

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΤΕΡΩΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΩΝ ΣΕ ΚΕΝΤΡΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ CNC 4 ΑΞΟΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ CAM

ΜΗΝΑΚΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ-ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Γ.-Χ. Βοσνιάκος

AOHNA 2012

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1° – Εισαγωγή	
1.1 Γενικά	3
1.2 Διάρθρωση της Εργασίας	4
Κεφάλαιο 2° – Θεωρητικό μέρος	
2.1 Πτερωτή ακτινικού (φυγοκεντρικού) συμπιεστή	4
2.2 Μέθοδοι κατασκευής πτερωτών ακτινικού συμπιεστή	5
Κεφάλαιο 3° – Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου λο CAD/CAM	γισμικού
3.1 Dassault SolidWorks	10
3.2 Dassault SolidCAM	16
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> – Διαδικασία σχεδιασμού μοντέλου και δημ κατεργασίας	ιιουργίας
4.1 Μεθοδολογία	22
4.2 Πτερωτή απλής γεωμετρίας  (Impeller 1)	
4.2.1 Σχεδίαση μοντέλου	23
4.2.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας	26
4.2.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας	27
4.3 Πτερωτές γεωμετρίας βαθμιαία αυξανόμενης πολυπλοκότητας	
(Impeller 2, 3, 4 και 5)	
4.3.1 Σχεδίαση μοντέλων	
4.3.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας	
4.3.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας	
4.4 Πτερωτή πολύπλοκης γεωμετρίας (Impeller 6)	
4.4.1 Σχεδίαση μοντέλου	
4.4.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας	
4.4.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας	40
4.4.4 Επιλογή του κοπτικού εργαλείου	43
4.4.5 Επιλογή των συνθηκών κοπής	44

Κεφάλαιο 5° - Παρουσίαση των κατεργασιών που έλαβαν χα πλαίσια της εργασίας	ώρα στα
5.1 Impeller 1	45
5.2 Impeller 2	50
5.3 Impeller 3	56
5.4 Impeller 4	62
5.5 Impeller 5	66
5.6 Impeller 6	70
κεφαλαίο 6° – Ι ενικευση της γεωμετρίας της πτερωτης 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής	82
κεφαλαίο 6° – Ι ενικεύση της γεωμετρίας της πτερωτης 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής 6.2 Εισαγωγή δεδομένων	82 82
κεφαλαίο 6° – Ι ενικεύση της γεωμετρίας της πτερωτης 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής 6.2 Εισαγωγή δεδομένων 6.3 Επεξεργασία των δεδομένων	82 82 84
κεφαλαίο 6° – Ι ενικεύση της γεωμετρίας της πτερωτης 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής 6.2 Εισαγωγή δεδομένων 6.3 Επεξεργασία των δεδομένων 6.4 Τελικό αποτέλεσμα	82 82 84 86
Κεφάλαιο 6° – Ι ενικευση της γεωμετρίας της πτερωτης 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής 6.2 Εισαγωγή δεδομένων 6.3 Επεξεργασία των δεδομένων 6.4 Τελικό αποτέλεσμα Κεφάλαιο 7° – Συμπεράσματα	82 82 84 86 88

## <u>Κεφάλαιο 1° – Εισαγωγή</u>

#### 1.1 Γενικά

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με την κοπή πτερωτής ακτινικού (φυγοκεντρικού) συμπιεστή σε Κέντρο Κατεργασιών CNC τεσσάρων αξόνων με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού CAD/CAM (Dassault SolidWorks & SolidCAM).

Η πτερωτή αποτελεί ένα από τα τρία κύρια μέρη των ακτινικών συμπιεστών που χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση και μεταφορά ρευστού υπό υψηλή ταχύτητα, πίεση και θερμοκρασία και περιστρέφεται με μεγάλες ταχύτητες. Σκοπός των συμπιεστών είναι η αύξηση της πίεσης του ρευστού με την πρόσδοση κινητικής ενέργειας/ταχύτητας σε μια συνεχή ροή ρευστού μέσω της πτερωτής. Η κινητική ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε αύξηση της δυναμικής ενέργειας/στατικής πίεσης με επιβράδυνση της ροής μέσω ενός διαχύτη.

Τα τελευταία χρόνια αρκετά συστήματα CAD/CAM έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές. Η αυξανόμενη και βελτιωμένη διαθεσιμότητα πανίσχυρων λογισμικών CAD/CAM παρέχει εξαιρετική ικανότητα μοντελοποίησης επιφανειών, καθιστώντας δυνατή την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας εξαρτημάτων συμπεριλαμβανομένων αυτών για αεροπλάνα, πλοία και αυτοκίνητα. Επιφάνειες περίπλοκης μορφής συχνά κατασκευάζονται με τη χρήση 5-αξονικών εργαλειομηχανών. Η ικανότητα κατεργασίας των 5-αξονικών εργαλειομηχανών είναι πολύ καλύτερη από αυτή των παραδοσιακών 3-αξονικών η 4-αξονικών εργαλειομηχανών. Για αυτό το λόγο προτιμώνται συνήθως για την κατασκευή τεμαχίων με επιφάνειες περίπλοκων χαρακτηριστικών, όπως είναι οι πτερωτές φυγοκεντρικών συμπιεστών.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια να ανακαλυφθούν τα όρια στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας πτερωτής μέσα στα οποία μπορεί αυτή να κατασκευαστεί με τη χρήση εργαλειομηχανής τεσσάρων αξόνων συντεταγμένων. Βασικό περιορισμό κάτω από τον οποίο τελέστηκε η μελέτη αποτελεί η έλλειψη αρκετής ελευθερίας κίνησης του κοπτικού εργαλείου ώστε να επιτύχει την επιθυμητή γεωμετρία των πτερυγίων της πτερωτής.

Αναπτύχθηκε μεθοδολογία για τη σχεδίαση και την δημιουργία κατεργασίας για διάφορα μοντέλα πτερωτής βαθμιαία αυξανόμενης πολυπλοκότητας της γεωμετρίας με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού CAD/CAM. Στη συνέχεια επιλέχθηκε η πολυπλοκότερη γεωμετρία πτερωτής για κοπή στο κέντρο κατεργασιών OKUMA του μηχανουργικού εργαστηρίου της Σχολής και τέλος επιχειρήθηκε γενίκευση της γεωμετρίας της πτερωτής με το μετασχηματισμό του G κώδικα ώστε να ταιριάξει στο κλιμακοποιημένο μοντέλο.

#### 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

1. Εισαγωγή. Παρουσιάζεται συνοπτικά η γενική ιδέα της εργασίας και τα τμήματα που την αποτελούν.

2. Θεωρητικό μέρος. Αναλύεται η γεωμετρία της πτερωτής ακτινικού συμπιεστή και πραγματοποιείται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τις μεθόδους κατασκευής πτερωτών ακτινικών συμπιεστών σε πολύ-αξονικές

3. Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου λογισμικού CAD/CAM. Παρουσιάζεται σύντομα το λογισμικό CAD/CAM (SolidWorks & SolidCAM) που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εργασίας, εστιάζοντας στις ιδιότητες σχεδίασης και μοντελοποίησης του SolidWorks και προσομοίωσης, δημιουργίας διαδρομής εργαλείου και στρατηγικών κοπής στο SolidCAM.

4. Διαδικασία σχεδιασμού μοντέλου και δημιουργίας κατεργασίας. Περιγράφεται η μεθοδολογία και η πορεία που ακολουθήθηκε μέχρι την επιτυχή προσομοίωση κατασκευής πτερωτής που περιέχει όλες τις λειτουργικές γεωμετρικές παραμέτρους των πτερυγίων ξεκινώντας από πτερωτή απλουστευμένης γεωμετρίας, πάντα υπό τον περιορισμό των κινήσεων του εργαλείου που οφείλονται στη χρήση συστήματος συντεταγμένων τεσσάρων αξόνων.

5. Παρουσίαση των κατεργασιών που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της εργασίας. Περιγράφονται με τη βοήθεια εικόνων από την προσομοίωση τα βασικά βήματα των κατεργασιών που δημιουργήθηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής της πτερωτής.

6. Γενίκευση της γεωμετρίας της πτερωτής. Παρουσιάζεται η διαδικασία προσαρμογής του G κώδικα στην εφαρμογή κλίμακας στην γεωμετρία της πτερωτής με τη χρήση του λογισμικού MS Excel.

7. Συμπεράσματα. Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται στην παρούσα εργασία σχετικά με τα αποτελέσματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και την ευκολία υλοποίησης της.

Βιβλιογραφία

## Κεφάλαιο 2° – Θεωρητικό μέρος

#### 2.1 Πτερωτή ακτινικού (φυγοκεντρικού) συμπιεστή

Η κινητή πτερύγωση σε ένα ακτινικό συμπιεστή ονομάζεται πτερωτή (impeller), αποτελεί κύριο μέρος του συμπιεστή και συνήθως χωρίζεται σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος ονομάζεται επαγωγός (inducer), μοιάζει με πτερύγιο αξονικού συμπιεστή και πραγματοποιεί στροφή της ροής που εισέρχεται στην πτερωτή πάνω σε αξονικές επιφάνειες ροής. Το δεύτερο μέρος είναι το καθαρά ακτινικό μέρος της ροής (exducer). Η γεωμετρία της πτερωτής αποτελείται από τις επιφάνειες πίεσης (pressure surface) και αναρρόφησης (suction surface), το μέτωπο πρόσπτωσης (leading edge), την ακμή εκφυγής (trailing edge), τα πτερύγια (main blades) και τα διαχωριστικά πτερύγια (splitter vanes). Στο σχήμα 2.1.1 παρουσιάζεται ο τύπος πτερωτής χωρίς διαχωριστικά πτερύγια, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2.1.1 Γεωμετρία πτερωτής χωρίς διαχωριστικά πτερύγια

Κατά την μοντελοποίηση των πτερωτών γίνεται χρήση καμπύλων τμημάτων, π.χ. δύο καμπύλες hub και δύο καμπύλες shroud που προκύπτουν από το λόγο συμπίεσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.2. Το πτερύγιο μοντελοποιείται με ευθειογενή επιφάνεια και σχηματίζει τέλεια συμμετρία ως προς τον άξονα περιστροφής. Η ακμή πρόσπτωσης μοντελοποιείται με επιφάνεια fillet για ομαλότερη ροή.

Συνήθως, μέσω προκαταρτικούς αεροδυναμικούς και ρευστομηχανικούς υπολογισμούς, η καμπύλη hub λαμβάνεται με τη χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Η περιστροφή της καμπύλης hub γύρω από τον άξονα περιστροφής σχηματίζει την επιφάνεια hub. Η επιφάνεια shroud προσδιορίζει το εξωτερικό σχήμα του πτερυγίου. Η επιφάνεια του πτερυγίου περικλείεται από την επιφάνεια shroud, την επιφάνεια αναρρόφησης και την επιφάνεια

πίεσης. Η περιστροφή της καμπύλης shroud γύρω από τον άξονα περιστροφής σχηματίζει την επιφάνεια shroud. Να σημειωθεί πως η επιφάνεια shroud δεν υφίσταται πραγματικά στην τελική πτερωτή.



Σχήμα 2.1.2 Γραφική απεικόνιση των hub και shroud

Η πρώτη ύλη (stock material) κατασκευάζεται με τόρνευση για να παραχθεί το σχήμα της επιφάνειας shroud. Ο στόχος του προγραμματισμού της διαδρομής του εργαλείου κατά την κατεργασία της πτερωτής είναι η δημιουργία κίνησης κοπής με την οποία η γεωμετρία του τεμαχίου μετασχηματιστεί με ακρίβεια από την πρώτη ύλη στο σχεδιασμένο μοντέλο.



Σχήμα 2.1.3 Η πρώτη ύλη (stock model) της πτερωτής

#### 2.2 Μέθοδοι κατασκευής πτερωτών ακτινικού συμπιεστή

Η πτερωτή ακτινικού συμπιεστή είναι ένα σημαντικό εξάρτημα ευρέως χρησιμοποιούμενο σε αερο-διαστημικές, ναυτιλιακές, ενεργειακές και στροβιλομηχανικές βιομηχανίες. Η γεωμετρία της είναι αρκετά περίπλοκη. Η χύτευση χρησιμοποιείται για την παραγωγή τεμαχίων ανάλογης πολυπλοκότητας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για παραγωγή μεγάλου όγκου. Παρ' όλα αυτά, οι μηχανικές ιδιότητες του χυτού μπορεί να μην πληρούν τις λειτουργικές απαιτήσεις των πτερωτών, οι οποίες βρίσκονται διαρκώς σε λειτουργία υπό συνθήκες υψηλών τάσεων και θερμοκρασιών.

Εναλλακτικά η κατεργασία με τη χρήση πολύ-αξονικών εργαλειομηχανών CNC προσφέρει ευελιξία στην κίνηση του εργαλείου κατά τη μορφοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών. Τα κατεργασμένα τεμάχια έχουν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων. Η μηχανουργική κατεργασία αυτή θεωρείται επομένως κατάλληλη για την κατασκευή πτερωτών. Αυτή τη στιγμή στη βιομηχανία οι περισσότερες φυγοκεντρικές πτερωτές ακριβείας παράγονται με κατεργασία σε εργαλειομηχανές CNC πέντε αξόνων. Ο σχεδιασμός της διαδρομής του εργαλείου (tool path planning) σε πολύ-αξονικές κατεργασίες ελεύθερης μορφής αποτελεί δύσκολο έργο που στερείται συστηματικών λύσεων, είναι χρονοβόρο, επιρρεπές σε σφάλματα και συχνά αποτελεί το σημείο καθυστέρησης (bottleneck) της όλης διαδικασίας στην παραγωγή της πτερωτής. Αρκετοί επιδραστικοί παράγοντες χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό της διαδρομής του εργαλείου όπως η ποιότητα της κατεργασίας, η αποδοτικότητα της διαδρομής του εργαλείου και η αποφυγή συγκρούσεων. Τα εργαλεία των εμπορικών λογισμικών CAM αποτυγχάνουν να υποστηρίξουν την αυτόματη δημιουργία 5που απαιτούνται στην κατεργασία αξονικών διαδρομών εργαλείου φυγοκεντρικών πτερωτών, σύμφωνα με τους Chu και Lee (2010).

