ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Προγραμματισμός CNC, χωρίς την χρήση συστημάτων CAM, για την κατασκευή παραμετρικά ορισμένης σταθερής πτερύγωσης ακτινικών στροβιλομηχανών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΧΡΗΣΤΟΥ ΧΙΩΤΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων : Γεώργιος-Χριστόφορος Βοσνιάκος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....

ΧΡΗΣΤΟΣ ΧΙΩΤΟΠΟΛΟΣ

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Χιωτόπουλος, 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία προσφέρεται
ως απόδειξη σε όσους με πίστεψαν, με την
ελπίδα να μην τους διαψεύσω.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την κατασκευή σταθερής πτερύγωσης ακτινικής εργοστροβιλομηχανής, χωρίς την βοήθεια προγράμματος CAM. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για την εύρεση των παραμέτρων που ορίζουν μια πτερύγωση, συμπεριλαμβανομένου της γεωμετρίας των δίσκων όπου εδράζονται τα πτερύγια, καθώς και την γεωμετρία των αεροτομών. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες μετατροπές των συστημάτων συντεταγμένων σε περιβάλλον excel. Η επεξεργασία των μεγεθών κατέδειξε την τελική γεωμετρία των αεροτομών και των τροχιών των εργαλείων.

Στη συνέχεια, έγινε επιλογή και μελέτη των διαδικασιών του φασεολογίου κατασκευής και δημιουργήθηκαν αρχεία εντολών σε κώδικα G-code μηχανής CNC, με χρήση του περιβάλλοντος Matlab. Έπιπλέον, έγιναν προσομοιώσεις στα αποτελέσματα με χρήση του περιβάλλοντος CNC-simulator, ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για τις ενέργειες κατασκευής. Τέλος, το δοκίμιο κατασκευαστικε στις εργαλειομηχανές του εργαστηρίου του τομέα.

Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να γίνει οδηγός για την παραμετροποίηση οποιασδήποτε σταθερής πτερύγωσης ακτινικής στροβιλομηχανής, με απλές αλλαγές στις τιμές των μεταβλητών στα αρχεία απεικόνισης και δημιουργίας των σημείων συντεταγμένων των τροχιών κοπής. Η γενικότητα της μεθοδολογίας έγκειται στο γεγονός ότι έχουν καταγραφεί όλα τα βήματα, από την προστασία του προσωπικού και του εξοπλισμού μέχρι την αναλυτική παρουσίαση όλων των σταδίων παραγωγής της πτερύγωσης.

Λέξεις κλειδιά:

“αεροτομή, στροβιλομηχανή, εργαλειομηχανή CNC, παραμετροποίηση, G κώδικας”

Abstract

The scope of this thesis was the development of a methodology in order to represent and manufacture a radial turbomachine stator stage, circumventing CAM system use. This methodology was applied to establish the parameters which define a stage, from the geometry of the disk where the blades seated, up to the geometry of the airfoils. For that purpose, necessary conversions of coordinate systems were carried out at excel environment. The process of variables represented the final geometry of airfoils and therefore tool orbits.

Moreover, selection and study of the constructing was planed and G-code command archives were made, with the use of Matlab environment. Furthermore, simulations were taken place using the extracted commands and CNC-simulation environment, so as to gain reliable conclusions for the constructing method. Finally, the item was manufactured to the CNC machines of N.T.U.A. laboratory.

This methodology can be used as a guide for the parameterization of any radial stator stage, by making simple changes at the function keys onto the represent and construction archives, which includes the coordinates of the cutting orbits. The usefulness of the methodology is the specification of the procedure of the manufacturing in steps, from the protection of the personnel and the equipment up to the analytical steps of the stage manufacture.

Keywords:

"airfoil, turbomachine, tool machine CNC, parameterization, G-code"

Πίνακας περιεχομένων

1 Εισαγωγή 9

1.1 Κατασκευές σε κέντρο τόρνευσης και κέντρο κατεργασιών CNC 9

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής 11

1.2.1 Συνεισφορά 11

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 12

1.4 Οργάνωση κειμένου 14

2 Γενική προσέγγιση κατασκευής 15

2.1 Στροβιλομηχανές 15

2.1.1 Συμπιεστής ακτινικής ροής 19

2.1.2 Στρόβιλος ακτινικής ροής 20

2.2 Πτερυγώσεις 20

2.2.1 Ονοματολογία στοιχειωδών μεγεθών πτερύγωσης 22

2.2.2 Εξισώσεις περιγραφής αεροτομής 25

2.3 Προϊόν 27

2.4 Κατασκευαστική προσέγγιση 28

2.4.1 Επιλογή κατεργασιών κατασκευής πτερύγωσης 28

2.4.2 Γενικές αρχές κατεργασιών της κατασκευής 31

2.4.3 Παράμετροι κέντρου τόρνευσης και κέντρου κατεργασιών 37

2.4.4 Επιλογή εργαλείων 41

2.4.5 Ανάλυση προβλημάτων της κατασκευής 47

2.4.6 Τεχνική και οικονομική αξιολόγηση της κατασκευής 70

3 Σχεδίαση κατεργασιών 72

3.1 Στοιχεία παραμετροποίησης αρχικών και τελικών τεμαχίων 72

3.2 Σεταρίσματα 73

3.3 Φασεολόγιο κατασκευής 79

3.4 Αρχεία παραμετροποίησης των τροχιών κοπής 93

3.5 Αρχεία εξαγωγής εντολών G κώδικα 122

4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων 160

4.1 Οδηγίες χρήσης αρχείων 160

4.2 Προσομοίωση στο CNC-simulator 161

4.3 Εκτέλεση - παράδειγμα 169

5 Κατασκευή τεμαχίου 197

5.1 Διορθωτικές ενέργειες στα αρχεία 197

5.2 Εκτέλεση 200

5.3 Αποτελέσματα 206

5.4 Σφάλματα κατά την διεξαγωγή 207

6 Επίλογος 209

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων 209

6.2 Έλεγχος προϊόντος 211

6.3 Εναλλακτικές ενέργειες και μελλοντικές επεκτάσεις 211

7 Πηγές 213

7.1 Άρθρα βιβλιογραφικής ανασκόπησης 213

7.2 Βιβλιογραφία συγγραφής 214

7.3 Διαδικτυακοί ιστότοποι 215

1

Εισαγωγή

1.1 Κατασκευές σε κέντρο τόρνευσης και κέντρο κατεργασιών CNC

Γενικά, μηχανή ονομάζεται οποιοδήποτε εργαλείο ή μέσον που μπορεί να διευκολύνει την ανθρώπινη εργασία ή που μπορεί να αυξήσει τη δύναμη ή την αποτελεσματικότητά της. Κατά τη μηχανολογία, η μηχανή είναι ένα σύνολο μηχανικών μερών και μηχανισμών ικανών να μετατρέψουν μια ενέργεια τροφοδότησης σε μία διαφορετικού ή ίδιου τύπου αλλά με διαφορετικές παραμέτρους τελική ενέργεια, προκειμένου να την χορηγήσουν σε άλλες μηχανές ή να την χρησιμοποιήσουν άμεσα για να πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες διαδικασίες παραγωγής έργου.

Η ανάγκη χρησιμοποίησης εργαλείων εμφανίζεται στον άνθρωπο από τις πρώτες περιόδους ύπαρξής του στον πλανήτη. Κατασκεύαζε πέτρινα εργαλεία και όπλα, λαξεύοντας τους λίθους που βρίσκονταν δίπλα στη σπηλιά του. Με το πέρασμα των χρόνων, θέλοντας να βελτιώσει τις συνθήκες διαβίωσής του, χρησιμοποίησε εμπειρίες και την γνώση για να παράξει με μεγαλύτερους ρυθμούς διάφορα εξαρτήματα και εργαλεία. Η χρήση των μηχανών κατεργασίας, οι εργαλειομηχανές, γίνεται μέρος της παραγωγής των αντικειμένων του από την εξέλιξη της χειρονακτικής εργασίας στην βιοτεχνία. Απλές εργαλειομηχανές που προορίζονται για την επεξεργασία των υλικών και την κατασκευή εξαρτημάτων άλλων μηχανών ή γενικότερα μηχανολογικών σχεδίων εμφανίζονται δειλά πριν την βιομηχανική επανάσταση.

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν η βιομηχανία είχε εδραιωθεί στην αναπτυγμένες χώρες, η ζήτηση μεταλλουργικών προϊόντων παρουσίασε έντονη

αύξηση. Ταυτοχρόνως, αυξήθηκαν οι απαιτήσεις του καταναλωτικού κοινού για προϊόντα ποιότητας παρασκευασμένα με μεθόδους που να καταναλώνουν μικρή ποσότητα ενέργειας και να είναι «φιλικές προς το περιβάλλον».

Ως αναπόσπαστο μέρος της μαζικής παραγωγής, η εργαλειομηχανή είναι μια μηχανή που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία μεταλλικών κομματιών, κατά μια σειρά συνήθως ορισμένων και επαναλαμβανόμενων κοπών. Τεχνίτης και μηχανή αναβάθμισαν την παραγωγή προϊόντων μειώνοντας κατασκευαστικά σφάλματα, κόστη και χρόνους κατεργασίας, εντούτοις παρέμεναν τα προβλήματα ευελιξίας στην διαφοροποίηση ή/και την μοντελοποίηση των αγαθών για την παραγωγή σειρών παραγωγής.

Σταδιακά, για να υπάρξει εποπτεία της παραγωγής χρειαζόταν να εισαχθεί στο σύστημα κατεργασίας ένα είδος ανατροφοδότησης, άρα να εγκατασταθούν στις εργαλειομηχανές συστήματα έλεγχου. Αρχικά, οι διάφορες πληροφορίες που απαιτούνταν για την κατεργασία, την κίνηση και την πορεία των εργαλείων κλπ. παρέχονταν υπό την μορφή αριθμητικών πληροφοριών. Ο έλεγχος αυτός ονομάζεται αριθμητικός έλεγχος (NC-Numerical Control) και η εργαλειομηχανή εργαλειομηχανή αριθμητικού έλεγχου.

Οι εργαλειομηχανές εξελίχθηκαν στο να είναι αυτόματες και καθοδηγούνταν από διάτρητα δελτία ή από μαγνητικές κορδέλες για την πραγματοποίηση ενός ολοκληρωμένου κύκλου του κομματιού σύμφωνα με το σχέδιο που δημιούργησε ο σχεδιαστής. Ο τεχνίτης γίνεται χειριστής της μηχανής ο οποίος θα επιβλέπει την διαδικασία παραγωγής, θα ελέγχει και θα αξιολογεί την ποιότητα των παραγόμενων τεμαχίων.

Η εισαγωγή των σερβομηχανισμών καθώς και η εμφάνιση των αναλογοψηφιακών μετατροπέων ρεύματος (ADC) πυροδότησαν τον έλεγχο των εργαλειομηχανών μέσω υπολογιστή. Οι εργαλειομηχανές CNC (Computer Numerical Control) χρησιμοποιούν πλέον σχέδια CAD κατασκευής προϊόντων και τα υλοποιούν με την βοήθεια προγραμμάτων κατασκευής CAM που ορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιήσει η κάθε μηχανή για να ολοκληρώσει την διαδικασία κατασκευής. Το πρόγραμμα CAD προφανώς είναι άρρητα συνδεδεμένο με το πρόγραμμα CAM.

Στην σύγχρονη εποχή και με την ανάπτυξη των υπολογιστών, ο άνθρωπος έχει την δυνατότητα πλέον να παράγει αντικείμενα με ένα σύστημα κατεργασίας αποτελούμενο πλέον από το επιβλέπον προσωπικό και το hardware που περιλαμβάνει τις μηχανές παραγωγής, τις συσκευές για την μεταφορά και αποθήκευση των προϊόντων και άλλες συσκευές. Το σύστημα αυτό υποστηρίζεται από κατάλληλο software που περιλαμβάνει τις πληροφορίες για την μέθοδο παραγωγής και την τεχνολογία. Σκοπός του συστήματος είναι να μετατρέπει τις πρώτες ύλες σε τελικά προϊόντα αποσκοπώντας σε μέγιστη παραγωγικότητα και απόδοση. Παράλληλα, τα σύγχρονα συστήματα κατεργασίας ανταποκρίνονται στην κύρια απαίτηση ώστε να είναι ικανά να αντιμετωπίσουν οικονομικά τις απαιτήσεις του σχεδιασμού της παραγωγής που ακολουθεί τις τάσεις και τις μεταβολές των αναγκών της αγοράς. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα είδος αντιστάθμισης της ποσότητας και της ποικιλίας της παραγωγής.

Η αναγκαιότητα της χρήσης των προγραμμάτων σχεδίασης και κατασκευής είναι αδιαμφισβήτητη σε όλες τις σύγχρονες παραγωγικές μονάδες. Ολοκληρωμένα πακέτα CAD, CAM, CAE και άλλα, παρέχουν στους μηχανικούς εργαλεία με τα οποία θα μπορέσουν να κατασκευάσουν χωρίς πόνημα οποιαδήποτε κατασκευή. Εντούτοις, η απόκτηση αυτών των προγραμμάτων δεν ενδείκνυται όταν πρόκειται για μικρή παραγωγική μονάδα που θα κατασκευάσει ορισμένα κομμάτια αυξημένης

πολυπλοκότητας από τα συνήθη που κατασκευάζει. Η αποδέσμευση των ανωτέρω προγραμμάτων δρα κατασταλτικά στην μείωση του κόστους σχεδιασμού, αφού τέτοια πακέτα έχουν μεγάλη χρηματική αξία. Τότε λαμβάνει μέρος η ανάπτυξη διαφόρων στρατηγικών και προγραμμάτων ώστε να δημιουργηθούν αρχεία με κώδικα μηχανής ελέγχοντας τις εργαλειομηχανές με επιθυμητό τρόπο.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε την παραγωγή μικρής κλίμακας μιας σταθερής πτερωτής ενός στροβίλου που ανήκει σε στροβιλοσυμπιεστή τραίνου. Προς το παρόν, η παραγωγή του συγκεκριμένου τεμαχίου γίνεται με την κατεργασία της χύτευσης. Αν και ο ισχύον τρόπος δημιουργίας της πτερωτής είναι απλός, η κατεργασία είναι αρκετά ενεργοβόρα, εισάγονται σφάλματα στο παραγόμενο τεμάχιο λόγω της φύσης της, καθώς επίσης, η αλλαγή ορισμένων γεωμετριών του τεμαχίου είναι αρκετά δυσχερής.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη εναλλακτικού τρόπου παραγωγής και αντικατάστασή του υπάρχοντος, εξασφαλίζοντας την δυνατότητα δημιουργίας οποιασδήποτε πτερύγωσης. Οι τεχνικές δυσκολίες που προκύπτουν με αυτή την θεώρηση αφορούν την επιλογή όλων των μεταβλητών που υπεισέρχονται για την μοντελοποίηση μιας αεροτομής και το σχήμα της πτερύγωσης, εν γένει, στην οποία πρόκειται να εδρασθεί.

Προς τούτο, επιλέγονται κατεργασίες που να βασίζονται σε αριθμητικά δεδομένα. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτό να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που αφορούν την τοποθέτηση των πτερυγίων στο χώρο που δημιουργείται από τους δακτυλίους συγκράτησης των. Η δημιουργία αντίστοιχου φασεολόγιου υποδεικνύει τον τρόπο και την σειρά των ενεργειών που πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε το τεμάχιο να κατασκευαστεί, χωρίς να υπάρχει η δέσμευση από μεγέθη γεωμετρίας, με αναφορά στους λόγους για την υιοθέτηση των φάσεων της κατεργασίας.

Κατά την παραγωγή εντολών μηχανής εξετάζονται και βελτιστοποιούνται ορισμένες ενέργειες της μηχανής, μέσω του πακέτου προγραμματισμού Matlab και ομαδοποιούνται διάφορα στοιχεία του αλγορίθμου G-Code, ώστε να γίνει εφικτή η αποδέσμευση της κατασκευαστικής διαδικασίας από το πρόγραμμα κατασκευής CAM. Όσον αφορά την χρήση του πακέτου Matlab, μπορεί να ειπωθεί ότι οι αλγόριθμοι που θα αναπτυχθούν μπορούν να εκφραστούν και σε άλλο πακέτο ελεύθερης γλώσσας προγραμματισμού, ώστε το κόστος για την σχεδίαση του προϊόντος σχεδόν να εκμηδενιστεί.

1.2.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Αναγνωρίστηκαν όλες οι μεταβλητές ορισμού της γεωμετρίας του επιθυμητού τεμαχίου και ορίστηκαν οι μεταβλητές παραμετροποίησης του
2. Μελετήθηκαν οι φάσεις της κατασκευής και καταστρώθηκε το φασεολόγιο.
3. Εκφράσθηκαν οι συναρτήσεις των χειλών της αεροτομής.

4. Ενσωματώθηκαν όλες οι μεταβλητές παραμετροποίησης καθ'όλη την διαδικασία ανάλυσης των αεροτομών σε αρχεία excel με σκοπό την πλήρη εποπτεία της ενεργειών δημιουργίας των τροχιών κοπής.
5. Δημιουργήθηκαν αλγόριθμοι εξαγωγής εντολών μηχανής σε G κώδικα βάσει του φασεολογίου σε αρχεία matlab.
6. Υλοποιήθηκε η προσομοίωση κατασκευής των τεμαχίων με εργαλειομηχανές CNC.
7. Αξιολογήθηκε ο τρόπος κατασκευής και βρέθηκε ότι ο συγκεκριμένος τρόπος κατασκευής ενδείκνυται έναντι του υπάρχοντος τρόπου.
8. Κατασκευάστηκε πραγματικό τεμάχιο και αξιολογήθηκε ο τρόπος παραγωγής.

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο παρελθόν έχουν γίνει προσπάθειες αποτύπωσης των ενεργειών που χρειάζονται για να κατασκευαστεί μια πτερύγωση με την βοήθεια ενός πακέτου CAD/CAM, ειδικά δε όταν η κατασκευή απαιτεί άνω των τριών αξόνων εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου [REN11]. Ορίζοντας ως πτερυγώσεις τις βαθμίδες του στάτορα και του ρότορα μιας στροβιλομηχανής, η αυξημένη πολυπλοκότητα της γεωμετρίας τους καθιστά δύσκολη την αποδέσμευση της κατασκευής από τα πακέτα CAD και CAM [MAD96], πολύ περισσότερο όταν πρόκειται τα εναλλακτικά προγράμματα κατασκευής να εμπεριέχουν όρους παραμετροποίησης. Εντούτοις, σε πιο απλές κατασκευές, όπου οι ενέργειες κατεργασιών μπορούν να περιοριστούν σε μηχανές τριών αξόνων, ήτοι κατασκευές με επαναλαμβανόμενους κύκλους κατεργασιών και γεωμετρίες οι οποίες γεννώνται από offset τυποποιημένων γεωμετριών της μηχανής, χωρίς να γίνονται υπερκοπές ή υποκοπές, είναι εφικτό ο σχεδιαστής να αποφύγει την χρήση των πακέτων CAD/CAM, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τον κόστος σχεδιασμού [XUH12]. Παρακάμπτοντας το σύστημα CAM στην κατασκευή ενός αντικειμένου, ουσιαστικά δεν χρειάζεται πλέον ο σχεδιασμός CAD για την μοντελοποίησή του, παρά μόνο για την εποπτεία του [PEN11]. Αν η γεωμετρία ωστόσο δεν μπορεί να δημιουργθεί υπό αυτές τις προϋποθέσεις, τότε και ειδικά η χρήση του συστήματος CAM δεν μπορεί να αποφευχθεί.

Σύμφωνα με το γενικό τελικό αντικείμενο το οποίο εξετάζεται στην παρούσα, η γεωμετρία του μπορεί να επιτευχθεί με ένα κέντρο τόρνευσης και ένα τριαξονικό κέντρο κατεργασιών [DHA02]. Αν και η ανάλυση των κοπών που ορίζονται στο φασεολογίο της κατασκευής, καθώς και η επιλογή της συγκεκριμένης ροής των σεταρισμάτων έγιναν με εμπειρικό τρόπο, υπάρχει σχετική βιβλιογραφία κατά την οποία τα δυο ανώτερα θέματα εξετάζονται και μπορούν να βελτιστοποιηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό για τεμάχια μεγαλύτερης πολυπλοκότητας [CHE94], [LEE01].

Παρακάμπτοντας προς στιγμή την παραμετροποίηση που πρέπει να ακολουθήσει, όλες οι διαστάσεις του αντικειμένου λαμβάνονται αρχικά ως σταθερές και ο σχεδιαστής περιορίζεται στο να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες της προσέγγισης των διαφόρων καμπυλών που ενδεχομένως υπάρχουν στο αντικείμενο, καθώς και των αρχικών γεωμετρικών μορφών των τεμαχίων που χρειάζονται για να συνθέσουν το τελικό τεμάχιο. Γνωρίζοντας ότι η δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων δισδιάστατων καμπυλών σε ένα τριαξονικό κέντρο κατεργασιών είναι αδύνατη με την έννοια της χρήσης μιας και μοναδικής εντολής κώδικα σε οποιασδήποτε σύγχρονη μηχανή,

γίνεται η αριθμητική προσέγγιση και η αναπαραγωγή της καμπύλης στο επίπεδο με πολλά σημεία τα οποία μπορούν να κυμανθούν έως τα όρια σχεδόν της μηχανής με γενικούς περιορισμούς την διακριτότητα στις τιμές που μπορεί να επιτευχθούν από την μηχανή καθώς και τις ενδεχόμενες δονήσεις στο λεπτότοιχο της κατασκευής κατά την διάρκεια της κατασκευής [VOR11]. Στο άρθρο [TAN12] αναφέρεται ότι αυτό γίνεται με την βοήθεια προσέγγισης καμπύλης με την χρήση τρίτου βαθμού πολυωνύμου, ώστε να βελτιωθεί η προσέγγιση που γίνεται με το CAM, η οποία χρησιμοποιεί δευτέρου βαθμού πολυώνυμα.

Στην συνέχεια, προσπαθώντας να κατηγοριοποιήσουμε τα σεταρίσματα και τις κατεργασίες που απαιτούνται χρησιμοποιούμε την φιλοσοφία της αρχικών βασικών γεωμετρικών σχημάτων τα οποία στη συνδεόμενα συνθέτουν το τελικό προϊόν με κατάλληλο τρόπο. Εκτενής αναφορά γίνεται στο άρθρο [XUS13] η οποία βασίζεται σε αυτή την αρχή.

Στην κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης, ο σχεδιαστής μπορεί να παραμετροποιήσει τις διαστάσεις των τεμαχίων και να εξάγει τα αντίστοιχα αποτελέσματα με την βοήθεια γλώσσας προγραμματισμού σε G κώδικά. Η χρήση της γλώσσας προγραμματισμού καθίσταται αναγκαία, ώστε να διαμορφωθούν με συνθήκες επαναλαμβανόμενοι κύκλοι κατεργασιών [GUN13].

Είναι αυτονόητο ότι η όλη διαδικασία της κατασκευής συντίθενται με βάση τις αρχές που αναφέρονται στην σειρά των διαδικασιών κατασκευής του φασεολογίου οι οποίες ορίζονται βάσει των προσβάσιμων περιοχών από τα εργαλεία που έχουν επιλεγεί, εκμεταλλεύοντας φυσικά και τις αντίστοιχες κινήσεις των διατάξεων της μηχανής, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται σχετικά, αλλά όχι σε βέλτιστο βαθμό, ο ολικός χρόνος κατεργασίας, άρα και κόστους (περιστροφή εργαλειοφορέα κτλ) [YAN13].

Κατά τις κατεργασίες των τεμαχίων στο κέντρο κατεργασιών λαμβάνεται στο φασεολόγιο ο τρόπος με τον οποίο θα γίνουν οι κατεργασίες, ώστε να χρησιμοποιηθούν όσο το δυνατό λιγότερα εργαλεία. Επίσης, καθ'όλη την διάρκεια των κατεργασιών, λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις των εργαλείων ως μεταβλητές, συνθέτοντας ένα εξίσου ενδιαφέρον πρόβλημα όσον αφορά τους χώρους που πρέπει να κατεργασθούν. Το πρόβλημα αυτό αναπτύσσεται στο άρθρο [TOK95].

Για την διαμόρφωση των πτερυγίων γίνεται η προσέγγιση των καμπυλών που ορίζουν τις αεροτομές και στην συνέχεια με διαδοχικές επαναλήψεις καθ'ύψος και κατά περιστροφή των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων πραγματοποιείται η κατασκευή των πτερυγίων. Παρόμοια με την κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης, εδώ υπάρχει η διαδοχή των φάσεων ώστε να γίνει εφικτή η κατασκευή με σωστό τρόπο (εκχόνδριση, ημι-αποπεράτωση, αποπεράτωση). Επιπλέον, γίνεται χρήση προγραμματιστικής γλώσσας για τους κύκλους επανάληψης, λαμβανομένου υπόψη της ταχύτητας κοπής, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του λεπτότοιχου των αεροτομών [LIU11].

Σε όλη την ανωτέρω διαδικασία, εισάγοντας τον όρο παραμετροποίηση ο σχεδιαστής εισάγει τις τιμές των διαστάσεων των τεμαχίων, των εργαλείων, και της μορφής των αεροτομών έχοντας επιτεύξει το τελικό αποτέλεσμα για την παράκαμψή των πακέτων CAD/CAM για την δημιουργία ακτινικών σταθερών πτερυγώσεων. Σε αυτήν όμως εμπεριέχονται και στοιχεία που αφορούν το υλικό και τις συνθήκες κατεργασιών οι οποίες πρέπει να επιλέγονται από τον σχεδιαστή (συγκόλληση, στροφές και προώσεις) βάσει αντίστοιχων πινάκων και όπως φυσικά ορίζεται από την όλη φιλοσοφία της κατασκευής.

Ιδιαίτερη σημασία έχει στην συνέχεια ο έλεγχος των τροχιών του εργαλείου, ώστε να μην καταστραφεί από λάθος κάποια επιφάνεια των τεμαχίων και

συγκεκριμένα ενδιάμεσα στα πτερύγια. Αυτό μπορεί να γίνει με απλό έλεγχο των κινήσεων και των τιμών των μεταβλητών στα αρχεία παραμετροποιήσης της γεωμετρίας των τεμαχίων, είτε με σχετικό πρόγραμμα αντίστοιχου ελέγχου ή προσομοίωσης.

1.4 Οργάνωση κειμένου

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στις πτερυγώσεις και στις στροβιλομηχανές ώστε να γίνει αντιληπτή η σημασία της γεωμετρίας μιας αεροτομής και πως αυτή ορίζεται. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των εργαλειομηχανών, των παραμέτρων που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη για τις κατεργασίες, καθώς και των αναγκαίων εργαλείων που προσφέρει η τεχνολογία για την διευκόλυνση της παραγωγής του προϊόντος. Τέλος, αναλύονται τα σημαντικότερα προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης κατά την παραμετροποίηση του προϊόντος.

Στο Κεφάλαιο 3 σχεδιάζεται οι τρόποι κατεργασίας στον κέντρο τόρνευσης και στο κέντρο κατεργασιών CNC. Επιλέγοντας τα αρχικά τεμάχια (stock models), δημιουργούμε όλες τις φάσεις κατεργασίας αιτιολογώντας τον τρόπο επιλογής τους. Επίσης, παρουσιάζονται αναλυτικά οι ενέργειες που ακολουθήθηκαν στη δημιουργία των αρχείων της παραμετροποίησης για την εποπτεία των αεροτομών και των δακτυλίων συγκράτησης και γίνεται παρουσίαση των αρχείων εξαγωγής των εντολών για τις κινήσεις των κοπών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η υλοποίηση της προσομοίωσης της κατασκευής. Επίσης, παρουσιάζονται ένας οδηγός χρήσης των αρχείων και εκτελείται μια διαφορετική περίπτωση πτερύγωσης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι διορθωτικές αλλαγές που είναι αναγκαίες να γίνουν, ώστε ο κώδικας να εναρμονιστεί με τα σεταρίσματα στις μηχανές CNC και τα εργαλεία που υπάρχουν στο εργαστήριο του Τομέα Κατεργασιών του Ε.Μ.Π.

Στο Κεφάλειο 6 γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων, προτείνονται εναλλακτικές ενέργειες για την ανάπτυξη των αρχείων κοπής, αναφέρονται ενδεχόμενοι τρόποι έλεγχου της ποιότητας του τελικού τεμαχίου και προτρέπουν όποιο ενδιαφερόμενο σε μελλοντικές επεκτάσεις των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται άρθρα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση και οι πηγές της εργασίας.

2

Γενική προσέγγιση κατασκευής

2.1 Στροβιλομηχανές

Με τον όρο στροβιλομηχανές χαρακτηρίζουμε μηχανές που συναλλάσσουν ενέργεια με το ρευστό το οποίο ρέει συνεχώς μέσα σε αυτές, ενώ αυτή η μεταφορά ενέργειας συντελείται με την δυναμική αλληλεπίδραση του ρευστού και μιας ή περισσοτέρων σειρών στρεφόμενων και σταθερών πτερυγίων. Στον όρο συναλλαγή ενέργειας εμπεριέχονται γενικά δύο περιπτώσεις κατά τις οποίες η μεταφορά ενέργειας μπορεί να γίνεται από το ρευστό προς την άτρακτο της μηχανής, όπου είναι προσδεδεμένα τα στρεφόμενα πτερύγια, είτε αντίστροφα.

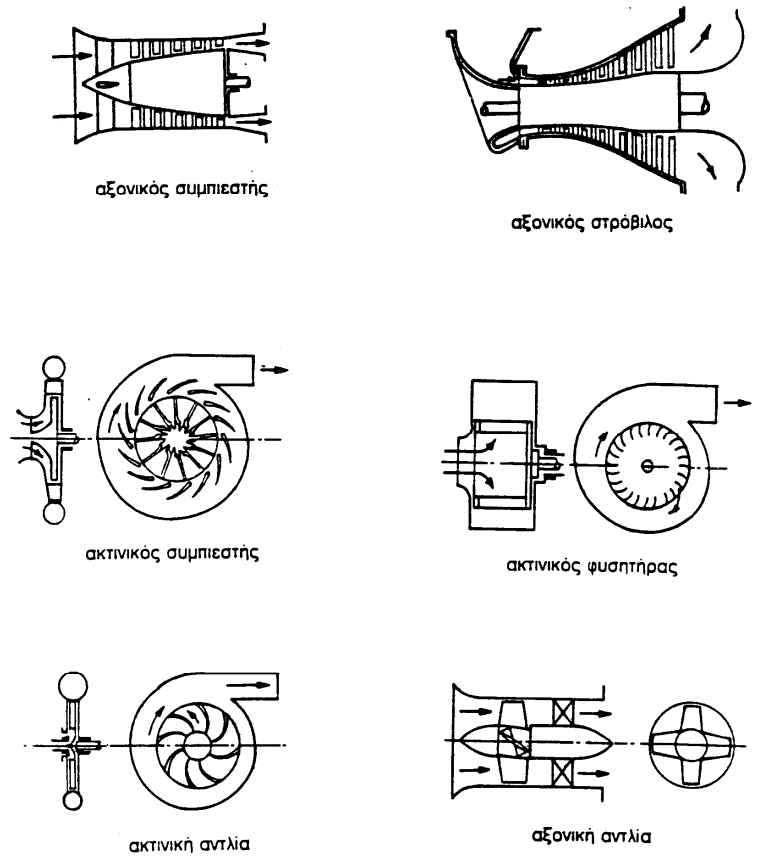
Ο όρος δυναμική αλληλεπίδραση που προαναφέρθηκε σημαίνει ότι στα πτερύγια αναπτύσσονται δυνάμεις αεροδυναμικής φύσης αντίστοιχες της δυναμικής άνωσης που αναπτύσσεται σε μια μεμονωμένη αεροτομή που βρίσκεται μέσα στην ροή ενός ρευστού. Οι δυνάμεις αυτές έχουν περιφερειακή συνιστώσα που δημιουργεί ροπή ως προς τον άξονα περιστροφής και λόγω της περιστροφής των πτερυγίων οδηγεί σε παραγωγή ή απορρόφηση ενέργειας στον άξονα της μηχανής. Οι συστοιχίες πτερυγίων που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της συναλλαγής έργου σε μια στροβιλομηχανή ονομάζονται πτερυγώσεις. Στις στροβιλομηχανές οι αλλαγές κατάστασης συμβαίνουν συνεχώς κατά μήκος της διαδρομής του ρευστού. Ως αποτέλεσμα, ένα στοιχείο ρευστού αλλάζει κατάσταση καθώς διατρέχει τις διάφορες θέσεις κατά μήκος της μηχανής.

Συνήθως, ο ορισμός των στροβιλομηχανών περιορίζεται στις περιπτώσεις μηχανών που περιλαμβάνουν σειρά ή σειρές πτερυγίων μέσα σε κλειστό κέλυφος και για τον λόγο αυτό, χαρακτηρίζονται ως κλειστές στροβιλομηχανές. Η παρουσία κλειστού κελύφους οδηγεί σε διαφορετική μορφή του πεδίου ροής λόγω της επιβολής των οριακών συνθηκών τις οποίες υπαγορεύει η ύπαρξη των στερεών τοιχωμάτων.

Οι στροβιλομηχανές μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες εφαρμόζοντας διάφορα κριτήρια τα οποία σχετίζονται με το είδος της λειτουργίας, την γεωμετρία ή άλλα χαρακτηριστικά τους.

Ο πρώτος βασικός διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το αν η μηχανή προσδίδει έργο στο ρευστό ή απορροφά έργο από το ρευστό. Οι μηχανές που απορροφούν έργο από το ρευστό και το αποδίδουν ως μηχανική ισχύ στην άτρακτο ονομάζονται στρόβιλοι. Οι μηχανές που προσδίδουν έργο στο ρευστό απορροφώντας μηχανική ισχύ από την άτρακτο ονομάζονται εργοστροβιλομηχανές.

Ένας άλλος διαχωρισμός γίνεται σύμφωνα με την γεωμετρική μορφή που έχει η δίοδος του ρευστού μέσα από την μηχανή. Στις λεγόμενες αξονικές στροβιλομηχανές η δίοδος του ρευστού είναι περίπου παράλληλη με τον άξονα της μηχανής, ενώ όταν η δίοδος είναι κατά κύριο λόγο κάθετη με τον άξονα της μηχανής τότε πρόκειται για ακτινικές στροβιλομηχανές. Παραδείγματα διατάξεων αξονικών και ακτινικών μηχανών φαίνονται στο σχήμα 2.1.



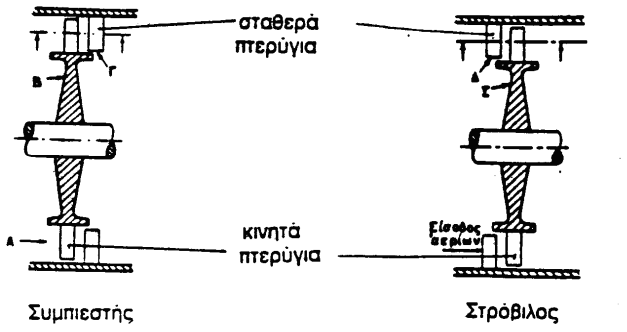
Σχήμα 2.1 Σχηματική παράσταση διαφόρων διατάξεων στροβιλομηχανών

Το είδος του ρευστού που διαρρέει μια στροβιλομηχανή καθώς και το μέγεθος της θερμοδυναμικής μεταβολής που αυτό υφίσταται δίνει ένα άλλο κριτήριο διαχωρισμού. Έτσι οι στρόβιλοι χωρίζονται σε υδροστρόβιλους (υγρό εργαζόμενο μέσο), ατμοστρόβιλους (το εργαζόμενο μέσο είναι ατμός) και στροβίλους αερίου (αέριο εργαζόμενο μέσο). Για τις εργοστροβιλομηχανές, όταν το εργαζόμενο μέσο είναι υγρό, χρησιμοποιείται ο όρος αντλία, όταν είναι αέριο αλλά η θερμοδυναμική μεταβολή που υφίσταται οδηγεί σε αμελητέες μεταβολές της πυκνότητάς του, τότε πρόκειται για φυσητήρα ή ανεμιστήρα. Στην περίπτωση που το μέσο υφίσταται

σημαντικές αλλαγές πυκνότητας και συνακόλουθα πίεσης και θερμοκρασίας, η στροβιλομήχανή ονομάζεται συμπιεστής.

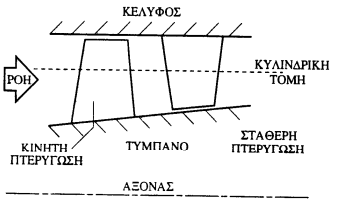
Η συναλλαγή έργου μεταξύ στροβιλομηχανής και ρευστού πραγματοποιείται με την χρήση σειρών πτερυγίων, όπως είπαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο αριθμός των σειρών πτερυγίων που απαρτίζουν την μηχανή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ιδιαίτερα όμως, από περιορισμούς που επιβάλλει η δυναμική της ροής μέσα από την μηχανή. Για να χαρακτηρίσουμε τον αριθμό των σειρών πτερυγίων από τα οποία αποτελείται μια μηχανή χρησιμοποιούμε την έννοια της βαθμίδας.

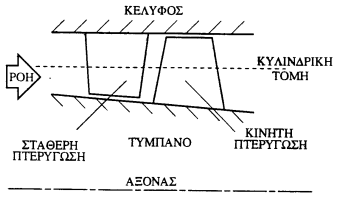
Η βαθμίδα αποτελεί ένα τυπικό στοιχειώδες μέρος μιας μηχανής και αποτελείται στην γενική περίπτωση από μια κινητή και μια ακίνητη πτερύγωση. Στην βαθμίδα συμπιεστή έχουμε μια κινητή πτερύγωση που ακολουθείται από μια σταθερή, ενώ στην βαθμίδα στροβίλου προηγείται η σταθερή και ακολουθεί η κινητή πτερύγωση. Μια βαθμίδα μπορεί να αποτελείται από μια βαθμίδα (μονοβάθμια) ή περισσότερες (πολυβάθμια) Στο σχήμα 2.2 φαίνονται τυπικές διατάξεις βαθμίδας αξονικού συμπιεστή και αξονικού στροβίλου.

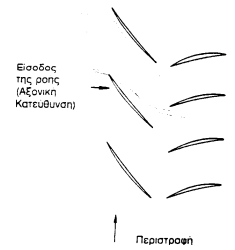


Σχήμα 2.2 Τυπικές διατάξεις βαθμίδας αξονικού συμπιεστή και βαθμίδας αξονικού στροβίλου

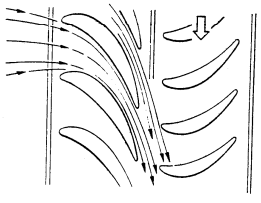
Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μια βαθμίδα αξονικού συμπιεστή στην οποία τα πτερύγια της κινητής και της ακίνητης πτερύγωσης τέμνονται με μια κυλινδρική επιφάνεια. Στο ίδιο σχήμα δίνεται το ανάπτυγμα της κυλινδρικής επιφάνειας όπου αναγνωρίζονται οι τομές μερικών πτερυγίων που αποτελούν τις δύο πτερυγώσεις. Το σχήμα 2.4 παρουσιάζει τις αντίστοιχες τομές της σταθερής και της κινητής πτερύγωσης ενός αξονικού στροβίλου.





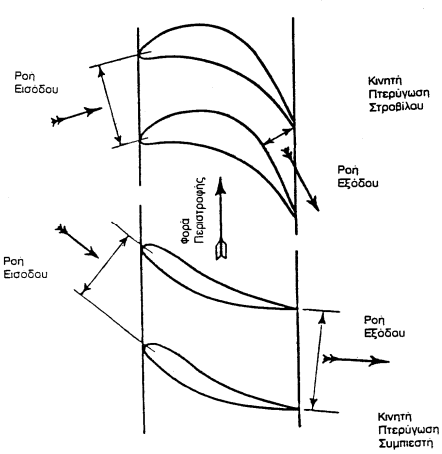


Σχήμα 2.3 Τομή των πτερυγίων ενός τυπικού αξονικού συμπιεστή με μια κυλινδρική επιφάνεια



Σχήμα 2.4. Τομή σταθερής και κινητής πτερύγωση ενός αξονικού στροβίλου με μια κυλινδρική επιφάνεια

Στο σχήμα 2.5 χρησιμοποιώντας μια αντίστοιχη τομή με κυλινδρική επιφάνεια παρουσιάζεται η μορφή της τομής των πτερυγίων που αποτελούν την κινητή πτερύγωση ενός αξονικού στροβίλου και ενός αξονικού συμπιεστή. Το σχήμα αυτό τονίζει τις σημαντικές διαφορές που παρουσιάζονται μεταξύ των δυο τύπων πτερυγίων, ως προς την γεωμετρική μορφή τους, την φορά περιστροφής τους και την διαδρομή του εργαζόμενου μέσου μέσα από τις δυο πτερυγώσεις. Παρόμοιες μορφές τομών συναντώνται και στην σταθερή πτερύγωση των αξονικών στροβίλων και συμπιεστών.



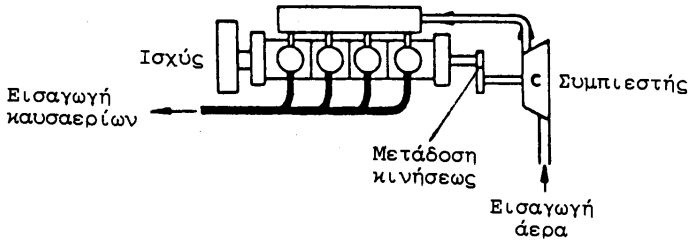
Σχήμα 2.5 Κινητή πτερύγωση αξονικού στροβίλου και συμπιεστή

Στον τομέα των επίγειων μεταφορών η χρήση στροβιλομηχανών η χρήση στροβιλομηχανών διευρύνεται τα τελευταία χρόνια με την εισαγωγή στην παραγωγή των στροβιλο-υπερπληρωτών. Παρόλα αυτά, μια διάταξη στροβιλομηχανών χρησιμοποιείται ευρύτατα για την αύξηση της συγκέντρωσης ισχύος και την βελτίωση των επιδόσεων των εμβολοφόρων μηχανών. Αυτή είναι η διάταξη του στροβιλοϋπερπληρωτή.

Η ισχύς ενός κινητήρα μπορεί να αυξήσει σημαντικά με την λεγόμενη υπερπλήρωση, η οποία συνιστάται στην αντικατάσταση της 'φυσικής' αναπνοής του κινητήρα (δηλαδή της άμεσης αναρρόφησης αέρα από το περιβάλλον) με την εξαναγκασμένη πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα υπό πίεση που παρέχεται από ένα συμπιεστή.

Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται αύξηση της μάζας του αέρα με την οποία γεμίζει ο κύλινδρος σε κάθε κύκλο λειτουργίας, οπότε καθίσταται δυνατή και η καύση ανάλογης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, μάλιστα χωρίς σημαντική ανύψωση της θερμοκρασιακής στάθμης στον κύλινδρο, και επομένως απόδοσης μεγαλύτερης ισχύος. Βέβαια, η ύπαρξη υψηλότερων πιέσεων απαιτεί και στιβαρότερη κατασκευή του κινητήρα.

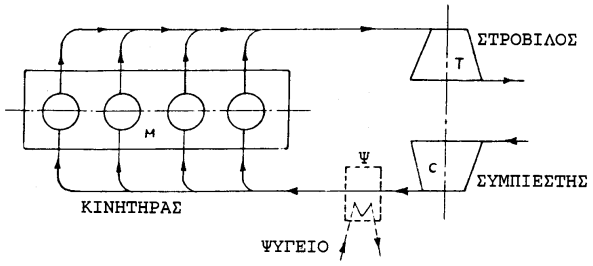
Ο συμπιεστής υπερπληρώσεως μπορεί καταρχήν να παίρνει κίνηση από τη στροφαλοφόρο άτρακτο (απορροφώντας πολύτιμο μηχανικό έργο) του κινητήρα, όποτε έχουμε την λεγόμενη μηχανική υπερπλήρωση. Τέτοια διάταξη φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Μηχανική υπερπλήρωση

Σήμερα βρίσκεται σε γενική σχεδόν χρήση το σύστημα με υπερπλήρωση με καύσιμο ή υπερπλήρωση με ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή, ή απλά στροβιλο-υπερπλήρωση, κατά την διάταξη του σχήματος 2.7, όπου ο συμπιεστής C κινείται από ένα στρόβιλο Τ, που παράγει ισχύ εκμεταλλευόμενος τα υψηλά θερμοδυναμικά

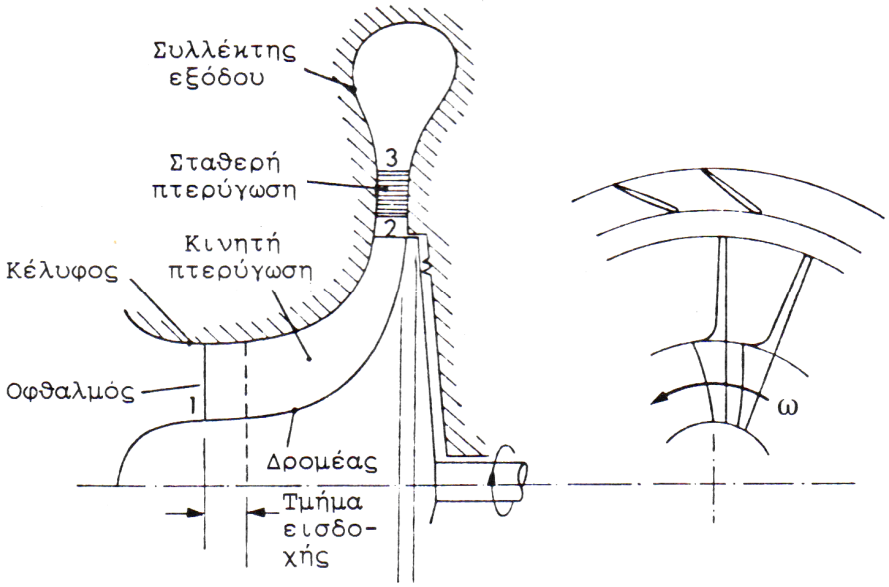
χαρακτηριστικά των καυσαερίων στην έξοδο από τους κυλίνδρους. Τονίζεται ότι το ζεύγος (σε κοινή άτρακτο) υπερπληρώσεως (C-T) δεν έχει καμία μηχανική σύνδεση με τον κινητήρα Μ.



Σχήμα 2.7 Στροβιλο-υπερπλήρωση

Όταν έχουμε υψηλή υπερπλήρωση (δηλαδή βαθμό υπερπληρώσεως περίπου άνω του 40%) εφαρμόζεται και η ψύξη του αέρα σε ψυγείο Ψ (που λειτουργεί με νερό) που καλείται ψυγείο του αέρα υπερπληρώσεως, το οποίο τοποθετείται μετά το συμπιεστή και προ της εισόδου στους κυλίνδρους του κινητήρα. Αυτό γίνεται για να μειωθεί η θέρμανση του αέρα που προήλθε από την προηγηθείσα συμπίεσή του και έτσι να ανυψωθεί η πυκνότητά του και άρα ο βαθμός υπερπληρώσεως του κινητήρα.

2.1.1 Συμπιεστής ακτινικής ροής



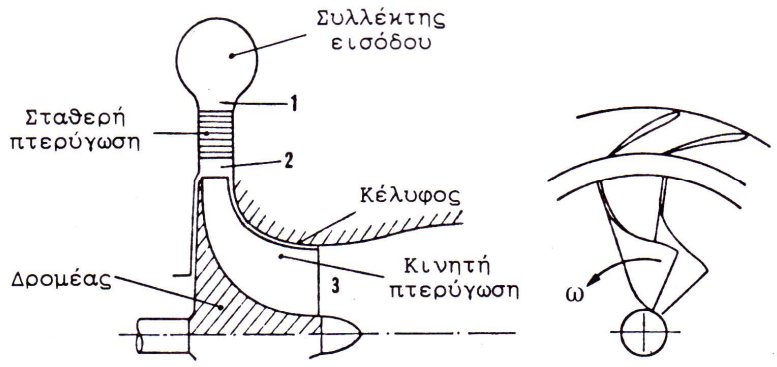
Σχήμα 2.8 Φυγοκεντρικής ροής συμπιεστής

Ο ακτινικός συμπιεστής μιας βαθμίδας παρουσιάζει το πλεονέκτημα της μεγάλης σχέσης συμπίεσης, αλλά τα μειονεκτήματα της μικρότερης παροχής μάζας και του μικρότερου βαθμού απόδοσης, έναντι του αξονικού συμπιεστού. Για αυτό τον λόγο, στους αεριοστρόβιλους έχουν επικρατήσει οι αξονικής ροής συμπιεστές με εξαίρεση τις μικρές ισχύεις όπου επικρατεί ο ακτινικός συμπιεστής λόγω της απλής και συμπαγούς κατασκευής του και της ικανότητας του να χειρίζεται αποδοτικά μικρές παροχές.

Οι ακτινικοί συμπιεστές έχουν πάντοτε ροή από το κέντρο προς την περιφέρεια, γι'αυτό και καλούνται φυγοκεντρικοί. Το σχήμα 2.8 δείχνει την σχεδίαση ενός τέτοιου συμπιεστού. Τα κινητά πτερύγια μπορούν να στηρίζονται μονόπλευρα επί του δρομέα (ανοικτός δρομέας) οπότε η ροή περιορίζεται στην άλλη πλευρά από το κέλυφος ή φέρουν στην εξωτερική πλευρά τους κάλυμμα (κλειστός δρομέας). Η ροή μετά το δρομέα εισέρχεται στον διαχύτη που περιλαμβάνει την σταθερή πτερύγωση για να εισέλθει κατόπιν στον σπειροειδή συλλέκτη εξόδου, προτού αποδοθεί στην κατανάλωση.

Το ρευστό αναρροφάται στον οφθαλμό του συμπιεστού και εισέρχεται στο τμήμα εισδοχής κατά την αξονική κατεύθυνση. Η σχετική ροή στρέφεται στο τμήμα της εισδοχής, που συνήθως τελειώνει στην περιοχή όπου η ροή αρχίζει να γυρίζει στην ακτινική κατεύθυνση. Στον δρομέα έχουμε αύξηση της ταχύτητας και της στατικής πίεσης ενώ στο διαχύτη έχουμε μετατροπή της κινητικής ενέργειας εξόδου από τον δρομέα σε στατική πίεση.

2.1.2 Στρόβιλος ακτινικής ροής



Σχήμα 2.9 Κεντρομόλου ροής 90^o στρόβιλος

Οι στρόβιλοι ακτινικής ροής με ροή από την περιφέρεια προς το κέντρο καλούμενοι κεντρομόλου ροής βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή σε πολύ μικρής ισχύος αεριοστροβίλους (π.χ. για διαστημική χρήση ή στροβιλο-υπερπλήρωση εμβολοφόρων κινητήρων).

Το σχήμα 2.9 δείχνει την σχεδίαση ενός τέτοιου στροβίλου, που όπως φαίνεται έχει παρόμοια στοιχεία με αυτά ενός φυγοκεντρικού συμπιεστού, με αντίθετη φυσικά φορά της ροής (κεντρομόλος).

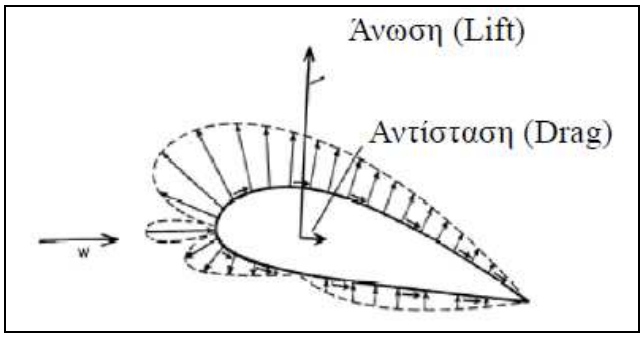
2.2 Πτερυγώσεις

Βασικό στοιχείο για την κατανόηση της λειτουργίας της πτερύγωσης είναι η αεροτομή. Αεροτομή ονομάζεται το γεωμετρικό σχήμα το οποίο μοιάζει με το σχήμα ενός φτερού, ή σε μηχανολογικές εφαρμογές, μιας έλικας, ενός στροφείου ή στροβίλου ή προπέλας, όπως φαίνεται σε εγκάρσια τομή. Όταν ένα σώμα με σχήμα αεροτομής κινείται σε ένα ρευστού τότε σε αυτό παράγεται μια αεροδυναμική δύναμη. Η συνιστώσα της δύναμης κάθετη προς την κατεύθυνση της κίνησης

ονομάζεται άνωση (lift), ενώ η συνιστώσα παράλληλη προς την κατεύθυνση της κίνησης ονομάζεται οπισθέλκουσα ή αντίσταση (drag).

Η δυνάμεις αυτές είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της πίεσης, άρα και της ταχύτητας της ροής του ρευστού αμφότερα στο άνω και κάτω μέρος της αεροτομής που οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αεροτομής και των ιδιοτήτων του ρευστού και της κίνησης της αεροτομής στο ρευστό.

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται το σχήμα της αεροτομής, καθώς και οι κατανομές πιέσεων στο άνω και κάτω μέρος της, καθώς και μια ποιοτική απεικόνιση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων. Επίσης, αναφέρεται ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή μπορούν να εκφραστούν και με την έννοια της κυκλοφορίας.



Σχήμα 2.10 Τυπικό σχήμα αεροτομής – άνωση, αντίσταση και κατανομή των πιέσεων

Μια πτερύγωση αποτελείται από μια σειρά πτερυγίων τοποθετημένων κατά τρόπο επιθυμητό, ώστε όταν αυτή κινείται σε ρεύμα ρευστού να αναπτύσσεται δύναμη ή ροπή ίση με το σύνολο των επιμέρους δυνάμεων ή ροπών των αεροτομών. Στο σχήμα 2.11 παρατηρούμε μια τυπική διάταξη πτερύγωσης ακτινικού συμπιεστή, ενώ στο σχήμα 2.12 μια διάταξη πτερύγωσης ακτινικού στροβίλου.

