον στις συμμετρικές αεροτομές η κατανομή πίεσης είναι ίδια θα χρησιμοποιηθεί συμμετρική αεροτομή ώστε τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να είναι ασφαλή. Οι πιο συνήθεις αεροτομές για ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus είναι οι NACA0018, NACA0015 και NACA0012 [11,12], διότι έχουν υψηλούς συντελεστές άντωσης για χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Με βάση τα παραπάνω, η αεροτομή που επιλέχθηκε να κατασκευαστεί είναι η NACA0015 στην οποία το μέγιστο πάχος του προφίλ βρίσκεται μεταξύ των άλλων δύο προτύπων, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη Παράγραφο. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή και η εξαγωγή συμπερασμάτων και για τις άλλες δύο αεροτομές, εφόσον γίνει ανάλυση της συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης στα πτερύγια, σε πραγματικές συνθήκες.

2.5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ενέργεια που παράγεται από την κινητική ενέργεια του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad 2.8$$

όπου, V η ταχύτητα του ανέμου (m/s), S η επιφάνεια του δρομέα (m^2) και ρ η πυκνότητα του αέρα Kg / m^3

Σε δεδομένη πίεση και θερμοκρασία ($T=273K$, $P=101,3Pa$), η προηγούμενη εξίσωση γίνεται:

$$P_w = 0,647 S V^2 \quad 2.9$$

Μία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να πάρει το 100% της ενέργειας του ανέμου διότι μέρος της ενέργειας αυτής καταναλώνεται σε αλλαγές της πίεσης κατά μήκος του πτερυγίου λόγω της γεωμετρίας του. Αυτές οι αλλαγές κατανομής της πίεσης μειώνουν την ταχύτητα του ανέμου, με αποτέλεσμα την εκμετάλλευση μέρους της ενέργειας του



ανέμου. Η μηχανική ισχύς (P_m) που μπορεί να απορροφηθεί από τον άνεμο σε μία ιδανική ανεμογεννήτρια δίνεται από την εξίσωση

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} \right) S V^2 \quad 2.10$$

Στην εξίσωση 2.10 το εμβαδό S , δηλώνει το εμβαδό σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Για μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα τύπου η εξίσωση γίνεται:

$$S = D * l_b \quad 2.11$$

Όπου S το εμβαδό σάρωσης (m^2), D η διάμετρος (m), και l_b το μήκος των πτερυγίων. Η σταθερά $\frac{16}{27} = 0,593$ προέρχεται από το όριο του benz. Η σταθερά αυτή ορίζει ότι το 59,3% από την ενέργεια του ανέμου μπορεί να δεσμευτεί από μία ιδανική ανεμογεννήτρια. Όπως και να έχει αυτό γίνεται μόνο σε θεωρητικό επίπεδο. Σε πρακτικό επίπεδο η απόδοση μιας ανεμογεννήτρια μπορεί να φτάσει το 35-40%. Να σημειωθεί επίσης ότι η πτώση της πίεσης κατά μήκος των πτερυγίων είναι πολύ μικρή, της τάξεως του 0,2%. Άρα η εξίσωση 2.10 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

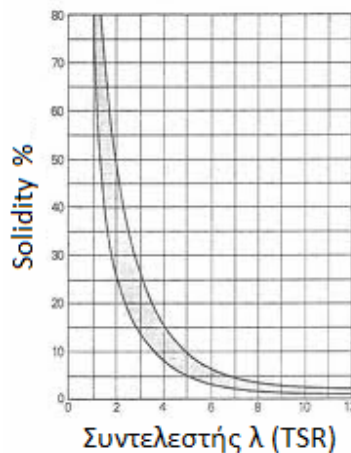
$$P_m = C_p * P_w \quad 2.12$$

όπου, C_p ο συντελεστής απόδοσης. Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα περιστροφής και στις παραμέτρους των πτερυγίων, γωνία βήματος και γωνία πρόσπτωσης. Η γωνία βήματος στην ανεμογεννήτρια τύπου-Η βρίσκεται ανάμεσα στην κατεύθυνση περιστροφής και στη χορδή του πτερυγίου. Για ανεμογεννήτριες με σταθερή γωνία βήματος, ο συντελεστής ισχύος είναι εξαρτώμενος απευθείας από το συντελεστή λ (Tip speed Ratio - TSR). Ο συντελεστής λ είναι η παράμετρος που συνδέει την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας, με την ταχύτητα του ανέμου και δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\lambda = \frac{\Omega * R}{V} \quad 2.13$$

Όπου Ω (rad/sec) η γωνιακή ταχύτητα, R (m) η ακτίνα του ρότορα και V (m/s) η ταχύτητα του ανέμου.

Μια σημαντική παράμετρος της ανεμογεννήτριας Darrieus τύπου-Η είναι το solidity. Ο συντελεστής λ (TSR) για μία τέτοια ανεμογεννήτρια κυμαίνεται μεταξύ 2 και 6. Ο συντελεστής λ προσδιορίζει το solidity από το γράφημα τις Εικόνας 22 [5].



Εικόνα 22. Solidity ως προς συντελεστή λ (TSR).

Στόχος είναι η κατασκευή ανεμογεννήτριας Darrieus για χαμηλούς ανέμους της τάξεως των 5 έως 10 m/s. Μία μέση ένταση μπορούμε να πούμε ότι είναι τα 7 m/s. Η ανεμογεννήτρια που θα κατασκευαστεί θέλουμε να παράγει μία μέση ισχύ 500w. Εάν στην εξίσωση 2.10 αντικατασταθεί όπου $P = 500w$, όπου $\rho = 1kg/m^2$ (πυκνότητα αέρα), $V = 7m/s$ και η εξίσωση λυθεί ως προς S (Εμβαδό) το αποτέλεσμα είναι $S = 5m^2$. Όπως έχει ειδη αναφερθεί η ανεμογεννήτρια που θα κατασκευαστεί είναι για αστικό περιβάλλον και θα τοποθετηθεί π.χ. σε ταρατσες σπιτιών με αποτέλεσμα να είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη κατανομή του συνολικού εμβαδού. Επιλέχθηκε λοιπόν η περίμετρος να ισούται με $D = 2,5m$ και το ύψος $dl = 2m$ όπου το γινόμενο τους είναι $S = 5m^2$ σύμφωνα με την εξίσωση 2.11. Στον Πίνακα 4 φαίνεται η ισχύς για διάφορες ταχύτητες ανέμου αν στην εξίσωση 2.10 αντικατασταθεί όπου $S = 5m^2$.

Ταχύτητα ανέμου	Παραγόμενη ισχύς
$U = 3m/s$	$P_w = 40w$
$U = 5m/s$	$P_w = 185w$
$U = 7m/s$	$P_w = 508w$
$U = 8m/s$	$P_w = 758w$
$U = 10m/s$	$P_w = 1480w$

Πίνακας 4. Ενδεικτική ισχύς για τιμές ανέμου 3-10 m/s.

Τέλος θα υπολογιστεί η χορδή της αεροτομής σύμφωνα με τις διαστάσεις της ανεμογεννήτριας. Αν το εμβαδό του ρότορα S πολλαπλασιαστεί με το Solidity και το αποτέλεσμα διαιρεθεί με τον αριθμό των πτερυγίων, δηλαδή το 3, δίνεται το εμβαδό του κάθε πτερυγίου που είναι $0,5m^2$. Από την Εικόνα 20 για $Tsr=2$ το Solidity είναι 0,3. Αν το εμβαδό του πτερυγίου διαιρεθεί με το ύψος του ρότορα-πτερυγίου δίνεται η χορδή $c = 0,25m$. Συμφώνα με τους παραπάνω υπολογισμούς οι τελικές διαστάσεις του πτερυγίου NACA0015 θα είναι μήκος 2m και χορδή $c = 0,25m$.



3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Computer Aided Design (CAD) ή σχεδιασμός με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, με σκοπό τη δημιουργία, την τροποποίηση, την ανάλυση και την βελτιστοποίηση ενός δισδιάστατου (2D) ή ενός τρισδιάστατου (3D) σχεδίου. Χρησιμοποιείται για την αύξηση της παραγωγικότητας σε βιομηχανικό επίπεδο, αυξάνει κατά πολύ την ποιότητα και την λεπτομέρεια του σχεδίου, βελτιώνει την επικοινωνία μεταξύ των σχεδιαστών και είναι δυνατή η δημιουργία βάσης δεδομένων για μαζική παραγωγή. Το περιβάλλον λειτουργίας τέτοιων λογισμικών δεν περιορίζεται σε απλά σχέδια, αλλά επεκτείνεται σε υλικά, σε διεργασίες, διαστασιολόγηση, ανοχές, αντοχές και άλλες εφαρμογές. Το CAD βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως στην αρχιτεκτονική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική, την αεροναυπηγική. Αποτέλεσε σημαντική κινητήρια δύναμη για την έρευνα στην υπολογιστική γεωμετρία, τα γραφικά υπολογιστών (hardware και software) και στη διαφορική γεωμετρία. Τα βασικά πλεονεκτήματα του 3D σχεδιασμού είναι:

- Ακριβής απεικόνιση τεμαχίου
- Εποπτικός έλεγχος τεμαχίου
- Φωτορεαλισμός
- Εύκολη μεταφορά από 3D σχέδιο σε 2D σχέδιο με απεικόνιση όλων των όψεων και των τομών
- Η δυνατότητα παραμετροποίησης για μαζική παραγωγή.





Τα σημαντικότερα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική παραγωγή είναι τα:

- Autodesk Inventor
- Autodesk Mechanical Desktop
- Pro-Engineer
- SDRC I-DEAS
- Autodesk Inventor
- Solid Works

Για την παραμετρική μοντελοποίηση του καλουπιού του ανεμοπτερυγίου NACA 0015 που επιλέχθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα τρισδιάστατης παραμετρικής μηχανολογική σχεδίασης Inventor της εταιρείας Autodesk [6].

Το Autodesk Inventor είναι προσαρμοσμένο για μηχανολόγους μηχανικούς κατά κύριο λόγο και αφορά την τρισδιάστατη μηχανολογική σχεδίαση, την προσομοίωση και κατασκευή συναρμολογημάτων και κατασκευαστικών σχεδίων. Αξιοποιώντας πλήρως την τρισδιάστατη μοντελοποίηση, επιτρέπει σε μηχανικούς και σχεδιαστές να δημιουργήσουν ένα ψηφιακό μοντέλο ώστε να αναλύσουν την λειτουργία και την συναρμογή του με άλλα εξαρτήματα πριν καν αυτά κατασκευαστούν. Από την στιγμή

που θα δημιουργηθεί το ψηφιακό μοντέλο, πλέον μπορούν αυτόματα να παραχθούν κατασκευαστικά σχέδια, οδηγίες συναρμολόγησης, λίστες υλικών, καλούπια, κινηματικές αναλύσεις κλπ. Υπάρχουν τέσσερα είδη αρχείων τα οποία δημιουργεί το και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Όνομα αρχείου	Σύμβολο
Τεμάχιο (Part)	
Συναρμολογημένο (Assembly)	
Σχέδια (Drawings)	
Παρουσίαση (Presentation)	










Πίνακας 5. Αρχεία Inventor.

Βασικό προτερήματα του σχεδιαστικού πακέτου Autodesk Inventor είναι η παραμετρική σχεδίαση και μοντελοποίηση. Δηλαδή οι διαστάσεις των τεμαχίων εύκολα μπορούν να αλλάζουν ανάλογα με τις ανάγκες των μηχανικών και χωρίς ο σχεδιαστής να χρειάζεται να κάνει το σχέδιο από την αρχή. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει δύο ακόμα βασικές εφαρμογές, την Stress Analysis και το Inventor Studio. Η εφαρμογή Stress Analysis χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα τρισδιάστατης μοντελοποίησης Autodesk Inventor για στατικές αναλύσεις μοντέλων μέσω πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method). Η συγκεκριμένη εφαρμογή παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση και την μοντελοποίηση των αντικειμένων καθώς με τις στατικές αναλύσεις το μοντέλο μπορεί να διορθωθεί αποφεύγοντας το κόστος και τον χρόνο που θα δημιουργούσε μια πραγματική παρέμβαση πριν να ελεγχθεί. Το Inventor Studio χρησιμοποιείται για την παρουσίαση και την απεικόνιση του μοντέλου. Με μεγάλη ποικιλία επιλογών καμερών και φωτισμού και επιλέγοντας την εντολή render μπορούμε να απεικονίσουμε φωτορεαλιστικά το μοντέλο που κατασκευάστηκε [10].



Εικόνα 23. Κομμάτια (Parts) ανεμογεννήτριας που συναρμολογούνται σε περιβάλλον Συναρμολογήματος (Assembly).

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι βασικές εντολές του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του σκελετού του καλουπιού του πτερυγίου.

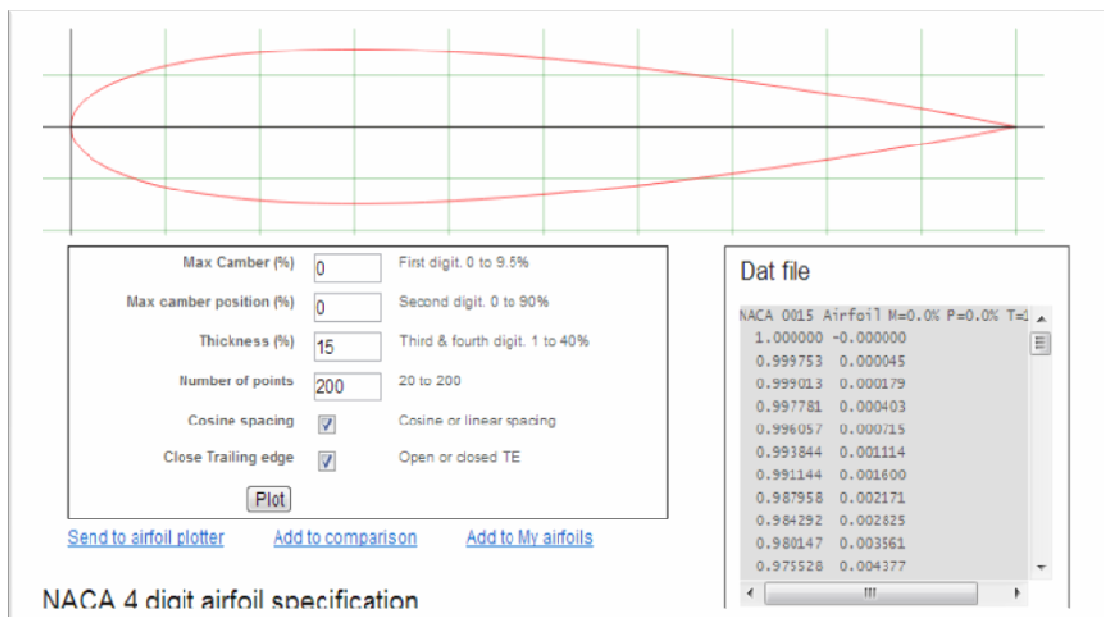
Εικονίδιο	Εντολή	Περιγραφή
	Work Plane	Η συγκεκριμένη εντολή βρίσκεται σε κάθε περιβάλλον εργασίας και η λειτουργία της είναι να δημιουργεί επίπεδα αναφοράς με βάση, επιφάνειες, σημεία ή άξονες που ορίζονται από το χρήστη.
	Extrude	Η εντολή extrude βρίσκεται στο περιβάλλον εργασίας της δημιουργίας του μοντέλου. Με βάση το sketch που θα επιλεγεί δημιουργούνται ή αφαιρούνται επιφάνειες και στερεά σώματα
	2D sketch	Η συγκεκριμένη εντολή διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση κάθε επιφάνειας και γι' αυτό το λόγο ανοίγοντας το πρόγραμμα, μας μεταφέρει αμέσως στο 2D sketch. Επιλέγοντας την εντολή αυτή μεταφερόμαστε σε περιβάλλον δισδιάστατης σχεδίασης .Το περιβάλλον σχεδιασμού είναι παρεμφερές με του AutoCAD
	3D sketch	Είναι το περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης έχοντας τις ίδιες σχεδόν επιλογές με το 2D sketch. Η μεγάλη διαφορά είναι η δυνατότητα σχεδίασης στο χώρο και η χρήση τρισδιάστατων σημείων και Spines.
	Import points	Με τη βοήθεια της εντολής αυτής μπορούν να εισαχθούν σημεία από ένα αρχείο excel σε δισδιάστατο ή σε τρισδιάστατο περιβάλλον. Με την εντολή αυτή παρέχεται μεγάλη διευκόλυνση στον διαχειριστή με την αποφυγή σχεδιασμού του κάθε σημείου ξεχωριστά.
	Spline	Η εντολή spline χρησιμοποιείται και σε δισδιάστατο και σε τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης. Η λειτουργία της συγκεκριμένης εντολής είναι η δημιουργία ομαλών καμπυλών παρεμβολής σε σημεία μηδενίζοντας από μόνη της την παράγωγο.
	Circle	Η εντολή Circle επίσης χρησιμοποιείται σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης. Με την βοήθεια της εντολής αυτής μπορούν να δημιουργηθούν κύκλοι συγκεκριμένης διαμέτρου.
	Line	Η εντολή Line ίσως είναι και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενη όλων των εντολών στο CAD. Με την εντολή αυτή είναι εφικτή η δημιουργία μιας απλής γραμμής συγκεκριμένων διαστάσεων μέχρι και περίπλοκα σχέδια, σε δισδιάστατο και σε τρισδιάστατο περιβάλλον.
	Move	Με την εντολή αυτή γίνεται μετακίνηση σχεδίων

Πίνακας 6. Βασικές εντολές στο πρόγραμμα Inventor.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

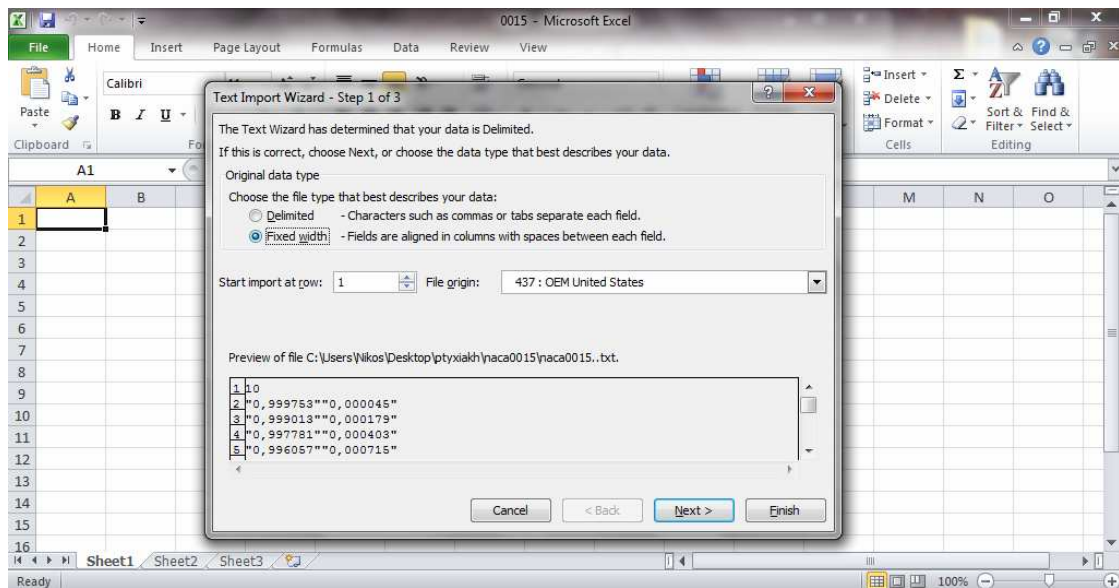
Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση του πτερυγίου, απαραίτητη είναι η σωστή δημιουργία του προφίλ της αεροτομής NACA0015 που επιλέχθηκε. Θα ακολουθήσει η τρισδιάστατη δημιουργία του πτερυγίου και η μοντελοποίηση του σκελετού του καλουπιού σύμφωνα με τις διαστάσεις που θα εξαχθούν από αυτή.