Από την άλλη πλευρά, οι προηγούμενες ερευνητικές μελέτες αφορούσαν κυρίως μεμονωμένα θέματα της 5-αξονικής κατεργασίας ελεύθερης μορφής γενικών γεωμετριών. Τα περισσότερα από αυτά εστιάζουν στη δημιουργία διαδρομής του εργαλείου κατά το στάδιο του φινιρίσματος. Ο Rehsteiner (2003) πρότεινε μία μέθοδο που βασίζεται στην αναγωγή σε πίνακα για την προσαρμογή του προσανατολισμού του εργαλείου για 5-αξονικό φρεζάρισμα στραμμένων ευθειογενών επιφανειών (twisted ruled surfaces) χωρίς συγκρούσεις. Εστιάζοντας στο 5-αξονικό πλευρικό φρεζάρισμα, οι Bed et al. (2003) ανέλυσαν τη σχέση ανάμεσα στη θέση του εργαλείου και τα επακόλουθα σφάλματα της κατεργασίας όπως το μέγεθος της υποκοπής και της υπερκοπής μιας ευθυγενούς επιφάνειας. Πρότειναν έναν ευρετικό αλγόριθμο για τον καθορισμό του άξονα του εργαλείου σε κάθε θέση κοπής για τη μείωση του σφάλματος. Οι Menzel et al. (2004) πρότειναν ένα σχέδιο βελτιστοποίησης το οποίο ελαχιστοποιεί την παρεμβολή του εργαλείου στην κατεργαζόμενη επιφάνεια. Οι Wu et al. (2008) μετασχημάτισαν το σχεδιασμό της διαδρομής του εργαλείου στο 5-αξονικό πλευρικό φρεζάρισμα σε ένα πρόβλημα ταιριάσματος καμπυλών. Χρησιμοποιήθηκε δυναμικός δημιουργηθεί βέλτιστο προγραμματισμός για να ένα ταίριασμα χρησιμοποιώντας το σφάλμα της επιφάνειας κατεργασίας σαν αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή η μέθοδος παρέχει συστηματικό έλεγχο του σφάλματος κατεργασίας. Παρόμοιες μελέτες που αφορούν τη μείωση του σφάλματος κατεργασίας περιλαμβάνουν αυτές των Liu (1995), Tsay και Her (2001), Lartique et al. (2003).

Άλλες μελέτες προσπάθησαν να παράσχουν μια συστηματική μέθοδο για την αποφυγή συγκρούσεων με το εργαλείο μέσω κατάλληλου προσδιορισμού του προσανατολισμού του εργαλείου. Οι Cho et al. (1997) εφάρμοσαν τη δυνητική θεωρία για δημιουργία διαδρομής εργαλείου κατά κατεργασία πτερωτής. Οι γενικές συγκρούσεις και οι τοπικές παρεμβολές εξαλείφονται φορτίζοντας την επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την επιφάνεια του τεμαχίου με στατικό ηλεκτρισμό. Οι Hsueh et al. (2007) πρότειναν μία μέθοδο δύο βημάτων για την αποτροπή σύγκρουσης του εργαλείου σε 5-αξονικές κατεργασίες. Κάθε βήμα προσαρμόζει τη γωνία κλίσης και τη γωνία εκτροπής αναλόγως. Με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου κατασκευάστηκε μία πτερωτή. Οι Wang και Tang (2007) ξεπέρασαν σοβαρά μειονεκτήματα των προηγούμενων μελετών που αφορά την αποφυγή συγκρούσεων σε 5αξονικές κατεργασίες, όπως για παράδειγμα το γεγονός πως το εργαλείο χρειάζεται να κάνει δραστικές μεταβολές στον προσανατολισμό του ανάμεσα σε γειτονικά σημεία επαφής. Ο αλγόριθμος τους δημιουργεί αυτόματα μια διαδρομή εργαλείου η οποία όχι μόνο δεν έχει παρεμβολές αλλά επιπλέον εγγυάται τη συμβατότητα της γωνιακής ταχύτητας.

Λιγότερες μελέτες ερευνούν το σχεδιασμό διαδρομής του εργαλείου κατά το στάδιο της εκχόνδρισης 5-αξονικής κατεργασίας. Οι Bohez et al. (1997) παρουσίασαν μια συνολική διαδικασία για την κατεργασία μιας πτερωτής εστιάζοντας στην εφαρμογή 5-αξονικού πλευρικού φρεζαρίσματος στις επιφάνειες του πτερυγίου που παριστάνονται με ευθειογενείς επιφάνειες. Οι Young και Chuang (2003) πρότειναν ένα πλαίσιο σχεδιασμού υψηλού επιπέδου για 5-αξονικό φρεζάρισμα των πτερωτών με ολοκληρωμένες προσεγγίσεις. Εξέτασαν ταυτόχρονα τα ζητήματα των ποιοτικών απαιτήσεων του κατεργαζόμενου τεμαχίου, της σύγκρουσης και παρεμβολής του εργαλείου και της σύγκρισης των σφαλμάτων τη κατεργασίας. Н μεταγενέστερη μελέτη τους (Young και Chuang 2007) βελτίωσε το σχεδιασμό της διαδρομής του εργαλείου κατά την εκχόνδριση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του σταθερού ύψους αποβλήτου. Οι Heo et al. (2008) ανέπτυξαν ένα αποδοτικό σχέδιο διαδρομής εκχόνδρισης για την 5-αξονική CNC κατεργασία μιας πτερωτής. Η περιοχή προς εκχόνδριση χωρίστηκε σε αρκετές μοναδιαίες περιοχές κατεργασίας από τις χαρακτηριστικές καμπύλες της πτερωτής και των γραφημάτων προβολής τους. Μια τέτοια μοναδιαία περιοχή μπορεί να κατεργαστεί με παραδοσιακή 3-αξονική κατεργασία, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την αποδοτικότητα της κατεργασίας.

Ο σχεδιασμός των πτερωτών γίνεται περισσότερο σύνθετος εξαιτίας της απαίτησης υψηλότερων επιδόσεων των στροβιλομηχανών. Ένα απλό παράδειγμα είναι η προσθήκη διαχωριστικών πτερυγίων για να αυξηθεί η λειτουργική αποδοτικότητα της συμπίεσης του ρευστού. Έτσι μεταβάλλεται η τοπολογία και η γεωμετρία μιας πτερωτής σε μεγάλο βαθμό και χρειάζεται να τροποποιηθεί αναλόγως ο σχεδιασμός της διαδρομής του εργαλείου κατά την κατεργασία πτερωτών. Σε αυτή την κατεύθυνση οι Chu και Lee (2010) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για το σχεδιασμό της διαδρομής του εργαλείου κατά το 5-αξονικό φρεζάρισμα πτερωτών με διαχωριστικά πτερύγια. Το αποτέλεσμα της έρευνας απέδειξε την αποτελεσματικότητα της μελέτης στην αυτοματοποίηση του σχεδιασμού της διαδρομής του εργαλείου σε πτερωτές ιδιαίτερα υψηλής πολυπλοκότητας.

Όσον αφορά την κατεργασία πτερωτών σε εργαλειομηχανές με συστήματα συντεταγμένων 4 αξόνων, οι Suh και Lee (1991) ανέπτυξαν ένα σύστημα CAM για 4-αξονική NC κατεργασία τεμαχίων με περιστροφικές ελεύθερες επιφάνειες (Rotational Free Surfaces, FRS). Τυπικό βιομηχανικό τεμάχιο που αποτελείται από FRS αποτελεί η πτερωτή φυγοκεντρικού συμπιεστή. Στα πλαίσια της μελέτης παρουσιάστηκαν αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό της διαδρομής του εργαλείου και της περιστροφής του τεμαχίου (CL Data), αναπτύχθηκε γεωμετρικός μοντελοποιητής, γραφικός προσομοιωτής και μετα-επεξεργαστής (post-processor).

### <u>Κεφάλαιο 3° – Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου</u> <u>λογισμικού CAD/CAM</u>

#### 3.1 Dassault Solidworks

To Solidworks είναι ένα λογισμικό 3D MCAD(Mechanical Computer Aided Design, Μηχανολογικός Σχεδιασμός με την Βοήθεια Υπολογιστή) που αναπτύχθηκε από την Dassault Systemes SolidWorks Corp. Χρησιμοποιείται αυτήν την στιγμή από περίπου 1,3 εκατομμύριο μηχανικούς και σχεδιαστές σε περισσότερες από 130.000 επιχειρήσεις παγκοσμίως. Αυτό που το ξεχωρίζει από άλλα λογισμικά 3D MCAD (CATIA, Pro-E, κ.λπ.) είναι η σχέση ποιότητας - τιμής που συνδυάζεται με τα ισχυρά εργαλεία που προσφέρονται. Εκτός από ένα ισχυρό περιβάλλον σκιτσογράφου, διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό διαθέσιμων εργαλείων μοντελοποίησης στερεών. Επίσης προσφέρονται εργαλεία σχετικά με την επιφάνεια, τη συναρμολόγηση, τη συγκόλληση, τη σχεδίαση και άλλα. Το SolidWorks έχει ένα καινοτόμο χαρακτηριστικό που επιτρέπει το σχεδιασμό μερών που μοιράζονται την ίδια βασική γεωμετρία αλλά με μερικές διαφορές, αρκετά εύκολα. Μπορείτε να δημιουργήσετε τις διαφορετικές διαμορφώσεις του ίδιου μέρους χρησιμοποιώντας ένα φύλλο εργασίας του MS Excel διευκρινίζοντας τη διάσταση προς αλλαγή. Μόλις σχεδιαστούν τα τμήματα, μπορείτε να δημιουργήσετε τα διδιάστατα σχέδιά τους, να τα αναλύσετε χρησιμοποιώντας το COSMOS. Στις νεώτερες εκδόσεις, μπορείτε ακόμη και να ελέγξετε εάν το εξάρτημα μπορεί να κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας το πρόσθετο DFM (Desian For Manufacture). Περιλαμβάνει επίσης το πρόσθετο PhotoWorks. Αυτό χρησιμοποιείται για να αποδώσει τα μοντέλα και να τους δώσει μία αίσθηση πραγματικού κόσμου. Μπορείτε να θέσετε τα υλικά, το περιβάλλον, τα σχέδια φωτισμού και έπειτα να αποδώσετε το μοντέλο σας.

Το SolidWorks είναι ένας σχεδιαστής στερεών που βασίζεται στο λογισμικό Parasolid, και χρησιμοποιεί μια προσέγγιση που βασίζεται σε παραμέτρους και χαρακτηριστικά για να δημιουργήσει τα μοντέλα και τις συνδεσμολογίες. Οι παράμετροι αναφέρονται στους περιορισμούς οι τιμές των οποίων καθορίζουν τη μορφή ή τη γεωμετρία του μοντέλου ή του συναρμολογήματος. Οι παράμετροι μπορούν να είναι είτε αριθμητικές, όπως τα μήκη γραμμών είτε οι διάμετροι κύκλων, είτε γεωμετρικές παράμετροι, όπως η εφαπτομενικότητα, η παραλληλία, η ομοκεντρικότητα, οριζόντιος είτε κάθετος, κ.λπ. Οι αριθμητικές παράμετροι μπορούν να συνδεθούν η μια με την άλλη μέσω της χρήσης των σχέσεων, οι οποίες τους επιτρέπουν να συλλάβει τις προθέσεις του σχεδιασμού. Οι προθέσεις του σχεδιασμού είναι πώς ο σχεδιαστής του μέρους το θέλει να ανταποκριθεί στις αλλαγές και τις αναπροσαρμογές. Παραδείγματος χάριν, θα θέλατε η τρύπα στο στόμιο ενός δοχείου να μείνει στην κορυφαία επιφάνεια, ανεξάρτητα από το ύψος ή το

τρύπα είναι ένα χαρακτηριστικό στην κορυφαία επιφάνεια, και θα διατηρήσει έπειτα την πρόθεση σχεδιασμού σας ανεξαρτήτου του ύψους που δώσατε στο δοχείο αργότερα. Τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στις δομικές μονάδες του μοντέλου. Είναι οι μορφές και οι διαδικασίες που κατασκευάζουν το μοντέλο. Τα χαρακτηριστικά που βασίζονται στη μορφή αρχίζουν συνήθως με ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο σκίτσο των μορφών όπως οι εξέχοντες όγκοι ,οι οπές, οι αυλακώσεις, κ.λπ. Αυτή η μορφή εξωθείτε ή περικόπτεται για να προσθέσει ή να αφαιρέσει το υλικό από το μοντέλο. Τα χαρακτηριστικά που βασίζονται στη λειτουργία δεν βασίζονται στο σκίτσο, και περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως fillets, chamfers και κελύφη, που εφαρμόζουν το σχέδιο στις όψεις ενός μοντέλου.

Η δημιουργία ενός μοντέλου στο SolidWorks αρχίζει συνήθως με ένα διδιάστατο σκίτσο. Το σκίτσο αποτελείται από τη γεωμετρία όπως τα σημεία, οι γραμμές, τα τόξα, τα κωνικά (εκτός από την υπερβολή), και τα splines. Οι διαστάσεις προστίθενται στο σκίτσο για να καθορίσουν το μέγεθος και τη θέση της γεωμετρίας. Οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις ιδιότητες όπως η εφαπτομενικότητα, η παραλληλία, ŋ καθετότητα, και η ομοκεντρικότητα. Η παραμετρική φύση του SolidWorks σημαίνει ότι οι διαστάσεις και οι σχέσεις οδηγούν τη γεωμετρία, όχι το ανάποδο. Οι διαστάσεις στο σκίτσο μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, ή από συσχετισμούς με άλλες παραμέτρους μέσα ή έξω από στο σκίτσο. Σε μια συνδεσμολογία, το ανάλογο στις σχέσεις σκίτσων είναι ο συσχετισμός εξαρτημάτων. Ακριβώς όπως οι σχέσεις σκίτσων καθορίζουν τους όρους όπως η εφαπτομενικότητα, η παραλληλία και η ομοκεντρικότητα όσον αφορά τη γεωμετρία σκίτσων, ο συσχετισμός εξαρτημάτων καθορίζει ισοδύναμες σχέσεις όσον αφορά τα επιμέρους μέρη ή τα εξαρτήματα, που επιτρέπουν την εύκολη κατασκευή των συνδεσμολογιών. Το SolidWorks περιλαμβάνει επίσης πρόσθετα προηγμένα χαρακτηριστικά συσχετισμού οι οποίοι επιτρέπουν στις διαμορφωμένες συνδεσμολογίες γραναζιών να αναπαραγάγουν ακριβώς την περιστροφική κίνηση ενός πραγματικού συστήματος μετάδοσης.

Τέλος, τα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν είτε από τα μέρη είτε τις συνδεσμολογίες. Οι όψεις παράγονται αυτόματα από το στερεό πρότυπο, και οι σημειώσεις, οι διαστάσεις και οι ανοχές μπορούν έπειτα να προστεθούν εύκολα στο σχέδιο όπως απαιτούνται. Η μονάδα σχεδίασης περιλαμβάνει τα περισσότερα μεγέθη χαρτιού και πρότυπα (ANSI, ISO, DIN, GOST, JIS, BSI και SAC).

Το SolidWorks είναι ένα πλήρες 3D μηχανολογικό εργαλείο για σχεδιασμό προϊόντων, προσφέροντας στη σχεδιαστική ομάδα όλα τα απαραίτητα εργαλεία για μηχανολογικό σχεδιασμό, επικύρωση, προσομοίωση κίνησης μηχανισμών, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (αντοχής και ροής), φωτορεαλισμό, διαχείριση δεδομένων από ομάδες και πολλά εργαλεία επικοινωνίας. Εξάγει τα γεωμετρικά δεδομένα σε πληθώρα ουδέτερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (IGES, STEP, PARASOLID, VRML, STL κ.α.), δίνοντας τη δυνατότητα για περεταίρω επεξεργασία τους και με άλλα λογισμικά εργαλεία.

Με το SolidWorks όλα τα σχεδιαστικά δεδομένα του υπό σχεδίαση αντικειμένου ή μηχανολογικού συνόλου είναι 100% παραμετρικά, επεξεργάσιμα και τροποποιήσιμα, η δε διασύνδεση ανάμεσα στα 3D μοντέλα (parts), συνδεσμολογίες (assemblies) και 2D σχέδια (drawings) που τα απαρτίζουν είναι πάντα άμεση και ανταποκρίνεται σε κάθε αλλαγή που γίνεται. Επίσης, η διασύνδεση με λογισμικά εργαλεία τρίτων εταιριών λογισμικού (π.χ. CAE, CAM, Flow), είναι δυνατή και άμεση μέσα από το ίδιο το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης (GUI) του ίδιου του προγράμματος.

