ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗΣ & ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ - ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΕΙΟ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Σχεδιομελέτη και κατασκευή καλουπιού Ανεμοπτερυγίου με σύγχρονες CAD/CAM–CAE υπολογιστικές μεθόδους και κατεργασίες"

Θεόδωρος Γ. Παπαδουλής

Επιβλέπων καθηγητής
Δρ. Βασίλειος Δημητρίου, Καθηγητής Εφαρμογών

ΧΑΝΙΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση της παρούσας εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το Δρ. Βασίλειο Δημητρίου, Καθηγητή Εφαρμογών, για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας καθώς και τους υπόλοιπους καθηγητές που γνώρισα και συνεργάστηκα μαζί τους στα πλαίσια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Ζωγράφο Πέτρο, Λυμπερόπουλο Γεώργιο, Παπαστεφανάκη Δημήτριο, Μπολανάκη Νικόλαο και το φίλο μου Σωτηρίου Στέφανο καθώς και τους γονείς μου για την πρακτική και ηθική τους υποστήριξη. Η βοήθεια της κ. Πανδή Καλλιόπης ήρθε την πιο κατάλληλη στιγμή. Μεγάλο ευχαριστώ στην κοπέλα μου, Υρώ Νταούδη που με στήριξε με τον τρόπο της από την πρώτη έως και την τελευταία στιγμή της εργασίας μου.

Χανιά, 2011
Παπαδουλής Θεόδωρος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ 7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8
1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ 8
1.2 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 12
- Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα 13
- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα 19
1.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ 21
2. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ 28
2.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ 28
3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ 42
3.1 CAD MODELING 42
3.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ 42
3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 42
3.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 43
3.4 3D MODELING ΜΕ ΤΟ AUTODESK INVENTOR PRO. 43
4. CAM ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΓΕΝΝΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ 52
4.1 CAM MODELING 52
4.2 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΩΝ CNC ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ CAM. 53
4.3 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MASTERCAM 54
4.4 CAM ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ 56
5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΗ CNC ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ HAAS-VF1 65
5.1 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ 65
5.2 ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ 68
5.2 Η ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC HAAS VF-1 71
5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ 76
5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ 77
5.5 ΣΤΗΡΙΞΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 79
5.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ 81

5.5 ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ 83
5.5 ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ Α/Γ 85
6. Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις 90
7. Βιβλιογραφία 93
8. Ορολογία - Συντομογραφίες 94

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιλογή του θέματος της παρούσας πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε με βασικό γνώμονα την εκμετάλλευση των γνώσεων που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Με την επιτυχή παρακολούθηση μαθημάτων όπως οι Κατασκευαστικές Τεχνολογίες, το CAD, οι ΑΠΕ και οι Ήπιες Μορφές Ενέργειας γεννήθηκε η ιδέα της μελέτης, του σχεδιασμού και της κατεργασίας ενός καλουπιού μιας πτέρυγας ανεμογεννήτριας, μικρής κλίμακας που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε αρκετά σπίτια τα οποία χρησιμοποιούν τις ΑΠΕ και ιδιαίτερα την αιολική ενεργεία σαν βασική πηγή ενεργείας για την κάλυψη των αναγκών τους σε ενέργεια.

Η εργασία ξεκινάει βασιζόμενη στην αντίστροφη μηχανική (Reverse Engineering), μιας και γίνεται αντιγραφή υπάρχουσας τυποποιημένης πτέρυγας και έχει σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του πρωτότυπου στοχεύοντας στην απόκτηση τεχνογνωσίας και τον μετέπειτα πειραματισμό με υλικά, όπως τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα κλπ.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιομελέτης και Κατεργασιών (DML) και στο Μηχανουργείο, του τομέα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του τμήματος Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος στο παράρτημα Χανίων του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, όπου και βρίσκεται και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Η διαδικασία ξεκίνησε με την μέτρηση της πτέρυγας ως προς την γεωμετρία της και την αναζήτηση του τύπου αεροτομής στον οποίο πρόσκειται. Με την βοήθεια διαφόρων μετρητικών συστημάτων όπως τράπεζα εφαρμογών, υψομετρικού χαράκτη και άλλων οργάνων η πτέρυγα σχεδιάστηκε σε τρισδιάστατη μορφή. Το λογισμικό CAD, στο οποίο σχεδιάστηκε και επεξεργάστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο της είναι το Inventor Professional 2009 της εταιρίας Autodesk. Με τη βοήθεια του 3D μοντέλου του πτερυγίου ακολούθησε η μοντελοποίηση διαιρούμενου καλουπιού με τη βοήθεια Boolean πράξεων.

Το καλούπι εισήχθηκε σε πρόγραμμα δημιουργίας κύκλων κατεργασίας (CAM) προκειμένου να δημιουργηθεί ο G-κώδικας για την κάθετη φρέζα 3 αξόνων CNC VF1 της εταιρείας HAAS που διαθέτει το Μηχανουργείο. Το λογισμικό CAM που χρησιμοποιήθηκε είναι το MasterCam της εταιρίας CNC Software Inc. Με αυτό το πρόγραμμα ορίστηκαν τα βήματα και οι παράμετροι για την κάθε μία κατεργασία που ακολούθησε και χρειάστηκε το κάθε ακατέργαστο τεμάχιο για να πάρει την τελική του μορφή. Μερικές από αυτές τις παραμέτρους κατεργασίας είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση, το βάθος κοπής και ο τύπος κατεργασίας. Αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας ήταν η δημιουργία ολοκληρωμένου G - κώδικα για εισαγωγή στην εργαλειομηχανή. Η κατεργασία έγινε στη CNC VF-1 της εταιρίας HAAS με κοπτικά εργαλεία της εταιρίας ISCAR και Ά ύλη για το καλούπι πολυαμίδιο τύπου PA6-G.

ABSTRACT

The topic of this thesis was based on the basic knowledge acquired during my studies in theoretical and practical level. With the successful completion of courses such as Manufacturing Technologies, CAD and Renewable Energy Sources the idea for the study of the design and machining a mold of a small-scale wind turbine blade, widely used in many homes that use renewable energy and especially wind energy, as a key source of energy to meet their energy needs, came up.

The basic principle of the whole Thesis is the reverse engineering, since it is relied on an existing standard wing, but also to improve the quality of the original one with the ultimate aim of knowledge and subsequent experimentation with materials such as fiberglass, the carbon fiber etc.

The study took place in the Design and Manufacturing Laboratory (DML) and the Machine Shop, of the Renewable Energy Division of the Natural Resources and Environment Department of TEI of Crete, Branch of Chania.

The project began with the measurement of the wing geometry and the study of the airfoil type. By the help of various measurement systems such as precision calibration table, height gauge and other measurement tools, the wing was designed in a 3D form in a Professional CAD System, Autodesk Inventor Pro. Using the 3D model of the wing and Boolean operations, the split mold was created.

The CAD model of the mold was imported in a CAM program so as to generate the G-code for the vertical milling 3 axis machine CNC VF1 of the HAAS company. The CAM software used is the MasterCam from the CNC Software Inc. With this program the cutting steps and parameters like toolpaths, cutting speed, power, depth of cut and the type of cutting tools, were defined for each manufacturing process. The CAM process resulted to the creation of an integrated G - code ready to be imported to the CNC machine VF-1 of HAAS. ISCAR cutting tools and polyamide PA6-G were chosen for the fulfillment of the cut.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον (ήλιος, βιομάζα, άνεμος). Αποτελούν τις πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος μέχρι τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, οπότε στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Σήμερα το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάσθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973, ενισχύθηκε μετά τη δεύτερη κρίση του 1979 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στο ενεργειακό κύκλωμα του πετρελαίου και του άνθρακα (εξόρυξη, μεταφορά, παραγωγή, χρήση), ενώ οι δευτερογενείς επιπτώσεις είναι ακόμη πιο σημαντικές σε μακροχρόνια βάση, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η συμβολή των ΑΠΕ για την αντιμετώπιση τόσο του προβλήματος της επάρκειας των πρώτων υλών, όσο και των περιβαλλοντικών προβλημάτων είναι επιτακτική και αποτελεί μακροπρόθεσμα μία λύση ικανή να στηρίξει την αειφόρο ανάπτυξη.

Σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να αξιοποιηθούν με κόστος ανταγωνιστικό σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Οι τεχνολογίες είναι σχετικά ώριμες και βρίσκονται σε εμπορική εκμετάλλευση, ενώ αναπτύσσονται ερευνητικές δραστηριότητες για την περαιτέρω βελτίωση και αύξηση της ανταγωνιστικότητάς τους.

Στα κεφάλαια που ακλουθούν περιγράφονται και αναλύονται, οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθ’ όλη τη διάρκεια της πτυχιακής εργασίας. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στη φιλοσοφία σχεδιασμού και λειτουργίας των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία μέτρησης διαστάσεων του πτερυγίου καθώς και η εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό Autodesk Inventor Pro, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου και περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό MasterCam X4, η εισαγωγή δεδομένων από τα CAD αρχεία και η δημιουργία κύκλου κατεργασίας των 6 τεμαχίων που απαρτίζουν το καλούπι. Ακολουθεί η εξαγωγή G κώδικα για κάθε κατεργασία. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στον τομέα των κατεργασιών. Αναλύεται η CNC VF1, η εισαγωγή δεδομένων και όλες οι παράμετροι προγραμματισμού των κύκλων κατεργασίας. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται η αξιολόγηση της ποιότητας των κατεργαζόμενων τεμαχίων και τα μετέπειτα συμπεράσματα και παρατηρήσεις και προτάσεις. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρεται η βιβλιογραφία απ’ όπου αντλήθηκαν δεδομένα για τη διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Επίσημες αναφορές επιβεβαιώνουν πως ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τους αρχαίους μόλις χρόνους. 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 στη Μύκονο

Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, το 2% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Υπολογίζεται ότι η συνολική ισχύς των ανέμων σε όλη τη γη είναι 3.6 * 109 MW. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ’ ευθείας μηχανική ενέργεια, μια «αναβαθμισμένη» κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας [1]. Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Στα πρώτα στάδια, η εκμετάλλευση της ήταν ασύμφορη. Με το πέρας όμως των ετών, η επιστημονική έρευνα έχει φτάσει σε τέτοιο σημείο προόδου, που επιτρέπει την παραγωγή μεγάλου μέρους της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Στις εικόνες 2 έως 5 παρουσιάζονται στοιχεία για την αιολική ενέργεια σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο:



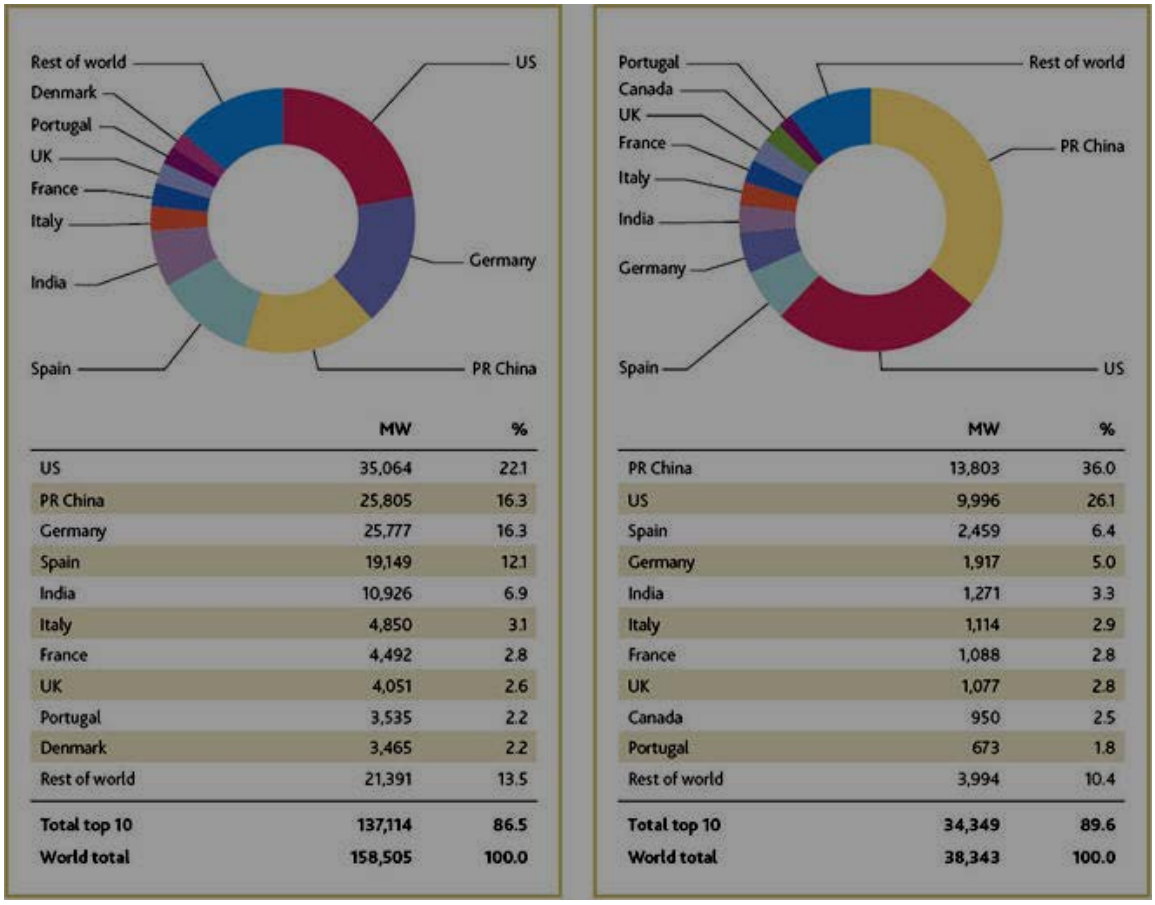
Εικόνα 2. Χάρτης της Ευρώπης με την εγκατεστημένη αιολική ενέργεια κάθε χώρας [2]

	Installed 2008	End 2008	Installed 2009	End 2009
EU Capacity (MW)				
Austria	14	995	0	995
Belgium	135	415	149	563
Bulgaria	63	120	57	177
Cyprus	0	0	0	0
Czech Republic	34	150	44	192
Denmark	60	3,163	334	3,465
Estonia	19	78	64	142
Finland	33	143	4	146
France	950	3,404	1,088	4,492
Germany	1665	23,903	1,917	25,777
Greece	114	985	102	1,087
Hungary	62	127	74	201
Ireland	232	1,027	233	1,260
Italy	1010	3,736	1,114	4,850
Latvia	0	27	2	28
Lithuania	3	54	37	91
Luxembourg	0	35	0	35
Malta	0	0	0	0
Netherlands	500	2,225	39	2,229
Poland	268	544	181	725
Portugal	712	2,862	673	3,535
Romania	3	11	3	14
Slovakia	0	3	0	3
Slovenia	0	0	0	0
Spain	1558	16,689	2,459	19,149
Sweden	262	1,048	512	1,560
United Kingdom	569	2,974	1,077	4,051
Total EU-27	**8,268**	**64,719**	**10,163**	**74,767**
Total EU-15	**7,815**	**63,604**	**9,702**	**73,194**
Total EU-12	**453**	**1,115**	**461**	**1,574**
Of which offshore and near shore	374	1,479	582	2,061

Εικόνα 3. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Α/Γ στην Ευρώπη μέχρι το τέλος του 2009 (πηγή EWEA) [2]

		End 2008	New 2009	Total end 2009
AFRICA & MIDDLE EAST	Egypt	365	65	430
	Morocco	134	119	253
	Iran	85	7	91
	Tunisia	20	34	54
	Cap Verde	12	0	12
	South Africa	8	0	8
	Israel	8	0	8
	Kenya	0	5	5
	Other[1]	4	0	4
	Total	635	230	865
ASIA	PR China	12,020	13,803	25,805
	India	9,655	1,271	10,926
	Japan	1,880	178	2,056
	Taiwan	358	78	436
	South Korea	236	112	348
	Philippines	33	0	33
	Other[2]	6	0	6
	Total	24,188	15,442	39,610
EUROPE	Germany	23,903	1,917	25,777
	Spain	16,689	2,459	19,149
	Italy	3,736	1,114	4,850
	France	3,404	1,088	4,492
	UK	2,974	1,077	4,051
	Portugal	2,862	673	3,535
	Denmark	3,163	334	3,465
	Netherlands	2,225	39	2,229
	Sweden	1,048	512	1,560
	Ireland	1,027	233	1,260
	Greece	985	102	1,087
	Austria	995	0	995
	Turkey	458	343	801
	Poland	544	181	725
	Belgium	415	149	563
	Rest of Europe[3]	1,313	304	1,614
	Total Europe	65,741	10,526	76,152
	of which EU-27[4]	*64,719*	*10,163*	*74,767*
LATIN AMERICA & CARIBBEAN	Brazil	341	264	606
	Mexico	85	117	202
	Chile	20	148	168
	Costa Rica	74	50	123
	Nicaragua	0	40	40
	Caribbean	35	0	35
	Argentina	29	2	31
	Uruguay	20	0	20
	Jamaica	22	1	23
	Colombia	20	0	20
	Others[5]	6	0	6
	Total	653	622	1,274
NORTH AMERICA	USA	25,068	9,996	35,064
	Canada	2,369	950	3,319
	Total	27,437	10,946	38,383
PACIFIC REGION	Australia	1,306	406	1,712
	New Zealand	325	171	497
	Pacific Islands	12	0	12
	Total	1,643	577	2,221
	World total	120,297	38,343	158,505

Εικόνα 4. Πίνακας παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύς για το έτος 2009 [3]



	MW	%
US	35,064	22.1
PR China	25,805	16.3
Germany	25,777	16.3
Spain	19,149	12.1
India	10,926	6.9
Italy	4,850	3.1
France	4,492	2.8
UK	4,051	2.6
Portugal	3,535	2.2
Denmark	3,465	2.2
Rest of world	21,391	13.5
Total top 10	**137,114**	**86.5**
World total	**158,505**	**100.0**

	MW	%
PR China	13,803	36.0
US	9,996	26.1
Spain	2,459	6.4
Germany	1,917	5.0
India	1,271	3.3
Italy	1,114	2.9
France	1,088	2.8
UK	1,077	2.8
Canada	950	2.5
Portugal	673	1.8
Rest of world	3,994	10.4
Total top 10	**34,349**	**89.6**
World total	**38,343**	**100.0**

Εικόνα 5. Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς Α/Γ μέχρι το τέλος του 2009 (πηγή GWEC) [3]

1.2 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι Α/Γ διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του δρομέα των πτερυγίων σε Α/Γ κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα που 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. Οι υφιστάμενες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε πολύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους ή ακριβέστερα ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής λ. Η παράμετρος περιστροφής (tip-speed ratio) της μηχανής *λ*, ορίζεται ως:

$$\lambda = \frac{\omega_0 * R}{V_w}$$

όπου *R* είναι η ακτίνα της πτερωτής, ω_o η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και V_w η ταχύτητα του ανέμου.

Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα

δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις. Επιπλέον καθοριστικό ρόλο παίζει και η διασύνδεση ή μη της εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, δεδομένου ότι σε περιπτώσεις σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να έχει τη συχνότητα του κεντρικού δικτύου, δηλαδή 50 Hz για τη χώρα μας και τις χώρες της Ε.Ε. και 60 Hz για τις Η.Π.Α.[4].



Εικόνα 6. Α/Γ οριζοντίου άξονα και καθέτου άξονα

- **Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα**

Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος Α/Γ. Περιλαμβάνουν τις Α/Γ με δρομέα ανάντη του πύργου και κατάντη του πύργου, δηλαδή εμπρός και πίσω από τον πύργο αντίστοιχα.



Εικόνα 7. Α/Γ με δρομέα ανάντη και κατάντη αντίστοιχα

Ο ιστός προκαλεί στροβιλισμό του διερχόμενου αέρα για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται συνήθως Α/Γ με δρομέα ανάντη. Οι Α/Γ με δρομέα κατάντη, παρ' όλες τις αναταράξεις από στροβιλισμό, χρησιμοποιούνται επειδή δεν χρειάζονται μηχανισμό κατεύθυνσης προς τον άνεμο και τα πτερύγια μπορούν να καμφθούν μειώνοντας έτσι την αντίσταση τους στον αέρα. Επίσης περιλαμβάνονται οι κατηγορίες μονόπτερου ή πολύπτερου δρομέα, ηθμού διάχυσης και με συγκεντρωτή όπως και διάφοροι άλλοι τύποι.

Ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα συγκαταλέγονται οι κλασσικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι (π.χ. τύπου Μυκόνου) καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων «αμερικανικού τύπου», οι οποίες λόγω των περιορισμένων διαστάσεών τους και της χαμηλής περιφερειακής τους ταχύτητας έχουν εγκαταλειφθεί σήμερα, αν και εμφανίζουν σχετικά μεγάλες ροπές λειτουργίας. Στο παρελθόν κατασκευάσθηκαν σε βιομηχανική κλίμακα αντίστοιχες μηχανές και βρήκαν ευρεία εφαρμογή για την άντληση νερού και άλλες γεωργικές χρήσεις.



Εικόνα 8. Διάφοροι τύποι Α/Γ οριζοντίου άξονα

Στις αιολικές μηχανές οριζοντίου άξονα περιλαμβάνονται και οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα (περίπου το 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών), και οι οποίες ονομάζονται ανεμογεννήτριες τύπου «έλικας». Οι μηχανές αυτές εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες, ενώ τα πτερύγια τους που είναι συνήθως ένα έως τρία, βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών ελίκων αλλά και σ' αυτή της έλικας των ελικοπτέρων. Ένα από τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι ο μεγάλος αεροδυναμικός βαθμός απόδοσής τους, αλλά και η βέλτιστη λειτουργία τους σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου περιστροφής λ, με αποτέλεσμα την αρκετά μεγάλη σχετική ταχύτητα

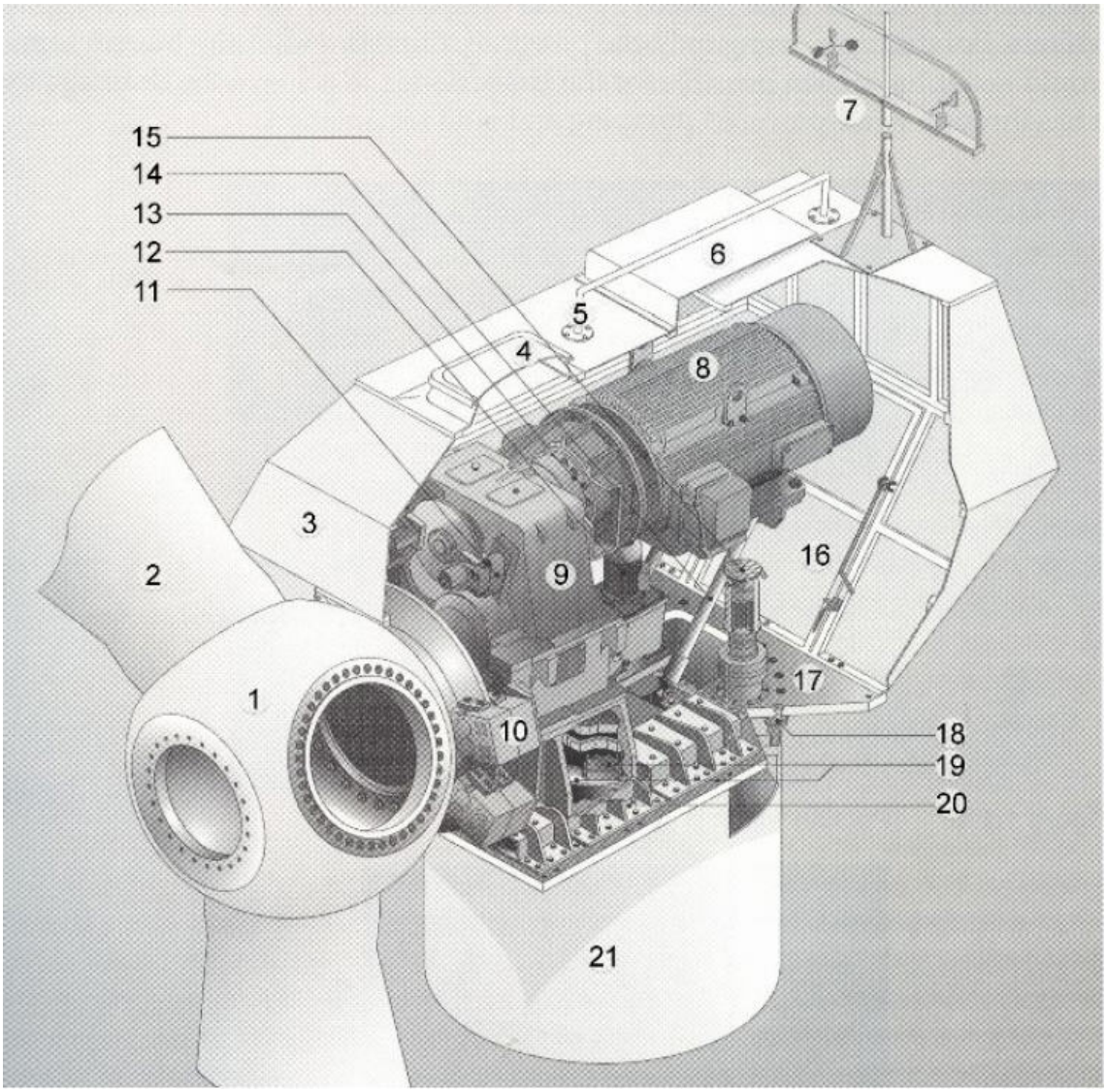
προσβολής των πτερυγίων από τον άνεμο [4]. Τα πλεονεκτήματα των Α/Γ οριζοντίου άξονα συνοψίζονται στα [6]:

- Μεταβλητού βήματος πτερύγια με βέλτιστο έλεγχο της γωνίας προσβολής με αποτέλεσμα την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.
- Ο ψηλός ιστός στήριξης επιτρέπει μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου.
- Υψηλή απόδοση λόγο των πτερυγίων τα οποία κινούνται πάντα κάθετα στον άνεμο και λαμβάνουν ενέργεια καθ' όλη την περιστροφή.

και τα μειονεκτήματα στα [6]:

- Το μεγάλο μήκος των ιστών και των πτερυγίων δυσκολεύει την μεταφορά που μπορεί να κοστίσει και το 20% του συνολικού κόστους του εξοπλισμού.
- Η μαζική παραγωγή ιστών για την υποστήριξη των μηχανισμών (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρογεννήτρια).
- Απαιτούνται γερανοί και ειδικά μηχανήματα για την εγκατάσταση.
- Α/Γ με δρομέα κατάντη υστερούν σε αντοχή λόγο της ανατάραξης που δημιουργεί το πτερύγιο περνώντας πίσω από τον ιστό.
- Το μεγάλο τους ύψος προκαλεί οπτική όχληση από μεγάλη απόσταση.

Τα κύρια μέρη μίας ανεμογεννήτριας είναι ο δρομέας, η πλήμνη, η άτρακτος του δρομέα, το σύστημα μετάδοσης κίνησης ή κιβώτιο αύξησης στροφών, οι ενδιάμεσοι άτρακτοι (στην περίπτωση διβάθμιου και παραπάνω κιβωτίου), η άτρακτος της ηλεκτρογεννήτριας, το σύστημα πέδησης, οι ελαστικοί σύνδεσμοι, το σύστημα προσανατολισμού, η ηλεκτρική γεννήτρια, τα συστήματα αυτοματισμού και το προστατευτικό κέλυφος. Στην Εικόνα 9 που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά τα κύρια χαρακτηριστικά μίας ατράκτου Α/Γ οριζοντίου άξονα:



1. Πλήμνη δρομέα
2. Πτερύγια δρομέα
3. Κάλυμμα ατράκτου
4. Φωταγωγός
5. Ράβδος ασφαλείας
6. Εξαγωγή αέρα
7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου
8. Γεννήτρια
9. Κιβώτιο ταχυτήτων
10. Δισκόφρενο δρομέα
11. Εφεδρικό φρένο
12. Υδραυλικά
13. Ελαστικός σύνδεσμος
14. Αναρτήσεις γεννήτριας
15. Σύστημα προσανατολισμού
16. Θυρίδα επισκόπησης
17. Εξέδρα
18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού
19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού
20. Αποζεύκτης θορύβου
21. Πύργος

Εικόνα 9. Περιγραφή ατράκτου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [7]

Για το σχεδιασμό του δρομέα, οι κύριοι παράμετροι είναι η διάμετρός του, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του, ο αριθμός των πτερυγίων του και η αεροδυναμική

συμπεριφορά του. Η διάμετρός του επιλέγεται σύμφωνα με την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής, όπου θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια. Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος Cp για την μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή που θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια. Τέλος ο αριθμός των πτερυγίων για τους ανεμοκινητήρες οριζοντίου άξονα είναι ίσος με δύο ή τρία. Η επιλογή του αριθμού των πτερυγίων, εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Από μια πρώτη ματιά δύο πτερύγια έχουν χαμηλότερο κόστος από τρία. Ο δρομέας όμως ενός ανεμοκινητήρα με δύο πτερύγια περιστρέφεται με μεγαλύτερες γωνιακές ταχύτητες από έναν ισοδύναμο από πλευράς ενεργειακής απόδοσης που έχει τρία πτερύγια. Σαν αποτέλεσμα τα πτερύγια του πρώτου ανεμοκινητήρα πρέπει να είναι ελαφρύτερα και περισσότερο δύσκαμπτα από αυτά του δεύτερου, ανεβάζοντας σημαντικά το κόστος τους. Η αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων σχετίζεται με την βέλτιστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, την αντοχή σε μηχανικά φορτία και την ρύθμιση της μηχανικής ισχύος του ανεμοκινητήρα σε περίπτωση λειτουργίας του σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική, ώστε να μην υπερφορτίζεται.

Η πλήμνη αποτελεί το δεύτερο μέρος της πτερωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της πτερωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα.

Ο άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να δύναται να μεταφέρει ισχυρές, μη μόνιμες, στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδρασή του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα ασκούμενα φορτία.

Η δυνατότητα περιστροφής του άξονα σε διεύθυνση παράλληλη προς αυτή του ανέμου εξασφαλίζεται με τη χρήση καθοδηγητικών πτερυγίων και ειδικών αυτοματισμών. Η πλέον σύγχρονη μέθοδος προσανατολισμού στηρίζεται στη χρήση ειδικού αισθητηρίου και σερβομηχανισμού, που περιστρέφει την άτρακτο της μηχανής (υπερκατασκευή) με τη βοήθεια οδοντωτής περιστροφής. Στις Α/Γ ισχύος έως 10kW γίνεται χρήση πτερυγίου προσανατολισμού ή αλλιώς ουράς που τόσο η επιφάνεια της όσο και η θέση της ως προς τον άξονα του πύργου επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου κατά το πολύ 10 μοίρες να εξασκείται ροπή επανα-προσανατολισμού του δρομέα στον άνεμο, ικανή να υπερνικήσει την αντίρροπη λόγω γυροσκοπικού φαινόμενου.

Ένα από τα σπουδαιότερα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, που περιλαμβάνει διβάθμιο ή τριβάθμιο κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής (συνήθως 20 έως 110 rpm) σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (άνω των 1000 rpm), στις οποίες λειτουργούν συνήθως οι ηλεκτρικές γεννήτριες. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός διβάθμιου συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 96%, ενώ για λόγους ασφαλείας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει επίσης, υδραυλικό ή μηχανικό φρένο και ελαστικούς συνδέσμους απορρόφησης στρεπτικών ταλαντώσεων. Το μηχανικό φρένο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται είτε στον άξονα υψηλής ταχύτητας περιστροφής, οπότε απαιτείται μικρή σχετικά δύναμη πέδησης, αλλά δεν προστατεύεται η πτερωτή από απώλεια φορτίου ή θραύση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είτε στον άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής. Στην τελευταία περίπτωση λόγω της μεγάλης ροπής πέδησης απαιτείται φρένο αυξημένων διαστάσεων, βάρους και κόστους. Στην περίπτωση όμως αυτή προστατεύεται καλύτερα η πτερωτή και το κιβώτιο μετάδοσης, γι' αυτό και αποτελεί τη βέλτιστη τεχνικά λύση. Τέλος, για λόγους πρόσθετης ασφάλειας, απαιτείται η αυτόματη ενεργοποίηση του φρένου με τη βοήθεια ελατηρίου, στην περίπτωση πτώσης της υδραυλικής πίεσης ή της ηλεκτρικής τάσης για την περίπτωση ηλεκτρομαγνητικού συστήματος πέδησης.

Για την προστασία των τμημάτων της ανεμογεννήτριας από τις καιρικές συνθήκες χρησιμοποιείται ειδικό κέλυφος από σύνθετο υλικό, π.χ. ειδικά κράματα χάλυβα ή αλουμινίου, που στην περιοχή της πλήμνης πρέπει να έχει και αεροδυναμική μορφή. Επιπλέον, το κέλυφος τη ανεμογεννήτριας πρέπει να έχει αντιδιαβρωτική προστασία.

Ο πύργος στηρίξεως της ανεμογεννήτριας αποτελείται συνήθως είτε από ένα μεταλλικό δικτύωμα, είτε από μια στήλη μπετόν ή μεταλλικό σωλήνα για μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Στην τελευταία περίπτωση υπάρχει ειδική μέριμνα για εσωτερική σκάλα, ενώ για ανεμογεννήτριες μεγάλων διαστάσεων υπάρχει πρόσθετη μέριμνα για εγκατάσταση ανελκυστήρα. Το ελάχιστο ύψος του πύργου στηρίξεως είναι συνήθως ίσο με τη διάμετρο της πτερωτής, ενώ κατά την εκλογή του πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν τόσο το αυξημένο κόστος κατασκευής και θεμελίωσης για μεγάλα ύψη όσο και η δυνατότητα αξιοποίησης υψηλότερων ταχυτήτων του ανέμου, με την αύξηση του ύψους τοποθέτησης της πτερωτής.

Ολοκληρώνοντας τη σύντομη περιγραφή των βασικών τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας, πρέπει να αναφερθεί η ύπαρξη των ηλεκτρικών γεννητριών, που χρησιμοποιούνται για μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, καθώς και των συστημάτων αυτοματισμού. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται δυο τύποι γεννητριών:

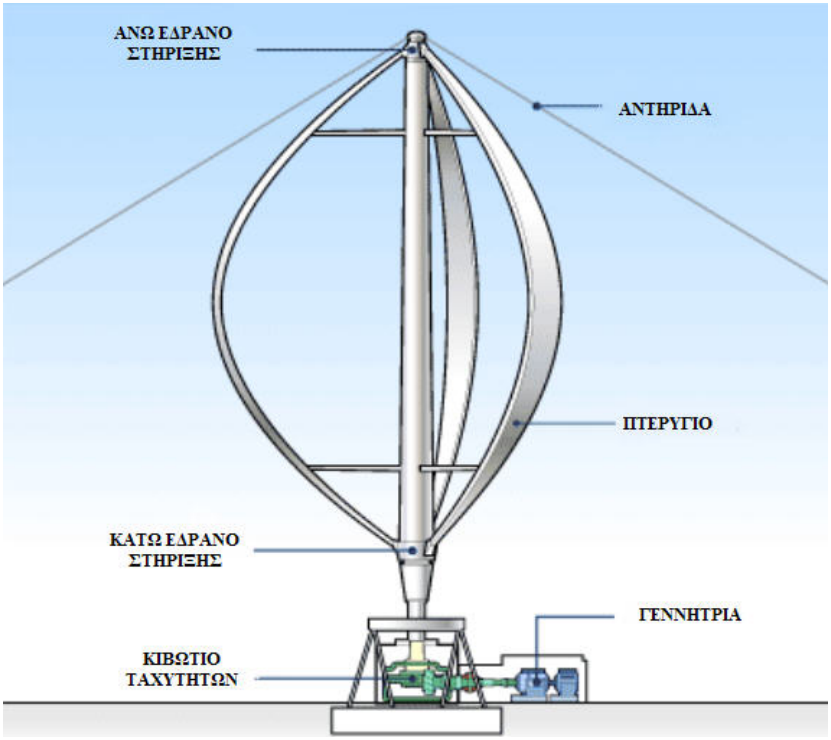
- οι σύγχρονες που διακρίνονται σε γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα και σε γεννήτριες μόνιμων μαγνητών.
- Οι ασύγχρονες (επαγωγικές) που διακρίνονται σε γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage) και σε γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor).