Ο υπολογισμός της δισδιάστατης γεωμετρίας του προφίλ του πτερυγίου πραγματοποιήθηκε στην ιστοσελίδα airfoiltools.com που παρέχει ένα αυτόματο διαδικτυακό εργαλείο υπολογισμού προφίλ με βάση τα όσα περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.4 του δεύτερου Κεφαλαίου. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Με τη βοήθεια του διαδικτυακού αυτού εργαλείου επιλέχθηκε ο σύνδεσμος NACA 4-Digit Generator για τη δημιουργία αεροτομής NACA 4-ψηφίων. Στο μενού εισαγωγής δεδομένων, για τις τετραψηφίες αεροτομές, στη μέγιστη τιμή της καμπύλης (max camber) εισήχθη το ψηφίο 0, στη θέση της μέγιστης τιμής της καμπύλης (max camber position) εισήχθη επίσης το 0 και στο πάχος της αεροτομής εισήχθη το 15. Στον αριθμό σημείων (number of points) επιλέχθηκε το 200 που είναι και το μεγαλύτερο δυνατό για μεγαλύτερη ακρίβεια, επίσης επιλέχθηκε το κλείσιμο του χείλους εκφυγής (close trailing edge) διότι θέλουμε η αεροτομή να κλείνει ακριβώς στο μήκος της χορδής που θα εισάγουμε. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκε με σύνολο σημείων το προφίλ της αεροτομής NACA0015.



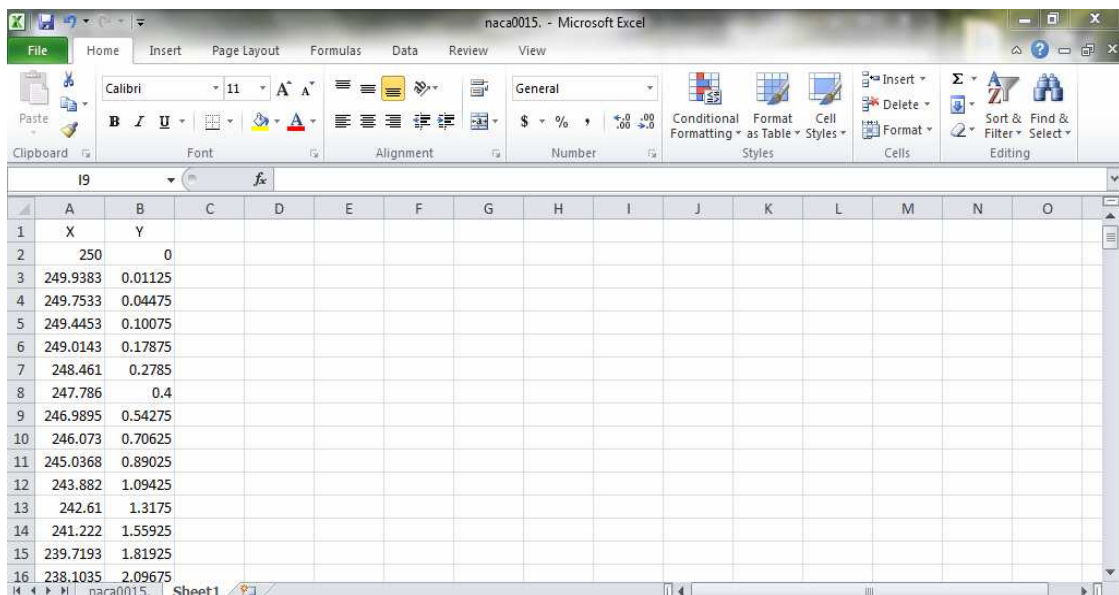
Εικόνα 24. Δημιουργία της γεωμετρίας της αεροτομή NACA0015.

Στη συνέχεια έγινε η αντιγραφή των σημείων που παράχθηκαν σε αρχείο text. Για να γίνει χωρισμός των ψηφίων σε συντεταγμένες X και Y, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel. Σε ένα φύλο του Excel έγινε εισαγωγή του αρχείου text με τα σημεία της αεροτομής και ενεργοποιήθηκε η επιλογή Fixed Width όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Εισαγωγή σημείων στο Excel.

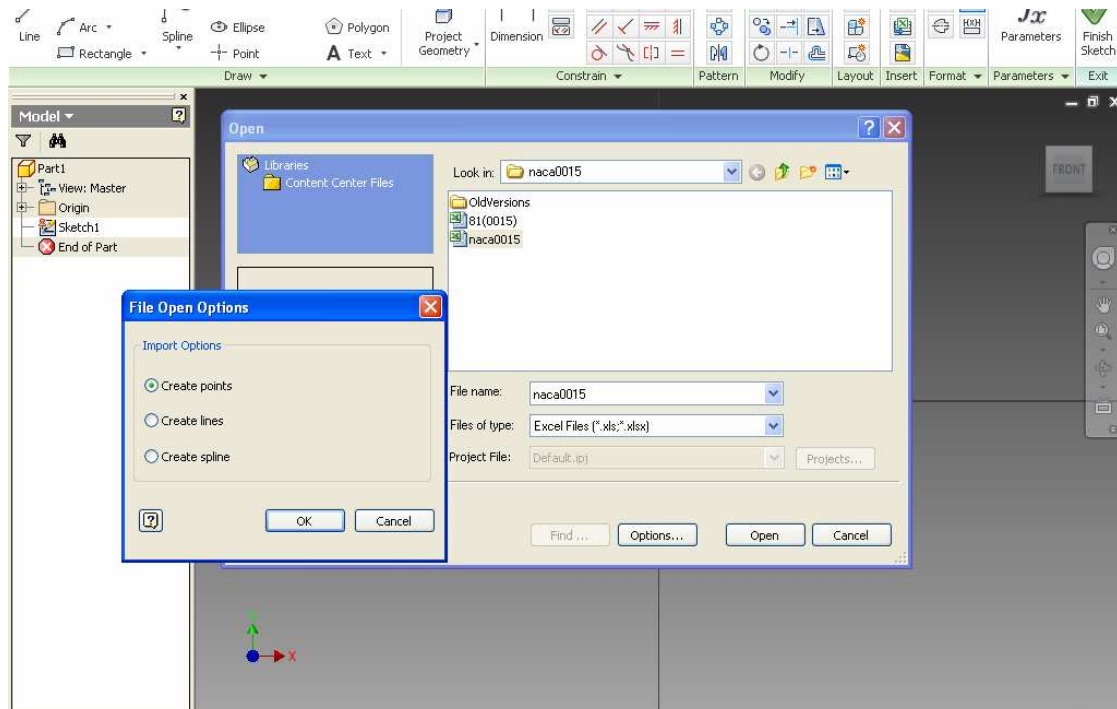
Επειδή τα σημεία που εισήχθησαν στο Excel έχουν ως υποδιαστολή το κόμμα ενώ το inventor αναγνωρίζει μόνο την τελεία μετά το ακέραιο μέρος των δεκαδικών, έγινε αντικατάσταση της τελείας με κόμμα. Οι συντεταγμένες των σημείων που πάρθηκαν από την ιστοσελίδα airfoiltools.com είναι υπολογισμένες για χορδή αεροτομής ίση με 1mm. Για το λόγο αυτό πολλαπλασιάστηκαν όλα τα σημεία με τον αριθμό 250 ώστε να προκύψουν τα σημεία για χορδή 250mm που υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αφού έγινε αντιγραφή των σημείων για χορδή 250 mm σε νέο φύλλο του Excel (βλ. Εικόνα 26), ακολούθησε η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα Inventor.



Εικόνα 26. Σημεία της αεροτομής NACA0015 για χορδή 250 mm.

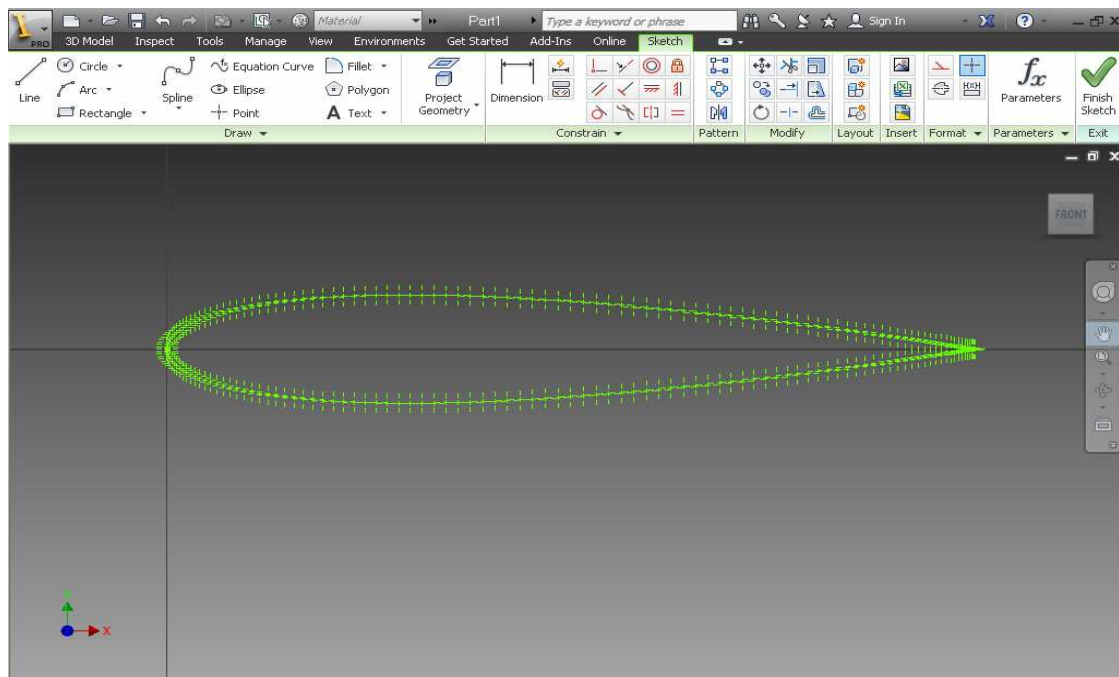
Για την εισαγωγή των σημείων στο Inventor αρχικά έγινε άνοιγμα νέου *part* και επιλέγεται μετρικό σύστημα (metric system) σε mm. Στη συνέχεια έγινε άνοιγμα 2D

Sketch και με την επιλογή *Import Points* εισήχθησαν τα σημεία. Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 27, κατά την εισαγωγή εμφανίζονται οι επιλογές *Create Points*, η οποία εμφανίζει μόνο τα σημεία, η εντολή *Create Lines*, η οποία ενώνει τα σημεία με γραμμές και η *Create Splines* η οποία εμφανίζει τα σημεία και τα ενώνει με ομαλές καμπύλες παρεμβολής.



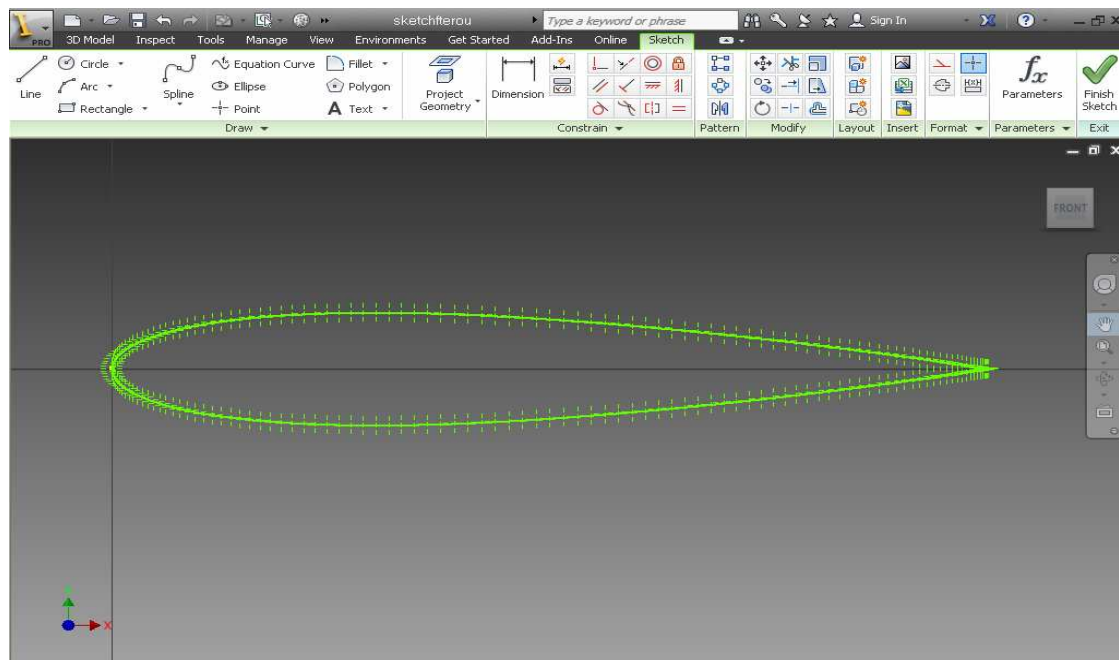
Εικόνα 27. Εισαγωγή των σημείων στο Inventor.

Για την βέλτιστη διαστάσιμη κατασκευή του προφίλ χρησιμοποιήθηκε η εντολή *Create Points*, δηλαδή επιλέχτηκε η εμφάνιση μόνο των σημείων ώστε η ένωση τους να γίνει παρακάτω από το χρήστη για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας. Στην Εικόνα 28 φαίνονται τα σημεία που εισήχθησαν.



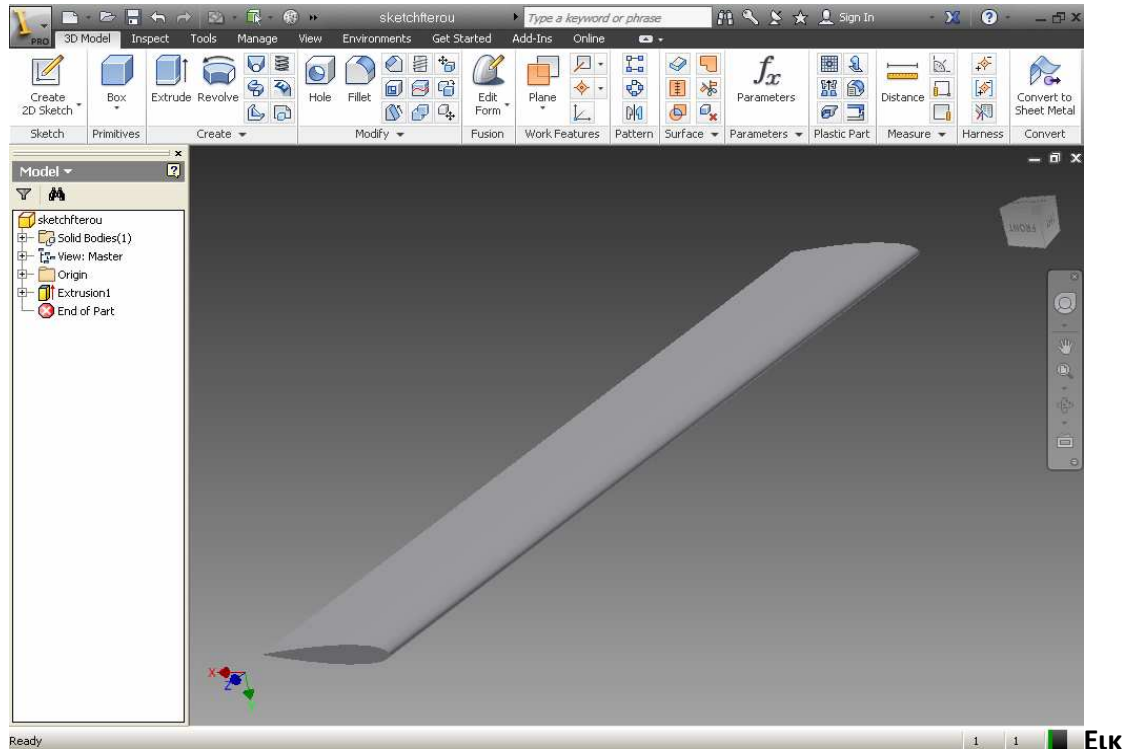
Εικόνα 28. Εμφάνιση σημείων σε 2D sketch.

Στη συνέχεια έγινε ένωση του κάθε σημείου με την εντολή *Spline*. Αρχικά για την πάνω πλευρά και μετά για την κάτω πλευρά του φτερού ως προς την αρχή των αξόνων (βλ. Εικόνα 29)



Εικόνα 29. Ένωση των σημείων με *spline*.

Αφού κατασκευάστηκε το προφίλ σε 2 διαστάσεις ακολούθησε η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του πτερυγίου με τη βοήθεια της εντολής *extrude* για μήκος 2m. Το τελικό πτερύγιο παρουσιάζεται στην Εικόνα 30.



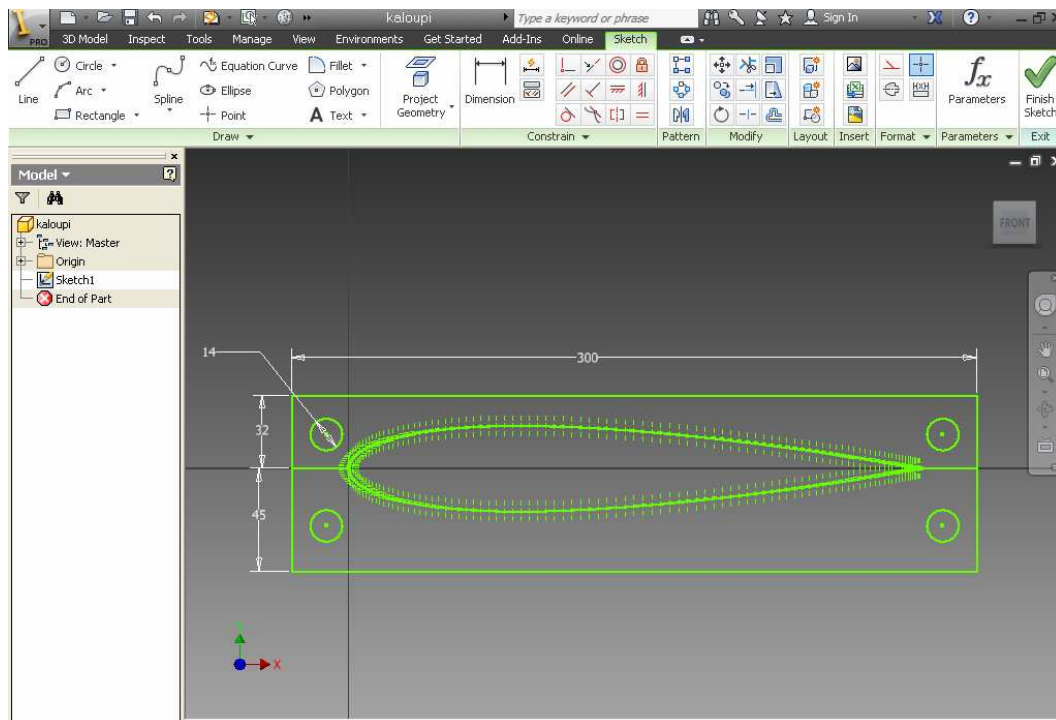
Εικόνα 30. Το πτερύγιο στην τελική του μορφή.