Με το SolidWorks μειώνονται τα βήματα σχεδιασμού και οι περιττές κινήσεις μέσα από μία πληθώρα καινοτόμων εργαλείων «εξοικονόμησης χρόνου». Η αναζήτηση παλιότερων σχεδίων είναι πολύ εύκολη και η επαναχρησιμοποίηση τμημάτων των σχεδίων αυτών μας επιτρέπει να σχεδιάζουμε πιο αποδοτικά.

Με το SolidWorks μπορούν να αυτοματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες σχεδιαστικές διαδικασίες και να δημιουργηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί πολλών παραμέτρων.

Το περιβάλλον SolidWorks παρέχει συνοπτικά και κωδικοποιημένα τις εξής δυνατότητες :

• Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων (2D drawings).

Συμφωνία με τα πρότυπα και την υπάρχουσα τυποποίηση μηχανολογικού σχεδιασμού (DIN, ISO κλπ).

• Αυτόματες λίστες υλικών (BOM) με τα χαρακτηριστικά τους.

Αμφίδρομη συμβατότητα και ενημέρωση με την αντίστοιχη 3D συνδεσμολογία.

• Πλήρη και αυτόματη διαστασιολόγηση.

• Σύγκριση μοντέλων και κατασκευαστικών σχεδίων.

 Δυνατότητα κίνησης σε 2D σκαριφήματα (sketch blocks) και εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας ενός μηχανισμού, πριν η σχεδίαση προχωρήσει στον τρισδιάστατο σχεδιασμό.

• Συνδυασμός ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών από διαφορετικά SolidWorks αρχεία και διατήρηση των «παλιών» ρυθμίσεων κατά τη δημιουργία νέων αντικειμένων.

 Γρήγορη δημιουργία συνδεσμολογιών με τη χρήση έξυπνων κανόνων συναρμογών και γειτνίασης (smart mates). Με κάθε αλλαγή ενός εξαρτήματος στη συνδεσμολογία (assembly),τα υπόλοιπα εξαρτήματα προσαρμόζονται αυτόματα στις νέες διαστάσεις των εξαρτημάτων.

 Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στερεών σωμάτων με μοναδικές δυνατότητες φυσικών συνθηκών (π.χ. επίδραση βαρύτητας). Προσομοίωση κινήσεων ιμάντων, αλυσίδων και οδοντωτών τροχών.

#### <u>Βασικές εντολές σχεδίασης</u>

Οι εντολές σχεδίασης του SolidWorks που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας για τον σχεδιασμό της πτερωτής παρουσιάζονται παρακάτω:

#### • Sketch

Το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί το βασικό, απλό και γρήγορο τρόπο σχεδίασης διδιάστατων σκίτσων στο SolidWorks τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στις υπόλοιπες εντολές με σκοπό τη δημιουργία στερεών σωμάτων. Η σχεδίαση γίνεται σε ένα από τα τρία βασικά επίπεδα (Front, Top και Right) με τη χρήση σημείων, ευθειών, καμπυλών και βασικών γεωμετρικών σχημάτων διαφόρων ειδών και την εισαγωγή σχέσεων ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία, μέσω κουμπιών που εμφανίζονται στη γραμμή εντολών της επιφάνειας εργασίας.

#### • 3-D Sketch

Ομοίως με την προηγούμενη εντολή, το 3-D Sketch επιτρέπει τη σχεδίαση σκίτσων στις τρεις διαστάσεις.

#### Revolve

Η εντολή revolve δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός στερεού σώματος δια της περιστροφής ενός διδιάστατου προφίλ περί έναν επιλεγμένο άξονα.



Εικόνα 3.1.1 Εντολή Revolve

#### • Sweep

Η συγκεκριμένη εντολή δημιουργεί ένα στερεό σώμα μέσω της σάρωσης ενός διδιάστατου προφίλ κατά μήκος μίας επιλεγμένης τριδιάστατης καμπύλης, η οποία έχει ως άκρο ένα από τα σημεία του προφίλ.



Εικόνα 3.1.2 Εντολή sweep

#### • Boss-Extrude

Ομοίως με την προηγούμενη εντολή, επιτρέπεται η σάρωση ενός διδιάστατου προφίλ κατά μήκος του άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο του προφίλ, με σκοπό τη δημιουργία ενός στερεού σώματος.



Εικόνα 3.1.3 Εντολή Boss-Extrude

#### • Circular Pattern

Η εντολή δίνει τη δυνατότητα άμεσης αναπαραγωγής σε κυκλικό μοτίβο ενός προτύπου που καθορίζεται από το σχεδιαστή. Με αυτό τον τρόπο σχεδιάστηκε μόνο ένα πτερύγιο και τα υπόλοιπα προέκυψαν με την κυκλική αναπαραγωγή του προτύπου περί τον άξονα περιστροφής της πτερωτής.



Εικόνα 3.1.4 Εντολή Circular pattern

#### • Cut Revolve

Η εντολή Cut Revolve κατά αντιστοιχία με την εντολή Revolve, επιτρέπει την αφαίρεση όγκου από ένα στερεό δια της περιστροφής ενός διδιάστατου προφίλ περί έναν επιλεγμένο άξονα.



Εικόνα 3.1.5 Εντολή Cut Revolve

#### • Fillet

Η εντολή επιτρέπει την άμεση και εύκολη δημιουργία ενός fillet ανάμεσα σε δύο επιλεγμένες επιφάνειες. Οι τύποι του fillet ου μπορεί να επιλέξει ο σχεδιαστής είναι τέσσερεις: σταθερής ακτίνας, μεταβλητής ακτίνας, μετωπικό και πλήρως κυκλικό.



Εικόνα 3.1.6 Εντολή fillet

#### Scale

Με την συγκεκριμένη εντολή επιτυγχάνεται η άμεση εισαγωγή κλίμακας σε μέρος ή στο σύνολο του εξαρτήματος. Ο σχεδιαστής εισάγει την κλίμακα και τα μέρη στα οποία θέλει να εφαρμοστεί και το λογισμικό αυτόματα προσαρμόζει το σχέδιο.

#### 3.2 Dassault SolidCAM

Το λογισμικό που προτιμήθηκε για την προσομοίωση της κατασκευής της πτερωτής και για την δημιουργία του G κώδικα είναι το SolidCAM 2010. Οι λόγοι για αυτό, εκτός φυσικά από τη διαθεσιμότητά του στο Εργαστήριο, ήταν η άμεση και εντός του γραφικού περιβάλλοντος του Solidworks συνεργασία του με αυτό (Ενσωματωμένο μενού) και η πλήρης αναγνώριση των αρχείωνμοντέλων και λοιπών παραμέτρων του Solidworks. Γενικά θεωρείται ως ένα λογισμικό δημιουργίας μηχανουργικών κατεργασιών (CAM) ικανό για αποδοτικό και επωφελή προγραμματισμό εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου (CNC).

Οι βασικές δυνατότητες του SolidCAM περιλαμβάνουν:

• Κατεργασίες 2½ και 3 αξόνων για οριζόντιο και κάθετο κέντρο κατεργασίας.

 Κατεργασίες 4 και 5 αξόνων για κοπή σε πολλαπλές πλευρές εξαρτημάτων με ένα δέσιμο.

• Κατεργασίες με ταυτόχρονη κίνηση σε 4 άξονες.

• Κατεργασίες τόρνου και με δυνατότητα χρήσης περιστρεφόμενων καθοδηγούμενων εργαλείων.

• Κατεργασίες ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (wire EDM)

 Την δυνατότητα γραφικής δυναμικής απεικόνισης της κατεργασίας και του εναπομένοντος υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής (graphic simulation).

Το SolidCAM ενσωματώνεται μέσω ενός ενιαίου παραθύρου και συνεργάζεται πλήρως με το αρχικό σχέδιο (τρισδιάστατη γεωμετρία) που έχει δημιουργηθεί στο SolidWorks. Το SolidCAM χρησιμοποιεί επίσης τα σχεδιαστικά εργαλεία του ίδιου του SolidWorks για να διαμορφώσει το μοντέλο κατεργασίας (CAM part) και να δημιουργήσει τις απαραίτητες γεωμετρίες που ορίζουν τις κατεργασίες κοπής. Όταν η γεωμετρία που χρησιμοποιείται, αλλάζει στο μοντέλο SolidWorks, το SolidCAM σε άμεση διασύνδεση συγχρονίζει αυτόματα όλες τις διαδικασίες κατεργασιών με την ανανεωμένη γεωμετρία. Η πλήρης αυτή συνεργασία του SolidCAM με το αρχικό μοντέλο SolidWorks, μειώνει δραστικά τα λάθη όταν υπάρχουν αλλαγές και βελτιώσεις στο βασικό CAD αρχείο του προς κατασκευή αντικειμένου και εξασφαλίζει τη δυνατότητα σωστής επανάληψης κατεργασιών σε μοντέλα που έχουν ήδη επεξεργαστεί και στα οποία έχουν γίνει μικρές αλλαγές.

#### Βασικά βήματα δημιουργίας προγράμματος κοπής για φρεζάρισμα

1. Αρχικά έχουμε το τριδιάστατο στερεό στο γραφικό περιβάλλον του SolidWorks.



Εικόνα 3.2.1 Τριδιάστατο στερεό στο γραφικό περιβάλλον του SolidWorks.

Ακολουθούμε την παρακάτω διαδρομή και επιλέγουμε SolidCAM > New > Milling, για να ορίσουμε νέα κατεργασία φρεζαρίσματος.

New	Milling
bpen	Turning
Manage Templates	Turn-Mill
Calculate CAM-Parts	Mill-Turn
Conv	Wire Cut
Delete	Customize Menu
Tool Library	
SolidCAM Settings	
Technology Database	
Recent CAM-Parts	
Hardware key info	
Exit SolidCAM	

Εικόνα 3.2.2 Μενού δημιουργίας νέας κατεργασίας

3. Μετά επιλέγουμε τον τύπο controller της μηχανής CNC που θα χρησιμοποιηθεί, τα απαραίτητα συστήματα συντεταγμένων, τις διαστάσεις της πρώτης ύλης (stock model), τη γεωμετρία του τελικού αντικειμένου (target model) και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά που αφορούν τις μονάδες μέτρησης, τα συστήματα συντεταγμένων, το είδος του υλικού που κατεργαζόμαστε (εάν βέβαια έχει οριστεί προηγουμένως μια βιβλιοθήκη υλικών).



Εικόνα 3.2.3 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων κατεργασίας

4. Εν συνεχεία επιλέγουμε τον τύπο κατεργασίας που θέλουμε να διεξάγουμε. Παρακάτω φαίνονται οι κατεργασίες που μπορούν να προγραμματισθούν στο SolidCAM.

Add Operation from Template Add Operations from Process Template Add Machining Process Holes Recognition + Technology	Face Profile Contour 3D Pocket Drilling
Calculate All GCode All D Calculate & GCode All	Thread Milling Slot T-Slot
Synchronize All Synchronize & Calculate All Check Synchronization for All Break Z-Levels Associativity for All	Translated Surface Pocket Recognition Drill Recognition
Simulate	3D Enggaving
Expand tree Collapse tree Hide tools in tree Hide CoordSys in tree Indent according to Tools Indent according to Coordsys	HSM HSS Sim. 5 Axes
Automatic sort Undo sort	
Delete All	

Εικόνα 3.2.4 Μενού επιλογής είδους λειτουργίας (operation)

Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκε ο τύπος κατεργασίας Simultaneous 5-Axis (Ταυτόχρονα 5-Αξονική κατεργασία) και κατόπιν εισήχθησαν περιορισμοί οι οποίοι απέτρεψαν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου κατά τον 5° Άξονα Συντεταγμένων, ώστε το τελικό αποτέλεσμα να αποτελεί κατεργασία σε 4αξονικό Σύστημα Συντεταγμένων. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά ο τύπος κατεργασίας Simultaneous 5-Axis.

5. Στο τελευταίο βήμα, στα ανάλογα πεδία δίνονται οι απαραίτητες τιμές του κοπτικού εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί και των παραμέτρων κοπής (ταχύτητες, προώσεις κλπ), ορίζονται-εξάγονται τροχιές κοπής (ομόκεντρες, ζιγκ-ζαγκ κλπ), προσομοιάζονται σε γραφικό περιβάλλον, και εξάγεται ο τελικός κώδικας κοπής (συνήθως σε μορφή αρχείου «\*.cnc»).

Technology	Operation name	Template	1
3D Milling	×		ų
Geometry Tool Levels Technology Cechnology	Geometry CoordSys MAC 1 (1- Position)  Define target  Show  Working area Define  th Axis Sth Axis		
	J.		

Εικόνα 3.2.5 Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων της κατεργασίας

#### Simultaneous 5-Axis Operation

Ο ορισμός των παραμέτρων της 5-Αξονικής κατεργασίας γίνεται μέσω του παραθύρου διαλόγου.

Operation name:	Template
•	
Pattern	Area Type:
Paralel cuts	Full, avoid cuts at exact edges
Machining angle in XY: 90 Parallel in Z: 0 Constant Z	
Geometry Drive surface	Extend/Trim     Angle range
Define Show	20 Boundary     Round corners
	Operation name:         Pattern         Parallel cuts         Machining angle         in XY:       90         Parallel         in Z:       0         Constant Z         Geometry         Drive surface         Ene         Show         Drive surface offset:

Εικόνα 3.2.6 Παράθυρο διαλόγου της 5-Αξονικής κατεργασίας

Οι παράμετροι της κατεργασίας χωρίζονται σε υποομάδες, οι οποίες είναι οι εξής:

• Technology (Τεχνολογία)

Στον τομέα της τεχνολογίας ορίζεται ο τύπος της 5-αξονικής κατεργασίας. Για τις κατεργασίες που έλαβαν χώρα στην εργασία επιλέχθηκε ο τύπος: Morph between two adjacent surfaces (Μορφή μεταξύ δύο παρακείμενων επιφανειών). Η επιλογή αυτή δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθεί η μορφοποιημένη διαδρομή του κοπτικού εργαλείου σε μία επιφάνεια-οδηγό που περικλείεται από δύο επιφάνειες ελέγχου. Η διαδρομή του εργαλείου δημιουργείται μεταξύ των επιφανειών ελέγχου και κατανέμεται ισομερώς πάνω στην επιφάνεια κατεργασίας.