Όταν πρόκειται να σχεδιαστεί μία νέα ανεμογεννήτρια λαμβάνονται υπόψη διάφορες επιμέρους παράμετροι, όπως είναι η ενεργειακή παραγωγή, τα μέγιστα στατικά φορτία και τα μέγιστα φορτία κόπωσης στα οποία πρέπει να αντέχει η κατασκευή, αλλά επίσης και το οικονομικό κόστος των επιμέρους εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Ο τελικός στόχος είναι το χαμηλότερο δυνατό κόστος ανά kWh παραγόμενης ενέργειας [4].

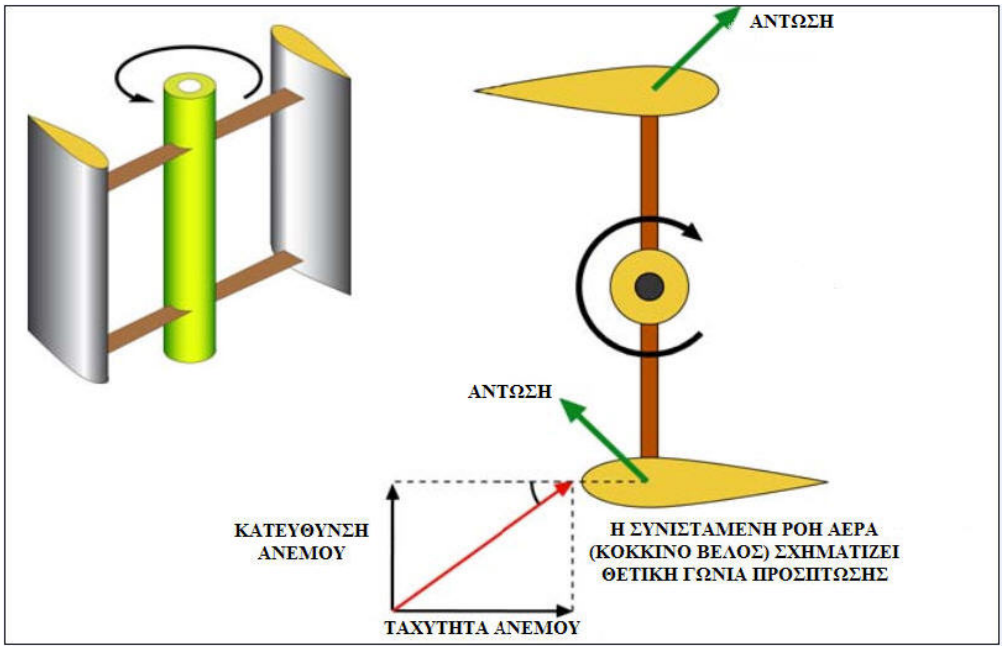
- **Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα**

Το βασικότερο πλεονέκτημα της κατηγορίας είναι ότι δεν χρειάζεται να αναφερθεί στην κατεύθυνση του ανέμου, έτσι χρησιμοποιείται ευρέως σε περιοχές με έντονους μεταβαλλόμενους ή ταραχώδεις ανέμους. Οι μηχανισμοί τοποθετούνται σε μικρότερη απόσταση από το έδαφος λόγω της δυσκολίας τοποθέτησης τους σε ιστούς οπότε είναι ευκολότερη και η συντήρηση τους. Η ταχύτητα του ανέμου όμως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι χαμηλότερη οπότε ισχύει το ίδιο και για την παραγόμενη αιολική ενέργεια. Επίσης, κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η ροή του αέρα δημιουργεί τυρβώδης ροές που μπορούν να προκαλέσουν κραδασμούς και θόρυβο με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της Α/Γ.

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα χωρίζονται σε δύο βασικές υποκατηγορίες. Στις Darrieus οι οποίες εκμεταλλεύονται την άντωση και στις Savonius οι οποίες έχουν σαν αρχή την αντίσταση (οπισθέλκουσα). Οι Α/Γ τύπου Darrieus έχουν πολύ καλή απόδοση αλλά μεγάλες αιχμές ροπής και περιοδικές φορτίσεις στον ιστό τους, που συμβάλλουν στην έλλειψη αξιοπιστίας τους. Επίσης, απαιτείται κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας για την εκκίνηση, διότι η ροπή εκκίνησης τους είναι πολύ χαμηλή. Οι αιχμές ροπής μειώνονται με τη χρήση τριών ή περισσοτέρων πτερυγίων και έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη σταθερότητα του στροφείου.

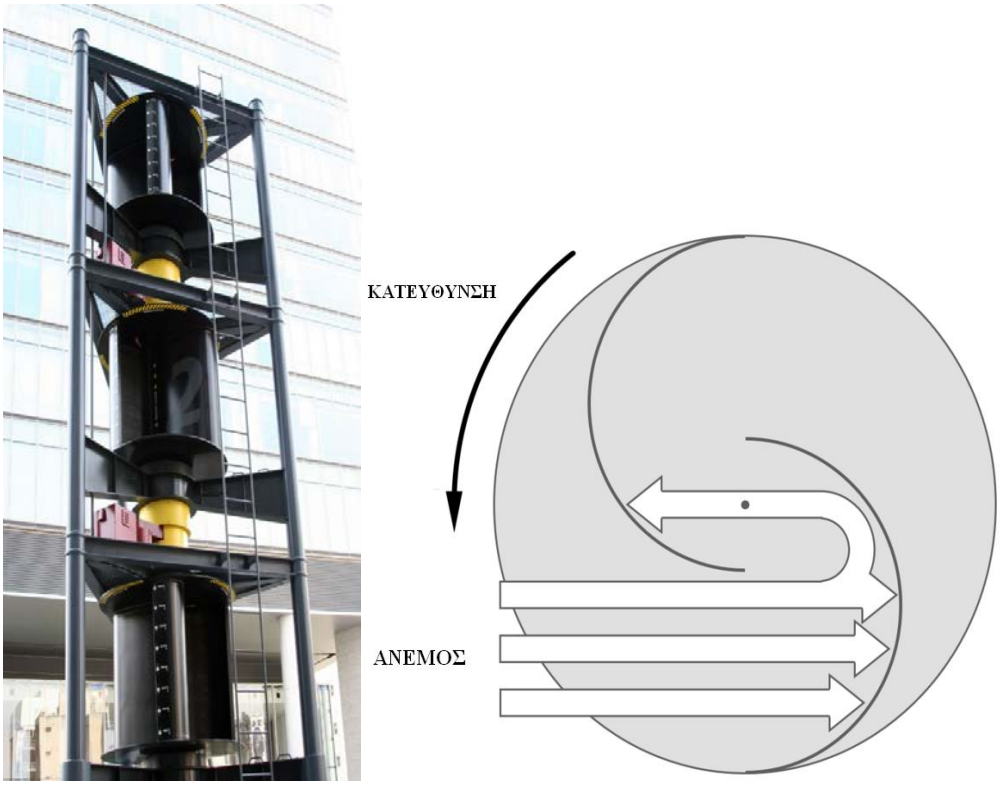


Εικόνα 10. Α/Γ τύπου Darrieus



Εικόνα 11. Αρχή λειτουργίας Α/Γ Darrieus

Οι Α/Γ τύπου Savonius, έχοντας σαν αρχή λειτουργίας την αντίσταση (οπισθέλκουσα), έχει υψηλή αξιοπιστία αλλά μικρότερη αποδοτικότητα σε σχέση με Α/Γ οριζοντίου άξονα και χρησιμοποιείται σε περιοχές με μη ομαλή ροή αέρα.



Εικόνα 12. Α/Γ τύπου Savonius και η αρχή λειτουργίας της

Τα πλεονεκτήματα των Α/Γ κατακόρυφου άξονα είναι [6]:

- Δεν χρειάζονται μηχανισμοί ελέγχου και προσανατολισμού προς τον άνεμο.
- Εγκαθίστανται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους προσδίδοντας εύκολη πρόσβαση και συντήρηση.
- Έχουν χαμηλότερες ταχύτητες έναρξης λειτουργίας σε σχέση με Α/Γ οριζοντίου άξονα.
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές όπου απαγορεύεται η δόμηση υψηλών κτηρίων.

και τα μειονέκτημά τους:

- Μειωμένη απόδοση λόγο του σχεδιασμού των πτερυγίων σε σχέση με Α/Γ οριζοντίου άξονα και του χαμηλού ύψους εγκατάστασης άρα και της χαμηλότερης παραγωγικότητας.

1.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Η Αεροδυναμική είναι κλάδος της Μηχανικής των ρευστών, και ειδικότερα της Δυναμικής. Ο επιστημονικός κλάδος αυτός έχει ως αντικείμενο έρευνας και μελέτης τους νόμους που διέπουν τη ροη του αέρα ή άλλων αερίων γύρω από διάφορα σώματα που έχουν ειδική μορφή με περιορισμένη τη μία από τις τρεις διαστάσεις τους κατά κατεύθυνση κίνησης, καθώς και τη κίνηση αυτών μέσα στον αέρα. Η Αεροδυναμική μέχρι πριν δύο δεκαετίες ήταν πειραματική επιστήμη και βασιζόταν ιδιαίτερα στις αεροδυναμικές σήραγγες. Μετά όμως την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών αναπτύχθηκε έντονα και η υπολογιστική αεροδυναμική, με συνέπεια πείραμα και θεωρία να συμβάλουν πλέον στη πλήρη μελέτη της, έτσι ώστε η «υπολογιστική» να συμπληρώνει με αποτελεσματικότητα την «πειραματική αεροδυναμική».

Η ροή του αέρα είναι ασυμπίεστη ή συμπιεστή ανάλογα με την τιμή του αριθμού Mach M (όπου M=1000 km/h).

- **Ασυμπίεστη** λέγεται η ροή, όταν ρ=σταθερό. Ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστος για περιθώριο ταχυτήτων μέχρι 0,4 M. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε για Ασυμπίεστη Αεροδυναμική ή Αεροδυναμική μικρών υποηχητικών ταχυτήτων.
- **Συμπιεστή** λέγεται η ροή, όταν ρ≠σταθερό. Ο αέρας λαμβάνεται υποχρεωτικά συμπιεστός για ταχύτητες μεγαλύτερες από 0,4 M. Τη περιοχή αυτή ταχυτήτων μελετάει η Συμπιεστή Αεροδυναμική, η οποία χωρίζεται στην Αεροδυναμική μεγάλων υποηχητικών ταχυτήτων (από 0,4-0,9M) στη Διηχητική Αεροδυναμική (M=1), στην Υπερηχητική Αεροδυναμική (1<M<6) και στην Υπερυπερηχητική Αεροδυναμική (M>6).

Μια ροή ανεξάρτητα αν είναι Ασυμπίεστη ή Συμπιεστή, μπορεί να είναι Ιδανική ή Πραγματική ροή, ροή με περιστροφή ή χωρίς περιστροφή, μόνιμη ή μη μόνιμη ροή, στρωτή ή τυρβώδης ροή.

- **Ιδανική** λέγεται η ροή που μεταξύ των μορίων της και των τοιχωμάτων των στερεών ορίων που περιορίζουν αυτή, δεν ασκούνται τριβές. Τα ρευστά που την

πραγματοποιούν λέγονται Ιδανικά Ρευστά, δεν έχουν ιξώδες (ανιξωδικά), και είναι υποθετικά ρευστά.

- **Πραγματική** λέγεται η ροή που μεταξύ των μορίων της και των τοιχωμάτων που περιορίζουν αυτή, ασκούνται τριβές και διατμητικές τάσεις. Τα ρευστά που την πραγματοποιούν λέγονται Πραγματικά Ρευστά, είναι αυτά που βρίσκονται στη φύση και έχουν ιξώδες (ιξώδη ρευστά).
- Ροή με **περιστροφή** (Στροβιλώδης ροή) λέγεται η ροή των ρευστών κατά την οποία τα μόρια τους μεταβάλλουν θέσεις στο χώρο και ταυτόχρονα περιστρέφονται περί τον εαυτό τους.
- Ροή **χωρίς περιστροφή** (Αστρόβιλη ροή) χαρακτηρίζεται η ροή όταν τα μόρια της κατά την κίνηση τους, μεταβάλλουν θέσεις στο χώρο αλλά δεν στρέφονται περί τον εαυτό τους.
- **Μόνιμη** λέγεται η ροή όταν τα μεγέθη που την χαρακτηρίζουν, ταχύτητα, πίεση, πυκνότητα κλπ., δεν είναι συναρτήσεις του χρόνου, αλλά μόνο του χώρου.
- **Μη μόνιμη** λέγεται η ροή όταν τα μεγέθη που την χαρακτηρίζουν εξαρτώνται και από τον χρόνο.
- Με τον όρο **στρωτή** εννοούμε τη ροή η οποία γίνεται κατά στοιβάδες, οι οποίες ολισθαίνουν η μια πάνω στην άλλη.
- **Τυρβώδης** λέγεται η ροή η οποία περιέχει και περιοχές με δίνες και στροβίλους και η οποία επομένως δεν γίνεται κατά στοιβάδες.

Η μελέτη των κινηματικών και δυναμικών χαρακτηριστικών της ροής του αέρα βασίζεται σε ορισμένες αρχές ή παγκόσμιους φυσικούς νόμους, οι οποίοι έχουν διατυπωθεί σαν συμπέρασμα φυσικών παρατηρήσεων και εμπειρίας. Οι νόμοι αυτοί, έχουν αξιωματική διατύπωση και αποτελούν τις αρχές πάνω στις οποίες θεμελιώνεται η Αεροδυναμική και αποδεικνύονται έμμεσα με σύγκριση των αποτελεσμάτων της μαθηματικής ανάλυσης και των πειραματικών δεδομένων. Οι αρχές αυτές είναι:

- Αρχή Διατήρησης της Μάζας (εξίσωση Συνέχειας)
- Αρχή Διατήρησης της Ορμής (εξίσωση Κίνησης)
- Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (εξίσωση Ενέργειας)

Οι τρεις αυτές αρχές αποτελούν τις βάσεις πάνω στις οποίες θεμελιώνεται η ροή του αέρα και παρέχουν τους νόμους που τη διέπουν.

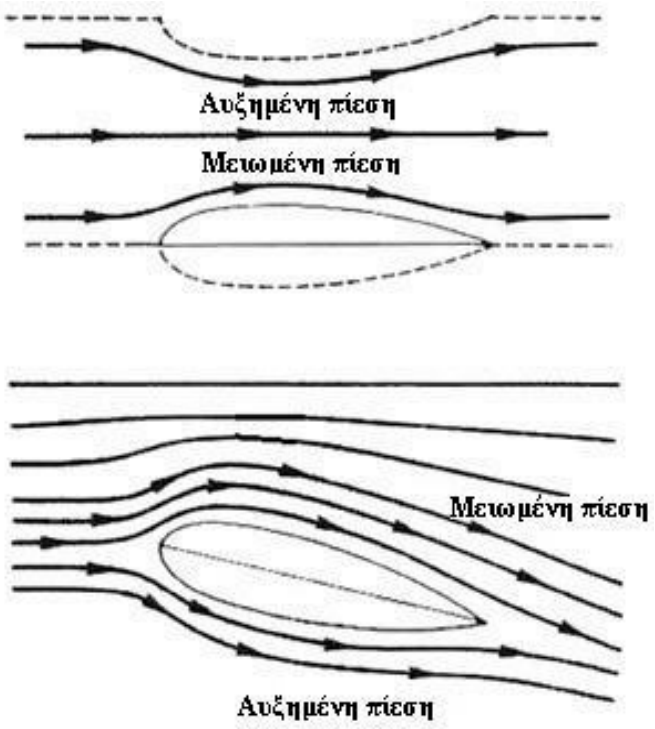
Μια ακόμη παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει τη ροή του αέρα είναι ο αριθμός Reynolds, ο οποίος ορίζεται ως:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, L είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος του σώματος συνήθως το μήκος της χορδής της αεροτομής c, V η ταχύτητα της ροής, μ το ιξώδες και ν το κινηματικό ιξώδες. Όπως φαίνεται από φυσικής πλευράς, ο Re εκφράζει ένα μέτρο μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων και των δυνάμεων συνεκτικότητας. Έτσι μικροί αριθμοί Reynolds, σημαίνουν ροή στην οποία υπερέχουν οι δυνάμεις συνεκτικότητας, ενώ μεγάλοι αριθμοί Reynolds, ροή στην οποία υπερέχουν οι

αδρανειακές δυνάμεις. Η πρώτη περίπτωση (Re πολύ μικρό) συμβαίνει όταν μελετάμε σώματα πολύ μικρών διαστάσεων ή μικρών ταχυτήτων και που το ρευστό έχει μεγάλο κινηματικό ιξώδες, όπως π.χ. στην περίπτωση νέφους σωματιδίων ή φιλμ ελαίου μεταξύ του στροφέα και του εδράνου ενός περιστρεφόμενου άξονα (έρπουσα ροή). Ιδιαίτερη σπουδαιότητα όμως έχει η δεύτερη περίπτωση των μεγάλων αριθμών Reynolds, η οποία έχει πολλές τεχνικές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε προβλήματα τεχνικής της πτήσης ενός αεροπλάνου, και τούτο διότι αυτή συμβαίνει σε ρευστά με πολύ μικρό κινηματικό ιξώδες ν (νερό και αέρα) και σε σώματα που οι διαστάσεις τους και οι ταχύτητες τους είναι μεγάλες. Αναφέρεται ότι η επίδραση του αριθμού Reynolds στη ροή γύρω από σώματα είναι καθοριστική για τη μορφή της ροής γύρω από αυτό. Από διάφορα πειράματα που είχαν γίνει, διαπιστώσαμε ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός Reynolds έχουμε μετάπτωση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Η τιμή του αριθμού Reynolds, στην οποία συμβαίνει, αυτή η μετάπτωση χαρακτηρίζει το κρίσιμο αριθμό Reynolds Re_{cr} και που για τη περίπτωση ροής μέσα σε σωλήνες έχει τη τιμή Re_{cr}=2.300.

Όπως ορίζει η αρχή του Bernoulli, η συνολική ενέργεια ενός ρευστού σε κίνηση παραμένει σταθερή. Εάν αυξηθεί η ταχύτητά του, η πίεση ελαττώνεται ενώ εάν μειωθεί η ταχύτητά του, η πίεση αυξάνεται.



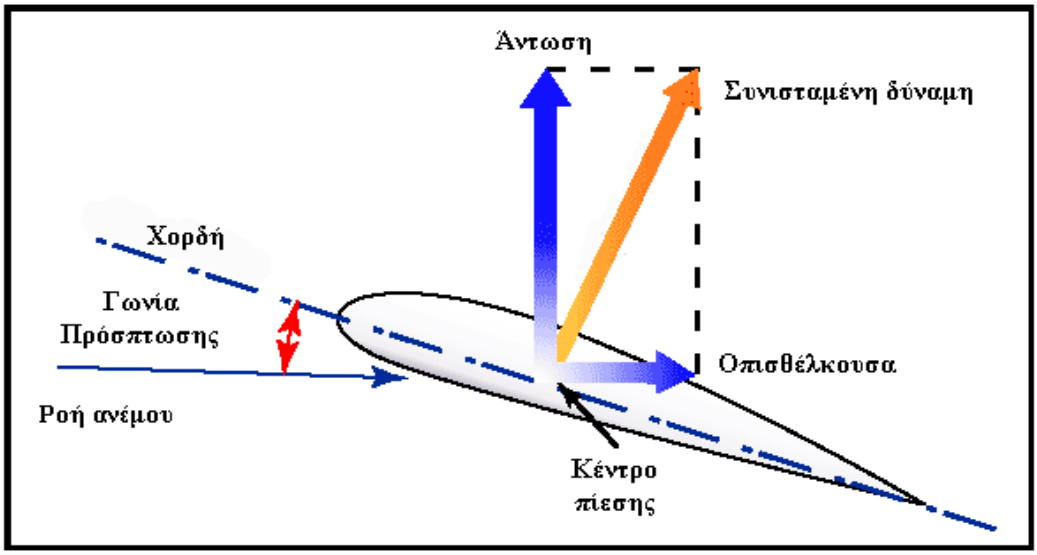
Εικόνα 13. Πίεση ρευστών κατά Bernoulli

Μία πτέρυγα σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμεταλλεύεται αυτόν τον συσχετισμό επιταχύνοντας τον αέρα που περνάει από την επάνω κεκλιμένη επιφάνεια της πτέρυγας και έτσι να ελαττώνεται η πίεση σε αυτήν. Η ροή του αέρα επάνω σε μια αεροτομή δημιουργεί δύο δυνάμεις. Η πρώτη είναι η άντωση, η οποία είναι κάθετη στη ροή του αέρα και η δεύτερη είναι η οπισθέλκουσα η οποία είναι παράλληλη στη ροή

αυτή. Η ύπαρξη της άντωσης συνεπάγεται με τη στρωτή ροη του αέρα επάνω στην αεροτομή και σημαίνει ότι ο αέρας ρέει ομαλά και από τις δυο πλευρές αυτής, ενώ εάν υπάρχει ελάχιστη ή καθόλου άντωση συνεπάγεται με την ύπαρξη τυρβώδους ροής. Η ροή του αέρα στην επάνω πλευρά της αεροτομής επιταχύνεται διότι έχει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση. Η επιτάχυνση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης δημιουργεί την άντωση. Η αποκόλληση της ροής παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο στην δημιουργία της άντωσης. Σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης (μέχρι περίπου 10°) η πορεία της ροής στην επάνω και την κάτω πλευρά δεν παρουσιάζει αποκόλληση και με καλή προσέγγιση πλησιάζει την ροή χωρίς τριβές. Σε μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης, υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης στη πλευρά υποπίεσης της αεροτομής, όπου η αύξηση της πίεσης είναι πολύ απότομη. Σε μια ορισμένη γωνία πρόσπτωσης, που είναι περίπου 15°, παρουσιάζεται εξαιτίας αυτού, αποκόλληση της ροής. Η θέση της αποκόλλησης βρίσκεται λίγο πίσω από το χείλος προσβολής της πτέρυγας. Η δυναμική άνωση των πτερύγων και των αεροτομών υπολογίζεται από τη σχέση :

$$L = \frac{1}{2} * C_L * p * A * V$$

με C_L το συντελεστής άνωσης ο οποίος χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά κάθε σώματος σχετικά με το φαινόμενο της άνωσης και εξαρτάται από τη μορφή σώματος, **ρ** είναι η τιμή της πυκνότητας του ρευστού, **A** είναι η μετωπική επιφάνεια η οποία για τις πτέρυγες δίνεται από το γινόμενο της χορδής επί το εκπέτασμα, **V** είναι η ταχύτητα του ρευστού, όταν το αντικείμενο είναι ακίνητο ή η ταχύτητα του αντικειμένου όταν το ρευστό είναι ακίνητο, ή η σχετική ταχύτητα όταν κινείται και το ρευστό αλλά και το σώμα.

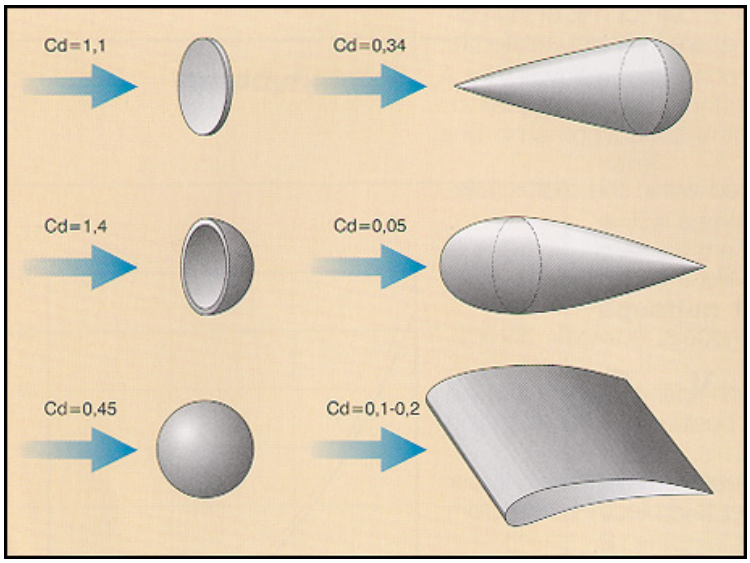


Εικόνα 14. Άντωση και οπισθέλκουσα δύναμη

Κινούμενος ο αέρας προς την αεροτομή, δημιουργεί μια δύναμη αντίστασης (οπισθέλκουσα) προς την κατεύθυνση της ροής του αέρα. Η οπισθέλκουσα ουσιαστικά είναι η αντίσταση που εμφανίζει η αεροτομή στον αέρα που προσπίπτει στην πτέρυγα και για αυτό το λόγο μειώνεται όσο το δυνατό περισσότερο κατά τον σχεδιασμό μιας Α/Γ. Η δύναμη της τριβής ανάμεσα στο ρευστό και το σώμα δίνεται από τη σχέση:

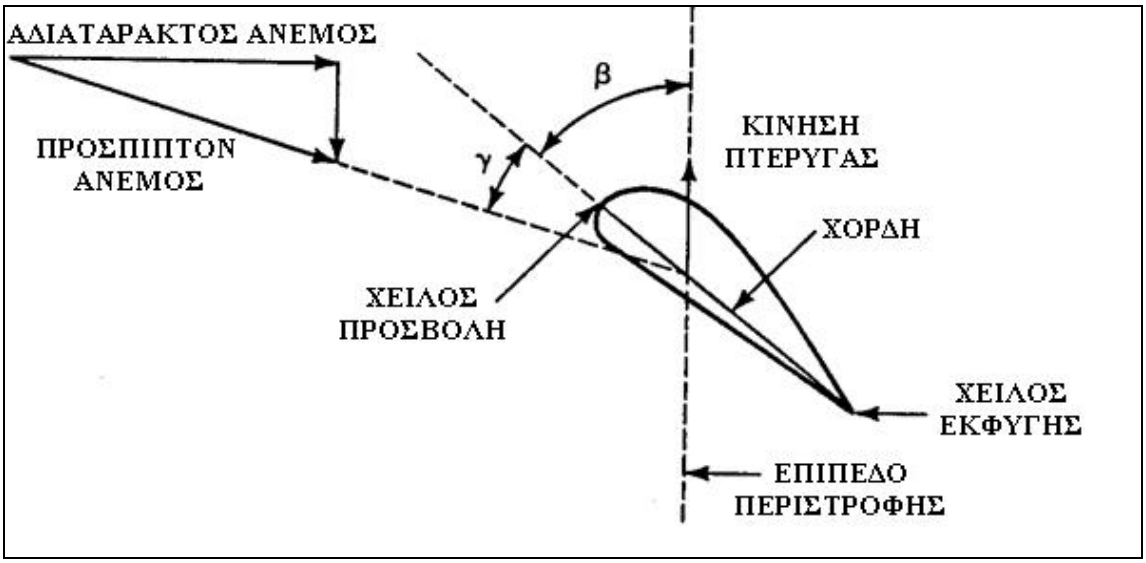
$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * p * A * V^2$$

με C_D το συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης (ή συντελεστής οπισθέλκουσας) ο οποίος εξαρτάται από τη μορφή του σώματος. Ο συντελεστής αυτός έχει επινοηθεί από τους μελετητές των αεροδυναμικών φαινομένων, για να δικαιολογηθεί η διαφορά που παρουσιαζόταν στην τιμή της αεροδυναμικής αντίστασης μεταξύ σωμάτων με ίδια μετωπική επιφάνεια. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται καθαρά πως επηρεάζει η μορφή των σχημάτων ίδιας μετωπικής επιφάνειας την τιμή της αεροδυναμικής αντίστασης. Η άντωση και η οπισθέλκουσα είναι ανάλογες με την πυκνότητα του αέρα, το εμβαδόν της αεροτομής καθώς και με την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 15. Τιμές συντελεστών οπισθέλκουσας για διάφορα σχήματα

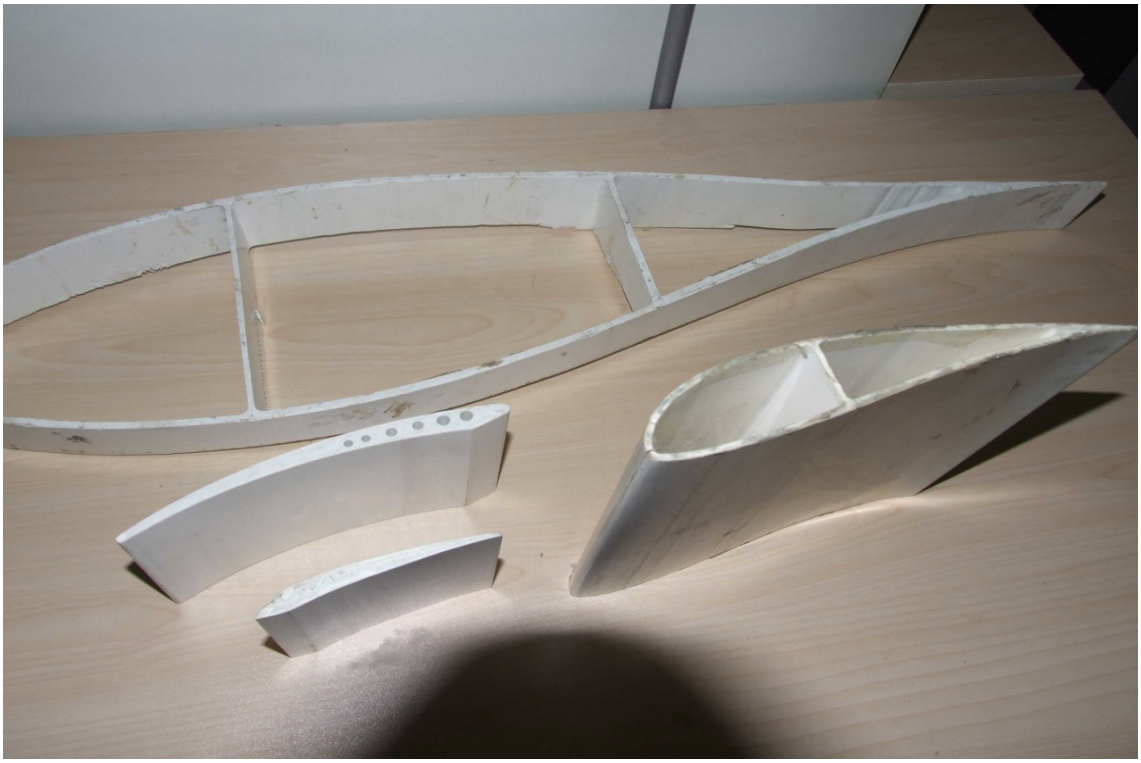
Σημαντική παράμετρος του πτερυγίου είναι η γωνία βήματος β (pitch angle) όπου σχηματίζεται μεταξύ της χορδής της αεροτομής και του επιπέδου περιστροφής. Χορδή είναι το ευθύγραμμο τμήμα όπου συνδέει το χείλος προσβολής και το χείλος εκφυγής μιας αεροτομής. Το επίπεδο περιστροφής είναι το επίπεδο εκείνο όπου περιστρέφεται ο δρομέας της Α/Γ. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς επιτυγχάνεται όταν η διεύθυνση του ανέμου είναι κάθετη προς το επίπεδο αυτό. Η γωνία βήματος β είναι σταθερή και εξαρτάται από τον προσανατολισμό του πτερυγίου. Η γωνία πρόσπτωσης γ (angle of attack) ενώνει την χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση του προσπίπτουν ανέμου ή την ουσιαστική κατεύθυνση της ροής του αέρα. Η γωνία πρόσπτωσης είναι δυναμική (μεταβαλλόμενη) και εξαρτάται από την ταχύτητα του πτερυγίου αλλά και από την ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα του πτερυγίου σε απόσταση r από το κομβίο και η γωνιακή ταχύτητα Ω_m, γίνονται Ωr_m.



Εικόνα 16. Συνιστώσες της αεροτομής [1]

Ένα πτερύγιο με στρέβλωση θα έχει διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης μεταξύ κομβίου και ακροπτερυγίου λόγω των διαφορετικών τιμών Ωr_m. Η άντωση και η οπισθέλκουσα έχουν συγκεκριμένες τιμές για συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, οπότε ένα πτερύγιο χωρίς στρέβλωση είναι λιγότερο αποτελεσματικό από ένα με σωστή στρέβλωση για να διατηρηθεί σχεδόν σταθερή γωνία προσβολής από το κομβίο έως το ακροπτερύγιο. Η στρέβλωση στα πτερύγια υπάρχει από την εποχή των παλιών ανεμόμυλων για την μεγαλύτερη δυνατή αποδοτικότητα τους. Ένας σημαντικός λόγος που κατασκευάζονται ακόμα πτερύγια χωρίς στρέβλωση είναι το κόστος. Ένα ίσιο πτερύγιο χωρίς στρέβλωση είναι ευκολότερο και φθηνότερο στην κατασκευή του και η μείωση του κόστους μπορεί να αντισταθμίσει την απώλεια στην απόδοση του [9].