Σχήμα 2.11 Τυπικό σχήμα κινητής πτερύγωσης ακτινικού συμπιεστή

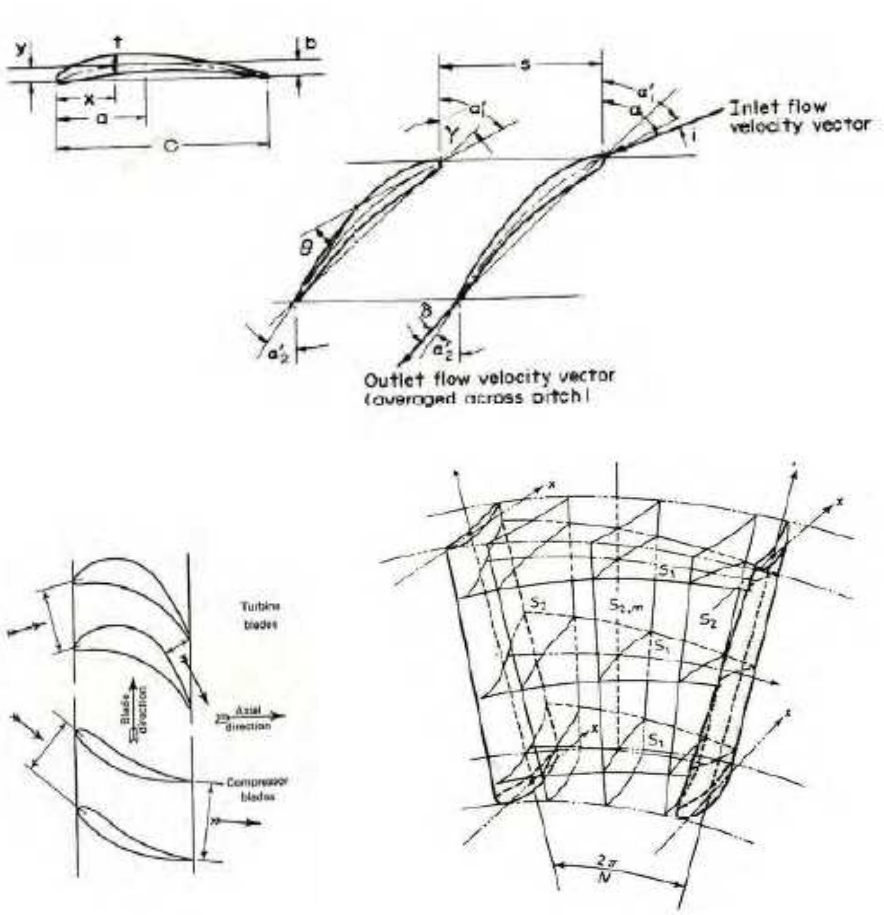
Σχήμα 2.12 Τυπικό σχήμα ακίνητης πτερύγωσης ακτινικού στροβίλου

2.2.1 Ονοματολογία στοιχειωδών μεγεθών πτερύγωσης

Η τυπική γεωμετρία, οι αντίστοιχοι παράμετροι και η ονοματολογία της πτερύγωσης φαίνεται στην εικόνα 2.13. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν μια πτερύγωση είναι:

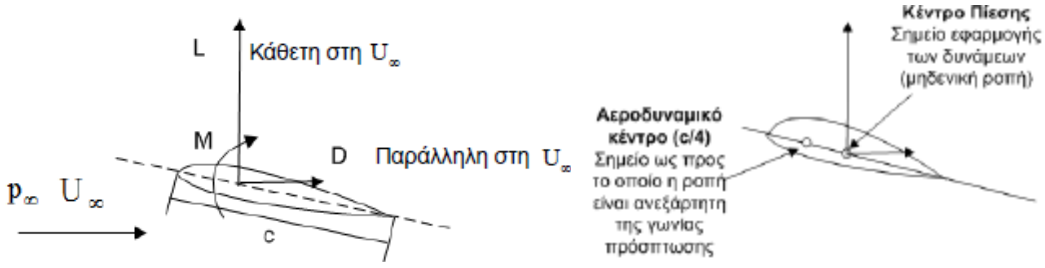
- Η απόσταση (s) μεταξύ δυο διαδοχικών αεροτομών που ονομάζεται και διάκενο (pitch).
- Η χορδή (chord),c, που είναι η ευθεία γραμμή μεταξύ των δυο άκρων της αεροτομής
- Η γραμμή καμπυλότητας (chamber line) που είναι η καμπύλη γραμμή σε ίση απόσταση από τις δυο εξωτερικές πλευρές που ορίζουν το σχήμα της αεροτομής.
- Η κατανομή το πάχους (thickness) της αεροτομής ως προς την γραμμή καμπυλότητας
- Η γωνία πλευρίσματος (stagger angle) γ, που σχηματίζει η χορδή με την αξονική κατεύθυνση της ροής (εδώ κατεύθυνση x)
- Η γωνία εισόδου της αεροτομής (α_1') που σχηματίζει η κατεύθυνση x με την εφαπτόμενη της γραμμής καμπυλότητας στο χείλος προσβολής
- Η γωνία εξόδου της αεροτομής (α_2') αντίστοιχα στο χείλος εκφυγής
- Η γωνία καμπυλότητας (camber) θ, όπου $\theta=\alpha_1'-\alpha_2'$
- Η γωνία εισαγωγής του ρευστού (inlet flow angle) α μεταξύ του διανύσματος u (ή C) και της κατεύθυνσης x
- Η γωνία εξόδου του ρευστού α μεταξύ του u (ή C) και της x
- Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) i, όπου $i=\alpha-\alpha_1'$
- Οι γωνίες απόκλισης (deviation angle), δ, όπου $\delta=\alpha-\alpha'$
- Και η γωνία εκτροπής, ε, όπου $\varepsilon=\alpha-\alpha_1$

Στα περιστρεφόμενα πτερύγια έχουμε και τις σχετικές γωνίες (β_1, β_2) που σχηματίζουν τα αντίστοιχα διανύσματα των σχετικών ταχυτήτων (w_1,w_2) με την κατεύθυνση x.



Σχήμα 2.13 Τυπική γεωμετρία πτερυγώσεων

Επιπλέον, σε μια αεροτομή διακρίνονται δυο σημεία. Το κέντρο πίεσης, όπου είναι το γεωμετρικό σημείο πάνω στην γραμμή καμπυλότητας στο οποίο ασκούνται οι δυνάμεις άνωσης και οπισθέλκουσας. Είναι ευνόητο ότι η ροπή στο κέντρο πίεσης είναι μηδενική. Επίσης, διακρίνεται και το αεροδυναμικό κέντρο, το οποίο βρίσκεται στο ¼ του μήκους της χορδής από το σημείο προσβολής. Πρόκειται για ένα σημείο όπου η ροπή είναι ανεξάρτητη για ένα εύρος γωνιών πρόσπτωσης και ο συντελεστής της ροπής ορίζεται ως μια σταθερή ποσότητα, σχήμα 2.14.

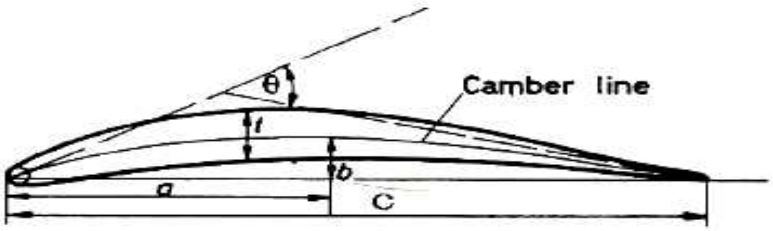


Σχήμα 2.14 Δυνάμεις, αεροδυναμικό κέντρο και κέντρο πίεσης στην αεροτομή

Στην διάρκεια της εξέτασης των φαινομένων σε αεροσήραγγες, στα πρώτα στάδια τουλάχιστον της σχεδίασης μιας στροβιλομηχανής, διάφορα φαινόμενα

ποσοτικοποιούνται βάσει εμπειρικών σχέσεων και πειραματικών δεδομένων. Οι εμπειρικές σχέσεις συνήθως απαιτούν κάποια γνώση των χαρακτηριστικών των αεροτομών και της πτερύγωσης. Η γεωμετρία των αεροτομών μπορεί να προσδιοριστεί είτε με το να καθορίσουμε την κατανομή ταχύτητας γύρω από την αεροτομή είτε να κάνουμε χρήση μιας γενικής οικογένειας αεροτομών. Οι πιο γνωστές οικογένειες είναι οι Βρετανικές (με γραμμή καμπυλότητας κυκλική ή παραβολική), οι Αμερικάνικες NACA-xxxx, οι γερμανικές Goetting xxx, και άλλες.

Στην Βρετανική σειρά αεροτομών χρησιμοποιούμε το γράμμα C για να προσδιορίσουμε την βασική κατανομή πάχους (t/c) ως προς την γραμμή καμπυλότητας. Έτσι έχουμε οικογένειες C1, C2, C3, C4, κλπ.



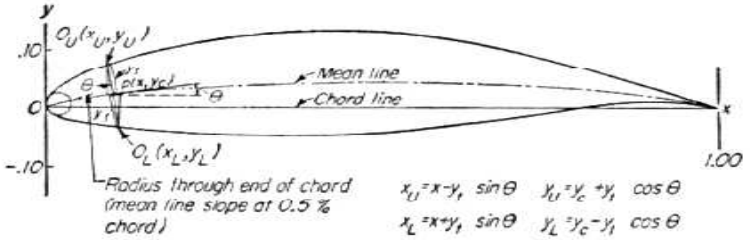
Σχήμα 2.15 Χαρακτηριστικά μεγέθη τυπικής αεροτομής

Στις αμερικάνικές αεροτομές NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), εκτός από την κατανομή του πάχους (t/c), ορίζεται και η γραμμή καμπυλότητας.

Συγκεκριμένα, η σειρά NACA 4 ψηφίων αντιπροσωπεύει πτερυγώσεις ως:
Το πρώτο ψηφίο είναι η μέγιστη καμπυλότητα ως ποσοστό της χορδής (%)
Το δεύτερο ψηφίο είναι η απόσταση (%/10) του LE από το σημείο που εμφανίζει την μέγιστη καμπυλότητα
Το τρίτο και τέταρτο ψηφίο (%) εκφράζει το μέγιστο πλάτος ως ποσοστό της χορδής
Π.χ. NACA 4412
4: max καμπυλότητα 4% της χορδής
4: θέση max καμπυλότητας 40% της χορδής
12: max πάχος 12% της χορδής

Όμοια γίνεται και για τις σειρές NACA 5 και 6 ψηφίων με προσδιορισμό περισσότερων στοιχείων για την γεωμετρία των αεροτομών.

Για κάθε αεροτομή, όπως θα αναπτύξουμε αργότερα, η μέση γραμμή και η κατανομή πάχους δίνεται από γνωστές συναρτήσεις. Με αυτόν τον τρόπο η κατανομή του πάχους ‘κτίζεται’ κάθετα στην μέση γραμμή και δημιουργεί την άνω και κάτω επιφάνεια της αεροτομής.



Σχήμα 2.16 Κατανομή πάχους γύρω από την μέση γραμμή αεροτομής

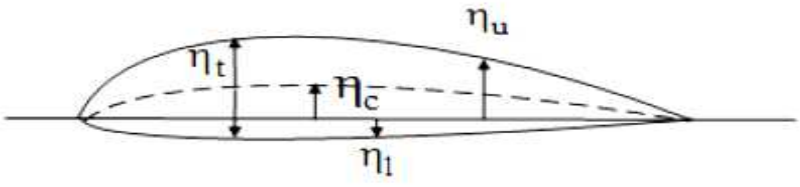
Στους χώρους μεταξύ των πτερυγίων υπάρχουν απώλειες που σχηματίζονται από το κέλυφος της μηχανής μας ή το τύμπανο, τα οποία συμβάλλουν στην δημιουργία της δευτερογενής στροβιλότητας. Επίσης, μπορεί να υπάρχουν απώλειες που οφείλονται σε εσωτερικά διάκενα που χρησιμεύουν στην ψύξη. Προφανώς, δεν μπορούμε να απαλλαγούμε από όλες τις αιτίες των απωλειών, εντούτοις ο σχεδιαστής πρέπει να εξετάσει όλα τα ενδεχόμενα στους τρόπους με τους οποίους θα φτιαχτεί η πτερύγωση ώστε να μειώσει όσο το δυνατό τις τιμές των απωλειών. Κύριοι άξονες πάνω σε αυτή την θεώρηση είναι η σωστή εφαρμογή των πτερυγίων στους δίσκους έδρασής των, καθώς και η τραχύτητα των επιφανειών των πτερυγίων, σχήμα 2.17.

Σχήμα 2.17 Πρόσθετες απώλειες στις πτερυγώσεις και η δευτερογενής στροβιλότητα

2.2.2 Εξισώσεις περιγραφής αεροτομής

Με την ανάπτυξη της τεχνογνωσίας γύρω από τις ροές και με την επίτευξη της διαχείρισης του ατμού στα τέλη της βιομηχανικής επανάστασης, αρχές του 20^{ου} αιώνα έγινε αναγκαία η χρήση στροβίλων ή συμπιεστών με ορισμένα χαρακτηριστικά. Η μοντελοποίηση τους τότε ήταν μηδαμινή αφού οι εξισώσεις των πτερυγίων εκφράζονταν για κάθε ένα από τα προς δημιουργία πτερύγια, ή πτέρυγες αεροσκαφών. Σήμερα, πρότυπα μοντέλα αδιαστατοποιημένων αεροτομών, όπως προαναφέρθηκαν οι βρετανικές και οι αμερικάνικες σειρές, λειτουργούν ως βάση για τη μοντελοποίηση των κατασκευών.

Εκφράζουμε λοιπόν την μέση γραμμή καμπυλότητας με μια συνάρτηση $\eta_c(\xi)$ και την κατανομή του πάχους $\delta(\xi)/2=\eta_t(\xi)$, με ξ [0,1], σχήμα 2.18, 219.



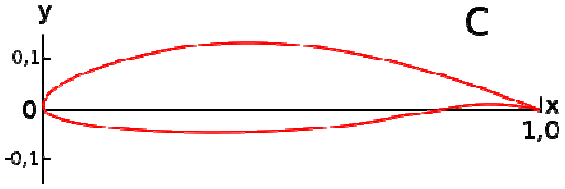
Σχήμα 2.18 Εξισώσεις περιγραφής αεροτομής

Τότε μπορούν να οριστούν οι άνω και κάτω πλευρές της πτερύγωσης αφού όπως αναφέρθηκε κατά τους ορισμούς η μέση γραμμή ισαπέχει από τις πλευρές. Τότε:

$$\xi=x/c$$
$$\eta_u(\xi)=\eta_c(\xi)+\delta(\xi)/2$$
$$\eta_l(\xi)=\eta_c(\xi)-\delta(\xi)/2 \quad (2.1)$$

Επίσης,

$$\eta_c(\xi)=[\eta_u(\xi)+\eta_l(\xi)]/2$$
$$\eta_t(\xi)=[\eta_u(\xi)-\eta_l(\xi)]/2 \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.19 Μορφή αδιαστατοποιημένης αεροτομής

Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι για την σειρά NACA 4 ψηφίων συμμετρικής αεροτομής έχουμε

$$y_t = \frac{t}{0.2}c\left[0.2969\sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260\left(\frac{x}{c}\right) - 0.3516\left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843\left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015\left(\frac{x}{c}\right)^4\right],$$

η συνάρτηση του πάχους της αεροτομής, η οποία σημειωτέων ότι δεν είναι αδιαστατοποιημένη στον κατακόρυφο άξονα. Τότε οι συντεταγμένες είναι $x_u=x_l=x$ και $y_u=+y_t$ και $y_l=-y_t$, όντας συμμετρική.

Για τις υπόλοιπες σειρές NACA οι συντεταγμένες δίνονται από άλλες, περισσότερο πολύπλοκες συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις αυτές παρέχονται από πηγές στο διαδίκτυο. Όμως, η χρήση τους είναι αρκετά δυσχερής αφού απαιτούνται αρκετές πράξεις.

Προς ευκολία των ερευνητών και των μηχανικών, έχουν αδιαστατοποιηθεί το μήκος της χορδής $\xi=x/c$ και η άνω και κάτω πλευρά των αεροτομών ($\eta_u(\xi)$ και $\eta_l(\xi)$) και προσφέρονται στο διαδίκτυο ως ένα πλήθος σημείων στον αδιάστατο χώρο $\{\xi,\eta\}$, σχήμα 2.20. Με υπολογιστικά μοντέλα, οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να έχουν στην διάθεσή τους τα σημεία και να δημιουργήσουν μια αεροτομή, η οποία προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αυτήν που ορίζουν οι εκάστοτε συναρτήσεις η(x) και δ(x), με την ευκολία της διαστατοποίησης στον πραγματικό χώρο {X,Y}.

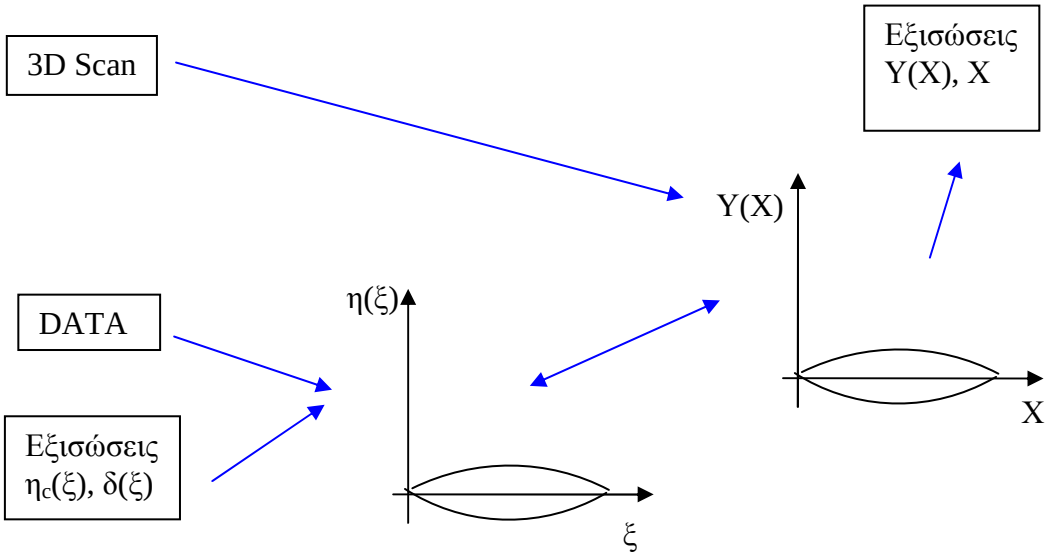
Καθόσον, λοιπόν, οι συναρτήσεις της μέσης γραμμής καμπυλότητας και πάχους εκφράζονται ως συναρτήσεις τουλάχιστον δευτέρου βαθμού, μπορεί κάλλιστα ο σχεδιαστής να δημιουργήσει συναρτήσεις που ταιριάζουν στις απαιτήσεις του (π.χ. $\eta_c(\xi)=ax^3+bx^2+cx$).

Table XIV. Coordinates of 10-Percent-Thick Supercritical Airfoil SC(2)-1010 Designed for 1.0 Lift Coefficient

x/c	$(y/c)_u$	$(y/c)_l$	x/c	$(y/c)_u$	$(y/c)_l$
0.000	0.0000	0.0000	.500	.0455	-.0454
.002	.0076	-.0076	.510	.0449	-.0449
.005	.0116	-.0116	.520	.0443	-.0444
.010	.0156	-.0156	.530	.0437	-.0439
.020	.0207	-.0207	.540	.0430	-.0434
.030	.0242	-.0242	.550	.0423	-.0428
.040	.0270	-.0270	.560	.0416	-.0422
.050	.0294	-.0294	.570	.0408	-.0416
.060	.0315	-.0314	.580	.0400	-.0410
.070	.0333	-.0332	.590	.0391	-.0404
.080	.0349	-.0348	.600	.0382	-.0398
.090	.0364	-.0362	.610	.0373	-.0392
.100	.0378	-.0375	.620	.0363	-.0386
.110	.0390	-.0387	.630	.0353	-.0380
.120	.0401	-.0398	.640	.0342	-.0374
.130	.0412	-.0408	.650	.0330	-.0367
.140	.0422	-.0418	.660	.0318	-.0360
.150	.0431	-.0427	.670	.0305	-.0353
.160	.0439	-.0435	.680	.0292	-.0346
.170	.0447	-.0443	.690	.0278	-.0339
.180	.0454	-.0450	.700	.0264	-.0332
.190	.0460	-.0457	.710	.0249	-.0325
.200	.0466	-.0463	.720	.0233	-.0319
.210	.0471	-.0468	.730	.0217	-.0313
.220	.0476	-.0473	.740	.0200	-.0307
.230	.0480	-.0478	.750	.0183	-.0301
.240	.0484	-.0482	.760	.0165	-.0295
.250	.0487	-.0486	.770	.0147	-.0290
.260	.0490	-.0489	.780	.0128	-.0285
.270	.0493	-.0492	.790	.0109	-.0280
.280	.0495	-.0494	.800	.0089	-.0276
.290	.0497	-.0496	.810	.0069	-.0272
.300	.0498	-.0498	.820	.0048	-.0269
.310	.0499	-.0499	.830	.0027	-.0266
.320	.0500	-.0500	.840	.0005	-.0264
.330	.0500	-.0500	.850	-.0017	-.0263
.340	.0500	-.0500	.860	-.0040	-.0264
.350	.0500	-.0500	.870	-.0063	-.0267
.360	.0499	-.0499	.880	-.0087	-.0271
.370	.0498	-.0498	.890	-.0111	-.0277
.380	.0497	-.0496	.900	-.0136	-.0285
.390	.0495	-.0494	.910	-.0161	-.0295
.400	.0493	-.0492	.920	-.0187	-.0307
.410	.0491	-.0489	.930	-.0214	-.0321
.420	.0488	-.0486	.940	-.0241	-.0337
.430	.0485	-.0483	.950	-.0269	-.0355
.440	.0482	-.0480	.960	-.0298	-.0375
.450	.0478	-.0476	.970	-.0327	-.0398
.460	.0474	-.0472	.980	-.0357	-.0423
.470	.0470	-.0468	.990	-.0388	-.0451
.480	.0465	-.0464	1.000	-.0420	-.0481
.490	.0460	-.0459			

Σχήμα 2.20 Παράδειγμα συντεταγμένων αδιαστατοποιημένης αεροτομής

Σε περιπτώσεις που έχουμε την γεωμετρία της αεροτομής, αλλά όχι τις εξισώσεις που την περιγράφουν μπορεί να γίνει χρήση σχεδιαστικών πακέτων. Ένα από τα εργαλεία που παρέχονται σε αυτά τα πακέτα είναι και το 3D Scan, όπου ο σχεδιαστής μπορεί με ειδική συσκευή Laser να σαρώσει γεωμετρίες στην φυσική τους υπόσταση. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον υπολογιστή, ως σημεία με συντεταγμένες στον χώρο, αποθηκεύονται και στην συνέχεια εισάγονται στο σχεδιαστικό περιβάλλον, όπου γίνεται η αναπαράσταση του σαρωμένου αντικειμένου. Έπειτα, μπορεί να γίνει προσδιορισμός της συναρτησιακής σχέσης που τους δίνει την συγκεκριμένη μορφή στον χώρο με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης. Ως αποτέλεσμα, εξάγονται οι συναρτήσεις συντεταγμένων, στις οποίες μπορεί ο σχεδιαστής να επιλέξει με κριτήριο την απλότητα τους, ή την πιθανότερη έκφραση της πραγματικής γεωμετρίας.



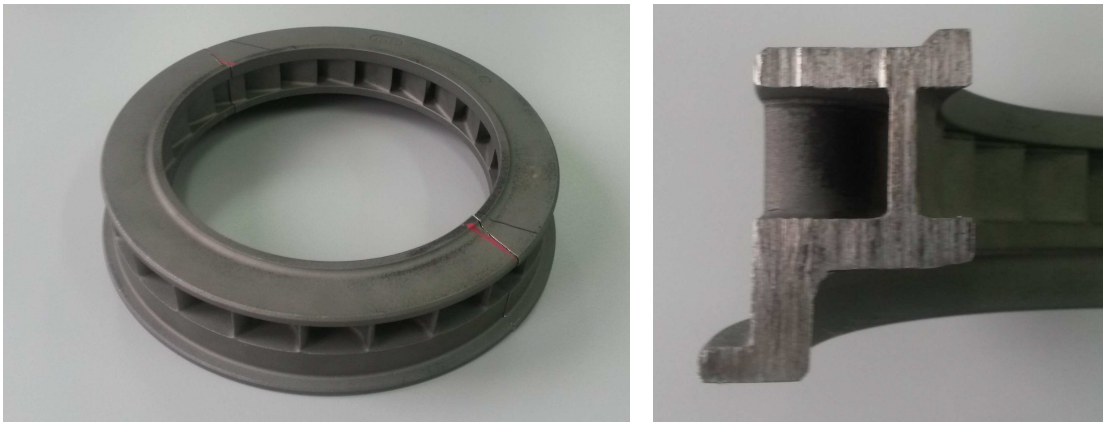
Σχήμα 2.21 Διαδικασία διαστατοποίησης αεροτομών

Για να έχουμε μια τάξη μεγέθους των δυνάμεων που ασκούνται στην πτερύγωση μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα, είτε γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά των ιδιοτήτων του ρευστού πριν και μετά την αεροτομή, είτε γνωρίζοντας τις συναρτήσεις που ορίζουν την αεροτομή. Από την θεωρία των ρευστών ή των πτερυγώσεων μπορούν να βρεθούν όλα τα μεγέθη που ενδιαφέρουν ώστε να κατασκευαστεί μια πτερύγωση η οποία θα πληροί τις προϋποθέσεις που θέτει ο ανασχεδιασμός της πτερύγωσης του υπερπληρωτή.

2.3 Προϊόν

Το προϊόν που πρέπει να κατασκευαστεί είναι μια σταθερή πτερύγωση βαθμίδας ακτινικού στροβίλου. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα 2.22, υπάρχουν δυο παράλληλοι ομόκεντροι δακτύλιοι συγκράτησης. Ο άνω δακτύλιος έχει μια πατούρα, η οποία εξασφαλίζει την σωστή τοποθέτηση του στάτορα μέσα στο κέλυφος της μηχανής, ενώ ο κάτω δακτύλιος έχει και αυτός μια πατούρα η οποία διαφέρει σε διάμετρο και σχήμα από τον άνω δακτύλιο. Οι διαστάσεις του προϊόντος

μετρήθηκαν με κατάλληλο εργαλείο (παχύμετρο βερνιέρου) στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασίας του Ε.Μ.Π. Η μέτρηση είχε ακρίβεια 0,05mm.



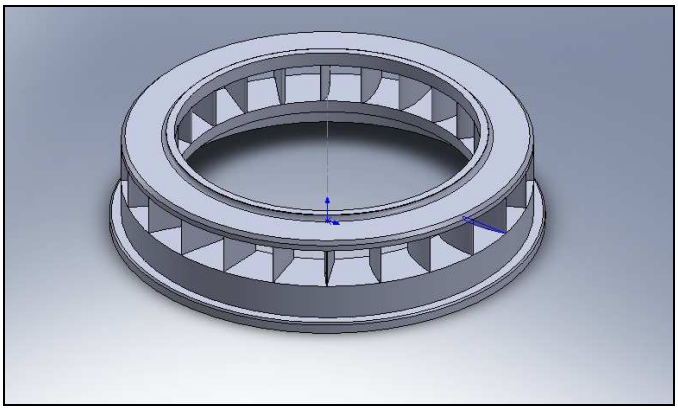
Σχήμα 2.22 Πρόοψη και τομή προϊόντος

Οι δυο δακτύλιοι συγκρατούν όλα τα πτερύγια της πτερύγωσης. Από το σχήμα των πτερυγίων κατανοούμε ότι η ροή του ρευστού γίνεται από το κέντρο της πτερύγωσης, αφού το σημείο προσβολής ορίζεται προς το κέντρο των δακτυλίων.

Σε κάθε περίπτωση, το σημείο πρόσπτωσης μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο εσωτερική διάμετρο των δακτυλίων, είτε στην εξωτερική. Ως εκ τούτου, μπορεί να κατασκευαστεί στροβιλομηχανή φυγόκεντρης ροής, είτε κεντρομόλου ροής. Από την θεωρία των στροβιλομηχανών, διαχωρίζουμε τον τύπο της μηχανής στις ακτινικές μηχανές, κατά γενική ομολογία, με βάση την φορά της ροής του ρευστού. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι, είτε θέλουμε να κατασκευάσουμε έναν στάτορα ενός στροβίλου, είτε έναν στάτορα ενός συμπιεστή, το μόνο που θα διαφέρει από κατασκευαστικής άποψης, είναι η φορά των πτερυγίων. Είναι ευνόητο ότι αυτό ισχύει εφόσον η γεωμετρία των δακτυλίων παραμένει η ίδια.

Άρα μπορούμε να αποφανθούμε ότι η κατασκευή της πτερύγωσης με την υποφαινόμενη γεωμετρία, αφορά γενικά μια στροβιλομηχανή και όχι συγκεκριμένα ενός στροβίλου ή συμπιεστή. Στην συνέχεια, θα γίνει δυνατή η παραμετροποίηση της αεροτομής των πτερυγίων και επομένως, αυτή η θεώρηση θα είναι ορθή.

Παρατηρώντας την πτερύγωση, διαπιστώνουμε ότι η κατασκευή της γίνεται με την κατεργασία της χύτευσης. Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα για την χρήση της πτερύγωσης ως στάτορα ενός στροβίλου ακτινικής ροής. Αυτό προκύπτει από την αυξημένη καμπυλότητα και το πάχος που έχουν τα συγκεκριμένα πτερύγια.



2.4 Κατασκευαστική προσέγγιση

2.4.1 Επιλογή κατεργασιών κατασκευής πτερύγωσης

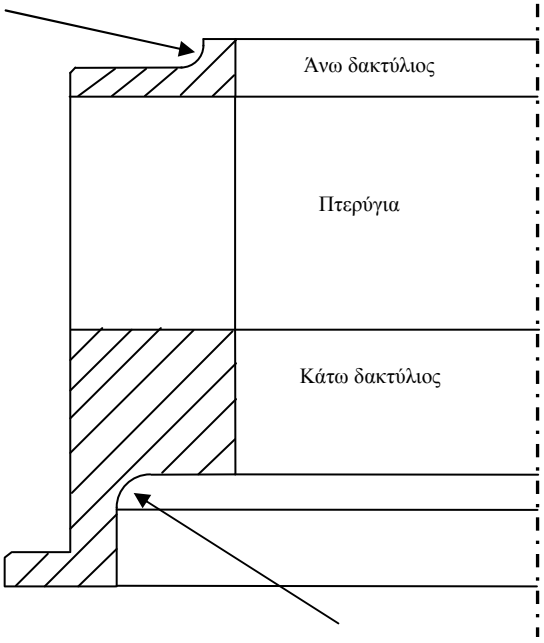
Η περίπλοκη γεωμετρία της πτερωτής καθιστά την υπάρχουσα μέθοδο κατασκευής της, την χύτευση, ως μια εύκολη και οικονομική λύση με το πλεονέκτημα της γρήγορης κατασκευής. Η αλλαγή, όμως, της γεωμετρίας των πτερυγίων είναι επίπονη διαδικασία, διότι οι τύποι που θα τις δημιουργήσουν θα πρέπει με την σειρά τους να αλλάξουν.

Επιπλέον, τα χυτά τεμάχια εμφανίζουν ελαττώματα τα οποία μπορούν να οφείλονται σε χημική ανομοιογένεια των κανονικών στοιχείων του χυτού στα διάφορα σημεία του, μπορεί να υπάρχουν διακενώσεις ή ασυνέχειες που οφείλονται στην συστολή του χυτού κατά την απόψυξη, ελαττώματα που οφείλονται στον χρόνο χύτευσης ή της κακής τοποθέτησης του καλουπιού, κλπ.

Προσπαθώντας να περιορίσουμε τους τρόπους κατασκευής μιας όμοιας ή ίδιας πτερύγωσης με αυτή του προϊόντος, και κάνοντας ανασκόπηση στους υπάρχοντες τρόπους κατασκευής των βαθμίδων περιοριστήκαμε στις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού. Με τις μεθόδους αυτές μπορεί να επιτευχθεί εύκολα η μεταβολή των γεωμετρικών μεγεθών εισάγοντας την έννοια της παραμέτρου κατά την φάση της σχεδίασης.

Είτε με μηχανική κατεργασία (κοπή), είτε με θερμική (ηλεκτροδιάβρωση) είτε με χημική (ηλεκτροχημική κοπή) η γεωμετρία που πρόκειται να παραμετροποιηθεί μπορεί να επιτευχθεί. Ωστόσο, η θερμική και χημική κατεργασία απαιτεί εργαλειομηχανές οι οποίες δεν είναι συνήθεις σε ένα μηχανουργείο μικρής παραγωγής. Περιοριζόμαστε, επομένως, στην μηχανική κατεργασία χρησιμοποιώντας εργαλειομηχανές αριθμητικού έλεγχου.

Η επόμενη επιλογή που χρειάζεται να γίνει αφορά την γενική θεώρηση της διαδικασία κατασκευής. Παρατηρούμε ότι όλη η κατασκευή μπορεί να γίνει σε κέντρο κατεργασιών, ή σε κέντρο κατεργασιών και κέντρο τόρνευσης. Επιλέγουμε συνειδητά την δεύτερη περίπτωση αφού υπάρχουν δυο γεωμετρικοί τόποι στο προϊόν οι οποίοι απαιτούν την χρήση του τόρνου. Αυτοί είναι οι επιφάνειες εκ περιστροφής στους δακτυλίους συγκράτησης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.23, οι επιφάνειες αυτές μπορούν να γίνουν στον τόρνο πολύ πιο εύκολα και η ακρίβεια της κατεργασίας να είναι αρκετά υψηλή. Αντίθετα, αν επιλέξουμε να τις δημιουργήσουμε στο κέντρο κατεργασιών τα πάσα που χρειάζεται να κάνει το κοπτικό εργαλείο είναι αναμφίβολα περισσότερα. Αυτό εξηγείται επειδή στο κέντρο η κίνηση του εργαλείου πρέπει να είναι κυκλική γύρω από το παράλληλο (XY) και το κάθετο (YZ ή XZ) επίπεδο προς το τραπέζι της εργαλειομηχανής, ενώ στον τόρνο η κίνηση αυτή περιορίζεται μόνο σε ένα επίπεδο (XZ).



Σχήμα 2.23 Τομή της πτερύγωσης

Ο τρόπος που μπορεί να κινηθεί το εργαλείο στο κέντρο κατεργασιών είναι άμεσα συνδεδεμένος με την γεωμετρία της εργαλειομηχανής. Το κοπτικό μπορεί να κινηθεί πάνω από το τεμάχιο και να διαγράφει συγκεκριμένες τροχιές. Αυτό, όμως, καθιστά ότι στην δεδομένη φάση στο τεμάχιο δεν θα υπάρχει ο άνω δακτύλιος. Επομένως, στην κατασκευή του προϊόντος πρέπει να εισαχθεί άλλη μια κατεργασία αυτή της συγκόλλησης του κάτω δακτυλίου με τα πτερύγια με τον άνω δακτύλιο. Πρόκειται για μια μηχανική κατεργασία συνένωσης υλικού, με εύκολη και οικονομική εκτέλεση από την μονάδα παραγωγής που μας αφορά. Χρειάζεται, παρόλα αυτά, να γίνει θεώρηση των σημείων που πρόκειται να συγκολληθούν ώστε να μην αλλοιωθεί η γεωμετρία των όγκων που θα ρέει το ρευστό, διότι όπως εξηγήθηκε ανωτέρω δημιουργούνται απώλειες στην ροή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση που η στροβιλομηχανή είναι ακτινική και οι λόγοι πίεσης είναι αρκετά υψηλοί στην βαθμίδα, οι απώλειες αυξάνονται με γεωμετρικό τρόπο.

Αντί αυτού του τρόπου συνένωσης του άνω και κάτω δακτυλίου με τα πτερύγια, θα μπορούσε να γίνει μηχανική συγκράτηση των δυο τεμαχίων κοχλίες συγκράτησης. Εντούτοις, μια τέτοια ενέργεια δεν θα ήταν κατασκευαστικά ορθή για τον λόγο ότι μέσα στην βαθμίδα των στροβίλων οι θερμικές φορτίσεις είναι αρκετά υψηλές και υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί η συγκράτηση. Εκτός αυτού, σε στάτορες συμπιεστών τα πάχη των αεροτομών είναι αρκετά μικρά ώστε να επιτευχθεί κατασκευή με αξιόλογη τάση συγκράτησης και να μην ακολουθήσει εκτίναξη του κοχλία, αφού η κατασκευή των σπειρωμάτων θα ήταν τεχνικά δύσκολο να γίνει.

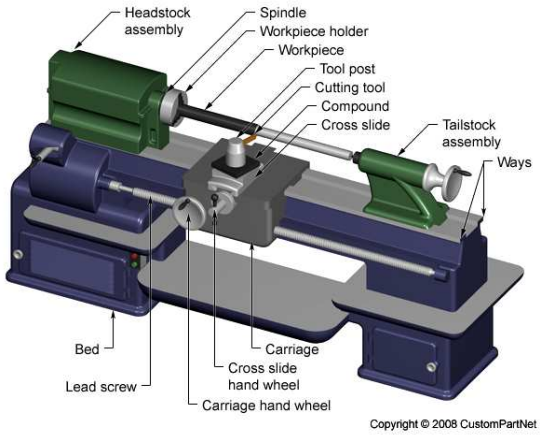
Στην συνέχεια έγιναν προσπάθειες εύρεσης τρόπων συγκράτησης των δυο τεμαχίων, όμως, καμιά δεν εξασφάλιζε την ασφάλεια της σύνδεσης και την αξιοπιστία της κατασκευής όσο η συγκόλληση. Με περιορισμό την αυξημένη ποιότητα και την ομαλότητα των επιφανειών που πρέπει να υπάρχει στους χώρους από τους οποίους ρέει το ρευστό, ώστε να διατηρούνται οι απώλειες σε χαμηλό επίπεδο, αποφασίστηκε να γίνει συγκόλληση στο άνω μέρος του άνω δακτυλίου του τεμαχίου, μέρος του προϊόντος που δεν επηρεάζει καθόλου την ροή. Η συγκόλληση περιφερειακά των πτερυγίων στο άνω μέρος τους θα διαφοροποιούσε σημαντικά την ομαλή ροή του ρευστού και θα ήταν σχετικά δύσκολο να γίνει σε αποδεκτό μήκος ώστε να εξασφαλιστεί η σύνδεση. Για να πραγματοποιηθεί η ανωτέρω ιδέα, χρειάζεται να κατασκευαστούν πείροι οι οποίοι θα διαπερνάνε τον άνω δακτύλιο, μέσω οπών και στη συνέχεια θα συγκολλούνται στο άνω μέρος τους. Η διάνοιξη των οπών του άνω δακτυλίου θα γίνεται και αυτή στο κέντρο κατεργασιών με αντίστοιχα δράπανα.

Καταστρώνουμε λοιπόν ένα γενικό πλαίσιο για τις διεργασίες που θα ακολουθήσουν και με παραδοχή ότι τα δυο τεμάχια της πρώτης ύλης έχουν κυλινδρικό σχήμα. Αυτά αφορούν την το άνω και κάτω τεμάχιο της κατασκευής. Αρχικά, θα χρειαστεί να τοποθετηθούν και τα δυο στο κέντρο τόρνευσης ώστε να διαμορφωθούν εκ περιστροφής και να αποκτήσουν όλα τα γεωμετρικά γνωρίσματα της πτερύγωσης, πλην την διαμόρφωσης των πτερυγίων. Ύστερα, θα ακολουθήσουν οι ενέργειες κοπής στο κέντρο κατεργασιών για τον άνω και κάτω δακτύλιο, διαμορφώνοντας τις οπές και τα πτερύγια. Τέλος, τα δυο τεμάχια θα συγκολλώνται και αν κρίνεται απαραίτητο θα λειαίνονται οι συγκολλήσεις ή/και θα γίνεται ανόπτηση για την απαλοιφή των θερμικών τάσεων.

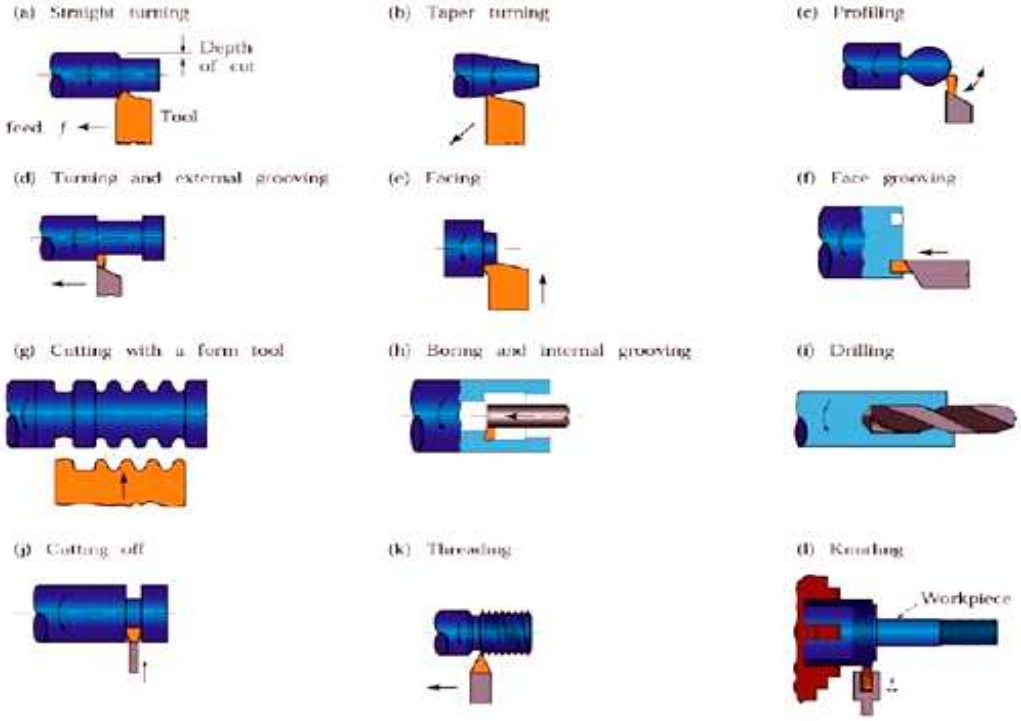
2.4.2 Γενικές αρχές κατεργασιών της κατασκευής

- Τόρνευση

Κατά την τόρνευση γίνεται κοπή υλικού εκ περιστροφής με απλή σημειακή επαφή εργαλείου με καθορισμένη γεωμετρία. Το προς κατεργασία τεμάχιο προσδένεται στο σφιγκτήρα τεμαχίων (τσοκ) ο οποίος περιστρέφεται. Το εργαλείο τοποθετείται στον εργαλειοδέτη που έχει την δυνατότητα να ρυθμίζει τις θέσεις του εργαλείου σε σχέση με το κατεργάσιμο αντικείμενο. Η πρόωση του κοπτικού εργαλείου επιταχύνεται με την ολίσθηση του εργαλειοφορείου στο τραπέζι της μηχανής. Σπουδαίο ρόλο παίζει η στιβαρότητα της κατασκευής της μηχανής ώστε να παραλαμβάνονται οι αναγκαίες δυνάμεις κοπής και να εξασφαλίζεται η χωρίς δονήσεις λειτουργία.



Σχήμα 2.24 Τυπική διάταξη τόρνου

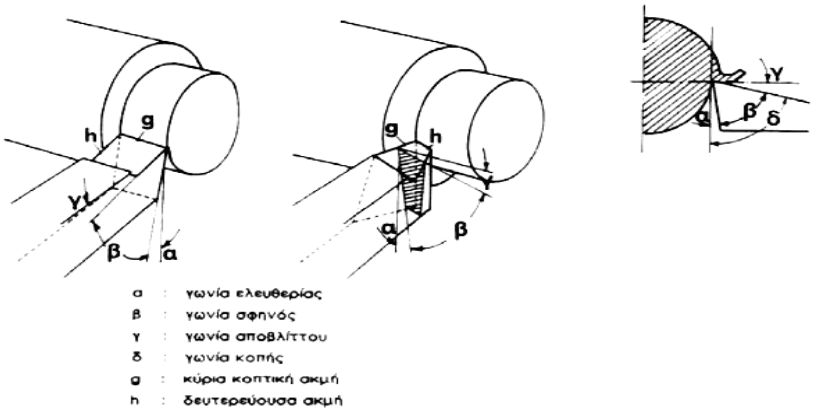


Σχήμα 2.25 Διάφορα είδη τόρνευσης

Ουσιώδη σημασία για την κοπή έχει η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου. Ανεξάρτητα από την κατεργασία το κοπτικό εργαλείο καθορίζεται από ορισμένα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη. Σε ένα κοπτικό εργαλείο μπορεί να διακρίνει κανείς δυο κοπτικές πλευρές, την κύρια και την δευτερεύουσα κόψη.

Οι κυριότερες γωνίες του κοπτικού εργαλείου είναι

i. η γωνία ελευθερίας (α) που επιτρέπει την μείωση της τριβής μεταξύ κατεργάσιμου τεμαχίου και του εργαλείου στις περιοχές του εργαλείου που πρόσκεινται στις δυο κόψεις του.
ii. η γωνία αποβλήτου (γ) που ελέγχει αποτελεσματικά την κοπή. Αύξηση της γωνίας αποβλήτου έχει σαν συνέπεια την μείωση των δυνάμεων κοπής. Πλην όμως σε μεγάλες γωνίες αποβλήτου το κοπτικό εργαλείο γίνεται πιο αιχμηρό με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή και την φθορά της αιχμής και την ελάττωση της αντοχής του. Σε μεγάλες ταχύτητες κοπής και μικρή διατομή αποβλήτου η γωνία γ λαμβάνει αρνητικές τιμές.
iii. η γωνία τοποθέτησης (β) που επηρεάζει την διάρκεια ζωής του εργαλείου και το μέγεθός της δύναμής κοπής. Με την αύξηση της γωνίας β αυξάνεται το πάχος του αποβλήτου και συνεπώς μειώνεται η δύναμη κοπής, ενώ με την μείωση της γωνίας β αυξάνεται το μήκος της κόψης και η επιφάνεια απαγωγής της θερμότητας κοπής, με συνέπεια την αύξηση του χρόνου ζωής του εργαλείου.



Σχήμα 2.26 Χαρακτηριστικές γωνίες κοπής εργαλείου τόρνευσης

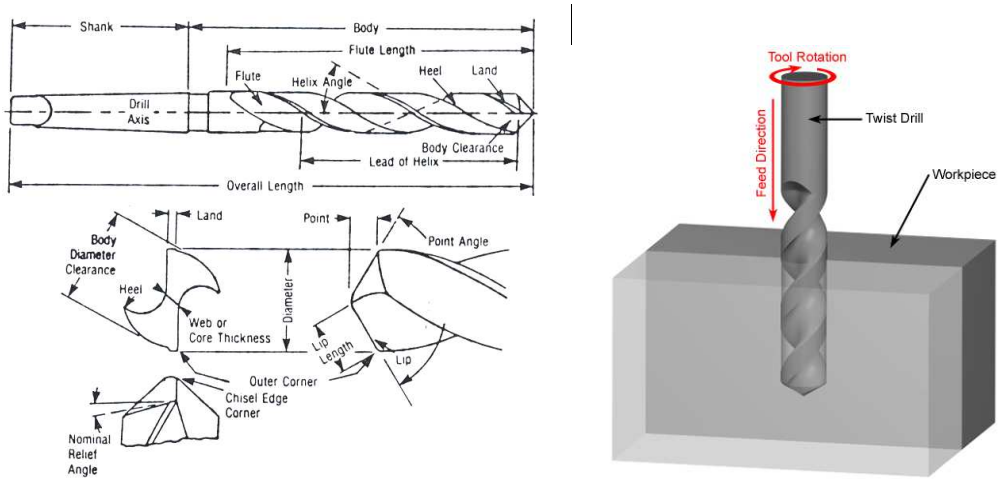
Οι βασικές συνθήκες της τόρνευσης είναι:
-η ταχύτητα κοπής, δηλαδή η σχετική ταχύτητα μεταξύ του κοπτικού εργαλείου και του κατεργάσιμου τεμαχίου αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής (η γραμμική ταχύτητα του περιστρεφόμενου τεμαχίου)
-το βάθος κοπής, δηλαδή το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου
-η πρόωση, δηλαδή η σχετική κίνηση μεταξύ εργαλείου και τεμαχίου, που προσφέρει σταθερά στο εργαλείο νέο υλικό προς κοπή.

- Διάτρηση

Διάτρηση είναι κατεργασία κοπής για την δημιουργία κυλινδρικών οπών σε μεταλλικά τεμάχια με ειδικό εργαλείο κοπής (τρυπάνι). Οι βασικές κινήσεις κατά την διάτρηση (εργαλείου και κατεργάσιμου τεμαχίου) είναι η περιστροφή και η πρόωση.

Το κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του και ταυτόχρονα προωθείται κατά μήκος του άξονα, ενώ το κατεργάσιμο υλικό παραμένει σταθερό. Η

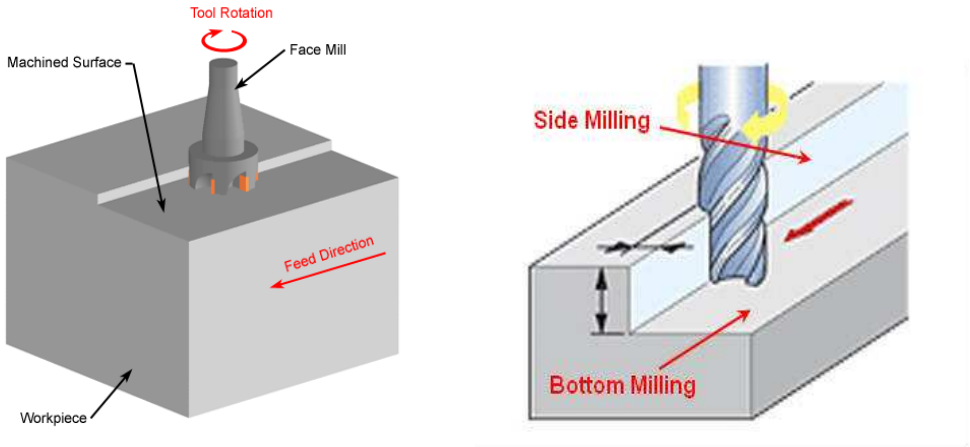
κατεργασία αυτή καλείται κάθετη διάτρηση. Το συνηθέστερο εργαλείο είναι το τρυπάνι δυο πτερυγίων η γεωμετρία του οποίου δίνεται στο σχήμα 2.27. Το τρυπάνι αυτό έχει δυο κύριες κόψεις που διαχωρίζονται μεταξύ τους με την κόψη κορυφής. Στην περιοχή της κόψης κορυφής το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά σε θλίψη και μετακινείται από το κέντρο προς την περιφέρεια του τρυπανιού, όπου κόβεται από την κύρια κόψη. Ο ελικοειδείς οδηγός του αποβλήτου κατά μήκος του τρυπανιού χρησιμεύει για την αποβολή του σχηματιζόμενου αποβλήτου και για την παροχή του υγρού κοπής στις κόψεις του εργαλείου.



Σχήμα 2.27 Τρυπάνι δυο ακμών κοπής και κατεργασία διάτρησης

- Φρεζάρισμα

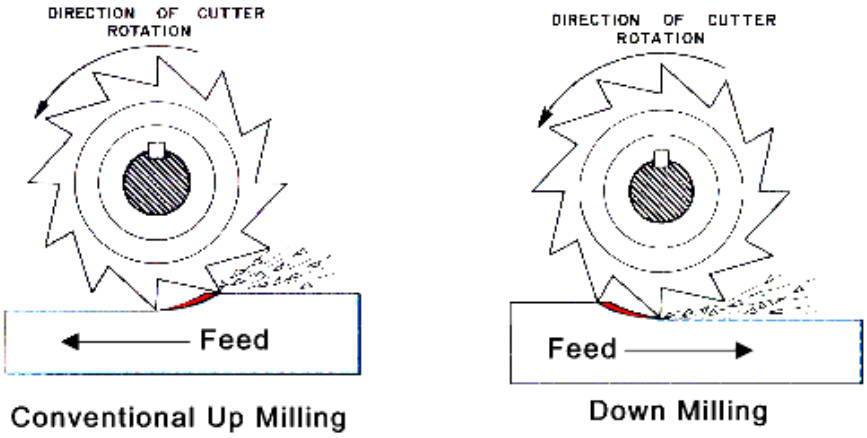
Άλλη μια συνήθης κατεργασία κοπής με εργαλείο πολλαπλής σημειακής επαφής είναι το φρεζάρισμα. Το φρεζάρισμα είναι κοπή με περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου και ανεξάρτητη κάθετη προς τον άξονα περιστροφής του εργαλείου προωθητική κίνηση του κατεργάσιμου τεμαχίου. Διακρίνονται δυο είδη φρεζαρίσματος, το περιστροφικό φρεζάρισμα, όπου το εργαλείο περιστρέφεται οριζόντια, και το μετωπικό φρεζάρισμα, όπου ο άξονας περιστροφής του κοπτικού εργαλείου είναι κατακόρυφος.



Σχήμα 2.28 Μετωπικό και περιφερειακό φρεζάρισμα

Οι βασικές συνθήκες κοπής κατά το φρεζάρισμα είναι:
-η πρόωση f ανά στροφή του κοπτικού εργαλείου και η πρόωση ανά οδόντα f_z, δηλαδή το μήκος της πρόωσης μεταξύ δυο επιφανειών κοπής, που η μια δημιουργείται αμέσως μετά την άλλη. Εάν z είναι ο αριθμός των οδόντων του κοπτικού εργαλείου τότε $f=f_z*z$.
-η ταχύτητα κοπής $v=\pi Dn$, όπου D η εξωτερική διάμετρος του κοπτικού εργαλείου και n ο αριθμός των στροφών του
-το βάθος ή πλάτος κοπής t δηλαδή το μήκος της εισόδου της κύριας κόψης του εργαλείου στο κατεργάσιμο τεμάχιο. Στο περιστροφικό φρεζάρισμα αντιστοιχεί στο πλάτος κοπής, ενώ στο μετωπικό φρεζάρισμα στο βάθος κοπής.
-το μέγεθος επαφής e που αντιστοιχεί στην ανά περιστροφή επαφή του κοπτικού εργαλείου πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια και κάθετα προς την κατεύθυνση της πρόωσης.

Αντίθετα προς τις άλλες συμβατικές κατεργασίες κοπής στο φρεζάρισμα το απόβλητο έχει διατομή μεταβαλλόμενου πάχους που είναι συνέπεια της επαλληλίας της περιστροφής του κοπτικού εργαλείου και της πρόωσης του τεμαχίου. Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού του αποβλήτου το περιφερειακό φρεζάρισμα διακρίνεται σε αντίρροπο και ομόρροπο. Είναι προφανές ότι στο αντίρροπο φρεζάρισμα το πάχος της διατομής του απόβλητου μεταβάλλεται από μηδενική σε μια μέγιστη τιμή, ενώ στο ομόρροπο φρεζάρισμα από την μέγιστη τιμή του στην μηδενική.