3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ (PARTS) ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ

Για την δημιουργία του συναρμολογήματος του καλουπιού θα μοντελοποιηθούν ελάσματα τα οποία θα περιέχουν το μισό προφίλ της αεροτομής NACA0015 για το πάνω και για το κάτω μέρος αντίστοιχα. Το υλικό των ελασμάτων είναι αλουμίνιο πάχους 10mm. Τα ελάσματα θα τοποθετηθούν σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να υπάρχει η δυνατότητα πλήρωσης των κενών με αδρανές υλικό. Για τη σωστή τήρηση των αποστάσεων κάθε τμήματος του συναρμολογήματος θα φτιαχτούν αποστάτες που θα «θηλυκώσουν» σε ειδικά διαμορφωμένες υποδοχές των ελασμάτων.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το μήκος του κάθε πτερυγίου της ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι δύο μέτρα, με αποτέλεσμα το μήκος του συναρμολογήματος του καλουπιού που θα κατασκευαστεί να έχει τελικό μήκος δύο μέτρα. Για να επιτευχθεί αυτό θα δημιουργηθούν 34 ελάσματα πάχους 10mm όπως είδη αναφέρθηκε. Όμως με τα θηλυκώματα-πατούρες που θα δημιουργηθούν, 2mm από τη μία πλευρά και 2mm από την άλλη για εφαρμογή των αποστατών, το πάχος των ελασμάτων ως προς το συνολικό μήκος πλέον θεωρείται 6mm. Ο αριθμός των αποστατών που θα χρησιμοποιηθεί για 34 ελάσματα είναι 33 αποστάτες μήκους 54,4mm.

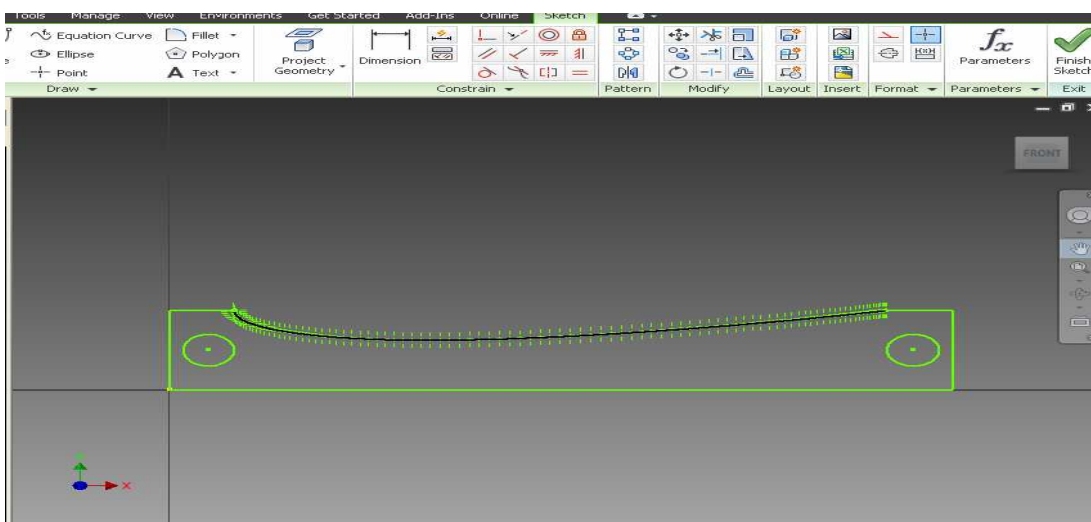
Με την εντολή *line* δημιουργήθηκε το διαδιάστατο σχέδιο του ελάσματος του προφίλ της αεροτομής NACA0015 με τις αποστάσεις ασφαλείας και συγκεκριμένα το πάνω μέρος καταλαμβάνει 300mm x 32mm και το κάτω μέρος 300mm x 45mm. Οι κύκλοι έχουν διάμετρο 14mm που είναι και η εσωτερική διάμετρος των αποστατών (Εικόνα 31).



Εικό

να 31. Άνω και κάτω προφίλ ελάσματος αεροτομής NACA0015.

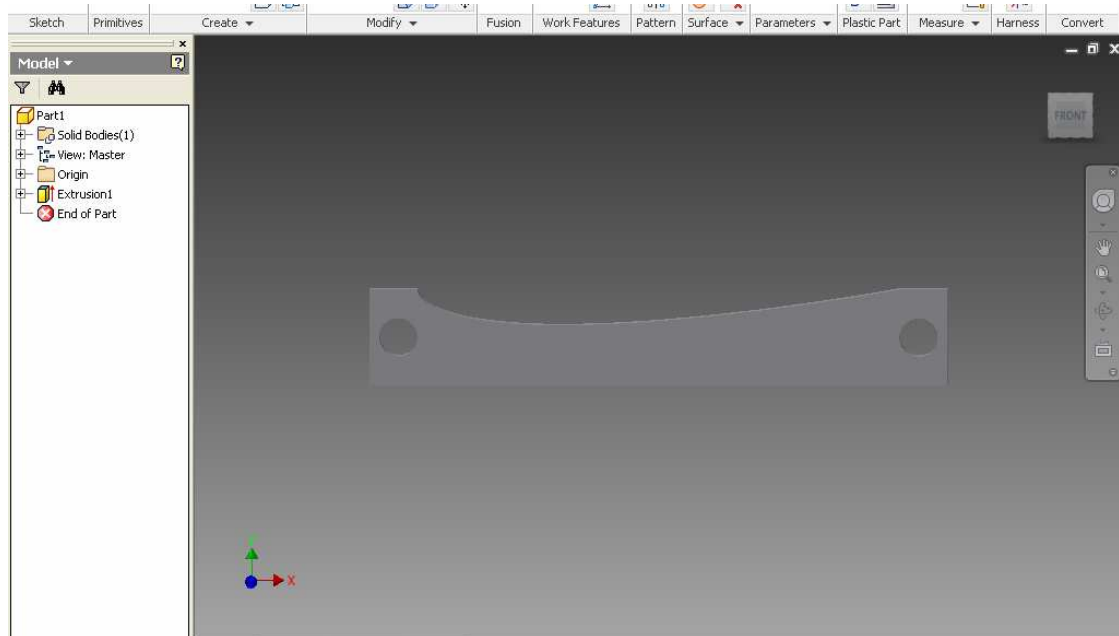
Στη συνέχεια έγινε αντιγραφή του κάτω μέρους του ελάσματος σε ένα καινούργιο part και με την εντολή *Move* τοποθετήθηκε στο κέντρο των αξόνων (βλ Εικόνα 32).



Ει

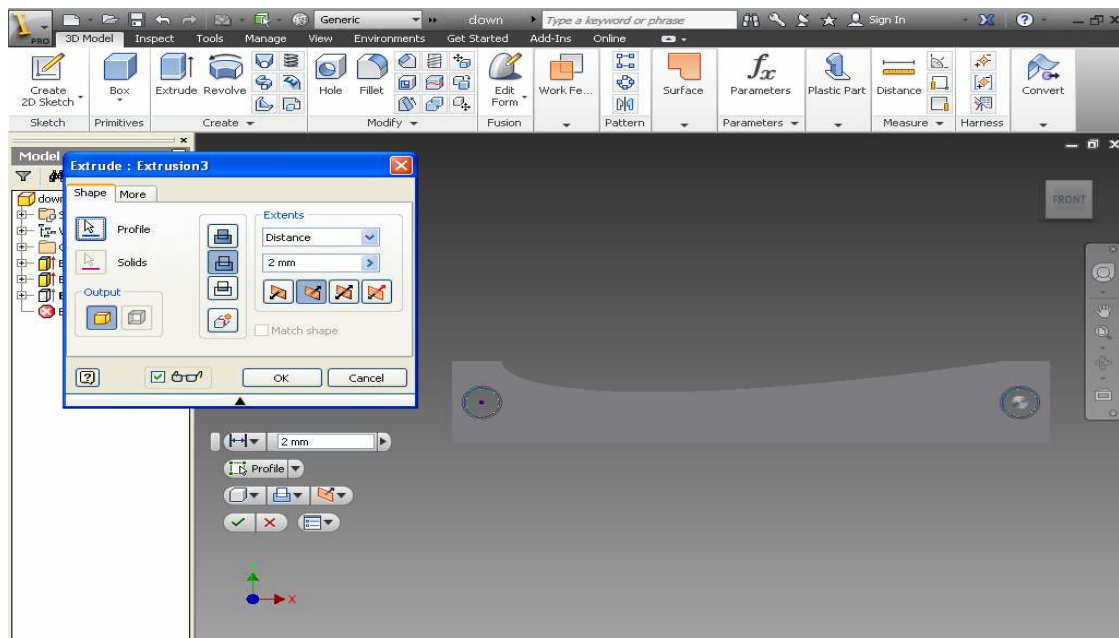
κόνα 32. Προφίλ του κάτω μέρους του ελάσματος.

Με την εντολή *Extrude* το σχέδιο έγινε τρισδιάστατο και δόθηκε πάχος 10mm όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 33.



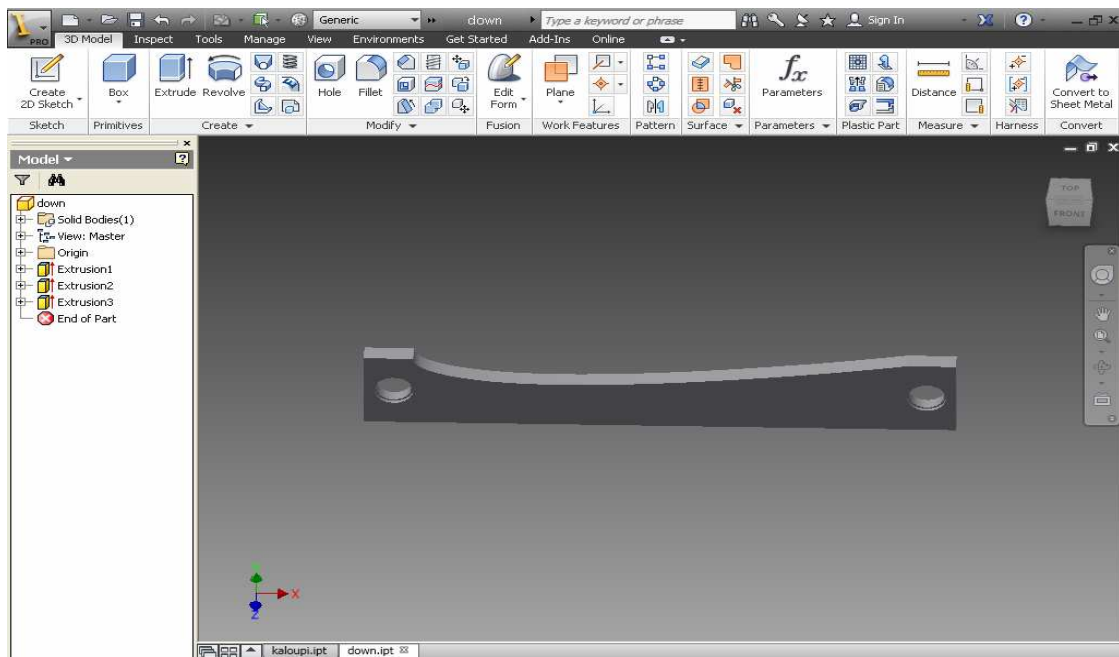
Εικόνα 33. Κάτω έλασμα.

Με την εντολή *Cut* δημιουργήθηκε πατούρα υποδοχής των αποστατών, βάθους 2mm στις μπροστά και στις πίσω τρύπες (Εικόνα 34).



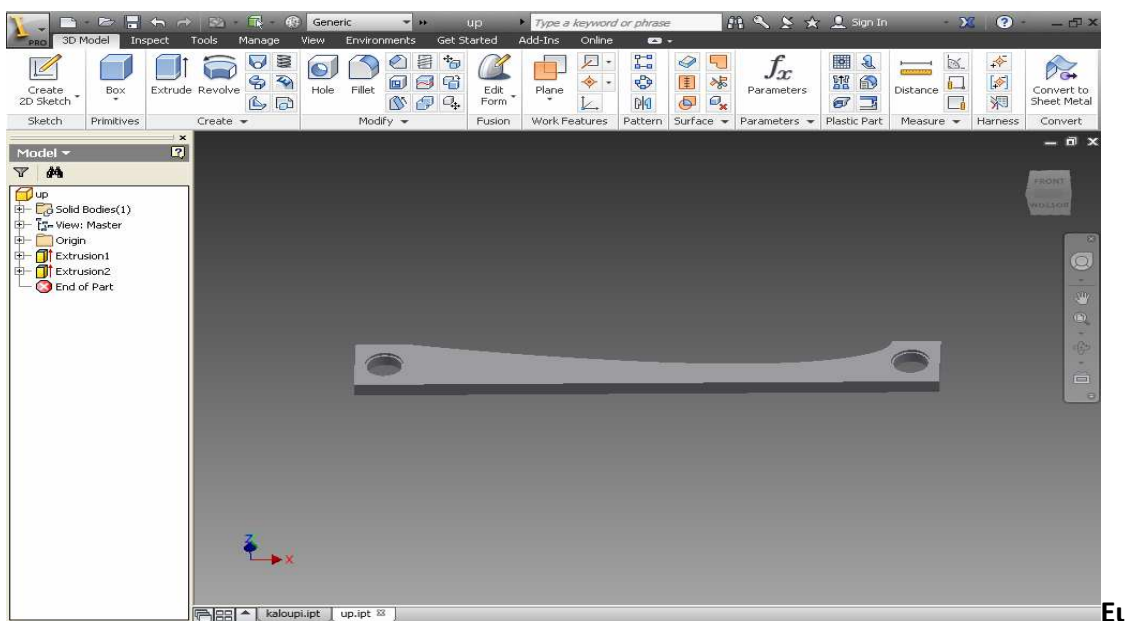
Εικόνα 34. Χρήση της εντολής *cut* για την δημιουργία πατούρας.

Η τελική μορφή του κάτω ελάσματος με τις πατούρες παρουσιάζεται στην Εικόνα 35.



Εικόνα 35. Κάτω έλασμα προφίλ.

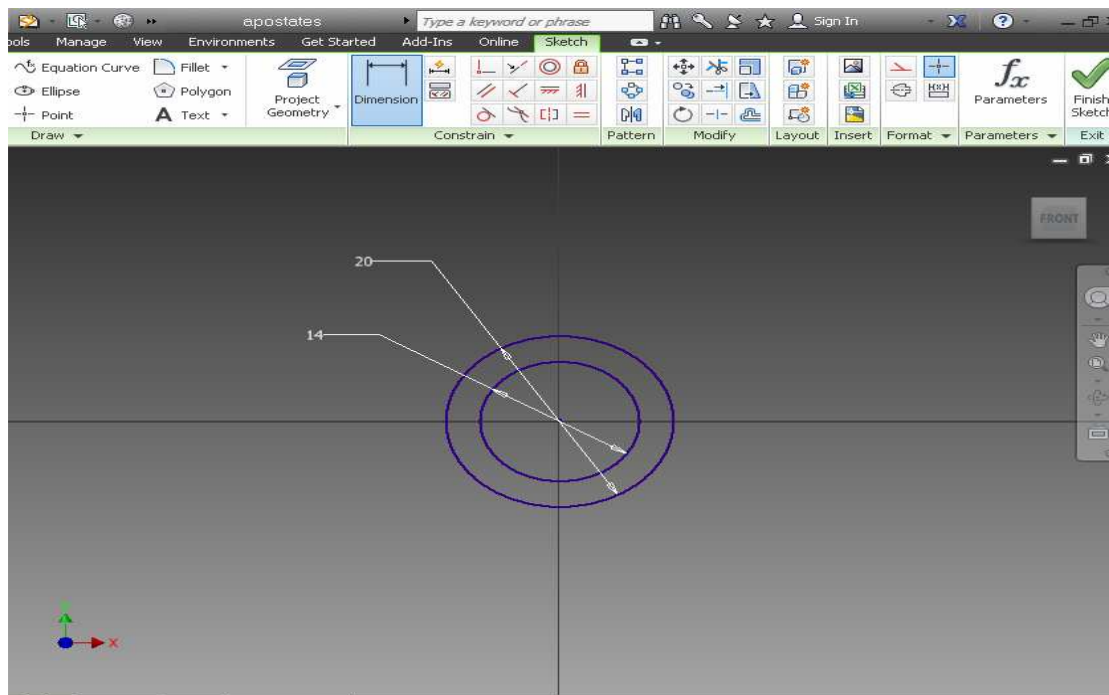
Η ίδια διαδικασία εκτελέστηκε για το πάνω έλασμα και το 3D αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36. Άνω έλασμα προφίλ.

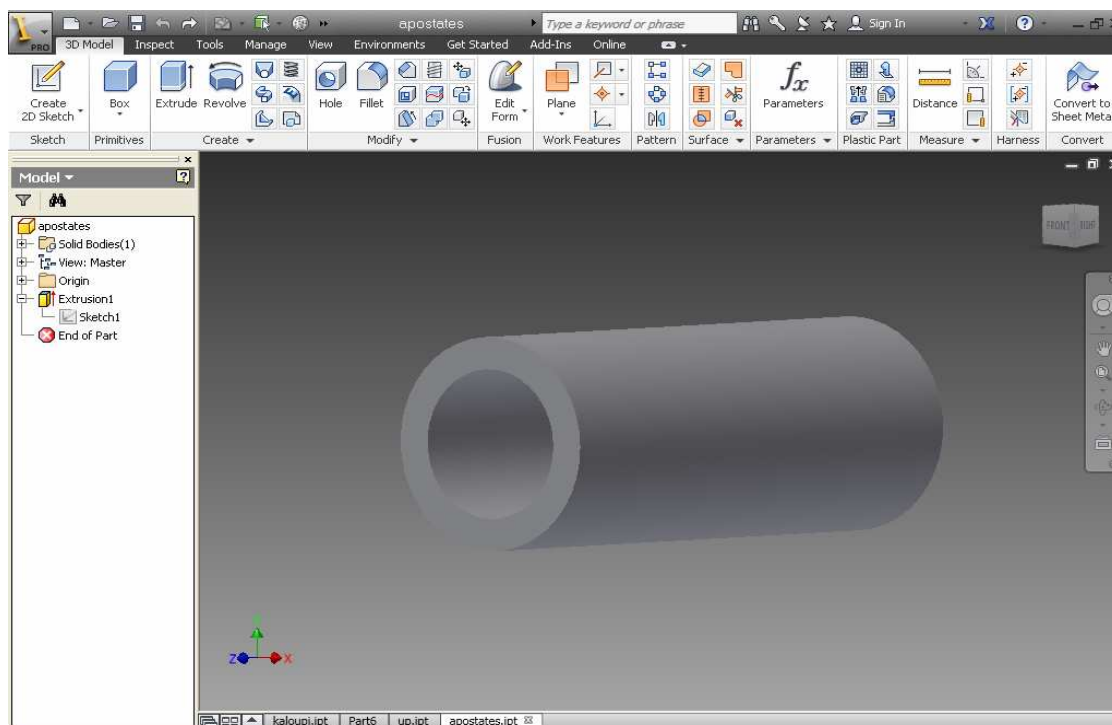
Το τελευταίο τεμάχιο (Part) που σχεδιάστηκε είναι οι αποστάτες, όπου η εξωτερική διάμετρος είναι 20mm ενώ η εσωτερική 14mm. Σε 2D sketch δημιουργήθηκαν δύο

κύκλοι διαμέτρου 20mm και 14mm (Εικόνα 37).