Το αεροδυναμικό προφίλ της αεροτομής είναι μεγίστης σημασίας για τις επιδόσεις του πτερυγίου. Ακόμα και μικρές μεταβολές στο σχήμα της αεροτομής μπορούν να αλλάξουν σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη ισχύος και το επίπεδο θορύβου. Για το λόγο αυτό τα προφίλ των αεροτομών επιλέγονται από ευρέως χρησιμοποιούμενες βάσεις δεδομένων αεροτομών, όπως αυτή της NACA (Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή Αεροναυπηγικής των ΗΠΑ) που έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχτεί με τη βοήθεια αεροσύραγγας. Έχει υπολογιστεί ότι για πτερύγια μήκους μέχρι 5 μέτρων, ο συνδυασμός 2 διαφορετικών τύπων αεροτομών στο ίδιο πτερύγιο δίνουν καλύτερη δυναμική και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Αυτό παρατηρήθηκε και στην αεροτομή που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή της πτυχιακής εργασίας. Στις εικόνες 17 και 18 παρουσιάζονται διάφορα προφίλ αεροτομών και τομές από το ανεμοπτερύγιο που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 17. Προφίλ διαφόρων αεροτομών



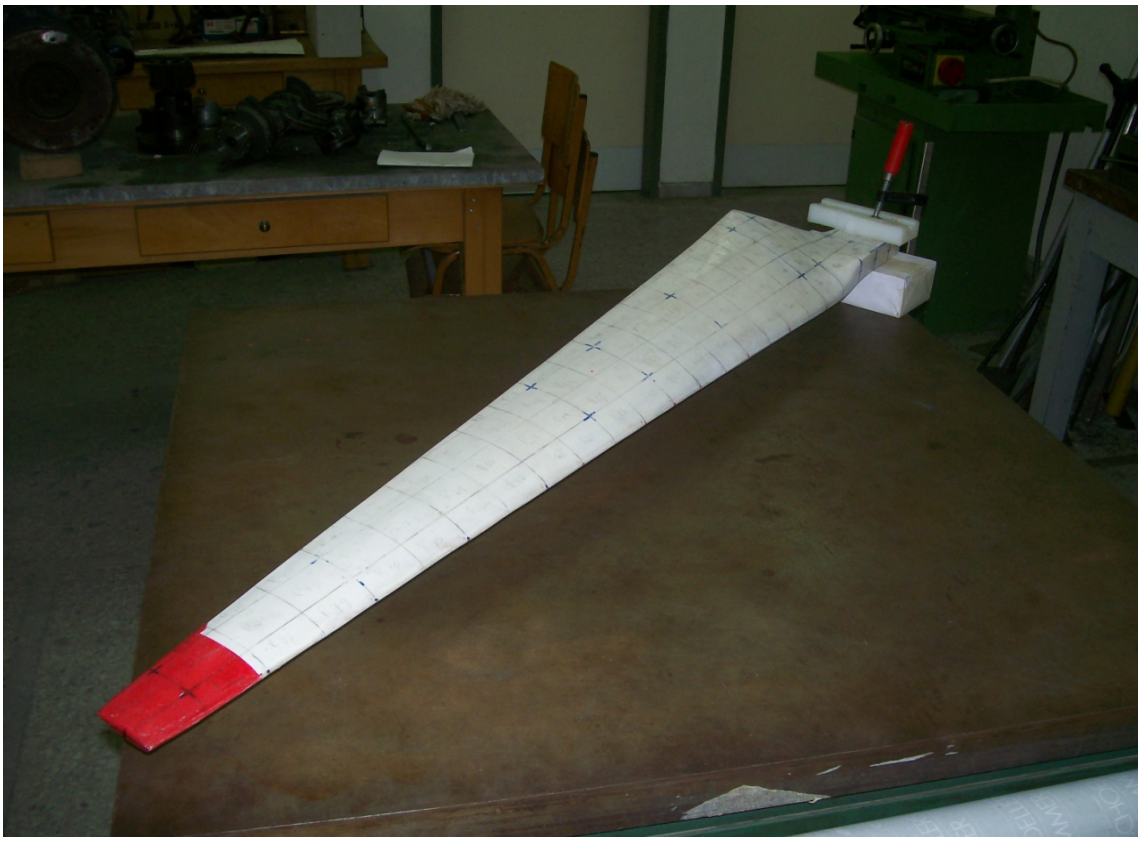
Εικόνα 18. Προφίλ αεροτομών του πτερυγίου που χρησιμοποιήθηκε

2. ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και στην Περίληψη της εργασίας η κατασκευή του καλουπιού του ανεμοπτερυγίου ξεκινάει βασιζόμενη στην αντίστροφη μηχανική (Reverse Engineering), μιας και γίνεται μηχανολογική αντιγραφή υπάρχουσας τυποποιημένης πτέρυγας. Η μέτρηση διαστάσεων ενός πτερυγίου Α/Γ είναι από τη φύση της πολύπλοκη και σύνθετη διαδικασία. Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας έγκειται στο σύνθετο του σχήματος και τον ορισμό του άξονα εκκίνησης. Οποιαδήποτε μέτρηση απαιτεί παράλληλο δέσιμο του κομβίου με την επιφάνεια μέτρησης, είτε είναι τράπεζα εφαρμογών είτε είναι τραπέζι φρέζας. Κομβίο είναι το σημείο εκείνο που ορίζονται οι αρχές τον αξόνων του πτερυγίου.

2.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Η διαδικασία μέτρησης ξεκίνησε με τις βασικές διαστάσεις του ολικού μήκους του πτερυγίου με τη βοήθεια αποστασιόμετρου laser της Bosch ακρίβειας ±1mm. Το πτερύγιο «δέθηκε» στην τράπεζα συμβατικής φρέζας με τη βοήθεια μέγγενης, τοποθετήθηκαν «όρια» στις εξωτερικές πλευρές του κομβίου και του ακροπτερυγίου.



Εικόνα 19. Το πτερύγιο στην τράπεζα εφαρμογών

Το αποστασιόμετρο τοποθετήθηκε παράλληλα στην πλευρά του κομβίου ώστε η ακτίνα του να προσκρούει στο όριο του ακροπτερυγίου. Η ένδειξη που λήφθηκε ήταν

1350mm.



Εικόνα 20. Εργαλεία μέτρησης. Από αριστερά, παχύμετρα, κανόνας, χαράκτης, μοιρογνωμόνιο και υψομετρικός χαράκτης

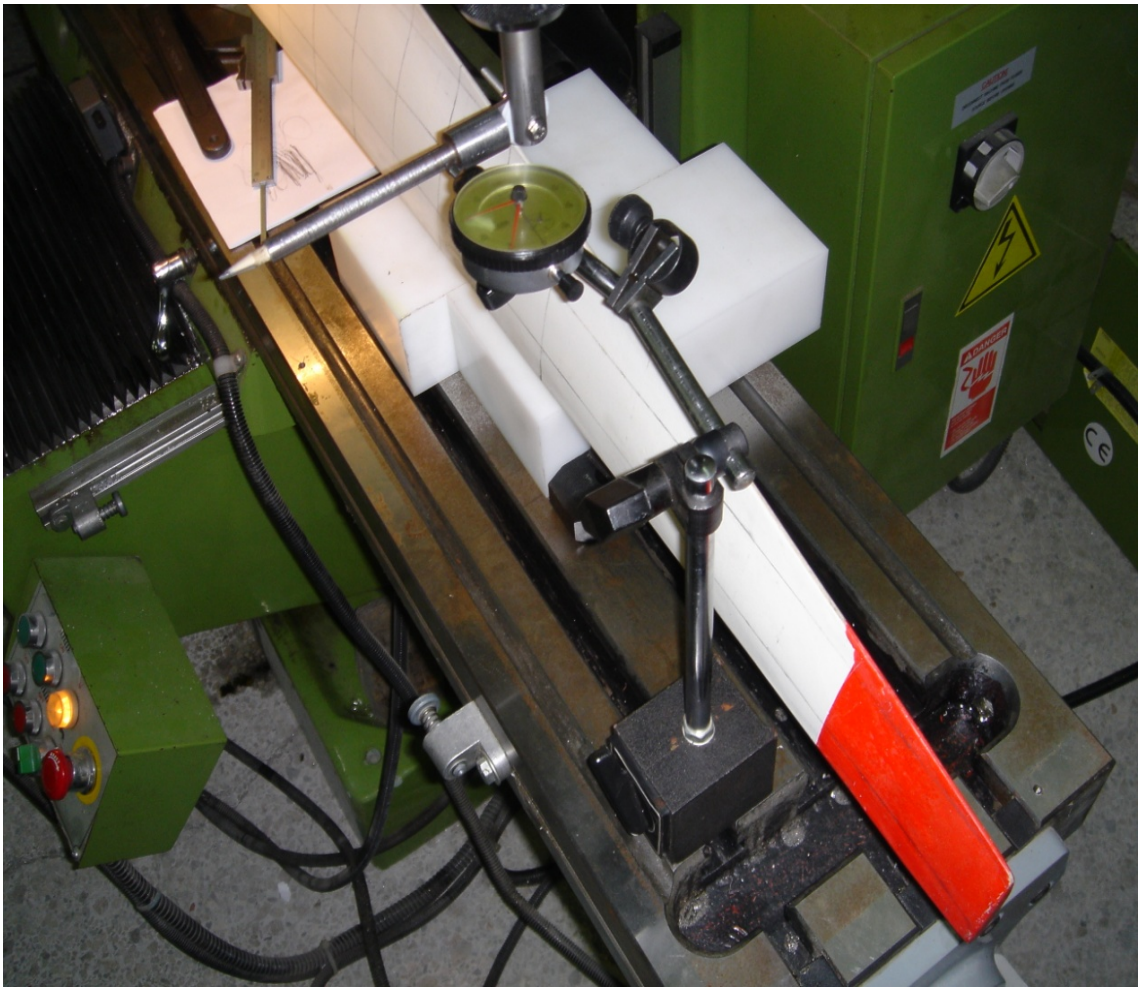
Στη συνέχεια μετρήθηκε το κομβίο αναλυτικά σε μήκος, πλάτος και πάχος μέχρι το σημείο αρχής της αεροτομής, με τη βοήθεια παχυμέτρου. Ακολούθησε η επισήμανση (μαρκάρισμα) του νοητού άξονα που διαπέρνα εγκάρσια το πτερύγιο από την άκρη του κομβίου έως το τέλος του ακροπτερυγίου και από τις δύο πλευρές της επιφάνειας του. Ο ρόλος του νοητού αυτού άξονα είναι η «στήριξη» των χωρισμάτων για τις αεροτομές που πρόκειται να μετρηθούν στη συνέχεια. Επίσης πέραν του

κεντρικού νοητού άξονα, σημαδεύτηκαν τρεις ακόμη βοηθητικοί, σε απόσταση 34mm ο καθένας. Έχοντας το σημάδι του νοητού άξονα, το πτερύγιο τοποθετήθηκε ξανά στο τραπέζι της φρέζας στηριζόμενο στη μέγγενη και με τη βοήθεια ιδιοκατασκευής (γράφτη/χαράκτη) σημαδεύτηκαν κάθετα τα περιγράμματα των αεροτομών και από τις δυο πλευρές ανεβοκατεβάζοντας την άτρακτο (προβοσκίδα) και μετακινώντας τον χειροστρόφαλο της τράπεζας ανά 52,5mm.



Εικόνα 21. Ιδιοκατασκευή (γράφτης/χαράκτη) για το μαρκάρισμα των τομών

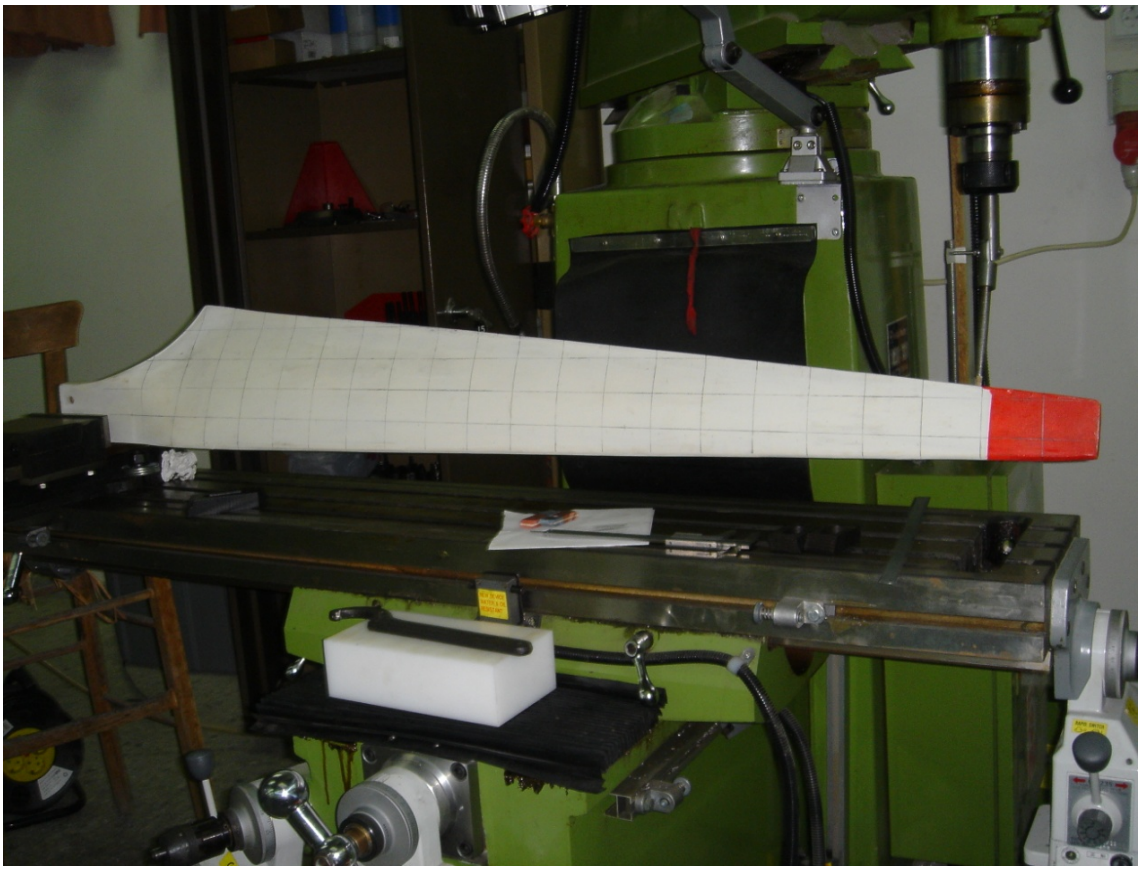
Για την επίτευξη της ελαχιστοποίησης σφαλμάτων μέτρησης η ιδιοκατασκευή που χρησιμοποιήθηκε διακριβώθηκε (καλυμπράρισμα) με τη χρήση μετρητικού ωρολογίου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 22. Με τη χρήση αυτής και τη βοήθεια της φρέζας επιτυγχάνεται το μαρκάρισμα παράλληλων τομών σε ισαπέχουσες αποστάσεις όπως και παρουσιάζεται στην εικόνα 23. Στην εικόνα 24 που ακολουθεί παρατηρούμε το κανονικό πλέγμα που σχηματίστηκε με το πέρας της εργασίας στην εμπρόσθια επιφάνεια του πτερυγίου.



Εικόνα 22. Διακρίβωση ιδιοκατασκευής



Εικόνα 23. Μετατόπιση προβοσκίδας φρέζας για το μαρκάρισμα παράλληλων τομών σε ισαπέχουσες αποστάσεις.



Εικόνα 24. Ολοκλήρωση μαρκαρίσματος εμπρόσθιας επιφάνειας πτερυγίου

Το πτερύγιο τοποθετήθηκε ακολούθως παράλληλα στο τραπέζι εφαρμογών και με τη βοήθεια του υψομετρικού χαράκτη μετρήθηκαν τα σημεία όπου τέμνονταν οι νοητοί άξονες με τα περιγράμματα των αεροτομών (208 σημεία). Η μέτρηση κάθε περιγράμματος είναι ξεχωριστή διαδικασία. Ο υψομετρικός χαράκτης μηδενίζεται στο χείλος προσβολής κάθε αεροτομής, δηλαδή είναι το σημείο μηδέν, και στη συνέχεια προχωρώντας στα υπόλοιπα σημεία, καταγράφονται οι υψομετρικές διαφορές και από της δυο πλευρές (εικόνα 25). Το αποτέλεσμα είναι άκρως ικανοποιητικό και δίνει το προφίλ της κάθε αεροτομής με ακρίβεια που επαληθεύτηκε στα συγκεκριμένα σημεία στο ±0.01mm περίπου.



Εικόνα 25. Μέτρηση με τον υψομετρικός χαράκτη

Η όλη διαδικασία πραγματοποιήθηκε 208 φορές, σε όλα τα σημεία του πτερυγίου που προαναφέρθηκαν. Στην εικόνα 26 (α) έως (δ) παρουσιάζεται σταδιακά η διαδικασία μέτρησης και καταγραφής των συντεταγμένων των σημείων με τη βοήθεια του υψομετρικού χαράκτη.



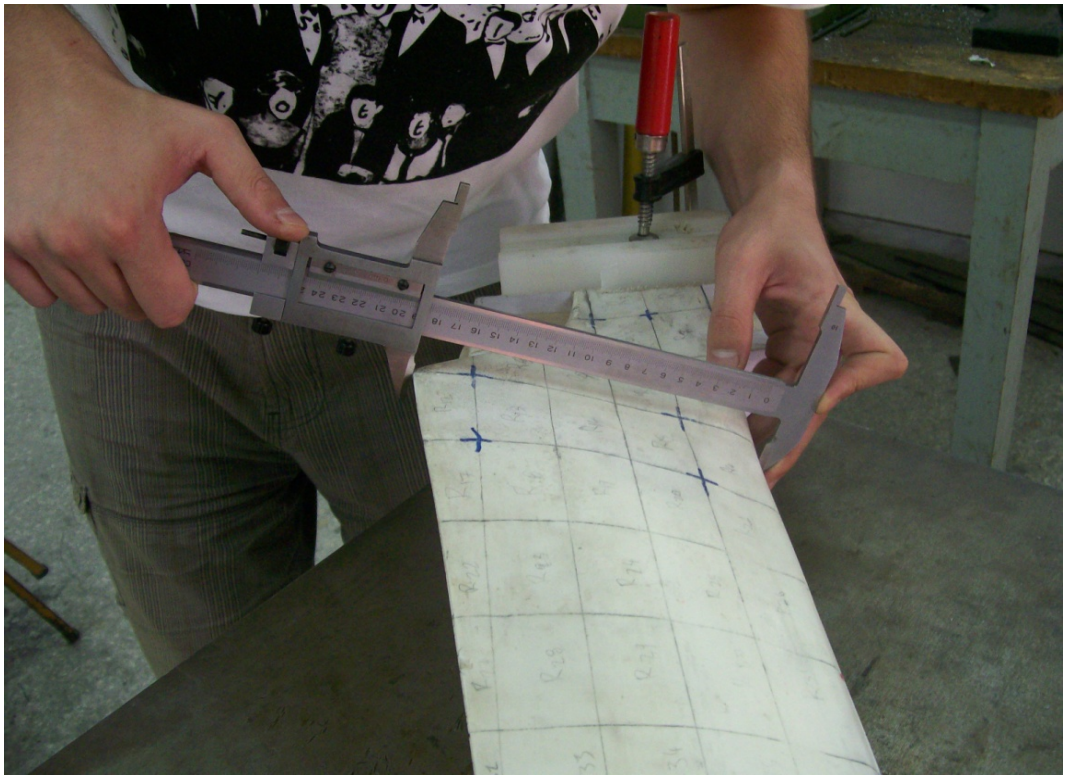
Εικόνα 26. (α) Πρώτη μέτρηση στο χείλος προσβολής της πρώτης τομής**, (β)** μέτρηση του δεύτερου σημείου (νοητός άξονας), **(γ)** Μέτρηση του τρίτου σημείου της επάνω πλευράς και **(δ)** Μέτρηση ύψους στο χείλος εκφυγής

Για την υλοποίηση της μέτρησης των σημείων στην κάτω επιφάνεια του πτερυγίου χρησιμοποιήθηκε το είδωλο των σημείων (εικόνα 27) με τη χρήση καθρέπτη ώστε να παραμείνουν αμετάβλητα τα σημεία αναφοράς της μέτρησης από τυχόν μετακίνηση της πτέτυγας.



Εικόνα 27. Μέτρηση σημείων κάτω επιφάνειας με τη βοήθεια του ειδώλου

Ακολούθησε η μέτρηση του μήκους της χορδής κάθε αεροτομής. Το μήκος προσδιορίστηκε με τη χρήση παχύμετρου προσαρμοσμένου μεταξύ χείλους προσβολής και χείλους εκφυγής όπως διακρίνεται στην εικόνα 28.



Εικόνα 28. Μέτρηση μήκους χορδής

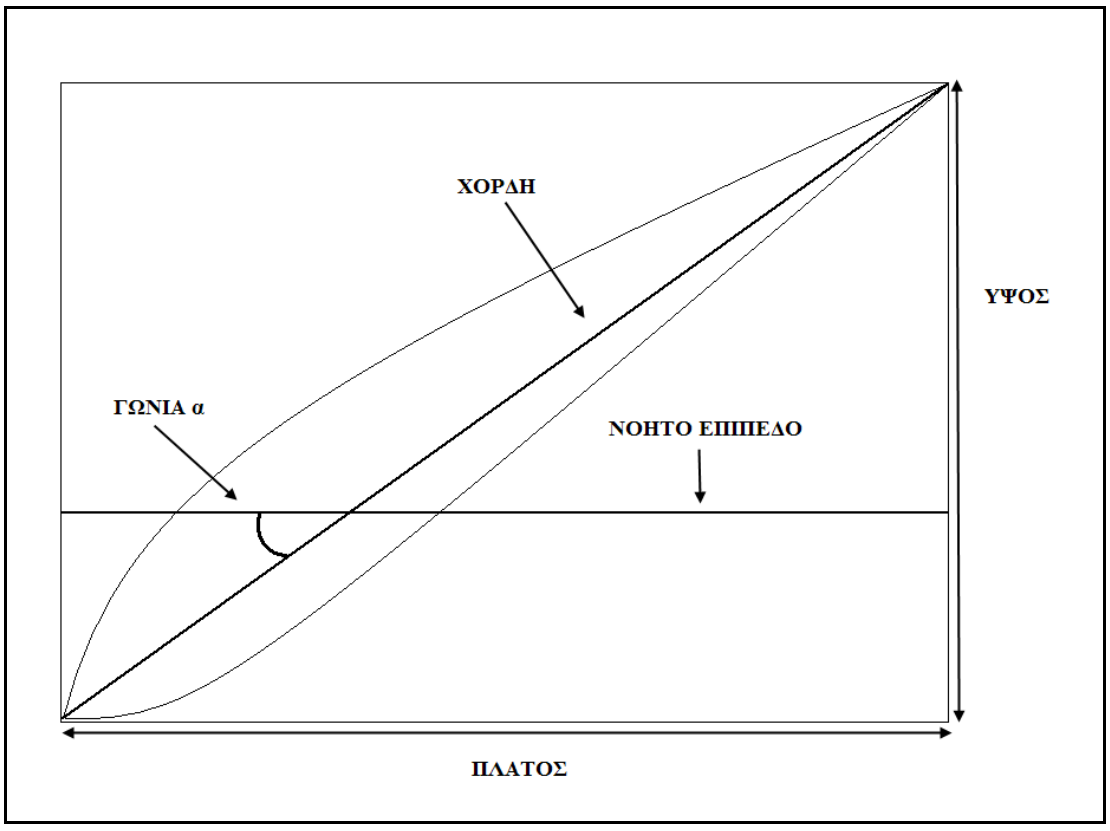
Τα δεδομένα που λήφθηκαν από τη μέτρηση καταχωρήθηκαν σε πίνακες για να χρησιμοποιηθούν στην αποτύπωση του πτερυγίου για την μετέπειτα τρισδιάστατη μοντελοποίησή του. Στον Πίνακα 1 :

- ΥΨΟΣ: Το μήκος της καθέτου που σχηματίζει το τρίγωνο.
- ΠΛΑΤΟΣ: Το μήκος μεταξύ χείλους προσβολής και εκφυγής στο επίπεδο.
- ΑΚΤΙΝΑ: Το μήκος του πτερυγίου μεταξύ της αρχής του κομβίου και κάθε τομής.

ΤΟΜΕΣ	ΥΨΟΣ	ΠΛΑΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	ΜΗΚΟΣ ΧΟΡΔΩΝ	ΑΚΤΙΝΑ ρ	ΓΩΝΙΑ α º	ΔΙΑΦΟΡΑ ΓΩΝΙΩΝ
1	90,5	175	197	222	27,4	
2	81,8	170	190	278,5	25,67	1,73
3	75	164	180	335	24,6	1,07
4	67	158	172	391,5	22,95	1,65
5	59	152	165	448	21,1	1,85
6	53	149	158	504,5	19,59	1,51
7	48,5	143	151	561	18,73	0,86
8	43,5	137	144	617,5	17,6	1,13
9	39	132	137	674	16,5	1,1
10	35	125	130	730,5	15,63	0,87
11	32	120	124	787	14,94	0,69
12	28,6	113	117	843,5	14,18	0,76
13	26	107	110	900	13,67	0,51

14	23,5	100	103	956,5	13,22	0,45
15	21,5	93	96	1013	12,98	0,24
16	19,4	86	89	1069,5	12,65	0,33
17	17,8	80	82	1126	12,54	0,11
18	14,9	73	75	1182,5	11,5	1,04
19	13	67	68	1239	11	0,5
20	9,7	62	62	1295,5	8,95	2,05
21	5,8	53	52	1352	6,38	2,57

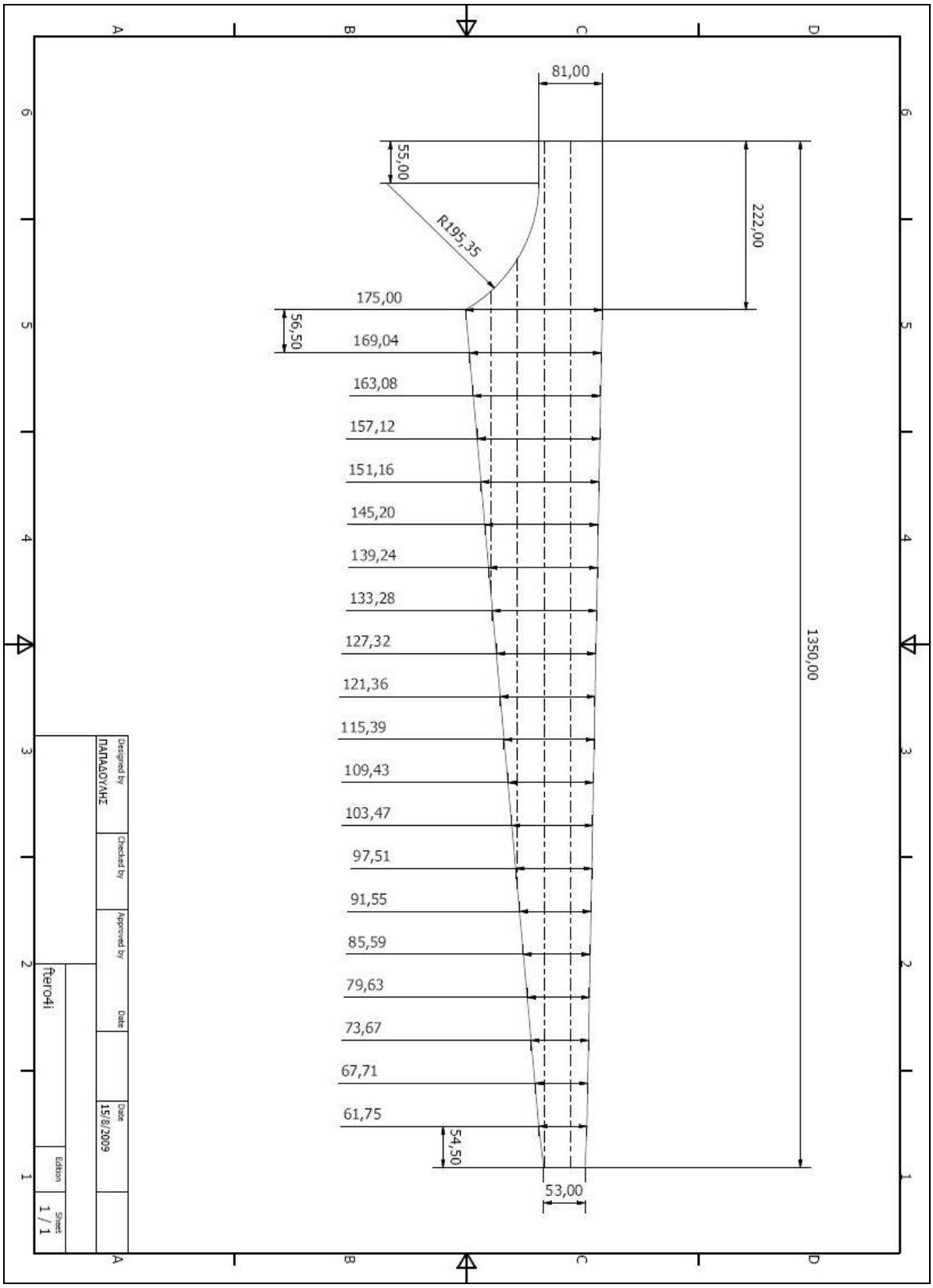
Πίνακας 1. Δεδομένα μετρήσεων (mm)



Εικόνα 29. Σκαρίφημα χαρακτηριστικών γωνιών αεροτομής

Για την εύρεση της γωνίας πρόσπτωσης **α,** με βάση και την απεικόνιση που παρουσιάζεται στο σκαρίφημα της εικόνας 29 ισχύει ότι **Sin(α)** = Υψος/Χορδή.

Η συλλογή των παραπάνω στοιχείων οδήγησε στο σχεδιασμό της όψης, σε νοητό επίπεδο παράλληλο στην τράπεζα, που παρουσιάζεται στην εικόνα 30. Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε καταγράφηκαν τα δεδομένα της άνω και κάτω πλευράς του πτερυγίου, όπως και παρουσιάζονται στους Πίνακες 2 και 3 που ακολουθούν.



Εικόνα 30. Σχεδιάγραμμα πτερυγίου

ΤΟΜΗ	Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ
1	0	41,76	56,9	72	84,8	91
2	0	38,7	56,9	70,44	79,3	82,7
3	0	36,5	54,5	66,2	73	74,5
4	0	33,8	50,6	60,8	66,25	67
5	0	30,5	46,7	55,6	60,15	60
6	0	27,95	42,88	50,8	54,3	54,5
7	0	26,85	40,45	47,5	49,6	48
8	0	25,9	38,06	43,56	44,15	-
9	0	24	35,5	40,05	40,5	-
10	0	21,8	32,3	36,1	35,85	-
11	0	20,5	30,1	32,9	33,05	-
12	0	19,45	28	29,6	29,6	-
13	0	18,35	26,5	27,35	26,7	-
14	0	16,85	24,15	24,4	24,9	-
15	0	16,4	22,7	22,6	-	-
16	0	16,2	22,05	20	-	-
17	0	14,45	19,2	17,88	-	-
18	0	13,1	16,9	15,82	-	-
19	0	11,5	14,6	13,55	-	-
20	0	9,55	11,5	9,8	-	-
21	0	7,85	8,3	-	-	-

Πίνακας 2. Μετρήσεις άνω πλευράς πτερυγίου.

ΤΟΜΗ	Α	Β	Γ	Δ	Ε	Ζ
1	0	9,7	25,7	47,5	72,8	91
2	0	6,5	22,3	42,8	68,45	83
3	0	4,7	19,05	38,5	63,74	74
4	0	3,75	16,95	35,7	59,4	67
5	0	2,8	15,57	33,6	55,4	60
6	0	2,1	14,58	31,65	51,5	54,7
7	0	1,6	12,65	29,3	47,4	48
8	0	1,2	11,2	27,2	44,15	-
9	0	0,7	10,2	26,3	39,5	-
10	0	0,5	9,6	25,2	35,4	-
11	0	0,3	9,6	25,2	32,8	-
12	0	-0,86	7,8	23,6	29	-
13	0	-1,9	7,5	22,7	26,7	-
14	0	-2	7,7	21,3	23,3	-
15	0	-2	7,53	21	-	-
16	0	-1,85	7,85	20	-	-
17	0	-1,95	8,1	17,88	-	-
18	0	-1,5	8,75	15,83	-	-
19	0	-1,6	7,7	12,45	-	-
20	0	-1,35	6,5	9,8	-	-
21	0	-3,27	6,8	-	-	-

Πίνακας 3. Μετρήσεις κάτω πλευράς πτερυγίου.

3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

3.1 CAD MODELING

CAD (**C**omputer **A**ided **D**esign) ή σχεδιασμός με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, είναι η μέθοδος δισδιάστατου (2D) και τρισδιάστατου (3D) σχεδιασμού με πλήθος εφαρμογών σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας και γενικότερα των κατασκευαστικών τεχνολογιών και των υπολογιστικών μεθόδων απεικόνισης. Η ανάπτυξη των λογισμικών CAD συσχετίζεται άμεσα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της βιομηχανίας. Το περιβάλλον εργασίας τέτοιων λογισμικών συχνά δεν περιορίζεται σε απλά σχήματα αλλά και σε εγχειρίδια, μηχανολογικά σχεδία, επιλογή υλικών, διαδικασίες και κατεργασίες, διαστάσεις, ανοχές, αντοχές κ.α. Το CAD χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική και την αεροδιαστημική, στον βιομηχανικό και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Λόγω αυτής της τεράστιας οικονομικής επιρροής, το CAD αποτέλεσε σημαντική κινητήρια δύναμη για την έρευνα στην υπολογιστική γεωμετρία, τα γραφικά υπολογιστών (hardware και software), αλλά και στη διαφορική γεωμετρία [8]. Τα βασικά πλεονεκτήματα του 3D CAD σχεδιασμού είναι:

- Ακριβής απεικόνιση τεμαχίου.
- Εποπτικός έλεγχος τεμαχίου.
- Άμεση μεταφορά σε σχέδιο 2 διαστάσεων για εξαγωγή όψεων και τομών.
- Δυνατότητα παραμετροποίησης για μαζική παραγωγή.
- Φωτορεαλισμός.

3.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Η αντίστροφη μηχανική αποτελεί τεχνική για την παραγωγή τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων από αντικείμενα, μετρώντας τις διαστάσεις τους. Η διαδικασία σχεδιασμού αντικειμένων με τη βοήθεια υπολογιστή ξεκινάει με κάποια ιδέα, η οποία εξελίσσεται σε ένα σχεδιαστικό μοντέλο και καταλήγει στο να τροφοδοτήσει τη διαδικασία παραγωγής με το τελικό αντικείμενο. Στην αντιστροφή μηχανική το υπάρχον αντικείμενο μετριέται και τα ψηφιοποιημένα δεδομένα μετατρέπονται σε γεωμετρικό μοντέλο. Τεχνικές παραγωγής με τη βοήθεια υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για να κατασκευαστούν νέα αντικείμενα από το γεωμετρικό αυτό μοντέλο. Τομείς εφαρμογών της αντίστροφης μηχανικής είναι η βιομηχανία για την παραγωγή ανταλλακτικών εξαρτημάτων, χωρίς να είναι διαθέσιμα αρχικά σχέδια ή προδιαγραφές όπως επίσης και η επιστήμη της αρχαιολογίας που δεν υπάρχουν γεωμετρικά μοντέλα από αντικείμενα, γιατί έχουν σχεδιαστεί σε προγενέστερες περιόδους, είτε πρόκειται για αντίκες ή αντικείμενα αρχαιολογικής σημασίας. Η σειρά με την οποία εφαρμόζεται η αντίστροφη μηχανική είναι η συλλογή δεδομένων, η επεξεργασία τους και τέλος η δημιουργία CAD μοντέλου.

3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την επεξεργασία των επιφανειών, πριν αρχίσει η μέτρηση, υπάρχουν δυο βασικές μέθοδοι για την συλλογή δεδομένων. Η πρώτη μέθοδος είναι χωρίς επαφή όπου τα δεδομένα συλλέγονται με τη μορφή παράλληλων καμπυλών, που αντιστοιχούν στο περίγραμμα του αντικειμένου, που προκύπτει από ένα νοητό κάθετο επίπεδο τομής στη θέση της μέτρησης, χρησιμοποιώντας ψηφιακές μηχανές σάρωσης (scanners). Η δεύτερη μέθοδος είναι με επαφή όπου τα δεδομένα συλλέγονται με κατάλληλες συσκευές μέτρησης συντεταγμένων (CMM Coordinate Measuring Machine) ή με ποιο απλές συσκευές μέτρησης όπως παχύμετρο, μικρόμετρο και υψομετρικό χαράκτη.

3.3 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η προσέγγιση των δεδομένων από γεωμετρικό μοντέλο επιφάνειας αποτελεί το πιο σημαντικό σημείο στις μεθόδους αντίστροφης μηχανικής, αφού εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες και επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια του μοντέλου που θα προκύψει από τις μετρήσεις. Η μεθοδολογία για την προσέγγιση των δεδομένων από γεωμετρικό μοντέλο επιφάνειας αποτελείται από τα δεδομένα όπου ομαδοποιούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε ομάδα στοιχείων να μπορεί να προσεγγιστεί από μια επιφάνεια αλλά το βασικότερο πρόβλημα, το οποίο παρουσιάζεται είναι να υπάρχουν ασυνέχειες στη δομή των δεδομένων. Επίσης το σύστημα δεν μπορεί να αναγνωρίσει το είδος της επιθυμητής επιφάνειας που θα κατασκευαστεί. Οι μέθοδοι αναπαράστασης των γεωμετρικών μοντέλων σε συστήματα CAD μπορεί να είναι είτε προσεγγιστικές είτε ακριβείς και αυτό εξαρτάται από τις απαιτήσεις των συγκεκριμένων προβλημάτων. Τέλος, ακόμα και με τα πιο εξελιγμένα εμπορικά προγράμματα, κάποια μοντέλα μπορούν να παραχθούν απεικονιζόμενα με τριγωνοποιημένες επιφάνειες, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό.