- CoordSys (Σύστημα συντεταγμένων)
   Καθορίζεται η θέση του συστήματος συντεταγμένων για την 5-αξονική κατεργασία
- Geometry (Γεωμετρία)
   Επιλέγεται η γεωμετρία προς κατεργασία και ορίζεται η στρατηγική κατεργασίας και οι παράμετροί της.
- ΤοοΙ (Κοπτικό εργαλείο)
   Επιλέγεται το κοπτικό εργαλείο για την κατεργασία και ορίζονται οι σχετικές παράμετροι όπως η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου
- Levels (Επίπεδα)
   Ορίζονται τα επίπεδα κατεργασίας και η περιοχή ελεύθερου χώρου (clearance area)
- Tool path parameters (Παράμετροι κοπτικού εργαλείου)
   Ορίζονται οι παράμετροι κατεργασίας
- Link (Σύνδεση)
   Ορίζεται ο τρόπος που τα πάσα κοπής συνδέονται με ολόκληρη τη διαδρομή του εργαλείου
- Tool Axis Control (Έλεγχος του άξονα του εργαλείου)
   Καθορίζεται η διεύθυνση του άξονα του εργαλείου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Gouge Check (Έλεγχος σύγκρουσης)
   Αποφεύγεται η σύγκρουση του κοπτικού εργαλείου με την επιφάνεια κατεργασίας και τις επιφάνειες ελέγχου.
- Roughing (Offset) (Εκχόνδριση)
   Καθορίζονται οι παράμετροι της εκχόνδρισης
- Motion Limits Control (Έλεγχος ορίων κίνησης)
   Ορίζονται οι παράμετροι που σχετίζονται με την κινηματική και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μηχανής CNC.
- Miscellaneous Parameters (Διάφορες παράμετροι)
   Ορίζεται ένα πλήθος διαφόρων παραμέτρων και επιλογών που σχετίζονται με τον υπολογισμό της διαδρομής του εργαλείου.

## <u>Κεφάλαιο 4° – Διαδικασία σχεδιασμού μοντέλου και</u> δημιουργίας κατεργασίας

#### 4.1 Μεθοδολογία

Με βάση τη μορφή της πτερωτής ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή, γίνεται αμέσως κατανοητό πως η ανάγκη κατασκευής σε κέντρο κατεργασιών με σύστημα συντεταγμένων με περισσότερους από τρεις (3) άξονες συντεταγμένων οφείλεται στην ιδιαίτερη γεωμετρία των πτερυγίων. Για αυτό το λόγο, και εφόσον οι δυνατότητες ικανοποιητικής απόδοσης της επιθυμητής μορφής με τη χρήση συστήματος τεσσάρων (4) αξόνων συντεταγμένων ήταν άγνωστες στην αρχή της εκπόνησης της παρούσης εργασίας, αρχικά αποφασίστηκε ο σχεδιασμός ενός μοντέλου απλουστευμένης μορφής πτερυγίων. Στα επόμενα βήματα, μετά την επιτυχή προσομοίωση της κατασκευής του μοντέλου, προστέθηκε βαθμιαία πολυπλοκότητα στη μορφή των πτερυγίων μέχρι την επιτυχή προσομοίωση κατασκευής πτερωτής με πλήρη λειτουργικά χαρακτηριστικά. Σε κάθε διαφορετικό μοντέλο, που χαρακτηρίζεται με έναν αύξοντα αριθμό, ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία με σκοπό την επιτυχή προσομοίωση της κατασκευής της πτερωτής. Ξεκινώντας από το πλήρως απλουστευμένο μοντέλο Impeller 1 και καταλήγοντας στην επιθυμητή γεωμετρία του στόχου Impeller 6.

Αρχικά επιλέχθηκε να σχεδιαστεί πτερωτή (Impeller 1) πτερυγίων με μέση γραμμή καμπυλότητας μια ευθεία ακτινική γραμμή χωρίς καμία καμπυλότητα κατά τον άξονα περιστροφής της με σκοπό την εξοικείωση με το λογισμικό CAM και την κατανόηση των διαφόρων παραμέτρων της κατεργασίας ώστε να καταστεί δυνατός ο κατάλληλος ορισμός τους στα επόμενα μοντέλα. Στα επόμενα δύο μοντέλα (Impeller 2 και 3) η μέση γραμμή καμπυλότητας είναι υπερβολικής μορφής και δεν διέρχεται από τον άξονα περιστροφής της πτερωτής. Στα μοντέλα Impeller 4 και Impeller 5 προστέθηκε καμπυλότητα στα πτερύγια κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής τη πτερωτής και στο τελευταίο στάδιο (Impeller 6) επιτεύχθηκε εναλλαγή της καμπυλότητας των πτερυγίων κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη σχεδίαση στο SolidWorks κάθε μοντέλου ήταν τα ίδια χρησιμοποιώντας τα ίδια εργαλεία σχεδίασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η γενική μορφή των μοντέλων είναι κατά βάση όμοια, με κάθε μοντέλο να αποτελεί εξέλιξη του προηγούμενου από την άποψη της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των πτερυγίων. Παρ' όλα αυτά, κάθε μοντέλο σχεδιάστηκε από το μηδέν ξεκινώντας με το μοντέλο Impeller 1 το οποίο αποτελεί απλούστευση του μοντέλου στόχου. Όσον αφορά τη δημιουργία κατεργασίας για τα μοντέλα, επιλέχθηκε κοινή στρατηγική κατεργασίας με τις λεπτομερείς παραμέτρους να αλλάζουν κατά περίπτωση.

#### 4.2 Πτερωτή απλής γεωμετρίας (Impeller 1)

#### 4.2.1 Σχεδίαση μοντέλου

Αποτελώντας απλούστευση του τελικού μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία του μοντέλου στόχου με τη διαφορά της αντικατάστασης των πτερυγίων του μοντέλου – στόχου με τελείως επίπεδα πτερύγια, ως πρώτο βήμα.

Η άτρακτος της πτερωτής, κοινή για όλα τα μοντέλα (Impeller 1 έως και 6), προέκυψε ως περιστροφή κατά 360° ενός διδιάστατου προφίλ με τη χρήση της εντολής Revolve. Το προφίλ αυτό είναι τεθλασμένη κλειστή γραμμή που αποτελείται από τέσσερα ευθύγραμμα τμήματα και ένα τόξο κύκλου και φαίνεται στην εικόνα 4.2.1.



Εικόνα 4.2.1 Δημιουργία της ατράκτου της πτερωτής με την εντολή revolve

Ακολούθως σχεδιάστηκε ένα από τα πτερύγια με χρήση των εντολών Sweep και Cut Revolve και προστέθηκε μετωπικό fillet ανάμεσα στις επιφάνειες των πτερυγίων και της ατράκτου (hub surface) της πτερωτής. Για την εντολή Sweep το προφίλ είναι ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και τη διαδρομή (path) είναι spline η οποία διέρχεται από συγκεκριμένα σημεία που ορίστηκαν βάσει των συντεταγμένων τους.



Εικόνα 4.2.2 Εντολή sweep

Στην εντολή Cut Revolve το προφίλ είναι κλειστή τεθλασμένη γραμμή που αποτελείται από έξι ευθύγραμμα τμήματα και ένα τόξο κύκλου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2.3.



Εικόνα 4.2.3 Εντολή Cut Revolve

Κατόπιν με χρήση της εντολής Circular Pattern σχεδιάστηκαν τα υπόλοιπα επτά πτερύγια του μοντέλου, δίνοντας με αυτό τον τρόπο την επιθυμητή μορφή στο μοντέλο.



Εικόνα 4.2.4 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 1

Ως πρώτη ύλη (stock model) επιλέχθηκε κυλινδρικό σώμα του οποίου η διατομή μεταβάλλεται με τρόπο τέτοιο ώστε να ακολουθεί το εξωτερικό προφίλ των πτερυγίων. Με αυτό τον τρόπο κατά την κατεργασία απαιτείται αφαίρεση υλικού μόνο στο χώρο ανάμεσα στα πτερύγια.



Εικόνα 4.2.5 Πρώτη ύλη (stock model) για το μοντέλο πτερωτής Impeller 1

Το μοντέλο της πρώτης ύλης σχεδιάστηκε με τη βοήθεια της εντολής Revolve χρησιμοποιώντας σαν προφίλ τεθλασμένη γραμμή τμήματα της οποίας είναι όμοια με το αντίστοιχο προφίλ των πτερυγίων του target model.



Εικόνα 4.2.6. Δημιουργία της πρώτης ύλης (stock model) με την εντολή Revolve

#### 4.2.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας

Μελετώντας τη σχετική βιβλιογραφία, γίνεται άμεσα αντιληπτό πως το πρώτο στάδιο της στρατηγικής αποτελεί η αφαίρεση του μεγάλου όγκου του υλικού στο χώρο ανάμεσα στα πτερύγια με κίνηση του εργαλείου παράλληλα προς τα πτερύγια σε διαδοχικά πάσα κοπής μέχρι την άτρακτο της πτερωτής ώστε στο τελευταίο πάσο αυτό να αποκτήσει την επιθυμητή γεωμετρία. Κατόπιν δίνεται το απαιτούμενο σχήμα στα πτερύγια καθώς αφαιρείται το υπολειπόμενο υλικό με μετωπικό φρεζάρισμα κατά μήκος της πλαϊνής επιφάνειας των πτερυγίων. Στο SolidCAM χρησιμοποιήθηκε ο τύπος κατεργασίας 'Morph between two adjacent surfaces', περιγραφή του οποίου γίνεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο οποίος επιλέχθηκε ως κατάλληλος με βάση την περιγραφή από τις οδηγίες του κατασκευαστή του λογισμικού. Κατόπιν η καταλληλότητα του ως βέλτιστη επιλογή εφαρμογής της στρατηγικής επαληθεύτηκε στην πράξη με δοκιμές και των άλλων τύπων κατεργασίας. Ως προς την εφαρμογή της στρατηγικής, στο μοντέλο Impeller 1 λόγω του γεγονότος πως τα πτερύγια είναι πλήρως επίπεδα σε συνδυασμό με την κίνηση του κοπτικού εργαλείου η μορφοποίηση και των τριών επιφανειών προέκυψε με τη χρήση μίας και μόνο λειτουργίας (operation).

#### 4.2.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας

Το σύστημα συντεταγμένων ορίστηκε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η αρχή των αξόνων είναι το σημείο τομής του άξονα περιστροφής της πτερωτής με την επιφάνεια εισόδου του ρευστού στην πτερωτή, ο άξονας Χ είναι κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής όπως και ο άξονας Α με τους άξονες Υ και Ζ όπως φαίνονται στην εικόνα 4.2.7.



Εικόνα 4.2.7 Ορισμός τους συστήματος συντεταγμένων

Στην ομάδα παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία ως επιφάνεια κατεργασίας (Driving Surface) ορίζεται το τμήμα της ατράκτου της πτερωτής και ως επιφάνειες ελέγχου οι παρακείμενες επιφάνειες των πτερυγίων με τα αντίστοιχα fillets. Στην εικόνα 4.2.8 με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η επιφάνεια κατεργασίας (Drive Surface) και με το μπλε οι επιφάνειες ελέγχου.



Εικόνα 4.2.8 Με κόκκινο χρώμα η επιφ. κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου

Ο τύπος του κοπτικού εργαλείου επιλέχθηκε να είναι απλό κονδύλι σφαιρικού άκρου (ball nose mill) ώστε να διευκολυνθεί η επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας υπό τον περιορισμό της έλλειψης πέμπτου Άξονα συντεταγμένων. Εισήχθησαν στο σύστημα τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώνου συγκράτησης του εργαλείου ώστε να δοθεί η δυνατότητα ελέγχου τυχόν σύγκρουσης με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Λεπτομερής επιλογή των απαραίτητων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου με δοκιμές στο ελάχιστο απαιτούμενο ενεργό μήκος, το πάχος και άλλα χαρακτηριστικά έγινε μόνο για το τελικό μοντέλο (Impeller 6) κατά το στάδιο επιλογής του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου από τα διαθέσιμα στο εμπόριο. Στα υπόλοιπα ενδιάμεσα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά κοπτικού εργαλείου οι τιμές των οποίων ήταν προϊόν παραδοχών. Τα ακριβή χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στην εικόνα 4.2.9.

tool Picture	Tool parameters           Mm         ®         Diameter (D):         6         AD         +
• Tool Picture	Mm  Diameter (D): 6
	Inch Corner radux (R): 3 Arbor dameter (AD): 6
	Length
	Mm         Total (TL):         200         SL         CL           Strukh         Soulder length (SL):         330         SL         CL         CL           Strukh         Cutting (CL):         120         L         CL         <
	Downh Number of States

Εικόνα 4.2.9 Ακριβή χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε

Όσον αφορά τα επίπεδα κατεργασίας, η απόσταση ασφαλείας (Safety distance) ορίστηκε στα 2 mm, η απόσταση ασφαλείας για κίνηση στον αέρα (Air move safety distance) στα 10 mm και η απόσταση υπαναχώρησης (Retract distance) στα 20 mm. Επίσης επιλέχθηκε η απομάκρυνση από το κατεργαζόμενο τεμάχιο στην περιοχή ελεύθερου χώρου (Clearance Area) να γίνεται κατά τον άξονα Ζ.

Στην ομάδα παραμέτρων που αφορούν τον έλεγχο του άξονα του κοπτικού εργαλείου, και η οποία καθόρισε αποφασιστικά τη δυνατότητα επίτευξης της επιθυμητής γεωμετρίας, εισήχθη ο περιορισμός του 4-αξονικού συστήματος συντεταγμένων, ορίστηκε ο 4<sup>ος</sup> άξονας και ορίστηκε η διεύθυνση του άξονα του εργαλείου ως περιστρεφόμενη περί τον άξονα Χ. Επίσης

τέθηκαν κάποια όρια όσον αφορά τις γωνίες περιστροφής του άξονα του εργαλείου στο επίπεδο YZ.

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι επιφάνειες τις οποίες θα πρέπει το λογισμικό να λαμβάνει υπόψη του για αποφυγή συγκρούσεων με το κοπτικό εργαλείο ή άλλα μέρη της εργαλειομηχανής κατά την κίνηση του. Τέλος ορίστηκε ο αριθμός των πάσων κοπής και το βάθος κοπής σε κάθε πάσο (5 mm) και εισήχθησαν τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να επαναληφθεί αυτόματα η κατεργασία και στα υπόλοιπα επτά διαστήματα ώστε να ολοκληρωθεί πλήρως η μορφή της πτερωτής.

Το σύνολο της διαδικασίας επιλογής κατάλληλων παραμέτρων κατεργασίας περιλαμβάνει πολλές επαναλήψεις δοκιμών, αρκετές από τις οποίες απεδείχθησαν λανθασμένες, και ελέγχου του αποτελέσματος με τη βοήθεια των διαφόρων εργαλείων προσομοίωσης της κατεργασίας μέχρι την τελική επίτευξη του απαιτούμενου στόχου. Εικόνες από τα διάφορα στάδια της προσομοίωσης της κατεργασίας των μοντέλων παρατίθενται στο Παράρτημα.

# 4.3 Πτερωτές γεωμετρίας βαθμιαία αυξανόμενης πολυπλοκότητας (Impeller 2, 3, 4 και 5)

#### 4.3.1 Σχεδίαση μοντέλων

• 4.3.1.1 Impeller 2

Κατά την σχεδίαση του μοντέλου Impeller 2 ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα με το προηγούμενο μοντέλο με τη διαφορά πως κατά το σχεδιασμό των πτερυγίων έγινε χρήση της εντολής Boss-Extrude αντί της Sweep. Το προφίλ που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο τόξα κύκλου και δύο ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τα άκρα των τόξων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.3.1 και επεκτείνεται κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής της πτερωτής.



Εικόνα 4.3.1 Εντολή Boss-Extrude

Στην εικόνα 4.3.2 παρατίθεται το ολοκληρωμένο μοντέλο του Impeller 2.



Εικόνα 4.3.2 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 2

#### • 4.3.1.2 Impeller 3

Τα βήματα σχεδίασης που ακολουθήθηκαν για τον Impeller 3 είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά του Impeller 2. Η μόνη διαφορά είναι πως χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά τόξα κύκλου στο προφίλ της εντολής Boss-Extrude ώστε να δοθεί μεγαλύτερη καμπυλότητα στα πτερύγια. Στην εικόνα 4.3.3 παρατίθεται το ολοκληρωμένο μοντέλο του Impeller 3.