Εικόνα 37. 2D sketch αποστάτη.

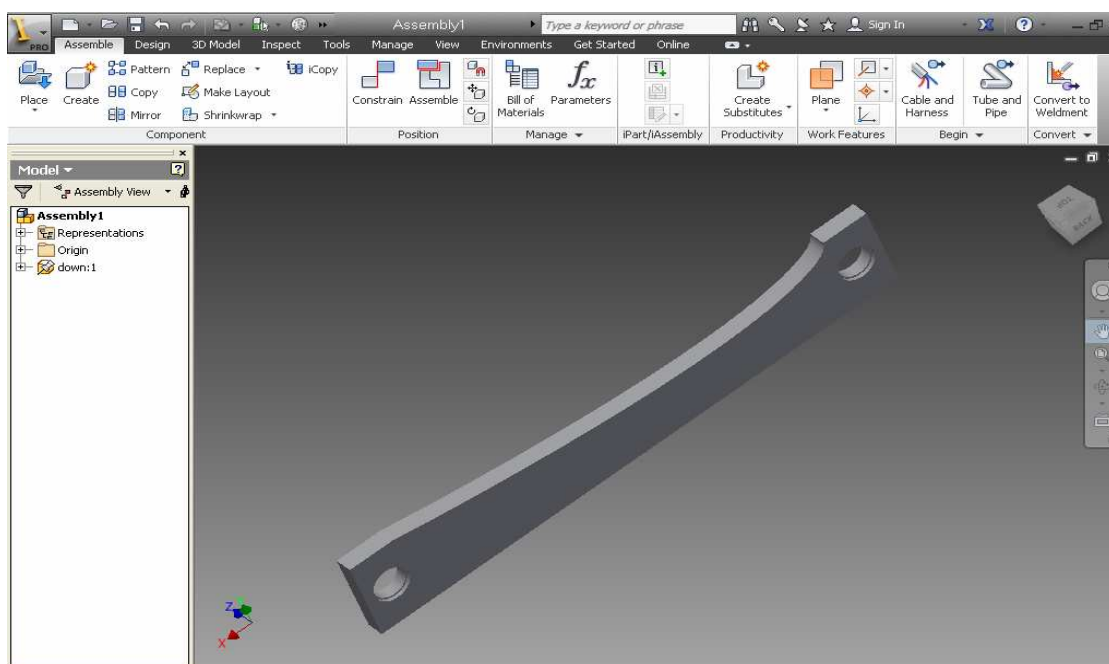
Με την εντολή *extrude* δόθηκε το μήκος των αποστατών που είναι 54,4mm όπως υπολογίστηκε παραπάνω (βλ. Εικόνα 38).



Εικόνα 38. Τελική μορφή του αποστάτη.

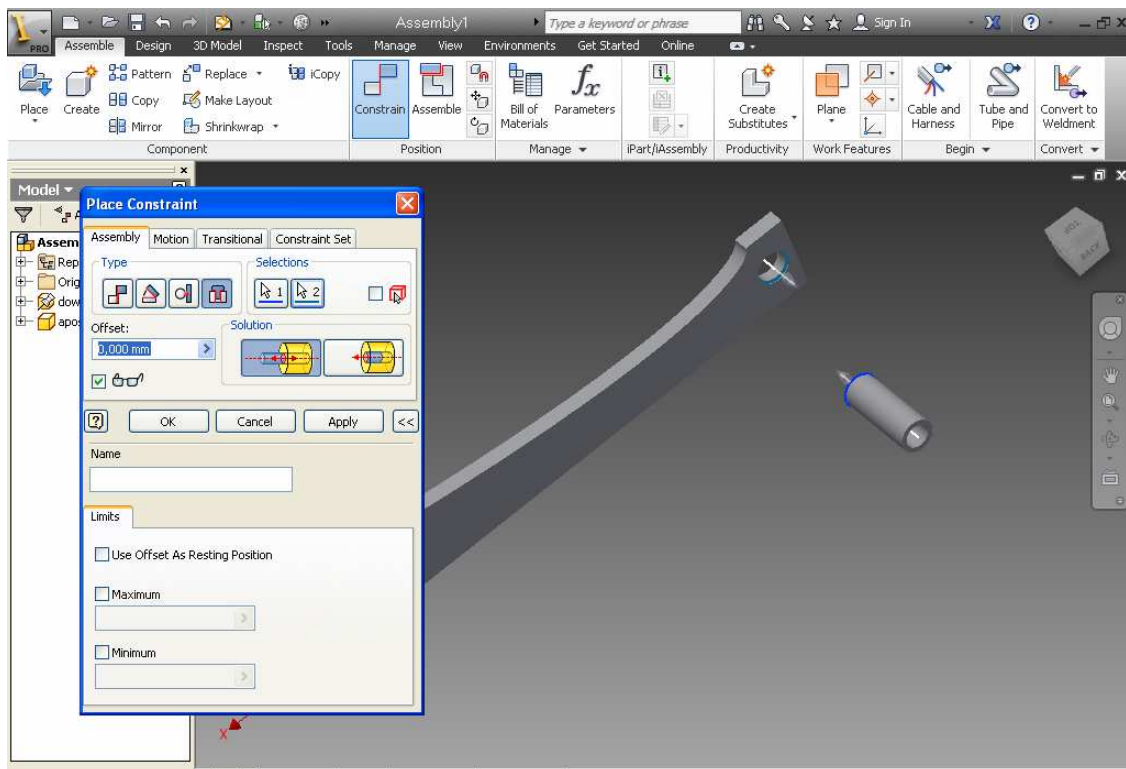
3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ (ASSEMBLY) ΣΚΕΛΕΤΟΥ

Το τελικό στάδιο της μοντελοποίησης του σκελετού του καλουπιού είναι η συναρμολόγηση του σε περιβάλλον Assembly. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο μέρη, τη συναρμολόγηση του πάνω μέρους του σκελετού και την συναρμολόγηση του κάτω μέρους του σκελετού, σε δύο διαφορετικά Assembly. Σε τρίτο Assembly τα δύο κομμάτια θα ενωθούν και η τελική μορφή του σκελετού θα είναι έτοιμη. Για την ορθή συναρμολόγηση του κάτω μέρους του σκελετού, αρχικά εισήχθη σε νέο περιβάλλον Assembly το κάτω μέρος του ελάσματος (βλ. Εικόνα 39).



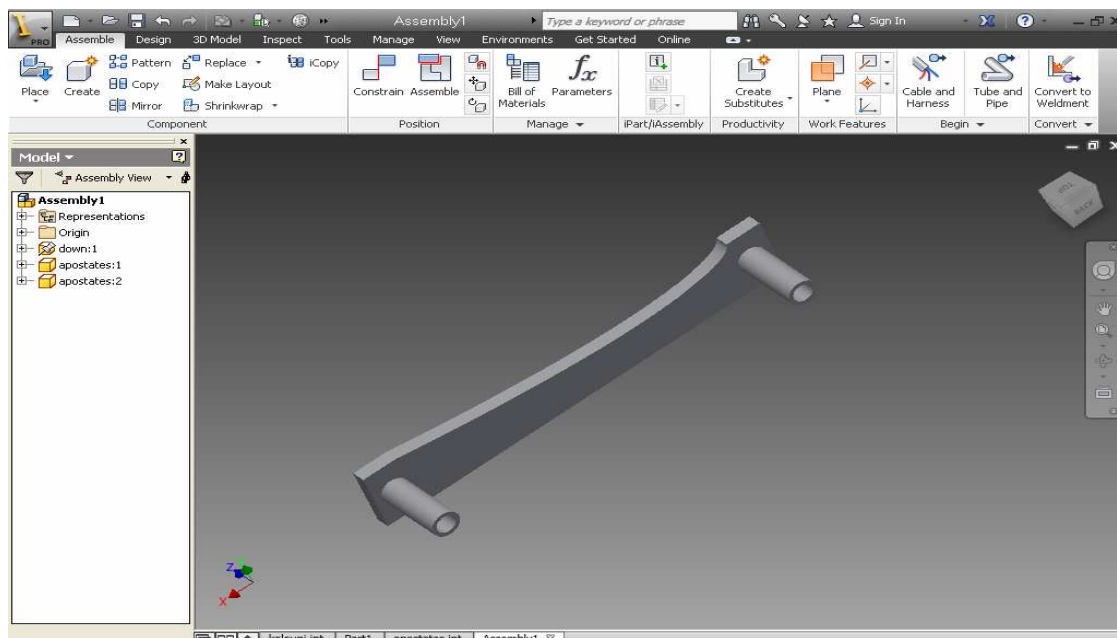
Εικόνα 39. Κάτω μέρος του ελάσματος σε περιβάλλον Assembly.

Στη συνέχεια εισήχθη και ένας αποστάτης στο ίδιο περιβάλλον assembly. Με την εντολή *constrain* έγινε συναρμολόγηση του αποστάτη με το πάνω έλασμα και συγκεκριμένα εισήχθη στην πατούρα. (βλ. Εικόνα 40).



Εικόνα 40. Χρήση της εντολής *constrain*.

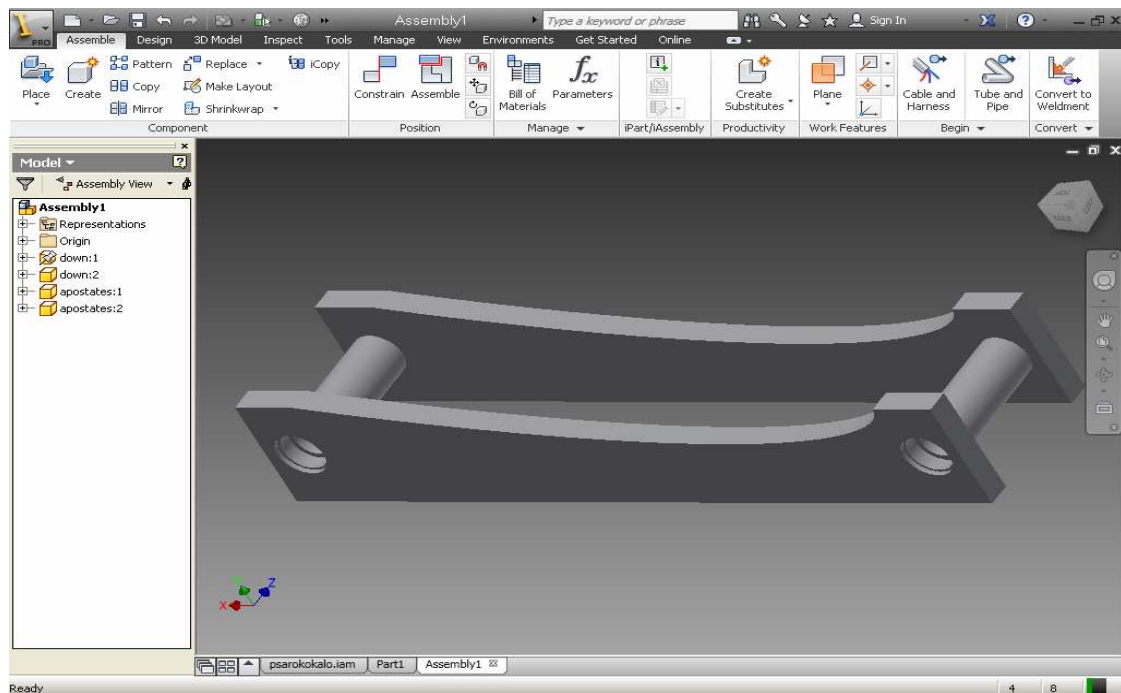
Με τον ίδιο τρόπο τοποθετήθηκε και ο δεύτερος αποστάτης στο έλασμα.



Εικόνα 41. Κάτω έλασμα συναρμολογημένο με δύο αποστάτες.

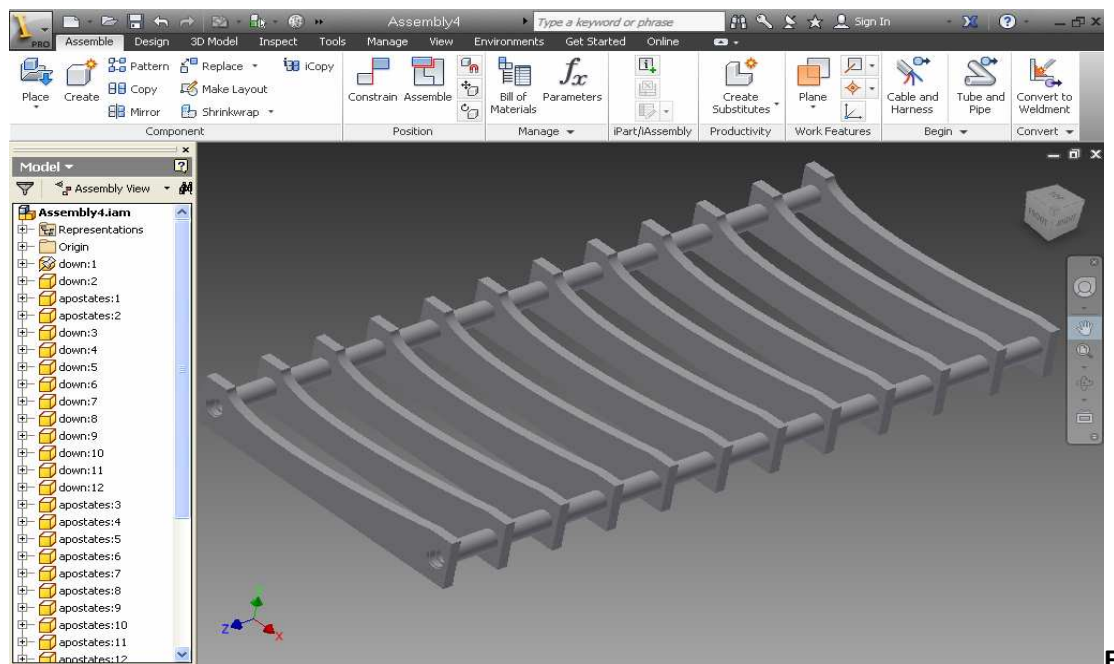
Τέλος έγινε εισαγωγή του δεύτερου ελάσματος και με την εντολή *constrain* έγινε συναρμολόγηση του ελάσματος αυτού στους δύο αποστάτες οι οποίοι εφάρμοσαν στις πατούρες όπως και στο πρώτο. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται το συναρμολόγημα

(assembly) δύο ελασμάτων και δύο αποστατών.



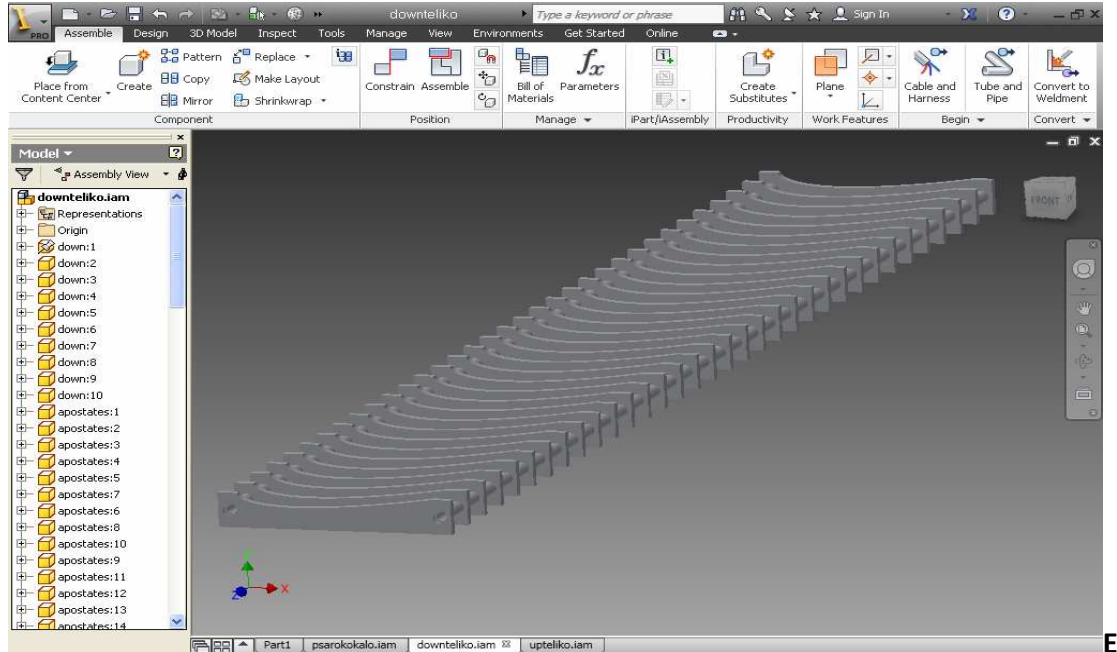
Εικόνα 42. Συναρμολόγηση (Assembly) ελασμάτων και αποστατών.

Με την ίδια διαδικασία ενώθηκαν και τα υπόλοιπα ελάσματα και αποστάτες. Στην Εικόνα 43 φαίνεται το κάτω μέρος του σκελετού του καλουπιού κατά την διάρκεια της δημιουργίας του.