3.4 3D MODELING ΜΕ ΤΟ AUTODESK INVENTOR PRO.

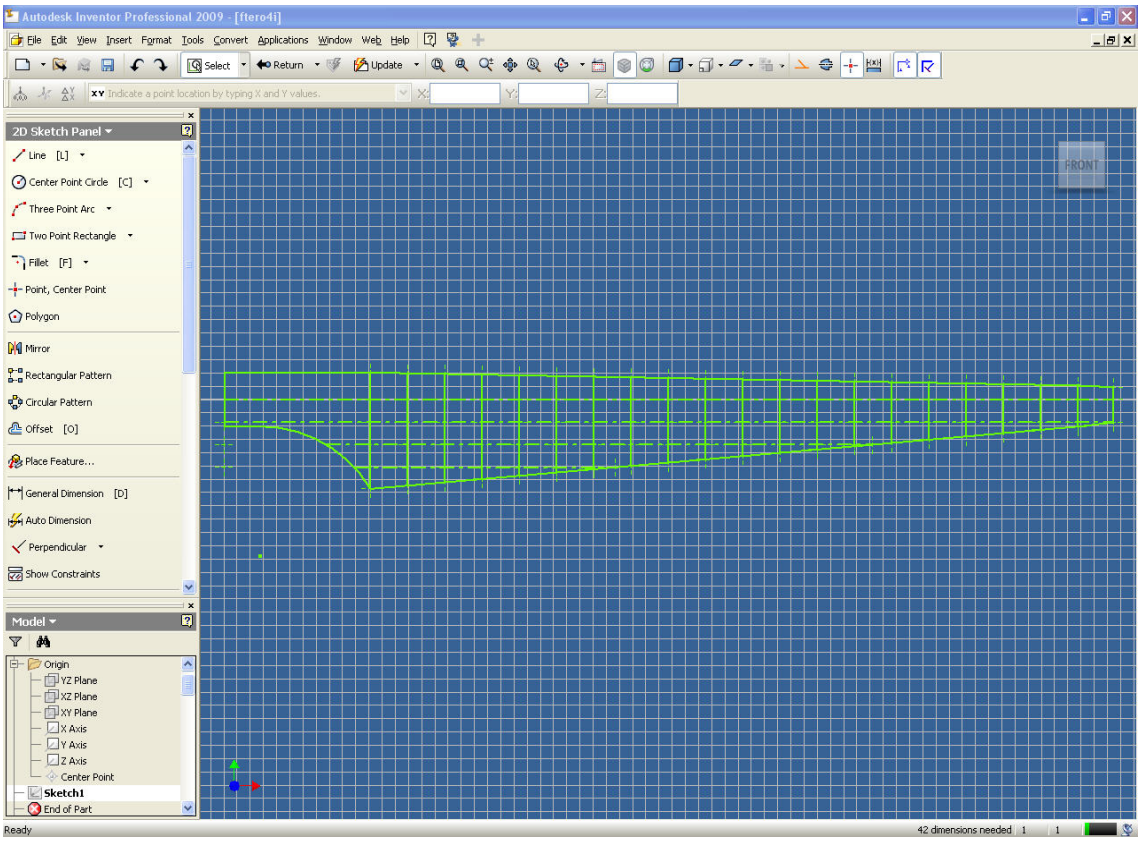
Με βάση το γεγονός της καθολικής μοντελοποίησης στο λογισμικό Inventor Pro [11], παρατίθενται στον Πίνακα 4, οι κύριες λειτουργίες και εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοντέλου της πτέρυγας.

	**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. Είναι μια λογική πράξη (Boolean) όπου με βάση το Sketch που θα επιλεχθεί δημιουργούνται ή αφαιρούνται επιφάνειες και στερεά σώματα.

	**Thicken / Offset**	Η συγκεκριμένη εντολή μπορεί να αποδώσει ή και να αφαιρέσει πάχος από κάθε επιφάνεια του μοντέλου.
	**Loft**	Η λειτουργία της είναι να δημιουργεί επιφάνεια με βάση πολλά προφίλ με διαφορετικά σχήματα σε ξεχωριστά επίπεδα ή επίπεδα αναφοράς. Για να ελέγξουμε την μορφή και να αποτραπεί η στρέβλωση ή η παραμόρφωση των σχημάτων που δημιουργούνται με την εντολή Loft, προστέθηκαν Rails Loft που είναι 2D είτε 3D καμπύλες και διασταυρώνονται σε κάθε ένα τμήμα.
	**Mirror**	Η συγκεκριμένη εντολή καθρεφτίζει ένα σχέδιο ή και ένα δημιούργημα (feature), με βάση το επίπεδο αναφοράς που θα του ορίσει ο χρήστης.
	**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 συγκεκριμένη εντολή μεταφερόμαστε σε περιβάλλον δισδιάστατης σχεδίασης. Το περιβάλλον σχεδιασμού είναι παρεμφερές με αυτό του AutoCAD.
	**3D Sketch**	Είναι το περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης έχοντας της σχεδόν επιλογές με το 2D Sketch. Η μεγάλη διαφορά είναι η δυνατότητα σχεδίασης στο χώρο και η χρήση τρισδιάστατων σημείων και splines.
	**Project Geometry**	Η συγκεκριμένη εντολή χρησιμοποιείται κυρίως σε 2D Sketch για να προβάλλει επιφάνειες ή γραμμές πάνω σε ένα επίπεδο αναφοράς. Η συγκεκριμένη εντολή χρησιμοποιήθηκε πολύ συχνά στην περίπτωση μας καθώς με την βοήθειά της εξοικονομήθηκε χρόνος στην δημιουργία πάρα πολλών 2D Sketch σε διαφορετικά επίπεδα αναφοράς τα οποία έπρεπε να δημιουργηθούν.
	**2D και 3D Spline**	Η εντολή Spline χρησιμοποιείται και σε δισδιάστατο αλλά και σε τρισδιάστατο περιβάλλον σχεδίασης. Η λειτουργία της συγκεκριμένης εντολής είναι η δημιουργία ομαλών καμπύλων παρεμβολής σε σημεία μηδενίζοντας από μόνη της την παράγωγο.

Πίνακας 4. Βασικές εντολές Inventor.

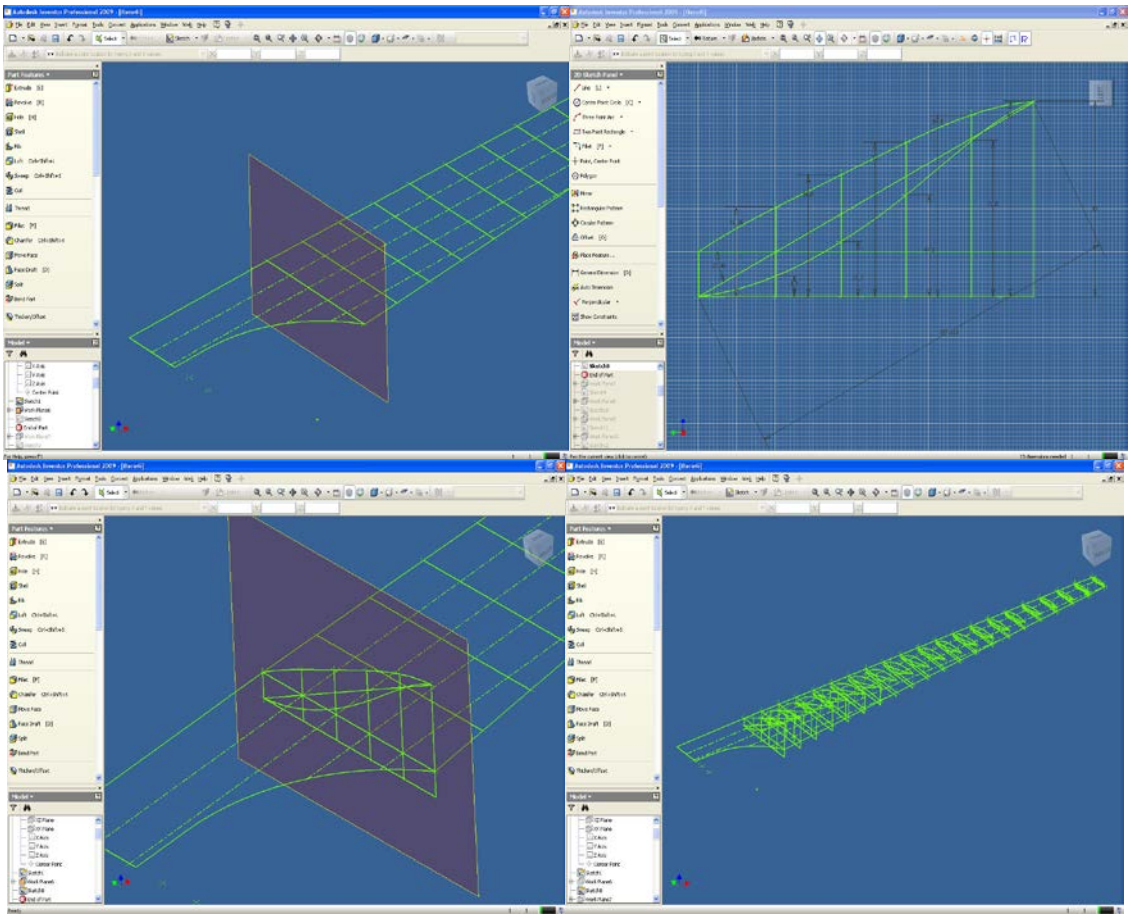
Η διαδικασία μοντελοποίησης του πτερυγίου ξεκίνησε με την δημιουργία επιπέδου αναφοράς το οποίο έχει για αρχή το μέσο του ύψους του κομβίου του φτερού και εκτείνεται έως την άκρη του.



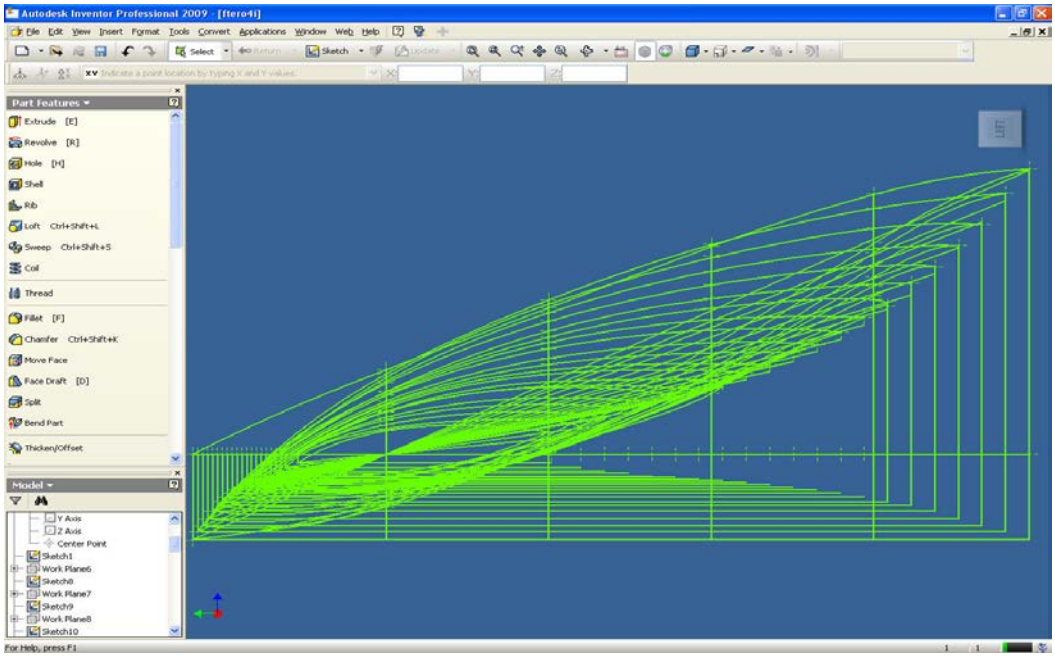
Εικόνα 31 Σχεδιασμός κάτοψης πτερυγίου

Το επίπεδο αυτό έχει το περίγραμμα της κάτοψης του πτερυγίου καθώς και τα χωρίσματα των 21 τομών που αποτυπώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης ορίστηκε ο νοητός άξονας που διαπερνά το κέντρο του κομβίου και κάθε τομής και αποτελεί ουσιαστικά τον οδηγό για τον σχεδιασμό της κάθε τομής ξεχωριστά. Για τη μηχανολογική σχεδίαση της κάθε τομής μεμονωμένα ακολουθήθηκε η διαδικασία που ακολουθεί και παρουσιάζεται στην Εικόνα 32:

- Δημιουργία work plane σε κάθε τομή, κάθετη ως προς το αρχικό επίπεδο.
- Τοποθετούνται points σε κάθε σημείο όπου το ευθύγραμμο τμήμα της τομής τέμνεται με τον νοητό άξονα, το χείλος προσβολής, το χείλος εκφυγής και κάποιους βοηθητικούς άξονες. Στην συνέχεια, προεκτάθηκαν κάθετα ευθύγραμμα τμήματα βάση των μετρήσεων που έγιναν και τοποθετήθηκαν points στις άκρες τους.
- Με χρήση την εντολή spline ενώθηκαν με καμπύλες τα άνω και κάτω σημεία της κάθε τομής σχηματίζοντας τις τελικές μορφές των αεροτομών.
- Το τελικό αποτέλεσμα έχει ουσιαστικά την μορφή ενός σκελετού ο οποίος καθορίζει και την τελική τρισδιάστατη μορφή του πτερυγίου.

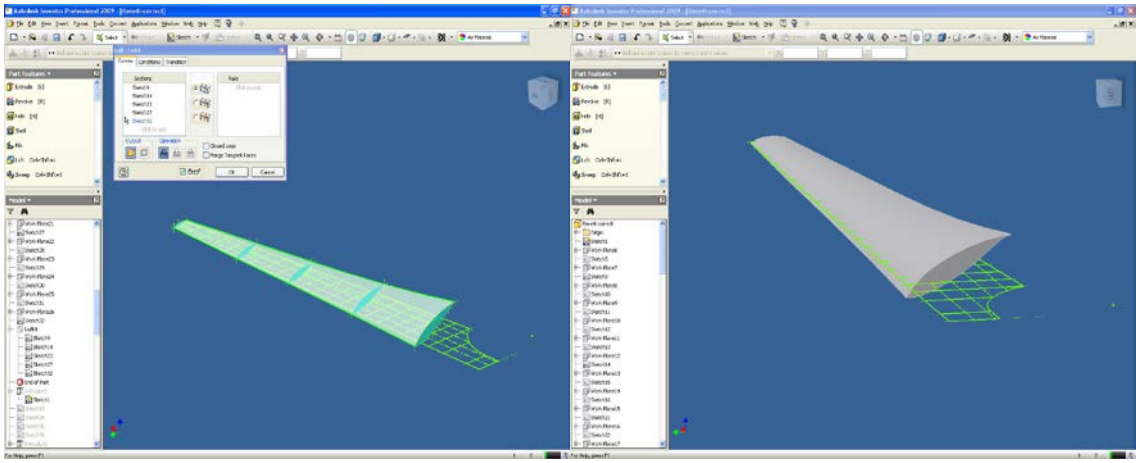


Εικόνα 32 (α) Δημιουργία επιπέδου αναφοράς (Work plane), **(β)** Τοποθέτηση σημείων (points) για την δημιουργία περιγράμματος, **(γ)** Ολοκλήρωση της πρώτης τομής και **(δ)** Συνολική εικόνα



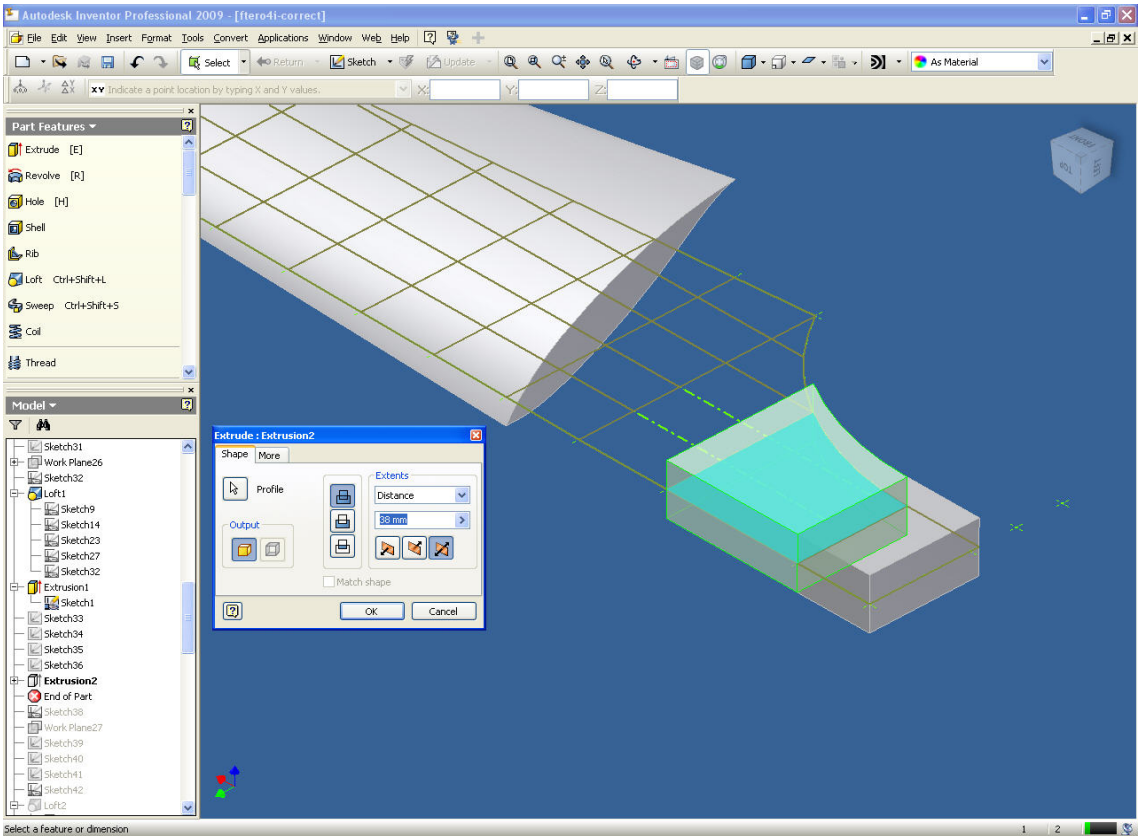
Εικόνα 33 Πλάγια όψη αεροτομών

Εκτελείται η εντολή *Loft* με την οποία δίδεται η τελική μορφή της πτέρυγας στο κομμάτι της αεροτομής όπως φαίνεται και στην εικόνα 34.

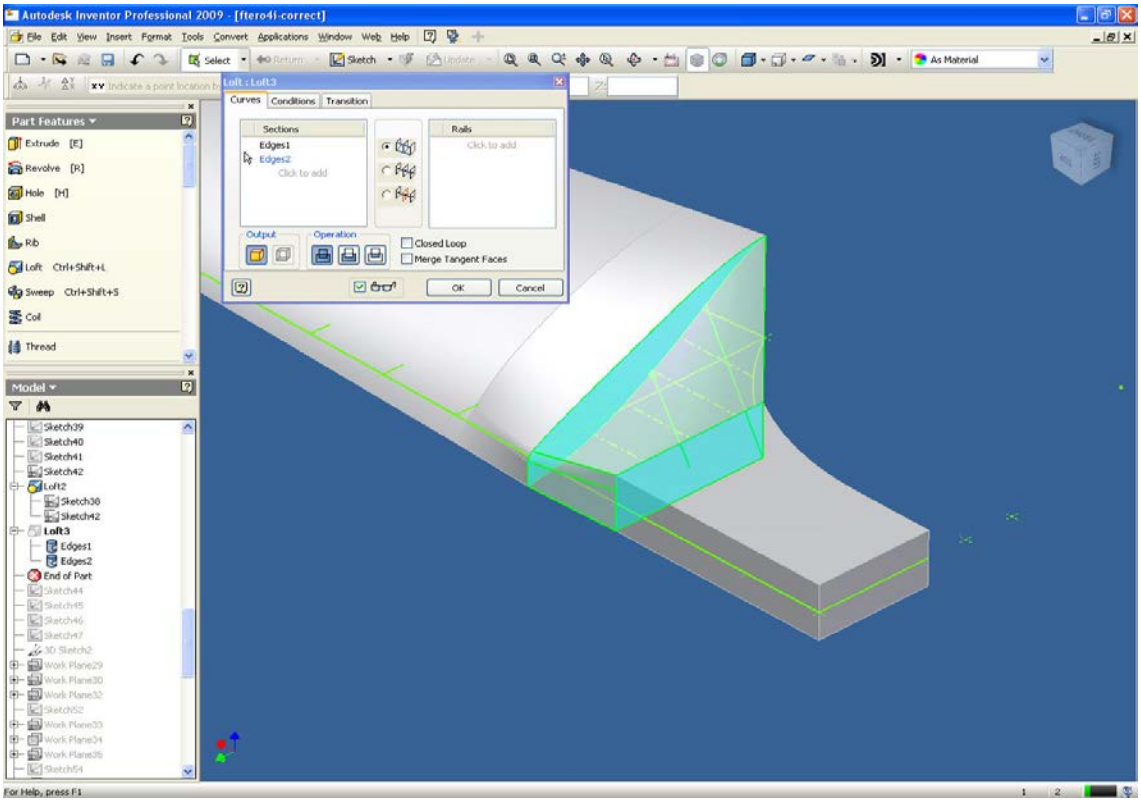


Εικόνα 34 Ένωση τομών με την εντολή loft

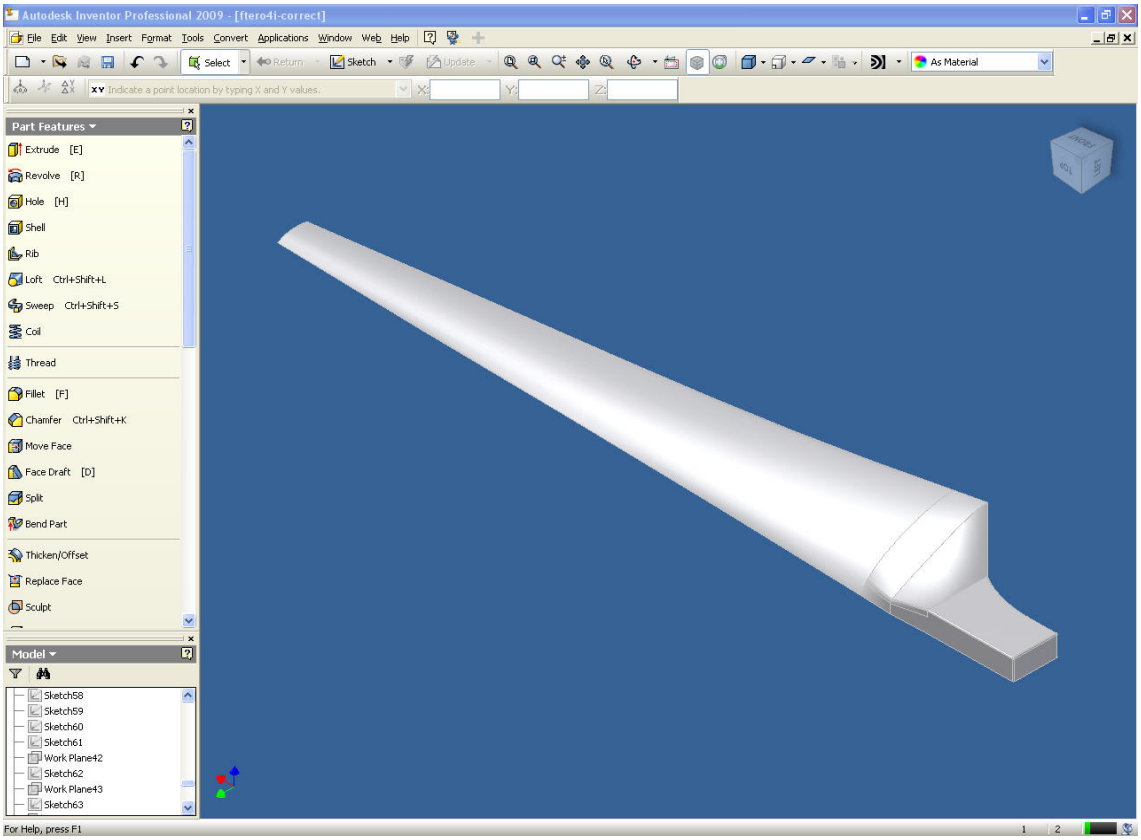
Για τον σχεδιασμό του πίσω μέρους του πτερυγίου χρησιμοποιήθηκε η εντολή Extrude, που βάσει του αρχικού επιπέδου, προεκτάθηκε κατά 19mm και στις δυο κατευθύνσεις και ακολούθως ενώθηκε με το υπόλοιπο κομμάτι (εικόνες 35 έως 37).



Εικόνα 35. Δημιουργία κομβίου με την εντολή Extrude

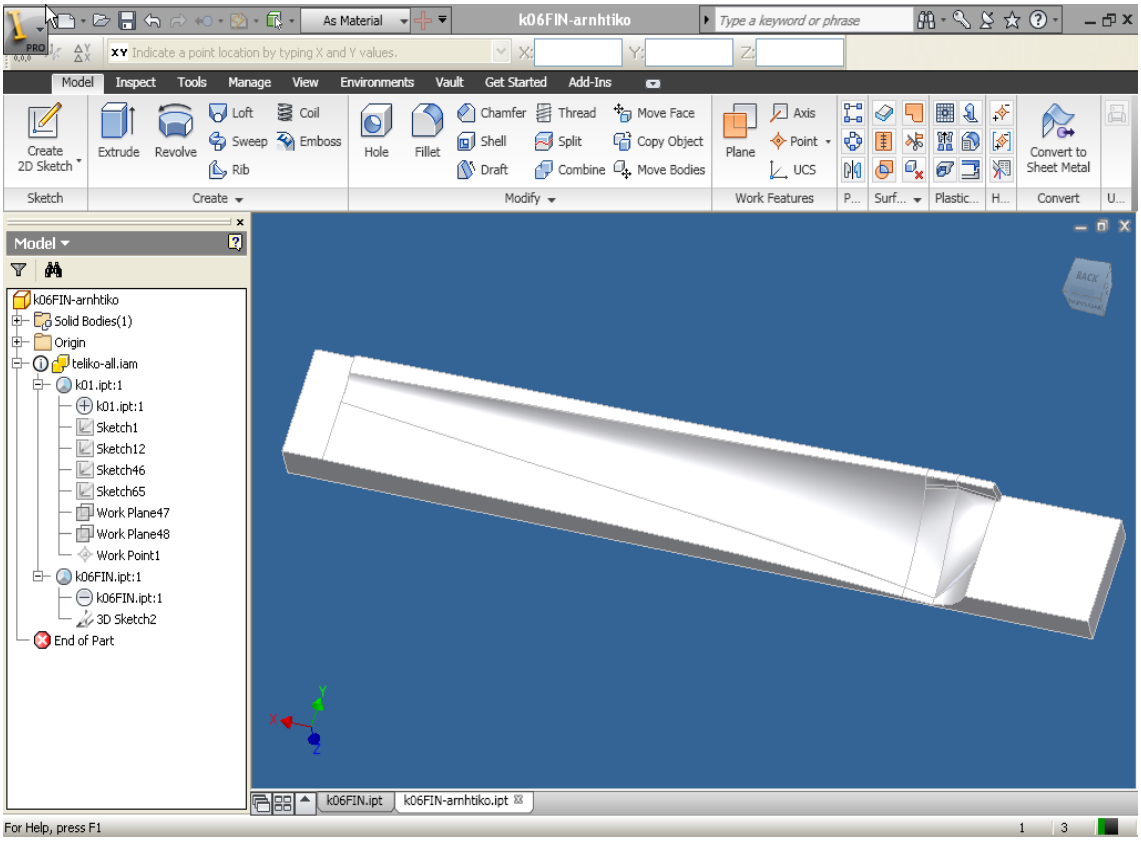


Εικόνα 36. Ένωση κομβίου και αεροτομής με την εντολή loft

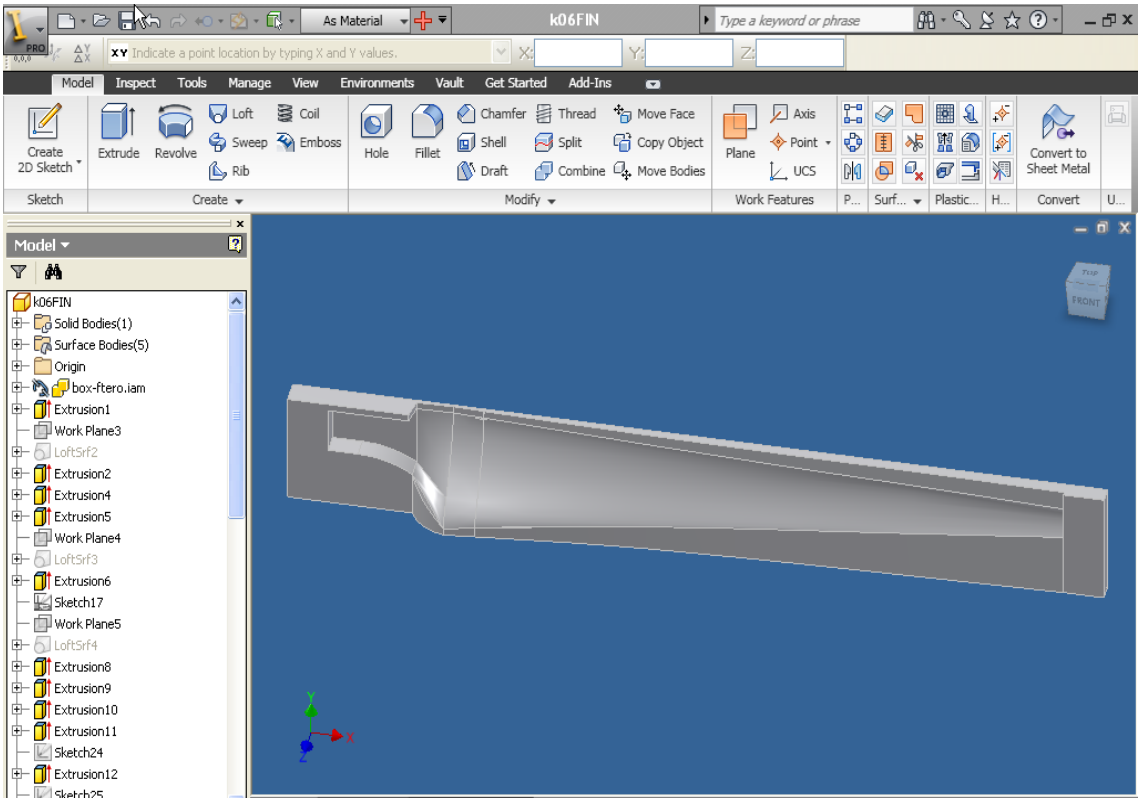


Εικόνα 37. Άποψη ολοκληρωμένου 3D Solid πτερυγίου

Εφόσον πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του πτερυγίου και επιβεβαιώθηκε η ορθότητα του, δημιουργήθηκε στο υπάρχον μοντέλο work plane και rectangle sketch σε αυτό με διαστάσεις 100 x 100 mm σε απόσταση 75 mm από το τέλος του πτερυγίου. Το work plane ορίστηκε 4.5mm από το υψηλότερο και χαμηλότερο σημείο και 12.5mm από την αριστερή και δεξιά πλευρά του. Έπειτα, με την εντολή Extrude, έγινε προέκταση του ορθογωνίου κατά 1500mm σχεδιάζοντας έτσι το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα του καλουπιού συμπεριλαμβάνοντας μέσα του το πτερύγιο. Ακολούθησε η επανάληψη της εντολής Loft αλλά αυτή την φορά με παράμετρο cut αφαιρώντας με αυτό τον τρόπο (Boolean Operation) τον όγκο του πτερυγίου μέσα από το παραλληλόγραμμο (= ακατέργαστο τεμάχιο). Τέλος το καλούπι χωρίστηκε κατά μήκος του χείλους προσβολής και εκφυγής και του μέσου του κομβίου με τη βοήθεια επιπέδων τομής. Τα δύο κομμάτια, άνω και κάτω μέρος του καλουπιού που προέκυψαν, παρουσιάζονται στις εικόνες 38 και 39.

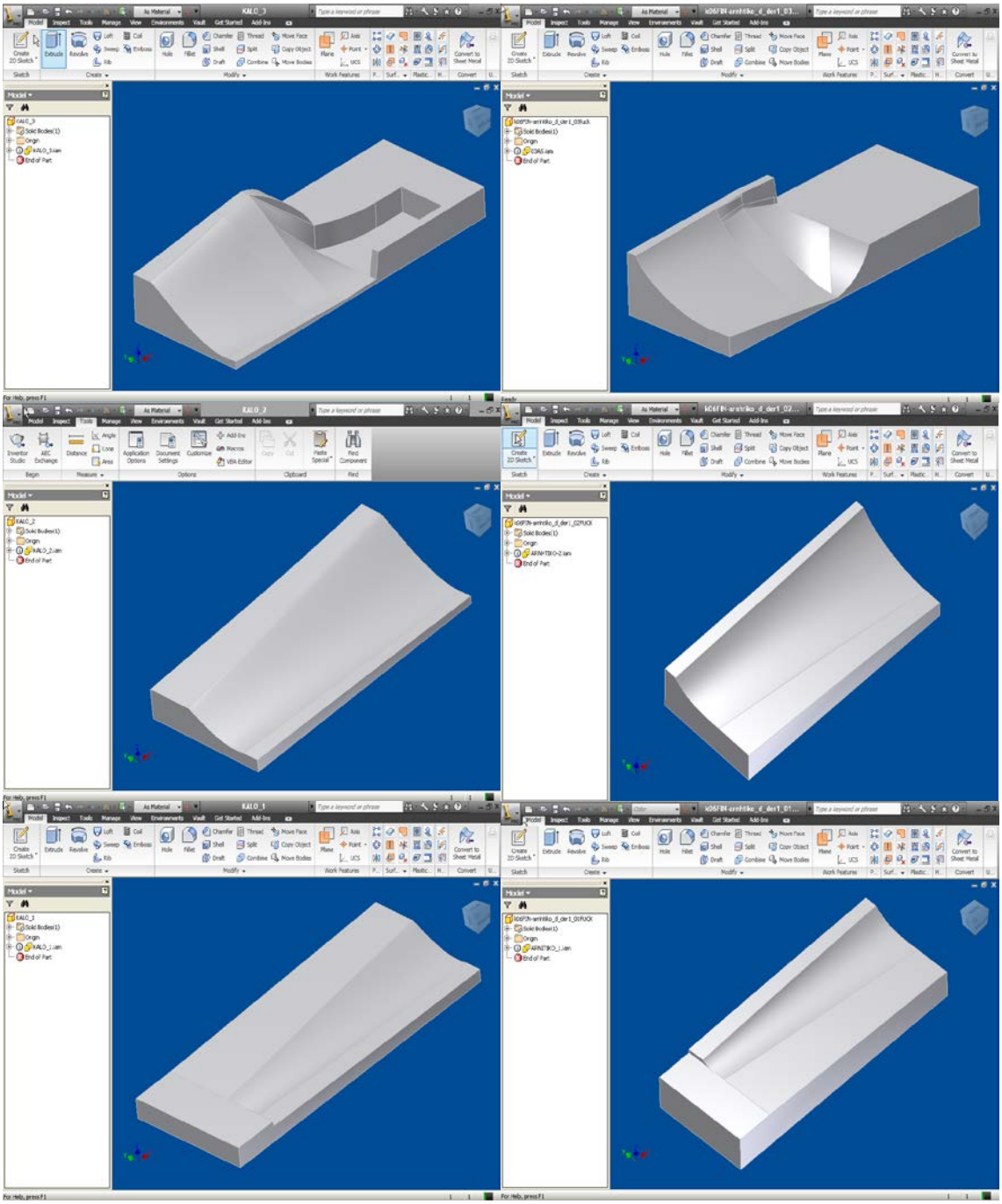


Εικόνα 38. Κάτω τμήμα διαιρούμενου καλουπιού



Εικόνα 39. Άνω τμήμα διαιρούμενου καλουπιού

Με αυτή την διαδικασία ολοκληρώθηκε η δημιουργία του διαιρούμενου καλουπιού στο Autodesk Inventor. Το ολοκληρωμένο διαιρούμενο πλέον καλούπι χωρίζεται εγκάρσια σε τρία μέρη, δυο των 525mm και ένα των 450mm. Δεδομένων των ωφέλιμων διαστάσεων κατεργασίας της CNC μηχανής VF1 η τριχοτόμηση του προς κατασκευή καλουπιού πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να δύναται η κατεργασία των τεμαχίων στον περιορισμένο χώρο της μηχανής, όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 5. Αυτή η διαδικασία θα επιτρέψει τη μορφοποίηση των έξι συνολικά κομματιών που προκύπτουν στη CNC και η τελική σύνδεσή τους θα οδηγήσει στο τελικό διαιρούμενο καλούπι του πτερυγίου. Τα 6 συνολικά τεμάχια που προέκυψαν παρουσιάζονται στην εικόνα 40.