Εικόνα 4.3.3 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 3

• 4.3.1.3 Impeller 4

Κατά την σχεδίαση του μοντέλου Impeller 4 ακολουθήθηκε η διαδικασία για την σχεδίαση του Impeller 1. Στο στάδιο της σχεδίασης των πτερυγίων στην εντολή sweep το προφίλ των πτερυγίων είναι όμοιο με αυτό των πτερυγίων του Impeller 3 και τη διαδρομή που ακολουθήθηκε είναι η τριδιάστατη καμπύλη που φαίνεται στην εικόνα 4.3.4 με σκοπό να δοθεί κλίση στα πτερύγια.



Εικόνα 4.3.4 Εντολή sweep



Στην εικόνα 4.3.5 παρατίθεται το ολοκληρωμένο μοντέλο του Impeller 4.

Εικόνα 4.3.5 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 4

• 4.3.1.4 Impeller 5

Το μοντέλο σχεδιάστηκε ομοίως με το προηγούμενο μοντέλο με τη διαφορά να εστιάζεται στην καμπύλη της διαδρομής (path) που χρησιμοποιήθηκε στην εντολή Sweep κατά τη σχεδίαση των πτερυγίων. Η διαφορά αυτή γίνεται άμεσα αντιληπτή με σύγκριση των εικόνων 4.3.4 και 4.3.6, που ακολουθεί.



Εικόνα 4.3.6 Εντολή sweep



Στην εικόνα 4.3.7 παρατίθεται το ολοκληρωμένο μοντέλο του Impeller 5.

Εικόνα 4.3.7 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 5

#### 4.3.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας

Η στρατηγική της κατεργασίας παρέμεινε η ίδια στα μοντέλα Impeller 2, 3, 4 και 5 με αλλαγές στον ορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς κάθε γεωμετρίας. Στο SolidCAM χρησιμοποιήθηκε ο τύπος κατεργασίας 'Morph between two adjacent surfaces',ως ο πλέον κατάλληλος. Ως προς την εφαρμογή της στρατηγικής, χρησιμοποιήθηκε διαφορετική λειτουργία (operation) για τη μορφοποίηση κάθε μίας από τις επιφάνειες, ξεκινώντας με την άτρακτο της πτερωτής και περνώντας στις παρακείμενες πλευρικές επιφάνειες των δύο πτερυγίων που περιέκλειαν την περιοχή προς κατεργασία. Οι τρεις αυτές λειτουργίες είχαν κοινές παραμέτρους ανά μοντέλο με μόνη διαφοροποίηση ως προς τον ορισμό της επιφάνειας κατεργασίας (Driving Surface) και των επιφανειών ελέγχου (Check surfaces) ανάλογα με την επιφάνεια που μορφοποιούταν σε κάθε λειτουργία.

#### 4.3.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας

Προκειμένου να γίνει εμφανής και ευκολότερα αντιληπτή η εξέλιξη της διαδικασίας προσδιορισμού των διαφόρων παραμέτρων όσο πολυπλοκότερη γίνεται η γεωμετρία των πτερυγίων, παρατίθενται στη συνέχεια μόνο οι αλλαγές στον ορισμό των παραμέτρων που παρατηρήθηκαν σε κάθε μοντέλο σε σχέση με το προηγούμενο του. Η ουσιώδης διαφορά ανάμεσα στα μοντέλα Impeller 2 και 3 και το μοντέλο Impeller 1 είναι η χρήση τριών λειτουργιών (operations) αντί μόνο μίας για την επιθυμητή μορφοποίηση των επιφανειών. Στην πρώτη λειτουργία μορφοποιείται η άτρακτος (hub surface) της πτερωτής ορίζοντας την ως επιφάνεια κατεργασίας (drive surface) και ως επιφάνειες ελέγχου τις παρακείμενες επιφάνειες των πτερυγίων μαζί με τα αντίστοιχα fillets. Στην εικόνα 4.3.8 με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η επιφάνεια κατεργασίας (Drive Surface) και με το μπλε οι επιφάνειες ελέγχου (Check Surfaces).



Εικόνα 4.3.8 Με κόκκινο χρώμα η επιφ. κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας hub

Σε κάθε μία από τις επόμενες δύο λειτουργίες ως επιφάνειες κατεργασίας ορίζεται η παρακείμενη επιφάνεια ενός από τα δύο πτερύγια μαζί με το αντίστοιχο fillet και ως επιφάνειες ελέγχου ορίζονται η άτρακτος (hub surface) και η εξωτερική πλευρά του πτερυγίου (shroud surface). Στις εικόνες 4.3.9 και 4.3.10 με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η επιφάνεια κατεργασίας (Driving Surface) και με το μπλε οι επιφάνειες ελέγχου (Check Surfaces), όπως αυτές ορίστηκαν για κάθε μία από τις λειτουργίες.


Εικόνα 4.3.9 Με κόκκινο χρώμα η επιφάνεια κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας του πτερυγίου



Εικόνα 4.3.10 Με κόκκινο χρώμα η επιφάνεια κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας του δεύτερου πτερυγίου

Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της κατεργασίας, όπως για παράδειγμα το κοπτικό εργαλείο, ορίστηκαν ακριβώς όπως και για το πρώτο μοντέλο. Η προσέγγιση αυτή, με τη χρήση 3 λειτουργιών ακολουθείται και σε όλα τα επόμενα μοντέλα Impeller 4, 5 και 6.

Για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας στο μοντέλο Impeller 4, χρειάστηκε να μεταβληθεί ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται η διεύθυνση του άξονα του εργαλείου κατά την κοπή. Συγκεκριμένα, αντί της περιστροφής περί τον άξονα Χ, θεωρήθηκε κατάλληλη η κλίση του άξονα περί ενός σημείου (Tilted through point) ώστε η κίνηση του εργαλείου να δώσει την επιθυμητή γεωμετρία στο τεμάχιο. Το σημείο επιλέχθηκε μετά από δοκιμή διαφόρων σημείων στο χώρο. Επίσης κρίθηκε απαραίτητη η αύξηση της απόστασης ασφαλείας από 2 mm σε 10 mm.



Σχήμα 4.3.11 Κλίση του άξονα περί ενός σημείου (Tilted through point)

Αντίστοιχα κατά την κατεργασία του μοντέλου Impeller 5, στον ορισμό της διεύθυνσης του άξονα του εργαλείου προτιμήθηκε η επιλογή της κλίσης περί καμπύλης (Tilted through curve). Η καμπύλη είναι spline και τα σημεία της, που ανήκουν στον χώρο, καθώς και η μορφή της επιλέχθηκαν μετά από δοκιμές. Η ίδια προσέγγιση επιλέχθηκε και στο τελικό μοντέλο (Impeller 6), με τη διαφορά πως για κάθε λειτουργία ορίστηκε διαφορετική καμπύλη. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι ορίστηκαν όπως και στα προηγούμενα μοντέλα.



Σχήμα 4.3.12 Κλίση του άξονα περί καμπύλης (Tilted through curve)

# 4.4 Πτερωτή πολύπλοκης γεωμετρίας (Impeller 6)

## 4.4.1 Σχεδίαση μοντέλου

Το τελικό μοντέλο σχεδιάστηκε με βάση μοντέλο πτερωτής φυγοκεντρικού συμπιεστή που επιλέχθηκε από τη βιβλιογραφία.

Η άτρακτος της πτερωτής είναι κοινή σε όλα τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν. Ο τρόπος σχεδίασης της είναι ο ίδιος με αυτόν που παρουσιάστηκε στο μοντέλο Impeller 1. Ακολούθως σχεδιάστηκε ένα από τα πτερύγια με χρήση των εντολών Sweep και Cut Revolve και προστέθηκε μετωπικό fillet ανάμεσα στις επιφάνειες των πτερυγίων και την άτρακτο (hub surface) της πτερωτής. Για την εντολή Sweep το προφίλ είναι κλειστή γραμμή που αποτελείται από δύο τόξα κύκλου και δύο ευθύγραμμα τμήματα που

ενώνουν τα άκρα των τόξων και τη διαδρομή (path) είναι spline η οποία διέρχεται από συγκεκριμένα σημεία που ορίστηκαν βάσει των συντεταγμένων τους.



Εικόνα 4.4.1 Εντολή sweep

Στην εντολή Cut Revolve το προφίλ είναι κλειστή τεθλασμένη γραμμή που αποτελείται από έξι ευθύγραμμα τμήματα και ένα τόξο κύκλου, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.4.2 Εντολή cut revolve

Κατόπιν με χρήση της εντολής Circular Pattern σχεδιάστηκαν τα υπόλοιπα οκτώ πτερύγια του μοντέλου, δίνοντας με αυτό τον τρόπο την επιθυμητή μορφή στο μοντέλο.



Εικόνα 4.4.3 Το μοντέλο πτερωτής Impeller 6

Ως πρώτη ύλη (stock model) επιλέχθηκε κυλινδρικό σώμα του οποίου η διατομή μεταβάλλεται με τρόπο τέτοιο ώστε να ακολουθεί το εξωτερικό προφίλ των πτερυγίων. Με αυτό τον τρόπο κατά την κατεργασία απαιτείται αφαίρεση υλικού μόνο στο χώρο ανάμεσα στα πτερύγια.



Εικόνα 4.4.4 Η πρώτη ύλη (stock model) του μοντέλου Impeller 6

Το μοντέλο της πρώτης ύλης σχεδιάστηκε με τη βοήθεια της εντολής Revolve χρησιμοποιώντας σαν προφίλ τεθλασμένη γραμμή τμήματα της οποίας είναι όμοια με το αντίστοιχο προφίλ των πτερυγίων του target model.



Εικόνα 4.4.5 Δημιουργία της πρώτης ύλης (stock model) με την εντολή revolve

# 4.4.2 Επιλογή στρατηγικής κατεργασίας

Η στρατηγική της κατεργασίας παρέμεινε η ίδια όπως στα μοντέλα Impeller 1, 2, 3, 4 και 5 με αλλαγές στον ορισμό των παραμέτρων της κατεργασίας ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της γεωμετρίας. Πρώτο στάδιο της στρατηγικής αποτελεί η αφαίρεση του μεγάλου όγκου του υλικού στο χώρο ανάμεσα στα πτερύγια με κίνηση του εργαλείου παράλληλα προς τα πτερύγια σε διαδοχικά πάσα κοπής μέχρι την άτρακτο της πτερωτής ώστε στο τελευταίο πάσο αυτό να αποκτήσει την επιθυμητή γεωμετρία. Κατόπιν δίνεται το απαιτούμενο σχήμα στα πτερύγια καθώς αφαιρείται το υπολειπόμενο υλικό με μετωπικό φρεζάρισμα κατά μήκος της πλαϊνής επιφάνειας των πτερυγίων. Στο SolidCAM χρησιμοποιήθηκε ο τύπος κατεργασίας 'Morph between two adjacent surfaces',ως ο πλέον κατάλληλος. Ως προς την εφαρμογή της στρατηγικής, χρησιμοποιήθηκε διαφορετική λειτουργία (operation) για τη μορφοποίηση κάθε μίας από τις επιφάνειες, ξεκινώντας με την άτρακτο της πτερωτής και περνώντας στις παρακείμενες πλευρικές επιφάνειες των δύο πτερυγίων που περιέκλειαν την περιοχή προς κατεργασία. Οι τρεις αυτές λειτουργίες είχαν κοινές παραμέτρους με μόνη διαφοροποίηση ως προς τον ορισμό της επιφάνειας κατεργασίας (Driving Surface) και των επιφανειών ελέγχου (Check surfaces) ανάλογα με την επιφάνεια που μορφοποιούταν σε κάθε λειτουργία.

#### 4.4.3 Επιλογή επιμέρους παραμέτρων της κατεργασίας

Το σύστημα συντεταγμένων ορίστηκε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η αρχή των αξόνων είναι το σημείο τομής του άξονα περιστροφής της πτερωτής με την επιφάνεια εισόδου του ρευστού στην πτερωτή, ο άξονας Χ είναι κατά την διεύθυνση του άξονα περιστροφής όπως και ο άξονας Α με τους άξονες Υ και Ζ όπως φαίνονται στο σχήμα.



Εικόνα 4.4.6 Ορισμός συστήματος συντεταγμένων

Στην ομάδα παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρία, στην πρώτη λειτουργία μορφοποιείται η άτρακτος (hub surface) της πτερωτής ορίζοντας την ως επιφάνεια κατεργασίας (drive surface) και ως επιφάνειες ελέγχου (check surfaces) τις παρακείμενες επιφάνειες των πτερυγίων μαζί με τα αντίστοιχα fillets. Στην εικόνα 4.4.7 με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η επιφάνεια κατεργασίας (Drive Surface) και με το μπλε οι επιφάνειες ελέγχου (Check Surfaces).



Εικόνα 4.4.7 Με κόκκινο χρώμα η επιφ. κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας hub

Σε κάθε μία από τις επόμενες δύο λειτουργίες ως επιφάνειες κατεργασίας ορίζεται η παρακείμενη επιφάνεια ενός από τα δύο πτερύγια μαζί με το αντίστοιχο fillet και ως επιφάνειες ελέγχου ορίζονται η άτρακτος (hub surface)και η εξωτερική πλευρά του πτερυγίου (shroud surface). Στις εικόνες 4.4.8 και 4.4.9 με το κόκκινο χρώμα διακρίνεται η επιφάνεια κατεργασίας (Driving Surface) και με το μπλε οι επιφάνειες ελέγχου (Check Surfaces), όπως αυτές ορίστηκαν για κάθε μία από τις λειτουργίες.



Εικόνα 4.4.8 Με κόκκινο χρώμα η επιφάνεια κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας του πτερυγίου



Εικόνα 4.4.9 Με κόκκινο χρώμα η επιφάνεια κατεργασίας και με μπλε οι επιφάνειες ελέγχου όπως ορίστηκαν για την λειτουργία κατεργασίας της επιφάνειας του δεύτερου πτερυγίου

Όσον αφορά τα επίπεδα κατεργασίας, η απόσταση ασφαλείας (Safety distance) ορίστηκε στα 10 mm, η απόσταση ασφαλείας για κίνηση στον αέρα (Air move safety distance) στα 10 mm και η απόσταση υπαναχώρησης (Retract distance) στα 20 mm. Επίσης επιλέχθηκε η απομάκρυνση από το κατεργαζόμενο τεμάχιο στην περιοχή ελεύθερου χώρου (Clearance Area) να γίνεται κατά τον άξονα Ζ.

Στην ομάδα παραμέτρων που αφορούν τον έλεγχο του άξονα του κοπτικού εργαλείου, και η οποία καθόρισε αποφασιστικά τη δυνατότητα επίτευξης της επιθυμητής γεωμετρίας, εισήχθη ο περιορισμός του 4-αξονικού συστήματος συντεταγμένων, ορίστηκε ο 4<sup>ος</sup> άξονας και ορίστηκε η επιλογή της κλίσης περί καμπύλης (Tilted through curve). Η καμπύλη είναι spline και τα σημεία της, που ανήκουν στον χώρο, καθώς και η μορφή της επιλέχθηκαν μετά από δοκιμές. Σε κάθε λειτουργία ορίστηκε διαφορετική καμπύλη. Επίσης τέθηκαν κάποια όρια όσον αφορά τις γωνίες περιστροφής του άξονα του εργαλείου στο επίπεδο ΥΖ.