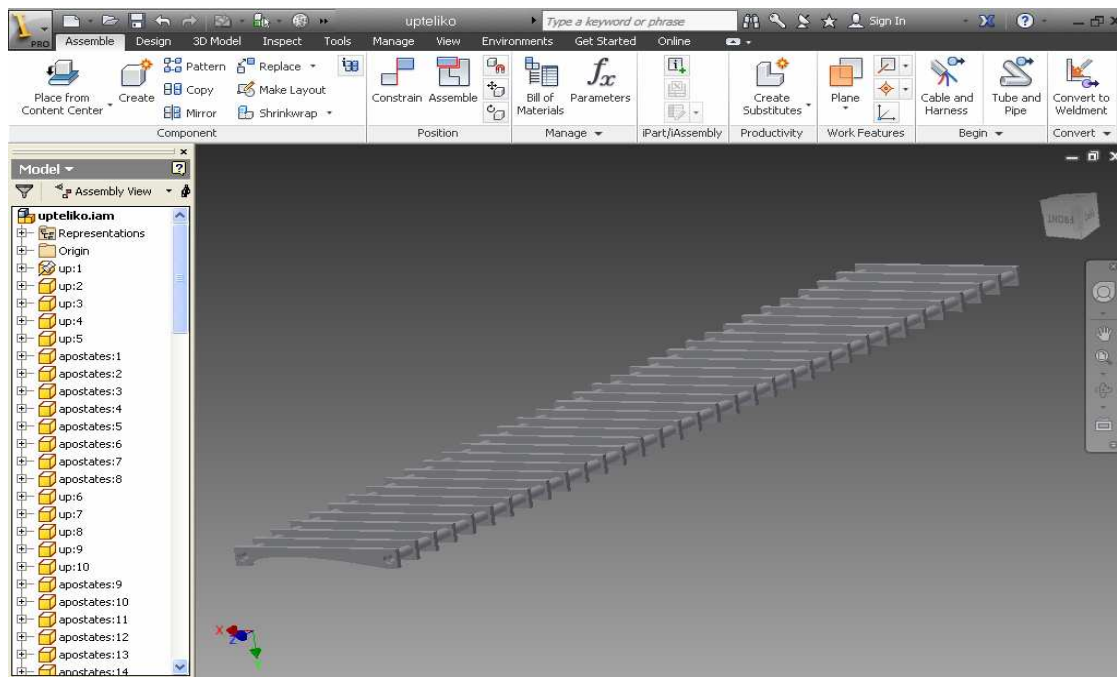
Εικόνα 43. Διαδικασία συναρμολόγησης του κάτω μέρους του συναρμολογήματος.

Το τελικό κάτω μέρος του σκελετού του καλουπιού παρουσιάζεται στην Εικόνα 44 και περιλαμβάνει 100 parts συνολικά.



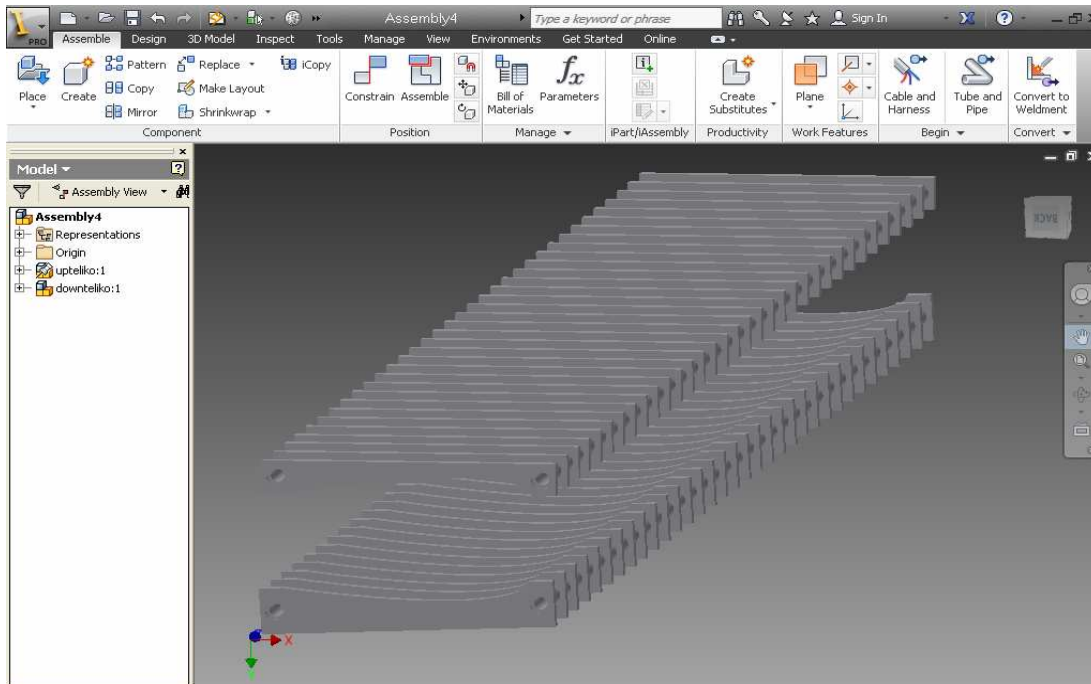
Εικόνα 44. Τελικό κάτω μέρος του συναρμολογήματος.

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε για το πάνω μέρος του οποίου το τελικό assembly παρουσιάζεται στην Εικόνα 45.

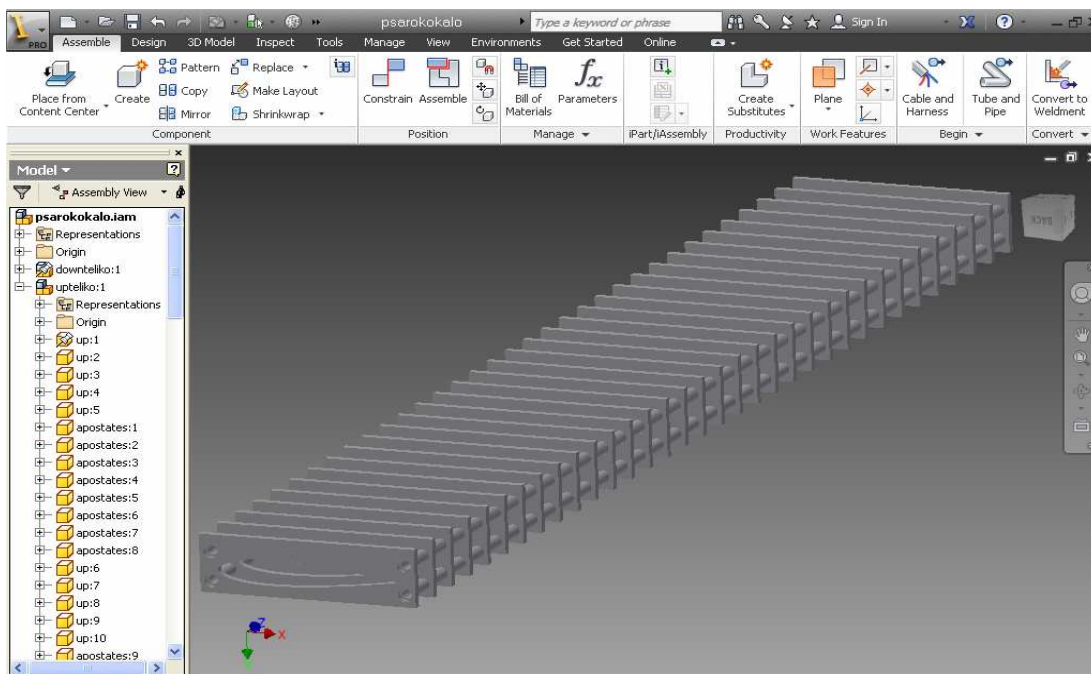


Εικόνα 45. Τελικό πάνω μέρος του συναρμολογήματος.

Τέλος, εισήχθησαν και τα δύο μέρη σε νέο περιβάλλον assembly:



Εικόνα 46. Πάνω και κάτω μέρος συναρμολογήματος σε περιβάλλον Assembly.
Η τελική του μορφή του σκελετού του καλουπιού παρουσιάζεται στην Εικόνα 47.

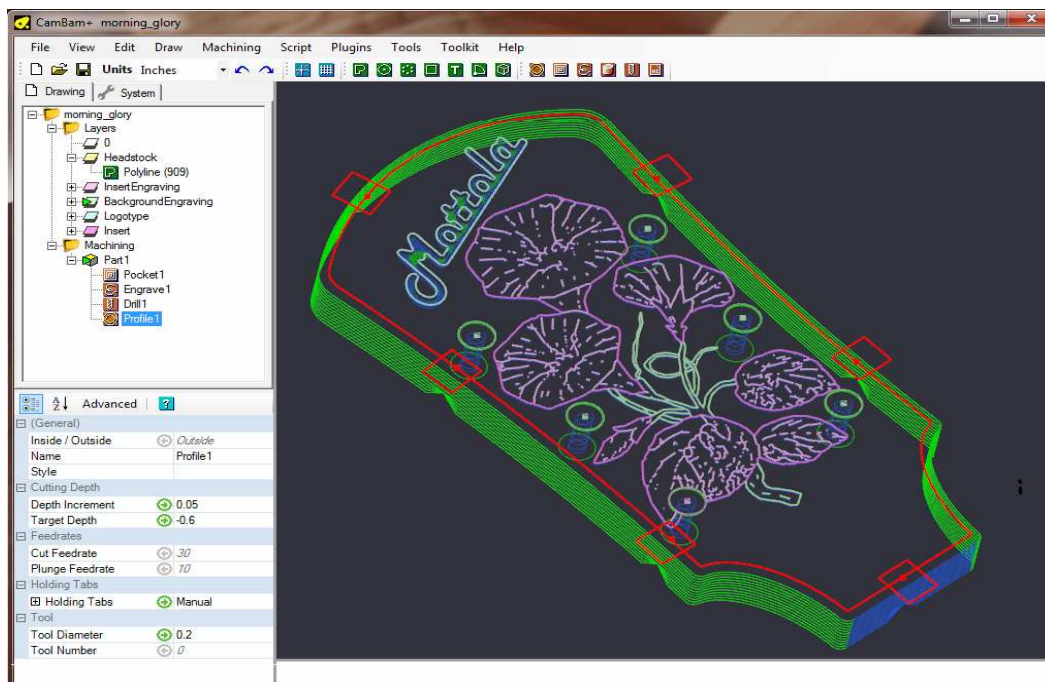


Εικόνα 47. Τελική μορφή του συναρμολογήματος.

4. ΓΕΝΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΓΙΑ ΚΟΠΗ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΦΙΛ (PARTS) ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΜΑΤΟΣ (ASSEMBLY) ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΓΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ - CAM

Computer Aided Manufacturing (CAM) είναι τα λογισμικά (ή και οι μέθοδοι) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προγραμμάτων κύκλων κατεργασίας σε εργαλειομηχανές CNC. Σε περιπτώσεις που η γεωμετρία ενός σχεδίου, προς κατεργασία δεν είναι πολύπλοκη ο κώδικας (G-code) εισάγεται στο μηχάνημα απευθείας, πληκτρολογώντας στον πίνακα ελέγχου του μηχανήματος τις κατάλληλες εντολές. Σε περιπτώσεις όμως μηχανολογικών σχεδίων σύνθετης γεωμετρίας όπως καλούπια και μήτρες, ή σχεδίων με πολύπλοκες μηχανολογικές απαιτήσεις, τα λογισμικά CAM είναι απαραίτητα για να αναπαράγουν με απόλυτη ακρίβεια και ταχύτητα τους κύκλους κατεργασίας.

Σε γενικές γραμμές η ανάπτυξη των λογισμικών CAM έχει κατανεμηθεί σε δυο βασικές κατηγορίες: **(α)** τα συστήματα CAM τα οποία χρησιμοποιούνται για σύνθετες γεωμετρικές κατασκευές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από το σύστημα, δίνουν υψηλής ακρίβειας διαδρομές και βέλτιστους χρόνους κατεργασίας, ώστε να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια κοπής και διάρκεια ζωής του εργαλείου και **(β)** η δεύτερη κατηγορία συστημάτων CAM χρησιμοποιείται για την παραγωγή απλούστερων γεωμετρικών στοιχείων όπου απαιτείται αυτοματοποίηση ή αλλιώς μεγάλη επαναληψιμότητα σε παρεμφερείς διαδικασίες όπως διάτρηση με τέσσερα διαφορετικά μεγέθη τρυπανιών [9]. Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται με πράσινες γραμμές η διαδρομή του κάθε κοπτικού εργαλείου όπως δομήθηκε σε περιβάλλον CAM για ένα τυχαίο τεμάχιο.



Εικόν

α 48. Κύκλος κατεργασίας σε περιβάλλον CamBam.



4.1 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ CNC ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ CAM

Τα λογισμικά CAM είναι ικανά να εξάγουν κώδικα G σε μορφή αναγνωρίσιμη από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (MCU) μιας εργαλειομηχανής ψηφιακού ελέγχου (CNC). Το πιο σημαντικό στη δημιουργία μιας διαδρομής τροχιάς (tool path generation) και ενός προγράμματος κοπής είναι η ακεραιότητα των δεδομένων. Ο υπολογιστικά παραγόμενος κώδικας G θα πρέπει να είναι ακριβής και κατάλληλος για κάθε τύπο εργαλειομηχανής CNC ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι ο κώδικας G που παράγεται από ένα σύστημα CAM δε θα πρέπει να χρειάζεται περαιτέρω τροποποιήσεις, βελτιστοποίηση ή επεξεργασία μέσω παραπλήσιων λογισμικών άπαξ και εκδοθεί. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται μέσω ενός πολύ καλά δομημένου προγραμματιστικού ύφους σε επίπεδο χρήσης CAM και ενός ορθά ρυθμισμένου ζεύγους προ- και μετά- επεξεργαστή (pre- and post- processor) για κάθε μηχανή CNC ξεχωριστά.

Οι προ-επεξεργαστές (pre- processors) είναι αρχεία στα οποία έχουν δηλωθεί βασικά στοιχεία της κατεργασίας που επιτελεί η μηχανή, αρχικές τιμές βασικών παραμέτρων της, στοιχεία και όρια για το παραγόμενο πρόγραμμα κοπής, υποστηριζόμενοι κώδικες G και αντιστοίχιση τους με κινήσεις και τροχιές, οι οποίες αναγνωρίζονται από τους ελεγκτές και μεταφραστές (controllers and compilers) των εκάστοτε εργαλειομηχανών. Οι μετά- επεξεργαστές (post- processors) πρακτικά αποτελούν εσωτερικά αρχεία των προγραμμάτων CAM και έχουν να κάνουν με την υλοποίηση των κινήσεων που αντιστοιχούν στο προγραμματισμένο αλγόριθμο κοπής, σε μορφή κώδικα G για υλοποίηση από την εκάστοτε μηχανή [9].

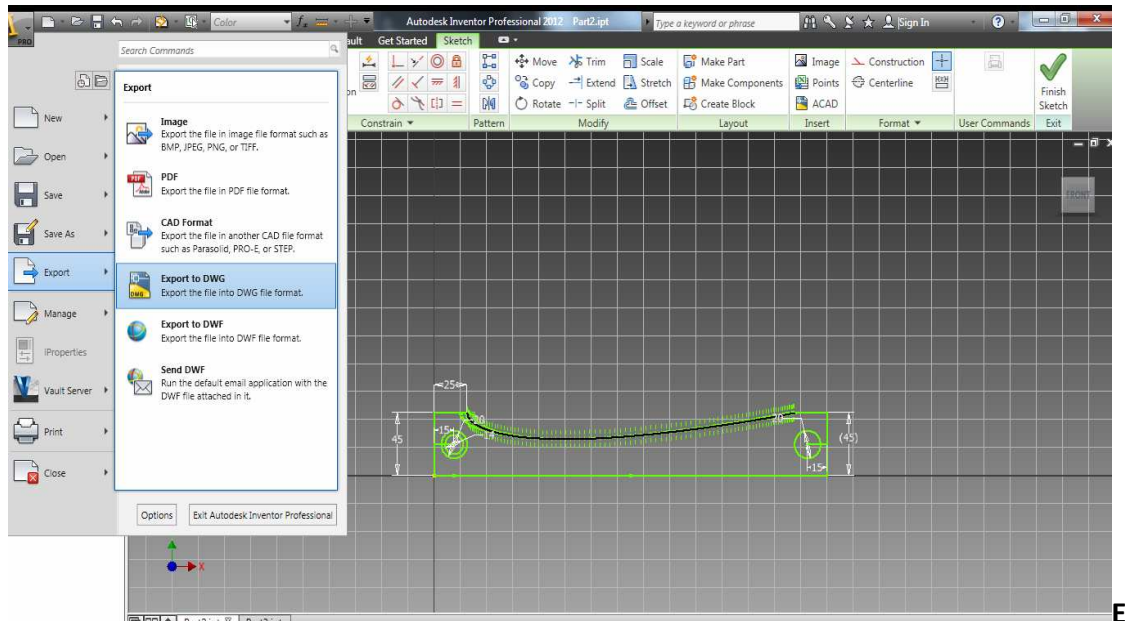
Το CAM πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι το CAMBAM [7] το οποίο επιτρέπει είτε τον σχεδιασμό δυσδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων με σκοπό την εξαγωγή προγραμμάτων κατεργασίας για CNC εργαλειομηχανές σε G κώδικα, είτε την εισαγωγή δυσδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων CAD πάλι με σκοπό την εξαγωγή προγραμμάτων κατεργασίας για CNC εργαλειομηχανές σε G κώδικα. Θεωρείται κυρίαρχο λογισμικό δημιουργίας κατεργασιών κοπής, ικανό για αποδοτικό προγραμματισμό εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC). Στην περίπτωση αυτή δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή του κώδικα G χειροκίνητα διότι η κοπή της γεωμετρίας των τεμαχίων είναι περίπλοκη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Cambam, στο οποίο έγινε εισαγωγή του μοντέλου από το Autodesk Inventor.

Το πρόγραμμα Ncplot [8] είναι το αμέσως επόμενο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε. Το πρόγραμμα αυτό ανήκει στην κατηγορία των μετά-επεξεργασιών των προγραμμάτων CAM και επιτρέπει επεξεργασία, μορφοποίηση και επαλήθευση του κώδικα G. Ο χειριστής της εργαλειομηχανής CNC ουσιαστικά ελέγχει σε αυτό τη διαδρομή του κοπτικού εργαλείου για τυχών σφάλματα και διορθώσεις του τελικού κώδικα G.

4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΩΔΙΚΑ G

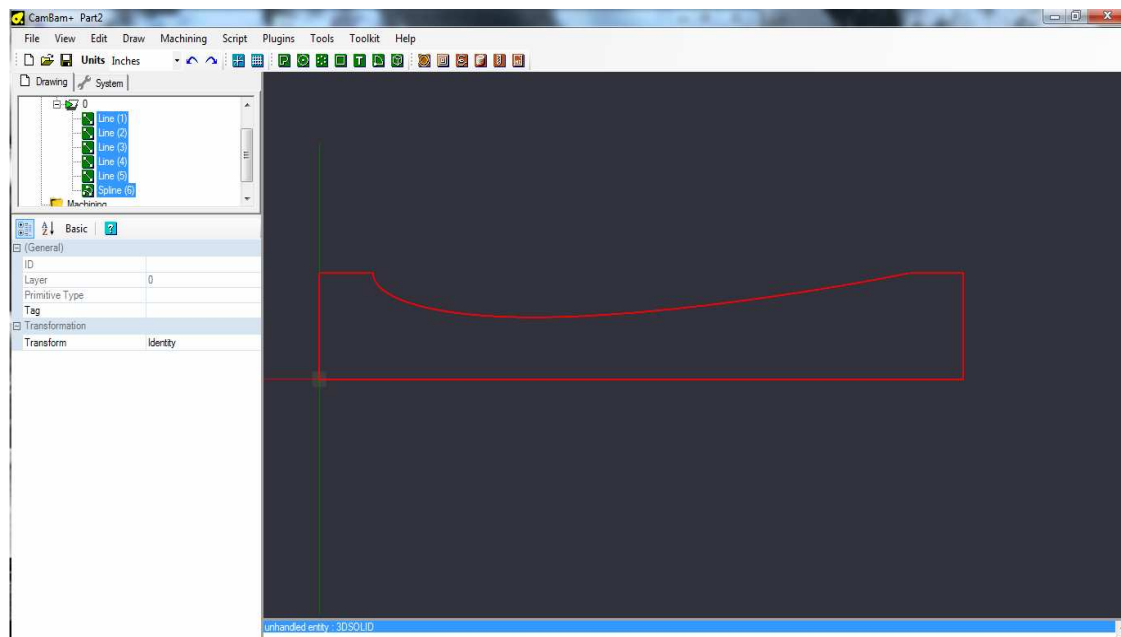
Η δημιουργία του κώδικα G απαιτείται για την κοπή των ελασμάτων του προφίλ στην εργαλειομηχανή CNC. Η διαδικασία ξεκίνησε με εξαγωγή του δισδιάστατου μοντέλου

(sketch κάτω ελάσματος) από το Autodesk Inventor, με την ακόλουθη διαδικασία όπως φαίνεται στην Εικόνα 49, file→export→export to DWG file.