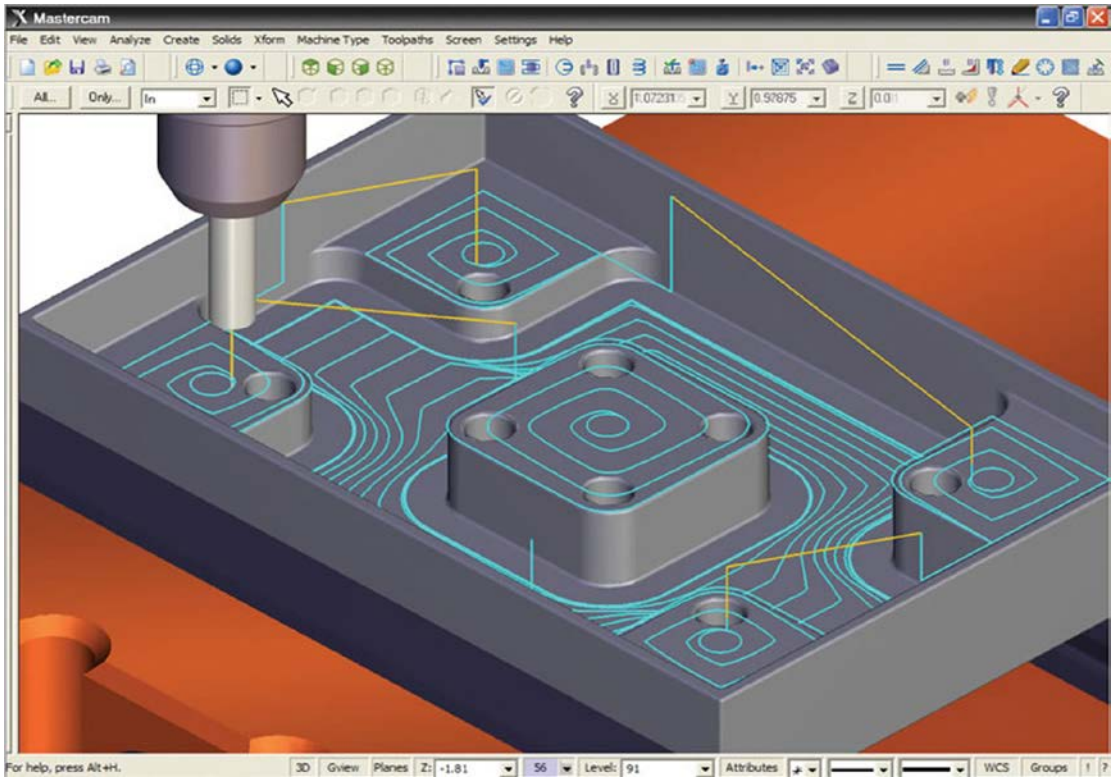


Εικόνα 40. Τα 6 τμήματα του άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) διαιρούμενου καλουπιού

4. CAM ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΓΕΝΝΕΣΗ ΚΩΔΙΚΑ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΑΝΕΜΟΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

4.1 CAM MODELING

CAM (**C**omputer **A**ided **M**anufacturing) είναι τα λογισμικά (ή και οι μέθοδοι) που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προγραμμάτων κύκλων κατεργασίας (βλ. εικόνα 40) σε εργαλειομηχανές CNC όπως κέντρα κατεργασίας, τόρνους, φρέζες, συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης κ.α. Σε περιπτώσεις που η γεωμετρία ενός σχεδίου, προς κατεργασία δεν είναι πολύπλοκη ο κώδικας ή πρόγραμμα (G code) εισάγεται στο μηχάνημα απευθείας, πληκτρολογώντας στον πίνακα ελέγχου του μηχανήματος τις κατάλληλες εντολές [8]. 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.



Εικόνα 41. Κύκλος κατεργασίας σε εικονικό περιβάλλον CAM [10]

Τα συστήματα λογισμικού που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών, μητρών και γενικότερα σύνθετων γεωμετρικών στοιχείων πρέπει να ανταποκρίνονται στις τρισδιάστατες κινήσεις όχι μόνο ως προς την κατεργασία (φρεζάρισμα, τόρνευση, διάτρηση κλπ) αλλά και ως προς την επιλογή του σωστού μοτίβου διαδρομής (path) με απώτερο στόχο το βέλτιστο χρόνο και την απαιτούμενη ποιότητα της επιφάνειας. Τα μοτίβα διαδρομών ή contour paths σε ένα τέτοιο πρόγραμμα είναι υπερβολικά πολλά και μαθηματικά περίπλοκα ώστε να γραφτούν από ένα χειριστή/προγραμματιστή εργαλειομηχανών. Τα λογισμικά CAM που η λειτουργία τους βασίζεται στην εισαγωγή δεδομένων, επιτρέπουν στον προγραμματιστή να εισάγει τη γνώση του σχετικά με τα εργαλεία, τη διαδικασία και τις υπόλοιπες παραμέτρους κοπής που αφορούν θεμελιώδη μηχανολογικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε το λογισμικό να μπορεί να αναγνωρίσει τα χαρακτηριστικά αυτά και στο μέλλον και να τα ανατρέξει αυτόματα εξοικονομώντας έτσι πολύτιμο χρόνο και χρήμα. Ο προγραμματιστής CNC εργαλειομηχανών πρέπει να επιβεβαιώσει ότι ένα σχέδιο CAD είναι ορθό και πλήρες, ώστε να επιλέξει τις βασικές παραμέτρους όπως εργαλεία κοπής, ταχύτητες κοπής – προώσεις, για να προχωρήσει στον προγραμματισμό του λογισμικού CAM. Με τη βοήθεια των λογισμικών CAM μπορούν επίσης να αναπτυχθούν συστήματα ελέγχου για ολοκληρωμένη παραγωγή με βήματα σχεδιασμού, διαχείρισης, μεταφοράς και αποθήκευσης τεμαχίων.

4.2 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- processor) 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.

Η διαδικασία τροποποίησης εξαρτάται από τον τύπο του προ- μετά- επεξεργαστή και τη μορφή αρχείων που αυτός λαμβάνει (format). Μικρές αλλαγές στον προ- μετά- επεξεργαστή μπορούν να ληφθούν σε μερικά μόνο λεπτά, ενώ οι μεγάλες μπορούν να διαρκέσουν ακόμη και ημέρες. Η επιτυχημένη τροποποίηση τους για χρήση με συγκεκριμένη εργαλειομηχανή, μπορεί να απαιτεί ακόμα και μια σειρά δοκιμών μεταφοράς συγκεκριμένων εντολών ή και προγραμμάτων CAM για υλοποίηση προς την εργαλειομηχανή. Ο προγραμματιστής μηχανών CNC είναι αναγκαίο να γνωρίζει τα συστήματα ελέγχου των μηχανών που χειρίζεται σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό. Μια βαθειά και μεγάλης κλίμακας γνώση πάνω σε μη-αυτοματοποιημένες μεθόδους προγραμματισμού είναι πολύ βασική και συνήθως επιβάλλεται. Επιπλέον, η γνώση της μηχανουργικής τεχνολογίας είναι πολύ βασική και αναγκαία. Επίσης η γνώση μιας γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου μπορεί να βοηθήσει το συντάκτη του μετά-επεξεργαστή να αναπτύξει έναν αποδοτικότερο και πιο αξιόπιστο μετά-επεξεργαστή.

4.3 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MASTERCAM

Το λογισμικό CAM που χρησιμοποιήθηκε για την υλοπίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι το MASTERCAM [10], της εταιρίας CNC Software, Inc. Το MASTERCAM είναι ένα CAD/CAM λογισμικό το οποίο επιτρέπει την δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και την εξαγωγή προγραμμάτων κατεργασίας για CNC εργαλειομηχανές σε G κώδικα. Θεωρείται κυρίαρχο λογισμικό δημιουργίας κατεργασιών κοπής, ικανό για αποδοτικό στον προγραμματισμό εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC).

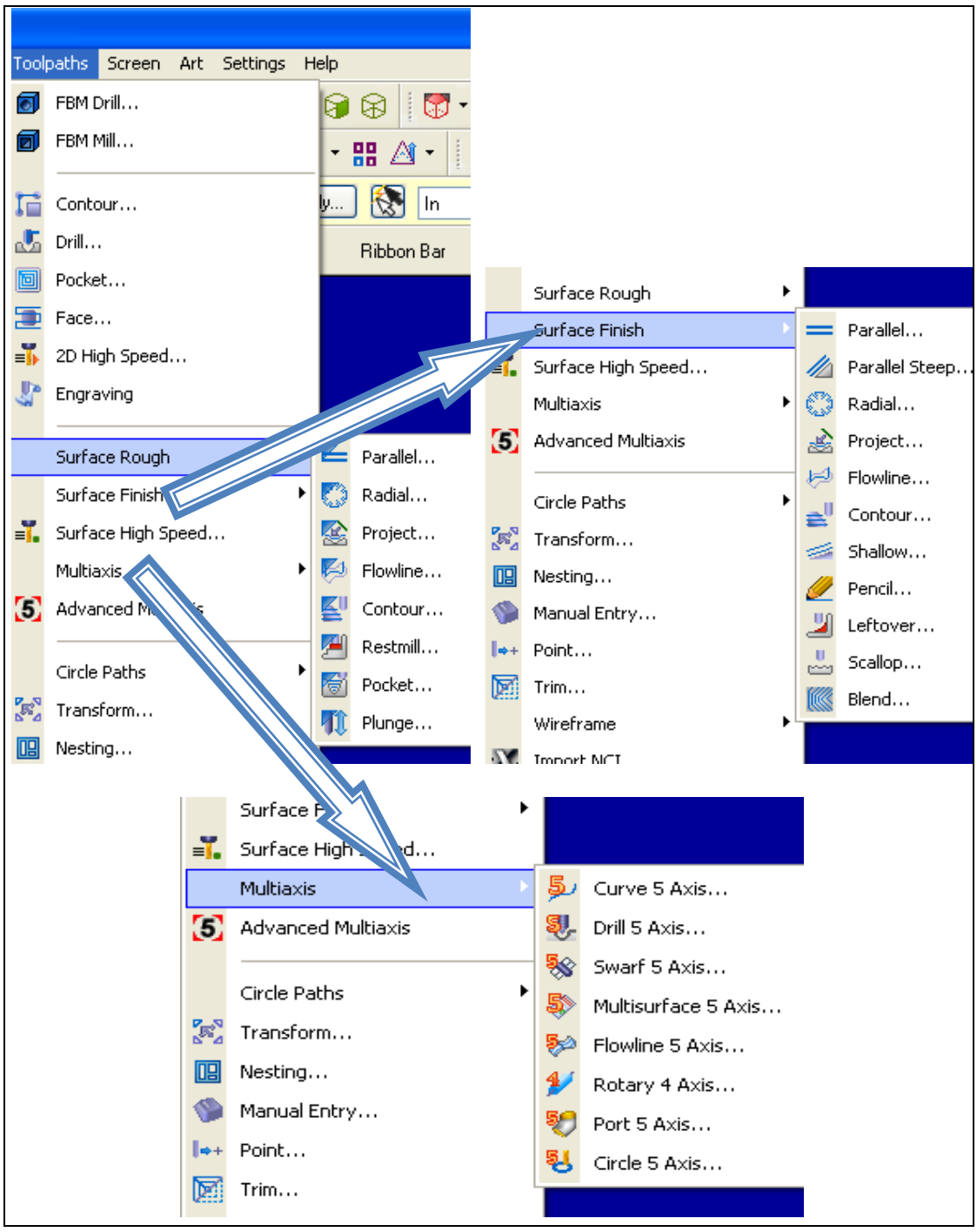
Για την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο το κομμάτι του CAM μιας και το μοντέλο σχεδιάστηκε στο 3D CAD πρόγραμμα της Autodesk, Inventor PRO. Το MASTERCAM παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής αρχείων διαφόρων τύπων όπως .mc, .igs, .dwg, .stp, .ipt, .stl και .prt. Οι βασικές κατεργασίες όπου μπορούν να διεξαχθούν στο MASTERCAM περιλαμβάνουν:

- Κατεργασίες 3, 4 και 5 αξόνων σε οριζόντιο και κάθετο κέντρο κατεργασίας, ταυτόχρονων κινήσεων και ενός δεσίματος.
- Κατεργασίες τόρνου με δυνατότητα χρήσης περιστρεφόμενων εργαλείων.
- Κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (wire EDM).
- Ρούτερ σταθερής ή κινητής γέφυρας 2, 3, 4 και 5 αξόνων, είτε πολατρακτικά.

Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα γραφικής δυναμικής απεικόνισης της κατεργασίας και εναπομένοντος υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας με ισχυρό γραφικό περιβάλλον απεικόνισης (graphic simulation). Στην παρούσα πτυχιακή εργασία επιλέχτηκε η κατεργασία φρεζαρίσματος 3 αξόνων. Οι βασικές κατηγορίες και τα είδη φρεζαρίσματος (toolpaths) του MASTERCAM είναι οι (βλ. εικόνα 42):

- *Surface rough* (ξεχόνδρισμα) με υποκατηγορίες: *Parallel, Radial, Project, Flowline, Contour, Restmill, Pocket* και *Plunge.*
- *Surface finish* (φινίρισμα) με υποκατηγορίες: *Parallel, Parallel Steep, Radial, Project, Flowline, Contour, Shallow, Pencil, Leftover, Scallop και Blend.*

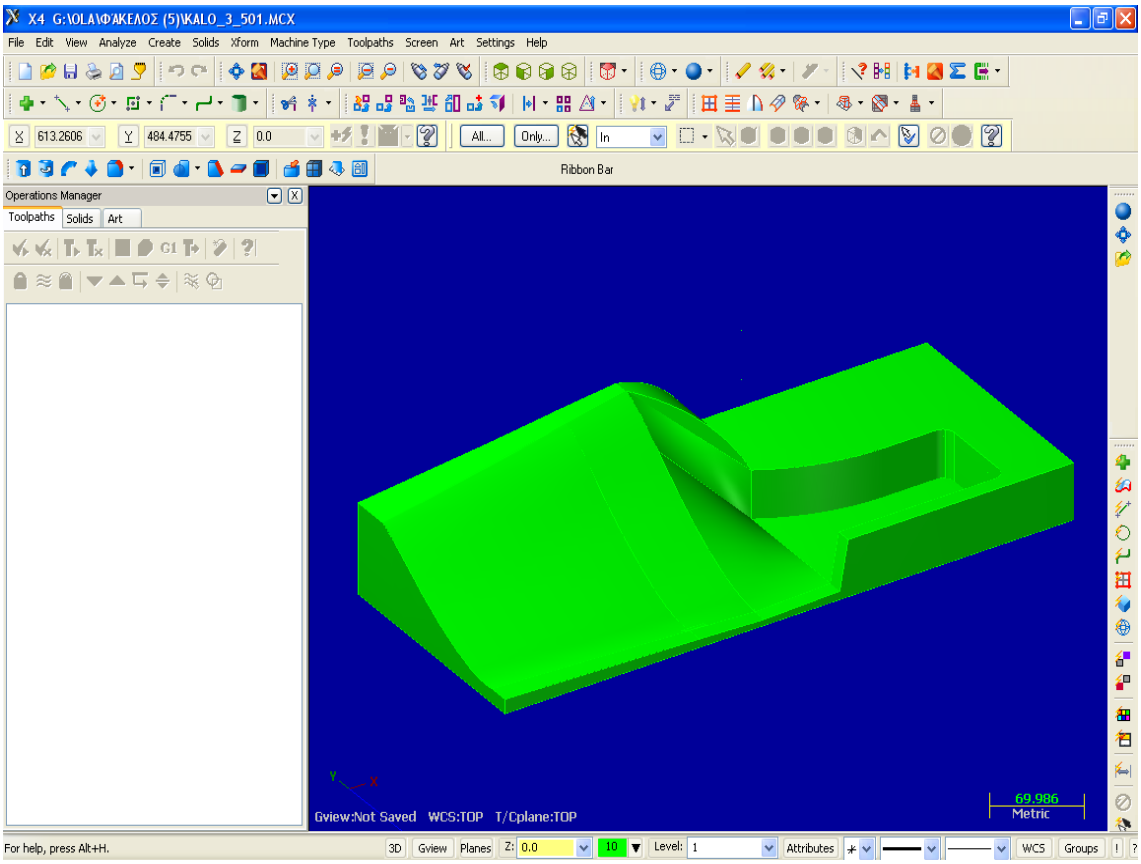
- *Surface High Speed* (κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων κοπής)
- *Multiaxis* (Πολυαξονικά 4 και 5 αξόνων) με υποκατηγορίες: *Curve 5 axis, drill 5 axis, swarf 5 axis, multisurface 5 axis, flowline 5 axis, rotary 4 axis, port 5 axis, circle 5 axis.*



Εικόνα 42. Βασικές κατηγορίες και τα είδη φρεζαρίσματος (toolpaths)

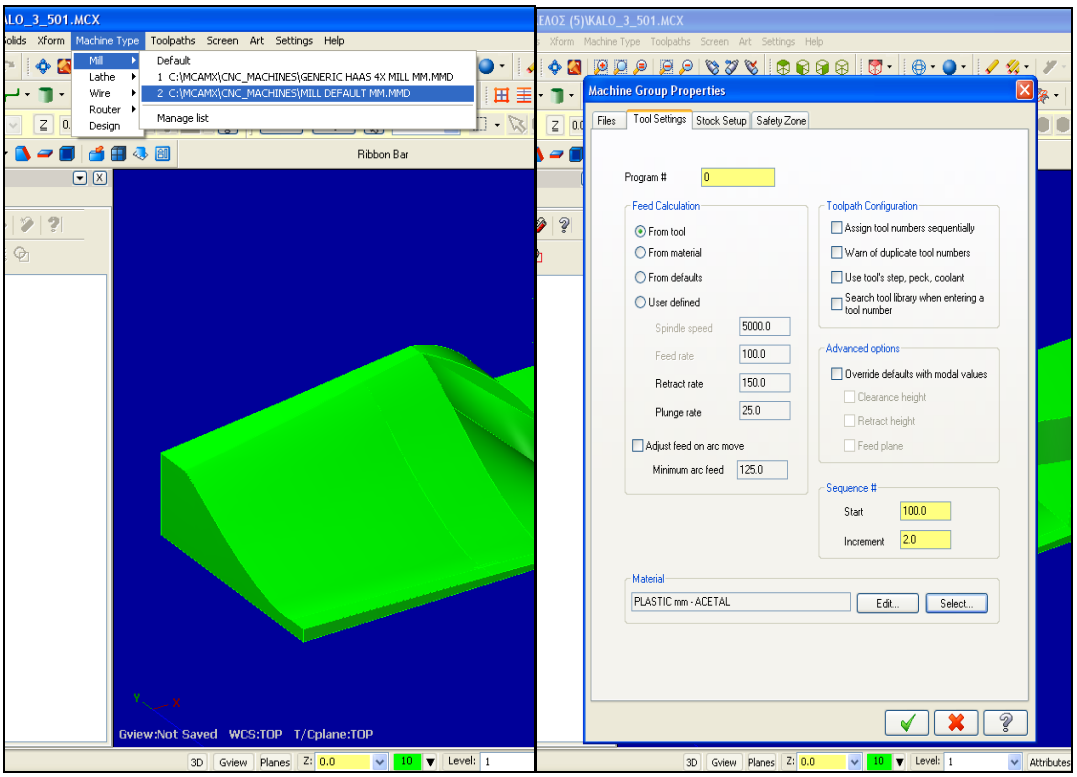
4.4 CAM ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Η διαδικασία προγραμματισμού κατεργασιών και προσομοίωσης ξεκίνησε με την εισαγωγή του πρώτου από τα έξι CAD αρχεία μορφής .ipt που κατασκευάστηκαν στο Inventor, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 43.



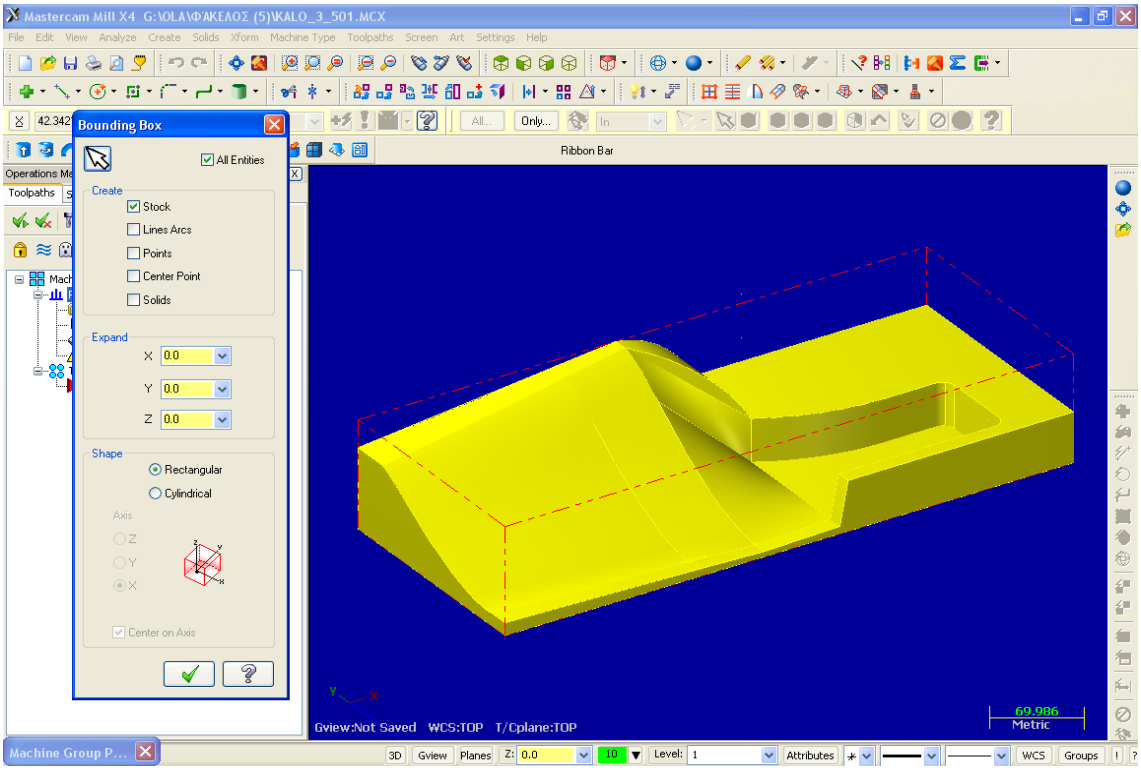
Εικόνα 43. Εισαγωγή CAD part στο MasterCam

Ακολουθεί η επιλογή του τύπου μηχανήματος στο οποίο έγινε η κατεργασία (εικόνα 43). ***{Machine Type→Mill→C:\MCAMX\CNC_MACHINES\MILL DEFAULT MM.MMD}***. Στον πίνακα *Operation Manager* παρουσιάζεται το *Machine Group1* με τις ιδιότητες του μηχανήματος (*Properties*) το οποίο ανάγεται στα *Files* που περιέχει διευθύνσεις αρχείων όπου θα αποθηκευτούν τα δεδομένα. Στα *Tool settings* μπορεί να προεπιλεγεί σαν βασική αρχή υπολογισμού ταχυτήτων κοπής και προώσεων το υλικό προς κατεργασία από βάση δεδομένων του ίδιου του προγράμματος ή το κοπτικό εργαλείο, όπως βλέπουμε στην παράμετρο *material* της εικόνας 44.



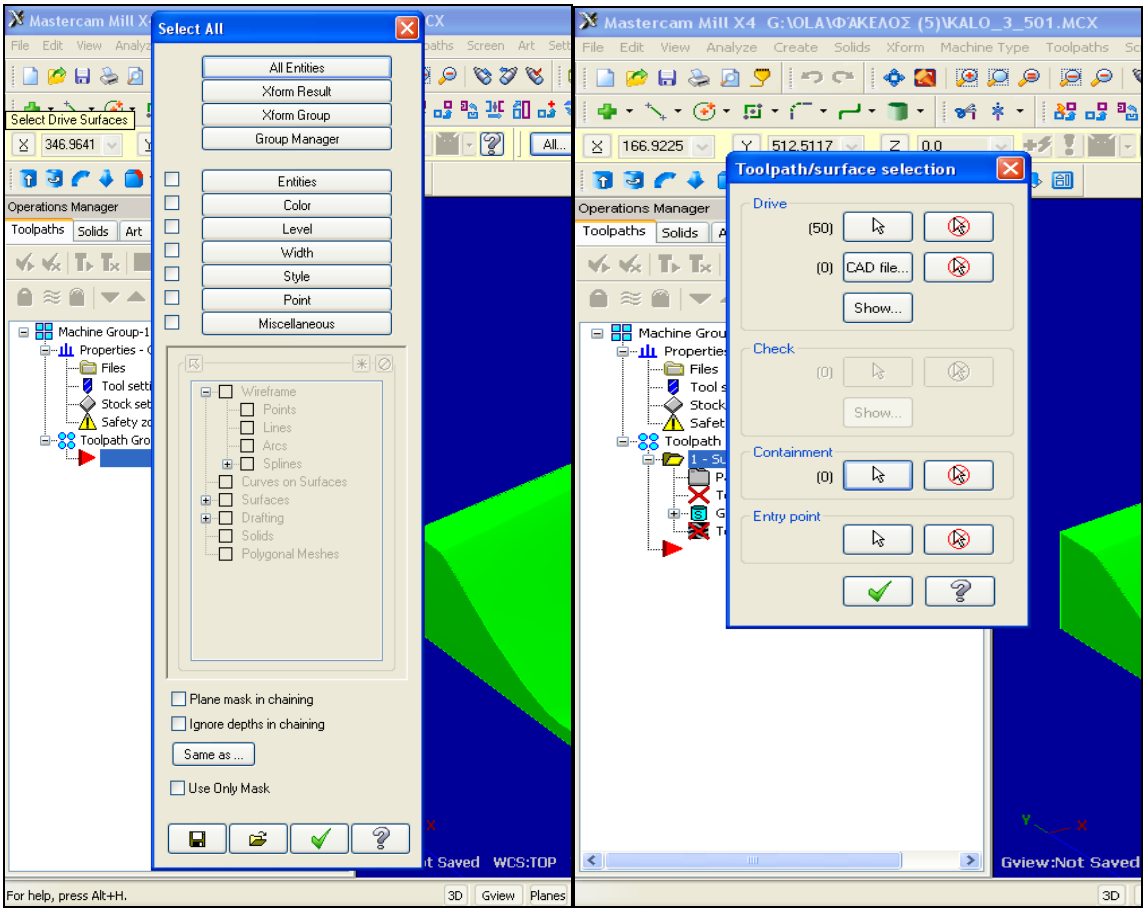
Εικόνα 44. Επιλογή Εργαλειομηχανής (αριστερά) και παραμέτρου υλικού(δεξιά)

Ακολουθεί η επιλογή του *Bounding Box* όπου ορίζεται το μέγεθος και το σχήμα του πρωταρχικού ακατέργαστου δοκιμίου (Ά-ύλη), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 45. Τέλος ορίζεται το *Safety zone* δίδεται μια ζώνη ασφαλείας γύρω από το κατεργαζόμενο τεμάχιο είτε ορθογώνιας, είτε σφαιρικής, είτε κυλινδρικής μορφής με τις επιθυμητές διαστάσεις, με σκοπό την αποφυγή προσκρούσεων της ατράκτου π.χ. με κάποιο σύστημα συγκράτησης και γίνεται η μετάβαση στις διαδικασίες ορισμού των κατεργασιών.



Εικόνα 45. Καθορισμός του Bounding Box

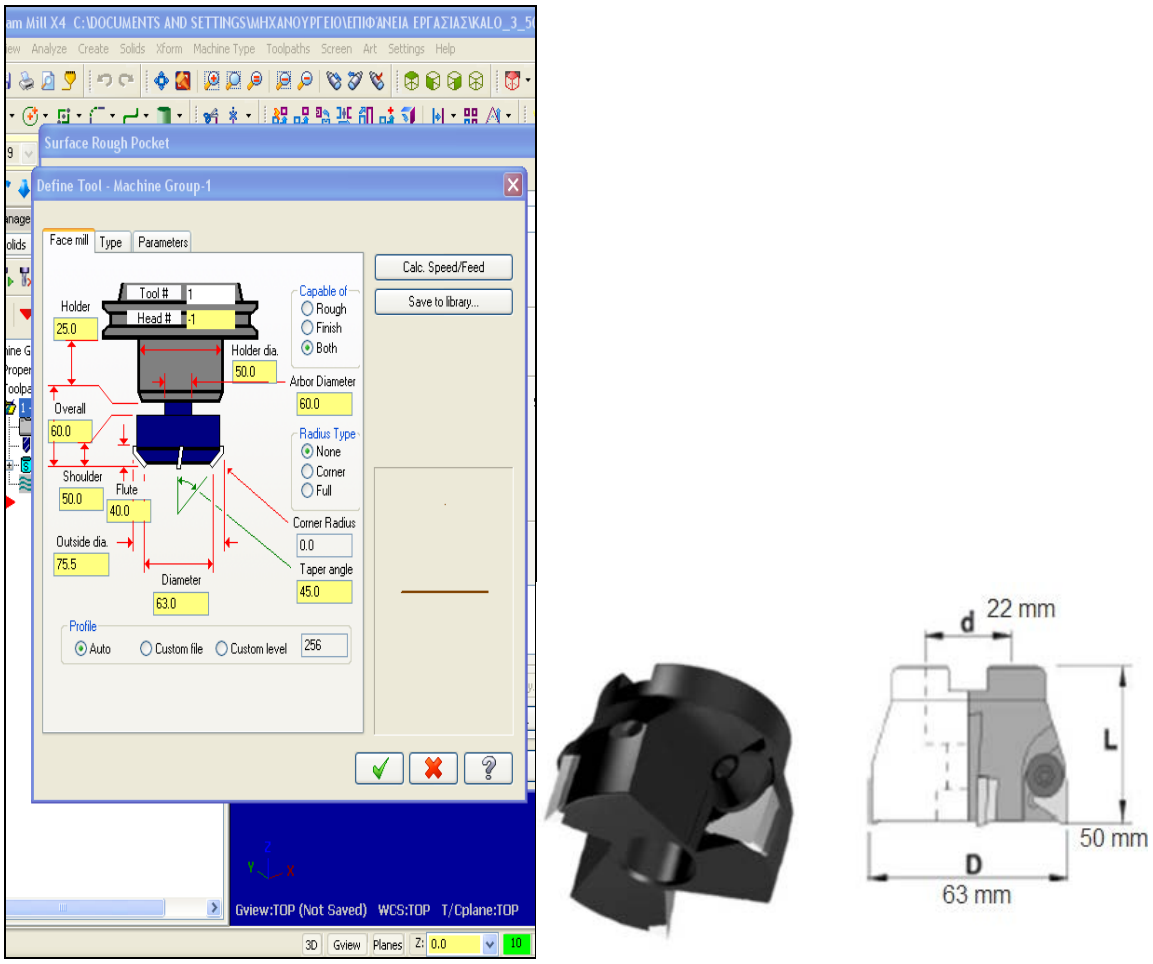
Το πρώτο είδος κατεργασίας που επιλέχτηκε για το ξεχόνδρισμα είναι Surface Rough Pocket. Επιλέγεται η επιφάνεια καθοδήγησης (*Drive Surface*), δηλαδή η επιφάνεια που θα κατεργαστεί το κοπτικό εργαλείο. Από την μπάρα εργασίας γίνεται η επιλογή *All* και *All Entities* και ακολούθως *End Selection* ( ) με τη βοήθεια της οποίας καθορίζεται η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου και λόγω του σχήματος, προτιμάται η επιλογή *Containment.*



Εικόνα 46. Επιλογή της *Drive Surface*

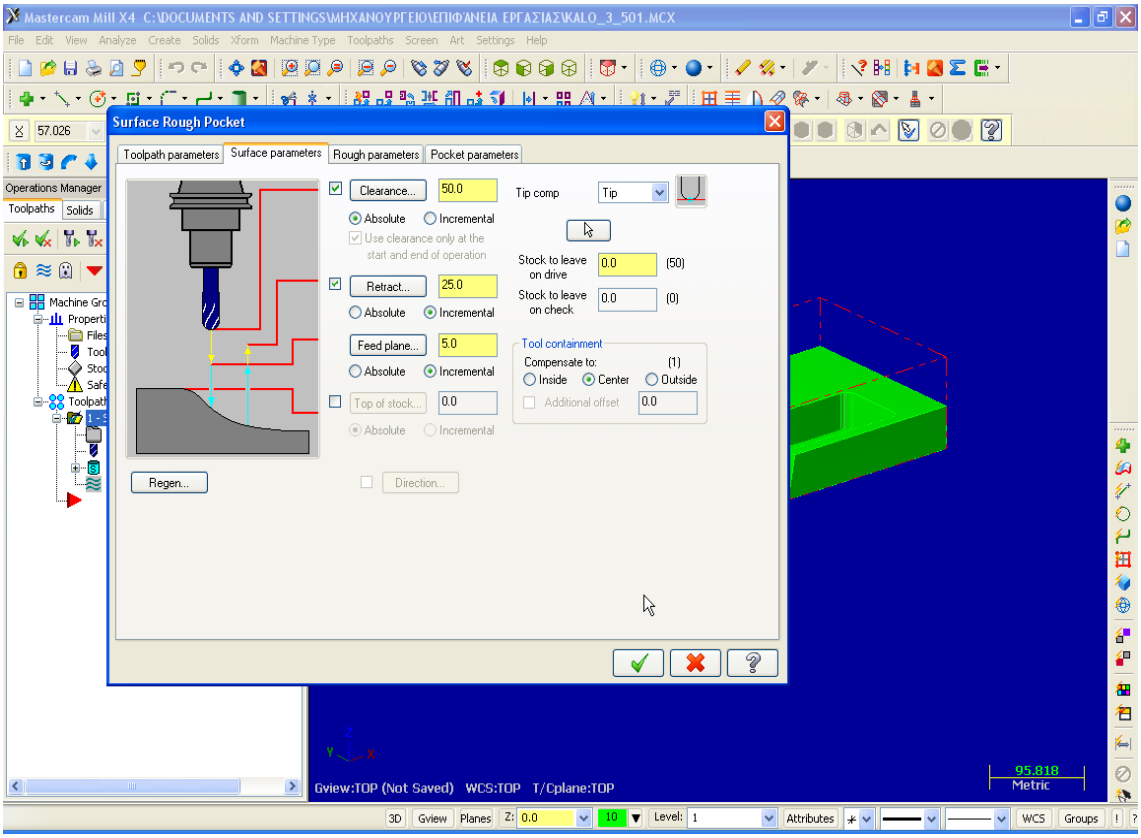
Με την βοήθεια του μενού *Chaining* δημιουργείται περιμετρικά του τεμαχίου η πορεία που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο.