Σχήμα 2.29 Αντίρροπο και ομόρροπο φρεζάρισμα

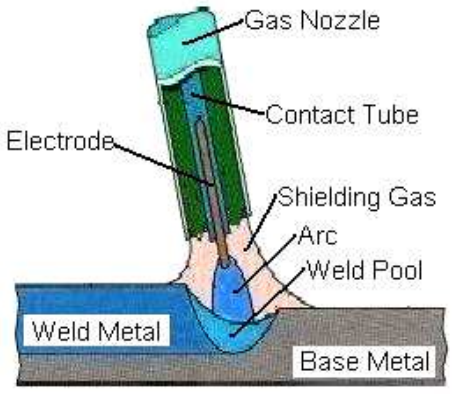
- Συγκόλληση

Οι συνδέσεις μπορούν να θεωρηθούν παροδικές (κοχλιώσεις, ηλώσεις) ή μόνιμες (συγκολλήσεις). Ο μεγαλύτερος αριθμός συνδέσεων ψηλής αντοχής γίνεται με συγκόλληση. Για να επιτευχθεί πρόσφυση μεταξύ δυο μετάλλων πρέπει να υπάρχει κατάλληλος συνδυασμό επαρκούς γειτνίασης και δραστικότητας μεταξύ των τεμαχίων που θα συγκολληθούν ώστε να σχηματιστούν κοινοί μεταλλικοί κρύσταλλοι. Διακρίνουμε τις ακόλουθες μεθόδους συγκόλλησης:
Α)με εφαρμογή πίεσης και θερμότητας
Με θέρμανση από ηλεκτρική ενέργεια
Από ηλεκτρική αντίσταση
Με χρήση επαγωγικού ρεύματος
Με άμεση χρήση ρεύματος

Από ηλεκτρικό τόξο
Με θέρμανση από καύση
Με φλόγα αερίου
Με φούρνο ή με ανοικτή εστία καύσεως (π.χ. σφυρηλάτηση)
Με χημική ενέργεια
Με εξώθερμη αντίδραση (για συγκόλληση αλουμινίου)
Με χρήση φορέα θερμότητας
Με ρευστό μέταλλο (π.χ. συγκόλληση με χύτευση)
Με μετατροπή μηχανικής ενέργειας
Με θερμότητα από την τριβή (συγκόλληση με τριβή)

Β)με εφαρμογή πίεσης χωρίς πηγή θερμότητας
Με υπέρηχους
Με εκρηκτικά
Με απλή συμπίεση

Γ)με τήξη υλικού ή υλικών
Με θερμότητα από ηλεκτρική ενέργεια
Από διέλευση ρεύματος δια ηλεκτρικής αντίστασης
Από ηλεκτρικό τόξο
Με χρήση ηλεκτροδίων χωρίς προστασία του τήγματος
Με προστασία του τήγματος με κατάλληλη σκόνη
Με ηλεκτρόδιο και αέριο προστασίας του τήγματος
Από την δημιουργία πλάσματος
Από δέσμη ηλεκτρονίων
Με θερμότητα από χημική αντίδραση
Με εξώθερμες αντιδράσεις (κυρίως για αλουμίνιο)
Με θερμότητα καύσης
Με φλόγα αερίου (π.χ. ασετιλίνη και οξυγόνο, υδρογόνο και οξυγόνο)
Με ρευστό μέταλλο (π.χ. συγκόλληση δια χυτεύσεως)



Σχήμα 2.30 Συγκόλληση επενδεδυμένου ηλεκτροδίου

Αρχικά, περιορίζουμε τις επιλογές μας στις συγκολλήσεις με τήξη υλικού, διότι είναι οι πιο κοινές μέθοδοι συγκόλλησης που δεν απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και είναι οι οικονομικά ενδεικνυόμενες για μια μικρή μονάδα παραγωγής.

Στην περίπτωσή μας συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε συγκόλληση με χρήση ηλεκτροδίου χωρίς προστασία του τήγματος (MIG), και το υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή είναι χάλυβας 360, σχήμα 2.30. Συγκόλληση με αντίσταση δεν ενδείκνυται, διότι μπορεί να λιώσει περιοχές των πτερυγίων που είναι αρκετά λεπτές, ειδικά στο σημείο εκφυγής. Αν πρόκειται να συγκολληθεί

διαφορετικό είδος μετάλλου τότε θα πρέπει να επανεξετασθεί ο τρόπος της συγκόλλησης, π.χ. ηλεκτροσυγκόλλησης τόξου με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και αδρανές αέριο (TIG). Η μέθοδος αυτή μοιάζει σε πολλά σημεία με την μέθοδο MIG, μόνο που εδώ το αναλώσιμο μεταλλικό σύρμα αντικαθίσταται από ένα μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο βολφραμίου.

Οι μεταβλητές που εκφράζουν την ικανότητα του μετάλλου προς συγκόλληση είναι πολλές, όπως π.χ. η μεταλλουργική δομή του βασικού μετάλλου, οι ακαθαρσίες, η μέθοδος κατεργασίας, η παρουσία αερίων κλπ. Προφανώς, η καλή γνώση του διαγράμματος φάσεων και η συμπεριφορά του μετάλλου σε υψηλή θερμοκρασία για μια χρονική περίοδο είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλιστούν οι σωστές συνθήκες για την συγκόλληση που θα γίνει.

Επίσης, καλό θα ήταν να γίνει χρήση ορισμένων τυποποιήσεων. Το DIN 1910 αφορά την ταξινόμηση των μεθόδων, ενώ το DIN 1912 τον σχεδιαστικό συμβολισμό τους. Το DIN 8528 αφορά στη δυνατότητα πραγματοποίησης συγκόλλησης μεταλλικών υλικών. Τα DIN 1913 και 8554 αφορούν στην χρήση ηλεκτροδίων και συρμάτων για συγκολλήσεις χαλύβων. Το DIN 8551 και 8552 αφορούν στην προετοιμασία των ραφών συγκόλλησης. Τα DIN 8569 αφορά στον έλεγχο των ηλεκτροσυγκολλητών, ενώ το DIN 8563 αφορά στην ποιότητα των εργασιών συγκολλήσεως. Το DIN 4100 αφορά στον υπολογισμό των συγκολλήσεων που φορτίζονται στατικά και τέλος το DIN 8570 αφορά στις επιτρεπόμενες αποκλίσεις από τις διαστάσεις, όταν δεν δίνονται οι σχετικές ανοχές.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου MIG ή TIG, αν επιλεχθεί, είναι ότι μπορεί να αυτοματοποιηθεί. Σε μια πλήρως αυτόματη διαδικασία, είτε η λειτουργία, είτε η πηγή θερμότητας ρυθμίζεται με μηχανικό τρόπο το τόξο ρυθμίζεται αυτόματα και το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται στην περιοχή σύνδεσης με προκαθορισμένο ρυθμό από ρολό σύρματος.

Για την μείωση των τάσεων που παραμένουν μετά την συγκόλληση σε χαλύβδινες κατασκευές χρησιμοποιείται η πυράκτωση περί τους 600-650^{o}C. Η διαμόρφωση των ραφών συγκόλλησης πρέπει να ακολουθεί ορισμένους λογικούς κανόνες για την μείωση των κινδύνων που συνεπάγεται γενικά μια συγκόλληση. Ανάλογα το υλικό και τις συνθήκες λειτουργίας της πτερύγωσης ο σχεδιαστής πρέπει να μελετήσει αν κρίνονται απαραίτητες κάποιες από τις ακόλουθες ενέργειες:

i. Προστασία από οξείδωση. Οι συγκολλήσεις είναι εν γένει ευπρόσβλητες από οξείδωση για αυτό αν κριθεί απαραίτητο πρέπει να προστατεύονται με κατάλληλη βαφή.
ii. Κατεργασία (τόρνευση λείανση) των ραφών. Η κατεργασία των ραφών έχει αποκλειστικό σκοπό την μείωση της συγκέντρωσης τάσεως λόγω της τοπικής γεωμετρικής ανωμαλίας στο ελάχιστο δυνατό. Έτσι η τοπική εξασθένηση λόγω της ραφής μειώνεται σε εκείνο μόνο το ποσοστό που αντιστοιχεί στην μεταβολή της εσωτερικής υφής του υλικού.

Για τον λόγο του ότι οι συγκολλήσεις που θα πραγματοποιηθούν γίνονται για να εξασφαλίσουν απλά την σύνδεση των δυο τεμαχίων, μπορεί να ειπωθεί ότι αυτές δεν αποτελούν σημεία της κατασκευής τα οποία θα καταπονούνται με τάσεις λόγω μηχανικών φορτίων. Η μοναδική φόρτισή που καταπονεί τις συγκολλήσεις είναι αυτή της θερμικής φόρτισης. Για εκτενέστερη μελέτη περί του θέματος ο σχεδιαστής μπορεί να ανατρέξει στα κεφάλαια μεταφοράς θερμότητας και της μηχανικής των συγκολλήσεων.

2.4.3 Παράμετροι κέντρου τόρνευσης και κέντρου κατεργασιών

Με την αύξηση της ζήτησης ποιοτικών προϊόντων από την αγορά, και με την είσοδο των υπολογιστών στις παραγωγικές διαδικασίες, οι συμβατικές μηχανές μετατράπηκαν αρχικά σε μηχανές με ηλεκτρικές βοηθητικές λειτουργίες και στην συνέχεια σε μηχανές προγραμματιζόμενες από ενσωματωμένες μονάδες ελέγχου.

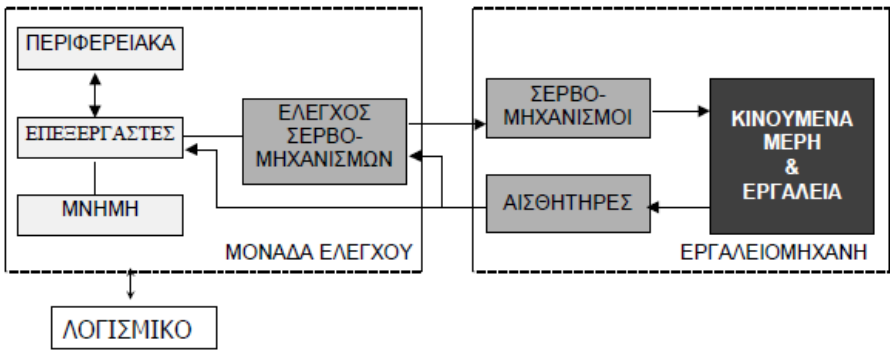
Η ταξινόμησή τους σήμερα γίνεται ανάλογα το σύστημά παραγωγής στο οποίο ανήκουν. Γενικά, τα συστήματα παραγωγής σχεδιάζονται για να προορίζουν την παραγωγή τους σε συγκεκριμένους τύπους αγορές και ως επακόλουθο οι μηχανές που απαιτούνται για την εκπλήρωση του στόχου διαφοροποιούνται σε υλικο-λογισμικό επίπεδο μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα, τα συστήματα παραγωγής διαχωρίζονται σε συνεχής παραγωγής συστήματα, σε μαζικής παραγωγής, σε μικρής και μεσαίας παραγωγής, σε κατά παραγγελία παραγωγής και σε group-technology.

Ο αριθμητικός έλεγχος των εργαλειομηχανών είναι ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές για την αναφορά στην θέση και την κίνηση των αξόνων της μηχανής για τον ορισμό των εργαλείων, στροφών της ατράκτου κτλ. Μια σειρά τέτοιων αριθμητικών τιμών αποτελεί ουσιαστικά το πρόγραμμα αριθμητικού ελέγχου, ή αλλιώς G κώδικα, όπως συνηθίζεται να λέγεται. Τα σημερινά συστήματα ελέγχου CNC χρησιμοποιούν επιπρόσθετα αριθμητικές τιμές και για λειτουργίες, όπως ο μετασχηματισμός συστημάτων συντεταγμένων, η διαχείριση πινάκων δεδομένων, η αντιστάθμιση διαμέτρου και μήκους των εργαλείων κτλ. Αυτές, καθώς και επιπρόσθετες λειτουργίες γραφικών, επικοινωνίας με άλλους Η/Υ και περιφερειακά αντιδιαστέλλουν τον απλό αριθμητικό έλεγχο NC με την αυτόν που βασίζεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (CNC). Σήμερα πλέον δεν υφίσταται NC με την αρχική του έννοια, αλλά απλά CNC και αυτό εννοούμε πλέον με τον όρο αριθμητικός έλεγχος.

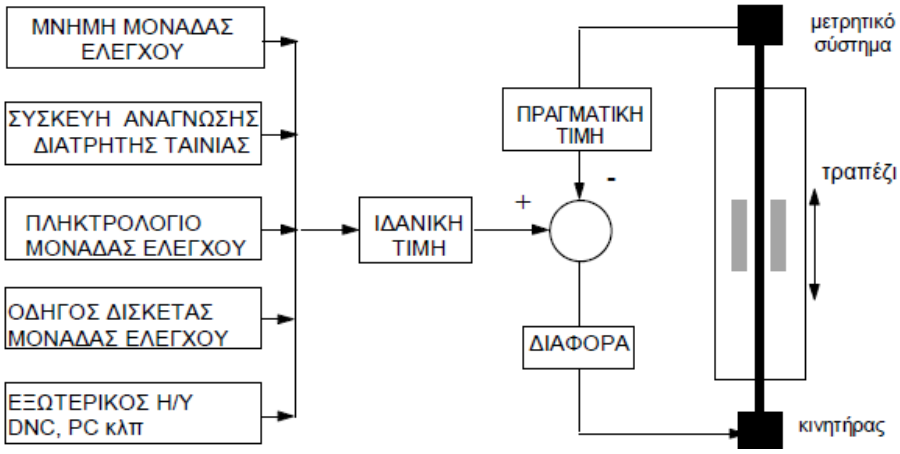
Τα κύρια στοιχεία εργαλειομηχανής αριθμητικού έλεγχου, σχήμα 2.31, είναι τα εξής:

- Οι άξονες της εργαλειομηχανής-συνδυασμός γραμμικών και περιστροφικών, όπου κάθε άξονας νοείται και με την κινηματική του έννοια, αλλά και σαν σύστημα μετάδοσης κίνησης, όπως επίσης και μέτρησης των στοιχείων αυτής της κίνησης (θέση, ταχύτητα, επιτάχυνση).
- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου το οποίο περιλαμβάνει συνήθως ένα αριθμό μικροεπεξεργαστών RAM, ROM και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την επεξεργασία και διαχείριση του προγράμματος καθώς και ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο των αξόνων.
- Το λογισμικό–λειτουργικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει παραμέτρους μηχανής, περιβάλλον προγραμματισμού, σταθερές ρουτίνες επιμέρους κατεργασιών, ρουτίνες διευκόλυνσης του προγραμματισμού της μονάδας ελέγχου, σύστημα ενδείξεων τρέχουσας κατάστασης, διαγνωστικά σφαλμάτων κτλ
- Διάφορα περιφερειακά για την εισαγωγή του προγράμματος στην μηχανή, την εκτύπωση αρχείων και ενδεχόμενα την παρακολούθηση της λειτουργίας της εργαλειομηχανής



Σχήμα 2.31Κύρια στοιχεία εργαλειομηχανών

Η γενική αρχή λειτουργίας μιας προγραμματιζόμενης εργαλειομηχανής φαίνεται στο σχήμα 2.32. Πρόκειται για ένα σύστημα κλειστού βρόχου ανάδραση. Οι τιμές αναφοράς που προέρχονται από το πρόγραμμα συγκρίνονται με τις πραγματικές τιμές που μετρώνται όσο συχνά απαιτείται και η διαφορά τους χρησιμοποιείται για την οδήγηση του συστήματος κίνησης κάθε άξονα ή γενικότερα των πάσης φύσεως ενεργοποιητών (actuators).



Σχήμα 2.32 Αρχή λειτουργίας εργαλειομηχανών

Ο προγραμματισμός που επιλέγεται στην παρούσα εργασία βασίζεται στην εισαγωγή των εντολών του G κώδικα, με την βοήθεια Η.Υ. Ο σχεδιαστής μπορεί να διαμορφώσει όλες τις συνθήκες κατεργασιών για την κατασκευή της πτερύγωσης, έχοντας παρακάμψει το πακέτο CAD-CAM. Χρειάζεται, ωστόσο, ο προγραμματιστής να μπορεί να καταλάβει το μηχανολογικό σχέδιο του τεμαχίου και τις απαραίτητες πληροφορίες της γεωμετρίας, καθώς ακόμη και να κατέχει τις γνώσεις που απαιτούνται από την τεχνολογία της κατεργασίας, όπως το φασεολόγιο της κατεργασίας, την εκλογή εργαλείων και την εκλογή συνθηκών κατεργασίας.

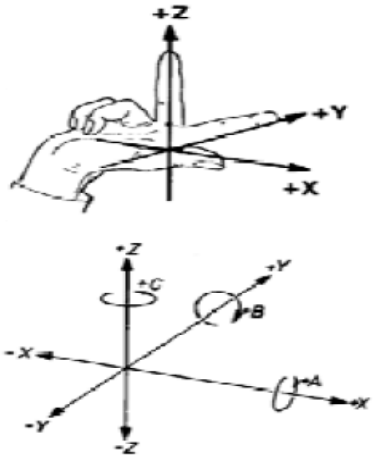
Η γλώσσα προγραμματισμού των μηχανών αριθμητικού ελέγχου αφορά τυποποιημένες εντολές που μπορούν να αναγνωριστούν γενικά από κάθε

εργαλειομηχανή CNC. Αυτές αφορούν κινήσεις, τυποποιημένους κύκλους, και δεδομένα για την κατεργασία, όπως στροφές ατράκτων, έγχυση ελαίου κοπής επιλογή εργαλείων και άλλα. Στο παράρτημα 7.4 παρουσιάζονται οι κοινά αποδεκτές εντολές G κώδικα με τον τρόπο που αυτές συντάσσονται, καθώς και οι βοηθητικές εντολές για μηχανές με controller τύπου FANUC.

Οι άξονες συντεταγμένων και ο τρόπος καθορισμού της θετικής κατεύθυνσης κίνησης για εργαλειομηχανές αριθμητικού έλεγχου περιγράφονται στο ISO 841 του 1974 και στα αντίστοιχα εθνικά πρότυπα DIN, BS κτλ Ορίζεται δεξιόστροφο καρτεσιανό σύστημα για τους τρεις άξονες X, Y, Z

Οι κύριοι γραμμικοί άξονες μιας εργαλειομηχανής είναι οι X,Y,Z

Οι άξονες περιστροφής συμβολίζονται με A,B,C και είναι επίσης παράλληλοι προς τις κύριες καρτεσιανές διευθύνσεις X,Y,Z. Η θετική κατεύθυνση περιστροφής για τους άξονες A, B, C προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία κοιτώντας προς την θετική κατεύθυνση των αξόνων X, Y, Z αντίστοιχα.



Σχήμα 2.33 Προσδιορισμός αξόνων

Για τον καθορισμό θετικής κατεύθυνσης σε κάθε γραμμικό άξονα θεωρείται πάντοτε η σχετική κίνηση του εργαλείου σε σύστημα αναφοράς ακίνητο ως προς το τεμάχιο. Αν στην πραγματικότητα κινείται το τεμάχιο η κατεύθυνση που καθορίζεται σαν θετική είναι η πραγματική (αντίθετη με αυτήν της περίπτωσης ακίνητου τεμαχίου) αλλά το σύμβολο του αντίστοιχου άξονα ακολουθείται από ένα τόνο δηλαδή +X΄, +Y΄ κτλ.

Οι κανόνες προσανατολισμού του καρτεσιανού συστήματος σε εργαλειομηχανές είναι οι ακόλουθοι:

Για τον άξονα Z

- Σε εργαλειομηχανές φρεζαρίσματος η διάτρησης η σύμβαση είναι ότι ο Z άξονας είναι παράλληλος με την άτρακτο και η θετική κατεύθυνση να αντιστοιχεί σε αύξηση της απόστασης εργαλείου-τεμαχίου
- Γενικά ο άξονας Z είναι κατά μήκος της κύριας ατράκτου (αυτής που διαθέτει την μέγιστη ισχύ).

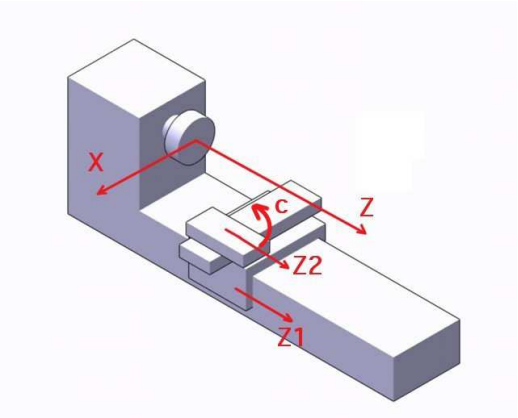
Για τον άξονα X

- Ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια συγκράτησης και παράλληλος προς την μακρύτερη από τις κινήσεις της μηχανής.
- Σε εργαλειομηχανές με περιστρεφόμενα εργαλεία εάν ο άξονας Z είναι οριζόντιος η θετική κατεύθυνση X είναι προς τα δεξιά κοιτώντας από την κολώνα προς το τεμάχιο. Εάν ο άξονας Z είναι κατακόρυφος η θετική κατεύθυνση του άξονα X είναι προς τα δεξιά από την άτρακτο προς την κολώνα.
- Στην περίπτωση τόρνου ο άξονας X έχει κατεύθυνση ακτινικά προς τα έξω.

Για τον άξονα των Y η θετική κατεύθυνση προκύπτει από το δεξιόστροφο σύστημα X,Y,Z μετά τον προσδιορισμό των θετικών κατευθύνσεων των Z και X.

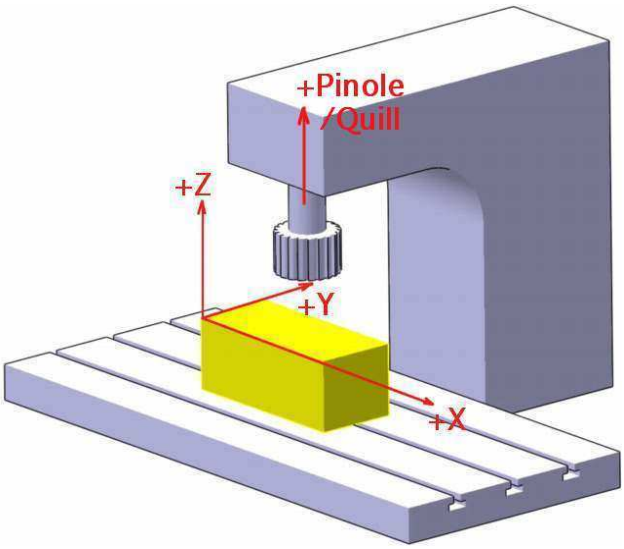
Για την κατασκευή της πτερύγωσης, όπως ορίζεται και από την γεωμετρία, χρειαζόμαστε κατ'ελάχιστο, ένα κέντρο τόρνευσης με X και Z άξονα, ενώ για το κέντρο κατεργασιών χρειαζόμαστε τρεις άξονες X, Y, Z.

Για το κέντρο τόρνευσης ορίζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.34 οι άξονες της μηχανής. Πρέπει να αναφερθεί ότι βάσει αυτών των αξόνων θα δοθούν όλες οι εντολές του G κώδικα, οι οποίοι μπορεί να διαφέρουν από τους άξονες που έχει οριστεί στο γραφικό περιβάλλον για την μελέτη της κατεργασίας. Εν προκειμένω, το ίδιο έγινε και στα προγράμματα που αναπτύσσονται κατωτέρω, οπότε ο σχεδιαστής χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη του την μετατροπή των αξόνων.



Σχήμα 2.34 Άξονες στο κέντρο τόρνευσης

Αντίστοιχα ορίζονται και οι άξονες για το κέντρο κατεργασιών στο σχήμα 2.35.



Σχήμα 2.35 Άξονες στο κέντρο τόρνευσης

Ορισμένα από τα μεγέθη που ίσως δεσμεύσουν στην δυνατότητα πραγματοποίησης των κατεργασιών για την πτερύγωση είναι αυτά των χαρακτηριστικών μεγεθών της εργαλειομηχανής που δίνει ο κατασκευαστής. Γενικότερα, μπορεί να ειπωθεί ότι μεγέθη ταχυτήτων και πρόωσης δεν θα απασχολήσουν και στην πλέον απαιτητική κατασκευή, όμως ο όγκος του τεμαχίου μπορεί να καταστήσει την κατεργασία αδύνατη σε ορισμένες μηχανές.

Για το κέντρο τόρνευσης έχουμε την μηχανή CNC HAAS TL1

Controler	Haas
XZ όγκος προσπέλασης εργαλείου:	203 x 737mm
Απόσταση τραπεζιού από το εργαλείο:	0 – 203mm
Μέγιστη πρόωση X και Z	1.9 και 3.8 m.min
Μέγιστο βάρος τεμαχίου:	50-100 kg
Τύπος:	TL1
Αριθμός εργαλείων :	4
Στροφές κύριου άξονα RPM:	2,000 rpm
Βασικός κινητήρας:	5.6 kW
Όγκος μηχανής:	2,057 (W) x 1,727 (D) x 1,956 (H)
Βάρος μηχανής:	1,860 kg

Για τον κέντρο κατεργασιών έχουμε την μηχανή CNC HAAS TM1:

Controler	HASS
Μέγεθος τραπεζιού:	1,213 x 267mm
XYZ όγκος προσπέλασης εργαλείου:	762 x 305 x 406mm
Απόσταση τραπεζιού από το εργαλείο:	-102,508 – 406mm
Μέγιστο βάρος τεμαχίου:	454 kg
Τύπος:	TM1
Αριθμός εργαλείων :	10
Στροφές κύριου άξονα RPM:	4,000 rpm
Βασικός κινητήρας:	7.5 kW
Όγκος μηχανής:	2,667 (W) x 2,438 (D) x 2,083 (H)
Βάρος μηχανής:	4,500 kg

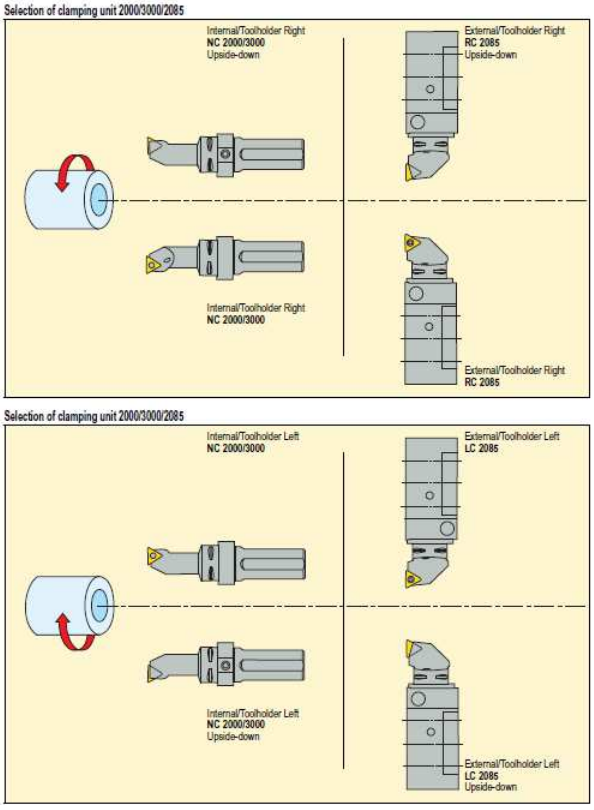
2.4.4 Επιλογή εργαλείων

Σε πρώτη φάση για την επιλογή των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν, ο σχεδιαστής χρειάζεται να γνωρίζει το υλικό του προϊόντος. Βάση των καταλόγων των κατασκευαστών εργαλείων κοπής γίνεται επιλογή εργαλείων τα οποία να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις γεωμετρικές απαιτήσεις. Επιπλέον, η επιλογή είναι και θέμα οικονομικής μελέτης, αφού γνωρίζοντας τον αριθμό των τεμαχίων που θα κατασκευαστούν μπορούν να επιλεχθούν οι συνθήκες κοπής και η αντοχή του εργαλείου. Με αυτό τον τρόπο θα αποφευχθεί πρόωρη φθορά σε σχέση με το μέγεθος της παραγωγής και μπορεί να γίνει μια πρώτη προσέγγιση βελτιστοποίησης της παραγωγής (βάθη κοπής, προώσεις, χρόνοι κατεργασιών κλπ.). Προς διευκόλυνση των επιλογών μας μπορεί να αναφερθεί και ο δείκτης κατεργασιμότητας του υλικού του προϊόντος.

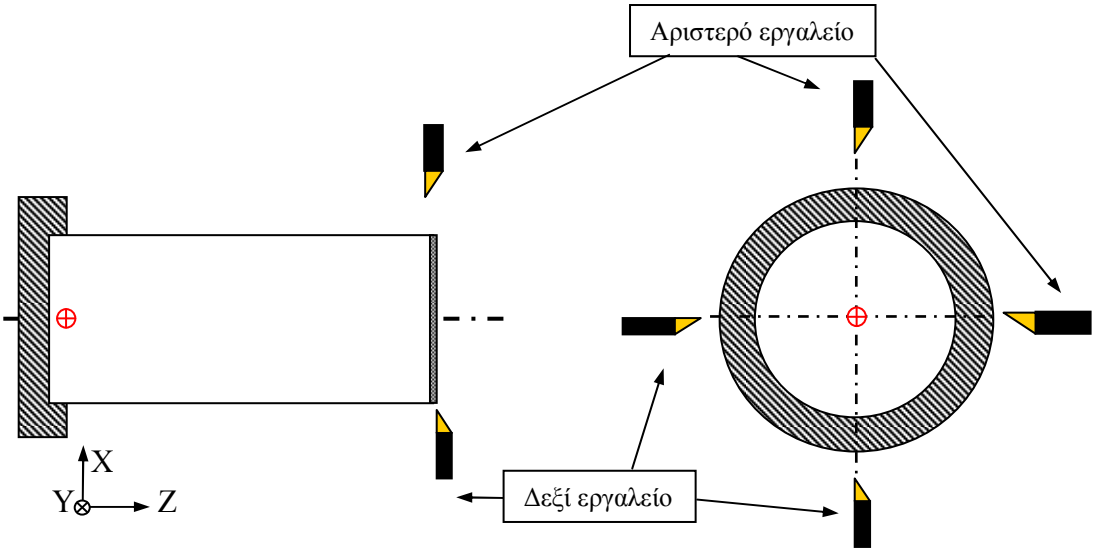
Συγκεκριμένα, για τον τόρνο χρειαζόμαστε ένα κοπτικό το οποίο θα πραγματοποιεί την κύρια κοπή εξωτερικά της ράβδου που θα χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη. Επίσης, χρειαζόμαστε το αντίστοιχο εργαλείο αποπεράτωσης για την εξωτερική επιφάνεια. Χρειαζόμαστε, επίσης, τα αντίστοιχα εργαλεία κοπής και

αποπεράτωσης για την κατεργασία που θα γίνει για την δημιουργία των εσωτερικών οπών των ράβδων. Τα συγκεκριμένα εργαλεία πρέπει να πραγματοποιούν τις κοπές και για τα δυο σεταρίσματα των τεμαχίων στον τόρνο.

Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας του τεμαχίου είναι δυνατή η επιλογή εργαλείων τα οποία προωθούνται μόνο προς την μια φορά κίνησης του εργαλειοδέτη (αριστερά ή δεξιά εργαλεία), ανάλογα και με την φορά της ατράκτου σχήμα 2.36. Από την γεωμετρία της εργαλειομηχανής και του εργαλειοδέτη μπορούμε να κατανοήσουμε ότι όταν το εργαλείο εργάζεται πάνω από το τεμάχιο τότε θα χρειαστούμε αριστερά εργαλεία, ενώ όταν ο εργαλειοδέτης είναι στο πλάι της μηχανής και αριστερά του βρίσκεται το τσοκ τότε χρειαζόμαστε δεξιά εργαλεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.37. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε υποθέσει ότι η άτρακτος γυρίζει ωρολογιακά. Επιλέγουμε αριστερά εργαλεία, για τον κύριο λόγο του ότι στην εργαλειομηχανή της προσομοίωσης γίνεται κοπή από πάνω. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται οικονομία των υλικών που απαιτούνται για την κατεργασία. Τα σεταρίσματα και το φασεολόγιο είναι σημαντικό να δομηθεί σύμφωνα με αυτή την αρχή, διότι αν δεν γίνει αυτό τότε υπάρχει κίνδυνος τρακαρίσματος του εργαλείου με το τεμάχιο, λόγω αδυναμίας δημιουργίας της απαιτούμενης γεωμετρίας. Τα ίδια ισχύουν και για το εργαλείο της αποπεράτωσης.



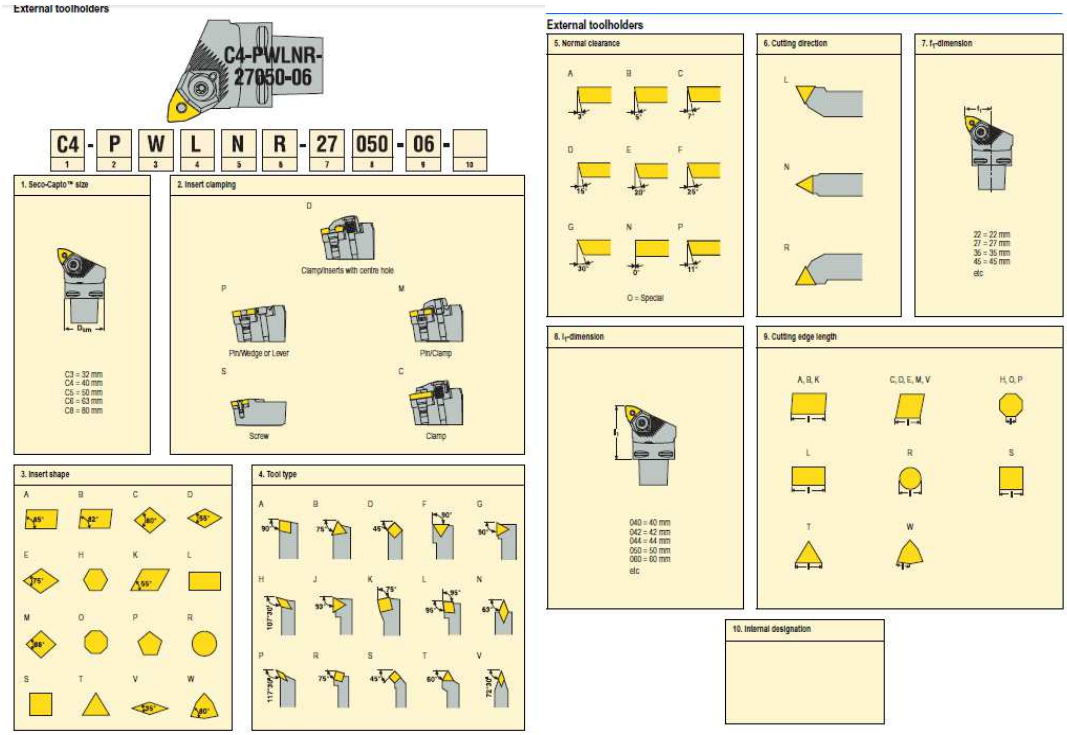
Σχήμα 2.36 Είδος εργαλειοδέτη σε σχέση με την φορά περιστροφής

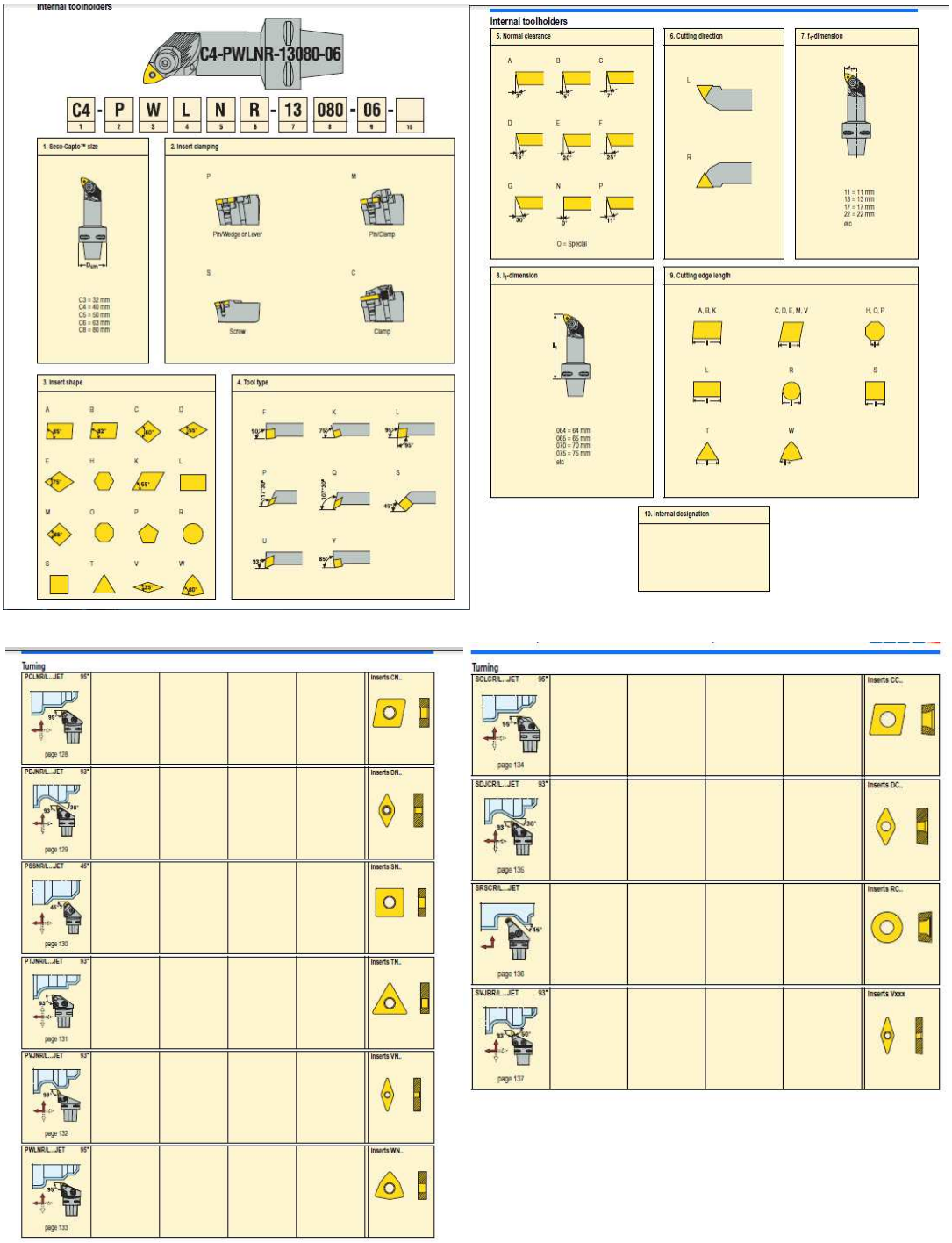


Σχήμα 2.37 Είδος εργαλειοδέτη ανάλογα με την σχετική θέση του ως προς το τεμάχιο

Ένα παράδειγμα επιλογής εργαλείων γίνεται στα παρακάτω σχήματα 2.38. Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην επιλογή των εργαλείων για την ασφάλεια των κατεργασιών. Λόγω της γεωμετρίας της πτερύγωσης στις εσωτερικές κατεργασίες επιλέγουμε τη διάμετρο του εργαλειοδέτη να είναι μικρότερη της διαμέτρου της εσωτερικής οπής, το μήκος του εργαλειοδέτη να είναι μεγαλύτερο από το τελικό βάθος για την δημιουργία των εσωτερικών οπών και οι κυκλικές επιφάνειες του τεμαχίου να μπορούν να πραγματοποιηθούν με τα συγκεκριμένα εργαλεία.

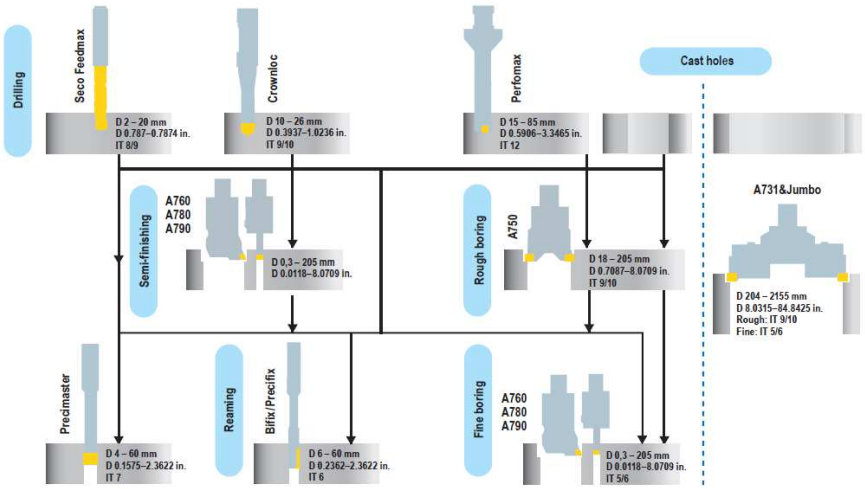
Χρειάζεται έτσι να επιλέξουμε σχήμα K, τύπο H, κατεύθυνση αριστερή, διάσταση L_1 αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να πραγματοποιήσει σωστά τις κοπές και το κοπτικό διαλέγεται σύμφωνα με την γεωμετρία που θα κατασκευαστεί και το φασεολόγιο, π.χ. το CN. Πλέον μπορούμε να βρούμε τις μέγιστες ταχύτητες κοπής, τα βάθη κοπής κτλ. Όμοια, επιλέγουμε τον εργαλειοδέτη των εσωτερικών κοπών.





Σχήματα 2.38 Παράδειγμα επιλογής εργαλείων κέντρου τόρνευσης

Για το κέντρο κατεργασιών και συγκεκριμένα για τον άνω δακτύλιο, χρειαζόμαστε ένα τρυπάνι το οποίο να έχει διάμετρο ίση με την επιλεγμένη διάμετρο των πείρων και ένα δράπανο για την δημιουργία των χώρων για την συγκόλληση. Η διάμετρος των πείρων πρέπει να είναι στρογγυλεμένη σε αριθμό ο οποίος να υπάρχει ως ονομαστική διάμετρος του τρυπανιού, σχήμα 2.39.



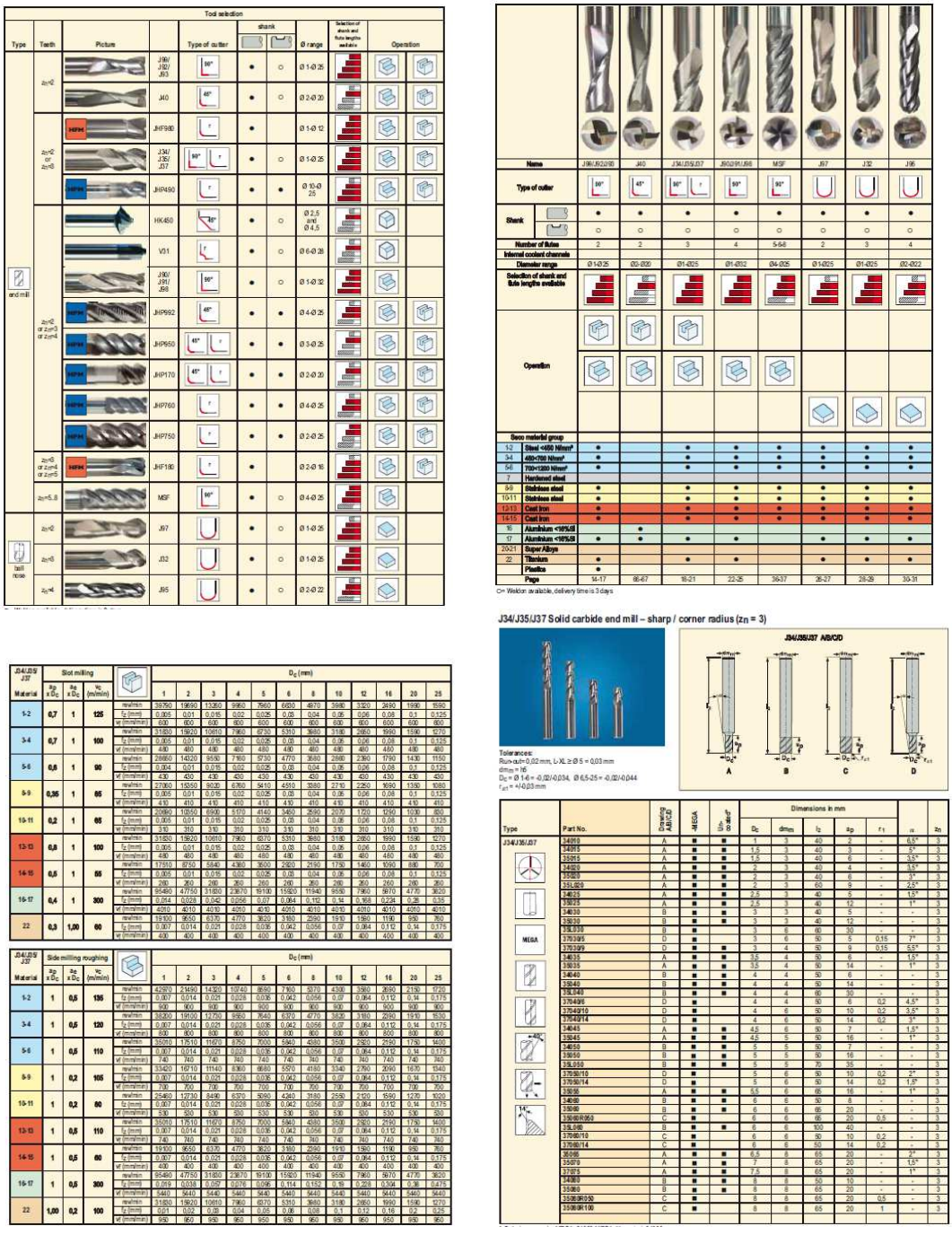
Σχήμα 2.39 Επιλογή τρυπανιού Seco Feedmax.

Για το δράπανο υπάρχει ο περιορισμός της διαμέτρου ώστε να επηρεάζει όσο το δυνατό λιγότερο την πατούρα, αλλά δίνοντας και τον απαραίτητο χώρο, ώστε κατά την διαδικασία της συγκόλλησης να μπορεί να εγχυθεί το συγκόλλημμα. Το δράπανο, επομένως, πρέπει να μπορεί να κόψει στην μετωπική επιφάνεια του τεμαχίου.

Για τον κάτω δακτύλιο χρειαζόμαστε δυο είδη εργαλείων, ένα για την εκχόνδριση μεταξύ των αεροτομών και των πείρων και ένα για την αποπεράτωση. Η διάμετρος του εργαλείου εκχόνδρισης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μεγάλη, αλλά μικρότερη από την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αεροτομών. Η διάμετρος του εργαλείου αποπεράτωσης μπορεί να βρίσκεται στα τυπικά όρια των διαμέτρων των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την αποπεράτωση γενικά σε κέντρα κατεργασιών, ήτοι περίπου 4-6mm. Το μήκος και των δυο εργαλείων πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε τα εργαλεία να μπορούν να δουλέψουν στο μέγιστο βάθος από το αρχικό ύψος των πείρων, έως το κατώτατο ύψος των πτερυγίων χωρίς να προσκρούσει ο εργαλειοδέτης τους στο τεμάχιο. Αυτό σημαίνει ότι ο λαιμός των εργαλείων πρέπει να είναι ίσος σε διάμετρο ή μικρότερος από την ενεργό διάμετρο κοπής τους. Επίσης, επειδή η φορά του φρεζαρίσματος έχει σημασία στην μηχανική της κοπής της κατεργασίας είναι σημαντικό το εργαλείο να έχει κόψεις τέτοιες ώστε να εξασφαλίζεται το αντίρροπο φρεζάρισμα. Τέλος, επειδή η όλη διαδικασία της κατεργασίας του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών έχει μελετηθεί ώστε να γίνεται και μετωπική κοπή σε μερικά σημεία, προς αποφυγή πρόσκρουσης του εργαλείου με το τεμάχιο, ο σχεδιαστής πρέπει να χρησιμοποιήσει εργαλεία που να μπορούν να κάνουν μετωπική κοπή. Αυτό αυξάνει το κόστος κτήσης των εργαλείων, αλλά παρόλα αυτά βελτιώνει τον χρόνο κατεργασίας, αφού μειώνεται ο αριθμός των κινήσεων του εργαλείου.

Επίσης, επειδή στον άνω δακτύλιο χρειάζεται δράπανο το οποίο να κάνει μετωπική κοπή αντισταθμίζεται το κόστος της κτήσης ενός εργαλείου με την δυνατότητα μετωπικής κοπής μειώνοντας τον ολικό αριθμό των εργαλείων κατά ένα. Παράδειγμα επιλογής των εργαλείων παρουσιάζεται στην συνέχεια.

Επιλέγουμε εργαλεία τα οποία μπορούν να κάνουν και μετωπικό και πλάγιο φρεζάρισμα. Επιλέγουμε την γωνία ακμής να είναι 90^{o} και επιλέγουμε οι κόψεις του εργαλείου να είναι μεγαλύτερες ή ίσες σε διάμετρο από ότι ο λαιμός του. Επίσης, επιλέγουμε την επιθυμητή διάμετρο και με βάση αυτή επιλέγουμε μήκος μεγαλύτερο από το μέγιστο ύψος των πτερυγίων. Πλέον μπορούμε να ορίσουμε τις συνθήκες κοπής.



Σχήμα 2.40 Παράδειγμα επιλογής εργαλείων κέντρου τόρνευσης

Συνολικά, επομένως, χρειαζόμαστε επτά εργαλεία. Όλοι οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν φαίνονται σχηματικά στο φασεολόγιο που ακολουθεί. Είναι προφανές ότι επειδή οι διαστάσεις του τεμαχίου ορίζονται παραμετρικά, ο σχεδιαστής θα πρέπει να βασίζεται στους ανωτέρω συλλογισμούς και να προσαρμόζει τα εργαλεία κάθε φορά που αλλάζει η γεωμετρία του προϊόντος.

2.4.5 Ανάλυση προβλημάτων της κατασκευής

Γενικά, τα δυο stock models είναι ράβδοι και οι διάμετροί τους είναι αναγκαστικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες διαμέτρους του άνω και κάτω δακτυλίου. Επιπρόσθετα, τα μήκη των stock models είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα μήκη των τελικών τεμαχίων για την καλύτερη πρόσδεση στο κέντρο τόρνευσης. Κατά την διάρκεια της τόρνευσης το τεμάχιο που κατεργάζεται πρέπει να κοπεί σε πριόνι, ώστε να ακολουθήσει νέο σετάρισμα στον τόρνο για την κατεργασία ολόκληρης της επιφάνειας του δακτυλίου. Η κοπή μπορεί να αντικατασταθεί και με ενέργεια αποκοπής στον τόρνο, εντούτοις επιλέχθηκε η χρήση του πριονιού και άρα στα ακόλουθα προγράμματα παρασκευής εντολών δεν έχει ενσωματωθεί αυτή η διεργασία.

Πιο συγκεκριμένα και βάσει του σχεδιασμού της κατεργασίας που έχει επιλεχθεί, τοποθετείται η πρώτη ύλη για τον άνω δακτύλιο στον τόρνο. Το πρόγραμμα με τον κώδικα Matlab επιλέγει ένα αρχικό σημείο μακριά από το τεμάχιο. Σε αυτό θα κινείται το εργαλείο και θα αρχίζει την κατεργασία. Η γεωμετρία του τελικού τεμαχίου έχει δοθεί με παραμετρικό τρόπο στο πρόγραμμα, και με αυτόν τον τρόπο το κοπτικό εργαλείο θα πραγματοποιεί, από το αρχικό σημείο, διαδικασίες επανάληψης πάσων ώστε να προσεγγίσει την τελική μορφή του δακτυλίου. Στο πρόγραμμα ορίζεται αριθμός για το βάθος κοπής και το βάθος φινιρίσματος. Στην συνέχεια το πρόγραμμα αλλάζει εργαλείο και πραγματοποιεί το φινίρισμα για όποιες επιφάνειες είναι προσεγγίσιμες κατά το πρώτο σετάρισμα του stock model.

Εν συνεχεία, γίνεται, όπως αναφέρθηκε, η κοπή του μέρους που έχει κατεργαστεί από την υπόλοιπη ράβδο της πρώτης ύλης. Γίνεται το δεύτερο σετάρισμα του προς κατεργασία δακτυλίου, πραγματοποιούνται οι αναγκαίες κοπές και το φινίρισμα. Η διαδικασία της τόρνευσης του άνω δακτυλίου έχει ολοκληρωθεί. Όμοια γίνεται και με το κάτω τεμάχιο για την διαδικασία της τόρνευσης. Γίνονται όλες οι δυνατές κοπές στο πρώτο σετάρισμα, γίνεται το φινίρισμα, έπειτα η αποκοπή του τεμαχίου από το stock model, δεύτερο σετάρισμα οι υπόλοιπες κοπές και το τελευταίο φινίρισμα.

Στις ανωτέρω διεργασίες δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα όσον αφορά τις προσεγγίσεις των τροχιών που πρέπει να δημιουργηθούν. Όλες οι γεωμετρίες που δημιουργούνται από τον τόρνο είναι αποτέλεσμα ευθειών και κυκλικών κινήσεων. Η έμφαση πρέπει να δοθεί στην παραμετροποίηση των αρχικών και τελικών σημείων των εκάστοτε κινήσεων, που είναι αποτέλεσμα των παραμετροποιημένων γεωμετρικών στοιχείων του τεμαχίου.

Όλα τα σφάλματα που μπορεί να υπάρξουν για τις διεργασίες στον τόρνο οφείλονται σε σφάλματα της ακρίβειας της μηχανής, του σεταρίσματος ή της φθοράς του κοπτικού εργαλείου, όμως σε καμία περίπτωση, σε προσεγγιστικά σφάλματα λόγω κάποιας αριθμητικής μεθόδου.

Σειρά λαμβάνει το κέντρο κατεργασιών όπου γίνονται οι διατρήσεις στον άνω δακτύλιο, μέσω των οποίων θα γίνεται η διέλευση των πείρων συγκράτησης, καθώς και η δημιουργία του χώρου όπου θα εγχέεται το συγκόλλημα. Τέλος, γίνεται η τοποθέτηση του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών και δημιουργούνται οι πείροι συγκράτησης και τα πτερύγια. Στην συνέχεια αναπτύσσονται όλη η μεθοδολογία για την δημιουργία τόσο των οπών, όσο των πείρων και των πτερυγίων.

Από δικτυακό τόπο (http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html) αναζητούμε την πτερύγωση που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Ο δικτυακός τόπος δεν μας παρέχει την γνώση των εξισώσεων των

αεροτομών, αλλά μας δίνει ορισμένα σημεία των χειλών, τα οποία είναι εκφρασμένα σε αδιάστατα μεγέθη, δηλαδή σημεία των συναρτήσεων $\eta_u(\xi)$ και $\eta_l(\xi)$. Στα δεδομένα της αεροτομής υπολογίζεται ότι η κλίση της αεροτομής είναι μηδενική. Πρόκειται για ένα αρχείο .txt το οποίο έχει σημεία του άνω και κάτω χείλους. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να τροποποιήσει τα δεδομένα, ώστε να διαχωρίσει τις τιμές που αναφέρονται στο άνω και στο κάτω χείλος, και οι τιμές να είναι αύξουσες.

Γίνεται η εύρεση των εξισώσεων των αεροτομών, μέσω διαδικτυακού τόπου (zunzun.com) με προσέγγιση των σημείων δεδομένων των τροχιών, εφόσον δεν έχουμε εξισώσεις έκφρασης της αεροτομής. Γίνεται εισαγωγή των δεδομένων των σημείων των δυο χειλών και επιλέγεται η ρύθμιση για την αναζήτηση εξίσωσης. Η εύρεση των εξισώσεων είναι πολύ βασικό βήμα, διότι μόνο με αυτό τον τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν αποδεκτές γεωμετρίες. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η προσέγγιση δεν είναι της παρούσης, αν και έχει αρκετό ενδιαφέρον, παρόλα αυτά μπορεί να αναφερθεί ότι τα δεδομένα εισάγονται σε έξι διαφορετικές μηχανές προσέγγισης, από όπου η κάθε μια εκφράζει τις συναρτήσεις με τα αντίστοιχα σφάλματα που δημιουργούνται, αναλόγως την μέθοδο προσέγγισης που χρησιμοποιούν.