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι επιφάνειες τις οποίες θα πρέπει το λογισμικό να λαμβάνει υπόψη του για αποφυγή συγκρούσεων με το κοπτικό εργαλείο ή άλλα μέρη της εργαλειομηχανής κατά την κίνηση του. Τέλος ορίστηκε ο αριθμός των πάσων κοπής και το βάθος κοπής σε κάθε πάσο (5 mm) και εισήχθησαν τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να επαναληφθεί αυτόματα η κατεργασία και στα υπόλοιπα οκτώ διαστήματα ώστε να ολοκληρωθεί πλήρως η μορφή της πτερωτής.

Το σύνολο της διαδικασίας επιλογής κατάλληλων παραμέτρων κατεργασίας περιλαμβάνει πολλές επαναλήψεις δοκιμών, αρκετές από τις οποίες απεδείχθησαν λανθασμένες, και ελέγχου του αποτελέσματος με τη βοήθεια των διαφόρων εργαλείων προσομοίωσης της κατεργασίας μέχρι την

τελική επίτευξη του απαιτούμενου στόχου. Εικόνες από τα διάφορα στάδια της προσομοίωσης της κατεργασίας των μοντέλων παρατίθενται στο Παράρτημα.

# 4.4.4 Επιλογή του κοπτικού εργαλείου

Ο τύπος του κοπτικού εργαλείου επιλέχθηκε να είναι απλό κονδύλι σφαιρικού άκρου (ball nose mill) ώστε να διευκολυνθεί η επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας υπό τον περιορισμό της έλλειψης πέμπτου Άξονα συντεταγμένων. Εισήχθησαν στο σύστημα τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κώνου συγκράτησης του εργαλείου ώστε να δοθεί η δυνατότητα ελέγχου τυχόν σύγκρουσης με το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Κατά το στάδιο επιλογής του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου από τα διαθέσιμα στο εμπόριο έγινε λεπτομερής επιλογή των ελάχιστων δυνατών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εργαλείου με δοκιμές στο ελάχιστο απαιτούμενο ενεργό μήκος, το πάχος και τα άλλα χαρακτηριστικά και στη συνέχεια με βάση τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών επιλέχθηκε το κατάλληλο εργαλείο από τον κατάλογο της εταιρίας SECO Tools. Ο κωδικός του εργαλείου είναι VHM 97 L 043. Τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στην εικόνα 4.4.10, όπως εισήχθησαν στο λογισμικό SolidCAM.



Εικόνα 4.4.10 Ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε

## 4.4.5 Επιλογή των συνθηκών κοπής

Κατόπιν της επιλογής του εργαλείου καθορίστηκαν οι συνθήκες κοπής με βάση τις τιμές που ορίζει ο κατασκευαστής του κοπτικού εργαλείου. Η πρόωση κατά την εκχόνδριση και το φινίρισμα ορίστηκε στα 760 mm/min και η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου στις 5000 RPM.

# Κεφάλαιο 5° - Παρουσίαση των κατεργασιών που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της εργασίας

# 5.1 Impeller 1

Κατά την κατεργασία του αρχικού (απλουστευμένου) μοντέλου Impeller 1 χρησιμοποιήθηκε μόνο μία λειτουργία για τη μορφοποίηση των επιφανειών των πτερυγίων και του hub με μετωπικό φρεζάρισμα. Ως επιφάνεια κατεργασίας ορίστηκε η επιφάνεια του hub και το κοπτικό εργαλείο κινήθηκε παράλληλα προς τις επιφάνειες των πτερυγίων. Λόγω της απλής γεωμετρίας των πτερυγίων (πλήρως επίπεδα) και της κίνησης του εργαλείου δόθηκε η επιθυμητή μορφή στα πτερύγια χωρίς να χρειαστεί επιπλέον λειτουργία.

Η κατεργασία έγινε σε έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το κάθε ένα κατά την εκχόνδριση και ένα πάσο για το φινίρισμα. Στις εικόνες 5.1.1, 5.1.2 και 5.1.3 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την προσομοίωση της κοπής κατά το πρώτο, το δεύτερο και το τελευταίο πάσο εκχόνδρισης αντίστοιχα, με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης SolidVerify.



Εικόνα 5.1.1 Πρώτο πάσο εκχόνδρισης

#### Παρουσίαση των κατεργασιών που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της εργασίας



Εικόνα 5.1.2 Δεύτερο πάσο εκχόνδρισης



Εικόνα 5.1.3 Τελευταίο πάσο εκχόνδρισης

Στην εικόνα 5.1.4 παρουσιάζεται αντίστοιχο στιγμιότυπο κατά το στάδιο του φινιρίσματος.



Εικόνα 5.1.4 Φινίρισμα της επιφάνειας hub

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και στην μορφοποίηση των υπολοίπων πτερυγίων. Στις εικόνες 5.1.5 και 5.1.6 παρατίθενται στιγμιότυπα από την κατεργασία των γειτονικών πτερυγίων.



Εικόνα 5.1.5 Κατεργασία των επόμενων πτερυγίων



Εικόνα 5.1.6 Κατεργασία των επόμενων πτερυγίων

Στην εικόνα 5.1.7 παρουσιάζεται η μορφή του τεμαχίου μετά το πέρας της κατεργασίας με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης Rest material.



Εικόνα 5.1.7 η μορφή του τεμαχίου μετά το πέρας της κατεργασίας με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης Rest material

Στην εικόνα 5.1.8 φαίνεται το γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται για την παράσταση των αποκλίσεων είναι η εξής: Κίτρινο χρώμα για υποκοπή της τάξης του εκατοστού του χιλιοστού, πορτοκαλί χρώμα για υποκοπή της τάξης του δέκατου του χιλιοστού και κόκκινο χρώμα για υποκοπή μεγαλύτερη της τάξης του δέκατου του χιλιοστού.

Τα αντίστοιχα χρώματα για τις περιπτώσεις υπερκοπής είναι το λευκό, το μπλε και το πράσινο. Όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.1.8 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 1 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

0 (	0	0	٥	
-0.1	0	0.01	0.	1 📃
Execute Use Transparen	cv	ОК		Cancel

Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στο παραπάνω γράφημα

## 5.2 Impeller 2

Για την κατεργασία του μοντέλου Impeller 2 χρησιμοποιήθηκαν τρεις λειτουργίες (operations). Κατά το πρώτο operation το εργαλείο κινείται παράλληλα προς τα πτερύγια αφαιρώντας υλικό με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας hub. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στις εικόνες 5.2.1 και 5.2.2 φαίνονται δύο στιγμιότυπα προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.2.1 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.2.2 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Στη συνέχεια ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, κατά τη διάρκεια του οποίου η κίνηση του εργαλείου είναι παρόμοια με το στάδιο της εκχόνδρισης. Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.2.3.



Εικόνα 5.2.3 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα της επιφάνειας hub όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.4.



Εικόνα 5.2.4 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της πρώτης λειτουργίας (Rest material)

Στη δεύτερη λειτουργία το εργαλείο κινείται κάθετα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου κατά μήκος της με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας αυτής. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στην εικόνα 5.2.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.2.5 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.2.6.



Εικόνα 5.2.6 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.2.6.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.7.



Εικόνα 5.2.7 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της δεύτερης λειτουργίας (Rest material)

Κατά την τρίτη λειτουργία μορφοποιείται η επιφάνεια πίεσης του γειτονικού πτερυγίου με κίνηση του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια και κατά μήκος της. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στην εικόνα 5.2.8 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.2.8 Στιγμιότυπο προσομοίωσης της τρίτης λειτουργίας με το εργαλείο SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.2.9.



Εικόνα 5.2.9 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2.10.



Εικόνα 5.2.10 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της τρίτης λειτουργίας (Rest material)

Στην εικόνα 5.2.11 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας με τη βοήθεια του λογισμικού CAM. Με βάση την εικόνα, η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.2.11 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 2 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

#### 5.3 Impeller 3

Για την κατεργασία του μοντέλου Impeller 3 χρησιμοποιήθηκαν τρεις λειτουργίες (operations). Κατά το πρώτο operation το εργαλείο κινείται παράλληλα προς τα πτερύγια αφαιρώντας υλικό με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας hub. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στις εικόνες 5.3.1 και 5.3.2 φαίνονται δύο στιγμιότυπα προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.3.1 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.3.2 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Στη συνέχεια ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, κατά τη διάρκεια του οποίου η κίνηση του εργαλείου είναι παρόμοια με το στάδιο της εκχόνδρισης. Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.3.3.



Εικόνα 5.3.3 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά τα φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.4.



Εικόνα 5.3.4 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της πρώτης λειτουργίας (Rest material)

Στη δεύτερη λειτουργία το εργαλείο κινείται κάθετα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου κατά μήκος της με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας αυτής. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στην εικόνα 5.3.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.3.5 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.3.6.



Εικόνα 5.3.6 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.7.



Εικόνα 5.3.7 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της δεύτερης λειτουργίας (Rest material)

Κατά την Τρίτη λειτουργία μορφοποιείται η επιφάνεια πίεσης του γειτονικού πτερυγίου με κίνηση του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια και κατά μήκος της. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στην εικόνα 5.3.8 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.3.8 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.3.9.



Εικόνα 5.3.9 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.10.



Εικόνα 5.3.10 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της τρίτης λειτουργίας (Rest material)

Στην εικόνα 5.3.11 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας με τη βοήθεια του λογισμικού CAM. Με βάση την εικόνα, η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.3.11 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 3 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

#### 5.4 Impeller 4

Για την κατεργασία του μοντέλου Impeller 4 χρησιμοποιήθηκαν τρεις λειτουργίες (operations). Κατά το πρώτο operation το εργαλείο κινείται παράλληλα προς τα πτερύγια παίρνοντας κλίση περί σημείου που έχει επιλεγεί κατάλληλα αφαιρώντας υλικό με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας hub. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στη συνέχεια ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, κατά τη διάρκεια του οποίου η κίνηση του εργαλείου είναι παρόμοια με το στάδιο της εκχόνδρισης. Στην εικόνα 5.4.1 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.4.1 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4.2.



Εικόνα 5.4.2 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της πρώτης λειτουργίας (Rest material)

Στη δεύτερη λειτουργία το εργαλείο κινείται κάθετα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου κατά μήκος της με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας αυτής. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα, που ακολουθούνται από ένα πάσο για το φινίρισμα. Στην εικόνα 5.4.3 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.4.3 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4.4.



Εικόνα 5.4.4 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της δεύτερης λειτουργίας (Rest material)

Κατά την τρίτη λειτουργία μορφοποιείται η επιφάνεια πίεσης του γειτονικού πτερυγίου με κίνηση του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια και κατά μήκος της. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα, που ακολουθούνται από ένα πάσο για το φινίρισμα. Στην εικόνα 5.4.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.4.5 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με το εργαλείο SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.4.6.



Εικόνα 5.4.6 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της τρίτης λειτουργίας (Rest material)

Στην εικόνα 5.4.7 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας με τη βοήθεια του λογισμικού CAM. Με βάση την εικόνα, η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.4.7 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 4 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

#### 5.5 Impeller 5

Για την κατεργασία του μοντέλου Impeller 5 χρησιμοποιήθηκαν τρεις λειτουργίες (operations). Κατά το πρώτο operation το εργαλείο κινείται παράλληλα προς τα πτερύγια παίρνοντας κλίση περί καμπύλης που έχει επιλεγεί κατάλληλα αφαιρώντας υλικό με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας hub. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στη συνέχεια ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, κατά τη διάρκεια του οποίου η κίνηση του εργαλείου είναι παρόμοια με το στάδιο της εκχόνδρισης. Στην εικόνα 5.5.1 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.5.1 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.5.2.



Εικόνα 5.5.2 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της πρώτης λειτουργίας (Rest material)

Στη δεύτερη λειτουργία το εργαλείο κινείται κάθετα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου κατά μήκος της με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας αυτής. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα, που ακολουθούνται από ένα πάσο για το φινίρισμα. Στην εικόνα 5.5.3 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.5.3 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από τη δεύτερη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.5.4.



Εικόνα 5.5.4 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της δεύτερης λειτουργίας (Rest material)

Κατά την τρίτη λειτουργία μορφοποιείται η επιφάνεια πίεσης του γειτονικού πτερυγίου με κίνηση του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια και κατά μήκος της. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα, που ακολουθούνται από ένα πάσο για το φινίρισμα. Στην εικόνα 5.5.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.5.5 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την τρίτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.5.6.



Εικόνα 5.5.6 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της τρίτης λειτουργίας (Rest material)

Στην εικόνα 5.5.7 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας με τη βοήθεια του λογισμικού CAM. Με βάση την εικόνα, η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.5.7 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 5 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

#### 5.6 Impeller 6

Η κατεργασία του τελικού μοντέλου Impeller 6 έγινε με τη χρήση τριών λειτουργιών (operations). Κατά την πρώτη λειτουργία το εργαλείο κινείται παράλληλα προς τα πτερύγια με τον άξονά του να παίρνει κλίση ακολουθώντας μία τριδιάστατη καμπύλη που επιλέχθηκε έτσι ώστε να επιτρέπει στο εργαλείο να ακολουθήσει την κατάλληλη διαδρομή. Κατά την εκχόνδριση αφαιρείται ο μεγάλος όγκος υλικού με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας hub. Η εκχόνδριση πραγματοποιείται σε έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στις εικόνες 5.6.1, 5.6.2 και 5.6.3 φαίνονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.1 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.


Εικόνα 5.6.2 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.3 Στιγμιότυπο προσομοίωσης από την πρώτη λειτουργία με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Στη συνέχεια ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας το οποίο εκτελείται σε ένα πάσο. Κατά τη διάρκεια του φινιρίσματος η κίνηση του εργαλείου είναι παρόμοια με το στάδιο της εκχόνδρισης. Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.6.4.



Εικόνα 5.6.4 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το αποτέλεσμα της κατεργασίας της λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.6.5.



Εικόνα 5.6.5 Το αποτέλεσμα της κατεργασίας της πρώτης λειτουργίας (Rest material)

Στη δεύτερη λειτουργία το εργαλείο κινείται κάθετα στην επιφάνεια αναρρόφησης του πτερυγίου κατά μήκος της με σκοπό τη μορφοποίηση της επιφάνειας αυτής. Εκτελείται πλευρικό φρεζάρισμα με τον άξονα του εργαλείου να παίρνει κλίση ακολουθώντας κατάλληλα επιλεγμένη τριδιάστατη καμπύλη. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στις εικόνες 5.6.6, 5.6.7 και 5.6.8 παρατίθενται στιγμιότυπα από την προσομοίωση της δεύτερης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.6 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της δεύτερης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.7 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της δεύτερης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.8 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της δεύτερης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.6.9.



Εικόνα 5.6.9 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το αποτέλεσμα της κατεργασίας της δεύτερης λειτουργίας (Rest material) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.6.10.