Η πρώτη υποκατηγορία του Surface Rough Pocket είναι η *Toolpath Parameter* όπου σε αυτήν επιλέγεται το κοπτικό εργαλείο είτε από βάση δεδομένων είτε από σχεδιασμό πρωτοτύπου. Επίσης επιλέγονται οι διάφορες τιμές όπως προώσεις, ταχύτητες κοπής και φορά. Στην συγκεκριμένη κατεργασία, επιλέχθηκε φρεζοκεφαλή διαμέτρου (D) 63mm, τριών δοντιών και γωνίας 90 μοιρών (εικόνα 47). Λεπτομέρειες διαστάσεων του συνολικού μεγέθους του εργαλείου, συμπεριλαμβανομένου του κώνου στήριξης, καταχωρήθηκαν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευάστριας εταιρείας. Η επιλογή της γωνίας 90 μοιρών έγινε λόγω της μορφολογίας του κομματιού (εσωτερική κοιλότητα) όπου σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή γωνία μικρότερης των 90 μοιρών, θα προσέκρουε στο δοκίμιο.

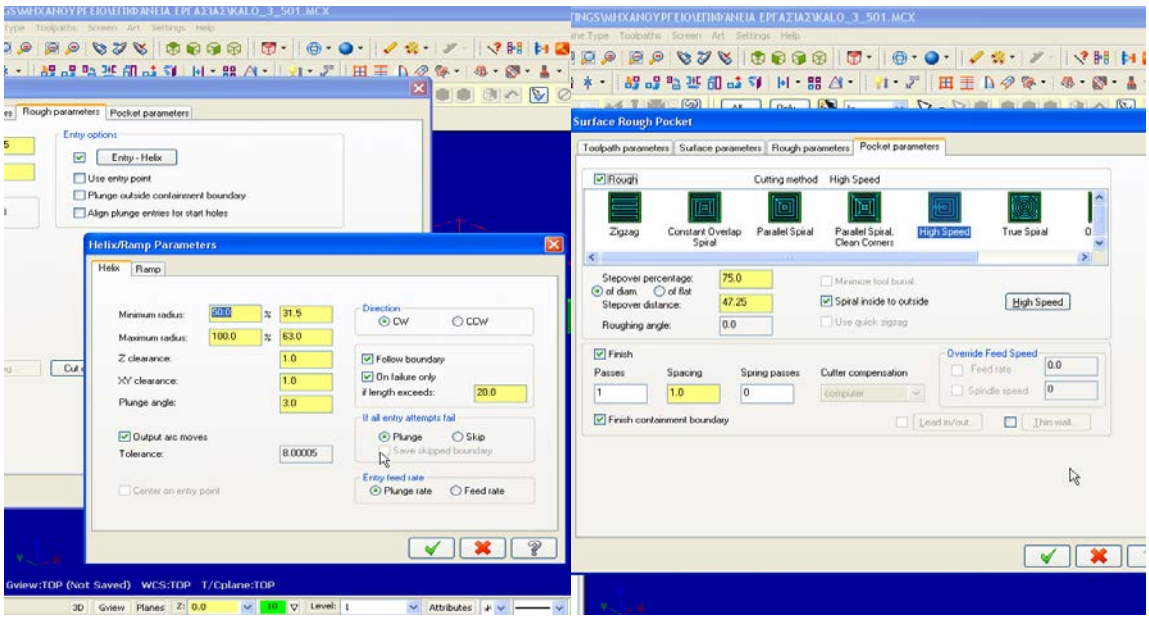


Εικόνα 47. Φρεζοκεφαλή και τεχνικά χαρακτηριστικά

Δεύτερη υποκατηγορία του Surface Rough Pocket είναι η *Surface Parameter* όπου επιλέγεται όριο ασφάλειας (*Clearance*) το οποίο καθορίζει το ύψος στο οποίο το εργαλείο κινείται από και προς το τεμάχιο . Επιλέχθηκε στα 50mm και δόθηκαν οι ρυθμίσεις ύψους επιστροφής (*Retract*) του εργαλείου από το ένα πέρασμα στο επόμενο. Επίσης καθορίστηκε η αντιστάθμιση, βάση της διαμέτρου του εργαλείου, δηλαδή ο τρόπος που θα κινείται το κοπτικό βάση της προκαθορισμένης διαδρομής, εσωτερικά, εξωτερικά ή στο κέντρο. Η τρίτη υποκατηγορία *Rough parameter* περιλαμβάνει την συνολική ακρίβεια (*Total tolerance*) η οποία ήταν προκαθορισμένη ήδη στα 0,025mm και το μέγιστο βάθος κοπής (*Maximum Stepdown*) το οποίο ορίστηκε στα 2mm. Επίσης, έγινε επιλογή μεταξύ ομόρροπου και αντίρροπου φρεζαρίσματος και επιλέχτηκε ο τρόπος εισαγωγής του εργαλείου στο τεμάχιο, για παράδειγμα αξονικά (κάθετα) ή ελικοειδής ή εισχώρηση με γωνία. Η τέταρτη υποκατηγορία *Pocket parameters* περιλαμβάνει επιλογές διαδρομής για τη συγκεκριμένη διαδικασία οι οποίες σε γενικές γραμμές έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις και εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό. Για την κατεργασία επιλέχτηκε η μέθοδος *High Speed*. Τέλος υπάρχει η επιλογή ρύθμισης του τελευταίου περάσματος της διαδικασίας για καλύτερο αποτέλεσμα (εικόνες 48 και 49).

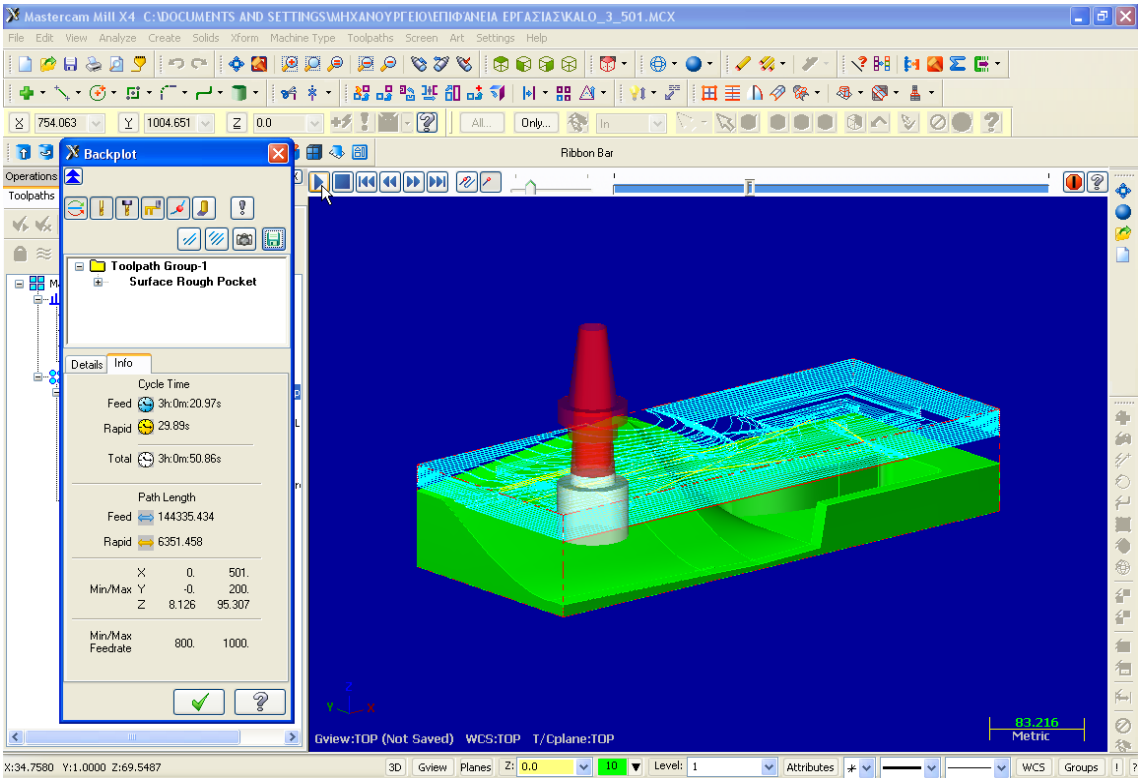


Εικόνα 48. Surface Rough Pocket. Καθορισμός παραμέτρων (υπό-μενού Surface Parameter)



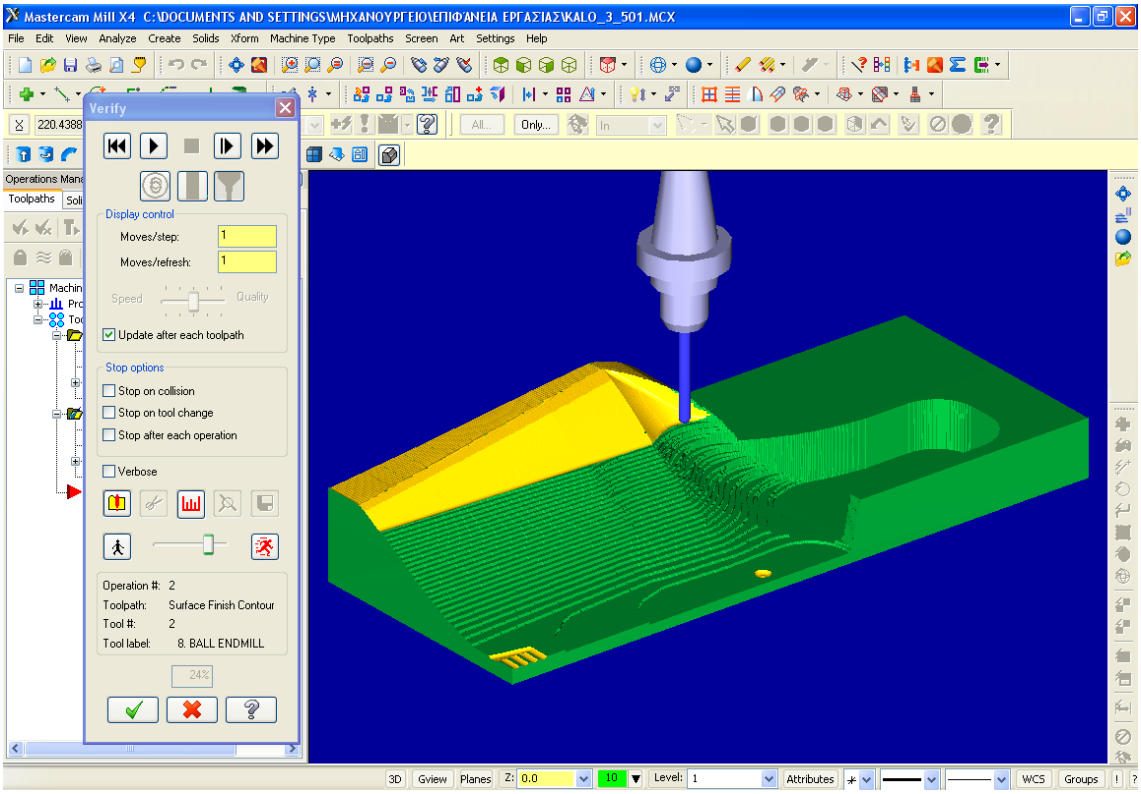
Εικόνα 49. Surface Rough Pocket. Καθορισμός παραμέτρων (υπό-μενού Rough parameter και Pocket parameters)

Ακολουθεί η προσομοίωση της διαδρομής του κοπτικού εργαλείου με τα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 50, προκειμένου να υπάρχει μια ρεαλιστική εικόνα και να υπολογιστεί ο χρόνος κατεργασίας. Ο χρόνος που υπολογίζει το πρόγραμμα είναι ο καθαρός χρόνος της κάθε κατεργασίας και όχι ο πραγματικός συνολικός χρόνος. Τέλος, επιλέχθηκε η εντολή *Verify Operation* η οποία προσομοιώνει τον κύκλο κατεργασίας του αρχικού δοκιμίου και αφού ολοκληρωθεί αποθηκεύεται σαν ξεχωριστό αρχείο στο οποίο θα βασιστεί η κατεργασία που θα ακολουθήσει.

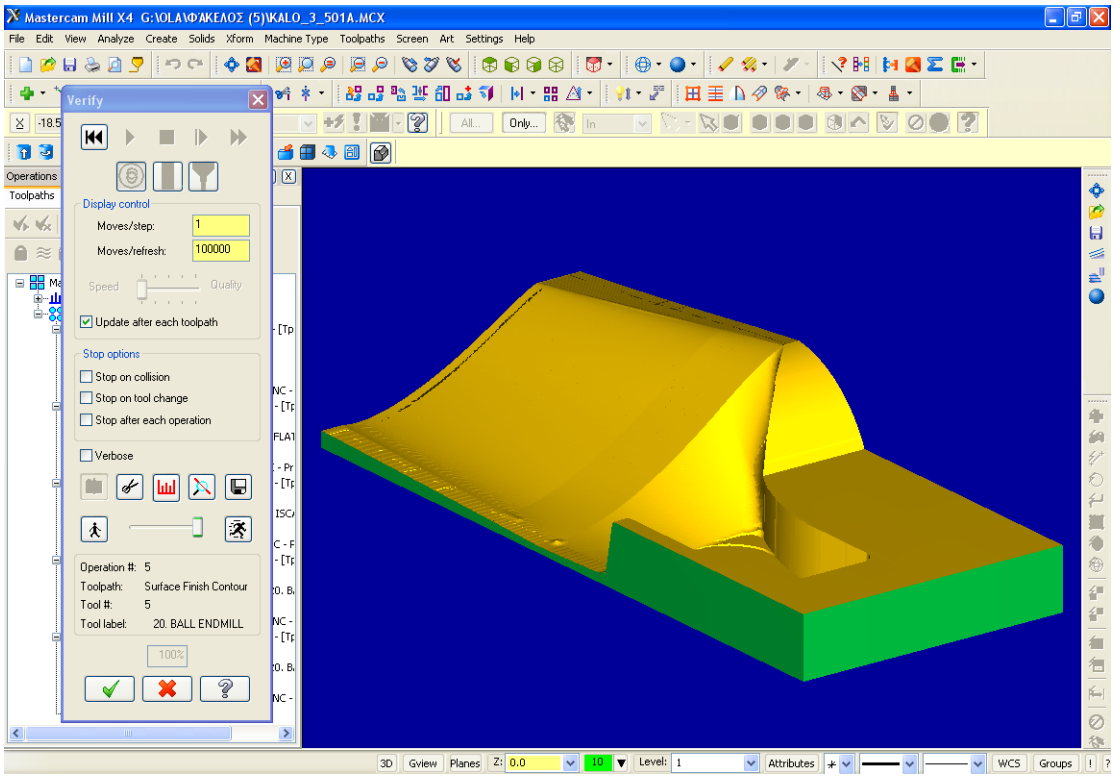


Εικόνα 50. Προσομοίωση διαδρομής κατεργασίας αφαίρεσης υλικού

Ακολούθησε η κατεργασία *Surface Finish Contour* και υλοποιήθηκαν τα ίδια με τα παραπάνω βήματα με σκοπό το φινίρισμα του δοκιμίου. Σημαντική διαφορά σε αυτό το είδος κατεργασίας, είναι ο τύπος του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε. Λόγω της ιδιομορφίας του τεμαχίου, επιλέχτηκε κονδύλι σφαιρικής απόληξης (Ball endmill) για την αποπεράτωση του φινιρίσματος. Για να επαναληφθεί ο κύκλος κατεργασίας με την εντολή *Verify* και να εμφανιστεί το δοκίμιο στην τελευταία του μορφή, δηλαδή μετά το ξεχόνδρισμα, πληκτρολογήθηκε η εντολή *Options*. Επιλέχθηκε η μορφή εισαγωγής (*File*) με την ονομασία *KALO_3_501* στο οποίο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία του φινιρίσματος. Το αποτέλεσμα αυτής παρουσιάζεται στην εικόνα 52 που ακολουθεί.

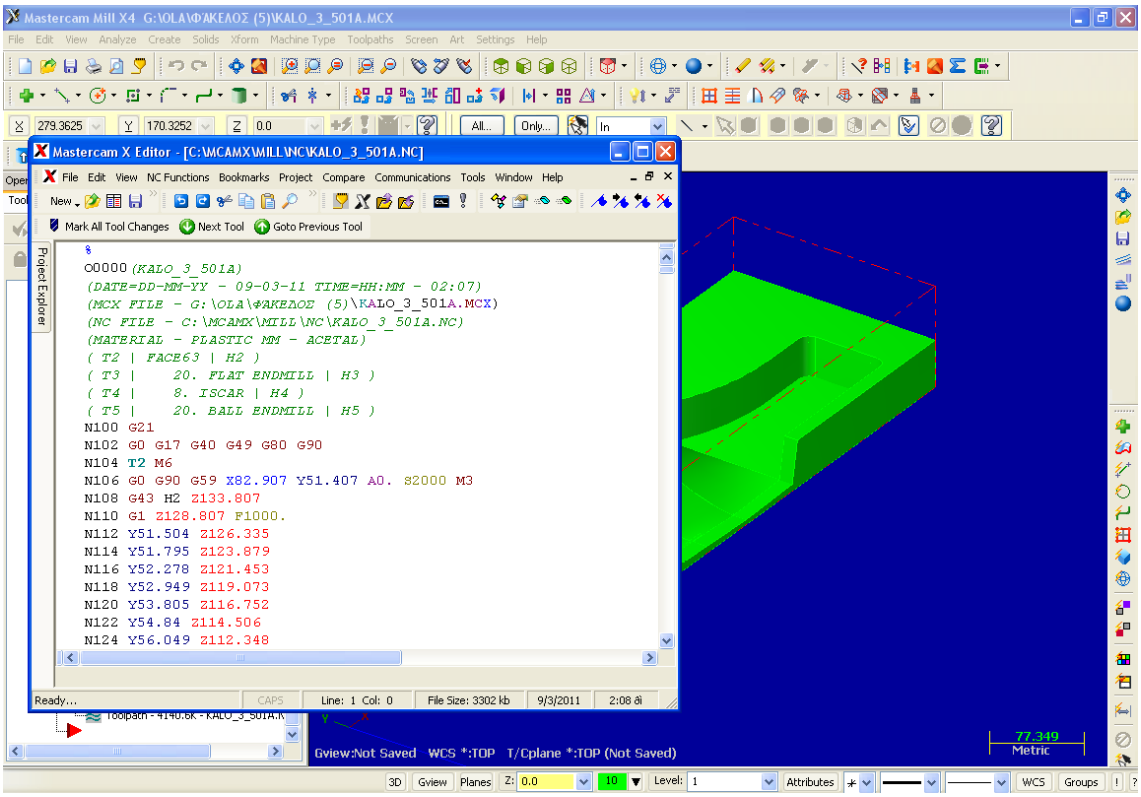


Εικόνα 51. Προσομοίωση κατεργασίας φινιρίσματος



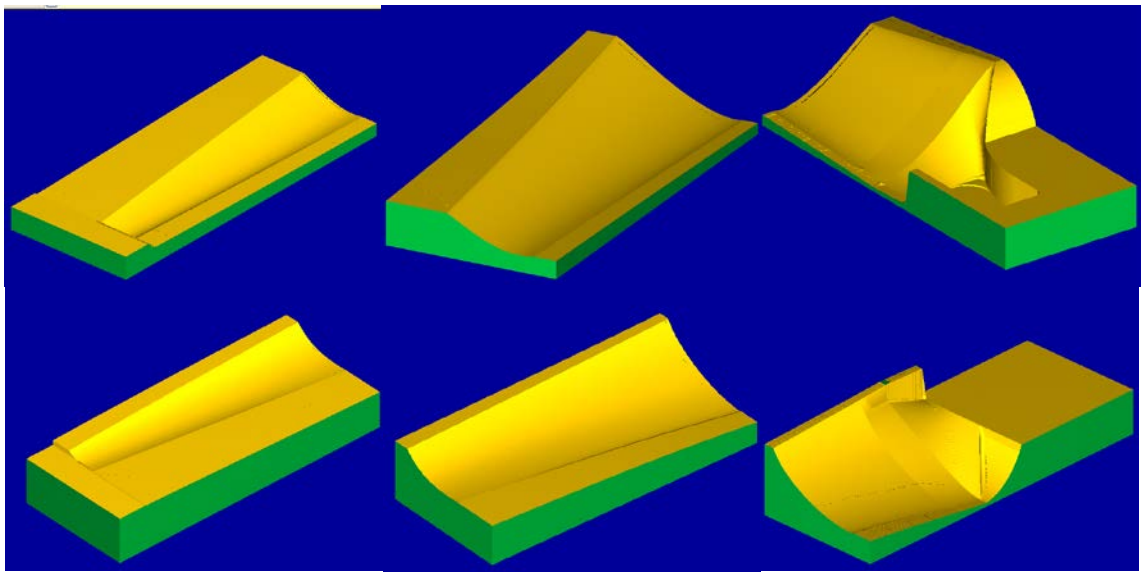
Εικόνα 52. Εικονική παρουσίαση του φινιρισμένου δοκιμίου

Ολοκληρώνοντας τους κύκλους κατεργασίας και φθάνοντας στο επιθυμητό αποτέλεσμα, επιλέγεται η εντολή *Post processing* ***G1*** για την δημιουργία του *.nc αρχείου που αποθηκεύεται ο G κώδικας για να εισαχθεί στη CNC εργαλειομηχανή VF1, όπως διακρίνεται στην εικόνα 53.



Εικόνα 53. Εξαγωγή του G-κώδικα

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω αναλυτικά για το ένα από τα έξι τεμάχια, δημιουργήθηκαν και τα υπόλοιπα πέντε δοκίμια του καλουπιού όπως και παρουσιάζονται στην εικόνα 54.



Εικόνα 54. Τα έξι εικονικά κατεργασμένα τεμάχια του καλουπιού στο MasterCAM

5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΗ CNC ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ HAAS-VF1

5.1 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΕΣ

Εργαλειομηχανές ονομάζονται οι μηχανές εκείνες, που χρησιμοποιούνται με την ευρεία έννοια του όρου, ως «εργαλεία» για την κατασκευή κάθε φύσεως μηχανημάτων και συσκευών. Αυτό το επιτυγχάνουν με την αναγκαία διαμόρφωση και επεξεργασία κατάλληλων υλικών και κυρίως μετάλλων. Κύριοι αντιπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι το δράπανο, ο τόρνος, η φρέζα και ο λειαντικός τροχός.



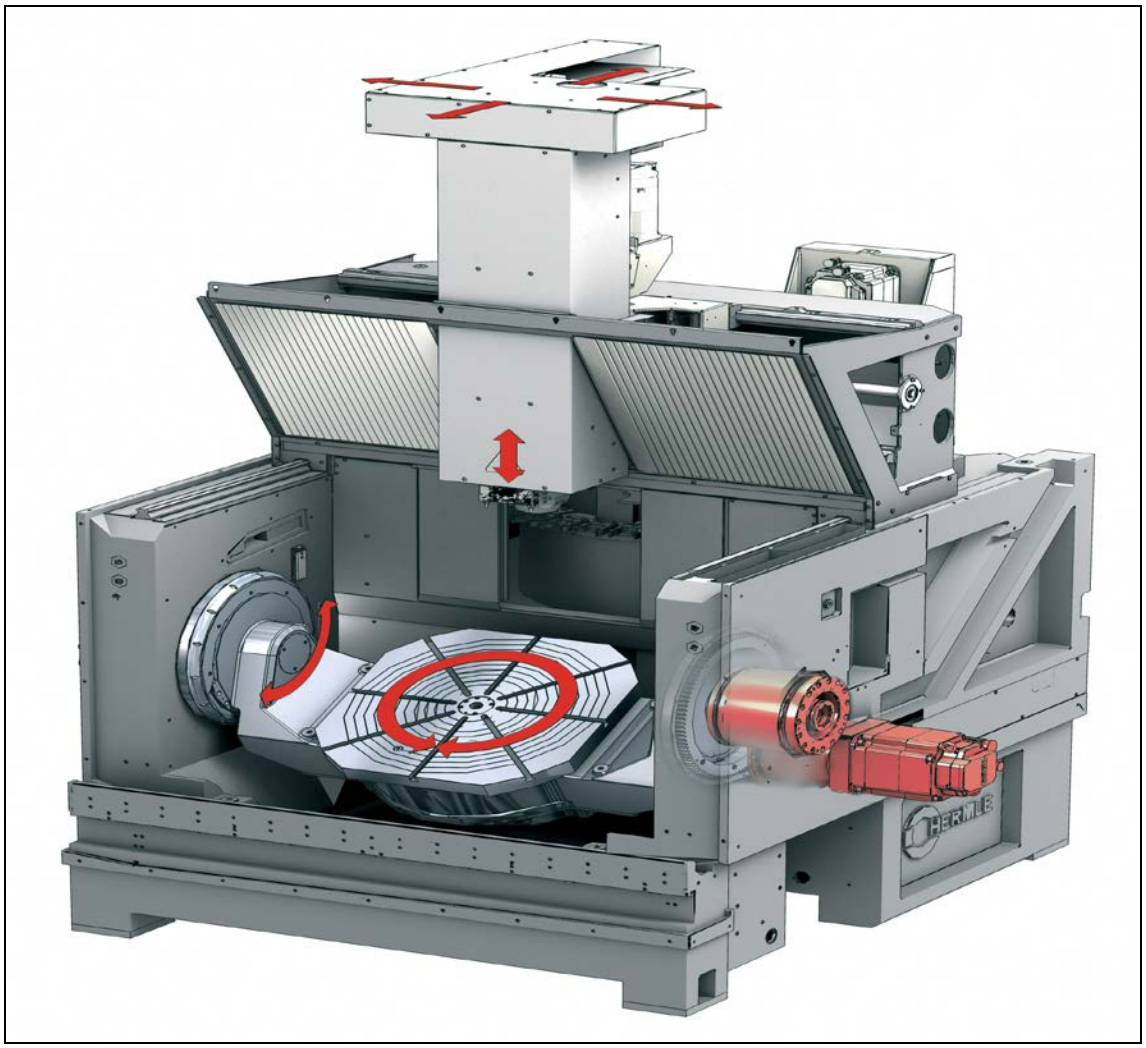
Εικόνα 55. Βασικοί τύποι εργαλειομηχανών

Το 1949 η αεροπορία των ΗΠΑ ανέθεσε στο εργαστήριο σέρβο-μηχανισμών στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας στη Μασαχουσέτης να αναπτύξει ένα εφαρμόσιμο NC σύστημα. Μέχρι το 1957 οι πρώτες πετυχημένες εγκαταστάσεις NC χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή όμως πολλοί χρήστες αντιμετώπιζαν δυσκολίες στο να παράγουν τμηματικά προγράμματα για εισαγωγή στο μηχανικό ελεγκτή. Για να αντιμετωπίσει την κατάσταση το Ινστιτούτο Τεχνολογίας, ξεκίνησε την ανάπτυξη τμηματικής γλώσσας προγραμματισμού, βασισμένη στους Η/Υ με την ονομασία APT (αυτόματος προγραμματισμός εργαλείων). Ο σκοπός ήταν να επινοήσουν μια συμβολική γλώσσα που θα καθιστούσε τον προγραμματιστή τμημάτων ικανό να συγκεκριμενοποιήσει μαθηματικές σχέσεις. Ένα χαρακτηριστικό κομμάτι που κατασκευάστηκε με την τεχνολογία εκείνης της εποχής είναι ένα τασάκι, που μοιράστηκε σε όλους τους παρευρισκόμενους στα πλαίσια επίδειξης της APT που έκανε το Εργαστήριο Σερβομηχανισμών του MIT το 1959. Το 1962 το πρώτο σύστημα προγραμματισμού APT δόθηκε για γενικές βιομηχανικές εφαρμογές. Η έννοια Αριθμητικός Έλεγχος (Numerical Control ή NC) είναι ταυτόσημος με τις μηχανουργικές κατεργασίες και τις εργαλειομηχανές. Ο αριθμητικός έλεγχος δίνει την δυνατότητα της επικοινωνίας εργαλειομηχανής – χειρίστη μέσω ενός κώδικα αριθμών και γραμμάτων. Ο κώδικας αυτός αντικαθιστά επιμέρους εργασίες του χειρίστη, οι οποίες εκτελούνται αυτόματα με τη δυνατότητα μεγαλύτερης ακριβείας και συνεχόμενων επαναλήψεων. Υπεύθυνη αυτών των λειτουργιών είναι η μονάδα έλεγχου της εργαλειομηχανής (Machine Control Unit, MCU). Η ονομασία αυτών των εργαλειομηχανών είναι: Ψηφιακά Καθοδηγούμενες

Εργαλειομηχανές-NC. Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας, οι εργαλειομηχανές τύπου NC περιλαμβάνουν ηλεκτρονικούς υπολογιστές και ονομάζονται Ψηφιακά Καθοδηγούμενες Εργαλειομηχανές με Η/Υ (Computer Numerical Control ή CNC). Αυτό έχει σαν πλεονέκτημα την μεγαλύτερη αυτοματοποίηση, τη δυνατότητα συνεργασίας με συστήματα σχεδίασης (CAD) και συστήματα κατεργασιών (CAM), όπως επίσης με ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (Computer Integrated Manufacturing) και ευέλικτα συστήματα παραγωγής (Flexible Manufacturing Systems). Οι εργαλειομηχανές ονοματίζονται και με βάση τους άξονες κατεργασίας που διαθέτουν. Για παράδειγμα, μια φρέζα που εκτελεί κίνηση ταυτόχρονα στους δυο άξονες του τραπεζιού της (X,Y) και όχι στον κατακόρυφο άξονα της ατράκτου (Z) τότε ονομάζεται, φρέζα 2 ½ αξόνων. Εάν υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης κατακόρυφης κίνησης, τότε η φρέζα ονομάζεται 3 αξόνων. Τέλος, ανάλογα με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής (περιστροφή τραπεζιού, ύπαρξη διαιρέτη, μετατόπιση προβοσκίδας) μπορεί μια φρέζα να ονομαστεί 4, 5 ή 6 αξόνων, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 56. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι φρέζες είναι 3 αξόνων ή 4 με την χρήση διαιρέτη. Εργαλειομηχανές με ταυτόχρονη κίνηση άνω των 4 αξόνων, ονομάζονται κέντρα κατεργασίας.

Κατά κανόνα οι εργαλειομηχανές, σταθερές στη θέση λειτουργίας τους, επεξεργάζονται και αποδίδουν στο παραγόμενο προϊόν την επιθυμητή μορφή και μέγεθος, είτε με διαμόρφωση είτε με αφαίρεση του πλεονάζων υλικού. Γεγονός αποτελεί ότι οι παραγωγικές δυνατότητες των συμβατικών εργαλειομηχανών περιορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του χειριστή τους. Η ποιότητα εργασίας και η παραγωγικότητα, είναι παράμετρος που εξαρτάται από την εκπαίδευση και την εμπειρία του μηχανικού που αναλαμβάνει την εκάστοτε εργασία.

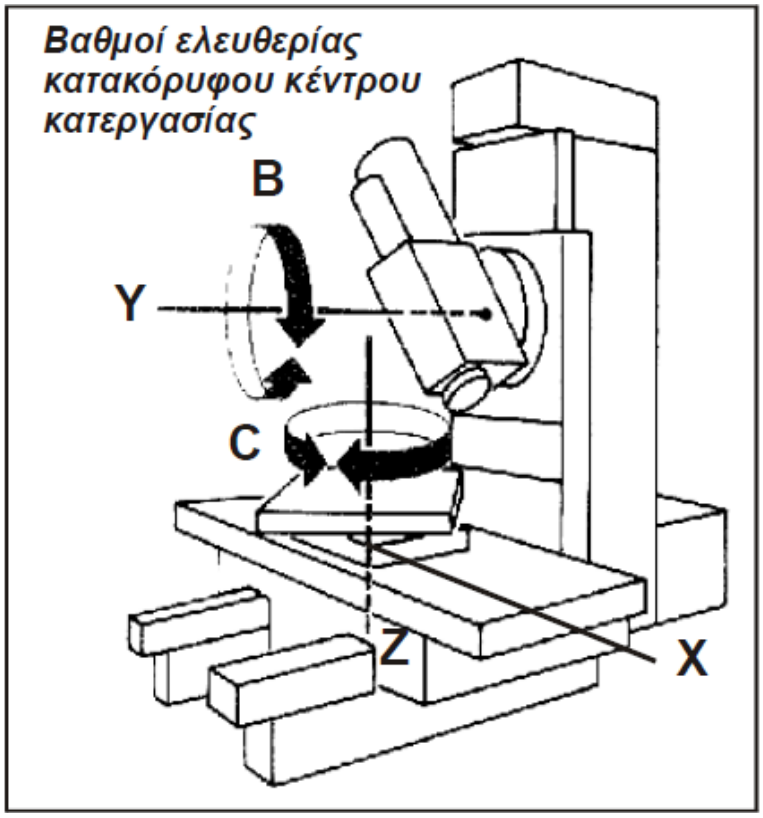
Τα πλεονεκτήματα των CNC εργαλειομηχανών είναι η παράγωγη τεμαχίων σύνθετης γεωμετρίας υψηλής ακρίβειας και ποιότητας μορφής, η αυτοματοποίηση και επαναληψιμότητα της κάθε κατεργασίας, η ελαχιστοποίηση νεκρών χρόνων, η ευκολία προγραμματισμού τους, η αύξηση της ασφάλειας εργασίας και κυρίως η αύξηση της παραγωγικότητας και της ποιότητας εργασίας. Μοναδικό μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος αγοράς και η ανάγκη εξειδικευμένου και εκπαιδευμένου προσωπικού.