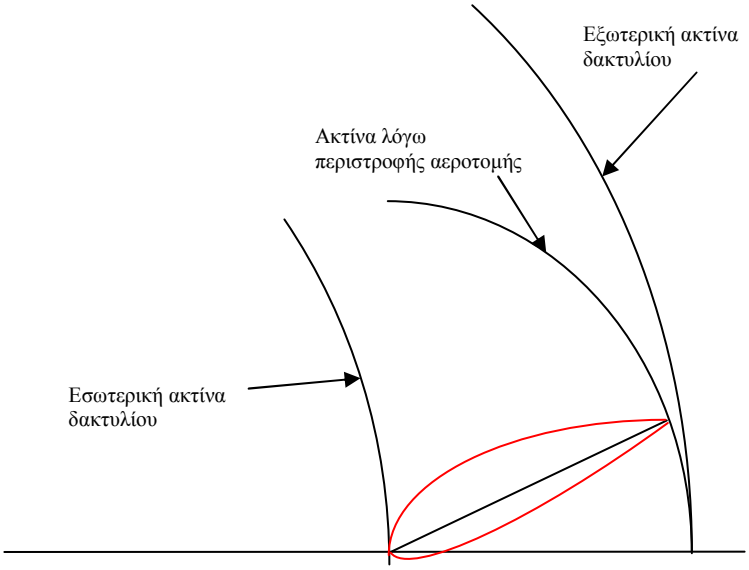
Επιλέγονται οι εξισώσεις με τα μικρότερα σφάλματα προσέγγισης. Η αριθμητική προσέγγιση των χειλών της αεροτομής εισάγει στην ιδεατή αεροτομή σφάλματα (της οποίας δεν γνωρίζουμε τις συναρτήσεις των χειλών), όμως αυτά είναι πολύ χαμηλότερης τάξης μεγέθους από τα σφάλματα που εισάγονται από την μηχανή και την ακρίβειά της. Επομένως, λαμβάνουμε ως αξιόπιστα και αποδεκτά τα αποτελέσματα που δημιουργούνται με αυτή τη μέθοδο.

Σε περίπτωση που ο σχεδιαστής έχει δικές του συναρτήσεις για τις εκφράσεις των χειλών τότε απλά επιλέγει τον αριθμό διαμέρισης και δημιουργεί σημεία τα οποία θα εισάγονται ως συντεταγμένες για την κοπή. Επίσης, ο σχεδιαστής μπορεί να μην δεσμευτεί την έκφραση μόνο των συναρτήσεων $\eta_u(\xi)$ και $\eta_l(\xi)$, αλλά μπορεί να έχει στην διάθεση του τις συναρτήσεις $\eta_t(\xi)$ και $\eta_c(\xi)$. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να είναι προσεκτικός για τον τρόπο με τον οποίο 'κτίζεται' η αεροτομή, όπως αναφέρεται στο σχετικό εδάφιο ανωτέρα (δηλαδή πρέπει να γνωρίζει αν η συνάρτηση $\eta_t(\xi)$ είναι κάθετη στην συνάρτηση $\eta_c(\xi)$ ή αν είναι κάθετη στην χορδή c).

Αφού αποκτήσουμε τις συναρτήσεις των χειλών της αεροτομής, επιλέγουμε τον αριθμό διαμέρισης και δημιουργούμε πρόσθετα σημεία που θα ορίζουν την αεροτομή μας, ως σημεία πλέον κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Έπειτα, έχουμε την δυνατότητα να την διαστατοποιήσουμε στο μέγεθος του δακτυλίου που σχηματίζεται από τον εσωτερικό και εξωτερικό κύκλο της πτερύγωσης.

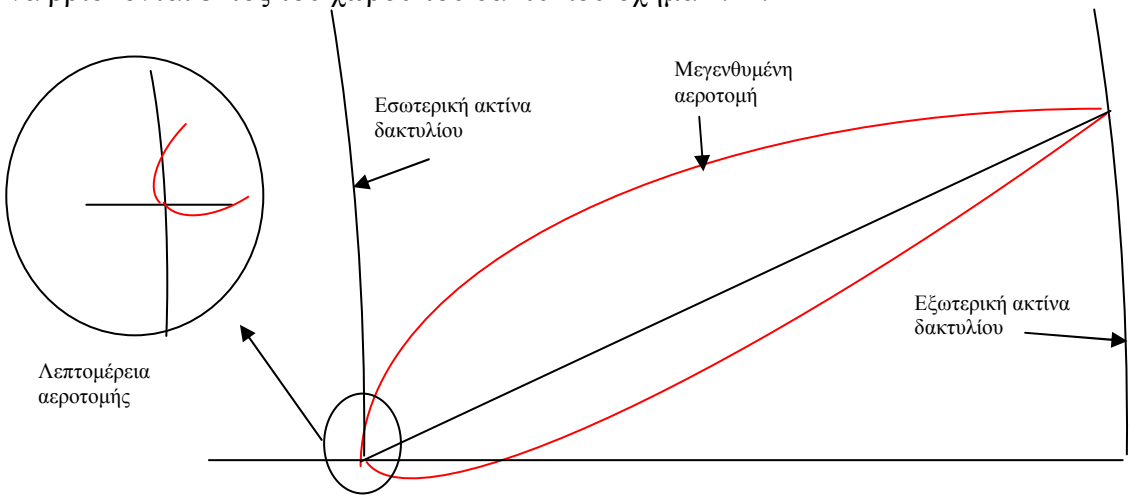
Στην συνέχεια μπορούμε να την χωροθετήσουμε με πίνακες μεταφοράς και περιστροφής ώστε το σημείο πρόσπτωσης και εκφυγής να βρίσκονται πάνω στις ακτίνες του δακτυλίου.

Το μείζον πρόβλημα της τοποθέτησης της αεροτομής στον χώρο του δακτυλίου αφορά την μεγέθυνση και την περιστροφή της. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι οι αεροτομές βρίσκονται σε ρεύμα ρευστού συνήθως υπό γωνιά. Αναγκαστικά, ο σχεδιαστής πρέπει να περιστρέψει την αδιαστατοποιημένη αεροτομή γύρω από το σημείο πρόσπτωσης. Με την οποιαδήποτε περιστροφή η διαστατοποιημένη αεροτομή στο μέγεθος του δακτυλίου πρέπει να μεγεθυνθεί λόγω της αναίρεσης της συνθήκης του ότι τα ακραία σημεία της χορδής πρέπει να βρίσκονται στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.41.



Σχήμα 2.41 Πρόβλημα μεγέθυνσης της αεροτομής με την περιστροφή.

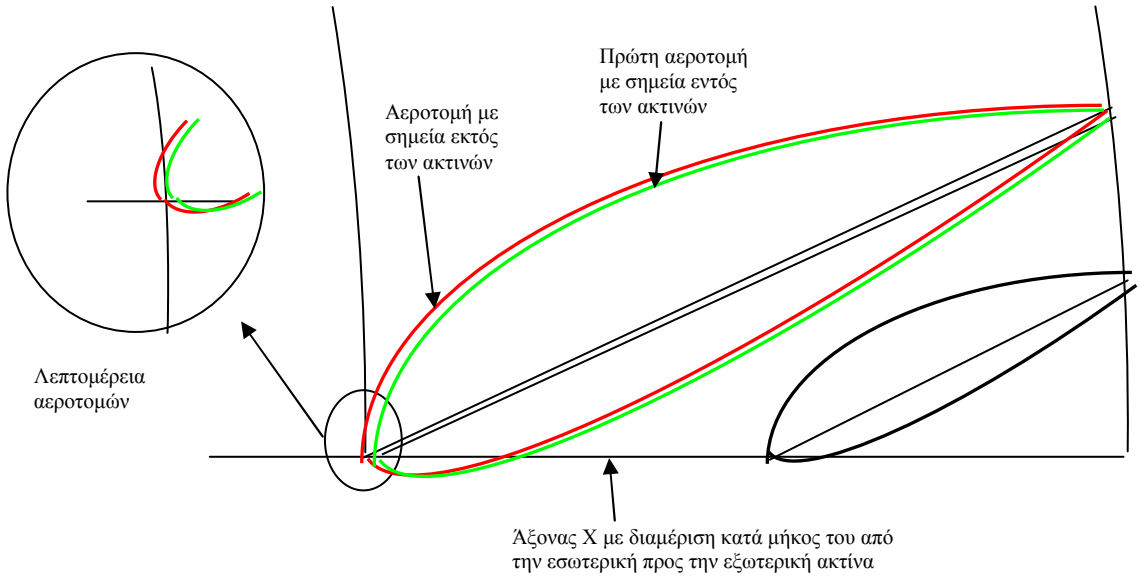
Περιορισμός σε αυτή την προσέγγιση είναι ότι περιστρέφοντας και μεγεθύνοντας την αεροτομή ώστε το σημείο πρόσπτωσης και εκφυγής να βρίσκονται στα άκρα του δακτυλίου μπορεί να υπάρχουν σημεία της αεροτομής που να βρίσκονται εκτός του χώρου του δακτυλίου σχήμα 2.42.



Σχήμα 2.42 Πρόβλημα ορίων της αεροτομής κατά την μεγέθυνση

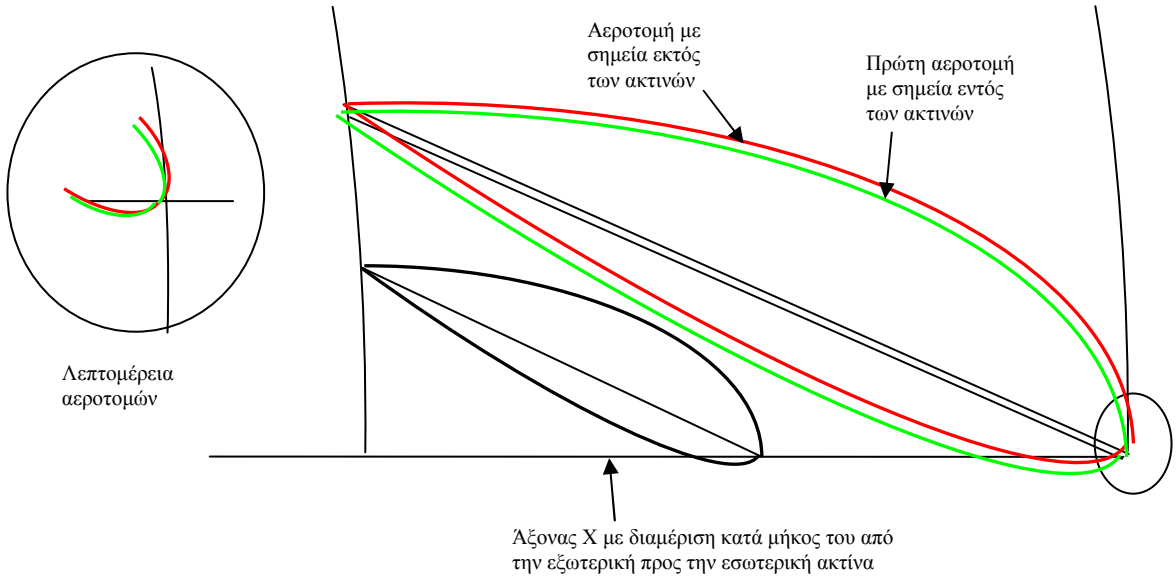
Ειδικά όταν η αεροτομή είναι αρκετά παχιά και πρέπει να περιστραφεί τότε τα πρώτα σημεία της θα βρίσκονται κατά πάσα πιθανότητα έξω από την μικρότερη διάμετρο. Αυτό γίνεται διότι έχουμε περιστρέψει την χορδή ως προς κάποια γωνία, η οποία δεν έχει πάχος, ενώ το πτερύγιο δημιουργείται ως μια κατανομή πάχους γύρω από μια μέση γραμμή. Αναθεωρώντας, λοιπόν, χρειάζεται να περιστρέψουμε την αεροτομή μας κατά την γωνία που ορίζει ο σχεδιαστής, όμως, η αεροτομή να βρίσκεται μέσα στον χώρο του δακτυλίου. Λύση στο πρόβλημά μας δίνει μια νέα διαμέριση, πάνω στον άξονα X και μεταξύ των δυο ακτινών που ορίζουν τον δακτύλιο. Από την εσωτερική έως την εξωτερική του ακτίνα διαμερίζουμε και σε κάθε μια ακτίνα δημιουργούμε μια αεροτομή για την οποία ισχύει ότι έχει περιστραφεί κατά την επιθυμητή γωνία και έχει μεγεθυνθεί τόσο, ώστε το αρχικό

σημείο να βρίσκεται πάνω στην διαμέριση που έγινε, ενώ το τελικό σημείο να βρίσκεται στην εξωτερική ακτίνα σχήμα 2.43.



Σχήμα 2.43 Τελικός προσδιορισμός της μεγέθυνσης φυγοκεντρικής ροής στάτορα

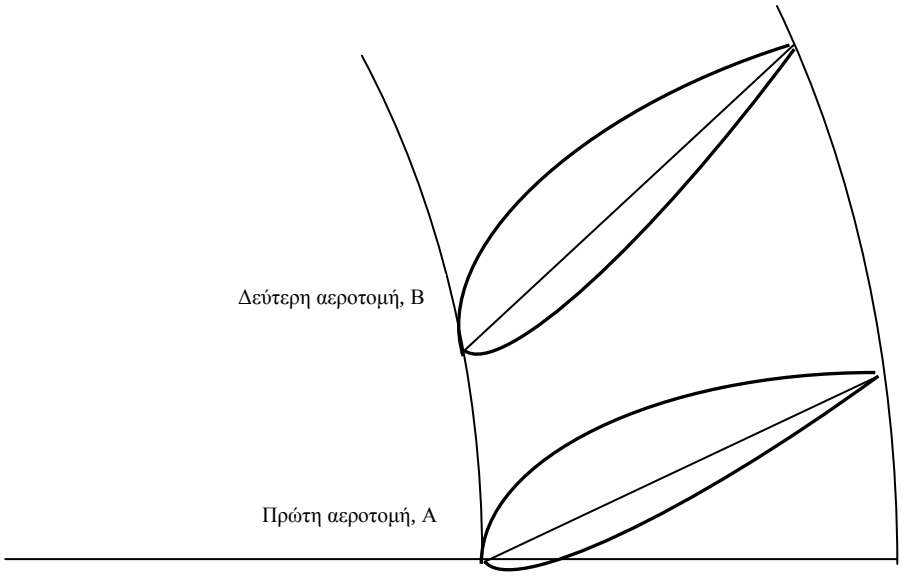
Αυτό εφόσον βεβαίως η αεροτομή έχει την ακμή εκφυγής εξωτερικά του δακτυλίου. Αν η ακμή εκφυγής βρίσκεται στην εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου, τότε η όλη διαδικασία πρέπει να αλλαχθεί και να θεωρηθεί αντίστοιχη διαμέριση από την εξωτερική ακτίνα προς την εσωτερική του δίσκου, σχήμα 2.44.



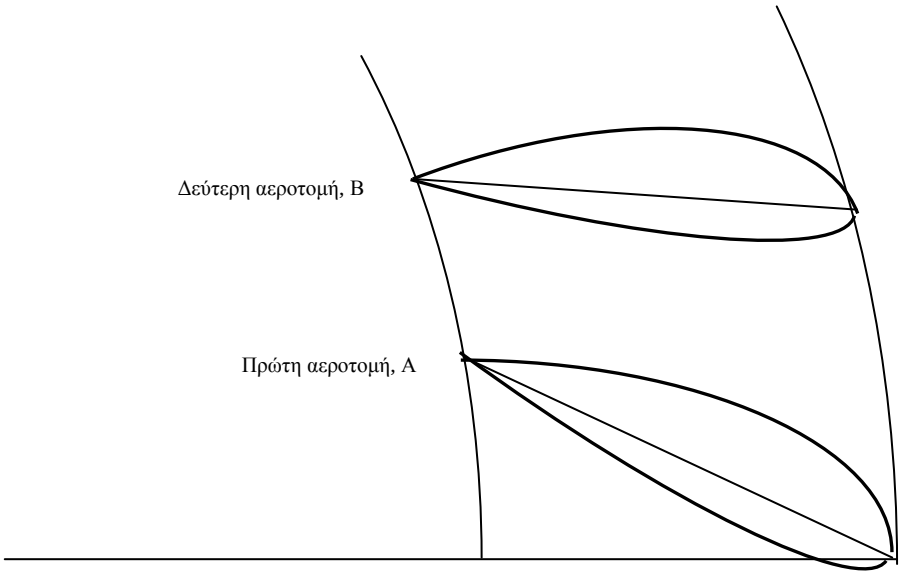
Σχήμα 2.44 Τελικός προσδιορισμός της μεγέθυνσης κεντρομόλου ροής στάτορα

Η αεροτομή που μας ενδιαφέρει είναι αυτή η οποία όλα τα σημεία του άνω και κάτω χείλους βρίσκεται μέσα στις ακτίνες του δακτυλίου. Πλέον, έχουμε βρει το αρχικό και τελικό σημείο της αεροτομής, τις αναλυτικές συναρτήσεις της, την μεγέθυνση της και άρα όλες τις παραμέτρους περιγραφή της.

Αφού τοποθετηθεί η πρώτη αεροτομή στην θέση της στον δακτύλιο, μπορούμε να δημιουργήσουμε κυκλικά όλες τις υπόλοιπες αεροτομές, ανάλογα με τον επιθυμητό αριθμό των πτερυγίων της πτερύγωσης. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός πίνακα περιστροφής γύρω από το κέντρο του δακτυλίου. Αφού εκφραστούν οι εξισώσεις των αεροτομών προς επαλήθευση των υπολογισμών γίνεται έλεγχος για τις δυο πρώτες διαδοχικές αεροτομές. Είναι ευνόητο ότι οι αεροτομές δεν πρέπει να έχουν κανένα κοινό χώρο μεταξύ τους (η τομή των χώρων τους βάσει της θεωρίας των διαγραμμάτων Venn να είναι μηδέν, $A \cap B=0$), σχήμα 2.45,2.46.

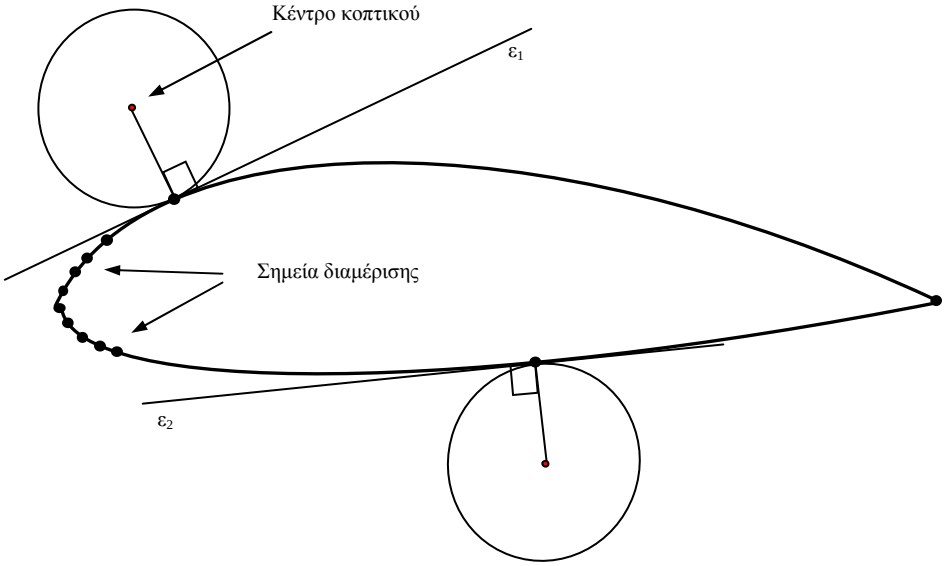


Σχήμα 2.45 Έλεγχος των δυο πρώτων αεροτομών φυγοκεντρικής ροής στάτορα



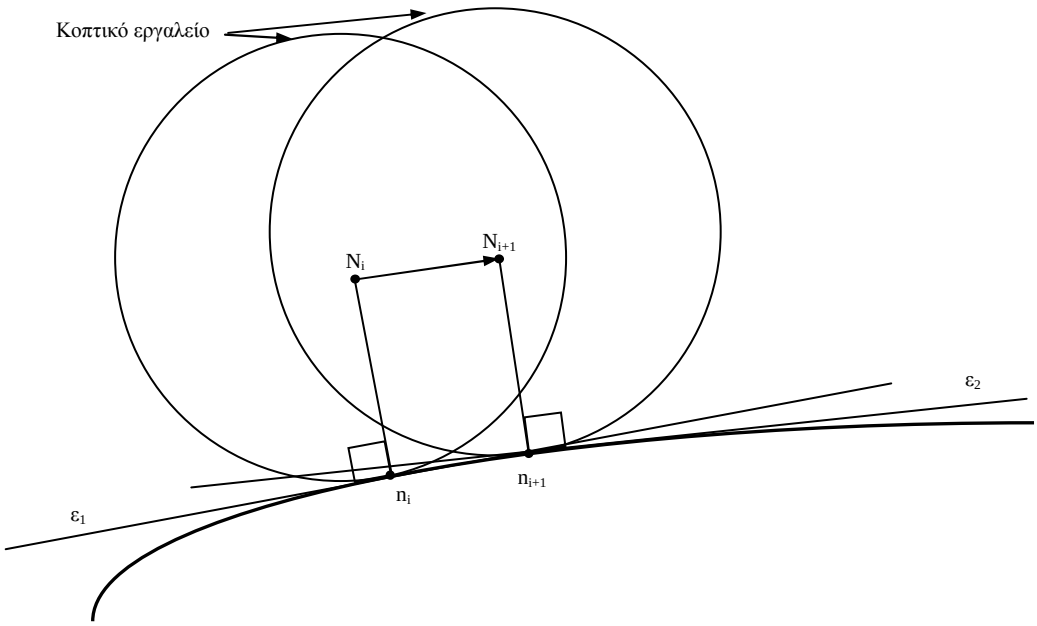
Σχήμα 2.46 Έλεγχος των δυο πρώτων αεροτομών κεντρομόλου ροής στάτορα

Στην συνέχεια χρειάζεται να βρούμε τις τροχιές που θα κάνει το κοπτικό για να κατασκευάσει την εν λόγω μορφή της αεροτομής. Γνωρίζοντας ήδη τις εξισώσεις του άνω και κάτω χείλους της αεροτομής και έχοντας υπόψη ότι το κοπτικό είναι κυκλικό εργαλείο, η πρώτη ιδέα είναι να προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε για κάθε ένα σημείο των χειλών ένα άλλο, από το οποίο θα περνάει το κέντρο του κοπτικού. Το σημείο της τροχιάς δημιουργείται έτσι ώστε να είναι κάθετο στο προφίλ της αεροτομής. Ο σχεδιαστής χρειάζεται να βρει τις παραγώγους των εξισώσεων των χειλών της αεροτομής, άρα και των κάθετων και εφαπτόμενων ευθειών της στα αντίστοιχα σημεία της διαμέρισης του προφίλ της αεροτομής. Λόγω της ύπαρξης στους υπολογισμούς τετραγωνικής ρίζας για την απόσταση, ο σχεδιαστής επιλέγει διαφορετική εξίσωση για τα σημεία της τροχιάς του άνω χείλους και άλλη για το κάτω χείλος, σχήμα 2.47. Οι προσεγγίσεις που θα ακολουθήσουν ισχύουν και για στάτορα κεντρομόλου και φυγόκεντρης ροής. Για λόγους συντόμευσης θα παρουσιάζονται γραφικά παραδείγματα μόνο πτερυγώσεις φυγόκεντρης ροής.

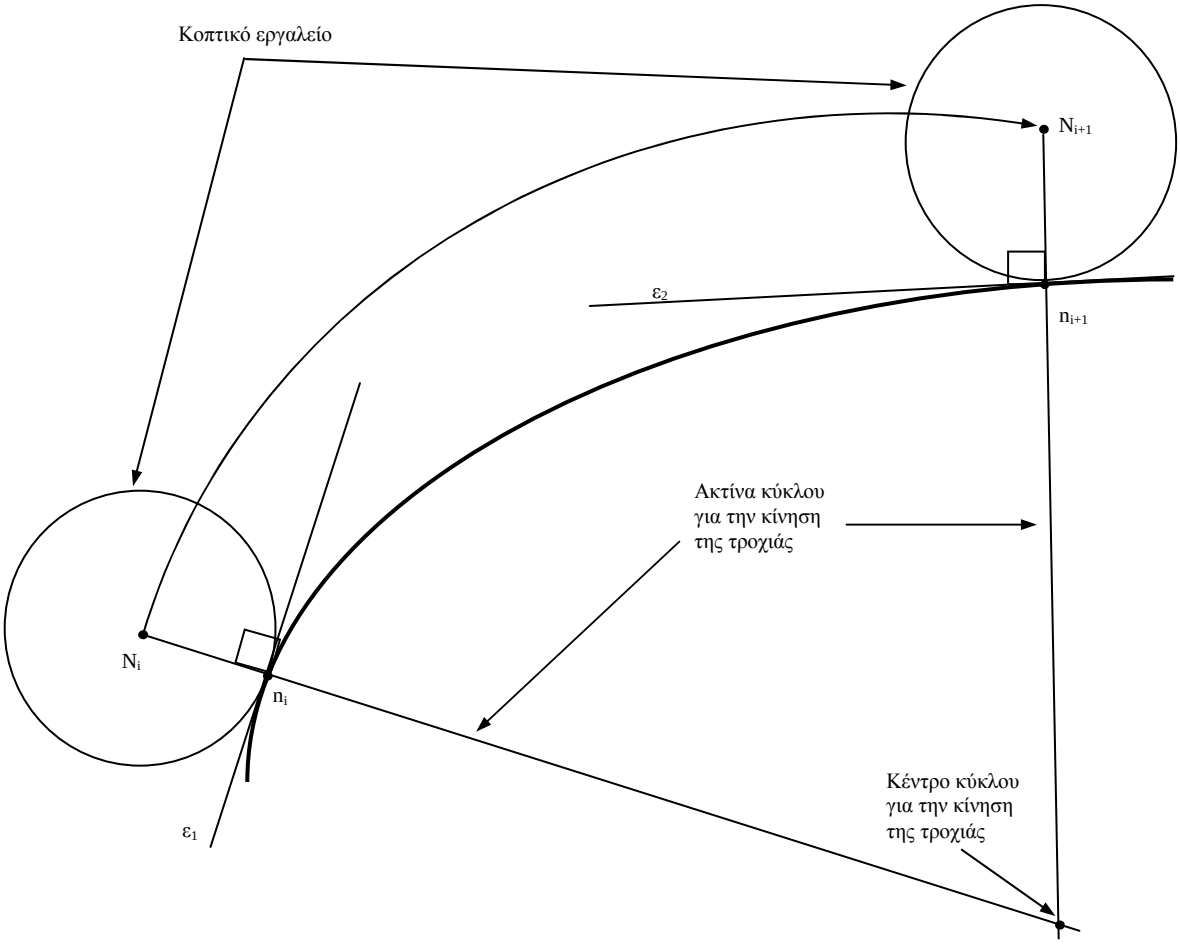


Σχήμα 2.47 Τρόπος δημιουργίας σημείων των τροχιών για το άνω και κάτω χείλος της αεροτομής

Σε αυτό το σημείο γίνεται κατανοητό ότι η εύρεση των συναρτήσεων που ορίζουν την αεροτομή είναι πολύ βασική προϋπόθεση, διότι δεν θα μπορούσαμε να ορίσουμε την κάθετη και την εφαπτόμενη για την δημιουργία της τροχιάς, αν γνωρίζαμε μονάχα τα σημεία. Βρίσκοντας για κάθε ένα σημείο της διαμέρισης το αντίστοιχο της τροχιάς γνωρίζουμε όλα τα σημεία από τα οποία πρέπει να περάσει το κοπτικό. Σε αυτή την φάση της κατάστρωσης των κινήσεων του κοπτικού έχουμε τα ακόλουθα προβλήματα. Στην γλώσσα μηχανής ο σχεδιαστής χρειάζεται να αναφέρει τον τρόπο που θα κινηθεί το κοπτικό από το ένα σημείο στο επόμενο, το οποίο, μαθηματικώς, είναι αντικείμενο αριθμητικής προσέγγισης. Ωστόσο, για λόγους απλότητας ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει τις αντίστοιχες κινήσεις που ορίζονται από την μηχανή, δηλαδή κίνηση με γραμμική παρεμβολή ή κίνηση με κυκλική παρεμβολή. Επιλέγοντας έναν μεγάλο σχετικά αριθμό για στην διαμέριση του προφίλ της αεροτομής μπορεί να επιλέξει το κοπτικό να πραγματοποιεί γραμμική κίνηση μεταξύ των σημείων, σχήμα 2.48. Όμως, αυτό μπορεί να καθυστερήσει την διαδικασία παραγωγής κατά πολύ, επομένως, αντίθετα με την προηγούμενη επιλογή, μπορεί να ορίσει κυκλική παρεμβολή του κοπτικού μεταξύ των σημείων και να μειώσει αντίστοιχα τον αριθμό της διαμέρισης, σχήμα 2.49.



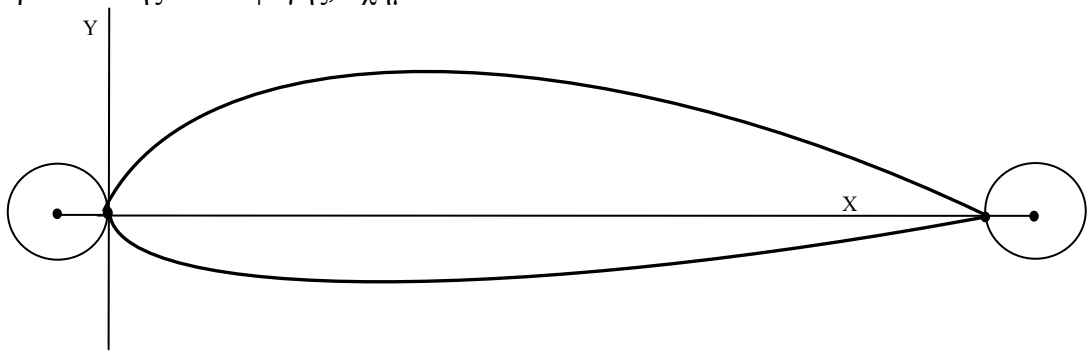
Σχήμα 2.48 Ευθεία κίνηση κοπτικού μεταξύ των σημείων των τροχιών της αεροτομής σε μεγέθυνση



Σχήμα 2.49 Κυκλική κίνηση κοπτικού μεταξύ των σημείων των τροχιών της αεροτομής σε μεγέθυνση

Στην κυκλική παρεμβολή το κοπτικό κινείται κυκλικά από το ένα σημείο στο άλλο. Στον G κώδικά, όμως, πρέπει να οριστεί η ακτίνα της κυκλικής κίνησης. Αυτό δεν δεσμεύει τον σχεδιαστή, αφού μπορεί με γεωμετρική ανάλυση να καθορίσει το κέντρο των δυο ευθειών που είναι κάθετες στην αεροτομή. Γνωρίζοντας το κέντρο, βρίσκει την ακτίνα ως την απόσταση ενός εκ των δυο σημείων της τροχιάς του κοπτικού. Ο σχεδιαστής, παρόλα αυτά, θα πρέπει να έχει υπόψη του τα όρια της μηχανής για τις τιμές των ακτινών. Για τον λόγο του ότι τα σημεία της διαμέρισης είναι αρκετά κοντά, μπορεί οι ακτίνες των κύκλων να αποκτούν πολύ υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα η μηχανή να μην μπορεί να τις διαβάσει. Ο σχεδιαστής χρειάζεται σε αυτή την περίπτωση, και αν έχει αποφασίσει να χρησιμοποιήσει τον κυκλικό τρόπο παρεμβολής, να εισάγει στον κώδικα δημιουργίας των εντολών G μια δικλείδα ασφαλείας, ώστε αν η τιμή της ακτίνας υπερβεί την ανώτατη τιμή που μπορεί να αναγνώσει η μηχανή, τότε το κοπτικό απλά να πραγματοποιεί γραμμική κίνηση από το ένα σημείο στο επόμενο. Στην συνέχεια, το κοπτικό μπορεί να συνεχίζει την κίνηση με κυκλική παρεμβολή. Στο υπάρχον πρόγραμμα δεν αναπτύσσεται κάτι τέτοιο, διότι κατά την ανάγνωση των εντολών από το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν εμφανίστηκε κάποιο πρόβλημα.

Ένα άλλο πρόβλημα αφορά το αρχικό και τελικό σημείο της αεροτομής. Βάσει των αρχικών αδιαστατοποιημένων σημείων που έχουμε στην διάθεσή μας, ενώ ορίζεται ως αρχή το σημείο (0,0) και για τα δυο χείλη, το τέλος δεν είναι το (1,0) αλλά δυο σημεία που έχουν συντεταγμένες (1,+ε) και (1,-ε), όπου το ε είναι ένας πολύ μικρός αριθμός, για το άνω και κάτω χείλος αντίστοιχα. Αυτό όμως, με την διαστατοποιήση που θα ακολουθήσει, θα δημιουργηθεί στην ακμή εκφυγής της αεροτομής ανεπιθύμητο πάχος. Επιπλέον, στο αρχικό σημείο (0,0) δεν μπορεί να οριστεί παράγωγος των συναρτήσεων του άνω ή κάτω χείλους ακριβώς διότι αυτή είναι παράλληλη στον Y άξονα. Αυτό, βεβαίως δεν συμβαίνει για τα τελικά σημεία των συναρτήσεων των χειλών. Λύση στο πρόβλημα του αρχικού και τελικού σημείου δίνει η κυκλική παρεμβολή. Γνωρίζοντας τους γεωμετρικούς περιορισμούς που υποβάλλεται το σχήμα της αεροτομής για την θέση της στον δακτύλιο, μπορούμε να βρούμε τα σημεία που πρέπει να πάει το κοπτικό ώστε να δημιουργηθούν το σημείο πρόσπτωσης και εκφυγής, σχήμα 2.50.

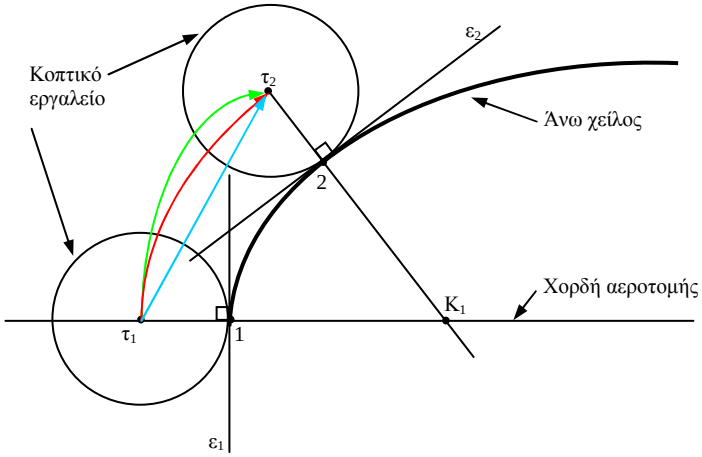


Σχήμα 2.50 Αρχικό και τελικό σημείο των τροχιών του άνω και κάτω χείλους της αεροτομής σε μεγέθυνση. Αυτά ορίζονται ως τα σημεία πάνω στην χορδή του πτερυγίου με απόσταση $\pm R_{εργαλείου}$. Κατά την τελική τοποθέτηση της αεροτομής στον δακτύλιο τα σημεία πρόσπτωσης και εκφυγής βρίσκονται πάνω στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα αντίστοιχα, ενώ τα αρχικά και τελικά σημεία του εργαλείου ορίζονται και με την περιστροφή της αεροτομής περί του σημείου πρόσπτωσης. Αντίστροφα ισχύει για τους στάτορες κεντρομόλου ροής.

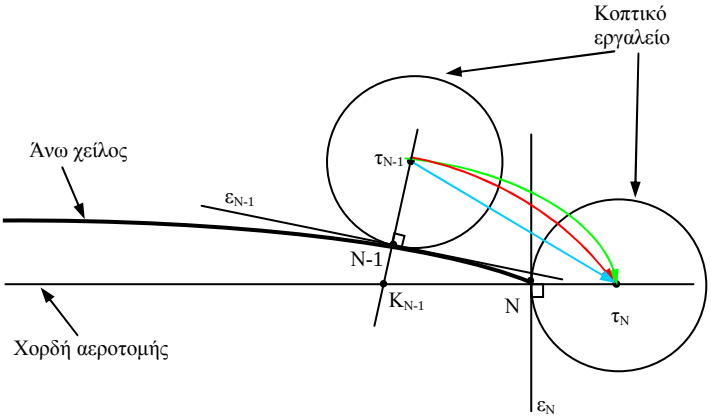
Εναλλακτικά, ο σχεδιαστής θα μπορούσε να μετέτρεπε τις δυο τιμές για το σημείο εκφυγής του άνω και κάτω χείλους σε (1,0) και (1,0) οπότε και να μην

συνέτρεχε λόγος αναφοράς του συγκεκριμένου προβλήματος, αφού η τιμή ε είναι πολύ μικρή. Όμως, επιλέγεται η αναφορά του και αποφεύγεται η τροποποίηση των δεδομένων στην παρούσα για λόγους πληρότητας.

Επίσης, γνωρίζοντας το δεύτερο και το προτελευταίο σημείο της διαμέρισης του άνω και κάτω χείλους, μπορούμε να βρούμε την ακτίνα που θα διαγράψει το κοπτικό, σχήμα 2.51 και σχήμα 2.52, χρησιμοποιώντας πάλι τον αλγεβρικό προσδιορισμό των κέντρων των κύκλων και των ακτινών.



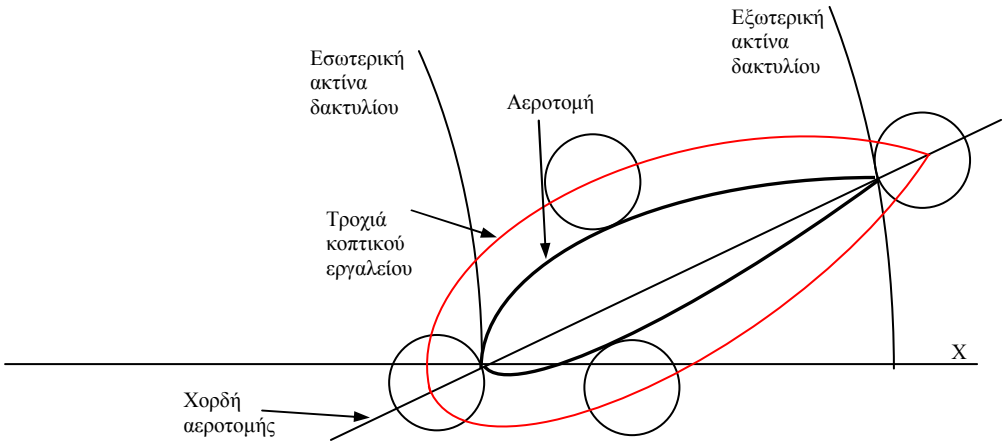
Σχήμα 2.51 Πρώτο και δεύτερο σημείο της τροχιάς του άνω χείλους της αεροτομής. Όμοια ισχύει και για την τροχιά του κάτω χείλους για το πρώτο και δεύτερο σημείο.



Σχήμα 2.52 Προτελευταίο και τελευταίο σημείο της τροχιάς του άνω χείλους της αεροτομής. Όμοια ισχύει και για την τροχιά του κάτω χείλους για το προτελευταίο και τελευταίο σημείο.

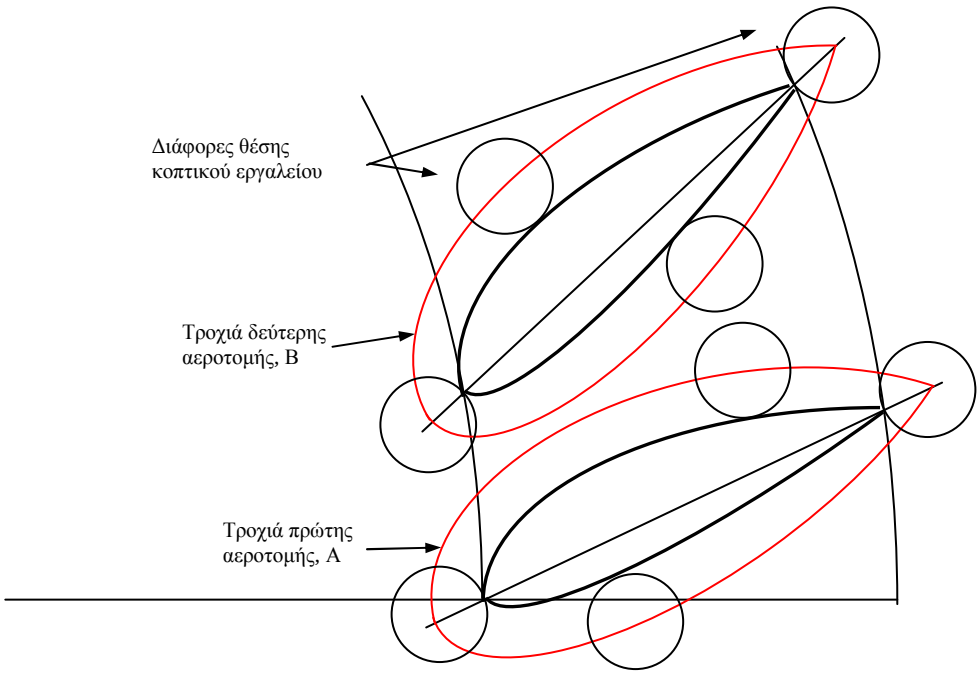
Στα παραπάνω σχήματα μπορούμε να παρατηρήσουμε τρεις τροχιές. Η μπλε που αφορά την γραμμική κίνηση του εργαλείου, η πράσινη η οποία είναι υποθετική τροχιά του εργαλείου και η οποία δημιουργεί ακριβώς το προφίλ της αεροτομής και η κόκκινη τροχιά η οποία είναι η κυκλική παρεμβολή του εργαλείου. Γίνεται σαφές με αυτά τα σχήματα ότι η γραμμική κίνηση δεν μπορεί να επιλεχθεί, διότι θα καταστρέψει το προφίλ της αεροτομής. Επίσης η πράσινη τροχιά δεν μπορεί να ακολουθηθεί διότι και αυτή θα είναι εξίσωση τουλάχιστον $3^{ου}$ βαθμού, όπως το προφίλ της αεροτομής. Επομένως το εργαλείο στον τόπο των αρχικών και τελικών σημείων επιλέγεται να κάνει κυκλική παρεμβολή. Με αυτή την ενέργεια γνωρίζουμε ότι το μέγιστο των σφαλμάτων κατά την κατεργασία λόγω προσεγγιστικής μεθόδου

βρίσκεται σε αυτά τα σημεία. Εντούτοις, ο σχεδιαστής με εύλογο αριθμό διαμέρισης μπορεί να μειώσει κατά ένα μεγάλο ποσοστό το σφάλμα αυτό προσεγγίζοντας έτσι την πράσινη τροχιά. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι στην περιοχή του τελικού σημείου δεν υπάρχει καμία ανεπιθύμητη εμφάνιση πάχους, διότι ως τελικό σημείο της τροχιάς του κοπτικού έχει ληφθεί σημείο πάνω στην χορδή της αεροτομής. Σε συνδυασμό με το κυκλικό προφίλ του εργαλείου, η μετάβαση στο τελικό σημείο τ_N από το τ_{N-1} αποδεσμεύει την κατασκευή από το αρχικό σφάλμα της τελευταίας τιμής των αδιάστατων δεδομένων. Τα ίδια ισχύουν και για το κάτω χείλος, οπότε οι ενέργειες που θα ακολουθηθούν και σε αυτή την περίπτωση στην κατασκευή έχουν την ίδια βάση. Στην συνέχεια μπορεί να γίνει η περιστροφή του πτερυγίου κατά επιθυμητή γωνία. Αυτός ο τρόπος υπολογισμού της τροχιάς δεν δεσμεύεται από κάποιο παράγοντα ο οποίος πρέπει να μείνει σταθερός, οπότε μπορεί να ειπωθεί πλέον ότι όλη η διαδικασία του υπολογισμού και δημιουργίας της τροχιάς γύρω από μια αεροτομή έχει παραμετροποιηθεί πλήρως. Στο σχήμα 2.53 φαίνεται ποιοτικά η τελική τοποθέτηση της αεροτομής στον κάτω δακτύλιο. Το ίδιο ισχύει και για αεροτομές που αφορούν κεντρομόλου ροής στάτορες.



Σχήμα 2.53 Τροχιά της πρώτης αεροτομής αφού τοποθετηθεί στην τελική της θέση στον δακτύλιο

Αφού εκφραστούν οι τροχιές των αεροτομών προς επαλήθευση των υπολογισμών γίνεται έλεγχος για δυο διαδοχικές αεροτομές και δημιουργείται ένας γενικός τύπος έκφρασής των. Είναι ευνόητο ότι οι τροχιές δεν θα πρέπει να έχουν κανένα σημείο κοινό (η τομή των χώρων που ορίζεται από τις τροχιές και τις συναρτήσεις των χειλών δυο διαδοχικών αεροτομών βάσει της θεωρίας των διαγραμμάτων Venn να είναι μηδέν, $A \cap B=0$), σχήμα 2.54. Λέγοντας κανένα σημείο είναι κοινό εννοούμε ότι ο χώρος που περικλείεται από την τροχιά της πρώτης αεροτομής δεν θα πρέπει να έχει κοινό χώρο με τον χώρο που περικλείεται από την τροχιά της δεύτερης αεροτομής. Έχει ενδιαφέρον αν στον χώρο της τροχιάς είναι και το όριό της, δηλαδή η ίδια η τροχιά, αλλά προς ευκολία και για τον λόγο του ότι έχουμε προσεγγιστική μέθοδο κατασκευής, θεωρούμε ότι οι δυο τροχιές σε κάθε σημείο τους έχουν απόσταση μεγαλύτερη του μηδενός.



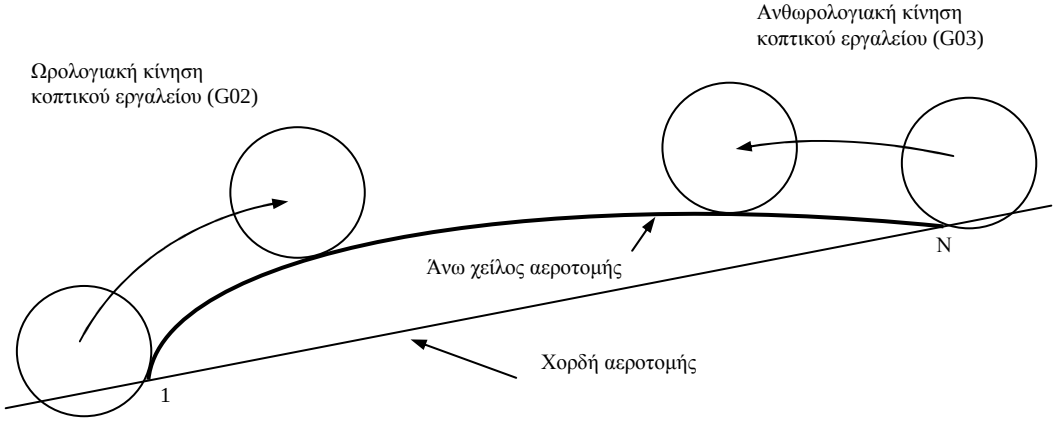
Σχήμα 2.53 Τροχιές δυο διαδοχικών αεροτομών στις τελικές θέσεις τους στον δακτύλιο

Σε αυτό το σημείο δημιουργείται ένα πρόβλημα το οποίο χρήζει ανάλυσης. Όπως ορίσαμε, οι τροχιές δημιουργούνται από τόσα σημεία περίπου (N+1) όσα και η διαμέριση (N) στις εξισώσεις των αεροτομών. Αυτό μας περιορίζει στο να αποφανθούμε αν οι τροχιές διασταυρώνονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση που είχαμε τις εξισώσεις των τροχιών θα μπορούσαμε να βρούμε αν η διαφορά τους για κάθε σημείο μέσα στα όρια των δακτυλίων είναι θετική και να ήμασταν βέβαιοι ότι οι τροχιές δεν τέμνονται, δηλαδή αν ισχύει:

$$[f(R)-g(R)]_{R_2}^{R_1} \geq 0, \ \forall R \in [R_1, R_2]$$

με g(R) η συνάρτηση τροχιάς του άνω χείλους της πρώτης αεροτομής και f(R) η συνάρτησης τροχιάς του κάτω χείλους της δεύτερης αεροτομής. Αυτό μπορεί να γίνει με εισαγωγή πάλι όλων των σημείων στην δικτυακή μηχανή προσέγγισης και την εξαγωγή των αντίστοιχων συναρτήσεων των τροχιών για το άνω χείλος και το κάτω χείλος. Αναζητώντας, όμως, τις βέλτιστες ενέργειες που θα κάνει ο σχεδιαστής, τότε αυτό δεν είναι απαραίτητο, διότι ο έλεγχος μπορεί να γίνει οπτικά από τον ίδιο στο περιβάλλον του excel. Αν γίνεται τομή των δυο χώρων σε δυο διαδοχικές αεροτομές δυο είναι οι ενέργειες που μπορεί να ακολουθήσουν. Η μια αφορά την χρήση μικρότερης διαμέτρου εργαλείου, τόσο ώστε να μην υπάρχει κανένας κοινός τόπος ή αυτός να είναι μηδενικός (σημείο). Αυτή είναι και η πλέον ενδεδειγμένη διότι δεν μεταβάλλονται οι παράμετροι που ορίζουν την πτερύγωση. Η άλλη εναλλακτική ενέργεια είναι αυτή της μείωσης του αριθμού των πτερυγίων, όμως αυτό πρέπει να γίνει ύστερα από μελέτη της ροής διαμέσου των πτερυγίων διότι αύξηση του χώρου μεταξύ δύο πτερυγίων μπορεί να αυξήσει δραματικά τις απώλειες, όπως αναφέρεται και στην θεωρητική ανάπτυξη ανωτέρω. Τέλος, ο σχεδιαστής χρειάζεται να γνωρίζει πως αν υπάρχει ένα σημείο στο οποίο οι τροχιές τέμνονται τότε ο αύξων αριθμός της διαμέρισης που αφορά τα συγκεκριμένα σημεία στο άνω χείλος της πρώτης αεροτομής και στο κάτω χείλος της δεύτερης αεροτομής δεν είναι ο ίδιος, αφού αλλιώς ορίζονται λόγω της περιστροφής που γίνεται.

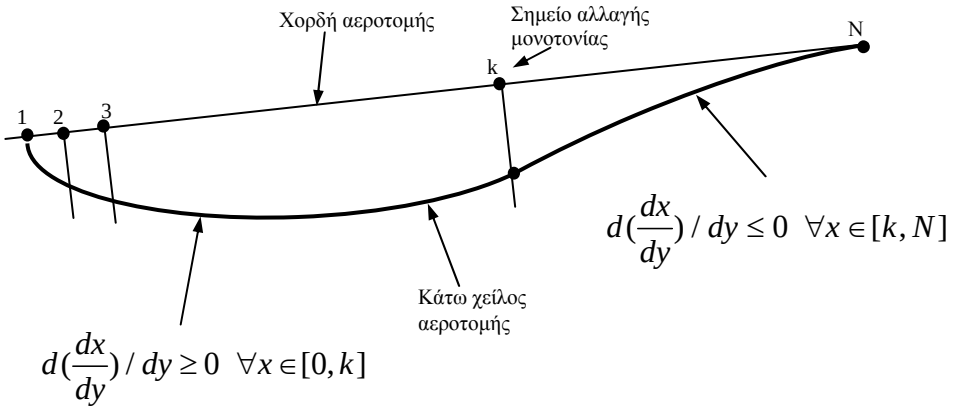
Τελευταίο πρόβλημα που πρέπει να αναλυθεί για την δημιουργία των τροχιών είναι αυτό της φοράς κοπής του κοπτικού γύρω από την αεροτομή. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εμφανίζεται όταν ο σχεδιαστής έχει επιλέξει το κοπτικό να πραγματοποιεί κυκλική παρεμβολή μεταξύ των σημείων και όχι γραμμική παρεμβολή. Για λόγους πληρότητας και επειδή όλες οι ενέργειες που ακολουθήθηκαν στο πρόγραμμα που αναπτύσσονται σε επόμενες παραγράφους, αφορούν κοπή με κυκλική παρεμβολή μεταξύ των σημείων των τροχιών των αεροτομών, παρουσιάζεται η συγκεκριμένη ανάλυση. Μια τυπική αεροτομή παρουσιάζει στο άνω χείλος της σταθερή μονοτονία, δηλαδή ισχύει $d(\frac{dx}{dy})/dy > 0$ *ή* $d(\frac{dx}{dy})/dy < 0$, με dx/dy την πρώτη παράγωγο στο κάθε σημείο, άρα και τον συντελεστή διεύθυνσης της εφαπτομένης ευθείας, με συνηθέστερη την δεύτερη περίπτωση, δηλαδή το σχήμα του άνω χείλους είναι με τα κοίλα κάτω. Επομένως, στον G κώδικα μπορεί να οριστεί η ωρολογιακή ή ανθωρολογιακή φορά του κοπτικού, ανάλογα από το σημείο έναρξης και λήξης της τροχιάς, σχήμα 2.54. Αν ο σχεδιαστής επιλέξει την κοπή από το τέλος της αεροτομής τότε θα πρέπει να κάνει ανθωρολογιακή κυκλική κίνηση το κοπτικό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, αν η κοπή γίνεται από την αρχή της αεροτομής τότε το κοπτικό θα πρέπει να κάνει ωρολογιακή κυκλική κίνηση. Αυτό ισχύει με κάθε επιφύλαξη στην γενικότητά του, δηλαδή είναι στην κρίση του σχεδιαστή από που θα αρχίσει την κοπή του άνω χείλους, αν η πτερύγωση είναι κεντρομόλου ή φυγόκεντρης ροής, αν καθορίζεται διαφορετικά το σχήμα της αεροτομής, αν βελτιστοποιούνται οι κινήσεις του κοπτικού με κάποιον από τους δυο τρόπους κτλ.