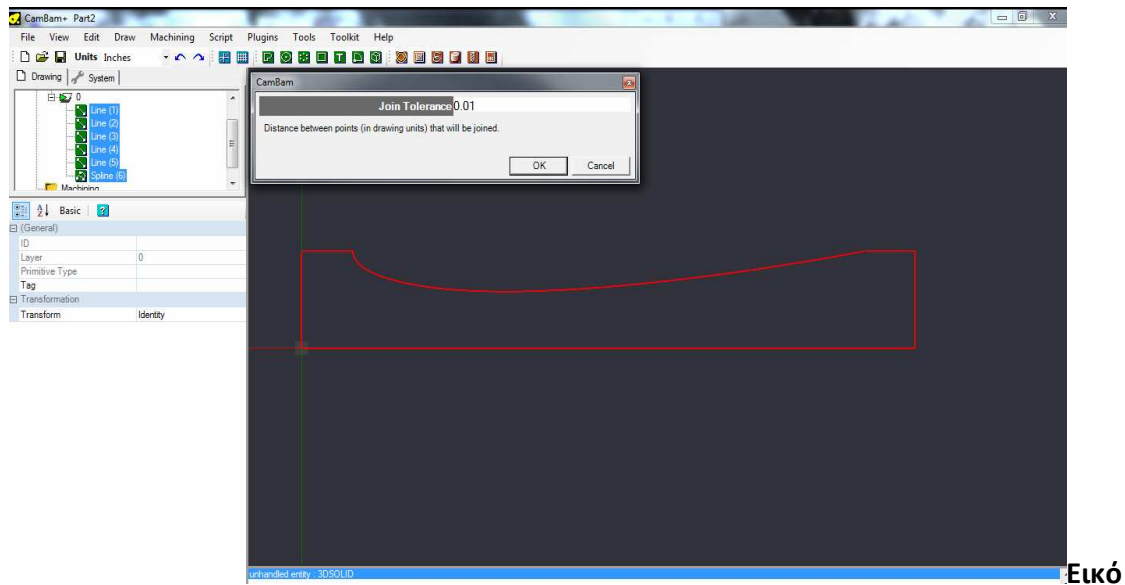
Εικόνα 49. Εξαγωγή DWG κάτω ελάσματος από το Inventor.

Το πρόγραμμα CamBam αναγνωρίζει αρχεία της μορφής DXF, και για το λόγο αυτό αφού τα αρχεία του Inventor εξήχθησαν σε μορφή DWG, μετατράπηκαν σε DXF με τη βοήθεια του Autocad. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή του σκαριφήματος (Sketch) του κάτω τεμαχίου στο CamBam, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 50.



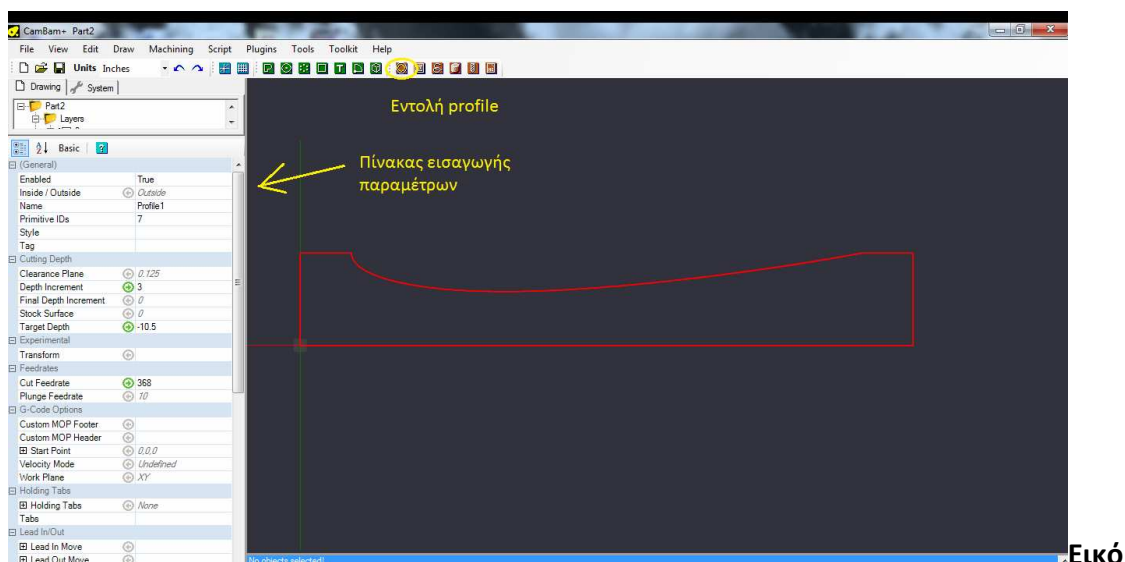
Εικόνα 50. Κάτω μέρος του ελάσματος όπως εμφανίζεται στο CamBam.

Το πρόγραμμα διαβάζει την κάθε γραμμή του σκαριφήματος ξεχωριστά, ενώ πρέπει να το αναγνωρίσει σαν ένα σώμα ώστε η διαδρομή που θα ακολουθήσει το εργαλείο να είναι η σωστή. Οπότε έγινε επιλογή όλου του σχεδίου και δεξί κλικ πάνω στο σχέδιο → *edit* → *join* → εμφανίστηκε το *Join tolerance* στο οποίο εισήχθη ο αριθμός 0,01 και οι γραμμές του σκαριφήματος αναγνωρίζονται πλέον ως ένα σχήμα (Εικόνα 51).



να 51. Ένωση των εντολών του σκαριφήματος του κάτω ελάσματος.

Στη συνέχεια έγινε επιλογή της εντολής *profile*, και στον πίνακα που εμφανίζεται εισήχθησαν οι παράμετροι για την κοπή των πλακών στην CNC εργαλειομηχανή.



να 52. Πίνακας εισαγωγής παραμέτρων κοπής.

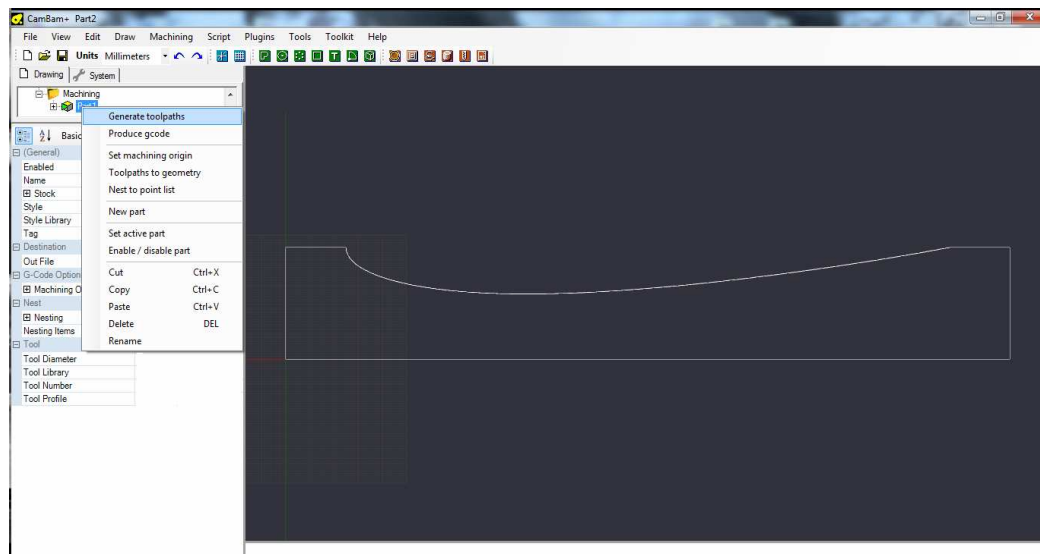


Οι παράμετροι που εισήχθησαν είναι το βάθος κοπής (depth increment) το οποίο ρυθμίζει το πόσο υλικό θα αφαιρέσει σε κάθε διαδρομή το κοπτικό εργαλείο στην εργαλειομηχανή CNC, τελικό βάθος κοπής (target depth), η πρόωση (cut feed rate) που ρυθμίζεται ανάλογα με το υλικό κοπής, το είδος φρεζαρίσματος (milling direction) ρυθμίζεται να είναι ομόρροπο (climb), η ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού εργαλείου (Spindle speed), το πάχος κοπής (cut width), τον αριθμό εργαλείου (tool number) που δηλώνει το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί και την διάμετρο του εργαλείου (tool diameter). Οι τιμές των παραμέτρων που εισήχθησαν για τη συγκεκριμένη κοπή φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι	Τιμές
Βάθος κοπής (depth increment)	3mm
Τελικό βάθος κοπής(target depth)	-10.5mm
Πρόωση(cut feed rate)	368mm/min
Φρεζάρισμα (Milling direction)	ομόρροπο (Climb)
Ταχύτητα περιστροφής(Spindle speed)	1700rpm
Πάχος κοπής(Cut width)	20mm
Αριθμός εργαλείου(tool number)	2
Διάμετρος εργαλείου(tool diameter)	20mm

Πίνακας 7. Τιμές παραμέτρων κοπής.

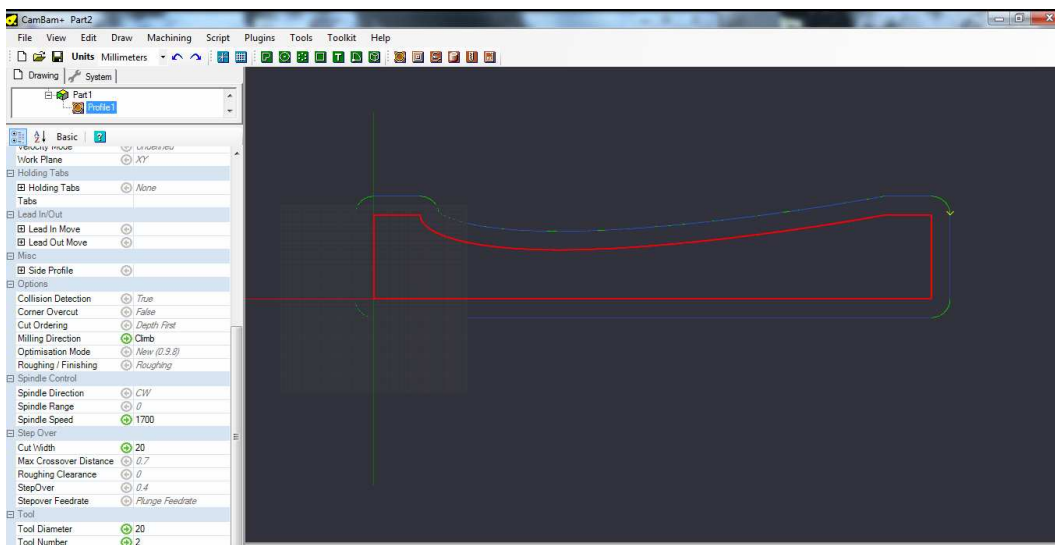
Για να οριστεί η διαδρομή που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο επιλέγεται η εντολή *generate tool path* όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 53. Η διαδικασία αυτή είναι η διαδικασία γένεσης της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου και μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως και πολύ περισσότερο, ανάλογα με το πόσο περίπλοκη είναι η διαδρομή του εργαλείου.



Εικόν

α 53. Χρήση της εντολής *Tool path generation*.

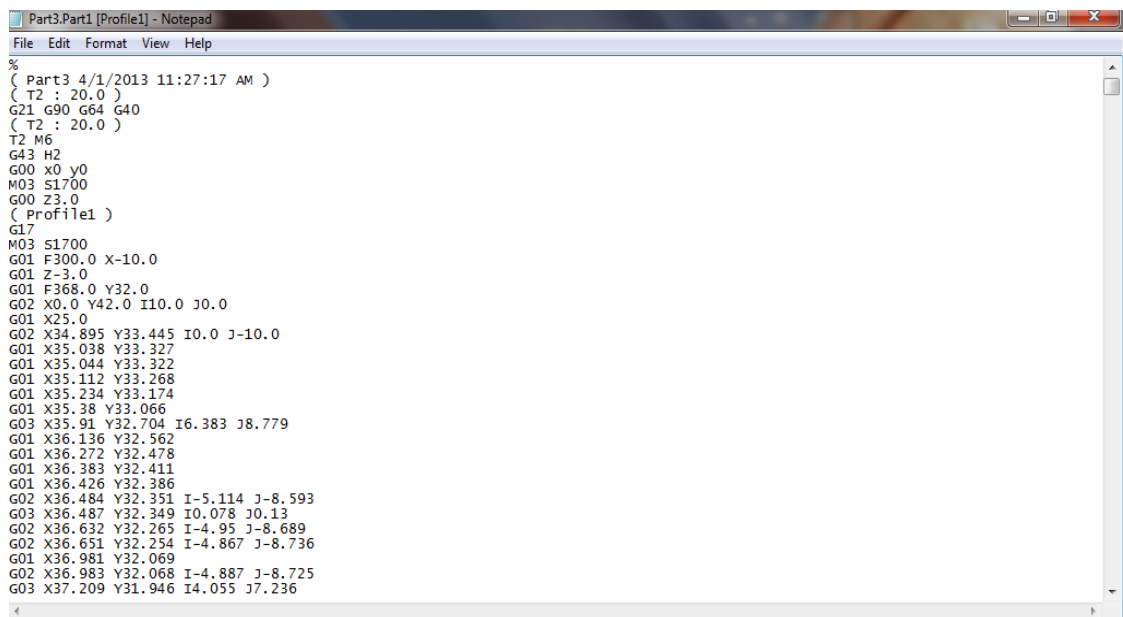
Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 54.



Εικό

να 54. Διαδρομή του κοπτικού εργαλείου.

Τέλος για την δημιουργία του G κώδικα από το πρόγραμμα CamBam έγινε επιλογή της εντολής *produce G code*. Ο κώδικας G αποθηκεύεται σε αρχείο κειμένου *.nc όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 55.



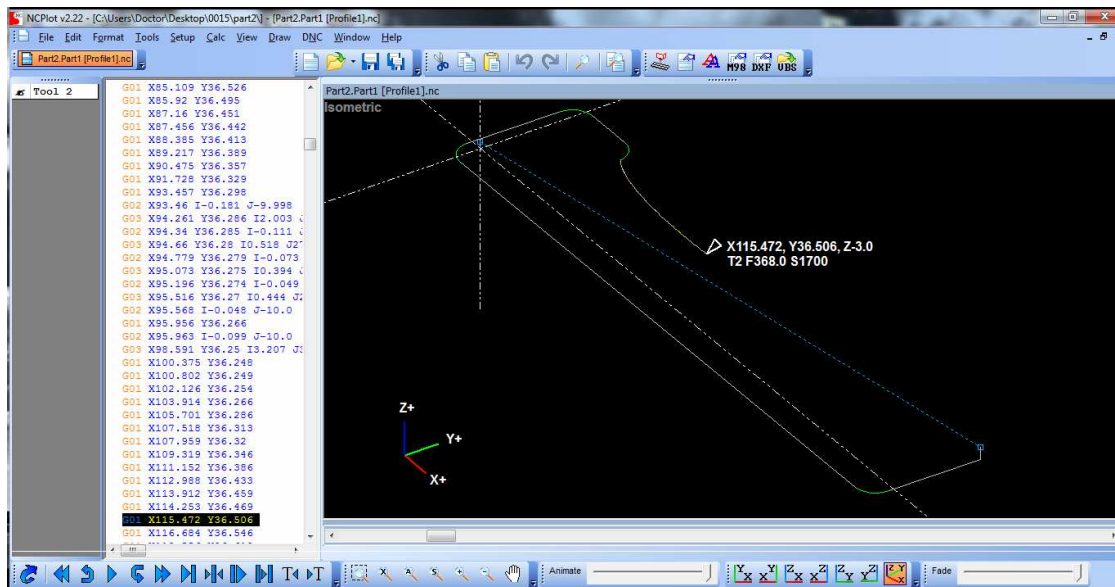
```

Part3.Part1 [Profile1] - Notepad
File Edit Format View Help
%
( Part3 4/1/2013 11:27:17 AM )
( T2 : 20.0 )
G21 G90 G64 G40
( T2 : 20.0 )
T2 M6
G43 H2
G00 X0 Y0
M03 S1700
G00 Z3.0
( Profile1 )
G17
M03 S1700
G01 F300.0 X-10.0
G01 Z-3.0
G01 F368.0 Y32.0
G02 X0.0 Y42.0 I10.0 J0.0
G01 X25.0
G02 X34.895 Y33.445 I0.0 J-10.0
G01 X35.038 Y33.327
G01 X35.044 Y33.322
G01 X35.112 Y33.268
G01 X35.234 Y33.174
G01 X35.38 Y33.066
G03 X35.91 Y32.704 I6.383 J8.779
G01 X36.136 Y32.562
G01 X36.272 Y32.478
G01 X36.383 Y32.411
G01 X36.426 Y32.386
G02 X36.484 Y32.351 I-5.114 J-8.593
G03 X36.487 Y32.349 I0.078 J0.13
G02 X36.632 Y32.265 I-4.95 J-8.689
G02 X36.651 Y32.254 I-4.867 J-8.736
G01 X36.981 Y32.069
G02 X36.983 Y32.068 I-4.887 J-8.725
G03 X37.209 Y31.946 I4.055 J7.236
  
```

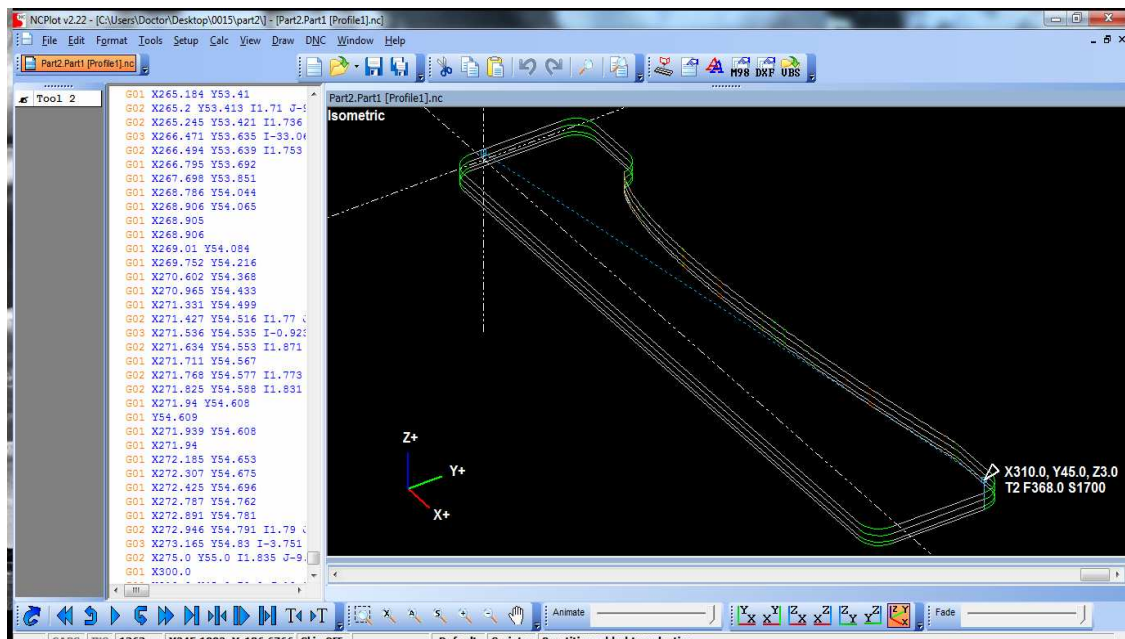
Εικόν

α 55. G κώδικας.