Εικόνα 56. Εργαλειομηχανή πέντε αξόνων

5.2 ΦΡΕΖΑΡΙΣΜΑ ΜΕ ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗ

Στο φρεζάρισμα με ψηφιακή καθοδήγηση, οι βασικές κινήσεις είναι τρεις. Η κάθετη, η διαμήκης και η εγκάρσια. Οι κινήσεις αυτές μπορούν να εκτελεστούν ταυτόχρονα, ενώ σε μια συμβατική φρέζα, ο χειριστής θα πρέπει να τις ελέγχει κάθε μια ξεχωριστά. Στα κέντρα κατεργασίας έκτος των γραμμικών κινήσεων, είναι δυνατές και περιστροφικές κινήσεις. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο διαχωρισμός γραμμικών και περιστροφικών βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 57. Βαθμοί ελευθερίας σε CNC εργαλειομηχανή πέντε αξόνων

Ο κώδικας G ή προπαρασκευαστικός κώδικας είναι ουσιαστικά οι λειτουργίες της προγραμματιστικής γλώσσας του αριθμητικού ελέγχου -NC. Η G-εντολές είναι αυτές που προστάζουν το κάθε εργαλείο να κάνει την πραγματική κατεργασία και οι M-εντολές είναι αυτές που διαχειρίζονται τη μηχανή. Πέραν των G και M εντολών κώδικα τα προγράμματα ψηφιακής καθοδήγησης των CNC, περιλαμβάνουν και εντολές με χαρακτήρες εκκίνησης, όπως: T για Tool που ορίζει τον αριθμό του εργαλείου, το S για Speed, που ορίζει τις στροφές του εργαλείου και F για Feed που ορίζει την πρόωση του εργαλείου. Η γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου NC αποκαλείται ανεπίσημα G- κώδικας. Αλλά στην πραγματικότητα, G-κώδικες είναι μόνο ένα μέρος της γλώσσας προγραμματισμού NC που ελέγχει NC και CNC εργαλειομηχανές. Η σπουδαιότητα των G-εντολών σε σχέση με τις υπόλοιπες, εδραίωσε και τη γενική ονομασία G-Codes στα προγράμματα αριθμητικής καθοδήγησης. Η τυποποιημένη έκδοση που χρησιμοποιείται στις Ηνωμένες Πολιτείες διακανονίστηκε από την Electronic Industries Alliance στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και μία τελευταία αναθεώρηση εγκρίθηκε το Φεβρουάριο του 1980 ως RS274D, που στην Ευρώπη χρησιμοποιείται συχνά ως πρότυπο ISO 66025 DIN. Στους Πίνακες 5 και 6 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι G- και M- εντολές αντίστοιχα, καθώς και η περιγραφή τους.

G-code	Περιγραφή
G 00 ή G 0	Γρήγορη κίνηση (κίνηση με τη μέγιστη ταχύτητα της μηχανής)
G 01 ή G 1	Γραμμική κίνηση με ταχύτητα F, ορισμένη από τον χρήστη
G 02	Κυκλική κίνηση με ωρολογιακή φορά
G 03	Κυκλική κίνηση με αντιωρολογιακή φορά
G 04	Καθυστέρηση (DWELL) π.χ. G 4 P 3 = καθυστέρηση 3 sec
G 12	Κυκλικό pocket με ωρολογιακή φορά
G 13	Κυκλικό pocket με αντιωρολογιακή φορά
G 17	Επιλογή επιπέδου εργασίας XY
G 18	Επιλογή επιπέδου εργασίας XZ
G 19	Επιλογή επιπέδου εργασίας
G 20	Εργασία σε inches
G 21	Εργασία σε mm
G 28	Επιστροφή στο σημείο αναφοράς της μηχανής
G 40	Ακύρωση αντιστάθμισης ακτίνας εργαλείου
G 41	Αντιστάθμιση εργαλείου αριστερά (συντάσσεται με D)
G 42	Αντιστάθμιση εργαλείου δεξιά (συντάσσεται με D)
G 43	Αντιστάθμιση του μήκους του εργαλείου
G 47	Εγγραφή κειμένου
G 51	Scaling
G 50	Ακύρωση της G 51
G 52	Τοπικό σύστημα συντεταγμένων
G 54 – G 59	Επιλογή σημείου αναφοράς
G 68	Περιστροφή συστήματος συντεταγμένων
G 70	Bolt Hole Circle : Τρύπες πάνω σε κύκλο
G 71	Τρύπες πάνω σε τόξο
G 72	Τρύπες πάνω σε ευθύγραμμο τμήμα υπό γωνία
G 73	Κύκλος διάτρησης μεγάλης ταχύτητας
G 74	Αριστερόστροφο σπείρωμα
G 76	Fine boring
G 77	Back boring
G 80	Ακύρωση standard κύκλων της μηχανής
G 81	Κύκλος διάτρησης (τρυπάνι)
G 82	Κύκλος κεντραρίσματος
G 83	Κύκλος βαθειάς διάτρησης (μοιάζει με G 73)
G 84	Δεξιόστροφο σπείρωμα
G 85 – G 89	Κύκλοι boring
G 90	Απόλυτες θέσεις (πάντα στην αρχή του προγράμματος)
G 91	Σχετικές θέσεις
G 98	Επιστροφή στο αρχικό επίπεδο εργασίας
G 99	Επιστροφή στο επίπεδο R

Πίνακας 5. Περιγραφή των G-codes

M-code	Περιγραφή
M 0	Σταμάτημα προγράμματος
M 01	Προαιρετικά σταμάτημα προγράμματος
M 02	Τέλος προγράμματος
M 03	Δεξιόστροφη περιστροφή ατράκτου
M 04	Αριστερόστροφη περιστροφή ατράκτου
M 05	Σταμάτημα στροφών
M 06	Αλλαγή εργαλείου
M 08	Εκκίνηση αντλίας σαπουνέλαιου
M 09	Σταμάτημα αντλίας σαπουνέλαιου
M 19	Προσανατολισμός ατράκτου
M 30	Τέλος προγράμματος
M 31	Εκκίνηση γρεζοσυλλέκτη
M 32	Ανάποδη κίνηση γρεζοσυλλέκτη
M 34	Προγραμματισθείσα θέση στομίου σαπουνέλαιου
M 98	Κλήση υποπρογράμματος
M 99	Κλείσιμο υποπρογράμματος

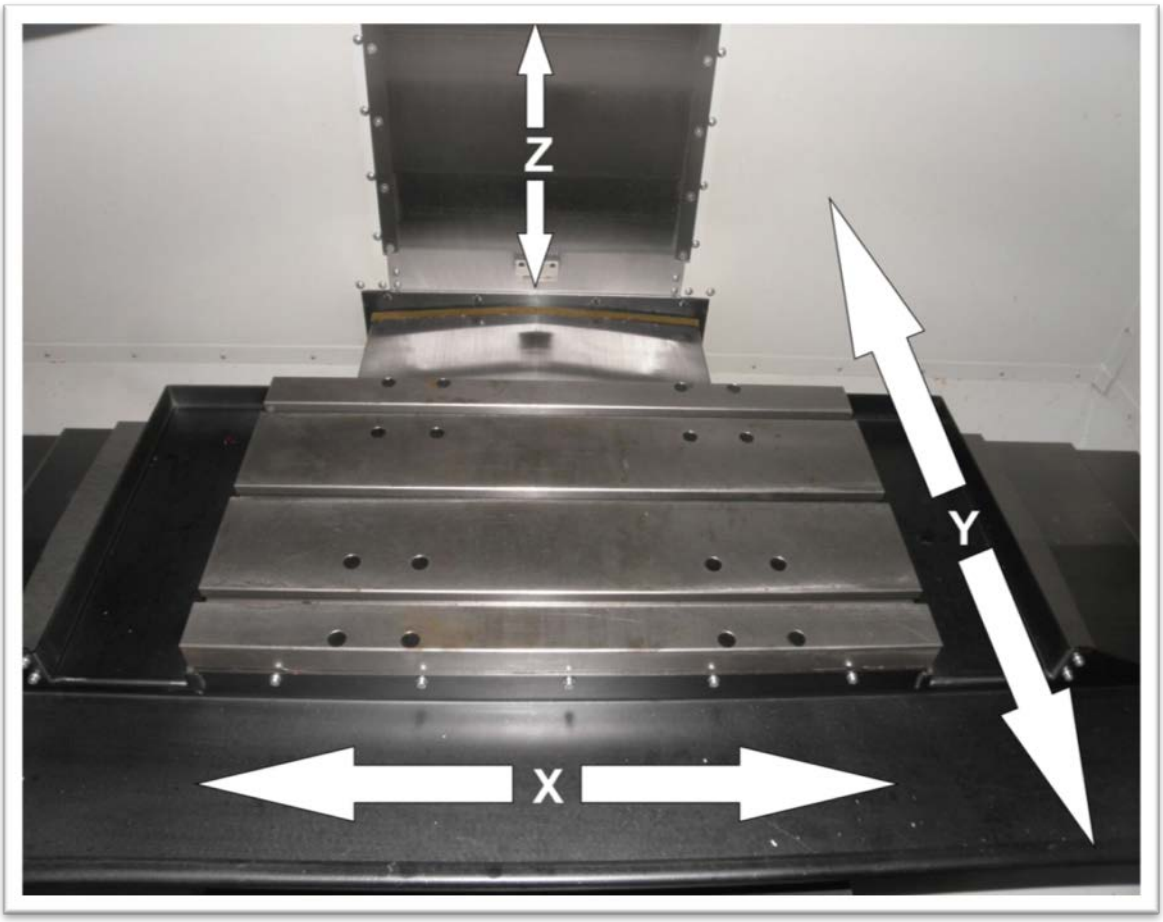
Πίνακας 6. Περιγραφή των M-codes

5.2 Η ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ CNC HAAS VF-1



Εικόνα 58. Κάθετο κέντρο κατεργασίας HAAS-VF1 τριών αξόνων

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 1μm. 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, παρουσιάζεται στην Εικόνα 59.

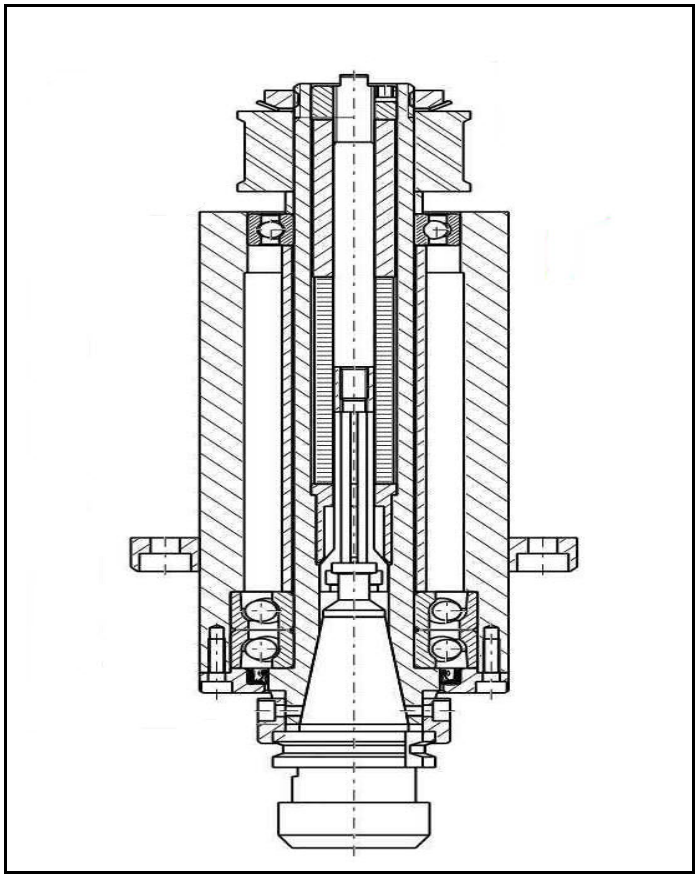


Εικόνα 59. Τράπεζα κατεργασίας και άξονες κύλισης οδηγών (γλιστρών)

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 διαθέτει

τρείς χαρακτηριστικές αύλακες συγκράτησης, διαστάσεων 16mm που χρησιμεύουν για την τοποθέτηση ειδικών συστημάτων συγκράτησης και πάκτωσης των προς κατεργασία τεμαχίων. Η συνδυασμένη κίνηση στους άξονές, που προκύπτει από την κίνηση της κάθε γλίστρας, γίνεται με ακρίβεια που φτάνει το 1μm. Η ισχύς της VF1 είναι της τάξεως των 20HP και η ταχύτητα κίνησης των γλιστρών φτάνει τα 25,4m/sec [5].

Η διασύνδεση της μηχανής με τους κώνους που φέρουν τα κοπτικά εργαλεία πραγματοποιείται από την άτρακτο η όποια 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 συστήματος ατράκτου

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. Σύστημα εναπόθεσης κώνων της VF1 (Μύλος ή εργαλειοφορέας)

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 (εικόνα 62). Τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής συνοψίζονται στον Πίνακα 7 που ακολουθεί.



Εικόνα 62. Το Control Panel της VF1

Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής VF1	
Τράπεζα	Διαστάσεις : X άξονας 660 mm & Y άξονας 356 mm
	Αριθμός αυλακώσεων T: 3
	Απόσταση αυλακώσεων: 125 mm
	Διαστάσεις T αυλακιού: 16 mm
	Μέγιστο βάρος τεμαχίου: 1.361 kg
Εύρος διαδρομών	X άξονας 514 mm, Y άξονας 410 mm, Z άξονας 508 mm
	Ελάχιστη απόσταση ατράκτου – τράπεζας: 102mm
	Μέγιστη απόσταση ατράκτου – τράπεζας: 610 mm
Άτρακτος	Μέγεθος κώνου: ISO 40
	Μέγιστη περιστροφική ταχύτητα: 7500 rpm
	Ελάχιστη περιστροφική ταχύτητα: 5 rpm
	Μέγιστη Ισχύς: 14.9 kW
	Μέγιστη ροπή: 102 Nm@ 1400rpm
Προώσεις	Ταχείες προώσεις X, Y, Z αξόνων: 25400 mm/min
	Μέγιστη πρόωση κοπής: 16500 mm/min
Κινητήρες αξόνων	Μέγιστη ώθηση άξονα X: 11343 N
	Μέγιστη ώθηση άξονα Y: 11343 N
	Μέγιστη ώθηση άξονα Z: 18683 N
Εργαλειοφορέας	Τύπος : Carousel
	Χωρητικότητα: 20 εργαλεία
	Μέγιστη διάμετρος εργαλείου: 89 mm
	Μέγιστο βάρος εργαλείου: 5.4 Kg
	Μέσος χρόνος εναλλαγής εργαλείου: 4.2 sec
Controller	Επεξεργαστής 32 bit συμβατός με σύστημα FANUC (Λογισμικό εργαλειομηχανών)
	Μνήμη χωρητικότητας 1 MB με δυνατότητα επέκτασης έως 750 MB
	Δυνατότητα σειριακής σύνδεσης με H/Y
	Θύρα επικοινωνίας USB
	Οθόνη υγρών κρυστάλλων 15”
Περιφερειακά	Απαίτηση παροχής αέρα: 113 L/min
	Απαίτηση πίεσης αέρα: 6.9 bar
	Ηλεκτρικές απαιτήσεις: 354 – 488 VAC / 30A
	Θερμοκρασία χώρου κατά την λειτουργία: 5 – 40 ºC
	Θερμοκρασία χώρου εκτός λειτουργίας: -20 – 70 ºC
	Υγρασία χώρου: < 90 %
	Βάρος μηχανής: 3221 Kg
	Όγκος δεξαμενής ψυκτικού υγρού: 208 lt
	Ισχύς αντλίας ψυκτικού υγρού: 0.6 kW
	Παροχή αντλίας ψυκτικού υγρού: 19.9 lt/min @ 2 bar

Πίνακας 7. Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά εργαλειομηχανής VF1

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

Στην βιομηχανία κατασκευής μητρών και καλουπιών τα κύρια υλικά κατασκευής είναι το αλουμίνιο και ο χάλυβας, γνωστά για τις μηχανικές τους ιδιότητες και το κόστος αγοράς τους. Λόγω της ερευνητικής μορφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας και έπειτα από τεχνικοοικονομική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αποφασίστηκε η χρήση υλικού χαμηλού κόστους παρόμοιων χαρακτηριστικών με το αλουμίνιο. Το υλικό που επιλέχτηκε για την κατεργασία και την δημιουργία του καλουπιού είναι πολυαμίδιο τύπου PA 6 το οποίο προσφέρει τον καταλληλότερο συνδυασμό μηχανικής αντοχής, ακαμψίας, μηχανικής ικανότητας απόσβεσης και αντοχής σε φθορά και κυρίως υψηλής κατεργασιμότητας, ώστε να θεωρηθεί μηχανολογικό πλαστικό γενικής χρήσεως. Βασικό χαρακτηριστικό του πολυαμιδίου που καθόρισε και τον χρόνο κατεργασίας είναι η ταχύτητα κοπής του η οποία κυμαίνεται από 250 έως 500 mm/min.



Εικόνα 63. Πολυαμίδια

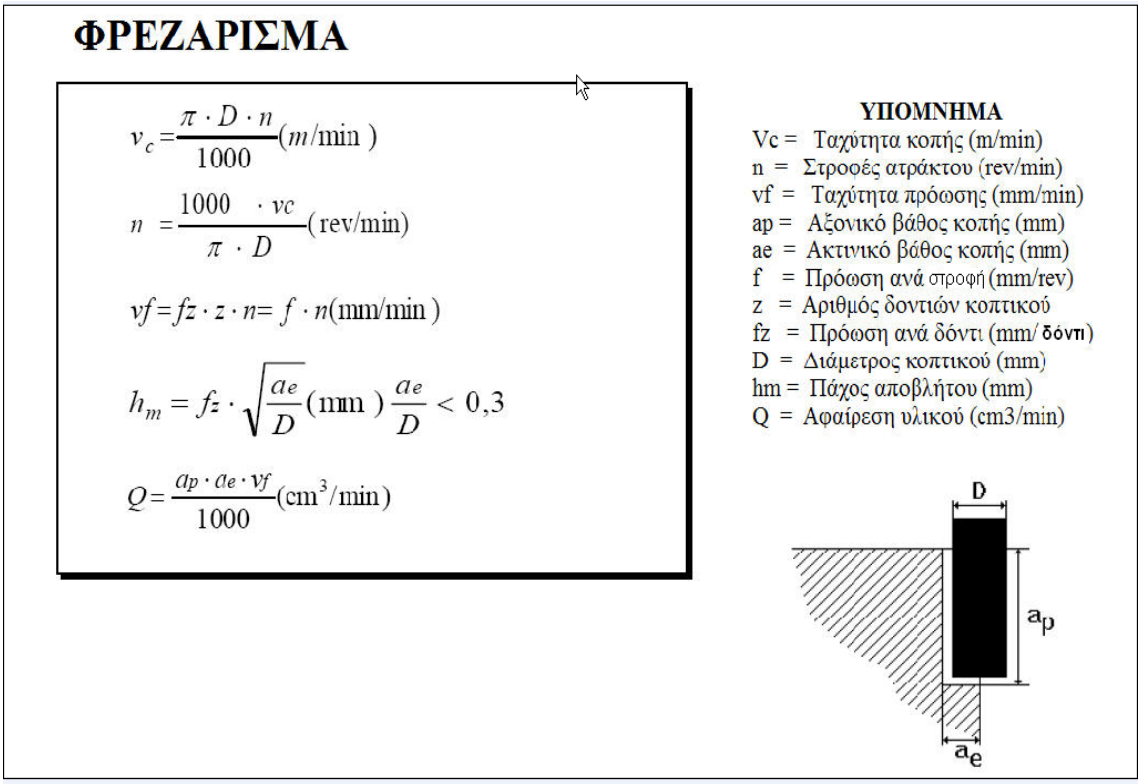
Τα πολυαμίδια βρίσκουν εφαρμογή σε ευρύ πεδίο βιομηχανικών εξαρτημάτων τόσο σε πρωτότυπες κατασκευές εξοπλισμού όσο και για συντήρηση. Μερικά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι: τριβείς, ράουλα, οδηγοί, κύλινδροι μεταφοράς, ακτινωτοί τροχοί και κοχλίες τροφοδοσίας.

Οι δυνάμεις επεξεργασίας είναι μικρότερες για τα βιομηχανικά πλαστικά από ότι στα μέταλλα, συνεπώς η πίεση σταθεροποίησης θα πρέπει να μειωθεί. Οι απαιτούμενες ανοχές για τα εξαρτήματα πολυαμιδίου είναι γενικά αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των μεταλλικών εξαρτημάτων. Αυτό οφείλεται στον υψηλότερο συντελεστή επέκτασης, διόγκωσης που προκαλείται από την απορρόφηση υγρασίας και πιθανή παραμόρφωση που προκαλείται από την εσωτερική απαλλαγή τάσεων κατά την διάρκεια και μετά την επεξεργασία. Η πιθανή παραμόρφωση εμφανίζεται κυρίως σε εξαρτήματα όπου η επεξεργασία προσκαλεί ασύμμετρες ή μεγάλες αλλαγές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, προτεινόμενη λύση είναι η θερμική επεξεργασία του εξαρτήματος μετά την αρχική και πριν την τελική μηχανουργική επεξεργασία.

5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για την κατεργασία πολυαμιδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαλεία ανθρακούχου χάλυβα, ταχυχάλυβα και σκληρομετάλλου εξαιτίας της χαμηλής σκληρότητας του υλικού. Όσον αφορά το φρεζάρισμα, επιλέγονται κοπτικά με λίγες κοπτικές ακμές για καλύτερη ροη του αποβλήτου.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της παρούσης πτυχιακής εργασίας αποτελούν εξοπλισμό του Μηχανουργείου και προσαρμόστηκαν στις ανάγκες τις κατεργασίας. Οι μαθηματικοί τύποι που χρειάστηκαν να υπολογιστούν οι στροφές της ατράκτου και οι προώσεις για κάθε εργαλείο ξεχωριστά παρουσιάζονται στην εικόνα 64.



Εικόνα 64. Υπολογισμοί ταχυτήτων κοπής, στροφών, προώσεων και αποβλήτων



Εικόνα 65. Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν από τα αριστερά προς τα δεξιά. Δίφτερο κονδύλι flat HSS 18 mm, δίφτερο ballmill κονδύλι HSS 20 mm, δίφτερο ballmill κονδύλι καρβιδίου 16, 8, 12 και 10 mm, φρεζοκεφαλή τρίφτερη καρβιδίου διαμέτρου 63 mm

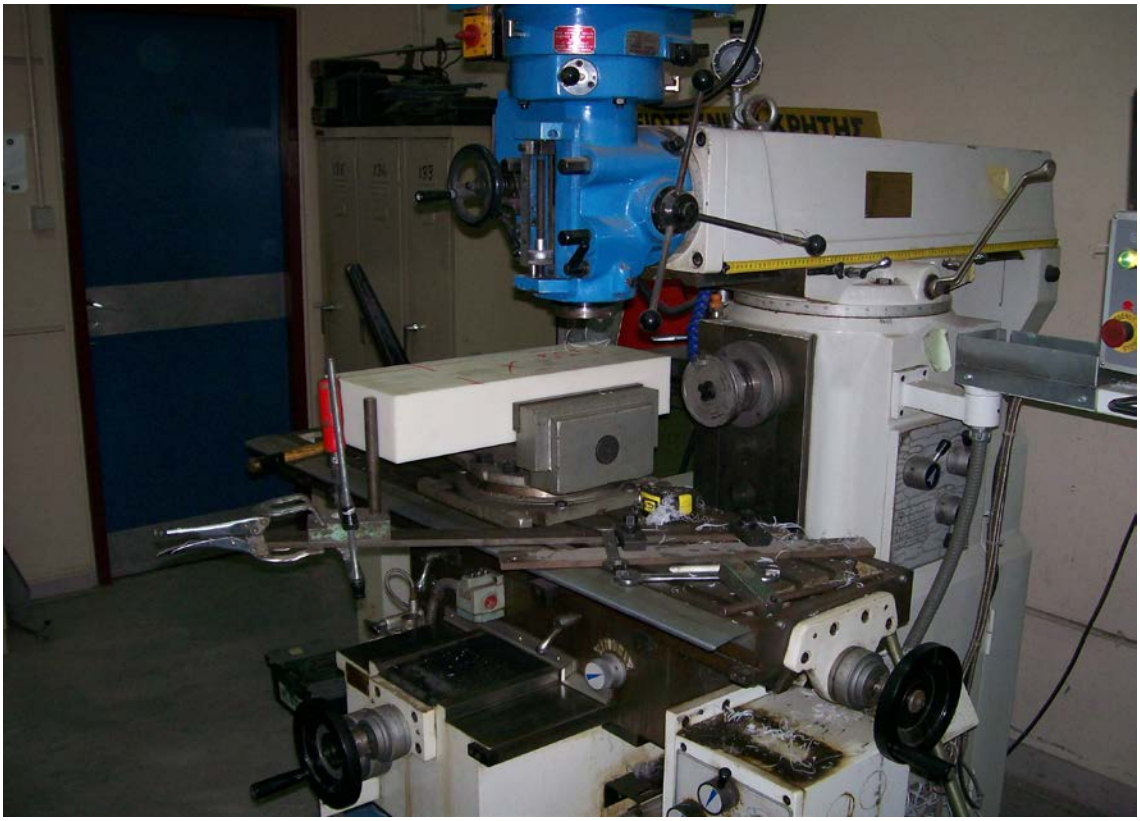
Με βάση τους τύπους υπολογισμού που παρουσιάστικαν, υπολογίστηκαν οι ταχύτητες προώσεων και οι στρόφές για κάθε εργαλείο:

- Για φρεζοκεφαλή τρίφτερη καρβιδίου 63 mm: Στροφές ατράκτου 1011 rpm με πρόωση 150 mm/min
- Για δίφτερο flat κονδύλι HSS 18mm: Στροφές ατράκτου 2500 rpm με πρόωση 265mm/min
- Για δίφτερο ballmill κονδύλι HSS 20mm: Στροφές ατράκτου 2400 rpm με πρόωση 318.4 mm/min
- Για δίφτερο ballmill κονδύλι καρβιδίου 16mm: Στροφές ατράκτου 4000 rpm με πρόωση 600 mm/min
- Για δίφτερο ballmill κονδύλι καρβιδίου 12mm: Στροφές ατράκτου 5300 rpm με πρόωση 650 mm/min
- Για δίφτερο ballmill κονδύλι καρβιδίου 10mm: Στροφές ατράκτου 6400 rpm με πρόωση 650 mm/min
- Για δίφτερο ballmill κονδύλι καρβιδίου 8mm: Στροφές ατράκτου 7500 rpm με πρόωση 800mm/min

Η ψύξη είναι αναγκαία στην κατεργασία πολυαμιδίου για την αποφυγή δημιουργίας υψηλών θερμοκρασιών με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του υλικού. Το ψυκτικό που χρησιμοποιήθηκε είναι υγρό διαλυτού ελαίου (σαπουνέλαιο).

5.5 ΣΤΗΡΙΞΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα έξι τεμάχια πολυαμιδίου που χρησιμοποιήθηκαν ως Ά-ύλη για το καλούπι ήταν διαστάσεων 525mm x 200mm x 100mm τα τέσσερα από αυτά και 450mm x 200mm x 100mm τα υπόλοιπα δύο. Η πρώτη κατεργασία των τεμαχίων που υλοποιήθηκε αφορά τον παραλληλισμό και την κανονικοποίησή τους. Η κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε συμβατική φρέζα με τη βοήθεια υποστήριξης μέγγενης αλλά και ειδικών μηχανισμών συγκράτησης, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 66.



Εικόνα 65. Παραλληλισμός τεμαχίων

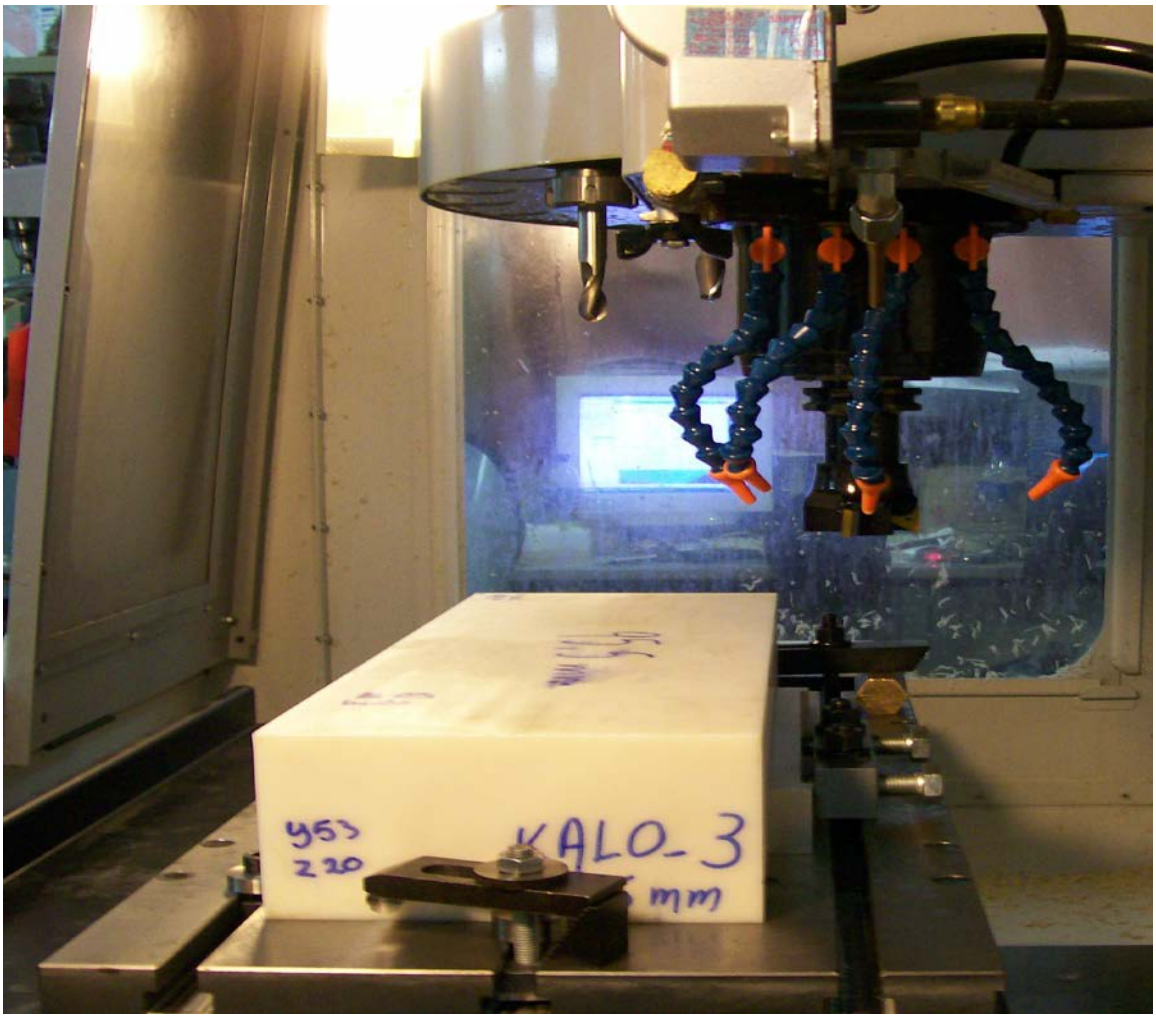
Όντας ολοκληρωμένα τα έξι block στις απαιτούμενες ακριβείς διαστάσεις, ξεκίνησε η αναζήτηση ενός τρόπου συγκράτησης στη τράπεζα της CNC εργαλειομηχανής. Από τους περιορισμούς που πρόεκυψαν αποφασίστηκε ότι μόνο ένας ειδικός μηχανισμός σχεδιασμένος για τα συγκεκριμένα κομμάτια θα κάλυπτε τις απαιτήσεις και έτσι σχεδιάστηκαν δυο μηχανισμοί, ένας για τα τέσσερα blocks και ένας για τα άλλα δυο. Ο μηχανισμός αυτός αποσκοπεί στην ασφαλή στήριξη των δοκιμίων σε περιβάλλον μεγάλων προώσεων και βάθους κοπής, χωρίς τον κίνδυνο ταλαντώσεων και απώλειας ακρίβειας. Για την επίτευξη αυτού του συστήματος υπολογίστηκαν, πρώτον, τα μέγιστα όρια κατεργασίας, δηλαδή πόσο θα μετατοπιστούν τα εργαλεία κατά X, Y και Z άξονα και δεύτερον σε ποια σημεία θα είναι αυτά. Έτσι κατασκευάστηκαν αποστάτες και τοποθετηθήκαν στην τράπεζα της εργαλειομηχανής αναγκάζοντας το block να παραλληλίζεται με τον Y και Y άξονα χωρίς να χρειάζονται επιπλέον μετρήσεις ή μηδενισμοί. Στην πλευρά με το μικρότερο βάθος κατεργασίας,

δηλαδή με το μεγαλύτερο ύψος υλικού, τοποθετήθηκε μηχανισμός που πακτώνεται στην τράπεζα και διαθέτει δυο κοχλίες οι οποίοι πιέζουν το δοκίμιο προς τους αποστάτες, ολοκληρώνοντας έτσι το σύστημα συγκράτησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 67.



Εικονα 67. Προετοιμασία μηχανισμού συγκράτησης

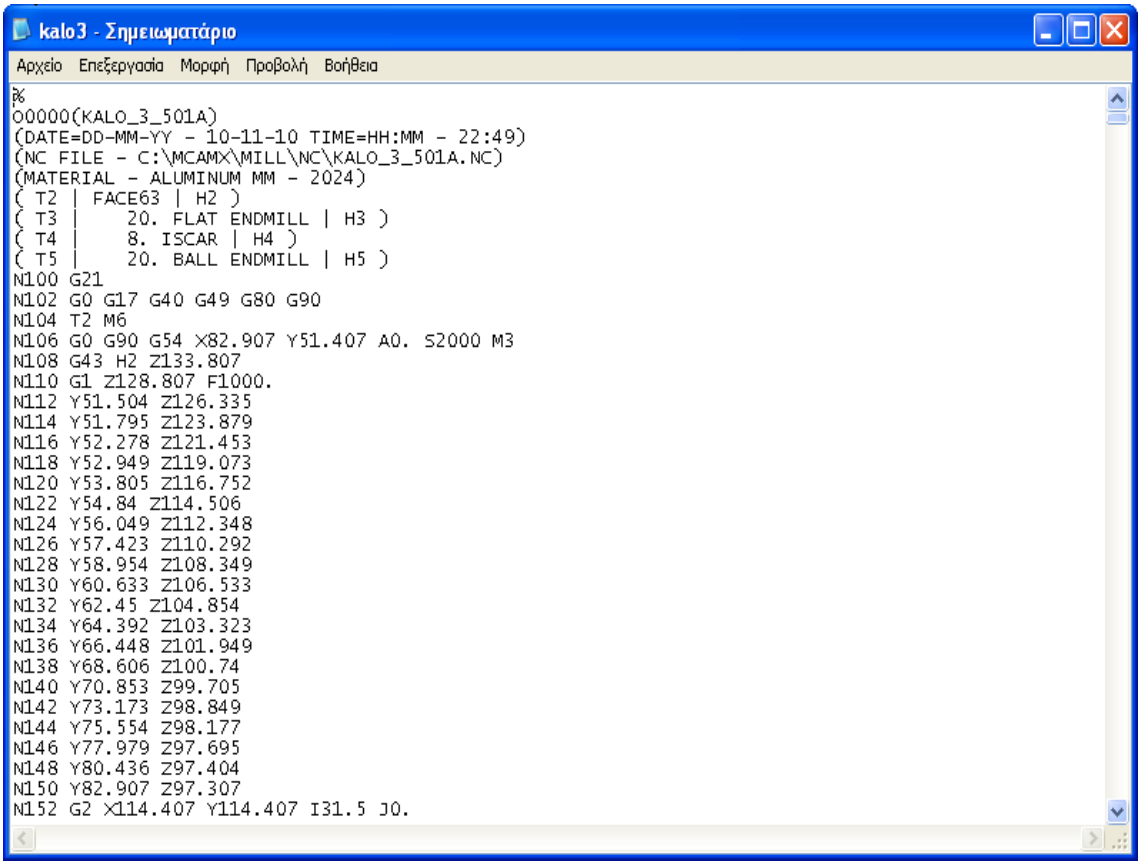
Προκειμένου να αποφευχθεί και ο παραμικρός κίνδυνος απώλειας του αρχικού σημείου μηδενισμού, στο ήδη υπάρχον σύστημα συγκράτησης τοποθετήθηκε άλλο ένα σύστημα με κοχλίες και φουρκέτες το οποίο σταθεροποιεί όλο το σύστημα κάθετα προς την τράπεζα. Για την υλοποίηση του δεύτερου συστήματος συγκράτησης, υπολογίστηκαν τα «νεκρά σημεία» κάθε δοκιμίου ξεχωριστά, δηλαδή σημεία στα οποία δεν γίνεται κάποια κατεργασία και θα μείνουν ανέπαφα μέχρι το τέλος του κύκλου κατεργασίας. Σε εκείνα τα σημεία έγιναν τρύπες διαμέτρου 20mm και βάθους 50mm, όπου προσαρμόστηκαν άξονες μήκους 90mm και επάνω σε αυτούς στερεώθηκαν οι φουρκέτες. Η όλη συγκράτηση διακρίνεται στην εικόνα 68.