Εικόνα 5.6.10 Το αποτέλεσμα της κατεργασίας της δεύτερης λειτουργίας (Rest material)

Κατά την τρίτη λειτουργία μορφοποιείται η επιφάνεια πίεσης του γειτονικού πτερυγίου με κίνηση του κοπτικού εργαλείου κάθετα προς την επιφάνεια και κατά μήκος της. Ομοίως με την προηγούμενη λειτουργία, εκτελείται πλευρικό φρεζάρισμα με τον άξονα του εργαλείου να παίρνει κλίση ακολουθώντας κατάλληλα επιλεγμένη τριδιάστατη καμπύλη. Για την εκχόνδριση πραγματοποιούνται έξι πάσα κοπής βάθους κοπής 5 mm το καθένα. Στις εικόνα 5.2.11, 5.2.12 και 5.2.13 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την προσομοίωση της τρίτης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.11 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της τρίτης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.12 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της τρίτης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.



Εικόνα 5.6.13 Στιγμιότυπο από την προσομοίωση της τρίτης λειτουργίας με τη βοήθεια του εργαλείου SolidVerify.

Ακολουθεί το φινίρισμα της επιφάνειας, για το όποιο η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D στην εικόνα 5.2.14.



Εικόνα 5.6.14 Η διαδρομή του κοπτικού εργαλείου κατά το φινίρισμα όπως παρουσιάζεται με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας, που αποτελεί και την τελική μορφή της κατεργαζόμενης περιοχής (Rest material) παρουσιάζεται στις εικόνες 5.2.15 και 5.2.16. Στη συνέχεια με την επανάληψη της διαδικασίας για τα υπόλοιπα πτερύγια λαμβάνεται η επιθυμητή μορφή της πτερωτής.



Εικόνα 5.6.15 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας, που αποτελεί και την τελική μορφή της κατεργαζόμενης περιοχής (Rest material)



Εικόνα 5.6.16 Το κατεργασμένο αποτέλεσμα της λειτουργίας, που αποτελεί και την τελική μορφή της κατεργαζόμενης περιοχής (Rest material)

Στις εικόνες 5.2.17 και 5.1.18 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) με το αποτέλεσμα της κατεργασίας με τη βοήθεια του λογισμικού CAM. Με βάση την εικόνα, η απόκλιση της κατεργασμένης επιφάνειας από το μοντέλο είναι της τάξης του δεκάτου του χιλιοστού.



Εικόνα 5.6.17 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 6 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας



Εικόνα 5.6.18 Γράφημα της σύγκρισης της επιθυμητής γεωμετρίας (Target model) του μοντέλου Impeller 6 με το αποτέλεσμα της κατεργασίας

Στη συνέχεια με την επανάληψη της διαδικασίας για τα υπόλοιπα πτερύγια λαμβάνεται η επιθυμητή μορφή της πτερωτής. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.6.19.



Εικόνα 5.6.19 Το τελικό κατεργασμένο αποτέλεσμα

Για την προετοιμασία της πρώτη ύλης (stock material) έγινε τόρνευση σε κυλινδρικό τεμάχιο ώστε να ακολουθεί τη μορφή της καμπύλης shroud των πτερυγίων. Η εκχόνδριση υλοποιήθηκε με διαδοχικά πάσα κοπής για την αποβολή υλικού. Η εικόνα 5.6.20 αποτελεί στιγμιότυπο της προσομοίωσης κατά την εκχόνδριση του τεμαχίου.



Εικόνα 5.6.20 Στιγμιότυπο της προσομοίωσης κατά την εκχόνδριση του τεμαχίου

Κατά το φινίρισμα του τεμαχίου το εργαλείο κινήθηκε διαγράφοντας την καμπύλη Shroud για να δοθεί η ακριβής μορφή στο τεμάχιο. Στην εικόνα 5.6.21 δίνεται στιγμιότυπο του φινιρίσματος.



Εικόνα 5.6.21 Στιγμιότυπο του φινιρίσματος

Στην εικόνα 5.6.22 παριστάνεται η διαδρομή του εργαλείου κατά την τόρνευση με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D.



Εικόνα 5.6.22 Η διαδρομή του εργαλείου κατά την τόρνευση με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης 3D

Το τεμάχιο που προέκυψε από την κατεργασία φαίνεται στην εικόνα 6.2.23 με τη χρήση του εργαλείου προσομοίωσης rest material.



Εικόνα 5.6.23 Το τεμάχιο που προέκυψε από την κατεργασία τη χρήση του εργαλείου προσομοίωσης rest material

# Κεφάλαιο 6° – Γενίκευση της γεωμετρίας της πτερωτής

# 6.1 Εφαρμογή κλιμακοποίησης στη γεωμετρία της πτερωτής

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας κατεργασίας για το μοντέλο της πτερωτής επιχειρήθηκε η γενίκευση της γεωμετρίας της πτερωτής. Συγκεκριμένα ζητούμενο αποτέλεσε η αποφυγή επανάληψης της διαδικασίας δημιουργίας κατεργασίας στο SolidCAM από την αρχή σε περίπτωση εφαρμογής ομοιόμορφης κλίμακας στη γεωμετρία της πτερωτής. Σε αυτή την κατεύθυνση αναπτύχθηκε λογιστικό φύλλο στο λογισμικό Microsoft Excel που επιτρέπει τον μετασχηματισμό του G-κώδικα που έχει αναπτυχθεί για την κατεργασία ενός οποιουδήποτε τεμαχίου στα δεδομένα της κλιμακοποιημένης γεωμετρίας του τεμαχίου αυτού. Για τον ορθό μετασχηματισμό του G-κώδικα απαιτείται κατάλληλη κλιμακοποίηση και στην γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Αυτή η αλλαγή του κοπτικού εργαλείου θα προκαλέσει αλλαγή στις συνθήκες κοπής του τεμαχίου, με βάση τις τιμές του κατασκευαστή του εργαλείου.

# 6.2 Εισαγωγή δεδομένων

Εκτός από τον G-κώδικα προς επεξεργασία, ο οποίος εισάγεται στα κελία του φύλλου εργασίας 'G Code', ζητείται από τον χρήστη η εισαγωγή κάποιων επιπλέον δεδομένων που αφορούν τις συνθήκες κοπής, κάποια χαρακτηριστικά της εργαλειομηχανής και βεβαίως η κλίμακα που θα εφαρμοστεί στο τεμάχιο, στα αντίστοιχα κελιά του φύλλου εργασίας 'Input'. Συγκεκριμένα τα δεδομένα αυτά είναι τα εξής:

- Η ταχύτητα κοπής (Cutting Speed) v<sub>c</sub> (m/min)
- Η πρόωση ανά δόντι (Feed per tooth) f<sub>z</sub> (mm/tooth)
- Ο αριθμός των δοντιών z<sub>n</sub>
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα πρόωσης (Feeding speed) F<sub>max</sub> (mm/min) της εργαλειομηχανής
- Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου της εργαλειομηχανής S<sub>max</sub> (RPM)
- Η κλίμακα (scale) που θα εφαρμοστεί στο τεμάχιο

Όπως φαίνονται και στις παρακάτω εικόνες (6.2.1 και 6.2.2) από παράδειγμα του αρχείου.

ت G code scaling (example) - Microsoft Excel و المعادية المعادي													
Επικόλ) Τρόχι	Казарани         Сойрани         Сайрани         Сайрани												
4	A	В	С	D	E	F	G	Н					
1													
2		Cutting Speed (Vc)(m/min)	Feed per tooth (fz) (mm/tooth)	Number of teeth (Zn)	Maximum allowable Feeding Speed (Fmax) (mm/min)	Maximum allowable RPM (Smax) (rev/min)	Scale						
3		43,980	0,108	2	900,000	3500	0,667						
4	Corrected	43,980	0,108										
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
14								<u> </u>					
14	M Input / Output	t /G code /G code (scaled)	/9/		Ū « [	30 Jan 10		*					
έτοιμο							1/0% 🕒						

Εικόνα 6.2.1 Φύλλο εισαγωγής δεδομένων

G code scaling (example) - Microsoft Excel										_ 0	s x				
	Κεντρική	Εισαγωγή	Διάταξη σ	ελίδας Τύτ	τοι Δεδομ	ένα Ανα	θεώρηση Προβ	ολή						<b>@</b> _ 1	o x
Επικ	οίλληση	Calibri B I U *	•  11 •  A		= <mark>  =</mark> (≫-) E =   i≠ i≠		ενική ở ~ % 000 % ε	κατά το	φοποίηση Στυλ	<ul> <li>Β΄ Εισαγωγή *</li> <li>Β΄ Διαγραφή *</li> <li>Μορφοποίηση *</li> </ul>	Σ - Α	τοη & Εύρεση &			
Πρόχειρο 🐄 Γραμματοσειρά 🚱		Στοίχιση	19	Αριθμός	Γa Στι	Στυλ Κελιά Επεξεργασία									
P28 - (* <i>f</i> *															×
	A	В	С	D	E	F	G	Н	L		J	К	L	М	-
1	01000														
2	G15	H1													
3	T1	M6													
4	G56	H1													
5	T1														
6	S1500	M3													
7	G0	X15	Y-0,156	Z60,958											
8	G1	X15	Y-0,156	F3000											
9	Z60,957														
10	XO	YO	Z60,958												
11	Z52,772	F500													
12	X0,000														
13	Y0,000														
14	Z50,193	Y0,173	M15	A0,000											
15	Z50,066	Y0,173	M15	A0,022											
16	Z49,999	Y0,173	M15	A0,067											
17	Z49,931	Y0,173	M15	A0,112											
18	Z49,863	Y0,174	M15	A0,156											
19															
20															
21															
22															
23															
24	Input	Output	G code G c	ode (scaled)	10		-		14						P I
Έτοιμ	10			(					the second second			120%	Θ	U	•

Εικόνα 6.2.2 Φύλλο εισαγωγής G κώδικα

#### 6.3 Επεξεργασία των δεδομένων

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων αρχικά υπολογίζονται οι στροφές της ατράκτου S (RPM) και η ταχύτατα πρόωσης F (mm/min) με τη βοήθεια των σχέσεων:

$$S = \frac{v_c \times 1000}{6 \times \pi \times Scale} [RPM] (1)$$
Kai  $F = z_n \times f_z \times S [mm/_{min}] (2)$ 

Αν η F υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη  $F_{max}$  τότε λαμβάνεται ίση με την  $F_{max}$  και απαιτείται διόρθωση της  $f_z$  με τη σχέση (4).

Σε περίπτωση που η S είναι μεγαλύτερη από την  $S_{max}$  τότε η S λαμβάνεται ίση με την  $S_{max}$ , η F υπολογίζεται από τη σχέση (2) και απαιτείται διόρθωση των  $v_c$  και  $f_z$  με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_c = \frac{6 \times \pi \times S \times Scale}{1000} [m/_{min}] (3)$$
  
Kai  $f_z = \frac{F}{S \times z_n} [mm/_{tooth}] (4)$ 

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού για κάθε παράμετρο υλοποιήθηκε στο MS Excel με τη χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

• Για την ταχύτητα πρόωσης F:

=IF((C4\*Input!D3\*Input!C3)<=(Input!E3);(C4\*Input!D3\*Input!C3);(Input!E3))

• Για τις στροφές της ατράκτου S:

=IF((Input!B3\*1000/PI()/6/Input!G3)<=(Input!F3); (Input!B3\*1000/PI()/6/Input!G3);(Input!F3))

• Για την ταχύτητα κοπής ν<sub>c</sub> σε περίπτωση διόρθωσης:

=PI()\*6\*Input!G3/1000\*C4

• Για πρόωση ανά δόντι fz σε περίπτωση διόρθωσης:

=Output!B4/Output!C4/Input!D3

Κατά την επεξεργασία του G-κώδικα οι εντολές που αφορούν την ταχύτητα πρόωσης και τις στροφές της ατράκτου του εργαλείου και έχουν τη μορφή F(αριθμητική τιμή) και S(αριθμητική τιμή) αντίστοιχα θα πρέπει να αλλαχθούν με σκοπό να περιλαμβάνουν τις σωστές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

Για την εφαρμογή της κλιμακοποίησης στις συντεταγμένες του εργαλείου είναι απαραίτητος ο πολλαπλασιασμός των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων με την κλίμακα που χρησιμοποιείται στις εντολές που έχουν τη μορφή Χ(αριθμητική τιμή), Υ(αριθμητική τιμή), Ζ(αριθμητική τιμή), Ι(αριθμητική τιμή).

Για όλες τις υπόλοιπες ομάδες εντολών δεν απαιτείται κάποια επεξεργασία.

Στο MS Excel η παραπάνω διαδικασία επεξεργασίας των αριθμητικών τιμών υλοποιείται με τα εξής βήματα:

- 1) Χωρίζεται η αριθμητική τιμή της εντολής από το αρχικό γράμμα που καθορίζει το είδος της εντολής με τη βοήθεια των συναρτήσεων του Excel 'LEFT' και 'RIGHT' που επιτρέπουν την επιλογή συγκεκριμένου πλήθους χαρακτήρων από ένα κελί. Βασίζεται στην ιδιότητα της μορφής των εντολών να έχουν πάντοτε ένα μόνο χαρακτήραν ακολουθούμενο αριθμητικά ψηφία. Έτσι το πλήθος των χαρακτήρων που θα επιλεγούν είναι ένα και το πλήθος των αριθμητικών ψηφίων ν-1 αν ν είναι το πλήθος των ψηφίων που περιέχει το κελί.
- 2) Μετατρέπεται σε μορφή αναγνωρίσιμη ως αριθμό το πλήθος των αριθμητικών ψηφίων που έχουν επιλεγεί στο προηγούμενο βήμα με τη βοήθεια της συνάρτησης 'VALUE' και επεξεργάζεται κατάλληλα (π.χ. πολλαπλασιάζεται με την κλίμακα ή αντικαθίσταται) ανάλογα το είδος της εντολής.
- Το αποτέλεσμα του παραπάνω βήματος μετατρέπεται σε μορφή αναγνωρίσιμη από το λογισμικό ως κείμενο με τη χρήση της συνάρτησης 'FIXED'.
- 4) Τέλος συντίθενται ξανά σε ένα ενιαίο το αριθμητικό μέρος της εντολής και ο χαρακτήρας που καθορίζει το είδος της εντολής με χρήση της συνάρτησης 'CONCATENATE'.

Η διαδικασία αναγνώρισης του είδος της εντολής και επιλογής της κατάλληλης επεξεργασίας του κάθε κελιού επιτυγχάνεται στο Excel με τη χρήση διαδοχικών εμφωλευμένων συναρτήσεων 'IF'. Ο ακριβής κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο εξής:

=IF((LEFT('Gcode'!A1;1)="X")+(LEFT('Gcode'!A1;1)="Y")+(LEFT('Gcode'!A1;1)="Z") +(LEFT('Gcode'!A1;1)="I")+(LEFT('Gcode'!A1;1)="J")+(LEFT('Gcode'!A1;1)="K") +(LEFT('Gcode'!A1;1)="R");CONCATENATE(LEFT('Gcode'!A1;1);FIXED(VALUE(RIGHT ('Gcode'!A1;LEN('Gcode'!A1)-1))\*Input!\$G\$3;3)); IF(LEFT('Gcode'!A1;1)="F";CONCATENATE(LEFT('Gcode'!A1;1);FIXED(Output!\$B\$4;3)

);IF(LEFT('Gcode'!A1;1)="S";CONCATENATE(LEFT('Gcode'!A1;1);FIXED(Output!\$C\$4; 0));IF(ISBLANK('Gcode'!A1)=TRUE;"";'G code'!A1))))

# 6.4 Τελικό αποτέλεσμα

Το τελικό αποτέλεσμα του αρχείου περιλαμβάνει τον μετασχηματισμένο G-κώδικα στο φύλλο 'G Code (Scaled)' και τις τιμές για τις παρακάτω παραμέτρους της κατεργασίας:

- Ταχύτητα πρόωσης (feeding speed) F (mm/min)
- Οι στροφές της ατράκτου S (RPM)
- Η ταχύτητα κοπής (Cutting Speed) v<sub>c</sub> (m/min) σε περίπτωση διόρθωσης της τιμής της
- Η πρόωση ανά δόντι (Feed per tooth) f<sub>z</sub> (mm/tooth) σε περίπτωση διόρθωσης της τιμής της

Οι παρακάτω εικόνες (6.4.1 και 6.4.2) αποτελούν τα τελικά αποτελέσματα του παραδείγματος που χρησιμοποιήθηκε στις εικόνες 6.2.1 και 6.2.2 . Με σύγκριση των εικόνων 6.2.2 και 6.4.2 μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή η εφαρμογή της κλιμακοποίησης στο G-κώδικα.