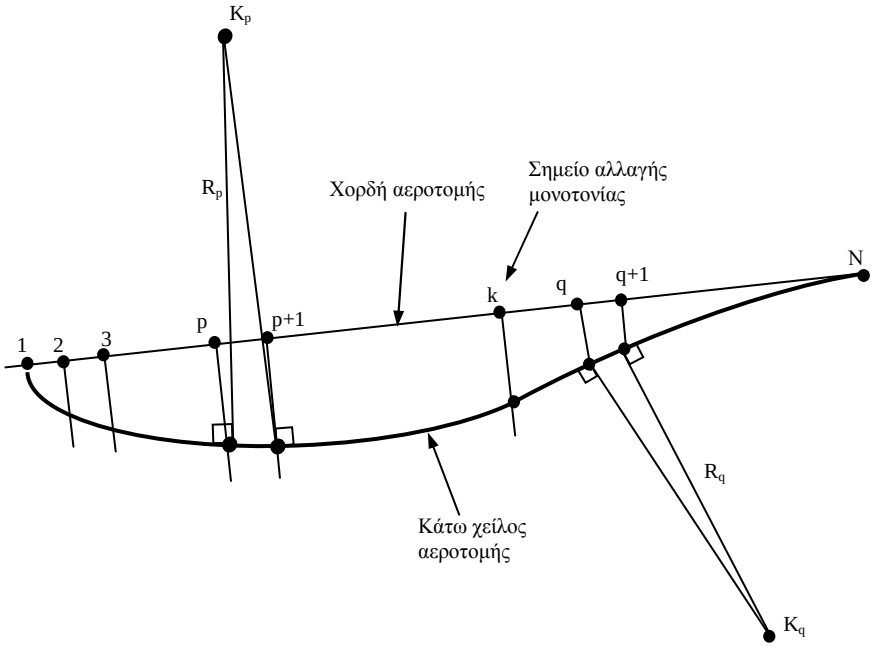
Σχήμα 2.54 Ωρολογιακή και ανθωρολογιακή κίνηση κοπτικού εργαλείου ανάλογα με το σημείο έναρξης και λήξης της τροχιάς του άνω χείλους τυπικής αεροτομής

Στην περίπτωση της δημιουργίας του κάτω χείλους ο σχεδιαστής πρέπει να αναγνωρίσει σε ποιο σημείο αλλάζουν καμπυλότητες οι συναρτήσεις των χειλών ώστε να χρησιμοποιήσει τις αντίστοιχες εντολές G για ωρολογιακή ή ανθωρολογιακή κίνηση του κοπτικού. Σε μια τυπική αεροτομή στο κάτω χείλος η μονοτονία δεν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από το μηδέν οπότε γενικά ισχύει $d(\frac{dx}{dy})/dy \geq 0 \;\; \forall x \in [0,k]$ *και* $d(\frac{dx}{dy})/dy \leq 0 \;\; \forall x \in [k,\mathrm{N}]$, όπου k κατά την αύξηση των α/α σημείων της διαμέρισης μέχρι τον οποίο ισχύει η πρώτη περίπτωση, ενώ μετά από αυτόν ισχύει η δεύτερη περίπτωση και N ο αριθμός της διαμέρισης, σχήμα 2.55. Ο σχεδιαστής μπορεί να αναγνωρίσει την αλλαγή της μονοτονίας είτε παραγωγίζοντας δυο φορές τις συνάρτησεις έκφρασης του προφίλ της αεροτομής, ή

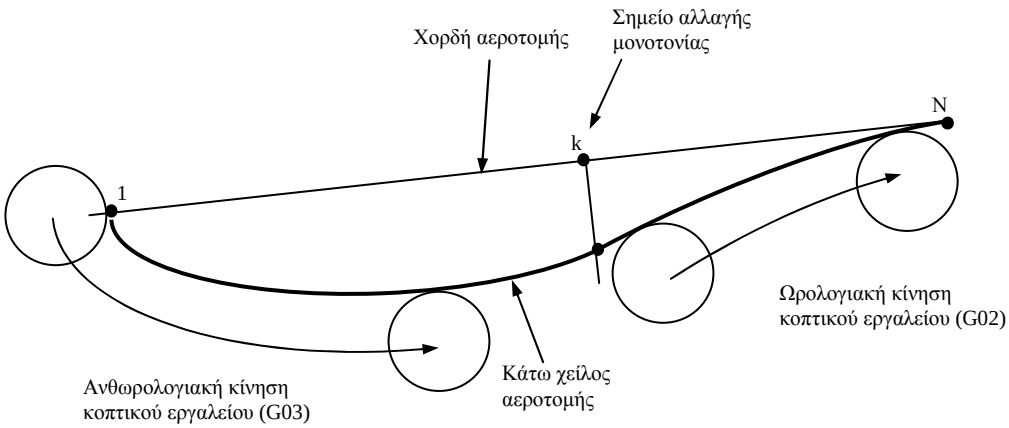
ευκολότερα, όπως έχουμε δομήσει την προσέγγισή μας, να παρατηρήσει σε ποιο σημείο το κέντρο του κύκλου δυο διαδοχικών σημείων μετατίθεται από την πάνω πλευρά της αεροτομής στην κάτω, σχήμα 2.56. Τότε ο σχεδιαστής μπορεί να καθορίσει τον τρόπο που θα κινηθεί το κοπτικό στον G κώδικα, φυσικά σε σχέση πάντα με το αρχικό και τελικό σημείο της τροχιάς, σχήμα 2.57 και σχήμα 2.58.



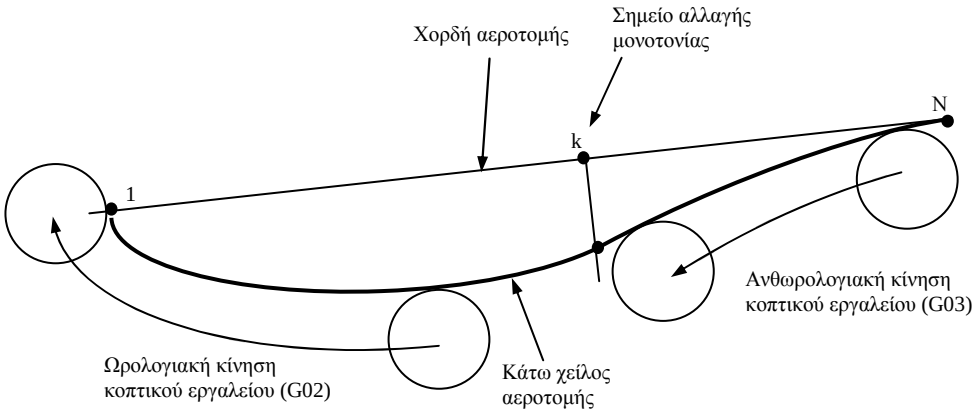
Σχήμα 2.55 Μονοτονία συνάρτησης κάτω χείλους τυπικής αεροτομής



Σχήμα 2.56 Αλλαγή κέντρου κύκλου δυο διαδοχικών σημείων εκατέρωθεν του σημείου αλλαγής της μονοτονίας k κάτω χείλους τυπικής αεροτομής.



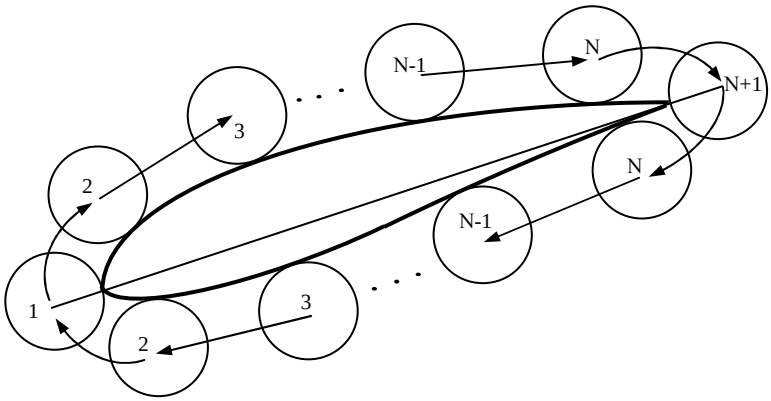
Σχήμα 2.57 Ωρολογιακή και ανθωρολογιακή κίνηση κοπτικού εργαλείου εκατέρωθεν του σημείου αλλαγής της μονοτονίας k κάτω χείλους τυπικής αεροτομής, με αρχικό σημείο το σημείο πρόσπτωσης και τελικό το σημείο εκφυγής



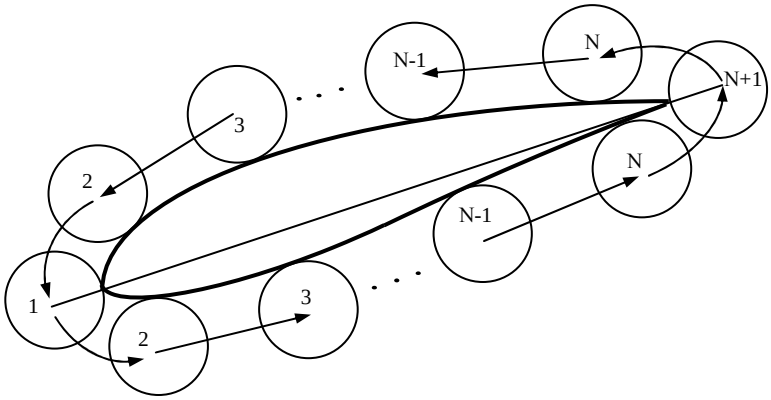
Σχήμα 2.58 Ανθωρολογιακή και ωρολογιακή κίνηση κοπτικού εργαλείου εκατέρωθεν του σημείου αλλαγής της μονοτονίας k κάτω χείλους τυπικής αεροτομής, με αρχικό σημείο το σημείο εκφυγής και τελικό το σημείο πρόσπτωσης

Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τροχιά πρέπει να ακολουθεί κάποιους κανόνες. Λαμβάνουμε δυο περιπτώσεις ανάλογα με το αν ο σχεδιαστής επιλέξει να πραγματοποιήσει κοπή με γραμμική παρεμβολή ή κοπή με κυκλική παρεμβολή. Και στις δυο περιπτώσεις όταν ο αριθμός της διαμέρισης αφορά το σημείο πρόσπτωσης και εκφυγής τότε στην περιοχή αυτή, δηλαδή +1 και -1 του α/α της διαμέρισης για το σημείο πρόσπτωσης και του σημείου εκφυγής αντίστοιχα για το άνω και κάτω χείλος, το κοπτικό πρέπει υποχρεωτικά να κάνει κυκλική παρεμβολή. Στην περίπτωση που γίνεται γραμμική παρεμβολή στα υπόλοιπα σημεία ο σχεδιαστής δεν χρειάζεται να ελέγξει καμπυλότητα. Αν γίνει όμως κυκλική παρεμβολή στην κοπή σε όλα τα άλλα σημεία τότε ο σχεδιαστής ελέγχει την καμπυλότητα και ανάλογα διαμορφώνει τις τιμές των εντολών G. Γενικά κρίνεται πιο σύντομο το εργαλείο να κόβει με μια κίνηση το προφίλ της αεροτομής, οπότε οι δυο κοπές, του άνω και κάτω χείλους πρέπει να συνδυαστούν. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι αντίστοιχες κινήσεις που πρέπει να κάνει το κοπτικό στην κοπή με γραμμική παρεμβολή και γενική ωρολογιακή φορά, σχήμα 2.59, με γενική ανθωρολογιακή φορά, σχήμα 2.60, κοπή με

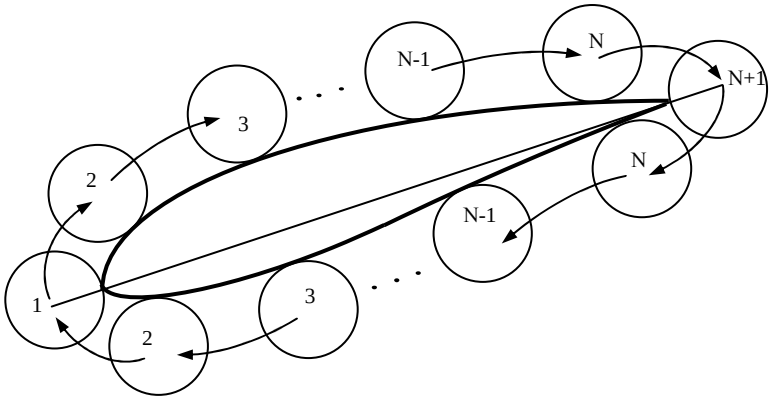
κυκλική παρεμβολή μεταξύ σημείων και γενική κοπή ωρολογιακής φοράς, σχήμα 2.61, και γενική κοπή ανθωρολογιακής φοράς, σχήμα 2.62.



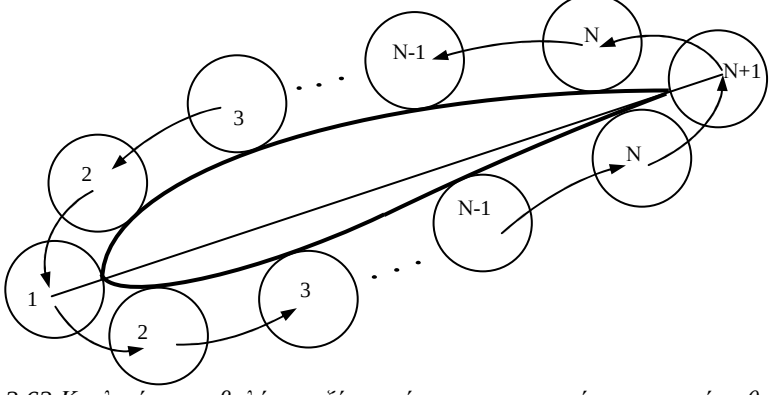
Σχήμα 2.59 Γραμμική παρεμβολή μεταξύ σημείων της αεροτομής και γενική ωρολογιακή φορά



Σχήμα 2.60 Γραμμική παρεμβολή μεταξύ σημείων της αεροτομής και γενική ανθωρολογιακή φορά

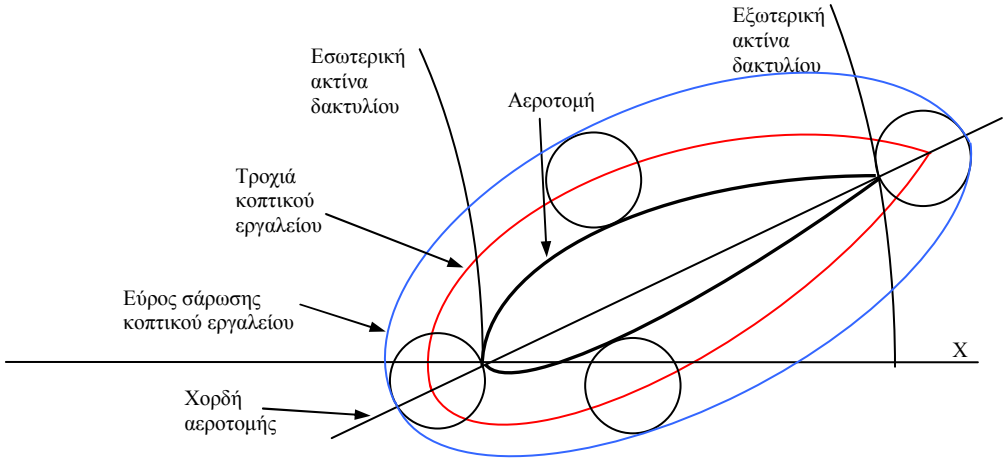


Σχήμα 2.61 Κυκλική παρεμβολή μεταξύ σημείων της αεροτομής και γενική ωρολογιακή φορά

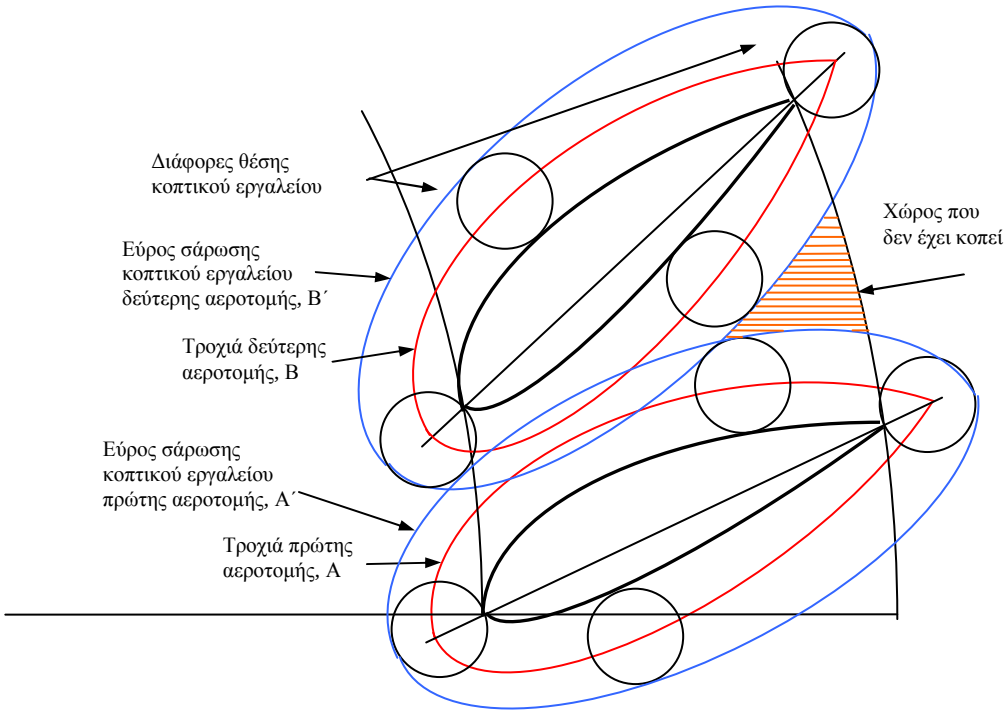


Σχήμα 2.62 Κυκλική παρεμβολή μεταξύ σημείων της αεροτομής και γενική ανθωρολογιακή φορά

Στη συνέχεια εξετάζεται ο χώρος που δημιουργείται από το εύρος του εργαλείου. Ο χώρος αυτός σχηματίζεται από την μια πλευρά ως το προφίλ της αεροτομής, και από την άλλη ως η πλευρά που απέχει κάθετα από το προφίλ της αεροτομής όσο η ακτίνα του εργαλείου, σχήμα 2.63. Πρόκειται δηλαδή για ένα offset της αεροτομής. Όμοια με τον έλεγχο των τροχιών, ο σχεδιαστής πρέπει γραφικά, και αφού έχει ολοκληρώσει τον έλεγχο με τις τροχιές, να εξετάσει αν το εύρος του εργαλείου βρίσκεται μέσα στον χώρο που θα δημιουργηθεί από το εύρος της δημιουργίας του αντίθετου χείλους της επόμενης αεροτομής και μέσα στις ακτίνες του δακτυλίου, σχήμα 2.64. Στην θεμιτή περίπτωση όπου τα σημεία του εύρους κατά την σάρωση για την δημιουργία του προφίλ του άνω χείλους της πρώτης αεροτομής βρίσκονται μέσα στο εύρος του εργαλείου κατά την σάρωση για την δημιουργία του προφίλ του κάτω χείλους της δεύτερης αεροτομής κ.ο.κ., ο σχεδιαστής δεν χρειάζεται να κάνει απολύτως τίποτα, επειδή δεν σχηματίζεται ενδιάμεσος χώρος μεταξύ των αεροτομών που δεν έχει κοπεί.

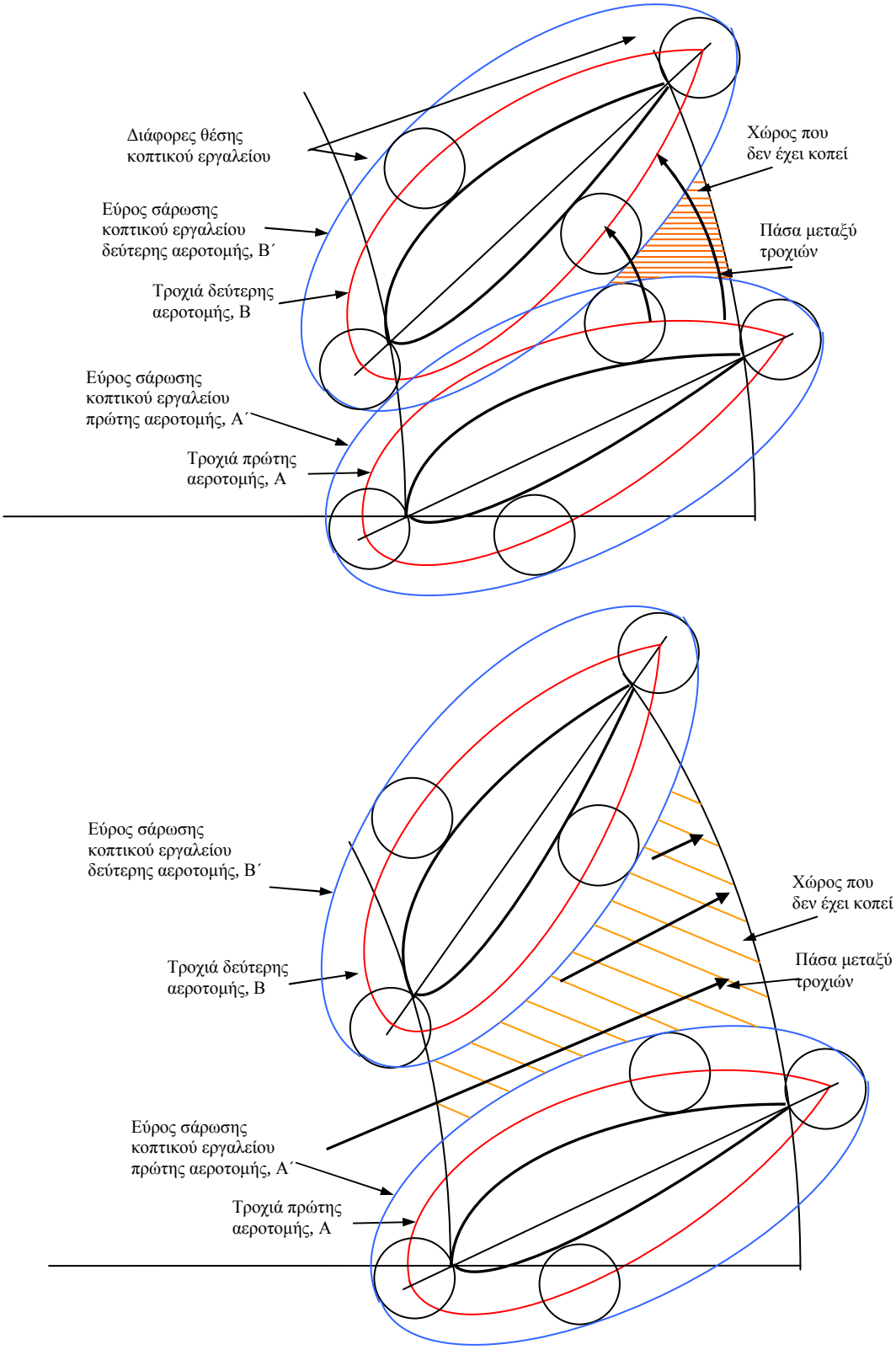


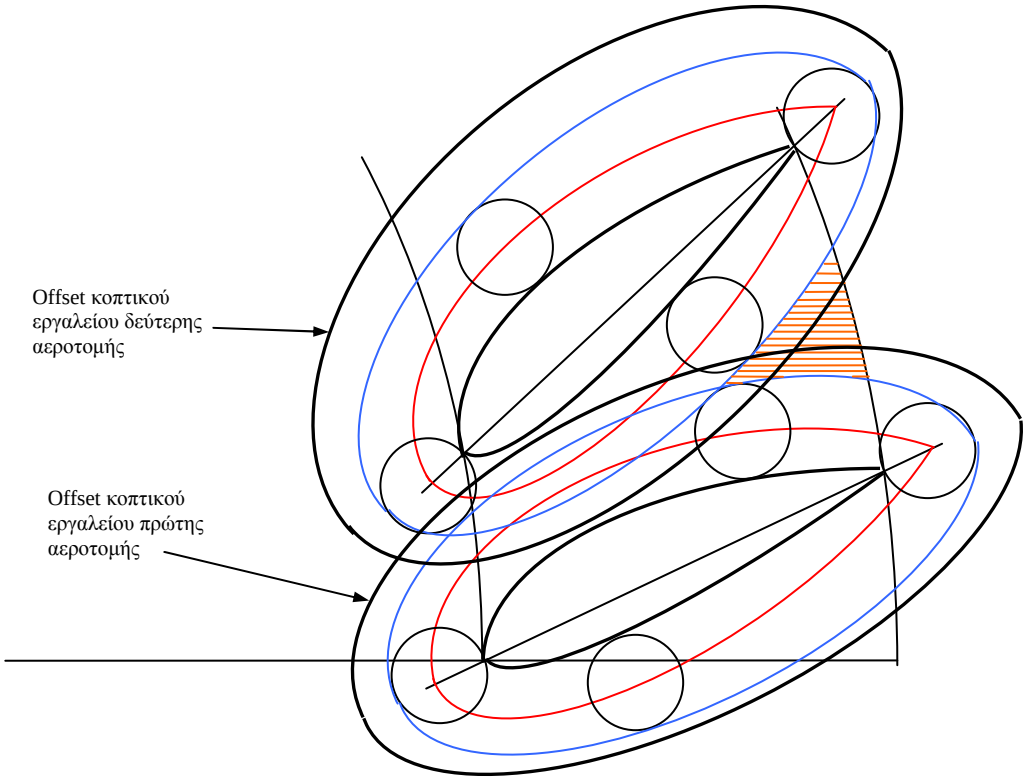
Σχήμα 2.63 Τροχιά και εύρος σάρωσης κοπτικού εργαλείου



Σχήμα 2.64 Έλεγχος τροχιάς και εύρους σάρωσης κοπτικού εργαλείου για δυο διαδοχικές αεροτομές.

Συνήθως όμως, προκύπτει γραφικά ότι δημιουργούνται χώροι μέσα στον χώρο του δακτυλίου όπου δεν έχουν κοπεί. Ο χώρος αυτός θα μπορούσε να κοπεί με κάποια πάσα από την τροχιά του άνω χείλους της πρώτης αεροτομής έως την τροχιά του κάτω χείλους της δεύτερης αεροτομής, σχήμα 2.65α.



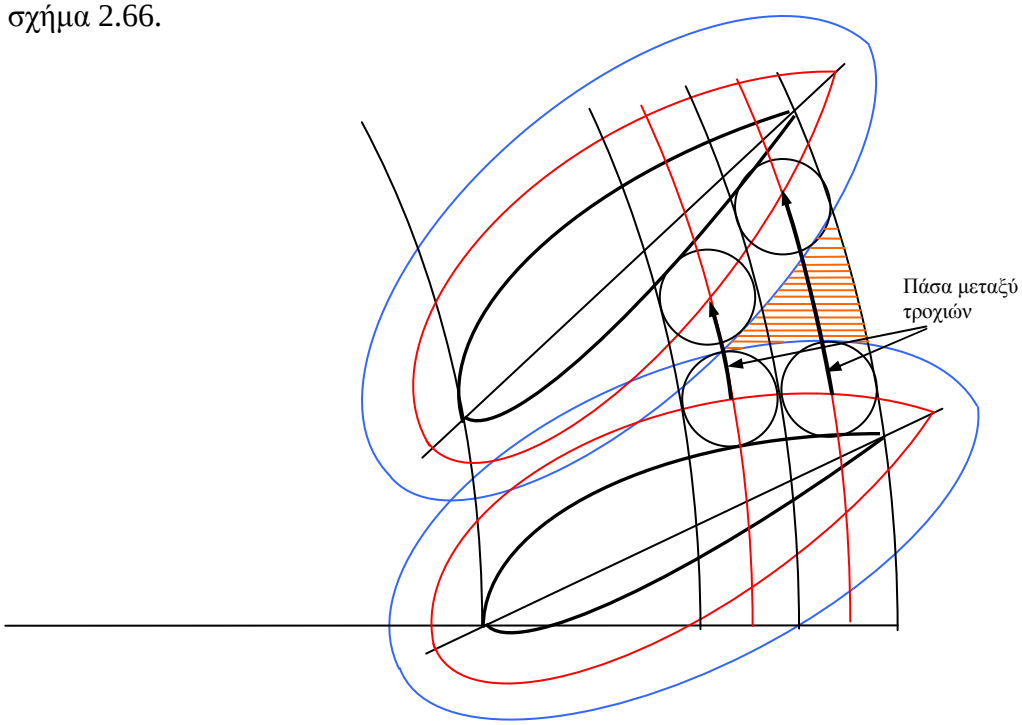


Σχήμα 2.65α,β,γ Τόποι πάσων μεταξύ τροχιών κοπτικού εργαλείου για δυο διαδοχικές αεροτομές.

Διαφορετικά, το κοπτικό θα μπορούσε να πραγματοποιήσει γραμμικές κινήσεις ακτινικά, με κέντρο το κέντρο του δακτυλίου, σχήμα 2.65β, εφόσον το προφίλ των αεροτομών το επιτρέπουν. Τέλος, μια άλλη εναλλακτική είναι η δημιουργία τροχιών το οποίο να είναι ένα offset των τροχιών. Στις δυο τελευταίες περιπτώσεις έχουμε ορισμένους περιορισμούς. Για την δεύτερη περίπτωση, όπου το κοπτικό θα πραγματοποιεί γραμμικές κινήσεις, ο χώρος που σχηματίζεται μεταξύ των αεροτομών μπορεί να μην είναι ενιαίος, οπότε και το εργαλείο να χρειάζεται να σηκωθεί μέχρι ενός ασφαλούς ύψους πάνω από το τεμάχιο και να συνεχίσει την κοπή με ακτινικό τρόπο στο άλλο μέρος του μη κατεργασμένου χώρου. Αυτό γενικά δεν είναι βολικό, διότι απαιτεί περισσότερες εντολές και υπολογισμό των σημείων μετάβασης, αρχή κοπής, σταματήματος κοπής, ανύψωσης του κοπτικού κτλ, που αφορούν συγκεκριμένη πτερύγωση. Επομένως, ο δεύτερος τρόπος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην γενικότητα των πτερυγώσεων. Στην τρίτη περίπτωση θεωρούμε ότι το κοπτικό θα πραγματοποιεί κοπές με αυξημένη ακτίνα από το προφίλ της αεροτομής. Και σε αυτή την περίπτωση, επειδή δεν γνωρίζουμε τις εξισώσεις των τροχιών για την δημιουργία των προφίλ των αεροτομών, είναι πολύ δύσκολο να καθορίσουμε τα σημεία στα οποία το κοπτικό πρέπει να σταματήσει για να πραγματοποιήσει τα συγκεκριμένα πάσα χωρίς να καταστρέψει το προφίλ των αεροτομών. Ακόμα και αυτό αν γινόταν, οι κανόνες για τις κοπές που θα καθιερωθούν δεν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην γενικότητα. Επομένως, περιορίζουμε τους τρόπους με τους οποίους θα κινηθούμε για τα πάσα μεταξύ των αεροτομών στην πρώτη περίπτωση. Αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στην γενική περίπτωση, αφού μπορεί να κόψει οποιοδήποτε χώρο μεταξύ των αεροτομών.

Ο σχεδιασμός της κοπής με ενδιάμεσα πάσα μπορεί να γίνει κατά την διάρκεια της κοπής του προφίλ της πτερύγωσης μειώνοντας έτσι τον χρόνο κατεργασίας κατά

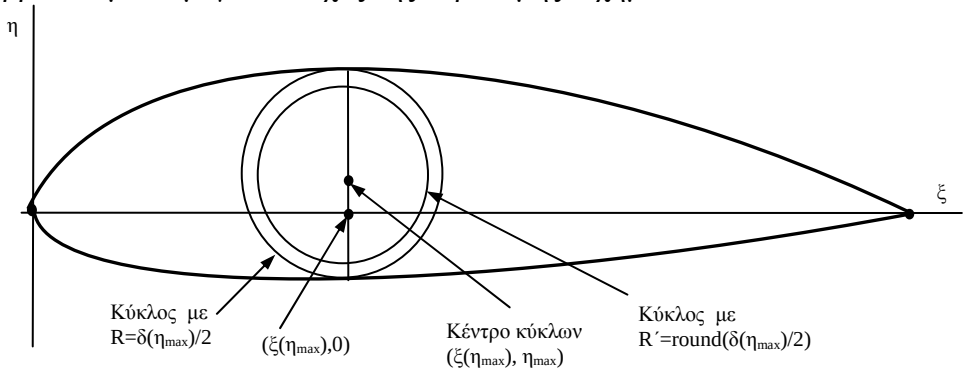
σημαντικό ποσοστό, δεδομένου ότι το κοπτικό δεν χρειάζεται να επανέρχεται σε κάθε πτερύγωση για να κόψει τον ακατέργαστο χώρο ύστερα από όλες τις κοπές του προφίλ των αεροτομών. Για να γίνει αυτό, ο σχεδιαστής δημιουργεί ομόκεντρους κύκλους με το κέντρο της πτερωτής και ακτίνες από την εσωτερική έως την εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου, ή αντίθετα, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει ο μικρότερος δυνατός αριθμός σε σχέση με την διάμετρο του εργαλείου. Μέρος αυτών των κύκλων θα αποτελέσουν κατά τόπους τις τροχιές του κοπτικού για την εκτέλεση των πάσων, σχήμα 2.66.



Σχήμα 2.66 Ομόκεντρα πάσα μεταξύ τροχιών κοπτικού εργαλείου για δυο διαδοχικές αεροτομές

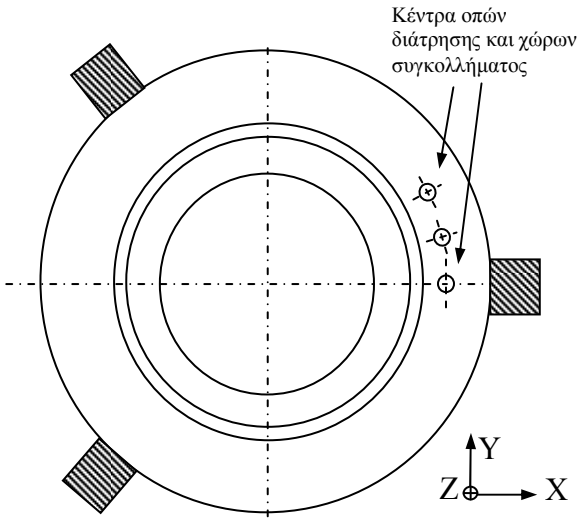
Είναι στην κρίση του σχεδιαστή κατά την διάρκεια δημιουργίας ποιου χείλους θα κάνει αυτά τα πάσα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται να εκτελεί τα πάσα κατά την δημιουργία των άνω χειλών. Τα σημεία που τέμνουν οι κύκλοι των πάσων την τροχιά του άνω χείλους είναι εν δυνάμει αρχές των πάσων. Το ποια θα είναι αυτά τα σημεία ορίζεται πάλι γραφικά από τον σχεδιαστή, ώστε να επιλέξει το βέλτιστο αριθμό πάσων ώστε να εξαλειφθούν όλοι οι χώροι που δεν έχουν κοπεί.

Όσον αφορά την δημιουργία των πείρων συγκράτησης και των οπών, γνωρίζοντας τις αδιαστατοποιημένες συναρτήσεις του άνω και κάτω χείλους της αεροτομής βρίσκουμε το μέγιστο πάχος της αεροτομής, σχήμα 2.67.



Σχήμα 2.67 Κέντρο πείρου και ακτίνα πείρου σε σχέση με την αδιάστατη αεροτομή

Στρογγυλεύοντας αυτόν τον αριθμό με δυο σημαντικά ψηφιά ορίζουμε την διάμετρο του πείρου. Το κέντρο του είναι το αντίστοιχο ξ στην αδιαστατοποιημένη του μορφή της αεροτομής, ενώ όταν αυτή μεγεθυνθεί, μετατοπιστεί ή/και περιστραφεί βρίσκεται με τους αντιστοίχους πίνακες μεταφοράς μεγέθυνσης και περιστροφής. Αυτά τα κέντρα είναι τα κέντρα των οπών διάτρησης και δημιουργίας των χώρων για την συγκόλληση. Επομένως, ο άνω δακτύλιος έχει παραμετροποιηθεί επιτυχώς.



Σχήμα 2.68 Κάτοψη άνω δακτυλίου και κέντρα οπών διάτρησης και χώρων συγκόλλησης

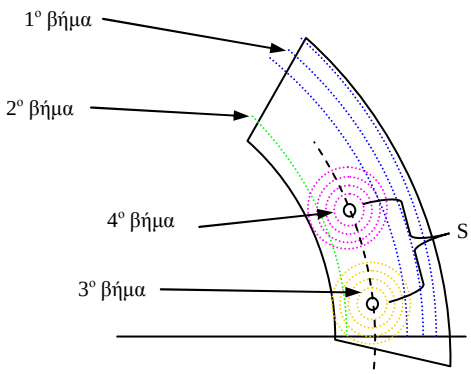
Ο σχεδιαστής μπορεί εναλλακτικά να υπολογίσει την απόσταση από το κέντρο του άνω δακτυλίου και να επαναλάβει την διάτρηση και το φρεζάρισμα όσες φορές είναι τα πτερύγια αποδεσμεύοντας την διαδικασία από την αρχική γωνία του κέντρου της οπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.68. Σε κάθε περίπτωση, αν δεν θέλει να ακολουθήσει αυτή την διαδικασία μπορεί να τοποθετήσει τα κέντρα των οπών και των πείρων στο σημείο πίεσης της αεροτομής, που όπως αναφέρθηκε μπορεί να μειώσει την ισοδύναμη τάση λόγω μηδενικής ροπής, αλλά θα χρειαστεί να βρει το πάχος της αεροτομής σε αυτό το σημείο και να αλλάξει την διάμετρο του τρυπανιού. Αυτό ισχύει και για τις θέσεις των πείρων συγκράτησης στον κάτω δακτύλιο.

Για την δημιουργία των πείρων συγκράτησης στον κάτω δακτύλιο δεν μπορούμε να αποδεσμευτούμε από την αρχική γωνία που ορίζει το πρώτο κέντρο των πείρων αυξανομένου τον αριθμό των πτερυγίων καθώς χρειάζεται σε κατώτερο επίπεδο από τους πείρους να σχηματιστούν οι αεροτομές. Δεν μπορεί να γίνει δηλαδή περιστροφή του συστήματος συντεταγμένων, όπως έγινε στον άνω δακτύλιο, διότι όλες οι συντεταγμένες έχουν δημιουργηθεί κατά τρόπο που είναι συνυφασμένος με το σύστημα συντεταγμένων του κάτω δακτυλίου. Αρχικά το κοπτικό θα πραγματοποιήσει ομόκεντρους κύκλους σε σχέση με την αρχή των αξόνων με εύρος ακτινών από την εσωτερική ακτίνα έως εσωτερικό σημείο της τροχιάς του πείρου και από το εξωτερικό σημείο της τροχιάς του πείρου έως την εξωτερική ακτίνα. Με αυτή την τεχνική εξασφαλίζεται ότι όλος ο χώρος εκτός του δακτυλίου των πείρων κόβεται. Είναι επίσης ευνόητο ότι οι κοπές αυτές γίνονται για κάθε ύψος όπως αυτό ορίζεται παραμετρικά από το βάθος κοπής του εργαλείου και της γεωμετρίας της πτερύγωσης. Στην συνέχεια γίνεται η κοπή των πείρων.

Για την συγκεκριμένη ακτίνα που θα βρίσκονται τα κέντρα υπολογίζεται η απόσταση των κέντρων των πείρων. Το κοπτικό θα πραγματοποιήσει ομόκεντρους

κύκλους γύρω από το κέντρο των πείρων με ακτίνες πολλαπλάσιες της ακτίνας του εργαλείου με εύρος την ακτίνα που θα καλύπτει άνω του μισού της απόστασης των δυο κέντρων των πείρων, μέχρι την ακτίνα που ορίζεται από την τροχιά της δημιουργίας του πείρου. Προς ασφάλεια αυτή το εύρος των ακτινών μπορεί να καλύπτει μεγαλύτερο μέρος από αυτό του μισού της απόστασης των δυο κέντρων δυο πείρων, όχι όμως μεγαλύτερο από το εύρος που ορίζεται από τις τροχιές του κοπτικού για την δημιουργία των πείρων. Στην κατασκευή μας επιλέξαμε το 0,75 της απόστασης των κέντρων και εφόσον ισχύει ο τελευταίος περιορισμός ώστε να μην κοπεί άθελα μέρος του πείρου. Αυτό γίνεται σε όλους τους πείρους των αεροτομών. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διάμετρος του πείρου δεν είναι η ίδια με την διάμετρο της οπής, άλλα λίγο μικρότερη ώστε να γίνει εφικτή η συναρμογή. Επιλέγεται η διάμετρος αυτή να είναι κατά 0,1mm μικρότερη της διαμέτρου της οπής.

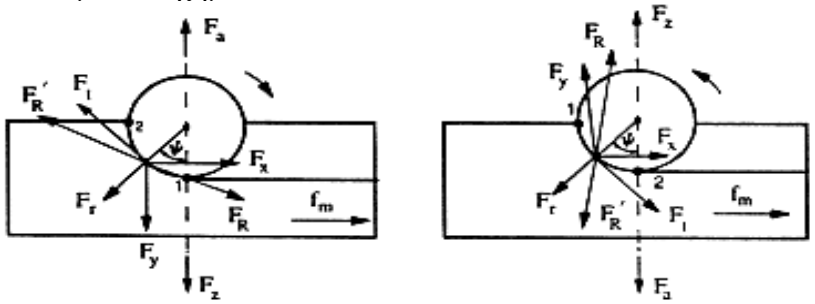
Στο επόμενο σχήμα 2.69, και με βάσει την ανωτέρω επεξήγηση, γίνονται πρώτα οι κοπές (1) καθ'ύψος, και στη συνέχεια γίνονται οι κύκλοι μειούμενης ακτίνας από το 0,75 της S, προς τα κέντρα των πείρων, έως την ακτίνα κατά 0,1mm μικρότερη της διαμέτρου της οπής.



Γίνονται πρώτα οι μπλε τροχιές μειούμενης ακτίνας από την εξωτερική ακτίνα. Το εργαλείο ανασηκώνεται και αυξανομένης της ακτίνας πραγματοποιεί τις κοπές της πράσινης τροχιάς. Στην συνέχεια, γίνονται ομόκεντροι κύκλοι της κίτρινης τροχιάς, μειούμενης ακτίνας, αρχής γενομένης από ακτίνα όσο το 0,75S, έως την ακτίνα της δημιουργίας του πείρου. Αυτό γίνεται καθ'ύψος και δημιουργείται ο πρώτος πείρος. Τέλος, το κοπτικό συνεχίζει την κοπή στον δεύτερο πείρο, την μοβ τροχιά, κάνοντας ακριβώς τις ίδιες ενέργειες, όπως στην δημιουργία του πρώτου.

Σχήμα 2.69 Καθορισμός κοπών για την δημιουργία των πείρων συγκράτησης

Οι βασικές σκέψεις και ενέργειες που πρέπει να γίνουν έχουν αναφερθεί. Ωστόσο η ανάπτυξη των ανωτέρων ενεργειών έγινε με γνώμονα την χρήση ενός μόνο εργαλείου. Αυτό καθιστά ότι οι τροχιές του εργαλείου θα ορίζουν με μια μόνο διεργασία τις τελικές γεωμετρίες, γεγονός που δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη. Ο λόγος για τον οποίο πρέπει οριστούν και άλλες διεργασίες, όπως τουλάχιστον αυτή της αποπεράτωσης είναι ότι στην κατασκευή μας υπάρχουν πολλά σημεία τα οποία έχουν πολύ μικρό πάχος. Ως μια από τις αρχές στην κατεργασία των μηχανικών κοπών είναι ότι για να γίνει σωστά μια κοπή σε ένα τεμάχιο οι δυνάμεις που εμφανίζονται σε αυτό πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να παραληφθούν από το υλικό που απομένει, σχήμα 2.70.



Σχήμα 2.70 Παραλαβή δύναμης $F_{R'}$ από το τεμάχιο, σε αντίρροπο και ομόρροπο φρεζάρισμα

Αν στο μέρος που πρόκειται να γίνει η κοπή το υλικό δεν έχει επαρκές πάχος τότε θα γίνει ‘μάσηση’ του υλικού, διότι τοπικά το πάχος του υλικού δεν μπορεί να αντέξει τις δυνάμεις κοπής με αποτέλεσμα περισσότερο υλικό από αυτό που είναι επιθυμητό αποκόπτεται και παρασύρεται από το κοπτικό προκαλώντας την καταστροφή γεωμετρίας της αεροτομής. Αυτό το πρόβλημα υπάρχει στο σημείο εκφυγής των πτερυγίων. Για αυτό το πρόβλημα έχει γίνει ανάπτυξη τριών διεργασιών, αυτό της κοπής, της ημι-αποπεράτωσης και της αποπεράτωσης. Κατά την κοπή το κοπτικό εκτελεί τροχιά γύρω από πτερύγωση που έχει υπολογιστεί με αντίστοιχο offset της ιδανικής τροχιάς με απόσταση 0,5mm και την ακτίνα του εργαλείου κοπής, κατά την ημι-αποπεράτωση 0,2mm και την ακτίνα του εργαλείου κοπής. Κατά την αποπεράτωση είναι ευνόητο ότι το offset της τροχιάς του εργαλείου σε σχέση με αυτό της αεροτομής θα είναι όσο η διάμετρος του εργαλείου αποπεράτωσης. Με αυτό τον τρόπο γίνεται βαθμιαία μείωση του πάχους του πτερυγίου και με άλλα βάθη κοπής. Επιπλέον, κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης και της αποπεράτωσης πρέπει να δοθεί βάση στο τρόπο φρεζαρίσματος ώστε να παραλαμβάνονται όσο το δυνατόν πιο ομαλά τα φορτία από το εναπομείναν υλικό του πτερυγίου, γι’αυτό προτιμάται το αντίρροπο φρεζάρισμα στην περίπτωση της γενικής ωρολογιακής κοπής του προφίλ, ενώ ομόρροπο στην περίπτωση της γενικής ανθωρολογιακής κοπής. Επίσης, κατά την φάση της αποπεράτωσης ως καλύτερος τρόπος ελέγχου για την ανεπιθύμητη θραύση του πτερυγίου μειώνουμε δραστικά την πρόωση του κοπτικού, ώστε να αναπτύσσονται όσο το δυνατό μικρότερες δυνάμεις. Ο σχεδιαστής πρέπει να μειώσει την πρόωση πέρα από έναν αύξοντα αριθμό της διαμέρισης κατά την κοπή του άνω και κάτω χείλους, όταν το πάχος του αποβλήτου γίνεται περίπου ίσο με το πάχος του εναπομείναντος υλικού. Μπορούμε να ελέγξουμε το πάχος στην αδιάστατη αεροτομή, να το διαστατοποιήσουμε στην τελική του μορφή και όταν το πάχος κοπής είναι μεγαλύτερο από το πάχος της αεροτομής τότε να μειώνεται η πρόωση.

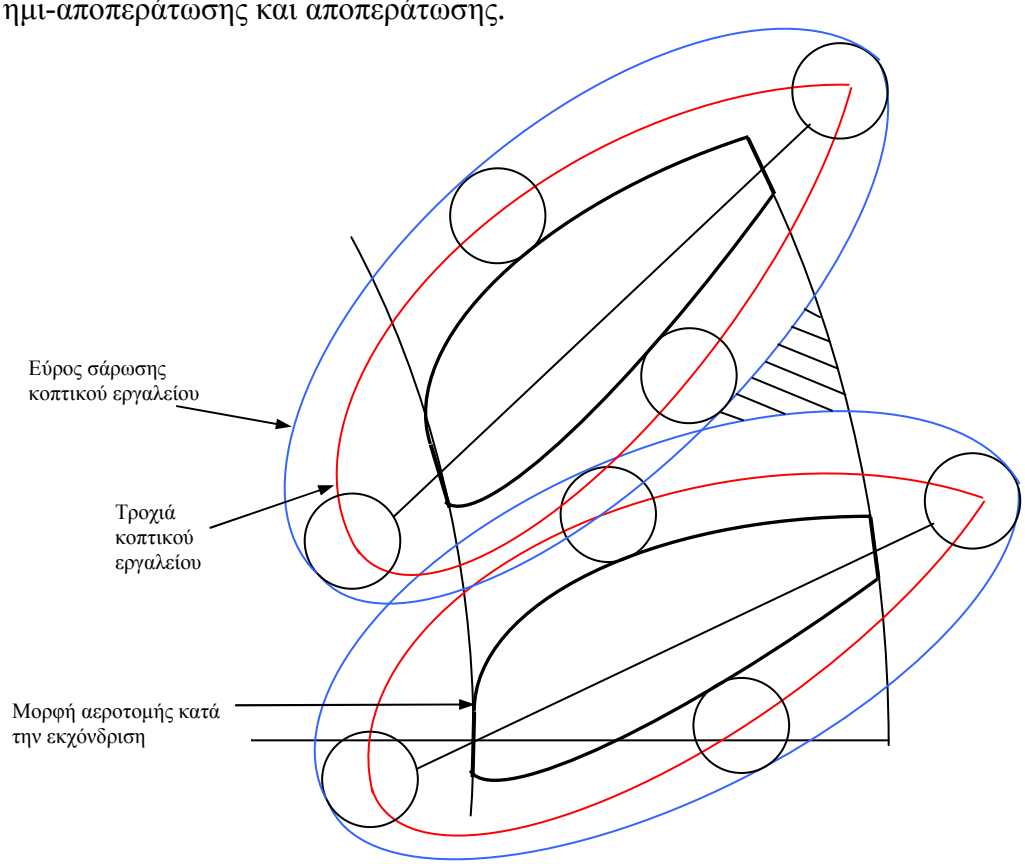
Όσον αφορά τις τροχιές, αποφασίζεται ότι κατά την φάση της εκχόνδρισης θα χρησιμοποιηθεί εργαλείο εκχόνδρισης, ενώ κατά την ημι-αποπεράτωση και αποπεράτωση θα χρησιμοποιηθεί το εργαλείο αποπεράτωσης. Οι γενικές φάσεις των κινήσεων είναι ίδιες και για τα δυο εργαλεία, ωστόσο ο έλεγχος για τις τροχιές διαφέρει, αφού διαφορετικές είναι οι τροχιές εκχόνδρισης από της ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης γύρω από το πτερύγιο. Ο σχεδιαστής τότε πρέπει να εισάγει την απόσταση που θα κινείται το κέντρο του εργαλείου γύρω από την ακτίνα και τότε μπορεί να ελέγξει γραφικά τους χώρους που αναφέρθηκαν στο πρόγραμμα excel.

Φτιάχνοντας μια μεθοδολογία για τις κοπές γύρω από την αεροτομή έχουμε:

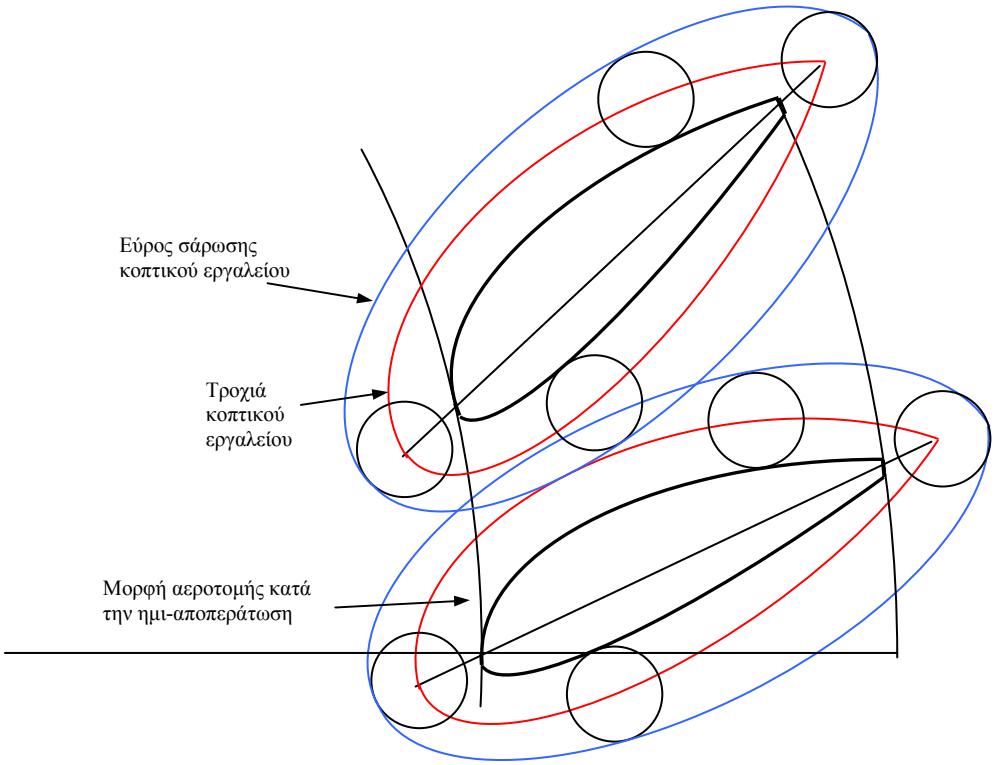
1. Φτιάχνουμε το προφίλ της αεροτομής
2. Φτιάχνουμε τις ακτίνες και τις τροχιές για την δημιουργία των πείρων
3. Ελέγχουμε τις τροχιές για την φάση της εκχόνδρισης, σχήμα 2.71
4. Ελέγχουμε τα εύρη σάρωσης για την φάση της εκχόνδρισης, σχήμα 2.71
5. Φτιάχνουμε τα αναγκαία πάσα μεταξύ των αεροτομών για την εκχόνδριση
6. Ελέγχουμε τις τροχιές για την φάση της ημι-αποπεράτωσης, σχήμα 2.72
7. Ελέγχουμε τις τροχιές για την φάση της αποπεράτωσης, σχήμα 2.73
8. Φτιάχνουμε τα αναγκαία πάσα μεταξύ των αεροτομών για την αποπεράτωση

Τα βήματα 6 και 7 δεν είναι αναγκαίο να γίνουν, αφού χρησιμοποιούνται ακτίνα εργαλείου μικρότερη από αυτό της φάσης της εκχόνδρισης. Αυτό, όμως, δεν ενδείκνυται, αφού ο σχεδιαστής πρέπει να έχει πλήρη εποπτεία των τροχιών και των συνιστωσών που, εν γένει, πρόκειται να επηρεάσουν την διαδικασία κατασκευής. Με αυτόν το τρόπο, τον εκτενή έλεγχο των τροχιών και των εύρων σάρωσης, ο

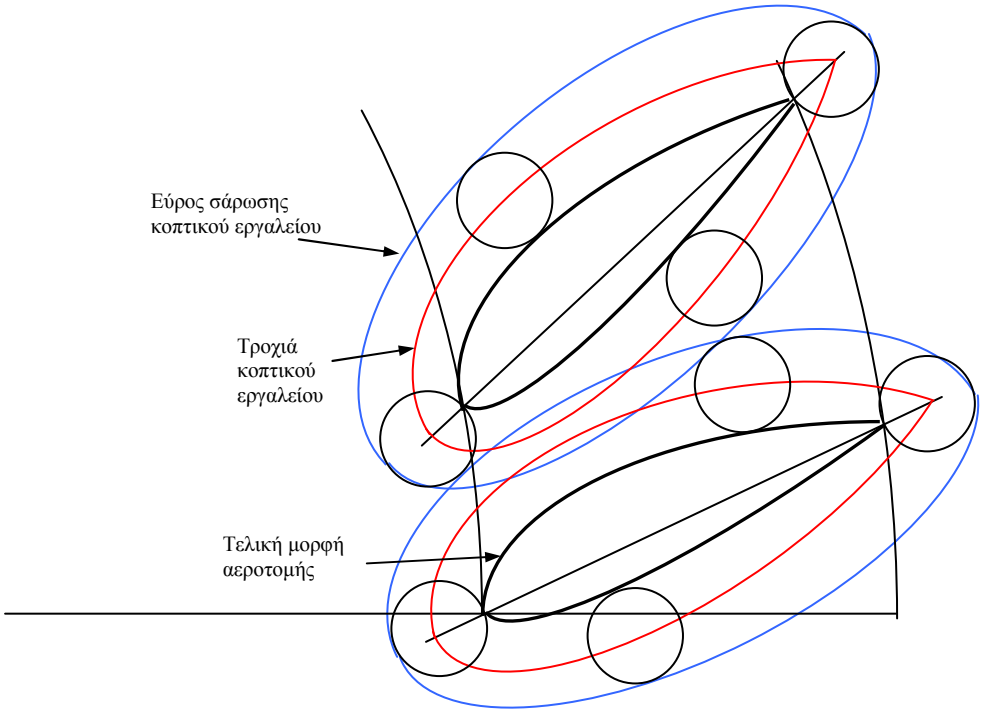
σχεδιαστής παρατηρεί αν έχει γίνει κάποιο λάθος σε όλη την ροή των υπολογισμών. Προς βεβαίωση όλων αυτών, μπορεί να ελέγξει και τα εύρη σάρωσης στις φάσεις της ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης.