Με το πρόγραμμα ncplot έγινε άνοιγμα του αρχείου που περιέχει τον G κώδικα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 56 και εμφανίστηκε η δομή του κώδικα. Με την εντολή *play* το πρόγραμμα τρέχει τον κώδικα και εμφανίζεται η διαδρομή που ακολουθεί το κοπτικό εργαλείο σε όλη τη διάρκεια της κοπής. Ο χειριστής είναι σε θέση να εντοπίσει τυχόν λάθη κατά την διάρκεια κοπής. Η τελική διαδρομή του εργαλείου φαίνεται στην Εικόνα 57, όπου το πρόγραμμα έχει τρέξει όλες τις εντολές του κώδικα.



Εικόνα 56. Επισκόπηση διαδρομής του κοπτικού εργαλείου.



Εικόν

α 57. Διαδρομή κοπτικού εργαλείου για όλο τον κώδικα G.



5. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΦΙΛ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

5.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ

Ο σύγχρονος αριθμητικός έλεγχος των εργαλειομηχανών ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του πολέμου με τους Ιάπωνες όπου η Αμερικανική πολεμική αεροπορία είχε εξαιρετικά μεγάλες απώλειες. Η ταχεία παραγωγή και επισκευή αεροσκαφών και ανταλλακτικών στάθηκε πραγματικά μεγάλο πρόβλημα και οδηγούσε συχνά σε ελαττωματικά και επικίνδυνα τεμάχια. Ακόμα, οι απαιτήσεις της βιομηχανίας για πιο σύνθετα τεμάχια δεν μπορούσαν να καλυφθούν από τα συμβατικά μηχανουργία. Έως το 1949 η εξέλιξη ήταν αργή όμως εκείνη τη χρονιά ανατέθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης η αποστολή ανάπτυξης αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών. Ο John Pearson και η ομάδα του, ήταν οι πρώτοι που προσδιόρισαν τις αρχές λειτουργίας των μηχανών αυτών. Σκέφτηκαν ότι χρειάζεται ηλεκτρονικός υπολογιστής, για να προσδιορίζει τις διαδρομές του κοπτικού εργαλείου. Αυτές οι κινήσεις έπρεπε να αποθηκεύονται στο μόνο μέσο εκείνης της εποχής δηλαδή στις διατρητές κάρτες. Επίσης η μηχανή θα έπρεπε να κατέχει ένα μέσω ανάγνωσης, ώστε να διαβάζει αυτόματα τις κάρτες αυτές. Τέλος κρίθηκε απαραίτητη η ύπαρξη μιας κεντρικής μονάδας ελέγχου, ώστε να καθοδηγεί τους σερβοκινητήρες που θα κινούσαν τους κοχλίες κίνησης των μηχανών. Το 1952 κατασκευάστηκε η πρώτη ψηφιακή εργαλειομηχανή, μία κατακόρυφη φρεζομηχανή. Η ογκώδεις αυτή φρεζομηχανή είχε όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και εκτελούσε ταυτόχρονες και ανεξάρτητες κινήσεις σε τρεις άξονες κατεργασίας. Το 1954 άρχισε να χτίζεται η πρώτη συμβολική γλώσσα προγραμματισμού και ονομάστηκε «Αυτόματος Προγραμματισμός Εργαλείων» (Automatically Programmed Tool). Περιέγραφε με σχετική ευκολία τη μορφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου και τις οδηγίες προς τη μηχανή, για να το κατασκευάσει. Αργότερα η εταιρία Bendix αγόρασε την πατέντα από τον Pearson και κατασκεύασε την πρώτη εμπορική ψηφιακά καθοδηγούμενη εργαλειομηχανή. Έτσι άρχισε η αυτοματοποίηση όλων των μηχανουργικών κατασκευών και η ανάπτυξη αντίστοιχων NC εργαλειομηχανών. Η εξέλιξη των μικροϋπολογιστών οδήγησε στη μετάβαση από τις NC στις CNC εργαλειομηχανές και η ανάπτυξη των αισθητήρων και των συστημάτων αυτόματου ελέγχου στις αντίστοιχες DNC.

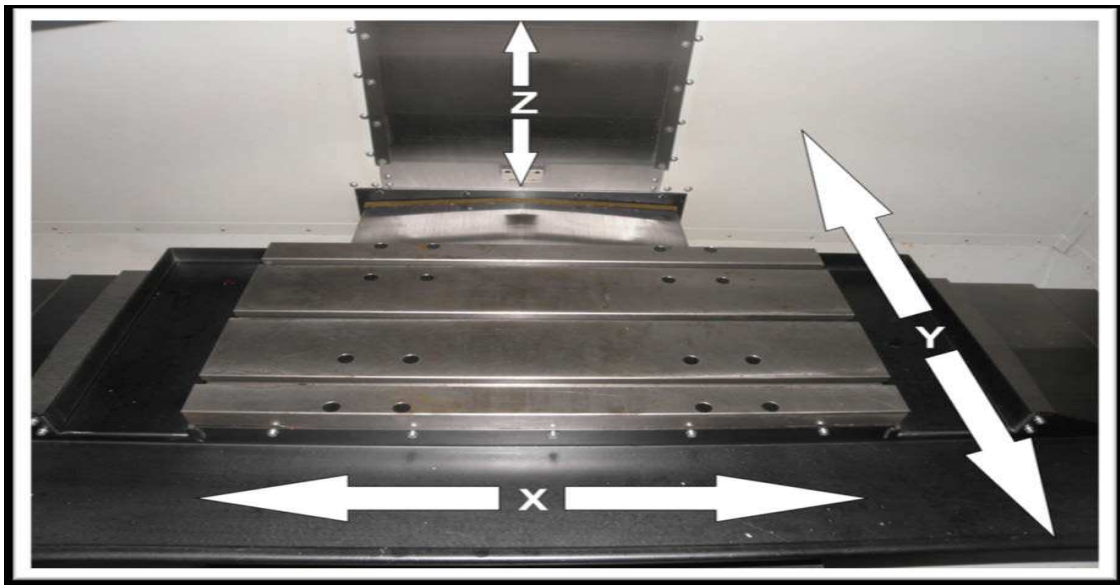
5.2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC HAAS VF-1



Εικόνα 58. Εργαλειομηχανή CNC Haas VF-1

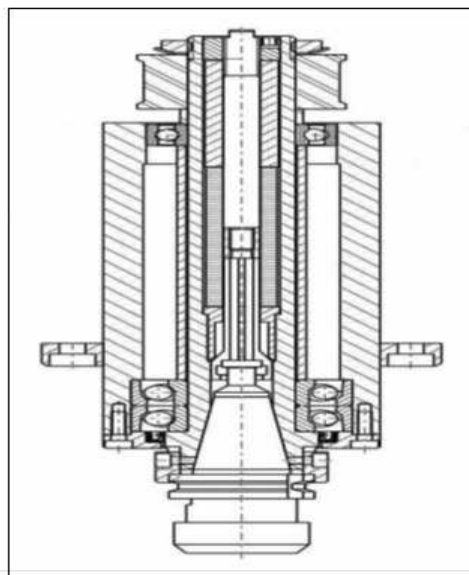
Καθοριστική σημασία στις παραμέτρους προγραμματισμού καθοδήγησης των CNC εργαλειομηχανών έχουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Οι τεχνικές τους λεπτομέρειες (hardware specifications) προσδιορίζουν τις δυνατότητες λειτουργίας τους, άρα και τον τρόπο προγραμματισμού αυτών για την ψηφιακά καθοδηγούμενη επιθυμητή κατεργασία που θα υλοποιηθεί. Η εργαλειομηχανή VF-1 της εταιρείας HAAS είναι ένα κάθετο κέντρο κατεργασίας με κίνηση στους τρεις άξονες X, Y, Z και είναι κατά παραγγελία τροποποιημένη ώστε να επιτυγχάνει ακρίβεια κατεργασίας τάξεως του 1 μ m. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής αποτελούν τα μήκη των διαδρομών της με εύρος τα 514mm στον οριζόντιο άξονα X, τα 410mm στον άξονα Y, και τα 510mm στον κάθετο στο επίπεδο-XY, άξονα Z. Η τράπεζα κατεργασίας που εκτελεί κινήσεις στο επίπεδο XY (βλ.Εικόνα 59).

Η τράπεζα κατεργασίας διαθέτει ειδικούς οδηγούς (αύλακες) συγκράτησης στους οποίους πακτώνονται (δένονται) τα προς κατεργασία κομμάτια. Στην Εικόνα 59, παρουσιάζεται η τράπεζα κατεργασίας με διαστάσεις 660mm x 355mm στους άξονες X και Y αντίστοιχα. Η κίνηση της τράπεζας γίνεται με σερβοκινητήρες που μετακινούν τις οριζόντιες και κάθετες γλίστρες που διακρίνονται στην ίδια Εικόνα. Η τράπεζα έχει τρεις χαρακτηριστικές αύλακες συγκράτησης, διαστάσεων 16mm που χρησιμεύουν για την τοποθέτηση ειδικών συστημάτων συγκράτησης και πάκτωσης των προς κατεργασία τεμαχίων. Η συνδυασμένη κίνηση στους άξονες, που προκύπτει από την κίνηση της κάθε γλίστρας, γίνεται με ακρίβεια που φτάνει το 1 μ m. Η ισχύς της VF1 είναι της τάξεως των 20HP και η ταχύτητα κίνησης των γλιστρών φτάνει τα 25,4m/sec.



Εικόνα 59. Τράπεζα κατεργασίας της εργαλειομηχανής CNC.

Η διασύνδεση της μηχανής με τους κώνους που φέρουν τα κοπτικά εργαλεία πραγματοποιείται από την άτρακτο η οποία περιστρέφει με ταχύτητες που καθορίζει ο χρήστης. Η περιστροφή της ατράκτου κυμαίνεται από 5 έως 7500 περιστροφές το λεπτό (rpm). Ο κώνος προσαρμόζεται στην άτρακτο με πνευματικό σύστημα συγκράτησης. Η άτρακτος μπορεί να κινηθεί μόνο κατά τον άξονα Z μαζί με ολόκληρο το σύστημα κίνησής της (κινητήρας). Στην Εικόνα 60 παρουσιάζεται το μηχανολογικό σχέδιο τομής της ατράκτου, στην οποία διακρίνεται προσαρμοσμένος κώνος.



Εικόνα 60. Τομή ατράκτου με κώνο.

Η εργαλειομηχανή είναι συμβατή με κώνους κατηγορίας ISO 40. Η κατηγορία αυτή είναι η πιο διαδεδομένη και περιλαμβάνει κώνους που φέρουν συστολικούς σφικτήρες (collets), τσοκ για τρυπάνια και κώνους για φρεζοκεφαλές. Για την επίτευξη των διάφορων κατεργασιών με εναλλαγές κοπτικών εργαλείων η VF1 διαθέτει εργαλειοφορέα (ή μύλο) απόθεσης εργαλείων που μπορεί να υποστηρίξει 20 κώνους με τα αντίστοιχα κοπτικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια ενός προγραμματισμένου κύκλου κατεργασίας. Ο μύλος της VF1 και οι θέσεις εναπόθεσης αυτού παρουσιάζονται στην Εικόνα 61.



Εικόνα

61. Ο μύλος και οι θέσεις εναπόθεσης της εργαλειομηχανής CNC VF1.

Τον εγκέφαλο της εργαλειομηχανής αποτελεί ο πίνακας χειρισμού (control panel) που παρουσιάζεται στην Εικόνα 62. Μέσω αυτού πραγματοποιείται η επικοινωνία του χειριστή με τη μηχανή. Το panel αποτελείται από LCD οθόνη και αλφαριθμητικό πληκτρολόγιο[13].



Εικόνα 62. Πίνακας χειρισμού της εργαλειομηχανής CNC VF1.

5.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η πρώτη κατεργασία για την κατασκευή του συναρμολογήματος του καλουπιού ήταν η κοπή 34 ελασμάτων για το πάνω μέρος και 34 για το κάτω μέρος του συναρμολογήματος του καλουπιού αντίστοιχα. Από μια πλάκα αλουμινίου διαστάσεων 1m x 1m x 10mm κόπηκαν 24 ελάσματα διαστάσεων 300mm x 32mm x 10mm και 34 ελάσματα διαστάσεων 300mm x 45mm x 10mm. Η κοπή έγινε με δισκοπρίονο εφαρμοσμένο σε τραπέζι για κοπή μεγάλων αντικειμένων με μεγάλη σταθερότητα και ακρίβεια. Στην Εικόνα 63 παρουσιάζεται η διαδικασία κοπής των ελασμάτων.



όνα 63. Κοπή των ελασμάτων αλουμινίου στο δισκοπρίονο.

Τα πάνω και τα κάτω ελάσματα μετά την κοπή φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 64.



Εικόνα 64. Πάνω και κάτω ελάσματα πριν την εισαγωγή τους στην εργαλειομηχανή.

Η επόμενη κατεργασία αφορά τη δημιουργία των αποστατών. Οι αποστάτες συγκρατούν το συναρμολόγημα σταθερό και ρυθμίζουν την απόσταση μεταξύ των ελασμάτων. Από κοίλους άξονες αλουμινίου υψηλής ακρίβειας εσωτερικής διαμέτρου 14mm, εξωτερικής διαμέτρου 20mm και συνολικού μήκους 8m έγινε κοπή των αποστατών. Σύμφωνα με το τρισδιάστατο μοντέλο (CAD) το μήκος του κάθε αποστάτη πρέπει να είναι 54,4mm. Σε δισκοπρίονο έγινε η κοπή 66 αποστατών που χρειάστηκαν για την συναρμολόγηση του σκελετού του συναρμολογήματος του καλουπιού. Έπειτα για την λείανση των επιφανειών χρησιμοποιήθηκε τόρνος όπως παρουσιάζεται την Εικόνα 65 δεξιά.



Εικόνα 65. Κοπή και λείανση επιφάνειας αποστατών με δισκοπρίνο και τόρνο

Για την στήριξη των δοκιμών στην τράπεζα συγκράτησης της εργαλειομηχανής CNC είναι πολύ σημαντική η δημιουργία μηχανισμού συγκράτησης των δοκιμών. Ο μηχανισμός αυτός αποσκοπεί στην ασφαλή στήριξη των δοκιμών κατά την διεργασία της κοπής χωρίς κίνδυνο ταλαντώσεων και απώλειας ακρίβειας. Η κεντρική ιδέα ήταν η συγκράτηση των δοκιμών πάνω σε πλάκα με ασφαλή συγκράτηση της πλάκας πάνω στην τράπεζα κατεργασίας.

Χρησιμοποιήθηκε πλάκα αλουμινίου με δυνατότητα συγκράτησης δύο ελασμάτων. Η συγκράτησή των ελασμάτων έγινε με τέσσερις τρύπες σπειρώματος M10. Οι δύο πάνω τρύπες ισαπέχουν από την πάνω πλευρά της πλάκας και η απόσταση των κέντρων τους στον άξονα X είναι 270mm, σύμφωνα με το τρισδιάστατο μοντέλο CAD των ελασμάτων. Οι κάτω τρύπες ισαπέχουν από την κάτω πλευρά της πλάκας και η μεταξύ τους απόσταση είναι επίσης 270mm. Στα 68 ελάσματα δημιουργήθηκαν από δύο διαμπερείς οπές 11mm το κέντρο των οποίων προσδιορίστηκε σύμφωνα με το μοντέλο για τη στήριξη των ελασμάτων πάνω στην πλάκα με βίδες M10. Η στήριξη της πλάκας πάνω στην τράπεζα κατεργασίας έγινε με 9 βίδες οι οποίες συγκρατήθηκαν με σφιγκτήρες τύπου T, που εφαρμόζουν κατάλληλα στην τράπεζα κατεργασίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 66.



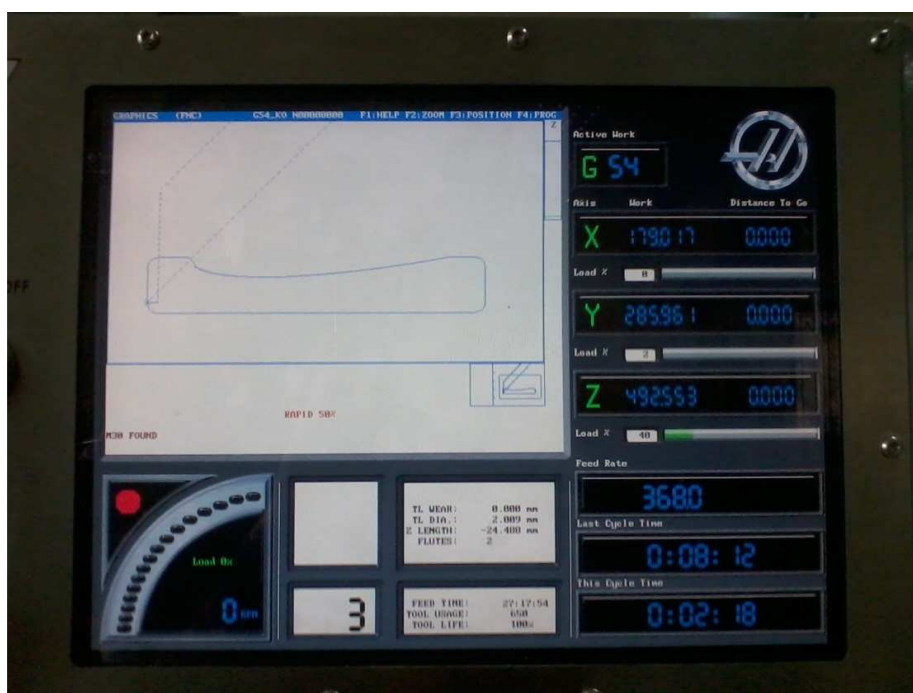
Εικό

να 66. Ελάσματα πακτωμένα προς κατεργασία.