	G code scaling (example) - Microsoft Excel										
	Κεντρική Εισαγωγή	j Διάταξη σελίδας Τύποι	Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολι	1 		A	@ _ = ×				
Erwälle	Calibri		🗞 - Ечикар	Macananian Macananian Sal	3 - Διαγραφή - 3 - 1						
Πρόχει		ματοσειρά <sup>7</sup> Ξτοίχι	TE TE (Ε) (Δ1 * (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5) (5)	υπό όρους * ως πίνακα * κελιών Στυλ	ν - Μορφοποίηση - 2 - φύτρ Κελιά Ετ	αρισμα * επιλογή * τεξερνασία					
	А	В	С	D	E	F	G				
1											
2											
		Feeding Speed	RPM (S)	Cutting Speed	Feed per tooth						
3		(F) (mm/min)	(rev/min) (RPM)	(Vc)(m/min)	(fz) (mm/tooth)		22				
4		755,961	3500	43,980	0,108						
5											
6											
7											
8											
9							_				
10											
11											
12											
13	Input Output	G code / G code (scaled)		(Ref)							
Έτοιμο	- sour / output /	o coust, o cous (sealed) / Car				200% 🕞	0.0				

Εικόνα 6.4.1 Φύλλο παρουσίασης των τελικών αποτελεσμάτων

G code scaling (example) - Microsoft Excel											- 0	х				
	Κεντρική Εισαγωγή	) Διάταξη σελίδας Τί	ύποι Δεδο	ιμένα Αναθ	εώρηση Πι	ροβολή									0 - 0	, x
1	Calibri	- 11 - (Δ <sup>*</sup> - x <sup>*</sup> ) (Ξ - 3	= - &	<b>1</b>	ακń		<b>B</b>	#12		<sup>2</sup> α Εισαγ	ωγή *	Σ - /	7 4			
Επικά					1 × 9/ 000 +/	0 ,00	Μορφοποίηση Μ	ορφοποίηση	Στυλ	3 Διαγρ	αφή *	Ταξιν	21 La	18.		
Dec	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				100 000 J0	0 *,0	υπό όρους *	ως πίνακα 🔹 κ	ελιών *	Mope	ροποίηση *	Q* φύτρ	άρισμα - επιλογ	i -		
B7 6										×						
	A	B	C	D	F	F	G	н			4	к		М	N	
1	01000	1. <del></del>			100						371					
2	G15	H1														
3	T1	M6														
4	G56	H1														
5	T1															
6	\$3.500	M3														
7	G0	X10,000	Y-0,104	Z40,639												
8	G1	X10,000	Y-0,104	F755,961												
9	Z40,638															
10	X0,000	Y0,000	Z40,639													
11	Z35,181	F755,961														
12	X0,000															
13	Y0,000															
14	Z33,462	Y0,115	M15	A0,000												
15	Z33,377	Y0,115	M15	A0,022												
16	Z33,333	Y0,115	M15	A0,067												
17	Z33,287	Y0,115	M15	A0,112												
18	Z33,242	Y0,116	M15	A0,156												
19																
20																
21																
22																
23																
24	H Input / Output /	G code G code (scaled)	10					14		_		10			1	
Έτοιμ	0													20% 🕞	Ū	٠

Εικόνα 6.4.2 Φύλλο παρουσίασης του μετασχηματισμένου G κώδικα

#### <u>Κεφάλαιο 7° – Συμπεράσματα</u>

Στην παρούσα εργασία κατασκευάζεται επιτυχώς πτερωτή φυγοκεντρικού συμπιεστή σε κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού CAD/CAM. Η αλματώδης πρόοδος των εργαλείων δημιουργίας κατεργασίας για τεμάχια πολύπλοκης γεωμετρίας που περιέχονται στα σύγχρονα λογισμικά CAM είναι αυτή που διευκόλυνε την επίτευξη του στόχου μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας δημιουργίας της διαδρομής του εργαλείου.

Ειδικότερα, η διεπαφή (interface) με το λογισμικό SolidCAM είναι φιλικότατη προς το χρήστη χάρη στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος και στην ευκολία χειρισμού του. Για την εξοικείωση του χρήστη με το λογισμικό απαιτείται σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός στο οποίο συμβάλει το εγχειρίδιο οδηγιών χρήσης, η εφαρμογή 'Boήθεια' που περιλαμβάνεται στο λογισμικό και η ύπαρξη πληθώρας μαθημάτων (tutorials) στο διαδίκτυο. Επίσης τα εργαλεία προσομοίωσης των κατεργασιών βοηθούν στην κατανόηση της κίνησης του εργαλείου και της μορφής του κατεργαζόμενου τεμαχίου καθιστώντας την διαδικασία επιλογής των αυγκεκριμένων εργαλείων συμβάλει στην κατανόηση των προσαρμογών που πρέπει να γίνουν από το χρήστη στις παραμέτρους της κατεργασίας και σε συνδυασμό με την ευκολία εισαγωγής των παραμέτρων στο λογισμικό καθίσταται εύκολη η επιτυχής ολοκλήρωση μιας κατεργασίας.

Με βάση τα παραπάνω, η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού εργαλείου για κάθε κατεργασία ήταν άμεση και απλή. Χρησιμοποιήθηκαν κοινά εργαλεία σφαιρικής μορφής (ball nose) για εκχόνδριση και αποπεράτωση, τα οποία δεν έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς τη γεωμετρία τους. Τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέχθηκε η διάμετρος των εργαλείων είναι η ευελιξία κίνησης ανάμεσα στα πτερύγια της πτερωτής και η τιμή απόκτησης τους. Επιλέχθηκαν εργαλεία με διάμετρο (4 mm) τέτοια ώστε να μπορεί το εργαλείο να κινηθεί ανάμεσα στα πτερύγια με τρόπο που θα προσδώσει την επιθυμητή μορφή στις επιφάνειες και παράλληλα να διατηρηθεί το κόστος του εργαλείου σε τιμές της τάξης μερικών δεκάδων ευρώ. Η χρήση εργαλείων μικρότερης διαμέτρου σχεδόν διπλασιάζει το κόστος αγοράς του εργαλείου χωρίς να εξασφαλίζει καλύτερα αποτελέσματα στην ακρίβεια της μορφής των επιφανειών.

Αντίστοιχη ευκολία χρήσης παρατηρήθηκε και κατά την σχεδίαση των μοντέλων της πτερωτής με το λογισμικό SolidWorks χάρη στα εργαλεία σχεδίασης που περιλαμβάνονται σε αυτό και τα οποία απλοποιούν και επισπεύδουν τη σχεδίαση μηχανολογικών τεμαχίων όπως η πτερωτή ακτινικού συμπιεστή.

Αντίθετα η διαδικασία επιλογής της στρατηγικής κατεργασίας που έπρεπε να ακολουθηθεί για την κατασκευή της πτερωτής αποδείχθηκε στην πράξη περίπλοκη υπόθεση λόγω των περιορισμών στην ελευθερία κίνησης του εργαλείου που προκύπτουν από τη χρήση τεσσάρων αντί πέντε αξόνων συντεταγμένων. Η έλλειψη αντίστοιχου τύπου κατεργασίας στο SolidCAM οδήγησε σε αναγκαστική προσαρμογή ενός από τους υπάρχοντες ώστε να ταιριάξει στις απαιτήσεις της εργασίας. Η προσαρμογή αυτή ήταν χρονοβόρα και πολύπλοκη.

Ο μετασχηματισμός του G κώδικα ώστε να ταιριάξει στην κλιμακοποιημένη γεωμετρία της πτερωτής θα μπορούσε να χαρακτηρισθεί ως το απλούστερο και λιγότερο χρονοβόρο κομμάτι της εργασίας. Αυτό οφείλεται στην απλή φύση του προβλήματος και στην επίλυση με τη βοήθεια λογισμικού που είναι αρκετά απλό και ελάχιστα απαιτητικό στη χρήση του.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα από την παρούσα εργασία είναι πως το τεμάχιο που προκύπτει από την κατεργασία της πτερωτής σε κέντρο κατεργασιών τεσσάρων αξόνων έχει την επιθυμητή μορφή και συγκεντρώνει όλα τα απαραίτητα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά ώστε να καθίσταται πλήρως λειτουργικό. Η επιτυχία κατασκευής της επιθυμητής γεωμετρίας με την απαιτούμενη ακρίβεια αποτελεί απόδειξη του γεγονότος πως υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής πτερωτών σε μηχανουργεία που δεν διαθέτουν κέντρα κατεργασιών πέντε αξόνων.

Εμβαθύνοντας στη σύγκριση με τα κέντρα κατεργασιών πέντε αξόνων, που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία για την παραγωγή πτερωτών, η χρήση κέντρου κατεργασιών τεσσάρων αξόνων για την κατασκευή πτερωτών παρουσιάζει χρόνους κατεργασίας εφάμιλλους των κέντρων κατεργασιών πέντε αξόνων, όταν πρόκειται για παραγωγή μικρού όγκου. Παράλληλα αποτελεί σημαντικά οικονομικότερη επιλογή καθώς η διαφορά στο κόστος κτήσης ανάμεσα στους δύο τύπους είναι αρκετά μεγάλη καθιστώντας τα κέντρα κατεργασίας τεσσάρων αξόνων συμφέρουσα επιλογή για την παραγωγή πρωτοτύπων και για μικρή παραγωγή.

Η κατασκευή πτερωτών με τη χρήση εργαλειομηχανών τεσσάρων αξόνων δεν είναι πάντα δυνατή. Πτερωτές με πολυπλοκότερη γεωμετρία από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, όπως πτερωτές με διαχωριστικά πτερύγια (splitter vanes), καθώς και πτερωτές με κλίση πτερυγίων μεγαλύτερη από αυτή των μοντέλων της εργασίας απαιτούν τη χρήση μηχανών πέντε αξόνων για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας. Ακόμα και πτερωτές του ίδιου τύπου με τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία οι οποίες έχουν διαστάσεις δύο τάξεις μεγέθους μικρότερες δεν μπορούν να κατασκευαστούν με τη χρήση της μεθόδου που παρουσιάστηκε παραπάνω διότι δεν μπορεί να επιτευχθεί η αναγκαία ακρίβεια στις επιφάνειες των πτερυγίων εξαιτίας των γεωμετρικών περιορισμών που υπαγορεύει η χρήση εργαλείων ανάλογων διαστάσεων.

Ολοκληρώνοντας την εργασία θα ήταν ουτοπικό να ειπωθεί ότι καλύφθηκε πλήρως κάθε δυνατή πτυχή της κατασκευής πτερωτών σε κέντρα κατεργασιών τεσσάρων αξόνων. Έγινε μια πρώτη προσπάθεια, από πολλές άλλες που απομένουν να γίνουν στο μέλλον εμβαθύνοντας σε επιμέρους περιοχές έρευνας με σκοπό τη βελτίωση της διαδικασίας.

# <u>Βιβλιογραφία</u>

[1] Bedi, S., Mann, S. & Menzel, C. (2003). Flank milling with flat end milling cutters. *Computer-Aided Design*, *35*, 293–300.

[2] Bohez, E. L. J., Ranjith Senadhera, S.D., Pole, K., Duflou, J. R. & Tar, T. (1997). A geometric modeling and five-axis machining algorithm for centrifugal impellers. *Journal of Manufacturing System*, *16*(6), 422–436.

[3] Cho, I., Lee, K. & Kim, J. (1997). Generation of collision-free cutter location data in five-axis milling using the potential energy method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *13*, 523–529.

[4] Chuang, L. C. & Young, H. T. (2007). Integrated rough machining methodology for centrifugal impeller manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *34*(11–12), 1062–1071.

[5]Young, H. T. & Chuang, L. C. (2003). An integrated machining approach for a centrifugal impeller. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *21*(8), 556–563.

[6] Heo, E. Y., Kim, D. W., Kim, B. H., Jang, D. K. & Chen, F.F. (2008). Efficient rough-cut plan for machining an impeller with a 5-axis NC machine. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *21*(8), 971–983.

[7] Hsueh, Y. W., Hsueh, M. H. & Lien, H. C. (2007). Automatic selection of cutter orientation for preventing the collision problem on a five-axis machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *32*(1-2), 66–77.

[8] Lartigue, C., Duc, E. & Affouard, A. (2003). Tool path deformation in 5-axis flank milling using envelop surface. *Computer-Aided Design, 35*, 375–382.

[9] Liu, X. W. (1995). Five-axis NC cylindrical milling of sculptured surfaces. *Computer-Aided Design*, *27*, 87–94.

[10] Menzel, C., Bedi, S. & Mann, S. (2004). Triple tangent flank milling of ruled surfaces. *Computer-Aided Design, 36*, 289–296.

[11] Rehsteiner, F. (1993). Collision-free five-axis milling of twisted ruled surfaces. *Annals of the CIRP, 42*, 457–461.

[12] Tsay, D. M. & Her, M.J. (2001). Accurate 5-axis machining of twisted ruled surfaces. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, *123*, 731–738.

[13] Wang, N. & Tang, K. (2007). Automatic generation of gouge-free and angular-velocity-compliant five-axis toolpath. *Computer-Aided Design, 39*, 841–852.

[14] Wu, P. H., Li, Y.W. & Chu, C. H. (2008). Tool path planning for 5-axis flank milling based on dynamic programming techniques. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48*(11), 1224–1233.

[15] Chu, C. H., Huang, W. N. & Li, Y. W. (2010). An integrated framework of tool path planning in 5-axis machining of centrifugal impeller with split blades. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Online publication* 

[16] Suh, S. H. & Lee, K. S. (1991). A Prototype CAM System for Four-Axis NC Machining of Rotational Free Surfaces *Journal of Manufacturing Systems, Volume10/ No.4, 322-331* 

[17] Jang, D. K., Shin, J. K., Lee, H. K., Ro, S. H. & Yang, G. E. (2002). A study on tool path generation for machining impellers with 5-axis NC machine

[18] Βοσνιάκος, Γ.-Χ., Εργαλειομηχανές CNC CAM, Αθήνα 2003

[19] Παπαηλίου, Κ. Δ., Μαθιουδάκης, Κ. Μ. & Γιαννάκογλου,Κ. Χ., Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές, Αθήνα 2000

[20] SolidCAM 2010 Simultaneous 5-axis machining User Guide

[21] Seco Tools, General Machining Catalogue 2009.1

[22] http://en.wikipedia.org