Σχήμα 2.71 Έλεγχος τροχιών και εύρων σάρωσης κατά την φάση της εκχόνδρισης



Σχήμα 2.72 Έλεγχος τροχιών και εύρων σάρωσης κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης



Σχήμα 2.73 Έλεγχος τροχιών και εύρων σάρωσης κατά την φάση της αποπεράτωσης

Τελικά και ο κάτω δακτύλιος έχει παραμετροποιηθεί και έγινε εφικτό να παραμετροποιηθούν όλες οι κινήσεις του κοπτικού κατά την κατασκευή του και στο κέντρο κατεργασιών.

Όλες οι τροχιές αφού ελεγχθούν και τροποποιηθούν ώστε να είναι αναγνώσιμες από στο συντακτικό των εντολών του G κώδικα (συντεταγμένες σημείων, ακτίνες, επιλεγμένες προώσεις στροφές και εργαλεία) εξάγονται σε αρχεία .txt τα οποία αφορούν συγκεκριμένα σεταρίσματα και συγκεκριμένες διεργασίες (της εκχόνδρισης, της ημι-αποπεράτωσης και της αποπεράτωσης). Ένα πρόβλημα που χρήζει αντιμετώπισης είναι αυτό της υποδιαστολής. Το αρχείο excel που έχουμε ως βάση για τον έλεγχο των τροχιών αναφέρει τα δεκαδικά ψηφία ενός πραγματικού αριθμού με υποδιαστολή, ενώ για την εισαγωγή αυτών των τιμών στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab οι τιμές αυτές πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να γίνεται η δήλωση του αριθμού με την χρήση της τελείας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα script στο περιβάλλον της Matlab το οποίο να πραγματοποιεί αυτή την μετατροπή.

2.4.6 Τεχνική και οικονομική αξιολόγηση της κατασκευής

Κατά γενική ομολογία, δυο είναι τα μεγέθη που απασχολούν στην αξιολόγηση της κατασκευής, η τεχνική και η οικονομική αξιολόγηση.

Στην τεχνική αξιολόγηση της κατασκευής αφορούν θέματα της ακρίβειας της κατασκευής, ώστε να εκπληρώνει συγκεκριμένες απαιτήσεις, που θέτει είτε ο σχεδιαστής, είτε η διοίκηση της παραγωγικής μονάδας. Διακρίνονται δυο παράγοντες για την ακρίβεια της κατεργασίας. Αυτοί που εκφράζονται βάσει των συστηματικών σφαλμάτων των κατεργασιών και αυτή των σφαλμάτων, λόγω της προσέγγισης κατά την φάση του σχεδιασμού. Προσεγγιστικές μέθοδοι έγιναν κατά την εύρεση των συναρτήσεων της αεροτομής και κατά την φάση της κίνησης του κοπτικού στην δημιουργία των πτερυγίων. Τα σφάλματα που εισάγονται στο τελικό αντικείμενο

είναι υπολογίσιμα και σε κάθε περίπτωση αυτά είναι μικρότερα την αντίστοιχη ακρίβεια που είναι επιτεύξιμη από τις μηχανές. Έχοντας μια εικόνα για την τάξη μεγέθους των ανωτέρω, αναφέρουμε ότι στην περίπτωση του κέντρου κατεργασιών και του κέντρου τόρνευσης ο αριθμός δεκαδικών ψηφίων των συντεταγμένων που μπορεί να αναγνωριστεί, άρα και η τάξη μεγέθους των σφαλμάτων είναι 10^{-3}mm, ενώ οι προσεγγίσεις δίνουν σφάλμα τάξης 10^{-7}mm.

Μεγέθη που επηρεάζουν, επιπλέον, την ακρίβεια είναι οι ταλαντώσεις των μηχανικών μερών της κατεργασίας (η μηχανή ή το εργαλείο), η επιλογή των συνθηκών κοπής (βάθος κοπής και προώσεις, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία των αυτοσυντηρούμενων ταλαντώσεων) κτλ.

Στην οικονομική αξιολόγηση της κατασκευής υπεισέρχονται οι χρόνοι σεταρισμάτων, οι συνολικοί χρόνοι των κατεργασιών στις μηχανές CNC και της συγκόλλησης, οι χρόνοι προετοιμασίας μηχανών και της μεταφοράς των τεμαχίων στην αποθήκευση.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν, της χρήσης των εργαλείων, του κόστους λειτουργίας των μηχανών και του κόστος συγκολλήσεων. Έχοντας γνώση του συνολικού κόστους της κατασκευής με την υπάρχουσα διαδικασία της χύτευσης και του κόστους του παρόντος τρόπου παραγωγής μπορεί να διαπιστωθεί αν γίνεται απόσβεση, αν συμφέρει δηλαδή η επιλογή της συγκεκριμένης διαδικασίας. Η ανωτέρω αξιολόγηση βασίζεται στην έννοια της ποιότητας του αντικειμένου και αφορά την στρατηγική που ακολουθείται από την διοίκηση της εταιρείας.

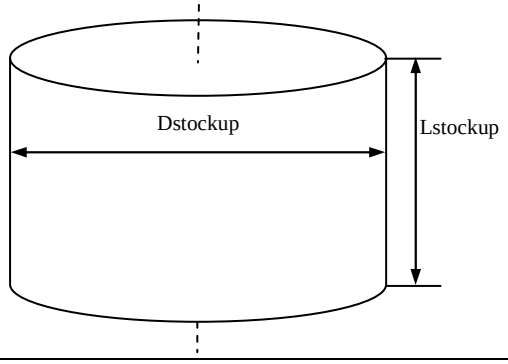
3

Σχεδίαση κατεργασιών

3.1 Στοιχεία παραμετροποίησης αρχικών και τελικών τεμαχίων

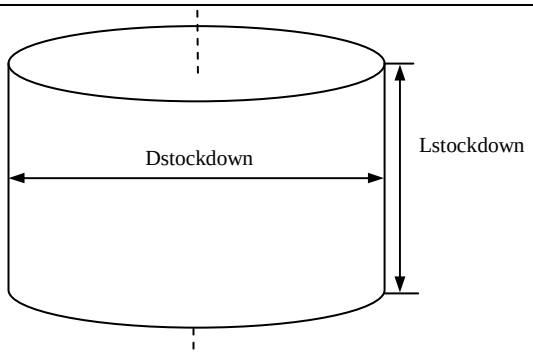
Σε πρώτη φάση, χρειάζεται να παραμετροποιήσουμε τα αρχικά και τελικά τεμάχια. Αυτό είναι εφικτό για όλες τις κατεργασίες που θα γίνουν στον τόρνο, ενώ για το κέντρο κατεργασιών η παραμετροποίηση γίνεται με την βοήθεια αρχείου excel, στο οποίο σχεδιάζονται οι αεροτομές. Δίνοντας στις μηχανές τους γεωμετρικούς τόπους έναρξης όλων των ενεργειών κοπής, τις οδηγούμε στο να κατασκευάσουν αντικείμενα τα οποία θα συμπίπτουν με τους τελικούς γεωμετρικούς τόπους. Εντούτοις, επειδή έχει επιλεχθεί να γίνει αποπεράτωση στην κατασκευή, χρειάζεται να παραμετροποιήσουμε και την γεωμετρία του τεμαχίου προ αυτής της φάσης.

Έχουμε λοιπόν για το stock model του άνω δακτυλίου:

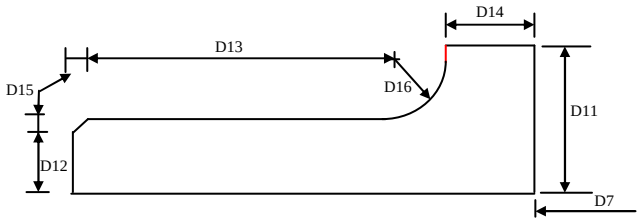


Διάμετρος: Dstockup
Μήκος: Lstockup
Σχόλια: Οι διαστάσεις του πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές του τελικού άνω δακτυλίου.

Για το stock model του κάτω δακτυλίου:

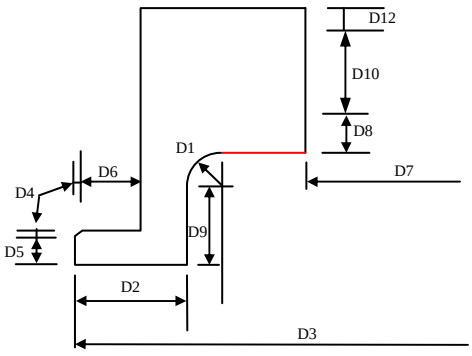
	<u>Διάμετρος:</u> Dstockdown <u>Μήκος:</u> Lstockdown <u>Σχόλια:</u> Οι διαστάσεις του πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές του τελικού άνω δακτυλίου.

Για το τελικό τεμάχιο του άνω δακτυλίου ύστερα από την κατεργασία της τόρνευσης:

	<u>Σχόλια:</u> Για αποφυγή του υπερορισμού της γεωμετρίας επιλέγουμε να μην παραμετροποιηθεί με άμεσο τρόπο η διάσταση με το κόκκινο χρώμα. Αυτή η επιλογή βεβαίως μπορεί να αλλάξει και να αναφέρεται σε άλλη διάσταση.

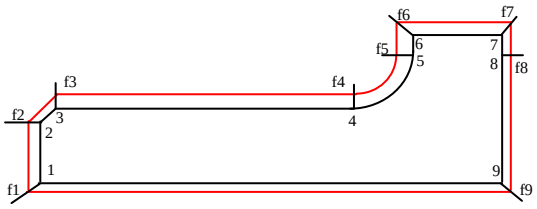
Η εξωτερική ακτίνα του άνω δακτυλίου είναι η ίδια με αυτή του κάτω δακτυλίου, επομένως δεν χρειάζεται να οριστεί αντίστοιχο μέγεθος στον άνω δακτύλιο. Στον κάτω δακτύλιο αυτή ορίζεται, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, ως D3-D4-D6.

Έχουμε για το τελικό τεμάχιο του κάτω δακτυλίου ύστερα από την κατεργασία της τόρνευσης:

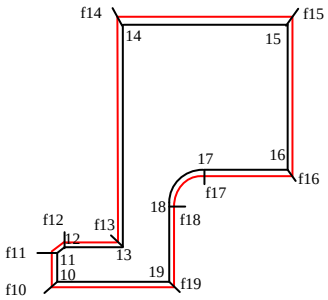
	<u>Σχόλια:</u> Για αποφυγή του υπερορισμού της γεωμετρίας επιλέγουμε να μην παραμετροποιηθεί με άμεσο τρόπο η διάσταση με το κόκκινο χρώμα. Αυτή η επιλογή βεβαίως μπορεί να αλλάξει και να αναφέρεται σε άλλη διάσταση.

Για την παραμετροποίηση των γεωμετριών των δυο τεμαχίων πριν από την φάση της αποπεράτωσης, αριθμούμε τα σημεία της κατασκευής μας και φτιάχνουμε το αντίστοιχο offset.

Έχουμε για το τεμάχιο του άνω δακτυλίου πριν την αποπεράτωση:

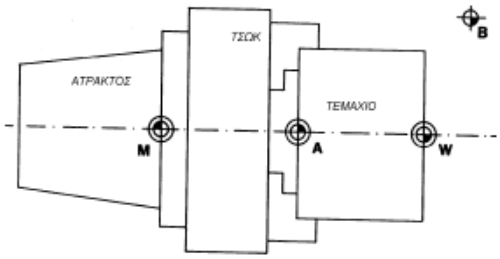
	Σχόλια: Δημιουργούμε ένα offset του άνω δακτυλίου αυξάνοντας τις διαστάσεις, από (x,y) σε (xf,yf), όπως φαίνεται για κάθε σημείο, ώστε οι κοπές της εκχόνδρισης να φτάσουν μέχρι το συγκεκριμένο offset (κόκκινο προφίλ) από την κοπή του αρχικού stock model. Κατά την αποπεράτωση το κοπτικό θα φτάσει μέχρι τις διαστάσεις (x,y) του τελικού τεμαχίου (μαύρο προφίλ).

Ενώ, για το τεμάχιο κάτω δακτυλίου πριν την αποπεράτωση έχουμε ότι:

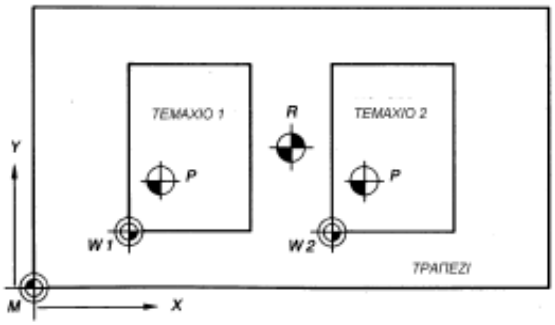
	Σχόλια: Δημιουργούμε ένα offset του άνω δακτυλίου αυξάνοντας τις διαστάσεις, από (x,y) σε (xf,yf), όπως φαίνεται για κάθε σημείο, ώστε οι κοπές της εκχόνδρισης να φτάσουν μέχρι το συγκεκριμένο offset (κόκκινο προφίλ) από την κοπή του αρχικού stock model. Κατά την αποπεράτωση το κοπτικό θα φτάσει μέχρι τις διαστάσεις (x,y) του τελικού τεμαχίου (μαύρο προφίλ).

3.2 Σεταρίσματα

Γενικά, οι εργαλειομηχανές CNC έχουν τα εξής βασικά συστήματα συντεταγμένων: Το σύστημα συντεταγμένων της μηχανής (M), το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς (R), όταν το (M) δεν είναι φυσικά προσπελάσιμο και τα οριζόμενα από τον χρήστη σύστημα συντεταγμένων τεμαχίου (W), και του προγράμματος (P). Στο σχήμα 3.1 φαίνονται τα συστήματα συντεταγμένων σε ένα κέντρο τόρνευσης και στο σχήμα 3.2 σε ένα κέντρο κατεργασιών. Επίσης, αναφέρεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε απόλυτες μονάδες, είτε βηματικές μονάδες σε αυτά τα συστήματα. Σε όλη την εφαρμογή της παρούσας έγινε η επιλογή απόλυτων μονάδων.

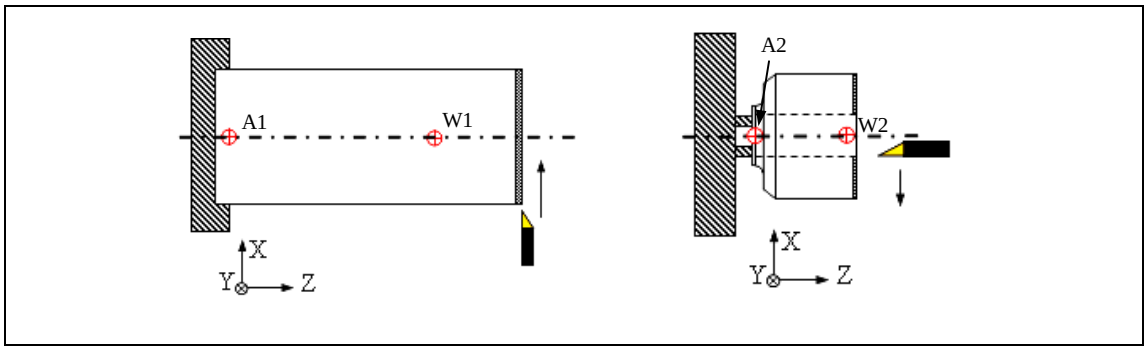


Σχήμα 3.1 Συστήματα συντεταγμένων κέντρου τόρνευσης

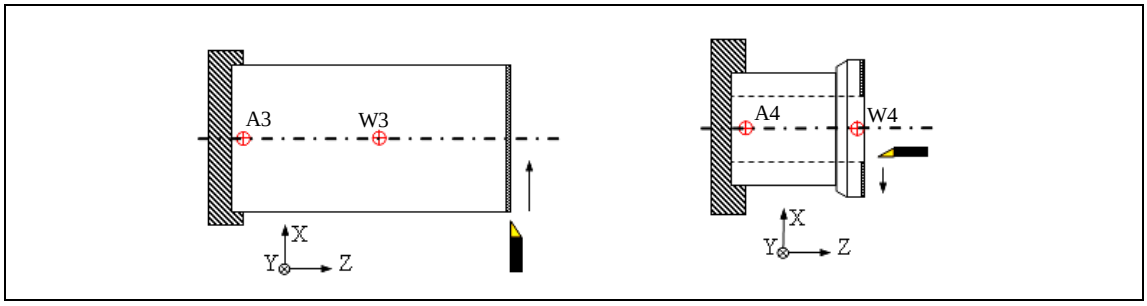


Σχήμα 3.2 Συστήματα συντεταγμένων κέντρου κατεργασιών

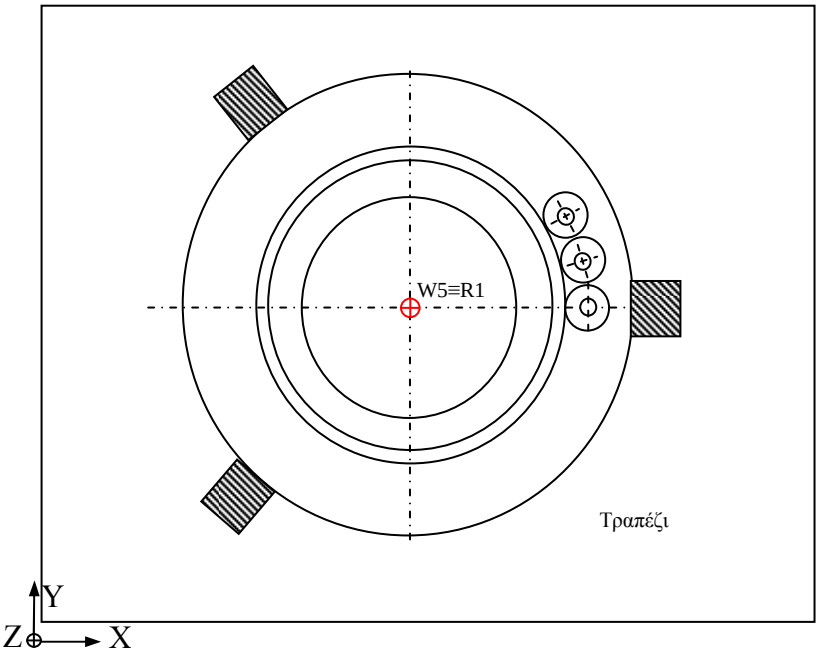
Με βάση τα ανωτέρω, χρειαζόμαστε δυο σεταρίσματα για κάθε τεμάχιο στο κέντρο τόρνευσης και ένα για το κέντρο κατεργασιών. Άρα, θα χρησιμοποιήσουμε τέσσερα συστήματα (W) στο κέντρο τόρνευσης για τα δυο σεταρίσματα σε κάθε δακτύλιο και δυο συστήματα συντεταγμένων (R)≡(W) στο κέντρο κατεργασιών σε κάθε δακτύλιο, σχήματα 3.2 έως 3.6.



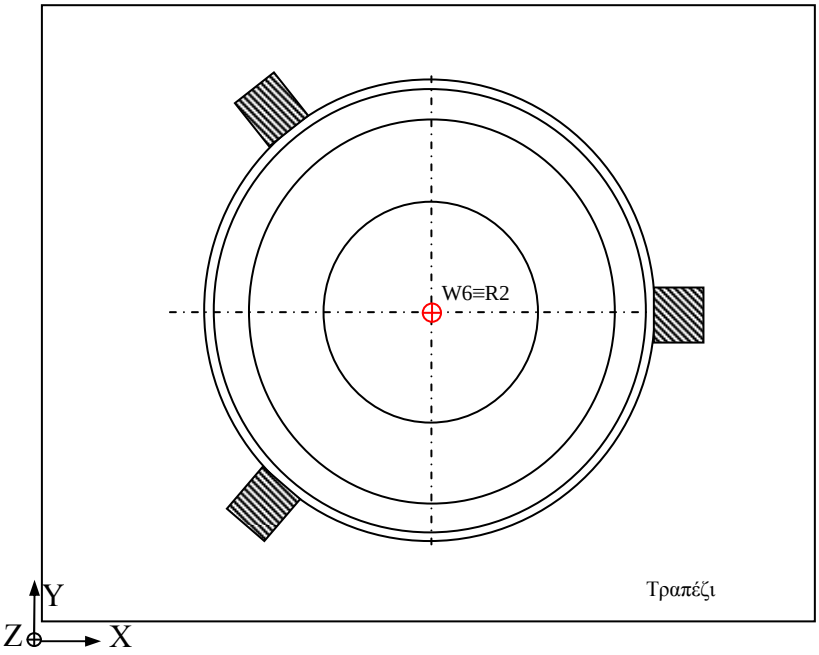
Σχήμα 3.3 Συστήματα συντεταγμένων (W1) και (W2) άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης



Σχήμα 3.4 Συστήματα συντεταγμένων (W3) και (W4) κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης



Σχήμα 3.5 Σύστημα συντεταγμένων (R1) άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών



Σχήμα 3.6 Σύστημα συντεταγμένων (R2) κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών

Επιλέγουμε τις αντίστοιχες αρχές συντεταγμένων για κάθε σετάρισμα τις W1, W2, W3, W4, W5 και W6. Στην πρώτη περίπτωση θεωρούμε ότι η αρχή συντεταγμένων της αναφοράς στο κέντρο τόρνευσης βρίσκεται πάνω στο τσόκ. Άρα, έχουμε ότι:

{W1}=(X,Z)= (0,Lstockup-ap1-ap2-D11), όπως ορίζονται από τις κατεργασίες από τις κατεργασίες που θα ακολουθήσουν στο φασεολόγιο, με ap2 το πάχος κοπής στην

διαδικασία αποπεράτωσης και ap1 το πάχος κοπής κατά στην διαδικασία της εκχόνδρισης

{W2}=(X,Z)= (0,D11)
{W3}=(X,Z)= (0,Lstockdown-ap1-ap2-D1-D8-D9-D10-D12), όπως ορίζονται από τις κατεργασίες που θα ακολουθήσουν στο φασεολόγιο
{W4}=(X,Z)= (0,D8+D9+D10+D12)

Ενώ για το κέντρο κατεργασιών έχουμε:

{W5}=(X,Y,Z)=(Χτραπέζι/2,Υτραπέζι/2,Ζτάκος), αφού πρέπει να υπάρχει τάκος κάτω από το τεμάχιο
{W6}=(X,Y,Z)=(Χτραπέζι/2,Υτραπέζι/2,0), αφού δεν θα υπάρχει τάκος

Πρέπει να σημειωθεί ότι για ισχύουν τα παραπάνω, όλα τα Ai έχουν ληφθεί να βρίσκονται στο πάνω στο τσόκ και στην κάτω αριστερή γωνία του τραπεζιού της μηχανής. Αυτό σημαίνει ότι στην κατεργασία του άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης το τεμάχιο πρέπει να εφάπτεται στο τσόκ. Αν οι σφιγκτήρες δημιουργούν κενό μεταξύ του τσόκ και του τεμαχίου τότε θα πρέπει ο σχεδιαστής να λάβει υπόψη του αυτό το μήκος και να το προσθέσει στο Z του {W2}. Επίσης, στην κατεργασία του άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών τοποθετούνται τάκοι, διότι σε αυτό το τεμάχιο θα πραγματοποιηθούν οπές σε όλο το πάχος του δακτυλίου. Επομένως, στο {W5} πρέπει να ληφθεί υπόψη αυτό το ύψος για να γίνει σωστά η κατεργασία, ως Ζτάκος.

Στην προσομοίωση όμως που γίνεται στην συνέχεια, το λογισμικό εφαρμόζει ως αρχές συντεταγμένων αναφοράς του κέντρου τόρνευσης Ai στο άκρο των σφιγκτήρων, όπως φαίνονται στα παραπάνω σχήματα. Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στον σχεδιαστή, διότι το πάχος των σφικτήρων δεν είναι γνωστό, αλλά λαμβάνοντας τις τιμές του Lstockup και Lstockdown δημιουργεί τις αρχές συντεταγμένων ως ποσοστό των μήκών αυτών, το οποίο και αυτό είναι άγνωστο. Επίσης στο κέντρο κατεργασιών δεν μπορεί να ληφθεί Z=Ζτάκος αφού όλη η κατεργασία γίνεται ιδεατά και θεωρείται ότι ακουμπά το τραπέζι της μηχανής. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να αναγράψουμε τα αντίστοιχα συστήματα συντεταγμένων ως:

Για το κέντρο τόρνευσης:

{W1}=(X,Z)= (0,Lstockup-ap1-ap2-D11)= (0,A1+(Lstockup-A1)-ap1-ap2-D11)
{W2}=(X,Z)= (0,D11)= (0,A2+(D11-A2))
{W3}=(X,Z)= (0,Lstockdown-ap1-ap2-D1-D8-D9-D10-D12)= (0,A3+(Lstockdown-A3)-ap1-ap2-D1-D8-D9-D10-D12)
{W4}=(X,Z)= (0,D8+D9+D10+D12)= (0,A4+(D8+D9+D10+D12-A4))

Ενώ για το κέντρο κατεργασιών έχουμε:

{W5}=(X,Y,Z)=(Ltραπέζι/2,Ltραπέζι/2,0)
{W6}=(X,Y,Z)=(Ltραπέζι/2,Ltραπέζι/2,0)

Μη γνωρίζοντας του παράγοντες (Lstockup-A1), (D11-A2), (Lstockdown-A3), και (D8+D9+D10+D12-A4) δεν μπορούμε να αποφανθούμε για την ακριβή τιμή

των συστημάτων αναφοράς, και για αυτό τον λόγο λαμβάνουμε προσεγγιστικά τις τιμές τους, ώστε να γίνεται σωστά η προσομοίωση. Είναι ευνόητο ότι αυτό δεν γίνεται σε μια πραγματική μηχανή, αφενός διότι μπορούμε να μετρήσουμε με ακρίβεια το πάχος του των τσόκ, αφετέρου οι αρχές συντεταγμένων αναφοράς ορίζονται πάνω στο τσόκ, άρα λαμβάνουμε τις τιμές της πρώτης περίπτωσης.

Οι αρχικές θέσεις του εργαλείου βρίσκονται μακριά από το κατεργαζόμενο αντικείμενο και σε κάθε περίπτωση μπορούμε να τις ορίσουμε ως:

{arxiW1}= (Χαρχή1,Ζαρχή1), όπου Χαρχή1>>Χτεμαχίου και Ζαρχή1>>Ζτεμαχίου
{arxiW2}= (Χαρχή2,Ζαρχή2), όπου Χαρχή2>>Χτεμαχίου και Ζαρχή2>>Ζτεμαχίου
{arxiW3}= (Χαρχή3,Ζαρχή3), όπου Χαρχή3>>Χτεμαχίου και Ζαρχή3>>Ζτεμαχίου
{arxiW4}= (Χαρχή4,Ζαρχή4), όπου Χαρχή4>>Χτεμαχίου και Ζαρχή4>>Ζτεμαχίου
{arxiW5}= (0,0,Ζαρχή5), όπου Ζαρχή5>>Ζτεμαχίου
{arxiW6}= (0,0,Ζαρχή6), όπου Ζαρχή6>>Ζτεμαχίου

Για τα αρχικά σημεία μπορούμε να τα ορίσουμε και αυτά παραμετρικά ώστε να υπολογίζονται οι μέγιστες διαστάσεις του τεμαχίου σε κάθε σετάρισμα και με έναν θετικό αριθμό που θα εισάγεται από τον σχεδιαστή θα δημιουργείται η απόσταση του εργαλείου από το τεμάχιο. Έτσι θα ισχύει για κάθε αρχή ότι:
Χαρχή1+offset=Χτεμαχίου και Ζαρχή1+offset=Ζτεμαχίου για το $1^{ο}$ σετάρισμα κ.ο.κ.

Είναι προφανές ότι ο αριθμός ‘offset’ δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλος για να μειώσουμε τον χρόνο προσέγγισης του εργαλείου στο τεμάχιο, αλλά ούτε πολύ μικρός, διότι μπορεί να υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης.

Γενικά μπορούμε να ορίσουμε τις συνθήκες κοπής ώστε να αφορούν απόλυτες μονάδες, το σύστημα συντεταγμένων να είναι το αντίστοιχο σε κάθε φάση, να γίνονται ακυρώσεις αντισταθμίσεων και να εγχέεται λάδι κοπής κατά την φάση όλων των κατεργασιών, αν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Τα σεταρίσματα έχουν πολύ μεγάλη σημασία ώστε να γίνονται σωστά και ο πραγματικός τόπος του σημείου (0,0,0) να συμπίπτει με αυτόν της κάθε φάσης, διότι, επειδή η ακρίβεια της μηχανής είναι αρκετά υψηλή, η λανθασμένη τοποθέτηση των τεμαχίων στις μηχανές θα δημιουργήσει εσφαλμένη γεωμετρία στο τελικό προϊόν.

Επομένως, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι γεωμετρικές ανοχές που χρειάζονται για να γίνουν ορθά οι κατεργασίες. Προφανώς, τα μεγέθη της ομοκεντρότητας και της ομοαξονικότητας για το κέντρο κατεργασιών και κέντρο τόρνευσης αντίστοιχα, ορίζονται και από την ακρίβεια της μηχανής και για αυτό τον λόγο θεωρούμε ότι αυτή γίνεται μέσα στα όρια του εύρους ευαισθησίας των μετρητικών συστημάτων. Επίσης θεωρούμε ότι η τοποθέτηση των τεμαχίων γίνονται με αυτή την αρχή, οπότε δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω με την ανάλυση των γεωμετρικών ανοχών.

3.3 Φασεολόγιο κατασκευής

Σε όλες τις φάσεις κατεργασίας διακρίνουμε τις παρακάτω μεταβλητές:

Προώσεις
Πρόωση εργαλείου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της εκχόνδρισης: F1
Πρόωση εργαλείου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της αποπεράτωσης: F2
Πρόωση τραπεζιού κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της εκχόνδρισης: F3
Πρόωση τραπεζιού κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης: F4
Πρόωση τραπεζιού κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης: F5
Πρόωση τραπεζιού κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης στο λεπτότοιχο της αεροτομής: F6

Βάθη και πάχη κοπής
Βάθος κοπής κατά την φάση της εκχόνδρισης στο κέντρο τόρνευσης: ap1
Βάθος κοπής κατά την φάση της αποπεράτωσης στο κέντρο τόρνευσης: ap2
Βάθος κοπής κατά την φάση της εκχόνδρισης στο κέντρο κατεργασιών: ap3
Βάθος κοπής κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης στο κέντρο κατεργασιών: ap4
Πάχος κοπής κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης στο κέντρο κατεργασιών: Lsf
Βάθος κοπής κατά την φάση της αποπεράτωσης στο κέντρο κατεργασιών: ap5
Πάχος κοπής κατά την φάση της αποπεράτωσης στο κέντρο κατεργασιών: Lf

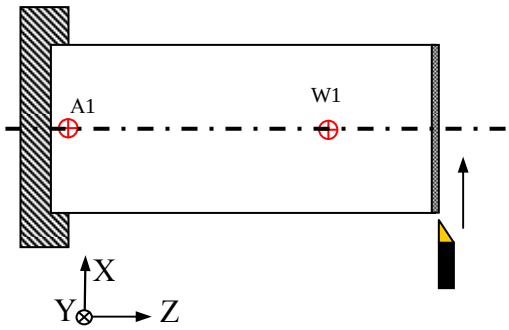
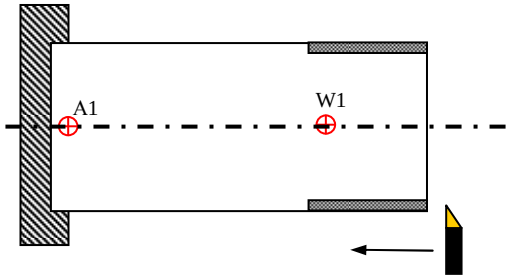
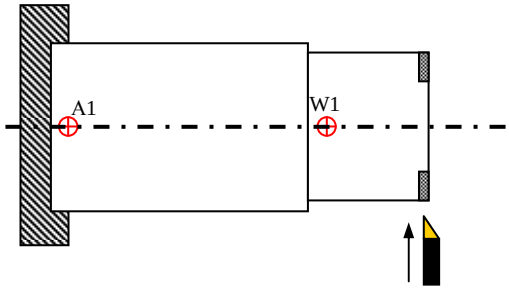
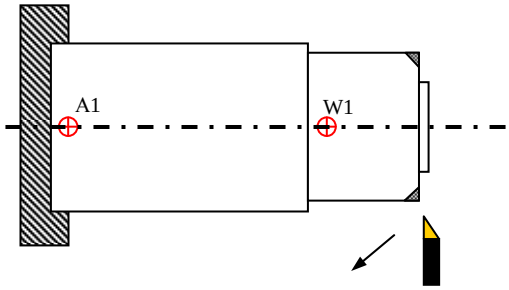
Εργαλεία κοπής
Εργαλείο εκχόνδρισης κέντρου τόρνευσης: T0101
Εργαλείο αποπεράτωσης κέντρου τόρνευσης: T0202
Εργαλείο εσωτερικής εκχόνδρισης κέντρου τόρνευσης: T0303
Εργαλείο εσωτερικής αποπεράτωσης κέντρου τόρνευσης: T0404
Εργαλείο δημιουργίας οπών κέντρου κατεργασιών: T0505
Εργαλείο εκχόνδρισης κέντρου κατεργασιών: T0606
Εργαλείο ημι-αποπεράτωσης κέντρου κατεργασιών: T0707
Εργαλείο αποπεράτωσης κέντρου κατεργασιών: T0707

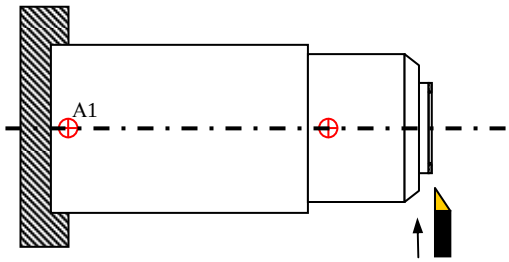
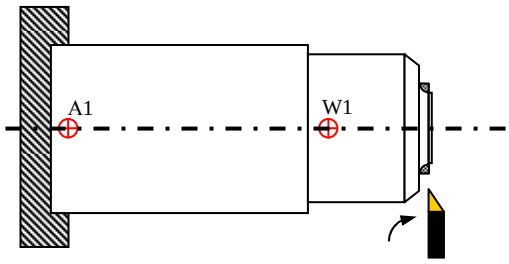
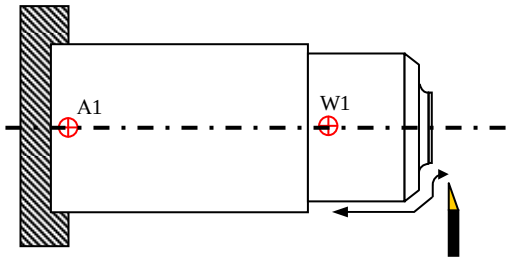
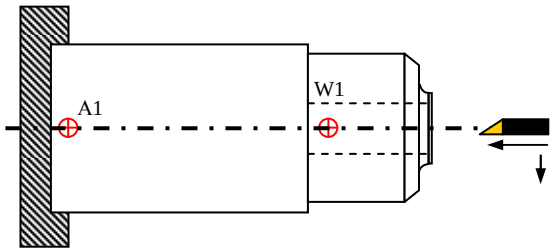
Στροφές ατράκτων
Στροφές ατράκτου κέντρου τόρνευσης κατά την εκχόνδριση: S1
Στροφές ατράκτου κέντρου τόρνευσης κατά την αποπεράτωση: S2
Στροφές εργαλείου κέντρου κατεργασιών κατά την εκχόνδριση: S3
Στροφές εργαλείου κέντρου κατεργασιών κατά την ημι-αποπεράτωση: S4
Στροφές εργαλείου κέντρου κατεργασιών κατά την αποπεράτωση: S5
Στροφές εργαλείου κέντρου κατεργασιών κατά την απόπεράτωση στο λεπτότοιχο της αεροτομής: S6

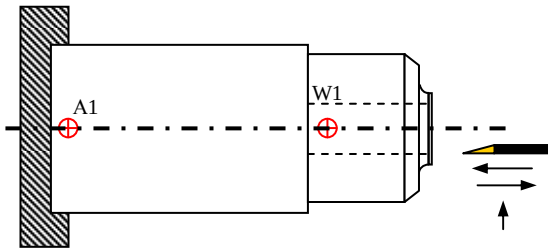
Πριόνι
Γραμμική ταχύτητα κοπής: Uc
Πρόωση βραχίονα: APc
Πάχος λεπίδας πριονιού: Lc

Τρυπάνι
Στροφές: Sd
Πρόωση:APd

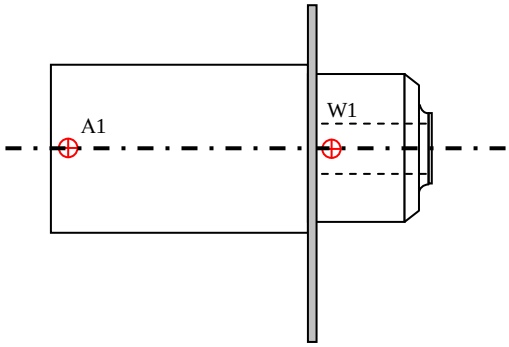
Φασεολόγιο δημιουργίας άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης
Πρώτο Σετάρισμα

Σχηματική παράσταση κατεργασίας	Συνθήκες κατεργασίας
	Φάση: Κοπή μετώπου Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή προφίλ Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή μετώπου Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή σπασίματος Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Γωνιακή κίνηση κοπής

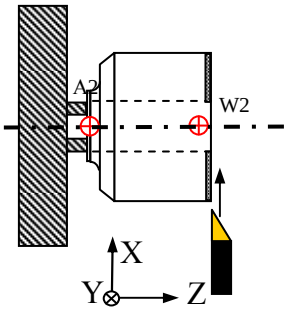
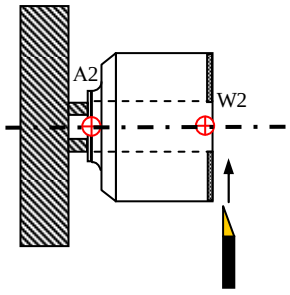
	Φάση: Κοπή προσώπου Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή κοίλης επιφάνειας Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Κυκλική κίνηση κοπής
	Φάση: Αποπεράτωση προφίλ Εργαλείο: T0202 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Σύνθετη κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Αξονική κίνηση κοπής

	Φάση: Αποπεράτωση εσωτερικής οπής και μετώπου Εργαλείο: T0404 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Αξονική κίνηση κοπής

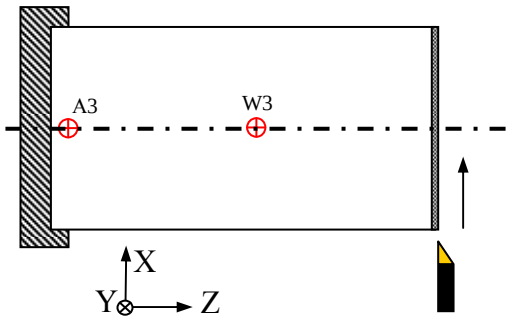
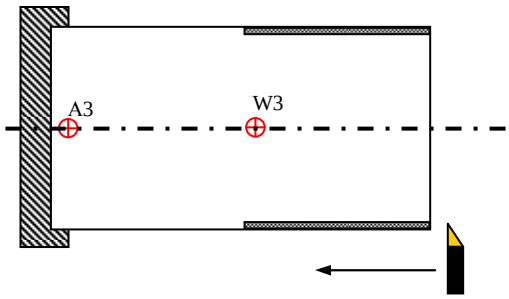
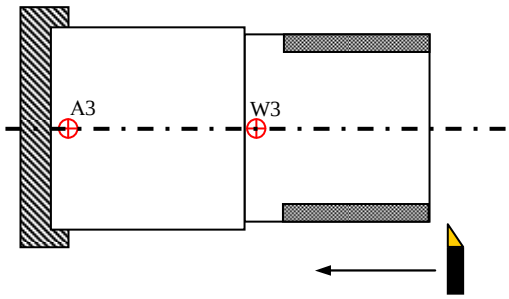
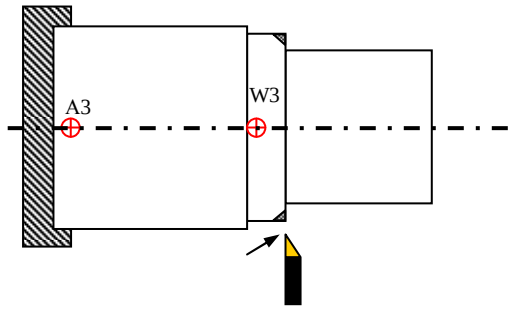
Κοπή σε πριόνι

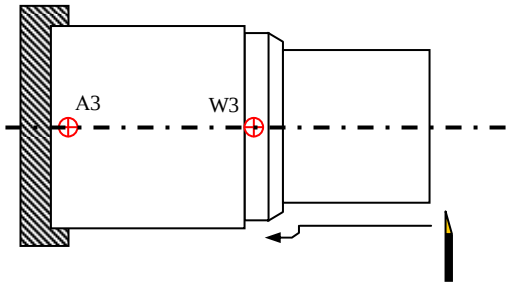
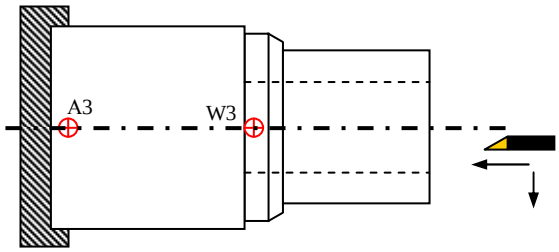
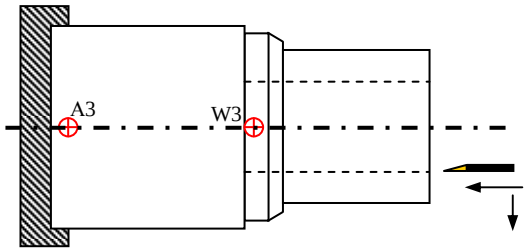
	Φάση: Κοπή σε πριόνι άνω δακτυλίου Εργαλείο: Πριόνι Πρόωση: APc Ταχύτητα: Uc Πάχος κοπής: Lc Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W1}, Κάθετη κίνηση κοπής

Δεύτερο Σετάρισμα

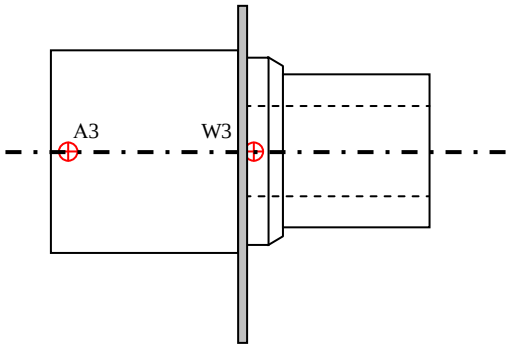
	Φάση: Κοπή μετώπου Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W2}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Αποπεράτωση μετώπου Εργαλείο: T0202 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup, Σ.Σ. {W2}, Ακτινική κίνηση κοπής

Φασεολόγιο δημιουργίας κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης
Πρώτο Σετάρισμα

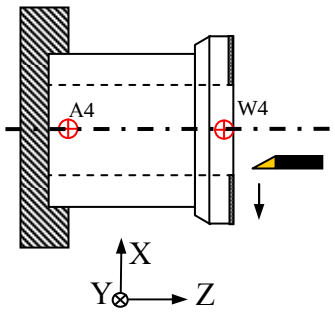
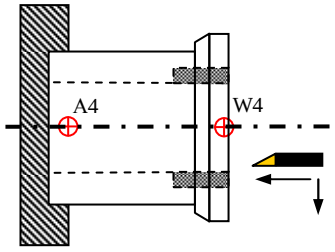
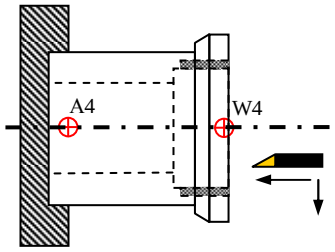
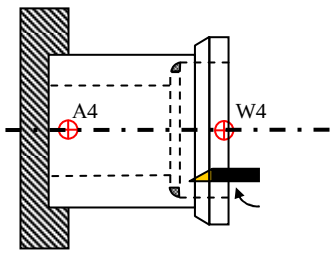
Σχηματική παράσταση κατεργασίας	Συνθήκες κατεργασίας
	Φάση: Κοπή μετώπου Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή προφίλ Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή προφίλ Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή σπασίματος Εργαλείο: T0101 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Γωνιακή κίνηση κοπής

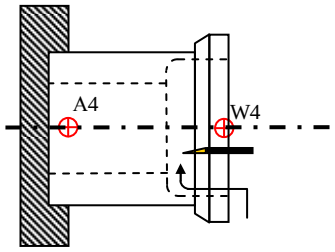
	Φάση: Αποπεράτωση προφίλ Εργαλείο: T0202 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Σύνθετη κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Αποπεράτωση εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0404 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Αξονική κίνηση κοπής

Κοπή σε πριόνι

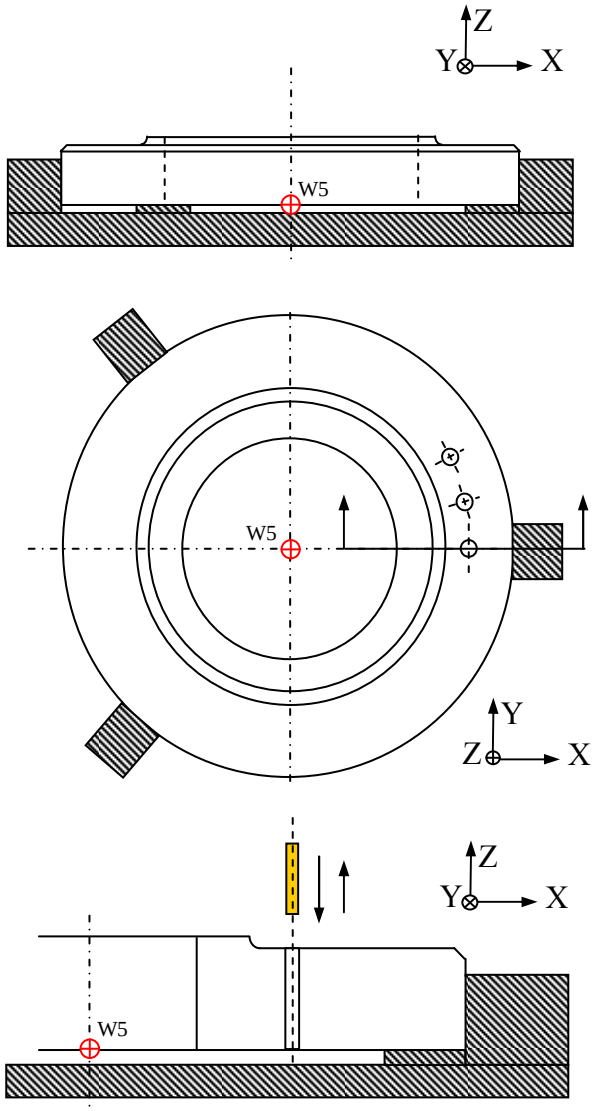
	Φάση: Κοπή σε πριόνι κάτω δακτυλίου Εργαλείο: Πριόνι Πρόωση: APc Ταχύτητα: Uc Πάχος κοπής: Lc Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W3}, Κάθετη κίνηση κοπής

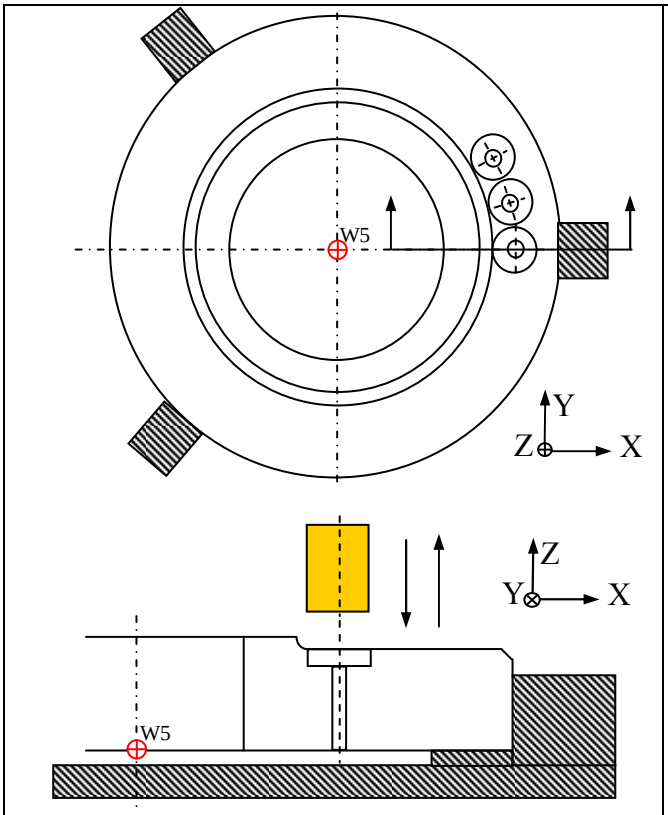
Δεύτερο Σετάρισμα

	Φάση: Κοπή προσώπου Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W4}, Ακτινική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W4}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W4}, Αξονική κίνηση κοπής
	Φάση: Κοπή εσωτερικής κοίλης επιφάνειας Εργαλείο: T0303 Πρόωση: F1 Στροφές: S1 Βάθος κοπής: ap1 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W4}, Κυκλική κίνηση κοπής

	Φάση: Αποπεράτωση εσωτερικής οπής Εργαλείο: T0404 Πρόωση: F2 Στροφές: S2 Βάθος κοπής: ap2 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W4}, Σύνθετη κίνηση κοπής

Φασεολόγιο δημιουργίας άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών

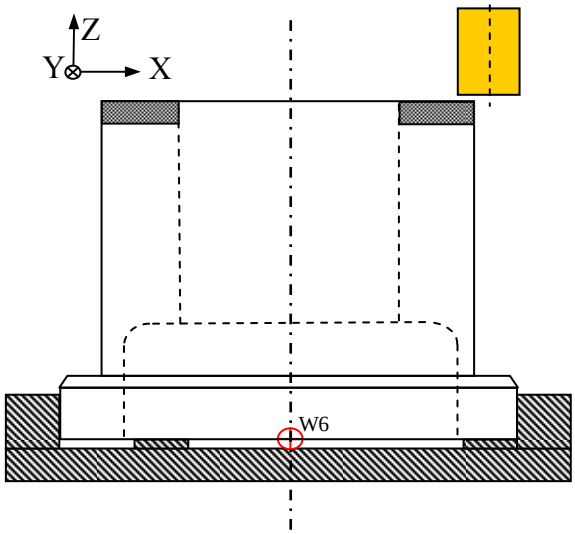
	Φάση: Κοπή οπών συγκράτησης άνω δακτυλίου Εργαλείο: T0505 Πρόωση: APd Στροφές: Sd Βάθος κοπής: >D12+D15 Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup Σ.Σ. {W5}, Διάτρηση Οι συνθήκες ορίζονται βάσει τον τύπο του τρυπανιού που θα χρησιμοποιηθεί και του υλικού. Το βάθος κοπής πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το ύψος του τελικού τεμαχίου ώστε να γίνει πλήρης διάτρηση του υλικού. Χρειάζεται προσοχή στο να μην τρακάρει το τρυπάνι στους τάκους που θα βρίσκονται κάτω από το τεμάχιο.



Φάση: Κοπή χώρου για το συγκόλλημα
Εργαλείο: T0606
Πρόωση: F3
Στροφές: S3
Βάθος κοπής: >D15, <D12+D15
Σχόλια: αρχικό τεμ. stockup
Σ.Σ. {W5},
Κάθετη κίνηση κοπής

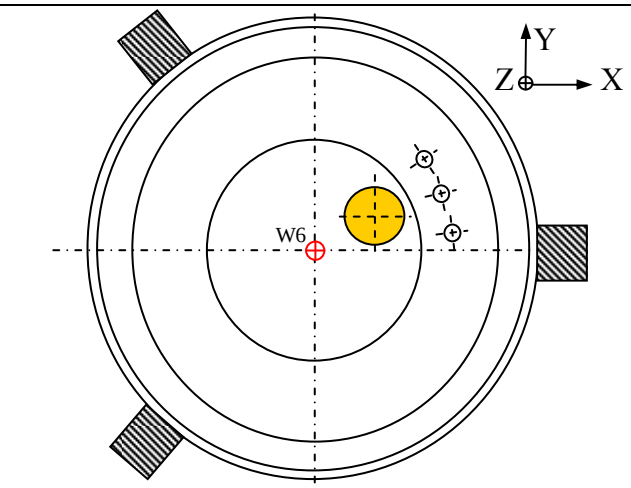
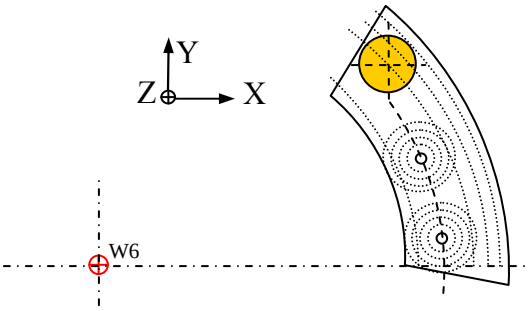
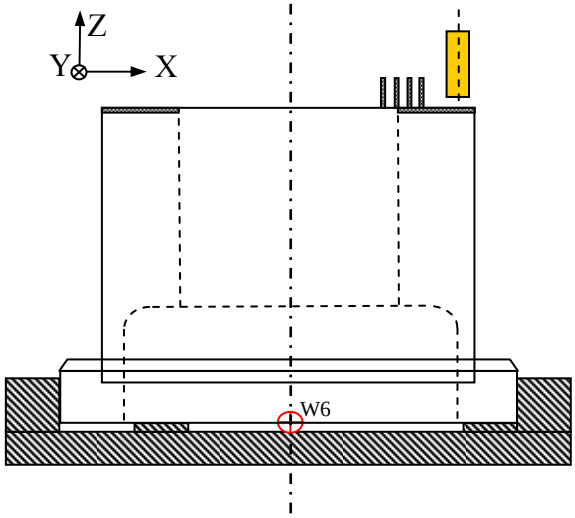
Το βάθος κοπής πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την διάσταση D15, ώστε να υπάρχει επαρκής χώρος για το συγκόλλημα, και μικρότερο από το τελικό ύψος του τεμαχίου στα σημεία των οπών, D12+D15.