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ G-CODE ΣΤΗ CNC ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία δημιουργίας G-κώδικα των ελασμάτων από το πρόγραμμα Cambar, οι κώδικες αποθηκεύτηκαν σε μορφή κειμένου *.nc, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Για να αναγνωριστούν οι κώδικες από την εργαλειομηχανή έγινε αποθήκευση σε μορφή *.txt και εισήχθησαν σε αυτή μέσω της USB θύρας της μηχανής. Για την εισαγωγή του κώδικα στη CNC έγινε:

- Εκκίνηση μηχανής από τον κεντρικό διακόπτη ON/OFF.
- Ενεργοποίηση του Power On.
- Απενεργοποίηση των Alarms
- Ενεργοποίηση της εντολής Power Up/Restart.
- Έχοντας τοποθετήσει το USB stick στην υποδοχή της μηχανής επιλέγεται η εντολή List Program → Device → USB Device → Enter → Directory → Select Program.
- Γίνεται ανάγνωση του κώδικα από τη συσκευή αποθήκευσης USB και όχι μέσω της μνήμης της εργαλειομηχανής λόγω χωρητικότητας.
- Έλεγχος προγράμματος με τη βοήθεια των γραφικών της μηχανής ενεργοποιώντας δυο φορές την εντολή: Setting Graph → Cycle Start για την αποφυγή σφαλμάτων (βλ. Εικόνα 67) [9].



Εικόνα 67. Προεπισκόπηση G-κώδικα.

Για τον μηδενισμό των ελασμάτων χρησιμοποιήθηκε μετρητική διάταξη (Taster) η οποία έχει τη μορφή μετρητικού ρολογιού και εφαρμόζει στον κώνο της εργαλειομηχανής αφού πρώτα έχει ενεργοποιηθεί η εντολή *Orient Spindle*, που ακινητοποιεί την άτρακτο. Κύρια χαρακτηριστικά του Taster είναι το ρολόι, το οποίο διαθέτει ακρίβεια 0,01 mm και η σφαίρα στο άκρο της ακίδας με διάμετρο 4 mm. Το σφαιρίδιο έρχεται σε επαφή με τα προς μηδενισμό τεμάχια και έχει διαδρομή 4 mm προς όλες τις κατευθύνσεις. Η αρχή λειτουργίας του Taster είναι απλή και παράλληλα ακριβής. Το σφαιρίδιο έρχεται σε επαφή με το τεμάχιο με τη βοήθεια της εντολής *HAND JOG* και μετακινείται έως ότου το ρολόι δείξει 0, δηλαδή έως ότου διανύσει 2 mm. Τότε ο άξονας στον οποίο γίνεται η μετατόπιση έχει μηδενιστεί. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται ουσιαστικά για τη μηχανή το τοπικό σύστημα συντεταγμένων του τεμαχίου. Η διαδικασία μηδενισμού πραγματοποιείται ως εξής:

- Τοποθετείται το Taster στην άτρακτο της εργαλειομηχανής και ενεργοποιείται η εντολή *HAND JOG*.
- Επιλέγεται η κλίμακα υποδιαίρεσης για την κίνηση του Z άξονα και με τη βοήθεια του joystick του controller το σφαιρίδιο του μετρητικού φέρεται σε επαφή με μία από τις πλευρές του τεμαχίου.
- Ενεργοποιείται δύο φορές η εντολή *OFFSET* προκειμένου να εμφανιστεί το μενού μηδενισμού τεμαχίων.
- Επιλέγεται σε ποιο κώδικα G θα αποθηκευτεί ο μηδενισμός.
- Επιλέγεται ο άξονας (X, Y ή Z) προς μηδενισμό.
- Ενεργοποιείται η εντολή *PART ZERO SET* και μηδενίζεται ο κάθε άξονας ξεχωριστά.

Στην Εικόνα 68 παρουσιάζεται ο μηδενισμός του X, Y και Z άξονα για την κοπή του προφίλ.



Εικόνα 68. Μηδενισμός αξόνων X,Y,Z

Για τον μηδενισμό των εργαλείων επιλέχθηκε μια φορά η εντολή *OFFSET* για να εμφανιστεί το αντίστοιχο μενού. Για τη διαδικασία αυτή, βασική προϋπόθεση είναι η τοποθέτηση των κοπτικών εργαλείων στους κατάλληλους κώνους συγκράτησης και ο έλεγχος του προκαθορισμένου μήκους τους. Τοποθετώντας το κάθε εργαλείο στην άτρακτο, επιλέγεται από το μενού, το αντίστοιχο νούμερο του εργαλείου και οδηγείται με τη βοήθεια της εντολής *HAND JOG*, κατά τον άξονα Z, στην επιφάνεια του τεμαχίου όπου και ορίζεται το σημείο μηδέν, με την εντολή *TOOL OFFSET MEASURE*. Η διαδικασία μηδενισμού του διπτερου κονδυλίου κοβαλτίου για την κοπή του προφίλ φαίνεται στην Εικόνα 69.



Εικ

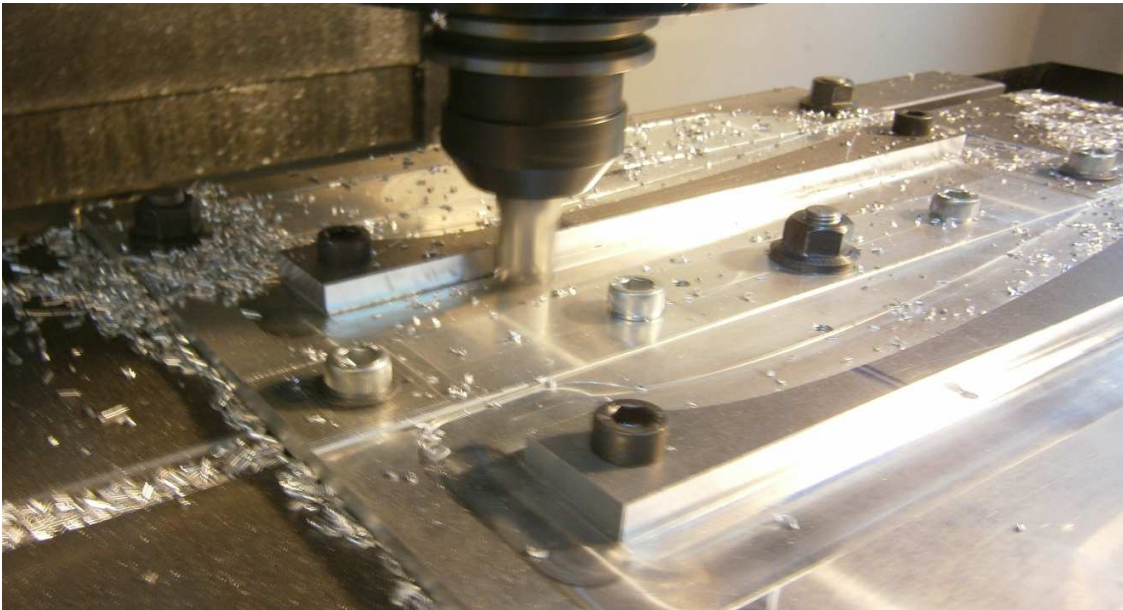
όνα 69. Μηδενισμός δίπτερου κονδυλίου.

5.3 ΨΗΦΙΑΚΑ ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την κατεργασία του προφίλ είναι δίπτερο κονδύλι κοβαλτίου διαμέτρου 20mm, κατάλληλο για κοπή μαλακού υλικού όπως το αλουμίνιο. Ο κύκλος κατεργασίας ξεκινάει ενεργοποιώντας την εντολή *Cycle Start*. Για τον σταδιακό έλεγχο κοπής επιλέγεται η εντολή *Single Block*, με την οποία ο κώδικας εκτελείται ανά γραμμή. Στις Εικόνες 70 και 71 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τον κύκλο κατεργασίας των προφίλ των ελασμάτων.

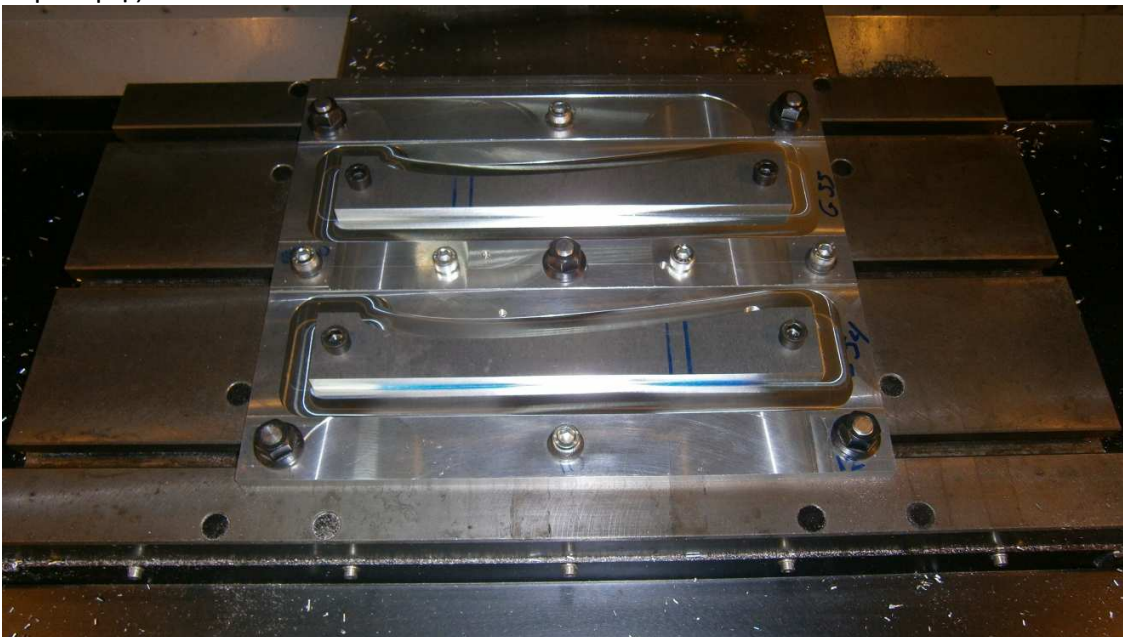


Εικόνα 70. Μετωπικό φρεζάρισμα ελάσματος.



Εικόνα 71. Περιφερειακό φρεζάρισμα ελάσματος.

Στην Εικόνα 72 φαίνονται και τα δύο ελάσματα κομμένα σύμφωνα με το προφίλ της αεροτομής Naca0015.

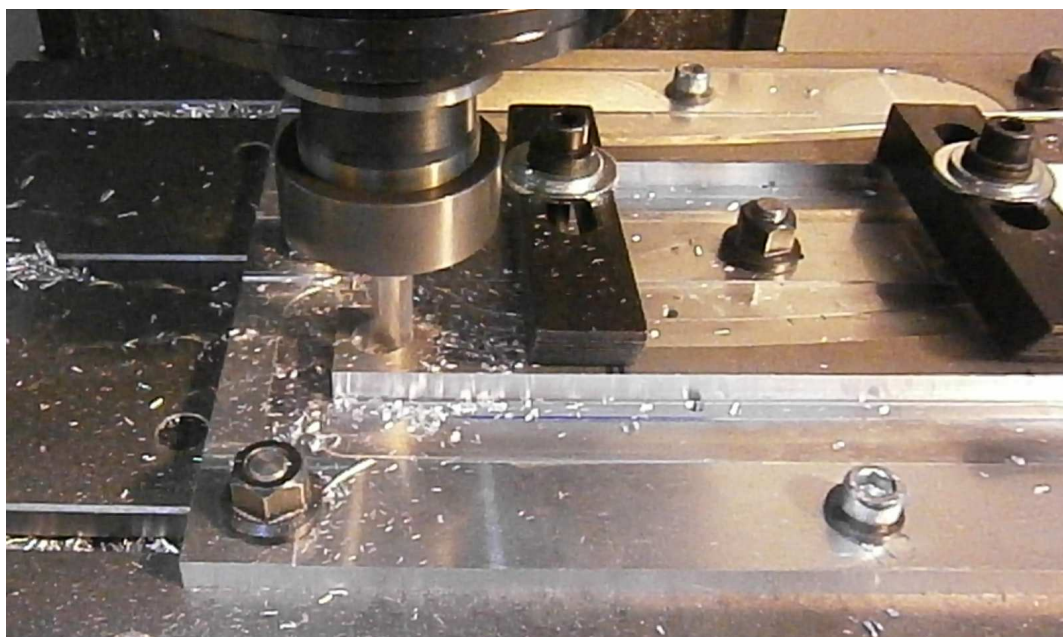


Εικόνα 72. Τελικά τεμάχια προφίλ NACA0015.

Για τη δημιουργία πατούρας και των διαμπερών οπών υλοποιήθηκε συγκράτηση των δοκιμών με δύο φουρκέτες καθώς οι βίδες παρεμβάλλονται στην κατεργασία (βλ. Εικόνα 73). Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα τετράφτερο κονδύλι κοβαλτίου διαμέτρου 14mm που παρουσιάζεται στην Εικόνα 74.



Εικόνα 73. Συγκράτηση ελασμάτων για δημιουργία πατούρας και οπής.



Εικόνα 74 Δημιουργία πατούρας και διαμπερούς οπής.

5.4 ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΚΕΛΕΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Το τελικό στάδιο της κατασκευής του σκελετού του καλούπιού αποτελεί η συναρμολόγησή του. Αρχικά έγινε συναρμολόγηση του πάνω μέρους και στη συνέχεια του κάτω. Στην Εικόνα 75 παρουσιάζεται η συναρμολόγηση 2 ελασμάτων και δύο αποστατών, μετά την κατεργασία τους. Με την ίδια φιλοσοφία ολοκληρώθηκαν τα

συναρμολογήματα του άνω και κάτω τμήματος του σκελετού όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 76.



Εικόνα 75 Συναρμολόγηση δύο ελασμάτων και δύο αποστατών



Εικόνα 76. Συναρμολογήματα άνω και κάτω τμημάτων σκελετού καλουπιού.

Η συγκράτηση όλων των κομματιών μεταξύ τους υλοποιήθηκε με χρήση ντίζας μήκους 2,20m η οποία περάστηκε από τις οπές των αποστατών και συγκρατήθηκε με

παξιμάδια όπως φαίνεται στην Εικόνα 77. Η τελική μορφή τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 78.



Εικόνα 77. Συγκράτηση κομματιών.



Εικόνα 78. Άνω και κάτω τμήμα συναρμολογήματος σκελετού καλουπιού.

Η ένωσή τους παρουσιάζεται στην εικόνα 79 όπου και διακρίνεται πλέον το προφίλ της αεροτομής NACA0015.



Εικόνα 79. Πλήρες συναρμολόγημα σκελετού καλουπιού.



6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μέρος ολικής κατασκευής ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα με στόχο τη χρήση σε αστικό ή μη περιβάλλον χωρίς περιορισμούς. Συγκεκριμένα επικεντρώθηκε στην επιλογή, τη μοντελοποίηση και την κατασκευή του καλουπιού των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Ο τύπος της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα που επιλέχθηκε είναι Darrieus - H, ο οποίος είναι και οι πιο αποδοτικός στην κατηγορία των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αν γίνει επιλογή του κατάλληλου προτύπου αεροτομής μπορεί να επιτευχθεί εκκίνηση χωρίς την χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας με την αλλαγή των γωνιών πρόσπτωσης ή με την προσθήκη μικρής Savonious και άλλες μεθόδους.

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων του πτερυγίου πραγματοποιήθηκε ανάλυση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη γεωμετρία τύπου πτερυγίου. Με βάση τη μελέτη αυτή, επιλέχθηκε το πρότυπο της αεροτομής NACA0015 η οποία έχει υψηλό συντελεστή άντωσης για χαμηλούς ανέμους και λόγω της συμμετρίας της, τις λιγότερες άγνωστες παραμέτρους επιρροής στην αεροδυναμική της συμπεριφορά και προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας και ακολούθως του πτερυγίου.

Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής καλουπιού για την χύτευση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και με βάση τις υπάρχουσες τεχνικές, επιλέχθηκε η κατασκευή καλουπιού που βασίζεται στην χρήση συναρμολογήματος (Assembly) σκελετού. Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει τη δυνατότητα πλήρωσης των κενών του σκελετού του συναρμολογήματος με αδρανές υλικό χαμηλού κόστους επιφέροντας το τελικό αποτέλεσμα σε διαστατική ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας. Η κεντρική ιδέα βασίστηκε στην κατασκευή ελασμάτων του προφίλ της ανεμογεννήτριας και αποστατών για τη συναρμολόγηση του σκελετού του καλουπιού.

Αρχικά έγινε τρισδιάστατη μοντελοποίηση των κομματιών του συναρμολογήματος στο πρόγραμμα τρισδιάστατης παραμετρικής μηχανολογικής σχεδίασης Inventor της Autodesk. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των μοντέλων των ελασμάτων σε σύστημα CAM για την εξαγωγή του κώδικα-G για την ψηφιακή καθοδήγηση των απαραίτητων κατεργασιών στην εργαλειομηχανή CNC VF1 της εταιρίας HAAS.

Υλοποιήθηκε η κατασκευή των ελασμάτων του προφίλ της αεροτομής NACA0015 και πραγματοποιήθηκε το καθολικό συναρμολόγημα του σκελετού του καλουπιού επιτυχία και με μεγάλη ακρίβεια. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Διατμηματικό Εργαστήριο του Τ.Ε.Ι Κρήτης, του Παραρτήματος Χανίων, Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών - SMM, στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Τμήματος Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος.



7. Βιβλιογραφία

- [1] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), <http://www.cres.gr> (Σύνδεσμος ενεργός 20 Ιανουαρίου 2013)
- [2] Ανεμοκινητήρες, Μπεργελές Γ, Αθήνα, Εκδόσεις Συμμεών, 2005.
- [3] Αναστάσιος Ι. Στάμου, Βασικά στοιχεία μηχανικής ρευστών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- [4] Ασπρούλιας Ιωάννης, Διπλωματική Εργασία, Πειραματική Μελέτη Επίδρασης Διάταξης Ακροπτερυγίων στα Αεροδυναμικά Φορτία Διπτέρυγου Μοντέλου Αεροσκάφους, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ, Οκτώβριος 2008
- [5] Vertical Axis Wind Turbine, Mech 4010 Design Project, Department of Mechanical Engineering Dalhousie University, December 5, 2005
- [6] <http://www.autodesk.com>, (Σύνδεσμος ενεργός 11 Μαρτίου 2013)
- [7] <http://www.cambam.info/> (Σύνδεσμος ενεργός 3 Απριλίου 2013)
- [8] <http://www.ncplot.com/> (Σύνδεσμος ενεργός 3 Απριλίου 2013)
- [9] Θεόδωρος Γ. Παπαδουλής, Σχεδιομελέτη και κατασκευή καλουπιού Ανεμοπτερυγίου με σύγχρονες CAD/CAM-CAE υπολογιστικές μεθόδους και κατεργασίες, Χανιά 2011
- [10] Λυμπερόπουλος Χ. Γεώργιος, Μοντελοποίηση συμβατικού αυτοκινήτου και προκαταρκτική μελέτη μετατροπής σε φιλικό ως προς το περιβάλλον αυτοκίνητο, Χανιά 2010
- [11] Ion Paraschivoiu, Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept, Ecole Polytechnique de Montreal, 2002
- [12] Andrzej J. Fiedler, Stephen Tullis, Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine, WIND ENGINEERING VOLUME 33, NO. 3, 2009
- [13] Β. Δημητρίου, Σημειώσεις Μαθήματος Κατασκευαστικές Τεχνολογίες, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά 2010