Εικόνα 68. Πάκτωση τεμαχίου

5.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΩΔΙΚΑ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΠΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ

Εφόσον ολοκληρώθηκε η διαδικασία δημιουργίας G-κώδικα των κομματιών από το πρόγραμμα MasterCam, οι κώδικες αποθηκεύτηκαν σε μορφή κειμένου *.nc, όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4. Για να αναγνωριστούν οι κώδικες από την εργαλειομηχανή αποθηκεύτηκαν ξανά σε μορφή .txt και εισήχθησαν σε αυτή μέσω της USB θύρας που διαθέτει η CNC στο πλάι του Control Panel. Στην εικόνα 68, παρουσιάζεται μέρος του αρχείου txt με το G-κώδικα από το MasterCam.



Εικόνα 69. Μέρος του G-κώδικα σε txt file

Τα βήματα εισαγωγής του κώδικα στη CNC είναι:

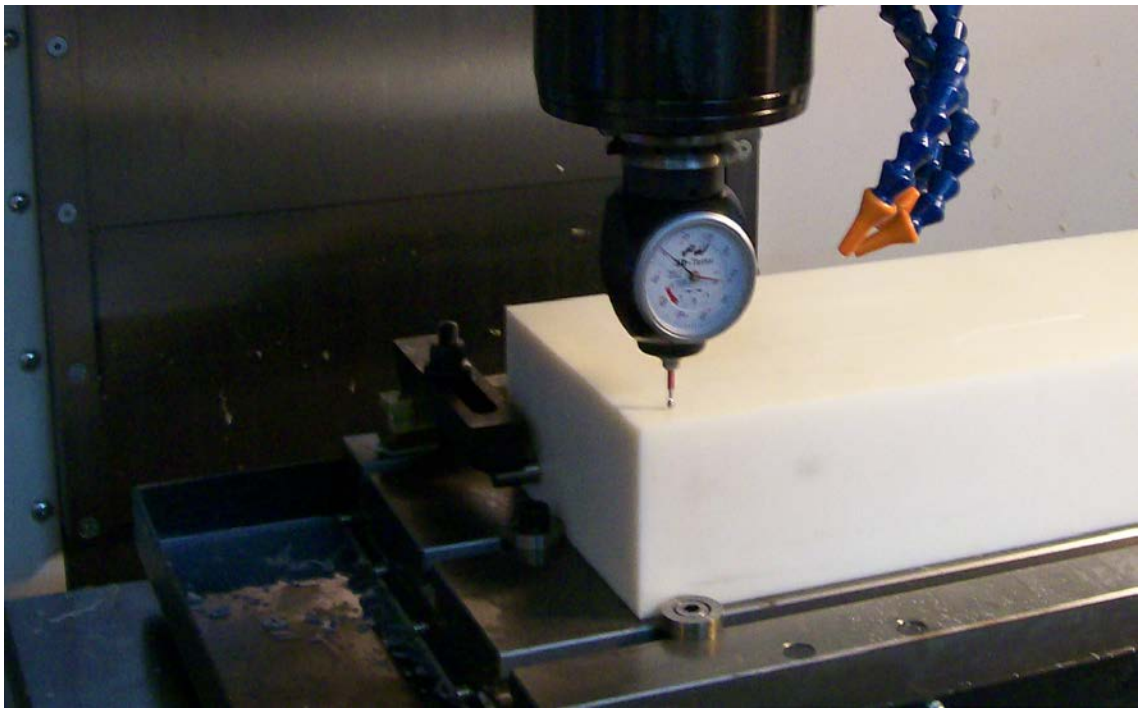
1. Εκκίνηση μηχανής από τον κεντρικό διακόπτη ON/OFF.
2. Ενεργοποίηση του Power On.
3. Απενεργοποίηση των Alarm πατώντας Reset, Emergency Stop και ανοιγοκλείνοντας την πόρτα της εργαλειομηχανής.
4. Ενεργοποίηση της εντολής Power Up/Restart.
5. Έχοντας τοποθετήσει το USB stick στην υποδοχή της μηχανής επιλέγεται η εντολή List Program → Device → USB Device → Enter → Directory → Select Program.
6. Γίνεται ανάγνωση του κώδικα από τη συσκευή αποθήκευσης USB και όχι μέσω της μνήμης της εργαλειομηχανής λόγω χωρητικότητας.
7. Έλεγχος προγράμματος με τη βοήθεια των γραφικών της μηχανής ενεργοποιώντας δυο φορές την εντολή: Setting Graph → Cycle Start για την αποφυγή σφαλμάτων (εικόνα 70).



Εικόνα 70. Προσομοίωση κατεργασιών στη λειτουργία γραφικών της CNC

5.5 ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΙ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΚΑΙ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Για τον μηδενισμό των τεμαχίων χρησιμοποιήθηκε μετρητική διάταξη (Taster) η οποία έχει τη μορφή μικρο-μετρικού ρολογιού και εφαρμόζει στον κώνο της εργαλειομηχανής αφού πρώτα έχει ενεργοποιηθεί η εντολή *Orient Spindle,* που ακινητοποιεί την άτρακτο.



Εικόνα 71. Μηδενισμός τεμαχίου

Κύρια χαρακτηριστικά του Taster είναι το ρολόι, το οποίο διαθέτει ακρίβεια 0,01 mm και της σφαίρας στο άκρο 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* 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, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 71.

Η διαδικασία μηδενισμού πραγματοποιείται με την εξής σειρά:

- 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 της ροδέλας 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, μεταξύ G52 έως G59 (συστήματα συντεταγμένων), θα αποθηκευτεί ο μηδενισμός. (Η επιλογή αυτή έχει προκαθοριστεί ήδη από τον προγραμματισμό του κώδικα στο CAM).
- Επιλέγεται ο άξονας (X, Y ή Z) προς μηδενισμό.
- Ενεργοποιείται η εντολή *PART ZERO SET* και μηδενίζεται ο κάθε άξονας ξεχωριστά.

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*.

5.5 ΚΑΘΟΔΗΓΟΥΜΕΝΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ Α/Γ

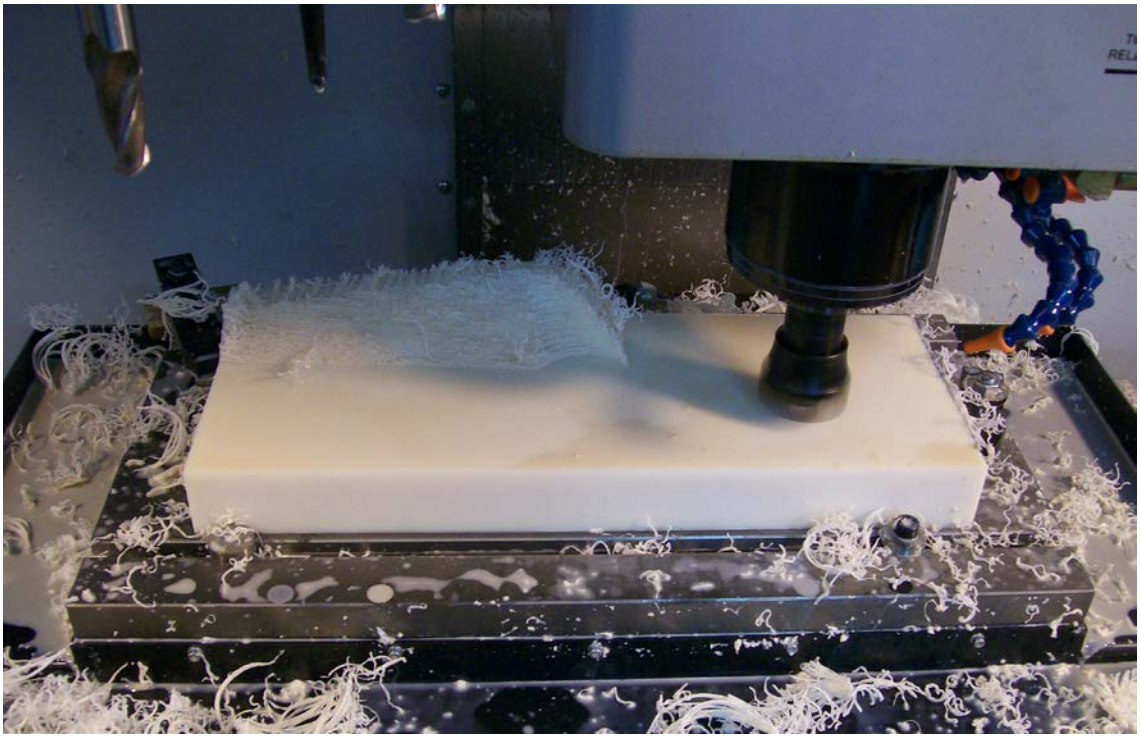
Εφόσον ολοκληρωθούν οι παραπάνω ενέργειες προετοιμασίας μηχανής, κομματιών και εργαλείων, η εργαλειομηχανή είναι έτοιμη να ξεκινήσει τον κύκλο κατεργασίας ενεργοποιώντας την εντολή *CYCLE START*. Για να μπορούν να ελεγχθούν σταδιακά τα πρώτα βήματα κοπής δύναται να επιλεχθεί η εντολή *SINGLE BLOCK,* με την οποία ο κώδικας εκτελείται ανά γραμμή. Ενεργοποιείται η εντολή *COOLANT* με την οποία λειτουργεί η αντλία ψυκτικού υγρού για την ψύξη του εργαλείου και του τεμαχίου προς αποφυγή παραμορφώσεων λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται κατά την κοπή αλλά και για την απομάκρυνση των αποβλήτων της κοπής. Παράλληλα ενεργοποιείται και ο γρεζομεταφορέας ο οποίος απομακρύνει από το εσωτερικό της εργαλειομηχανής, μέσω ειδικής χοάνης, τα απόβλιττα της κάθε κατεργασίας.

Στην εικόνα 72 παρουσιάζεται η πρώτη κατεργασία που υλοποιείται, το φρεζάρισμα ξεχονδρίσματος.



Εικόνα 72. Κατεργασία ξεχονδρίσματος με χρήση φρεζοκεφαλής

Στην εικόνα 73 έχει ξεκινήσει η αρχική διαμόρφωση του κατεργαζόμενου τεμαχίου και στην 74 παρατηρούμε πλέον την εικόνα του τεμαχίου μετά την ολοκλήρωση της κατεργασίας.



Εικόνα 73. Αρχική διαμόρφωση τεμαχίου



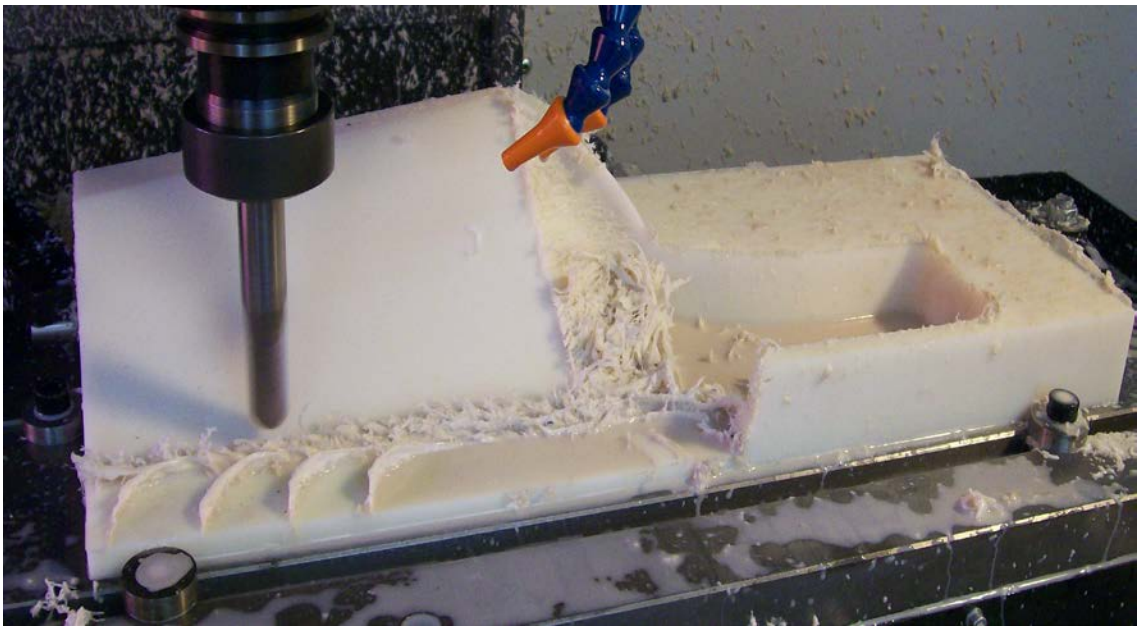
Εικόνα 74. Ολοκλήρωση κατεργασίας ξεχονδρίσματος

Ακολουθεί η διαμόρφωση με δίφτερο flat κονδύλι (εικόνα 75) με την ολοκλήρωση της οποίας το κατεργαζόμενο τεμάχιο παίρνει και την τελική του μορφή.

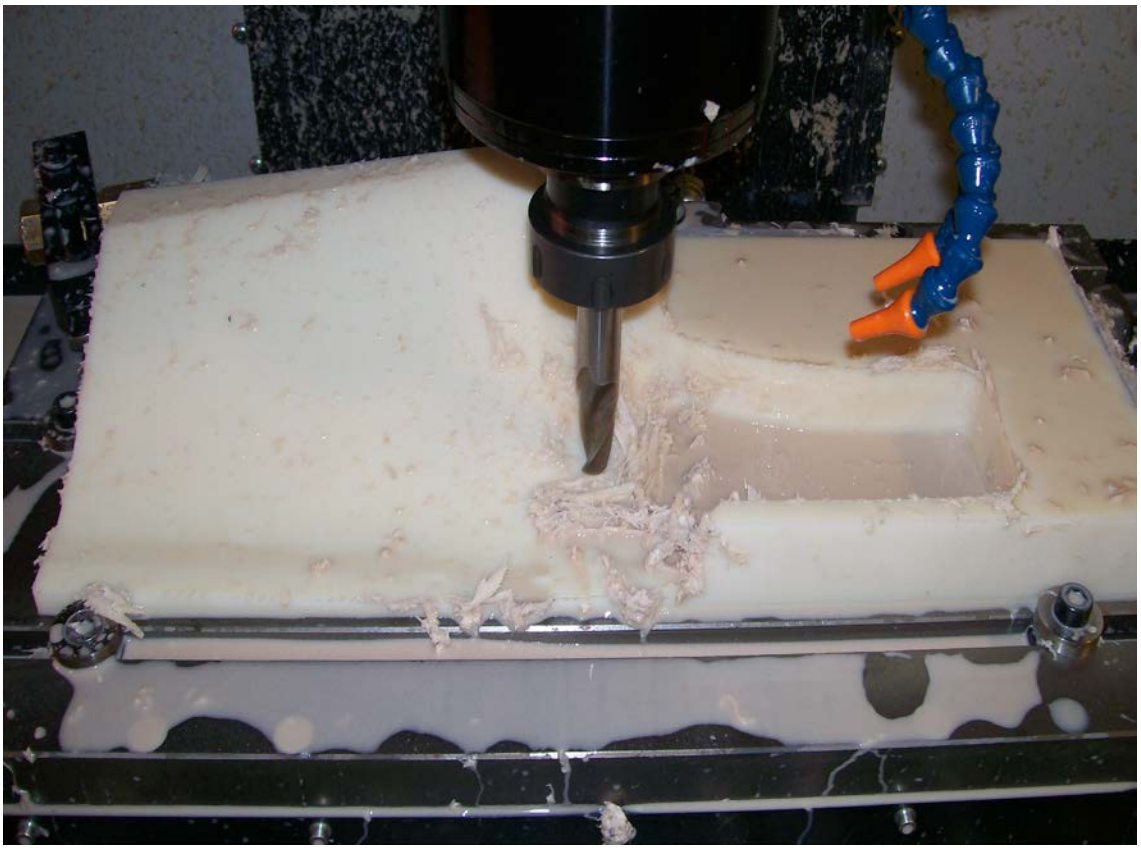


Εικόνα 75. Κατεργασία κοπής με δίφτερο flat κονδύλι

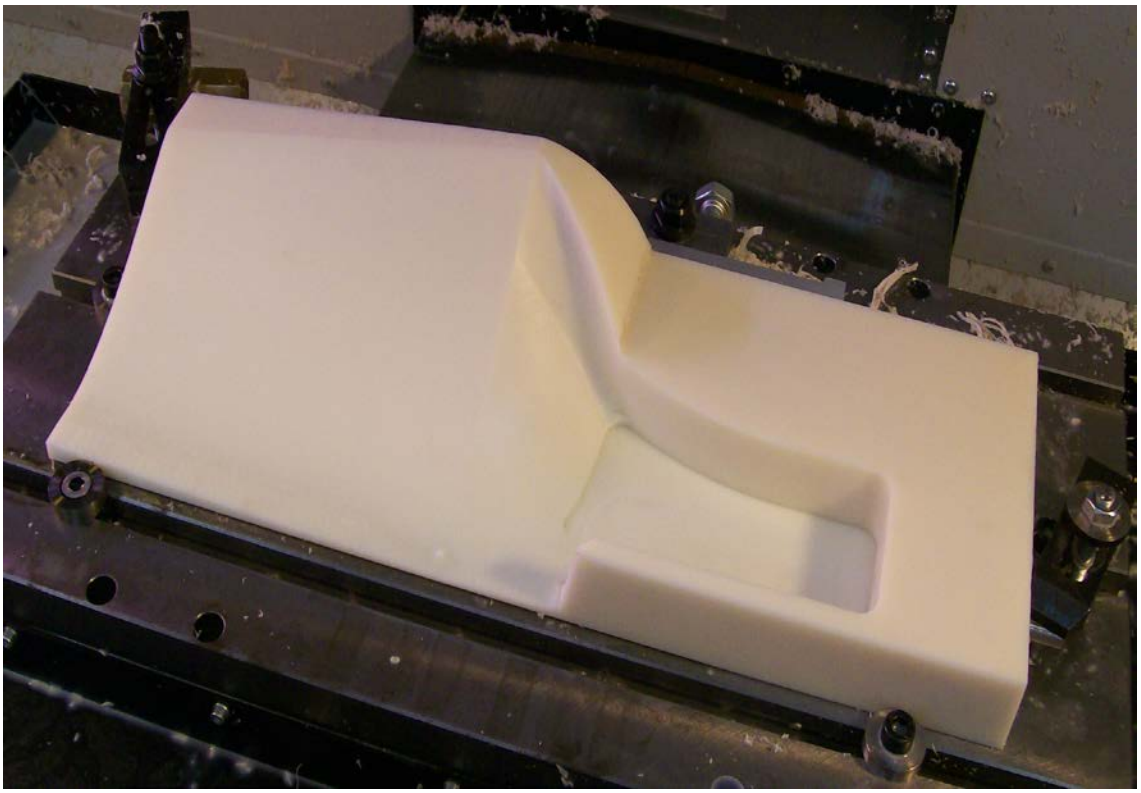
Για να αποκτήσει την επιθυμητή τραχύτητα η τελική επιφάνεια του καλουπιού, ακολουθεί και η τελική κατεργασία που είναι η αφαίρεση υλικού για το φινίρισμα, όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 76 και 77. Η ολοκλήρωση του φινιρίσματος οδηγεί στο τελικό προϊόν της εικόνας 78. Το πρώτο από τα έξι κομμάτια του καλουπιού.



Εικόνα 76. Κατεργασία φινιρίσματος

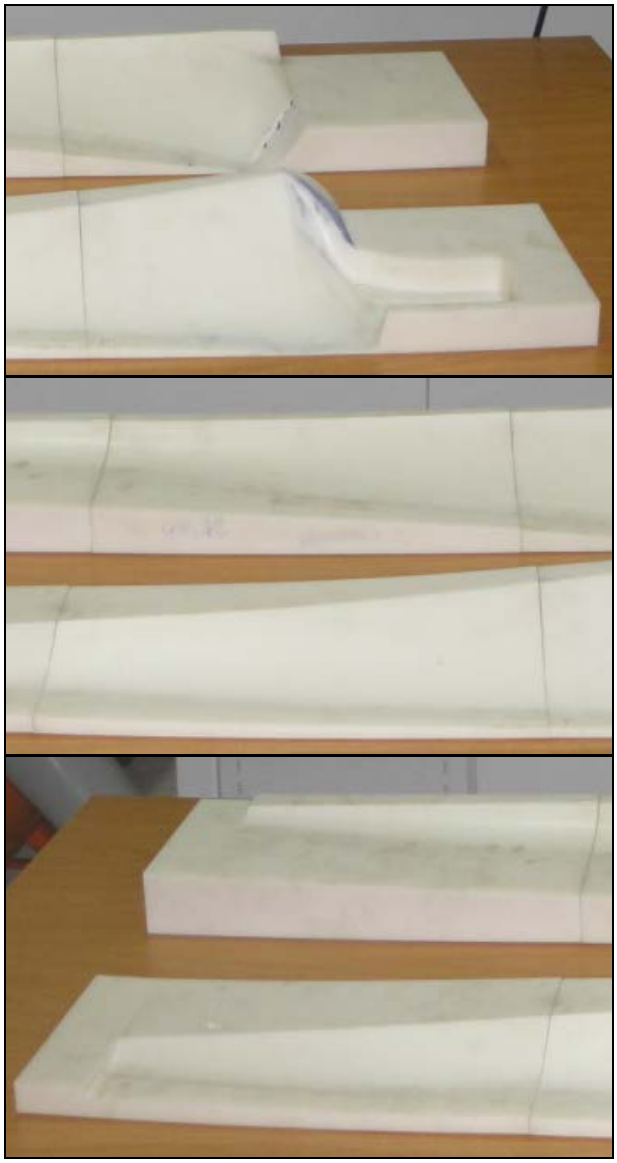


Εικόνα 77. Κατεργασία φινιρίσματος



Εικόνα 78. Τελικό προϊόν

Η ίδια ακολουθία των κατεργασιών που περιγράφηκαν, ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα πέντε δοκίμια με μέσο όρο χρόνου κατεργασίας 5h για το κάθε ένα από αυτά. Οι κύκλοι κατεργασίας διεξήχθησαν άκρως ικανοποιητικά χωρίς προβλήματα στήριξης και εναλλαγής εργαλείων. Σημειώνεται ότι όταν η εργαλειομηχανή «διαβάζει» τον κώδικα μέσω εξωτερικής συσκευής αποθήκευσης (USB), δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί παρέμβαση στον κώδικα αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, την αυστηρή λειτουργία του κώδικα από την αρχή έως το τέλος της διαδικασίας χωρίς την δυνατότητα ενδιάμεσης παύσης (π.χ. με χρήση της Single Block) της εργαλειομηχανής ή την τροποποίηση του κώδικα. Έτσι, σε περίπτωση παύσης, ο κώδικας πρέπει να ξανατρέξει από την αρχή. Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του καλουπιού που κατασκευάστηκε, και η άριστη εφαρμογή των έξι κομματιών (εικόνα 79 και 80) κάλυψαν πλήρως το στόχο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 79. Λεπτομέρειες εφαρμογής του διαιρούμενου καλουπιού πτερυγίου Α/Γ



Εικόνα 80. Το τελικό διαιρούμενο καλούπι πτερυγίου Α/Γ

6. Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Σε κατεργασίες μεγάλης ακριβείας, πολύπλοκων γεωμετριών και μεγάλο αριθμό παράγωγης τεμαχίων η επιλογή χρήσης εργαλειομηχανής επιβάλλεται και σε καμία περίπτωση η χρήση συμβατικών μηχανών δε θα φτάσει την ποιότητα και την απόδοσή μιας CNC. Αντίθετα, σε κατεργασίες απλών γεωμετρικών σχημάτων π.χ. ξεχόνδρισμα επιφάνειας, η χρήση της εργαλειομηχανής είναι ασύμφορη. Η διαδικασία πρόσδεσης, ο μηδενισμός τεμαχίου και η δημιουργία κώδικα, θα απαιτήσουν πολύ περισσότερο χρόνο από μια συμβατική φρέζα. Τα προϊόντα που παράγονται από τα μηχανουργεία, στην Ελλάδα είναι κυρίως μηχανικά εξαρτήματα όπως οδοντωτοί τροχοί, πείροι, ανταλλακτικά διαφόρων τύπων, κλπ. Οι βασικοί πελάτες τους είναι βιομηχανίες, ιδιωτικοί ή δημόσιοι φορείς όπως η Δ.Ε.Η. ο Ο.Σ.Ε. ή και ο Ελληνικός Στρατός. Συνήθως το κόστος παραγωγής είναι αρκετά υψηλό, λόγω του κόστους των κατεργασιών κοπής, του κόστους των πρώτων υλών και της χαμηλής παραγωγικότητας, η οποία δυστυχώς υπολογίζεται στο 1/3 της παραγωγικότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι λόγοι που οδηγούν το κόστος παραγωγής σε υψηλά επίπεδα, είναι πολλοί με βασικότερους:

i) *Δε γίνεται σωστή επιλογή της εργαλειομηχανής που θα χρησιμοποιηθεί και των συνθηκών κατεργασίας για τις κατεργασίες κοπής. Τα μηχανουργεία λειτουργούν σε αυτόν τον τομέα κυρίως εμπειρικά.*

ii) *Το μέγεθος των μηχανουργείων είναι συνήθως μικρό, με αποτέλεσμα να γίνονται απαγορευτικές οι παραγγελίες μεγάλων παρτίδων πρώτων υλών και έτσι δεν επιτυγχάνονται χαμηλές τιμές στην αγορά της πρώτης ύλης.*
iii) *Χαμηλή εξειδίκευση σε επίπεδο παραγωγής.*
iv) *χαμηλή εξειδίκευση προσωπικού.*
v) *Παρωχημένη τεχνολογία μεθόδων παραγωγής σε συνδυασμό με τη δυσπιστία από μέρους των μηχανουργών για τη χρήση νέων τεχνολογιών.*

Εκτός των προαναφερθέντων προβλημάτων, η μικρή δυναμικότητα των περισσοτέρων μμηχανουργείων, έχει σαν αποτέλεσμα την ανυπαρξία μόνιμου τμήματος συντήρησης. Έτσι δεν υπάρχει κατά κανόνα προγραμματισμένη προληπτική συντήρηση, με επακόλουθο την εμφάνιση βλαβών των εργαλειομηχανών κατά την λειτουργία τους. Η διαχείριση των υλικών επίσης, παρουσιάζει προβλήματα μιας και η σωστή λειτουργία του μυφαντουργείου εξαρτάται πολύ από την ύπαρξη αποθηκευτικού χώρου πρώτων υλών και προϊόντων, με δυνατότητα γρήγορης και εύκολης διακίνησης.

Η ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας, άρα και του κόστους αφού μειώνεται η φθορά των εργαλείων και η σπατάλη ενέργειας ενώ αυξάνεται η παραγωγή, επιτυγχάνεται με εμπειρία και σωστό συνδυασμό πρώτης ύλης και κοπτικών εργαλείων. Το κόστος επισκευής σε περίπτωση εσφαλμένου χειρισμού είναι υψηλό και έτσι τα περιθώρια λάθους είναι σχεδόν ανύπαρκτα.

Για την ορθή λειτουργία της CNC απαιτούνται συγκεκριμένες ενέργειες. Η σωστή επιλογή στροφών και προώσεων θα δώσει τη βέλτιστη ποιότητα επιφάνειας και την ελάχιστη καταπόνηση στα κοπτικά εργαλεία. Η σωστή συγκράτηση του τεμαχίου στη μέγγενη ή στην τράπεζα εφαρμογών, θα μειώσει την πιθανότητα μετακίνησης του τεμαχίου κατά την κατεργασία, με αποτέλεσμα την ανακρίβεια της γεωμετρίας του τεμαχίου, η ακόμα και την δημιουργία ατυχήματος. Ο τακτικός έλεγχος ποιότητας των κοπτικών εργαλείων, ιδίως μετά από μια επίπονη κατεργασία, μας εγγυάται καλύτερα αποτελέσματα τελικής επιφάνειας. Επίσης η σωστή προμελέτη, οι παράμετροι κοπής και ο σωστός προγραμματισμός, είναι ενέργειες που θα οδηγήσουν στο επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα. Χρήση μετάλλων και βιομηχανικών πλαστικών για πρώτη ύλη, αυστηρή απαγόρευση στην κατεργασία πετρωμάτων και ξύλων καθώς υπάρχει κίνδυνος καταστροφής οδηγών (γλιστρών). Η ψύξη με κατάλληλα επιλεγμένο υγρό κοπής βάση ιδιοτήτων του υλικού προς κατεργασία είναι απαραίτητη. Δίδεται και η δυνατότητα ψύξης μέσω ατράκτου (Coolant through spindle) με καλύτερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις διάτρησης.

Στις περισσότερες εργαλειομηχανές, όπως και στη VF1, παρέχεται η δυνατότητα επέκτασης σε τέταρτο και πέμπτο άξονα για σύνθετες γεωμετρίας και πολύπλοκες κατεργασίες όπως η κατεργασία φτερωτών αντλιών. Μια τέτοια επένδυση αποσκοπεί σε μεγάλη παραγωγή και μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και καθίσταται ασύμφορη για παραγωγή μεμονωμένων τεμαχίων.

Στην HAAS VF1 υπάρχει ο περιορισμός χωρητικότητας 20 κοπτικών εργαλείων στον εργαλειοφορέα, με αποτέλεσμα, σε περίπτωση κατεργασίας, που θα απαιτηθούν, παραπάνω από 20 εργαλεία, να μην είναι εφικτή η υλοποίηση του τελικού τεμαχίου σε

ένα συνεχή κύκλο. Επίσης, το εύρος στροφών της ατράκτου, ο αριθμός των αξόνων και το μήκος διαδρομών τους, είναι περιορισμένο για κατεργασίες τεμαχίων με μεγάλο όγκο. Η επιλογή της κάθε εργαλειομηχανής πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις κατεργασιών του προς παραγωγή τελικού προϊόντος.

Η γεωμετρία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του καλουπιού που κατασκευάστηκε, κάλυψαν πλήρως το στόχο της παρούσας εργασίας. Η πολύ μικρή τραχύτητα της τελικής επιφάνειας και η άριστη εφαρμογή των έξι κομματιών προ(σ)καλούν για τη συνέχιση αυτής της εργασίας στον τομέα τον κατεργασιών, τη χύτευση.

7. Βιβλιογραφία

[1] Μπεργελές Γ., Ανεμοκινητήρες, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2005.

[2] http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/100401_General_Stats_2009.pdf, σύνδεσμος ενεργός στις 15 Οκτώβρη 2010.

[3] http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/Global_Wind_2007_report/GWEC_Global_Wind_2009_Report_LOWRES_15th.%20Apr..pdf, σύνδεσμος ενεργός στις 12 Οκτώβρη 2010.

[4] Καλδέλλης Ι., Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας - 2η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, 2005.

[5] *HAAS Automation Inc. [operator's manual],* www.haascnc.com*, 2009.*

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine, σύνδεσμος ενεργός στις 12 Οκτώβρη 2010.

[7] Ν. Α. Βοβός, Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2001.

[8] Β. Δημητρίου, Σημειώσεις Μαθήματος *Κατασκευαστικές Τεχνολογίες*, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά 2010.

[9] Gary L. Johnson, Wind Energy Systems, Prentice Hall, 1985.

[10] http://www.mastercam.com/

Επίσημος Ιστότοπος εταιρίας MasterCAM. Documentation for MasterCAM (Ενεργός 10 Φεβρουαρίου, 2011).

[11] http://usa.autodesk.com/autodesk-inventor/

Επίσημος Ιστότοπος εταιρίας Autodesk. Documentation for Autodesk Inventor Pro. (Ενεργός 5 Ιανουαρίου 2011).

8. Ορολογία - Συντομογραφίες

- **CAD – Computer Aided Design:** η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών για το σχεδιασμό πραγματικών ή εικονικών αντικειμένων. Το σύστημα CAD συχνά περιλαμβάνει πολύ περισσότερα από απλά σχήματα. Όπως για παράδειγμα είναι η δημιουργία εγχειρίδιου σύνταξης για τεχνικά και μηχανολογικά σχέδια. Μπορεί να επεξεργάζεται συμβολικά στοιχεία όπως υλικά, διαδικασίες, διαστάσεις και ανοχές, ανάλογα με την εφαρμογή ειδικών εντολών.
- **CAM - Computer Aided Manufacturing:** η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με βάση τα εργαλεία λογισμικού που βοηθούν κυρίως τους μηχανικούς στον τομέα της μεταποίησης ή προτυποποίησης συστατικών, προϊόντων και εργαλείων.
- **CAE - Computer Aided Engineering:** η χρήση τεχνολογικών πληροφοριών για την υποστήριξη των μηχανικών σε εργασίες όπως η ανάλυση, η προσομοίωση, ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η διάγνωση και η επισκευή αντικειμένων.
- **FEM - Finite Element Method:** Είναι μια αριθμητική τεχνική προσέγγιση για την εξεύρεση λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDEs), καθώς και εξισώσεις ολοκληρωμάτων. Η προσεγγίσιμη λύση βασίζεται είτε στην ολοκληρωτική εξάλειψη των διαφορικών εξισώσεων (προβλήματα σταθερής κατάστασης), είτε μέσω της προσέγγισης συστημάτων των συνήθων διαφορικών εξισώσεων.
- **NC - Numerical Control & CNC - Computer Numerical Control:** Αναφέρεται στην αυτοματοποίηση των εργαλειομηχανών που λειτουργούν με προγραμματισμένες εντολές που κωδικοποιούνται σε ένα μέσο αποθήκευσης, ελέγχεται μέσω χειροτροχού ή μοχλού.
- **APT - Advanced Packaging Tool:** ελεύθερο περιβάλλον εργασίας που ο χρήστης συνεργάζεται με κέντρα βιβλιοθηκών για να χειριστεί την εγκατάσταση και την απεγκατάσταση του λογισμικού. Το APT απλοποιεί τη διαδικασία της διαχείρισης λογισμικού για Unix-όπως τα συστήματα πληροφορικής, αυτοματοποιώντας την ανάκτηση, τη διαμόρφωση και την εγκατάσταση των πακέτων λογισμικού, είτε από δυαδικά αρχεία ή με τη σύνταξη κώδικα. (Αυτόματος προγραμματισμός κοπτικών εργαλείων κατεργασίας).
- **DNC - Direct Numerical Control:** κοινός όρος παραγωγής για τη δικτύωση των εργαλειομηχανών CNC σε κάποια μονάδα ελέγχου. Η διαθέσιμη μνήμη είναι πολύ μικρή για να περιέχει το πρόγραμμα κατεργασίας για επιφάνειες π.χ. μηχανικού συγκροτήματος. Οπότε στην περίπτωση αυτή το πρόγραμμα είναι αποθηκευμένο σε έναν ξεχωριστό υπολογιστή και θα διαβιβαστεί στο μηχάνημα άμεσα. Αν ο υπολογιστής είναι συνδεδεμένος σε έναν αριθμό μηχανών μπορεί να διανείμει τα προγράμματα με διαφορετικές μηχανές, όπως απαιτείται.