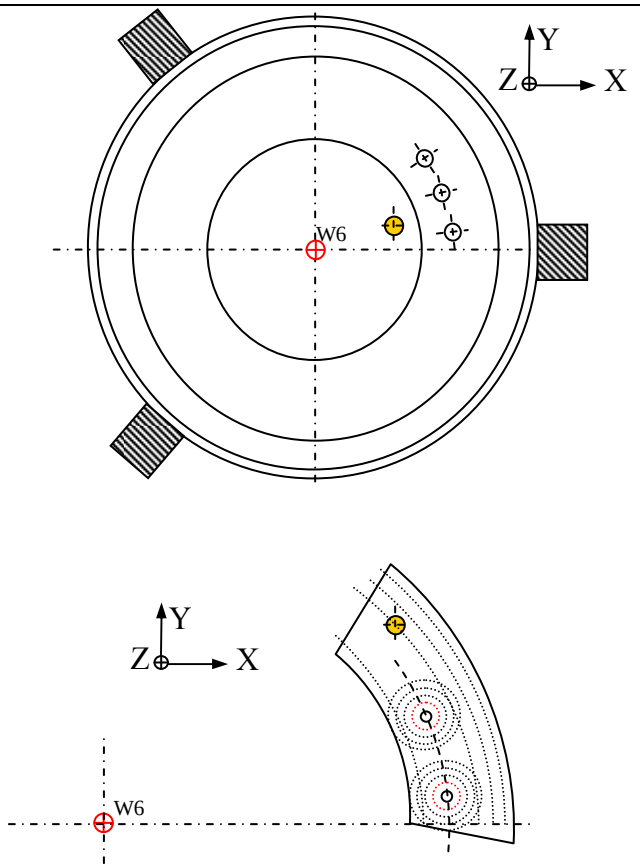
Φασεολόγιο δημιουργίας κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών



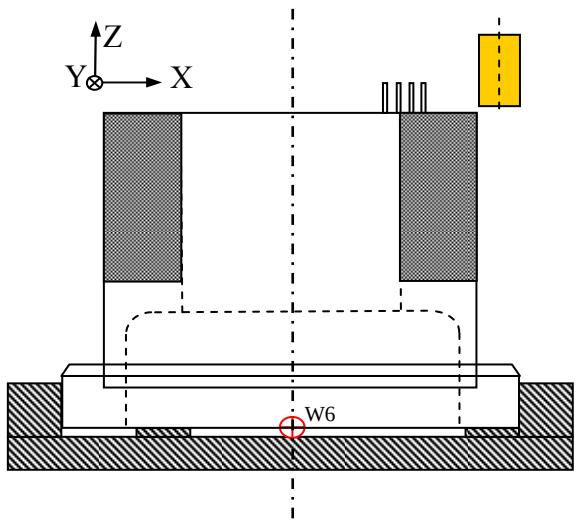
Φάση: Κοπή πείρων συγκράτησης
Εργαλείο: T0606
Πρόωση: F3
Στροφές: S3
Βάθος κοπής: ap3
Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown
Σ.Σ. {W6},
Κυκλική κίνηση κοπής

Γίνεται η κοπή των εξωτερικών κύκλων καθ'ύψος από το ζαρχικό, ύστερα των εσωτερικών καθ'ύψος και τέλος η κοπή των ομόκεντρων κύκλων γύρω από κάθε πείρο καθ'ύψος. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέχρι του zf, όπου zf>ztελικό διότι θα ακολουθήσει η αποπεράτωση. Στο συγκεκριμένο σετάρισμα για την κατεργασία του κάτω

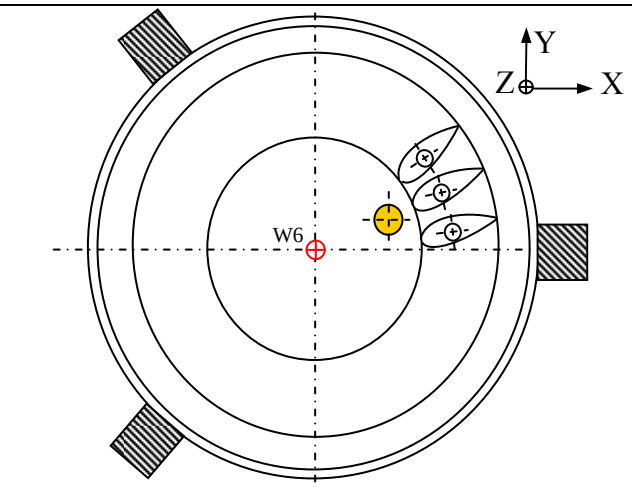
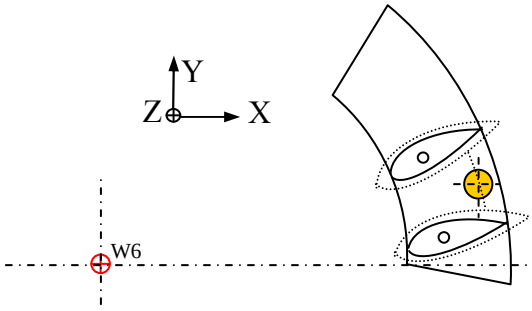
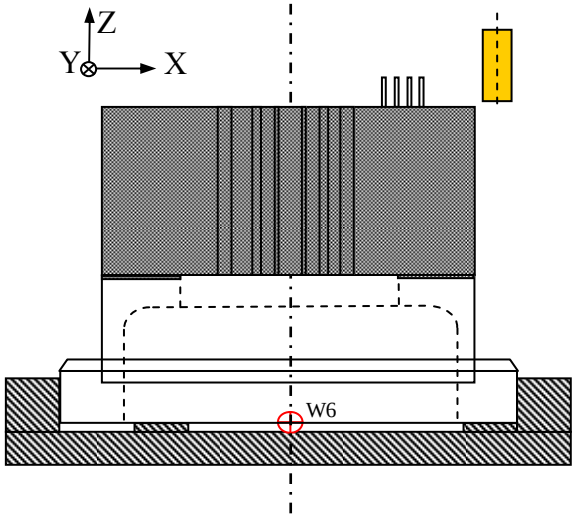
 	δακτυλίου θα πρέπει να ελεγχθεί το Σ.Σ., ώστε αν υπάρχουν τάκοι κάτω από το τεμάχιο, τότε το W6 θα πρέπει να αλλάξει. ζαρχικό= D1+D8+D9+D10+D12+D15 zf=D1+D8+D9+D10+Lf ζτελικό=D1+D8+D9+D10
	Φάση: Αποπεράτωση πείρων συγκράτησης Εργαλείο: T0707 Πρόωση: F5 Στροφές: S5 Βάθος κοπής: ap5 Πάχος κοπής: Lf Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W6}, Κυκλική κίνηση κοπής Γίνεται η αποπεράτωση γύρω από κάθε πείρο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται καθ'ύψος από το ζαρχικό μέχρι το ζτελικό. Ύστερα γίνεται αποπεράτωση της επιφάνειας στο ύψος του ζτελικό, πρώτα με ομόκετρους κύκλους γύρω από κάθε πείρο, ύστερα στους

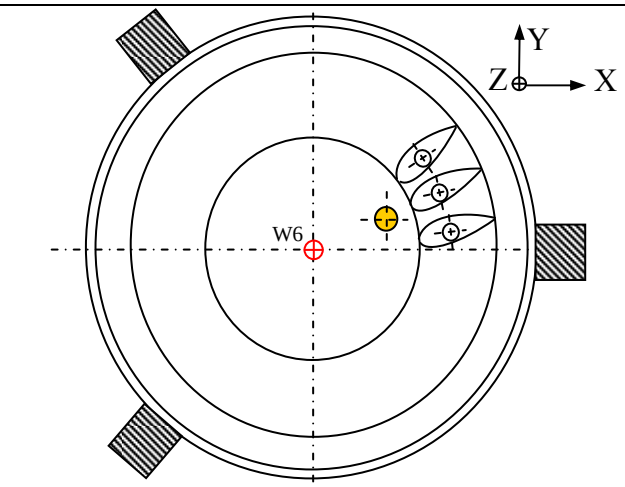
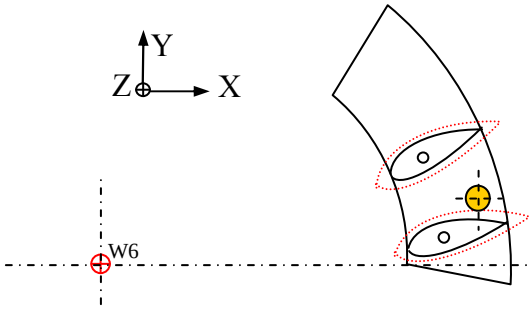
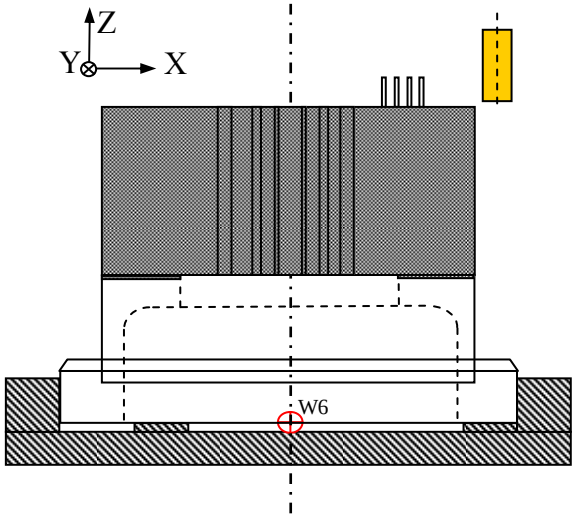
<table>
<tr>
<td> 
</td>
<td>εξωτερικούς κύκλους και τέλος στους εσωτερικούς.

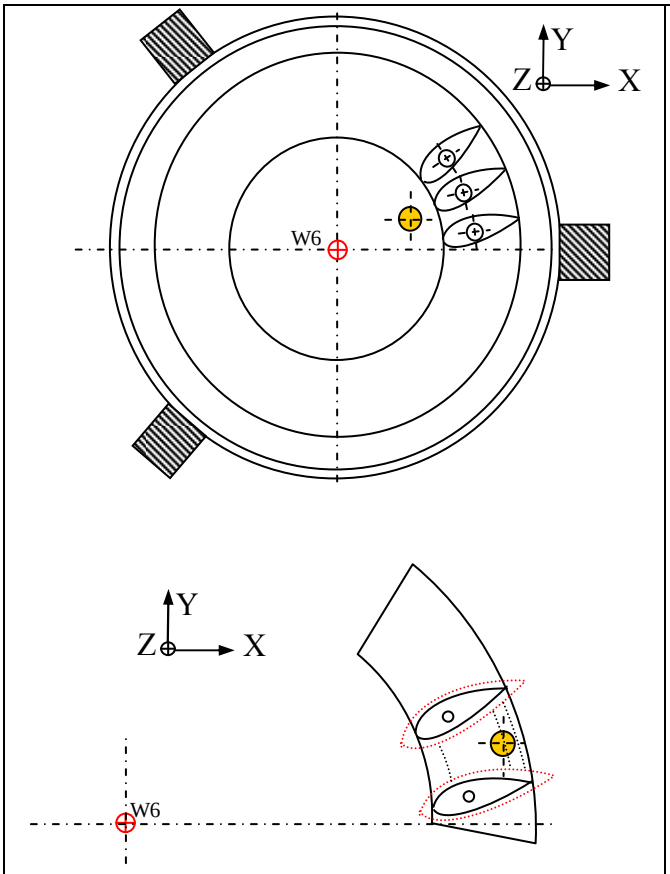
ζαρχικό= D1+D8+D9+D10+D12+D15

ζτελικό=D1+D8+D9+D10</td>
</tr>
<tr>
<td> 
</td>
<td>Φάση: Κοπή πτερυγίων
Εργαλείο: T0606
Πρόωση: F3
Στροφές: S3
Βάθος κοπής: ap3
Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown
Σ.Σ. {W6},
Κυκλική κίνηση κοπής

Γίνεται η κοπή των πτερυγίων με τροχιές που ακολουθούν την εκχόνδριση σε όλα τα πτερύγια από το ζαρχικό. Στην φάση της εκχόνδρισης γίνονται τα πάσα εκχόνδρισης του χώρου μεταξύ των αεροτομών. Ύστερα γίνεται η μείωση του ύψους του κοπτικού και επαναλαμβάνονται όλες οι κοπές των πτερυγίων. Αυτή η</td>
</tr>
</table>

 	διαδικασία πραγματοποιείται μέχρι του zf, όπου zf>ztελικό διότι θα ακολουθήσει η αποπεράτωση. zαρχικό=D1+D8+D9+D10 zf=D1+D8+D9+Lf ztελικό=D1+D8+D9
	Φάση: Ημι-αποπεράτωση πτερυγίων Εργαλείο: T0707 Πρόωση: F4 Στροφές: S4 Βάθος κοπής: ap4 Πάχος κοπής: Lsf Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W6}, Κυκλική κίνηση κοπής Γίνεται η κοπή των πτερυγίων με τροχιές που ακολουθούν την ημι-αποπεράτωση σε όλα τα πτερύγια. Ύστερα γίνεται η μείωση του ύψους του κοπτικού και επαναλαμβάνονται όλες οι κοπές των πτερυγίων από το ζαρχικό. Αυτή η διαδικασία

 	πραγματοποιείται μέχρι του zf, όπου zf>ztελικό διότι θα ακολουθήσει η αποπεράτωση. zαρχικό=D1+D8+D9+D10 zf=D1+D8+D9+Lf ztελικό=D1+D8+D9
	Φάση: Αποπεράτωση πτερυγίων Εργαλείο: T0707 Πρόωση: F5 και F6 Στροφές: S5 και S6 Βάθος κοπής: ap5 Πάχος κοπής: Lf Σχόλια: αρχικό τεμ. stockdown Σ.Σ. {W6}, Κυκλική κίνηση κοπής Γίνεται η κοπή των πτερυγίων με τροχιές που ακολουθούν την αποπεράτωση σε όλα τα πτερύγια. Ύστερα γίνεται η μείωση του ύψους του κοπτικού και επαναλαμβάνονται όλες οι κοπές των πτερυγίων από το zαρχικό. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέχρι του ύψους ztελικό. Σε αυτό το ύψος



γίνεται και η αποπεράτωση της επιφάνειας που βρίσκεται στο ζτελικό. Τέλος, στην φάση της αποπεράτωσης της επιφάνειας γίνονται τα πάσα αποπεράτωσης του χώρου μεταξύ των αεροτομών.

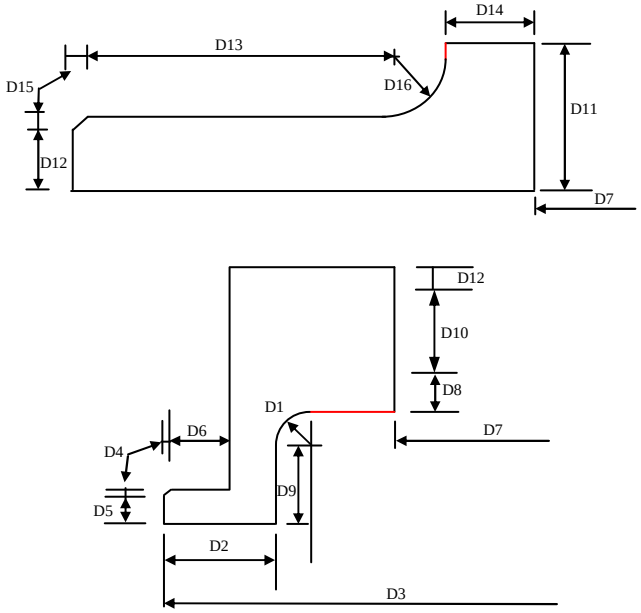
ζαρχικό=D1+D8+D9+D10

ζτελικό=D1+D8+D9

3.4 *Αρχεία παραμετροποίησης των τροχιών κοπής*

Σε πρώτη φάση χρειάζεται να έχουμε μια εικόνα για τις κατεργασίες που θα γίνουν στον τόρνο. Από την γεωμετρία έχουμε τα εξής δεδομένα:

D1
D2
D3
D4
D4
D6
D7
D8
D9
D10
D11
D12
D13
D14
D15
D16



Σχήμα 3.7 Μεταβλητές των διαστάσεων της πτερύγωσης

Τοποθετούμε στο αρχείο excel όλες αυτές τις διαστάσεις, βάζοντας σε κάθε μεταβλητή την τιμή που θέλουμε, ώστε να κατασκευαστεί πλήρως η γεωμετρία των δακτυλίων. Σε αυτή την φάση εισάγονται όλες οι διαστάσεις που ήταν εύκολο να μετρηθούν στο τεμάχιο μας, σχήμα 3.7. Αλληλεξάρτηση αυτών δεν υπάρχει, ωστόσο χρειάζεται η μέτρηση τους, άρα και η εισαγωγή των τιμών τους στο αρχείο να είναι ακριβής ως προς τα δεκαδικά ψηφία των. Στην συνέχεια, γίνεται ένας τρόπος αλληλεξάρτησης των μεγεθών αυτών, ώστε να δημιουργηθούν οι συντεταγμένες σε γραφικό περιβάλλον που θα ορίζουν την συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι συντεταγμένες αυτές καθορίζονται από την επιλογή του συστήματος {R,L}≒{X,Y}. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούμε τις συντεταγμένες για κάθε α/α σημείο της κατασκευής μας.

Σημείο 1:
R(1)=D7+D14+D16+D13
L(1)=0 εξ'ορισμού διότι θέλουμε να βρίσκεται πάνω στον X άξονα.
Σημείο 2:
R(2)= D7+D14+D16+D13
L(2)=D12-D15
Σημείο 3:
R(3)= D7+D14+D16+D13-D15
L(3)=D12
Σημείο 4:
R(4)= D7+D14+D16
L(4)=D12

Σημείο 5:

R(5)= D7+D14

L(5)=D12+D16

Σημείο 6:

R(6)= D7+D14

L(6)=D11

Σημείο 7:

R(7)=D7

L(7)=D11

Σημείο 8:

R(8)=D7

L(8)=D12+D16

Σημείο 9:

R(9)=D7

L(9)=0 εξ'ορισμού διότι θέλουμε να βρίσκεται πάνω στον X άξονα

Σημείο 10:

R(10)=D3

L(10)=0 εξ'ορισμού διότι θέλουμε να βρίσκεται πάνω στον X άξονα

Σημείο 11:

R(11)=D3

L(11)=D5-D4

Σημείο 12:

R(12)=D3-D4

L(12)=D5

Σημείο 13:

R(13)=D3-D6

L(13)=D5

Σημείο 14:

R(14)=D3-D6

L(14)=D9+D1+D8+D10+D12

Σημείο 15:

R(15)=D7

L(15)=D9+D1+D8+D10+D12

Σημείο 16:

R(16)=D7

L(16)=D9+D1

Σημείο 17:

R(17)=D3-D2-D1

L(17)=D9+D1

Σημείο 18:

R(18)=D3-D2

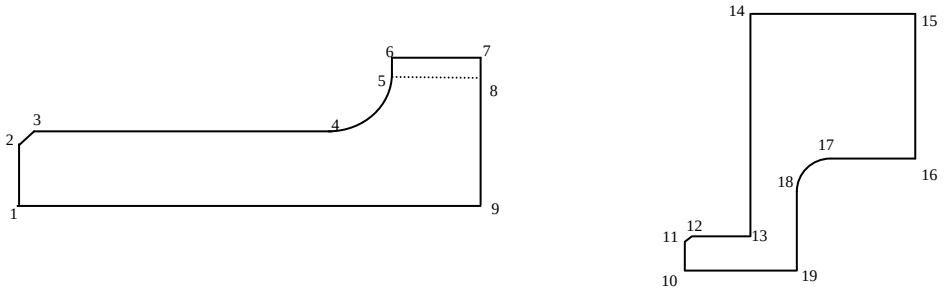
L(18)=D9

Σημείο 19:

R(19)=D3-D2

L(19)=0 εξ'ορισμού διότι θέλουμε να βρίσκεται πάνω στον X άξονα

Ο α/α των σημείων στην γεωμετρία μας φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.8 Α/Α των σημείων που ορίζουν την γεωμετρία της πτερύγωσης

Οι συσχετίσεις που έγιναν ήταν με τρόπο αυθαίρετο ως προς την επιλογή των αντίστοιχων μετρούμενων διαστάσεων, επομένως, είναι στην κρίση του σχεδιαστή πως αυτές θα ορίζουν τις συντεταγμένες των σημείων στο γραφικό περιβάλλον.

Είναι προφανές, όπως ορίζει το ανώτερο σχήμα 3.8, ότι όλες οι μεταβλητές που ορίζουν την γεωμετρία της πτερύγωσης έχουν μια αλληλένδετη σχέση μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο, ώστε ο σχεδιαστής χρειάζεται να έχει πλήρη εικόνα του προφίλ της γεωμετρίας για την αποφυγή σφαλμάτων. Για παράδειγμα, δεν μπορεί η μεταβλητή R(3) να είναι διαφορετική της R(2)-D15=R(1)-D15. Επίσης, ο αύξων αριθμός των σημείων από 1 έως 9 ορίζουν την γεωμετρία του άνω δακτυλίου, ενώ από 10 έως 19 την γεωμετρία του κάτω δακτυλίου συμπεριλαμβανομένου το ύψος των πτερυγίων και του πάχους του άνω δακτυλίου. Αυτό διότι ο κάτω δακτύλιος θα κατασκευαστεί έτσι ώστε να έχει συμπεριληφθεί το μήκος των πείρων συγκράτησης, που το ορίζουμε ίσο με το πάχος του άνω δακτυλίου, καθώς και το ύψος των πτερυγίων που θα δημιουργηθούν.

Στην συνέχεια, δημιουργούμε ένα offset της γεωμετρίας των δακτυλίων. Ορίζουμε την τιμή Lf ως τιμή για το πάχος της κοπής κατά την φάση της αποπεράτωσης. Αυτό γίνεται διότι σε όλες τις φάσεις των εκχονδρίσεων το κοπτικό πρέπει να πηγαίνει έως τα σημεία προ της φάσης της αποπεράτωσης. Για την δημιουργία του offset απλά προσθέτουμε ή αφαιρούμε σε όλες τις ανωτέρω συντεταγμένες την τιμή Lf κατά περίπτωση. Έτσι:

Σημείο 1:
Rf(1)=R(1)+Lf=D7+D14+D16+D13+Lf
Lf(1)=L(1)-Lf=0-Lf
Σημείο 2:
Rf(2)=R(2)+Lf=D7+D14+D16+D13+Lf
Lf(2)=L(2)=D12-D15
Σημείο 3:
Rf(3)=R(3)=D7+D14+D16+D13-D15
Lf(3)=L(3)+Lf=D12+Lf
Σημείο 4:
Rf(4)=R(4)=D7+D14+D16
Lf(4)=L(4)+Lf=D12+Lf
Σημείο 5:
Rf(5)=R(5)+Lf=D7+D14+Lf
Lf(5)=L(5)=D12+D16
Σημείο 6:
Rf(6)=R(6)+Lf=D7+D14+Lf

Lf(6)=L(6)+Lf=D11+Lf

Σημείο 7:

Rf(7)=R(7)-Lf=D7-Lf

Lf(7)=L(7)+Lf=D11+Lf

Σημείο 8:

Rf(8)=R(8)-Lf=D7-Lf

Lf(8)=L(8)=D12+D16

Σημείο 9:

Rf(9)=R(9)-Lf=D7-Lf

Lf(9)=L(9)-Lf=0-Lf

Σημείο 10:

Rf(10)=R(10)+Lf=D3+Lf

Lf(10)=L(10)-Lf=0-Lf

Σημείο 11:

Rf(11)=R(11)+Lf=D3+Lf

Lf(11)=L(11)=D5-D4

Σημείο 12:

Rf(12)=R(12)=D3-D4

Lf(12)=L(12)+Lf=D5+Lf

Σημείο 13:

Rf(13)=R(13)+Lf=D3-D6+Lf

Lf(13)=L(13)+Lf=D5+Lf

Σημείο 14:

Rf(14)=R(14)+Lf=D3-D6+Lf

Lf(14)=L(14)+Lf=D9+D1+D8+D10+D12+Lf

Σημείο 15:

Rf(15)=R(15)-Lf=D7-Lf

Lf(15)=L(15)+Lf=D9+D1+D8+D10+D12+Lf

Σημείο 16:

Rf(16)=R(16)-Lf=D7-Lf

Lf(16)=L(16)-Lf=D9+D1-Lf

Σημείο 17:

Rf(17)=R(17)=D3-D2-D1

Lf(17)=L(17)-Lf=D9+D1-Lf

Σημείο 18:

Rf(18)=R(18)-Lf=D3-D2-Lf

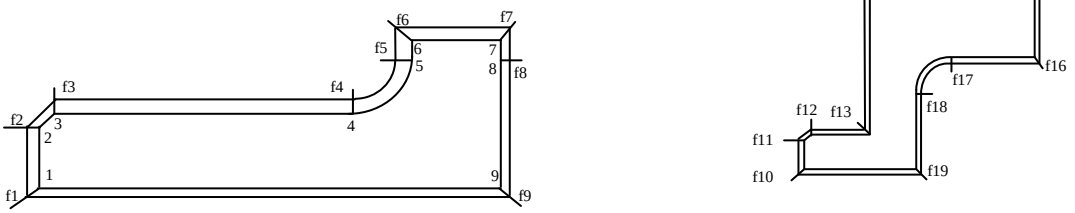
Lf(18)=L(18)=D9

Σημείο 19:

Rf(19)=R(19)-Lf=D3-D2-Lf

Lf(19)=L(19)-Lf=0-Lf

Ο α/α των σημείων στην γεωμετρία μας και στο αντίστοιχο offset φαίνεται στο σχήμα 3.9:

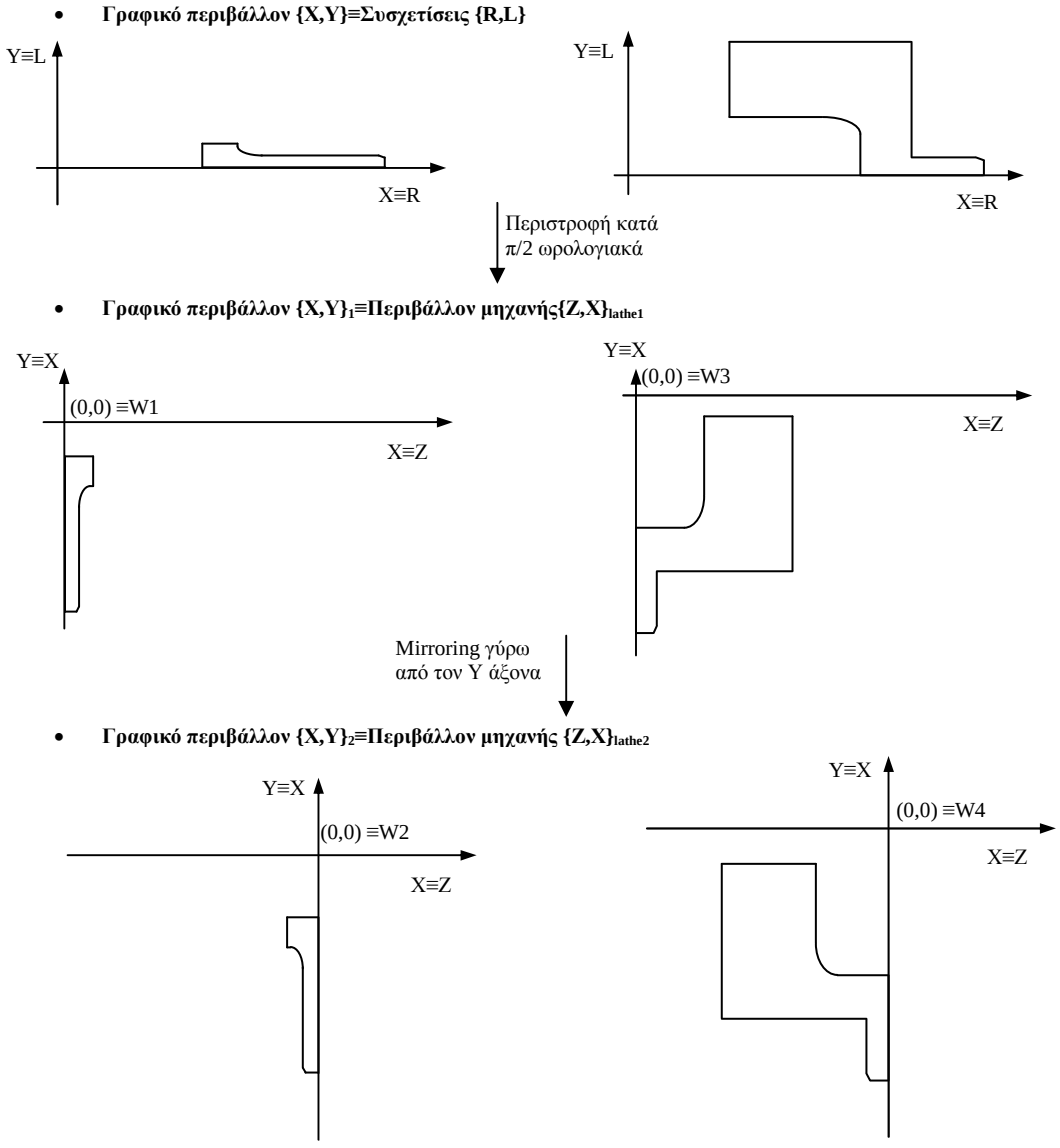


Σχήμα 3.9 Α/Α των σημείων που ορίζουν το offset της γεωμετρίας της πτερύγωσης

Οι συσχετίσεις που έγιναν σε αυτή την φάση της δημιουργίας των συντεταγμένων του offset είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον αρχικό προσδιορισμό των συντεταγμένων της γεωμετρίας της πτερύγωσης. Χρειάζεται, πάλι, ο σχεδιαστής να έχει πλήρη εικόνα του προφίλ και του offset της γεωμετρίας για την αποφυγή σφαλμάτων. Για παράδειγμα, δεν μπορεί η μεταβλητή Rf(3) να είναι διαφορετική της Rf(2)-D15-Lf=Rf(1)-D15-Lf.

Έχοντας παραμετροποιήσει την γεωμετρία της πτερύγωσης μπορούμε τώρα να κάνουμε περιστροφή των συντεταγμένων που βρήκαμε ανωτέρω και να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες που πρέπει να πάει το κοπτικό εργαλείο για τις κατεργασίες σύμφωνα με τις αντίστοιχες φάσεις του φασεολογίου.

Βασική προϋπόθεση στην συνέχεια, είναι η σωστή μεταφορά των συντεταγμένων, που έχουν υπολογιστεί παραμετρικά, από το γραφικό περιβάλλον στο περιβάλλον της μηχανής. Σε πρώτη φάση χρειάζεται να εκφράσουμε όλες τις συντεταγμένες στο γραφικό περιβάλλον για όλες τις φάσεις και στην συνέχεια να γίνει η μετατροπή των στα συστήματα αναφοράς.



Σχήμα 3.10 Περιστροφή και mirroring άνω και κάτω δακτυλίου για την κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10, περιστρέφουμε τις μετρήσεις $\{R,L\} \doteq \{X,Y\}$ κατά 90^o ωρολογιακής φοράς, έτσι ώστε $\{X,Y\}_1 \doteq \{Z,X\}_{Lathe1}$. Βάσει της μορφολογίας που αναπτύξαμε στα κεφάλαια της θεωρίας και βάσει των πρώτων σεταρισμάτων που θα γίνουν στον άνω και κάτω δακτύλιο, εκφράζουμε τα σημεία ως:

$$\begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(i) \\ L(i) \end{bmatrix} \xrightarrow{\theta=-\pi/2}$$

$$\begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\pi/2) & -\sin(-\pi/2) \\ \sin(-\pi/2) & \cos(-\pi/2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(i) \\ L(i) \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R(i) \\ L(i) \end{bmatrix}, \forall i \in (1,19)$$

Ο δείκτης 1 δείχνει την αντιστοίχηση των σημείων στις φάσεις κατεργασίας, ενώ ο α/α το αντίστοιχο σημείο της γεωμετρίας όπως ορίστηκε. Όμοια έχουμε για τις συντεταγμένες των σημείων που ορίζουν το offset:

$$\begin{bmatrix} x_1 f(i) \\ y_1 f(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Rf(i) \\ Lf(i) \end{bmatrix}, \forall i \in (1,19)$$

Για τα δεύτερα σεταρίσματα χρειάζεται να κάνουμε ‘mirror’ όλη την γεωμετρία της πτερύγωσης από τον καθορισμό των συντεταγμένων της πρώτης φάσης, έτσι ώστε $\{X,Y\}_2 \doteq \{Z,X\}_{Lathe2}$. Έτσι χρησιμοποιούμε τον αντίστοιχο πίνακα που κάνει αντικατοπτρισμό ως προς τον Y άξονα ως κατωτέρω:

$$\begin{bmatrix} x_2(i) \\ y_2(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1(i) \\ y_1(i) \end{bmatrix}, \forall i \in (1,19)$$

όπου ο δείκτης 1 και 2 δείχνει την αντιστοίχηση των σημείων στις φάσεις κατεργασίας.

Ομοίως, για τις συντεταγμένες του offset:

$$\begin{bmatrix} x_2 f(i) \\ y_2 f(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 f(i) \\ y_1 f(i) \end{bmatrix}, \forall i \in (1,19)$$

Προφανώς στα ανωτέρω σχήματα η αρχή συντεταγμένων για το γραφικό περιβάλλον (0,0) αντιστοιχεί σε αρχή συντεταγμένων που ορίστηκε στο φασεολόγιο ως W1, W2, W3 και W4. Στο σχήμα 3.10 μπορεί να διαπιστώσει κάποιος την αντιστοιχία των αρχών συντεταγμένων, ανάλογα των σεταρισμάτων.

Με τον ίδιο συλλογισμό δημιουργούμε τις συντεταγμένες που θα βρεθεί αρχικά το κοπτικό εργαλείο πριν πραγματοποιήσει οποιαδήποτε κοπή. Όπως έχει ειπωθεί, τα αρχικά σημεία του κοπτικού πριν από τις κοπές για κάθε σετάρισμα ορίζονται ως Χαρχή1+offset=Χτεμαχίου και Ζαρχή1+offset=Ζτεμαχίου για το 1^o σετάρισμα κ.ο.κ. Ως Χτεμαχίου και Ζτεμαχίου ορίζουμε την μέγιστη διάσταση του τεμαχίου με θετική τιμή, και υποθέτοντας ότι το κοπτικό θα προσεγγίζει από την θετική περιοχή κατά Z

και Χ, προσθέτουμε την τιμή του offset που ορίζει ο σχεδιαστής. Τα αντίστοιχα αρχικά σημεία κοπής για όλα τα άλλα σεταρίσματα μπορούν να υπολογιστούν από ίδιους πίνακες περιστροφής και mirroring, όπως αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

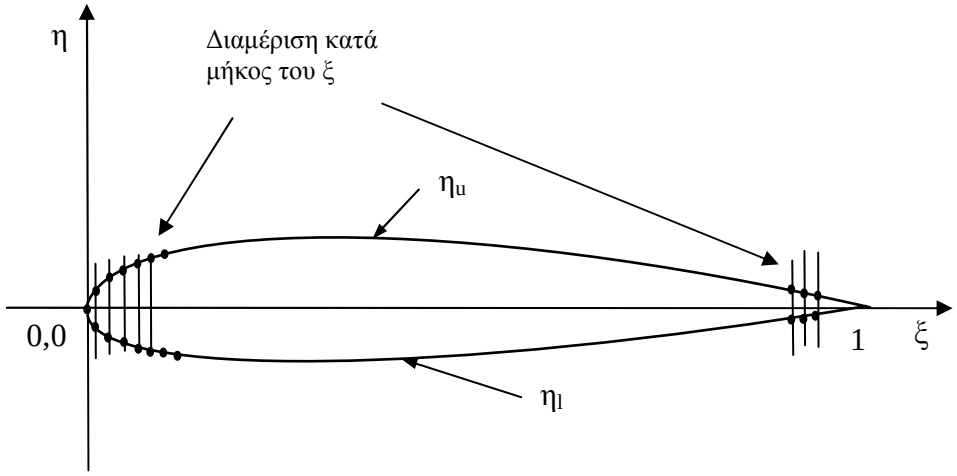
Με αυτές τις σκέψεις έχουμε, πλέον, πλήρη εικόνα της γεωμετρίας των δακτυλίων που θα κατασκευαστούν στον τόρνο. Το μόνο που απομένει είναι η παραγωγή των εντολών G που ορίζουν τον τρόπο των κινήσεων του κοπτικού.

Εν συνεχεία, προχωράμε στην εξαγωγή των συντεταγμένων των αεροτομών. Και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε αρχείο excel, διότι είναι πιο φιλικό ως προς τον χρήστη, ο οποίος μπορεί να επιλέξει να δει ανά πάσα στιγμή το γράφημα που χρειάζεται, με όποιες και όσες μεταβλητές θελήσει. Το αρχείο excel έχει έξι φύλλα υπολογισμού. Στο φύλλο 'Airfoil' σχεδιάζεται η αεροτομή, τοποθετείται στο δακτύλιο και φτιάχνεται γενικός τύπος για όλες τις αεροτομές. Στο φύλλο 'Tool path' δημιουργούνται τα σημεία από τα οποία θα περάσει το κέντρο του κοπτικού για να φτιάξει την αεροτομή. Στο φύλλο 'Tool range' υπολογίζεται το εύρος σάρωσης του κοπτικού, ώστε να μπορεί να γίνει έλεγχος για τις τροχιές του εργαλείου. Στο φύλλο 'Routes' εξετάζονται και δημιουργούνται τα αναγκαία πάσα για την κοπή του χώρου μεταξύ των αεροτομών, αν υπάρχει. Τέλος, στο φύλλο 'Connections' δημιουργούμε τα σημεία του κέντρου των πείρων, των οπών συγκράτησης και του χώρου για το συγκόλλημα. Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες αντιγράφονται στο φύλλο 'Coordinates', από όπου θα εξαχθούν και οι συντεταγμένες που είναι απαραίτητες για το αρχείο εξαγωγής εντολών G. Αρχικά εξηγείται πως γίνεται η διαδικασία για την εκχόνδριση και ύστερα θα επεκταθούμε στο αρχείο της αποπεράτωσης και ημι-αποπεράτωσης.

Αρχικά ο σχεδιαστής πρέπει να εισάγει τις συναρτήσεις των άνω και κάτω χειλών της αεροτομής η_u και η_l. Ύστερα, ορίζεται η κλίση της αεροτομής σε α rad, ο αριθμός των πτερυγίων N που θα φτιαχτούν, η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα Rεσ και Rεξ και τέλος η διαμέριση που θα γίνει στο μήκος της αεροτομής. Φτιάχνουμε τα σημεία του άνω (δείκτης u) και κάτω χείλους (δείκτης l) με τον επιθυμητό αριθμό της διαμέρισης, σχήμα 3.11, ως:

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_u = \begin{bmatrix} \alpha / \alpha \\ \eta_u(a/a) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_l = \begin{bmatrix} \alpha / \alpha \\ \eta_l(a/a) \end{bmatrix}$$

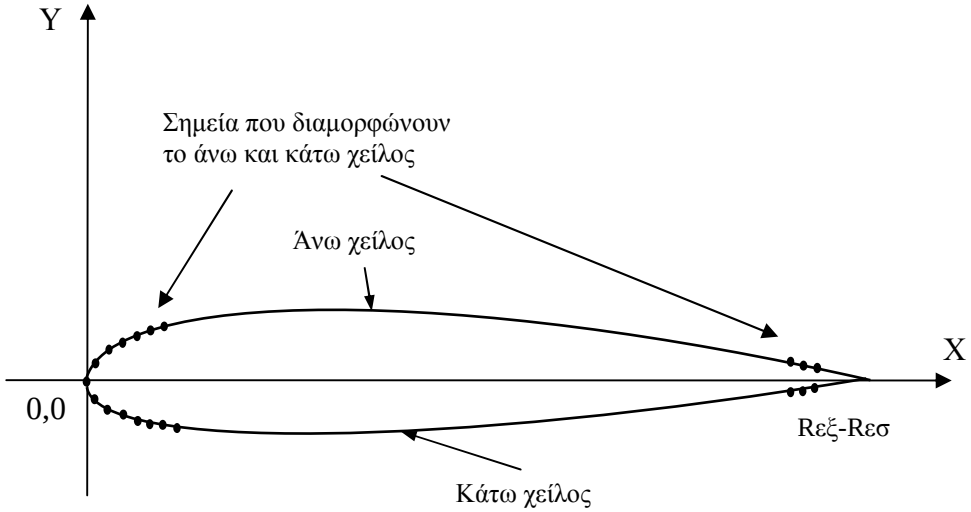


Σχήμα 3.11 Δημιουργία άνω και κάτω χείλους αεροτομής με διαμέριση, στο σύστημα {η,ξ}

Στην συνέχεια μεγεθύνουμε την αεροτομή κατά (Rεξ-Rεσ), σχήμα 3.12:

$$\left[\frac{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}\right]\left[\frac{\xi}{\eta}\right]_u$$

$$\left[\frac{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}\right]\left[\frac{\xi}{\eta}\right]_l$$

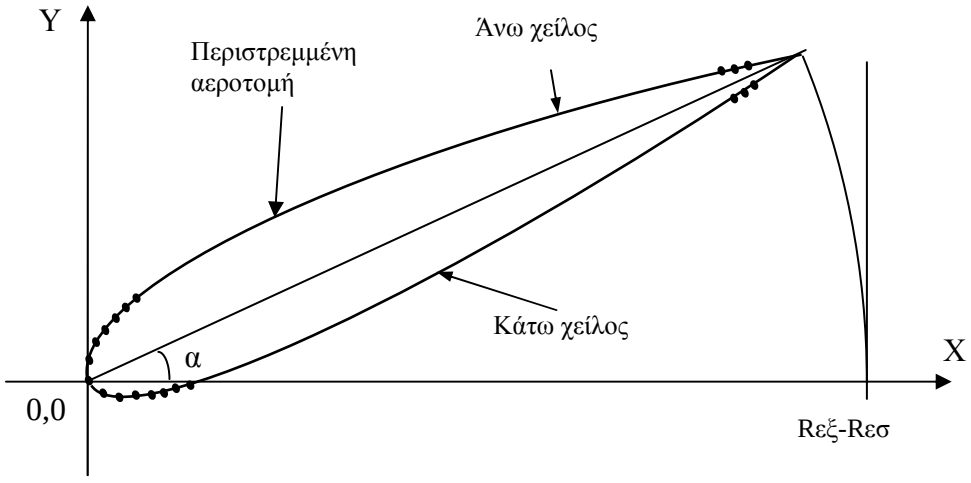


Σχήμα 3.12 Μεγέθυνση αεροτομής στις διαστάσεις του δακτυλίου, μεταφορά στο σύστημα {X,Y}

Περιστρέφουμε την αεροτομή κατά την επιθυμητή γωνία α, σχήμα 3.13:

$$\begin{bmatrix}\cos a & -\sin a\\ \sin a & \cos a\end{bmatrix}\left[\frac{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}\right]\left[\frac{\xi}{\eta}\right]_u$$

$$\begin{bmatrix}\cos a & -\sin a\\ \sin a & \cos a\end{bmatrix}\left[\frac{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}{\mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma}\right]\left[\frac{\xi}{\eta}\right]_l$$

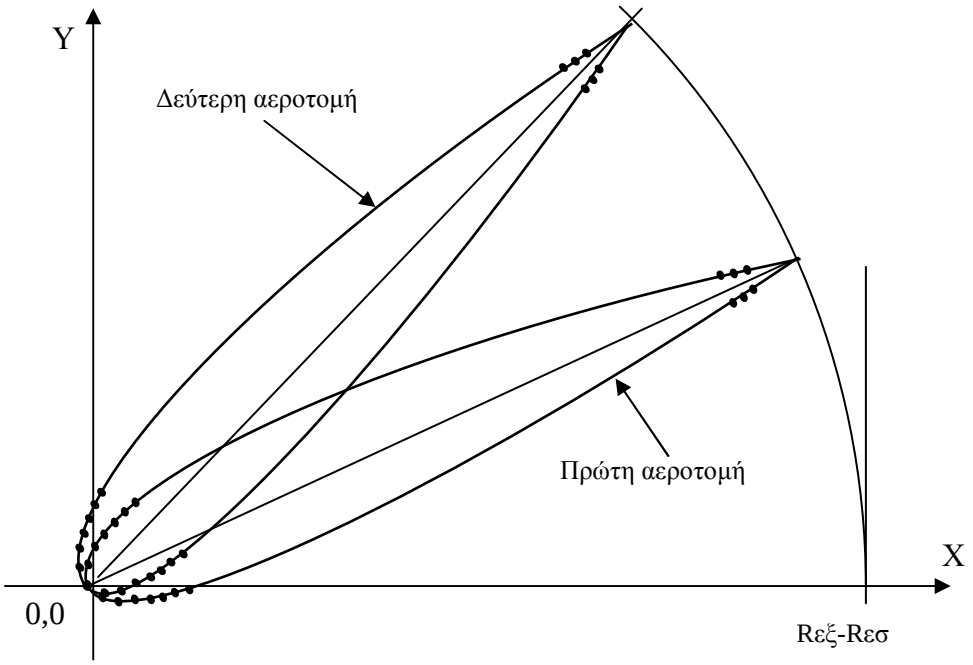


Σχήμα 3.13 Περιστροφή αεροτομής γύρω από το σημείο πρόσπτωσης

Γράφουμε τις συντεταγμένες για κάθε πτερύγωση, γνωρίζοντας τον αριθμό των επιθυμητών πτερυγίων N, έτσι ώστε Θ=2π(i-1)/N, με το i ο α/α του πτερυγίου, αρχόμενος από το 1, σχήμα 3.14.

$$\begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_u$$

$$\begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_l$$



Σχήμα 3.14 Δημιουργία αεροτομών γύρω από το σημείο (0,0)

Στην συνέχεια, γίνεται η μεταφορά της αεροτομής στο (X,Y)=(Rεσ,0) του δακτυλίου για την πρώτη αεροτομή:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{u,1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_u + \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\sigma \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{l,1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_l + \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\sigma \\ 0 \end{bmatrix}$$

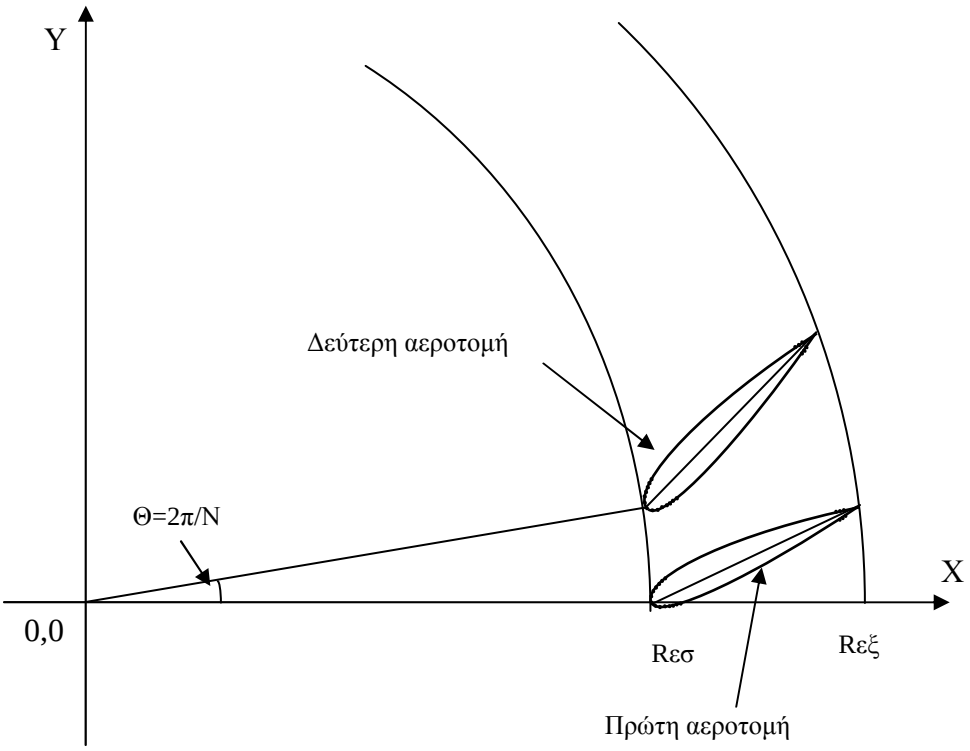
Για την τοποθέτηση όλων των άλλων αεροτομών στο δακτύλιο ως αρχικό σημείο πρέπει να λαμβάνεται ο όρος

$$\begin{bmatrix} xb \\ yb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta_i\,\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma \\ \sin\Theta_i\,\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma \end{bmatrix}$$

εφόσον πρόκειται για αεροτομή φυγόκεντρης ροής, αλλιώς ο σχεδιαστής πρέπει να χρησιμοποιήσει τον ακόλουθο όρο, για πτερυγώσεις κεντρομόλου ροής:

$$\begin{bmatrix} xb \\ yb \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Theta_i \, \mathrm{R}\, \varepsilon\xi \\ \sin\Theta_i \, \mathrm{R}\, \varepsilon\xi \end{bmatrix}$$

Έχουμε λοιπόν μια πρώτη εικόνα για τα πτερύγια στον δακτύλιο, σχήμα 3.15:



Σχήμα 3.15 Αρχική τοποθέτηση αεροτομών στον δακτύλιο

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει μεγέθυνση και μεταφορά της αεροτομής, λόγω της γωνίας και του πάχους της αεροτομής, ώστε αυτή να βρίσκεται ολόκληρη μέσα στα όρια του δακτυλίου. Είναι προφανές ότι αν η γωνία α είναι μηδενική και η αεροτομή αρκετά λεπτή τότε ο σχεδιαστής θα πρέπει να περάσει στο επόμενο βήμα και να μην μεγεθύνει την αεροτομή, ούτε να την μετατοπίσεί. Αν όμως η γωνία α είναι διάφορη του μηδενός τότε θα πρέπει να γίνει εξέταση των αεροτομών για το αν βρίσκονται μέσα στα όρια Rεσ και Rεξ και αν αυτό δεν ισχύει τότε πρέπει να ακολουθηθούν τα επόμενα βήματα. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με λογική συνθήκη στο excel ως:

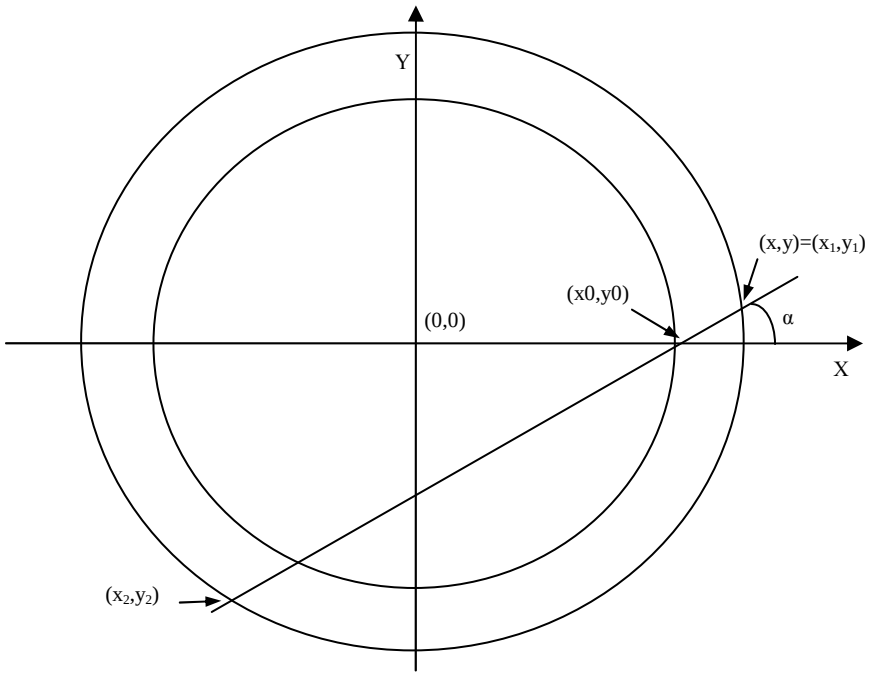
$$\sqrt{(x_{u,1}^2 + y_{u,1}^2)} \geq \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2 + 0^2)} \; \kappa\alpha\iota \; \sqrt{(x_{u,1}^2 + y_{u,1}^2)} \leq \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2 + 0^2)}$$
$$\sqrt{(x_{l,1}^2 + y_{l,1}^2)} \geq \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2 + 0^2)} \; \kappa\alpha\iota \; \sqrt{(x_{l,1}^2 + y_{l,1}^2)} \leq \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2 + 0^2)}$$

Εφόσον ισχύει για την πρώτη αεροτομή τότε θα ισχύει και για όλες τις άλλες. Αν όμως τουλάχιστον μια από τις παραπάνω συνθήκες δεν ισχύει, τότε ορίζεται μια διαφορετική διαμέριση στο μήκος του X άξονα, όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2, έτσι ώστε κάθε ένα της σημείο να είναι εν γένει σημείο πρόσπτωσης της αεροτομής

με συντεταγμένες ως (x_0,y_0) με τιμές από το (Rεσ,0) έως (Rεξ,0). Τότε, και βάση την γεωμετρία έχουμε ότι η ευθεία που περνά από το σημείο αυτό με γωνία α έχει, σχήμα 3.16:

Εξίσωση εξωτερικού κύκλου: $X^2+Y^2=R\varepsilon\xi^2$
Εξίσωση ευθείας που περνά από το σημείο (x_0,y_0) με κλίση α rad: $y-y_0=\tan\alpha*(x-x_0)$

$$\left.\begin{array}{l} y-y_0=\lambda(x-x_0) \\ x^2+y^2=R\varepsilon\xi^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} y=\lambda(x-x_0)+y_0 \\ x^2+y^2=R\varepsilon\xi^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} y^2=(\lambda(x-x_0)+y_0)^2 \\ x^2+y^2=R\varepsilon\xi^2 \end{array}\right\}$$



Σχήμα 3.16 Μεταφορά της χορδής της πρώτης αεροτομής από το (Rεσ,0) έως το (Rεξ,0) με την βοήθεια της νέας διαμέρισης στον X άξονα

Άρα για το σημείο (x_0,y_0) στην διαμέριση αυτή:

$$x^2+(\lambda(x-x_0)+y_0)^2=R\varepsilon\xi^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2-x^2=\lambda^2(x-x_0)^2+y_0^2+2\lambda(x-x_0)y_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2-x^2=\lambda^2(x^2-2xx_0+x_0^2)+y_0^2+2\lambda xy_0-2\lambda x_0y_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2-x^2=\lambda^2x^2-2\lambda^2xx_0+\lambda^2x_0^2+y_0^2+2\lambda xy_0-2\lambda x_0y_0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow -\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2+x^2+\lambda^2x^2-2\lambda^2xx_0+\lambda^2x_0^2+y_0^2+2\lambda xy_0-2\lambda x_0y_0=0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow x^2(1+\lambda^2)+(2\lambda y_0-2\lambda^2x_0)x+(\lambda^2x_0^2+y_0^2-2\lambda x_0y_0-\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2)=0$$

Επομένως για την δευτέρου βαθμού εξίσωση, βρίσκουμε την διακρίνουσα:

$$\Delta=\beta^2-4\alpha\gamma=(2\lambda y_0-2\lambda^2x_0)^2-4(1+\lambda^2)(\lambda^2x_0^2+y_0^2-2\lambda x_0y_0-\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2)$$

Και έχουμε τις τιμές του αγνώστου x, που είναι οι τιμές τομής του κύκλου με την ευθεία:

$$x_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha} =$$

$$= \frac{-(2\lambda y_0 - 2\lambda^2 x_0) \pm \sqrt{(2\lambda y_0 - 2\lambda^2 x_0)^2 - 4(1+\lambda^2)(\lambda^2 x_0^2 + y_0^2 - 2\lambda x_0 y_0 - \mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2)}}{2(1+\lambda^2)}$$

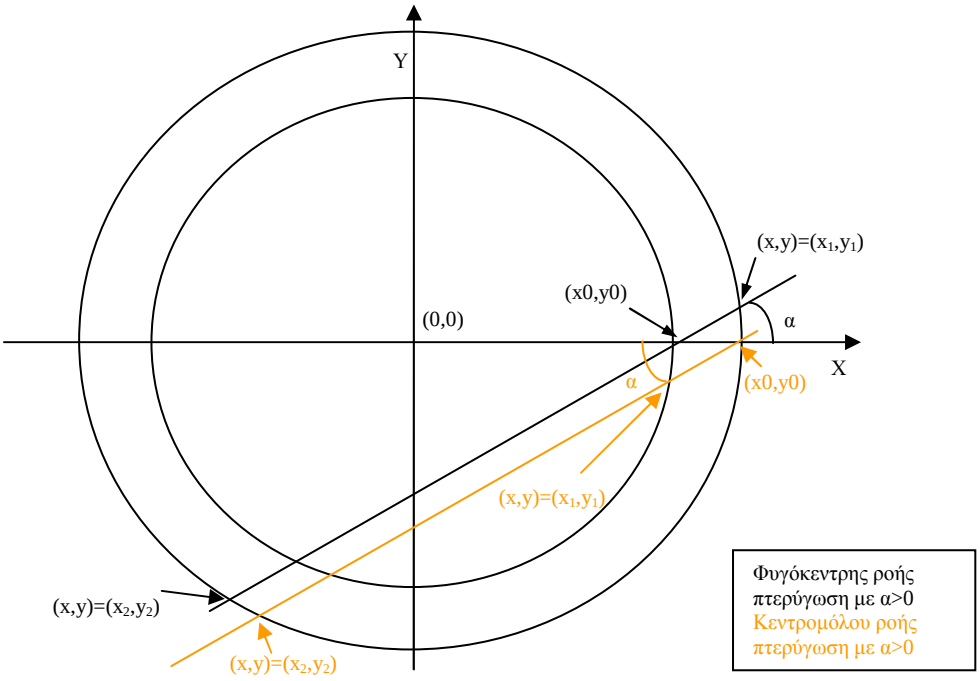
Επιλέγω για την θετική τιμή της ρίζας από το σχήμα 3.16, οπότε

$$x = \frac{-(2\lambda y_0 - 2\lambda^2 x_0) + \sqrt{(2\lambda y_0 - 2\lambda^2 x_0)^2 - 4(1+\lambda^2)(\lambda^2 x_0^2 + y_0^2 - 2\lambda x_0 y_0 - \mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2)}}{2(1+\lambda^2)}$$

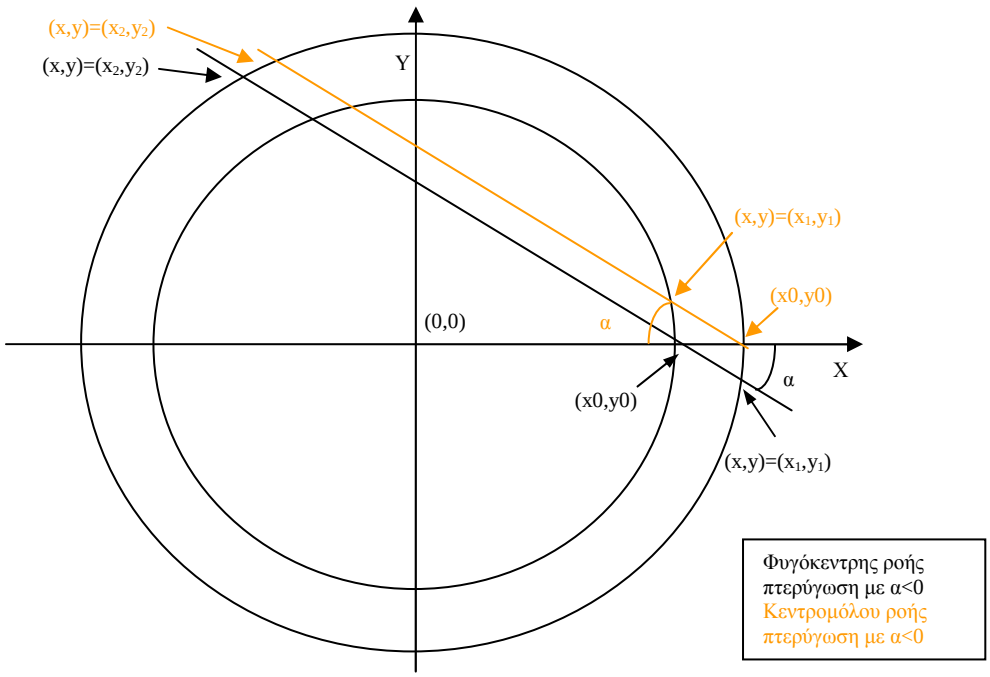
Άρα τελικά για το y του σημείου τομής της ευθείας και του εξωτερικού κύκλου είναι :

$$y = y_0 + \lambda(x - x_0)$$

Σε αυτό το σημείο, για λόγους της γενικότητας, ο σχεδιαστής πρέπει να έχει πλήρη εποπτεία για τις εξισώσεις των ευθειών και των κύκλων που χρησιμοποιεί ανάλογα με τον τύπο της πτερύγωσης που θέλει να κατασκευάσει. Στην περίπτωση που μελετάμε, φυγοκεντρικής πτερύγωσης, ο κύκλος στον οποίο πρέπει να φτάσει η αεροτομή είναι ο εξωτερικός. Σε άλλη περίπτωση που η πτερύγωση αφορούσε κεντρομόλου ροής, ο σχεδιαστής θα έπρεπε να επιλέξει την εξίσωση του εσωτερικού κύκλου. Προφανώς σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση ευθείας θα άλλαζε, ώστε ο συντελεστής κατεύθυνσης, εφαπτομένη της ευθείας, να αφορά κλίση α΄=π-α. Επιπλέον, η κλίση της αεροτομής παίζει και αυτή σημαντικό ρόλο για την επιλογή των σημείων των τομών, σχήματα 3.17, 3.18.



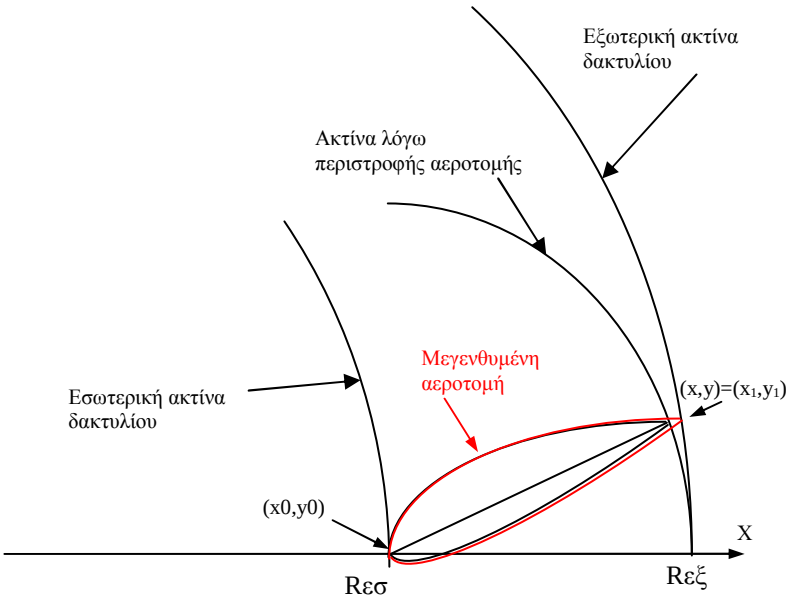
Σχήμα 3.17 Σημεία τομής ευθειών και κύκλου με α>0 σε φυγοκεντρικής και κεντρομόλου ροής πτερύγωση



Σχήμα 3.18 Σημεία τομής ευθειών και κύκλου με α<0 σε φυγοκεντρικής και κεντρομόλου ροής πτερύγωση

Τότε η διορθωτική μεγέθυνση που πρέπει να γίνει στην χορδή της αεροτομής, ώστε αρχομένης από κάθε σημείο (x_0,y_0) να φτάνει έως την εξωτερική ακτίνα είναι, σχήμα 3.19:

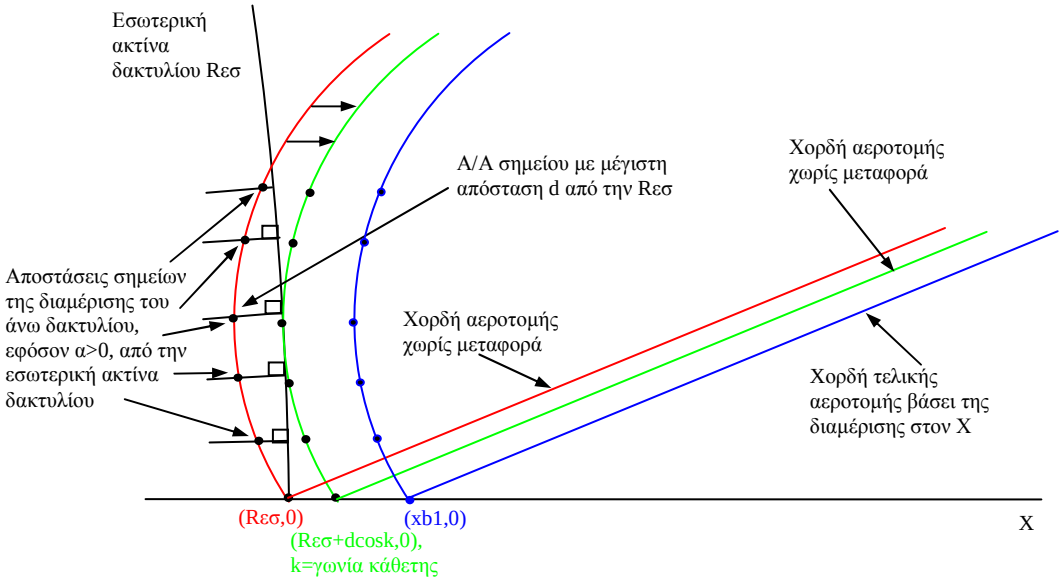
$$M = \frac{l'}{l} = \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{(R\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma)}$$



Σχήμα 3.19 Διορθωτική μεγέθυνση χορδής αεροτομής, ώστε να το σημείο εκφυγής να βρίσκεται στην Rεξ

Έχουμε λοιπόν ένα πλήθος αεροτομών με την κατάλληλη μεγέθυνση και μεταφορά. Τώρα πια υπάρχει ένα υποσύνολό όλων των εν γένει πρώτων αεροτομών που να εξασφαλίζουν την ορθότητα των ανωτέρω συνθηκών. Η μοναδική αεροτομή που θα επιλέξουμε τελικά είναι αυτή που έχει το μεγαλύτερο μήκος χορδής. Γίνεται ξανά ο έλεγχος για το χείλος το οποίο εμφανίζει το πρόβλημα (αν η γωνία α>0 τότε η συνθήκη που θα παραβιάζεται θα είναι αυτή του άνω χείλους, ενώ αν α<0 τότε η συνθήκη που θα παραβιάζεται θα αφορά το κάτω χείλος). Για το συγκεκριμένο χείλος ελέγχουμε όλες τις αποστάσεις των σημείων που ορίζουν την πρώτη αεροτομή, με σημείο πρόσπτωσης το σημείο (Rεσ,0), και βρίσκουμε την μέγιστη απόσταση που εμφανίζεται σε σχέση με τον εσωτερικό κύκλο. Για το σημείο αυτό, π.χ. το τέταρτο στην διαμέριση του άνω χείλους, ελέγχουμε σε όλες τις διορθωμένες με μεγέθυνση αεροτομές που κείτονται στον άξονα Χ, έτσι ώστε να βρούμε τη πρώτη περίπτωση που η απόσταση αυτή θα είναι μέσα στον χώρο του δακτυλίου.

Στο σχήμα 3.20, παρατηρούμε την κόκκινη αεροτομή με αρχικό σημείο το (Rεσ,0), το τέταρτο σημείο που έχει την μέγιστη απόσταση από την εσωτερική ακτίνα. Όλες οι έχουν μεγεθυνθεί, ώστε να φτάνουν μέχρι την εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου. Η πράσινη αεροτομή είναι μια ιδανική αεροτομή, όπου η απόσταση του τέταρτου σημείου είναι μηδενική από την εσωτερική ακτίνα. Αυτή όμως που τελικά θα επιλέξουμε δεν είναι η πράσινη αεροτομή, επειδή αυτή μπορεί να μην ορίζεται από την διαμέριση που έχουμε κάνει στον άξονα Χ. Άρα, αυτή που επιλέγουμε είναι η μπλε, αφού είναι η πρώτη στην διαμερισή μας για την οποία ισχύουν όλες οι συνθήκες που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 3.20 Εποπτεία τρόπου επιλογής της τελικής αεροτομής για το πρώτο πτερύγιο

Πρακτικά και με βάσει τις λογικές εντολές του excel βρίσκουμε για την αεροτομή

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{u,1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}_{(R\varepsilon\sigma,0)} \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ R\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_u + \begin{bmatrix} R\varepsilon\sigma \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{l,1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}_{(R\varepsilon\sigma,0)} \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ R\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_l + \begin{bmatrix} R\varepsilon\sigma \\ 0 \end{bmatrix}$$

το α/α για το οποίο ισχύει

$$\max\left[\sqrt{(x_{u,1}^2+y_{u,1}^2)}-\sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2+0^2)}\right] \textit{ και ισχύει ότι } \sqrt{(x_{u,1}^2+y_{u,1}^2)} \le \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2+0^2)}$$

για αυτό το α/α εξετάζουμε τις εν γένει αεροτομές σε όλα τα σημεία της διαμερίσης

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{u,1} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}_{(x_0,y_0)} \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a/a \\ \eta(\alpha/\alpha) \end{bmatrix}_u + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$

και επιλέγουμε το πρώτο σημείο (xb1,0)=(x_0,y_0), που να εξασφαλίζει την συνθήκη για το συγκεκριμένο α/α ώστε

$$\sqrt{(x_{u,1}^2+y_{u,1}^2)} \ge \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2+0^2)}$$

Τελικά εκφράζουμε τις συναρτήσεις που θα αφορούν όλες τις αεροτομές της πτερύγωσης, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που βρήκαμε, με τον γενικό τύπο και το επιλεγμένο σημείο (xb1,0)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{u,i} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}_{(xb1,0)} \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_u + \begin{bmatrix} xb1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}_{l,i} = \begin{bmatrix} \cos\Theta & -\sin\Theta \\ \sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}_{(xb1,0)} \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \\ \sin a & \cos a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \\ \mathrm{R}\,\varepsilon\xi - R\varepsilon\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}_l + \begin{bmatrix} xb1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Τέλος, γίνεται ένας τυπικός έλεγχος με τις ευρεθείσες συντεταγμένες ώστε

$$\sqrt{(X_{u,i}^2+Y_{u.i}^2)} \ge \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2+0^2)}\,\textit{και}\,\sqrt{(X_{u.i}^2+Y_{u.i}^2)} \le \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2+0^2)}$$
$$\sqrt{(X_{l.i}^2+Y_{l.i}^2)} \ge \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\sigma^2+0^2)}\,\textit{και}\,\sqrt{(X_{l.i}^2+Y_{l.i}^2)} \le \sqrt{(\mathrm{R}\,\varepsilon\xi^2+0^2)}$$

να ισχύουν σε όλα τα σημεία της διαμέρισης ορισμού της αεροτομής και για όλες τις αεροτομές.

Προς διευκόλυνση του σχεδιαστή, στο αρχείο ‘Airfoil’ δημιουργούμε τον εσωτερικό και εξωτερικό κύκλό του κάτω δακτυλίου και γνωρίζοντας τον αριθμό των αεροτομών παρουσιάζουμε γραφικά την δεύτερη αεροτομή. Τώρα μπορεί να δικαιολογηθεί η χρήση του προγράμματος excel σε μεγάλο βαθμό, ως προς την ευχρηστία του ως προς το πρόγραμμα matlab. Με αυτή την ανάλυση που κάναμε έχουμε ορίσει παραμετρικά όλες τις αεροτομές στον δακτύλιο, όσον αφορά την ορθότητα της θέσης τους και είναι πλέον δυνατή η άμεση παρατήρηση των χώρων που καλύπτουν.

Στο φύλλο ‘Tool path’ γνωρίζοντας την διαμέριση και τα σημεία που ορίζουν κάθε αεροτομή, ο σχεδιαστής εισάγει την τιμή της διαμέτρου του εργαλείου, άρα την ακτίνα του. Και σε αυτή την μεθοδολογία θα αναφερόμαστε στην πρώτη αεροτομή αφού αν βρεθούν οι τροχιές γύρω από αυτές τότε μπορούν με περιστροφή να βρεθούν γύρω από όλες τις άλλες αεροτομές.

Από την ανάλυση της αεροτομής γνωρίζουμε σε κάθε σημείο τον συντελεστή κατεύθυνσης της εφαπτόμενης της συνάρτησης που ορίζει το άνω ή κάτω χείλος ως dη/dx, επομένως γνωρίζουμε τον συντελεστή κατεύθυνσης της κάθετης της ως -1/(dη/dx). Η κάθετη που ορίζεται σε κάθε σημείο της πρώτης αεροτομής είναι η ευθεία $y-Y_1=-1/(d\eta/dx)*(x-X_1)$. Το εργαλείο, όμως, πρέπει να κινείται σε σημείο πάνω στην ευθεία και σε απόσταση από το σημείο της αεροτομής ίσο με την ακτίνα του, επομένως έχουμε:

Εξίσωση κάθετης ευθείας σε κάθε σημείο της αεροτομής: $y-Y_1=1/(d\eta/dx)*(x-X_1)$
Εξίσωση απόστασης κέντρου κοπτικού από το σημείο της αεροτομής: $D^2=R^2=(x_\kappa-X_1)^2+(y_\kappa-Y_1)^2$, με (X_1,Y_1) τυχαίο σημείο της πρώτης αεροτομής και (x_κ,y_κ) το σημείο του κέντρου του κοπτικού.

Επομένως έχουμε:

$$\left.\begin{array}{l} y-Y_1=-\dfrac{1}{dy/dx}(x-X_1) \\ D^2=R^2=(x_\kappa-X_1)^2+(y_\kappa-Y_1)^2 \end{array}\right\} \overset{dy/dx\neq 0}{\Rightarrow} \left.\begin{array}{l} -\dfrac{dy}{dx}(y_\kappa-Y_1)=(x_\kappa-X_1) \\ D^2=R^2=(x_\kappa-\mathrm{X}_1)^2+(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \end{array}\right\} \Rightarrow$$

$$\left.\begin{array}{l} (x_\kappa-\mathrm{X}_1)^2=(-\dfrac{dy}{dx})^2(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \\ D^2=R^2=(x_\kappa-\mathrm{X}_1)^2+(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \end{array}\right\} \Rightarrow \left.\begin{array}{l} (x_\kappa-\mathrm{X}_1)^2=(\dfrac{dy}{dx})^2(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \\ D^2=R^2=(x_\kappa-\mathrm{X}_1)^2+(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \end{array}\right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D^2=R^2=(\frac{dy}{dx})^2(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2+(y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \Rightarrow D^2=[(\frac{dy}{dx})^2+1](y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (y_\kappa-\mathrm{Y}_1)^2=\frac{D^2}{[(\frac{dy}{dx})^2+1]} \Rightarrow y_\kappa-\mathrm{Y}_1=\pm\sqrt{\frac{D^2}{[(\frac{dy}{dx})^2+1]}} \overset{D>0}{\Rightarrow} y_\kappa=\mathrm{Y}_1\pm\frac{D}{\sqrt{(\frac{dy}{dx})^2+1}}$$

Για το άνω χείλος παίρνω την θετική τιμή της ρίζας ενώ για το κάτω χείλος παίρνω την αρνητική της τιμή, σχήμα 3.21. Επομένως, έχω:

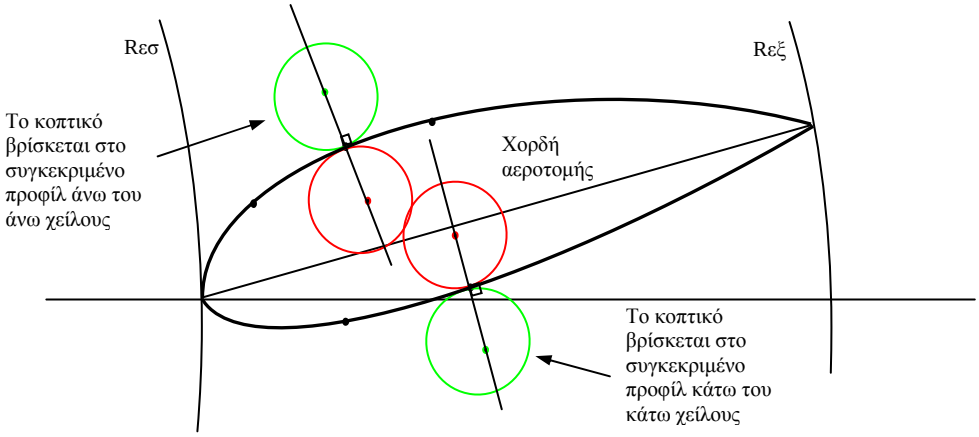
$$y_\kappa=\mathrm{Y}_{u,1}+\frac{D}{\sqrt{(\frac{dy}{dx})^2+1}}$$, για το άνω χείλος

και

$$y_\kappa=\mathrm{Y}_{l,1}-\frac{D}{\sqrt{(\frac{dy}{dx})^2+1}}$$, για το κάτω χείλος

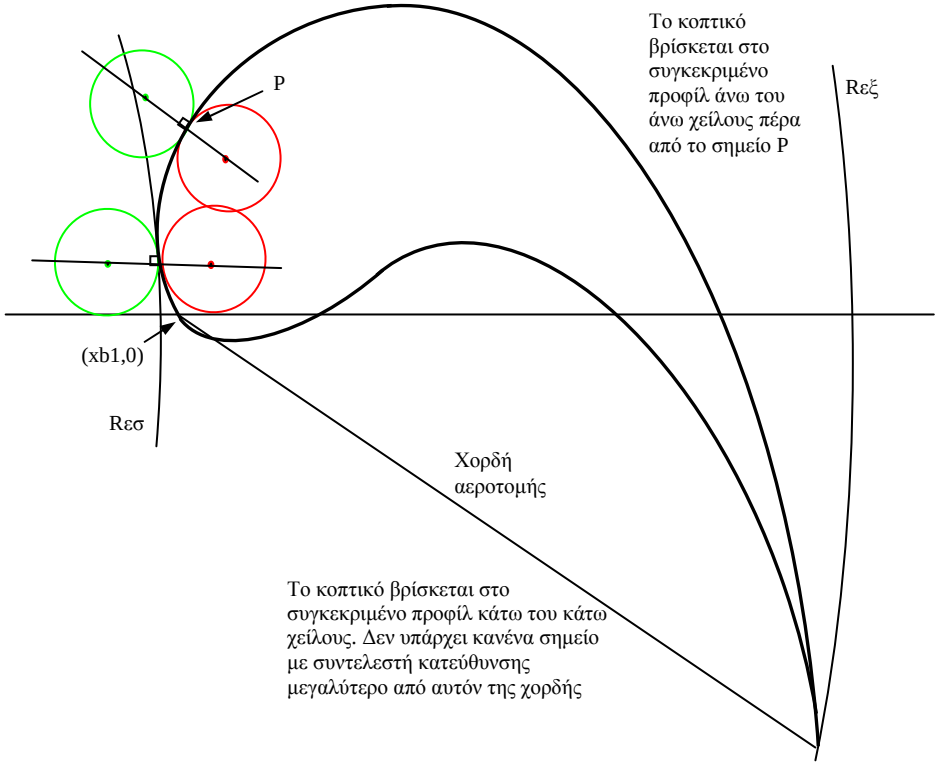
Άρα για την τετμημένη του σημείου του κοπτικού έχουμε και στις δυο περιπτώσεις

$$x_\kappa-X_1=-(\frac{dy}{dx})(y_\kappa-Y_1) \Rightarrow x_\kappa=X_1-(\frac{dy}{dx})(y_\kappa-Y_1)$$



Σχήμα 3.21 Ορθή και λανθασμένη επιλογή τιμών συντεταγμένων του κέντρου του κοπτικού, όσον αφορά το άνω ή κάτω χείλος, για την πρώτη αεροτομή

Με κάθε επιφύλαξη της γενικότητας μπορεί να οριστεί η σωστή θέση του κοπτικού από τις ανωτέρω εξισώσεις. Όμως, για πολύ καμπυλωμένες αεροτομές υπάρχει πιθανότητα οι συνθήκες ότι το κοπτικό βρίσκεται πάνω από το άνω χείλος και κάτω από το κάτω χείλος μπορεί να μην ισχύουν. Τότε ο σχεδιαστής πρέπει να ελέγξει αν γίνεται αυτό και να διαφοροποιήσει την επίλυση των δυο ανώτερων εξισώσεων, ώστε να μπορεί να επιλέξει σε δυο τιμές του $x_κ$, αν για παράδειγμα το εργαλείο βρίσκεται αριστερά ή δεξιά του χείλους, σχήμα 3.22. Διαφορετικά, ο σχεδιαστής μπορεί να προσθέσει κάποια άλλη συνθήκη, όπως για παράδειγμα αυτή που αναφέρεται στο σχήμα 3.22, ότι όσα σημεία του άνω χείλους είναι μικρότερα από το α/α του P και έχουν συντελεστή κατεύθυνσης μεγαλύτερο από αυτόν της χορδής τότε το $y_κ$ να λαμβάνεται όπως του κάτω χείλους, κλπ.



Σχήμα 3.22 Ορθή και λανθασμένη επιλογή τιμών συντεταγμένων του κέντρου του κοπτικού σε πολύ καμπυλωμένες αεροτομές. Το πρόβλημα λύνεται είτε με αλλαγή του τρόπου επίλυσης των εξισώσεων, είτε με εισαγωγή κατάλληλης συνθήκης

Για τις ακτίνες που πρέπει να πραγματοποιήσει το κοπτικό ώστε να γίνει κυκλική παρεμβολή μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων, έστω m και n, έχω, σχήμα 3.23:

$$\left.\begin{aligned} y &= y_m - \frac{1}{\lambda_m}(x - x_m) \\ y &= y_n - \frac{1}{\lambda_n}(x - x_n) \end{aligned}\right\} \underset{\lambda_m,\lambda_n \neq 0}{\overset{y=y_c}{\Longrightarrow}} y_m - \frac{1}{\lambda_m}(x_c - x_m) = y_n - \frac{1}{\lambda_n}(x_c - x_n) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow y_m - y_n = \frac{1}{\lambda_m}(x_c - x_m) - \frac{1}{\lambda_n}(x_c - x_n) \Rightarrow y_m - y_n = (\frac{1}{\lambda_m} - \frac{1}{\lambda_n})x_c - \frac{1}{\lambda_m}x_m + \frac{1}{\lambda_n}x_n \Rightarrow$$

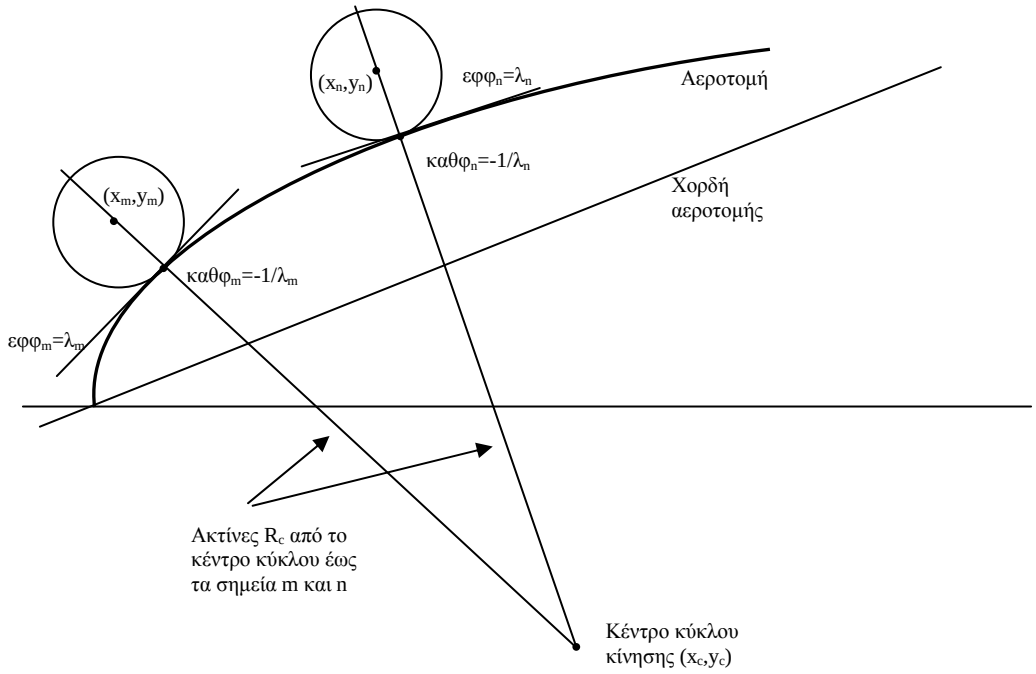
$$x_c = \frac{y_m - y_n + \frac{1}{\lambda_m}x_m - \frac{1}{\lambda_n}x_n}{(\frac{1}{\lambda_m} - \frac{1}{\lambda_n})}$$

Άρα και

$$y_c = y_m - \frac{1}{\lambda_m}(x_c - x_m) = y_m - \frac{1}{\lambda_m}(\frac{y_m - y_n + \frac{1}{\lambda_m}x_m - \frac{1}{\lambda_n}x_n}{(\frac{1}{\lambda_m} - \frac{1}{\lambda_n})} - x_m)$$

Επομένως και η ακτίνα θα είναι

$$R_c = \sqrt{(x_c - x_m)^2 + (y_c - y_m)^2} = \sqrt{(x_c - x_n)^2 + (y_c - y_n)^2}$$



Σχήμα 3.22 Κέντρο και ακτίνα κύκλου για την κυκλική παρεμβολή δυο διαδοχικών σημείων

Ως διαδικασία, γνωρίζοντας τις συντεταγμένες του σημείου m και την ακτίνα του κύκλου φτάνουμε στο σημείο n. Ονομάζουμε λοιπόν $(x_m,y_m,R_m)\rightarrow(x_n,y_n)$. Αυτό

έχει σημασία, όπως θα δούμε στην συνέχεια, όταν το κοπτικό πρέπει να πάει με ανθωρολογιακή φορά από το σημείο n στο m τότε θα αναφερόμαστε στα δεδομένα ως $(x_n,y_n,R_m)\rightarrow(x_m,y_m)$.

Σε όλες τις ανώτερες εξισώσεις έγινε η επιφύλαξη της γενικότητας ότι όλοι οι συντελεστές, άρα παράγωγοι ορίζονταν. Όμως, όπως φαίνεται από τα δεδομένα σε δυο σημεία έχουμε επιπλοκή στον ορισμό τους. Αυτά είναι το σημείο πρόσπτωσης και το σημείο εκφυγής. Στο πρώτο σημείο η παράγωγος dy/dx δεν ορίζεται αφού η εφαπτόμενη στο σημείο αυτό είναι παράλληλη με τον άξονα Y. Εντούτοις, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν συντρέχει λόγος συνέχειας σε αυτό το σημείο των δυο συναρτήσεων του άνω και κάτω χείλους, γεγονός το οποίο συμβαίνει στο σημείο εκφυγής. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, το σημείο εκφυγής δεν ορίζεται ως ένα, αφού τα δεδομένα του άνω και κάτω χείλους στο σημείο ξ=1 διέφεραν του η(1)=0.

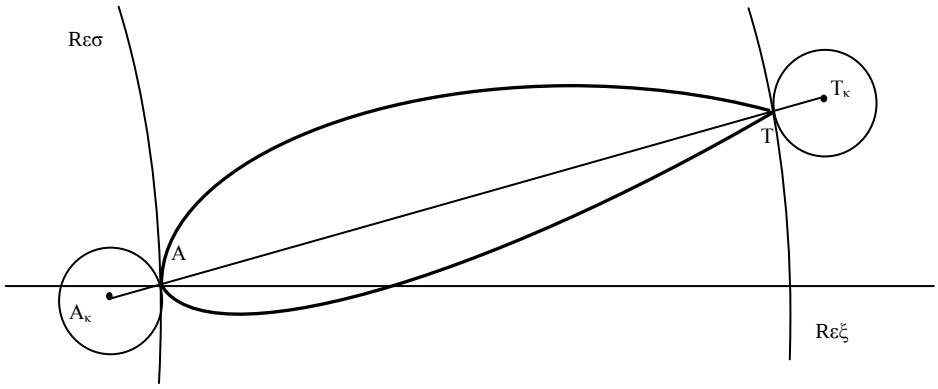
Μελετώντας πρώτα το σημείο πρόσπτωσης έχουμε ότι το σημείο που πρέπει να φτιαχτεί είναι το A
(xb1, 0),

άρα το κοπτικό πρέπει να πάει στο σημείο $A_κ$
(xb1-D/2*cosα, 0-D/2*sinα)

Στην συνέχεια μελετώντας το σημείο εκφυγής έχουμε ότι το σημείο που πρέπει να φτιαχτεί είναι το T
(xb1+(Rεξ-Rεσ)*M_{xb1}*cosα, 0+(Rεξ-Rεσ)*M_{xb1}*sinα)

άρα το κοπτικό πρέπει να πάει στο σημείο $T_κ$
(xb1+[(Rεξ-Rεσ)*M_{xb1}+D/2]*cosα, 0+[(Rεξ-Rεσ)*M_{xb1}+D/2]*sinα)

Στο σχήμα 3.23 φαίνονται τα αντίστοιχα σημεία. Είναι ευνόητο ότι στις παραπάνω συντεταγμένες για την γενική περίπτωση ο σχεδιαστής πρέπει να βάλει στην θέση του (xb1,0) το αντίστοιχο (x_0,y_0) που επιβάλλεται, ανάλογα με την πτερύγωση.



Σχήμα 3.23 Αρχικό και τελικό σημείο αεροτομής και κοπτικού εργαλείου

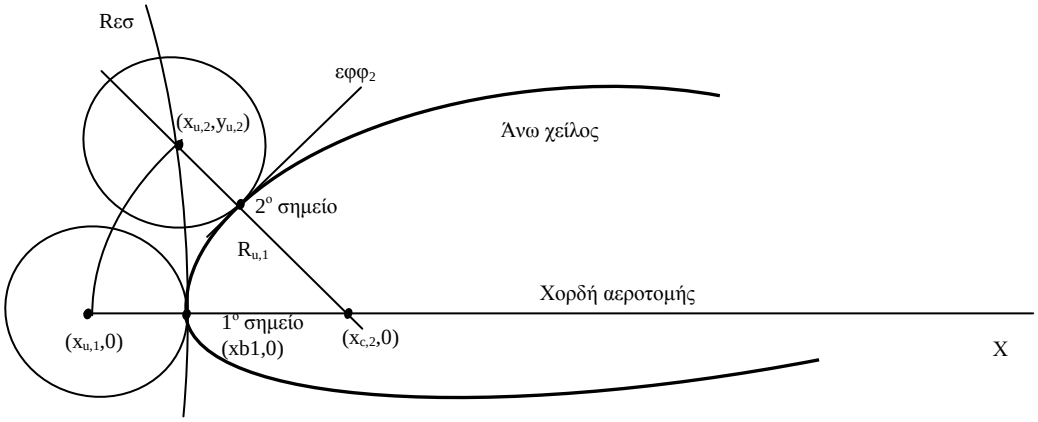
Πλέον, το μόνο που δεν γνωρίζουμε είναι οι ακτίνες που πρέπει να διαγράψει το κοπτικό σε αυτά τα δυο σημεία. Γυρνώντας ορισμένα στάδια πίσω στην παραμετροποίηση της αεροτομής, μπορούμε να βρούμε την ακτίνα με την βοήθεια των διπλανών τους σημείων, ήτοι του δεύτερου σημείου όταν αναφερόμαστε στην δημιουργία του πρώτου και του προτελευταίου, όταν αναφερόμαστε στην δημιουργία του τελευταίου, είτε πρόκειται για το άνω χείλος είτε για το κάτω.

Για το πρώτο και δεύτερο λοιπόν σημείο και πριν γίνει η περιστροφή της αεροτομής ως προς την επιθυμητή γωνία α, θεωρούμε ότι το κοπτικό θα κάνει κυκλική κίνηση με κέντρο το σημείο που τέμνει η κάθετη στο σημείο 2 τον άξονα Χ, που στην συγκεκριμένη φάση της παραμετροποίησης είναι και η κάθετη στο προαναφερθέν σημείο Α. Έχουμε λοιπόν για εξίσωση της κάθετης ευθείας στο σημείο 2

$y = y_2 - \frac{1}{\lambda_2}(x - x_2) \overset{y=0}{\Longrightarrow} x = \lambda_2 y_2 + x_2$, το σημείο X_c,του κύκλου και άρα η ακτίνα θα είναι

$R_{u,1} = \sqrt{(x_c - x_{u,1})^2 + (y_c - y_{u,1})^2}$,

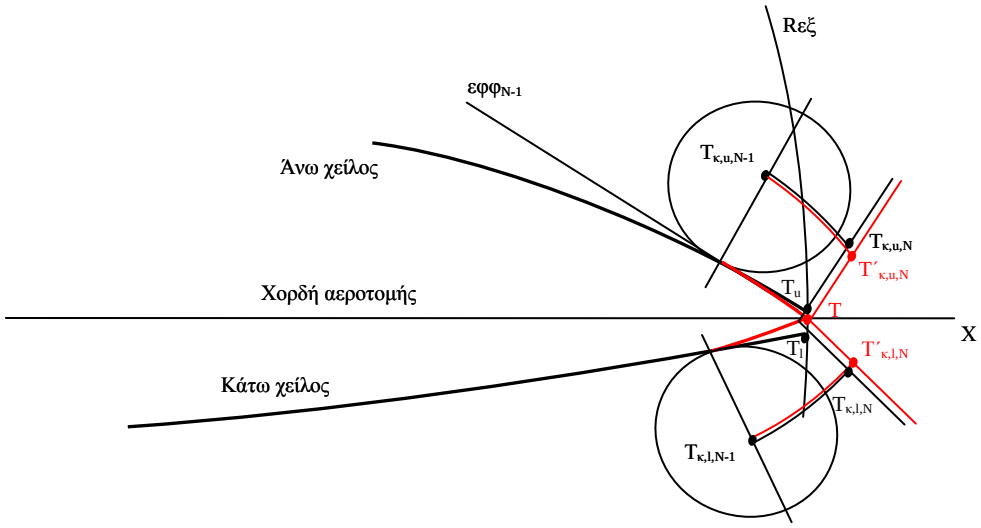
αναφερόμενοι με την παραδοχή που έγινε προηγουμένως για την ονομασία του α/α των ακτινών. Όμοια γίνεται και για την ακτίνα $R_{l,1}$ του κάτω χείλους.



Σχήμα 3.24 Εύρεση ακτίνας κύκλου κοπτικού εργαλείου πρώτου και δεύτερου σημείου της αεροτομής

Παρόμοια γίνεται και στο τελευταίο σημείο της αεροτομής με την βοήθεια του προτελευταίου. Σε αυτή την περίπτωση, σε αντίθεση με το πρώτο σημείο της αεροτομής, ο κύκλος που θα κάνει το κοπτικό διαμορφώνει το τελικό άκρο, ώστε αυτό να μην έχει καθόλου πάχος στο τελευταίο του σημείο. Αντίθετα με όσα επιβάλλουν τα δεδομένα, δηλαδή την ύπαρξη του πάχους στο σημείο αυτό, έστω και ελάχιστο, η παρούσα λύση δεν μας δημιουργεί κάποιο πρόβλημα, διότι αφενός το πάχος σε αυτό το σημείο πρέπει από την θεωρία των αεροτομών να είναι μηδέν, οι δε εξισώσεις διαμορφώθηκαν χωρίς αλλαγή των δεδομένων, όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2, για να μην γίνει αλλοίωση των συναρτήσεων των χειλών. Σε κάθε περίπτωση το πάχος που πρόκειται να αφαιρεθεί με την παραδοχή της κυκλικής κίνησης είναι περίπου της τάξης του 0,0015/1, τιμή που πλησιάζει αρκετά στα όρια της μηχανής. Μειώνοντας την επίδραση της προσέγγισης ο σχεδιαστής μπορεί να διαλέξει μεγαλύτερη διαμέριση στον ορισμό των σημείων της αεροτομής.

Επειδή η τιμή στο τελικό σημείο είναι διαφορετική από το μηδέν αυτό σημαίνει ότι σε αυτό το σημείο της αεροτομής δεν παρουσιάζεται η απροσδιοριστία του ότι dη/dx=0. Αυτό μας ωθεί στο να αλλάξουμε μόνο το τις συντεταγμένες του τελευταίου σημείου ($X_{u,N}$,$Y_{u,N}$), σε αυτές του επιθυμητού Τ άρα θα ισχύει λαμβάνοντας υπόψη και το κάτω χείλος ότι ($X_{u,N}$,$Y_{u,N}$)=($X_{l,N}$,$Y_{l,N}$)=Τ, σχήμα 3.25. Εννοείται ότι ο τρόπος υπολογισμού της ακτίνας ακολουθεί την μεθοδολογία της εύρεσης ακτίνας σε όλα τα ενδιάμεσα σημεία. Στο σχήμα 3.36 φαίνεται το προφίλ της αεροτομής με μαύρο χρώμα και με κόκκινο φαίνεται το προφίλ που θα κατασκευαστεί από την κίνηση του κοπτικού.



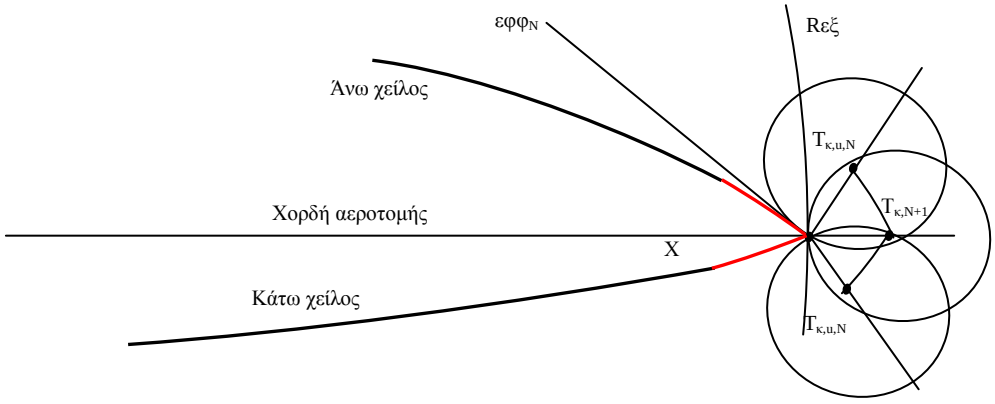
Σχήμα 3.25 Εύρεση ακτίνας κύκλου κοπτικού εργαλείου τελευταίου και προτελευταίου σημείου του άνω και του κάτω χείλους με την αλλαγή των τελικών σημείων T_u και T_l σε ένα σημείο T

Ωστόσο με αυτή την αλλαγή δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς το τελικό σημείο της τροχιάς, ώστε αυτή να είναι κλειστή διαδρομή. Με την βοήθεια του Τκ, όπως ορίστηκε όμως ανωτέρω, τότε έχουμε μια κλειστή διαδρομή. Αυτό είναι το σημείο N+1, και η ακτίνα που πρέπει να βρεθεί, υπολογίζεται όπως και για το πρώτο σημείο, σχήμα 3.26. Προφανώς, και με αυτή την ενέργεια μας αποδεσμευόμαστε από την απροσδιοριστία που δημιουργήσαμε εσκεμμένα ότι το τελικό σημείο T να έχει δυο παραγώγους, που οφείλονται στην συνάρτηση του άνω και του κάτω χείλους.

Έχουμε λοιπόν για εξίσωση της κάθετης ευθείας στο σημείο N, όπου N ο αριθμός της διαμέρισης ότι

$y = y_N - \frac{1}{\lambda_N}(x - x_N) \overset{y=0}{\Longrightarrow} x = \lambda_N y_N + x_N$, το σημείο X_c,του κύκλου και άρα η ακτίνα θα είναι

$$R_{c,N} = \sqrt{(x_c - x_{u,N})^2 + (y_c - y_{u,N})^2} = \sqrt{(x_c - x_{l,N})^2 + (y_c - y_{l,N})^2} \ ,$$



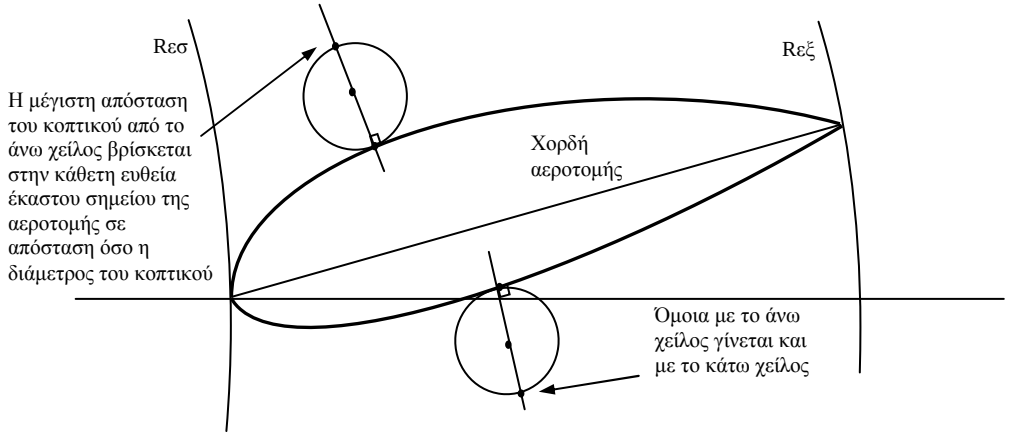
Σχήμα 3.26 Εύρεση ακτίνας κύκλου κοπτικού εργαλείου τελευταίου σημείου της τροχιάς του άνω και του κάτω χείλους

Αφού έχουμε βρει την ακτίνα σε αυτά τα ιδιάζοντα σημεία, μπορούμε να περιστρέψουμε την αεροτομή. Με την περιστροφή αλλάζουν τα αρχικά και τελικά σημεία των κοπών, τα οποία τα γνωρίζουμε, όμως οι ακτίνες των κύκλων του κοπτικού εργαλείου δεν επηρεάζονται από την περιστροφή, ως αναλλοίωτες ποσότητες στην περιστροφή. Βάσει αυτού του γεγονότος, όλες οι ακτίνες του κοπτικού εργαλείου σε όλες τις άλλες αεροτομές θα είναι οι ίδιες με τις αντίστοιχες ακτίνες της πρώτης αεροτομής.

Στο φύλλο 'Tool path' γίνεται κατάστρωση όλων των ανώτερων υπολογισμών καθώς και ο έλεγχος των τροχιών για τις δυο πρώτες αεροτομές. Αυτός γίνεται οπτικά από τον σχεδιαστή και, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, δεν πρέπει να υπάρχει κοινός τόπος μεταξύ τους.

Στο φύλλο 'Tool range' Συνεχίζουμε με τους υπολογισμούς των εύρων του εργαλείου μεταξύ δυο αεροτομών. Το σκεπτικό της εποπτείας του χώρου που δημιουργούν τα εργαλεία στο πέρασμά τους γύρω από την αεροτομή είναι το ίδιο με αυτό των τροχιών. Εξετάζεται η πρώτη αεροτομή και σε αυτή την περίπτωση και τα ίδια ισχύουν και για τις άλλες αεροτομές. Το μόνο που αλλάζει όταν αναφερόμαστε στα εύροι των εργαλείων, σε σχέση με τις τροχιές, είναι ότι η απόσταση από το προφίλ της αεροτομής δεν είναι D=R του εργαλείου, αλλά D=D διάμετρος του εργαλείου. Άρα ουσιαστικά το φύλλο 'Tool range' είναι μια αντιγραφή του 'Tool path' όσον αφορά τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται, όμως σε όλες τις εξισώσεις χρησιμοποιείται η διάμετρος του εργαλείου.

Στην συνέχεια γίνεται έλεγχος για τα εύρη των εργαλείων σε δυο διαδοχικές αεροτομές και γραφικά μπορούμε να διαπιστώσουμε αν χρειάζονται πάσα για τυχόν χώρους που δεν έχουν κοπεί, σχήμα 3.27. Εννοείται ότι για να γίνει αυτό χρειαζόμαστε στο γραφικό περιβάλλον και τις ακτίνες του δακτυλίου. Αυτές είναι στους γενικούς τύπους εποπτείας μαζί με το άνω εύρος της πρώτης αεροτομής και το κάτω εύρος της δεύτερης αεροτομής.



Σχήμα 3.27 Εύρεση σημείων κατά την σάρωση του κοπτικού εργαλείου σε όλα τα σημεία των τροχιών του άνω και κάτω χείλους για την πρώτη αεροτομή

Τότε στο φύλλο 'Routes' και αν διαπιστωθεί ότι χρειάζονται πάσα, δημιουργούμε ανάλογα την διάμετρο του εργαλείου, ομόκεντρους κύκλους οι οποίοι θα μας δείχνουν τις τροχιές και τα εύροι των πάσων. Ο σχεδιαστής χρειάζεται να επιλέξει τον ελάχιστο αριθμό των πάσων που θα εξασφαλίζουν την πλήρη κοπή του ή των χώρων που υπάρχουν. Έτσι γνωρίζοντας τις τροχιές των πάσων ο σχεδιαστής χρειάζεται να αναγνωρίσει σε ποια σημεία αυτές οι τροχιές τέμνουν τις τροχιές για την δημιουργία του προφίλ της αεροτομής. Οι ακτίνες των τροχιών των πάσων είναι

R πάσο =Rεξ-i*Dεργ,

με αρχή το Rεξ-Dεργ/2 αν ο χώρος είναι μοναδικός και προς τον εξωτερική ακτίνα, αλλιώς μπορεί να αλλάξει σε Rεσ- Dεργ/2, αν ο χώρος είναι μοναδικός και προς τον εσωτερική ακτίνα. Με αυτό το σκεπτικό ο σχεδιαστής μπορεί να διαμορφώσει τα αντίστοιχα όρια αν ο χώρος δεν είναι ενιαίος, από την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.
Ο σχεδιαστής αφού βρει τον απαιτούμενο αριθμό των i≤roundup(Rεξ-Rεσ)/Dεργ που γίνουν εστιάζει στους α/α των σημείων της τροχιάς ώστε την ίδια διαδικασία σε όλα τα πάσα που είναι αναγκαία. Για αυτά τα σημεία πρέπει ισχύει

$$\sqrt{(X_{\kappa,u}^2+Y_{\kappa,u}^2)}=\sqrt{(\mathrm{R}\,\pi\alpha\sigma o^2+0^2)}$$
$$\sqrt{(X_{\kappa,l}^2+Y_{\kappa,l}^2)}=\sqrt{(\mathrm{R}\,\pi\alpha\sigma o^2+0^2)}$$

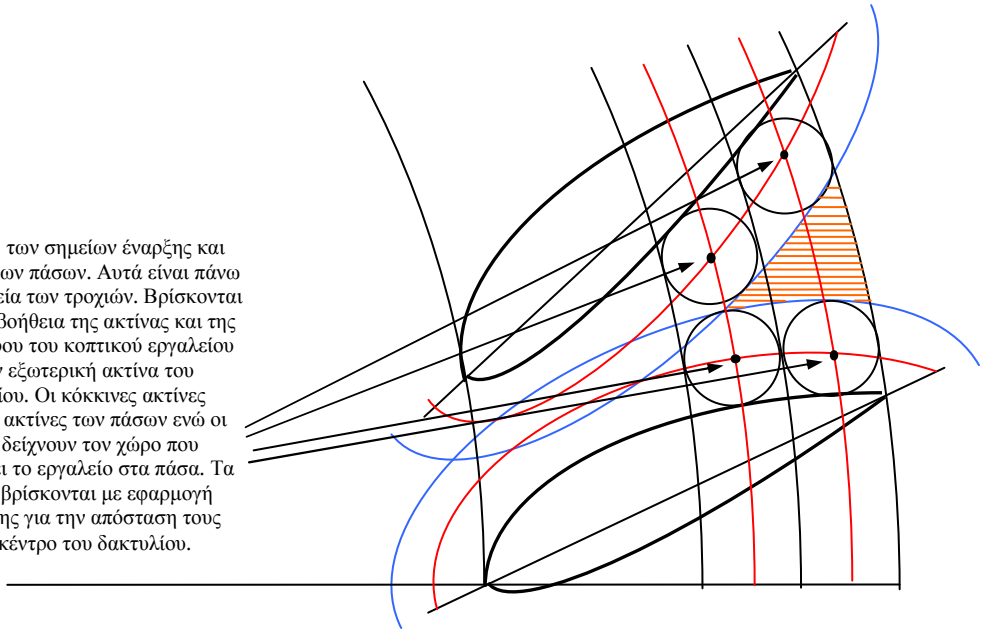
, για το άνω και κάτω χείλος

έτσι ώστε, και λαμβανόμενοι υπόψη τη διαμέριση, να μην εμφανίζεται χώρος που να μην έχει κοπεί, δηλαδή ο σχεδιαστής να έχει ως γνώμονα ότι η συνθήκη αυτή μπορεί να μην ισχύει ακριβώς σε σημείο της διαμέρισης αλλά στο ενδιάμεσο χώρο. Επομένως ο σχεδιαστής πρέπει να βρει το πρώτο σημείο για το οποίο ισχύει η ανισότητα

$$\sqrt{(X_{\kappa,u,p}^2+Y_{\kappa,u,p}^2)}\le\sqrt{(\mathrm{R}\,\pi\alpha\sigma o^2+0^2)}$$
$$\sqrt{(X_{\kappa,l,q}^2+Y_{\kappa,l,q}^2)}\le\sqrt{(\mathrm{R}\,\pi\alpha\sigma o^2+0^2)}$$

, για το άνω και κάτω χείλος

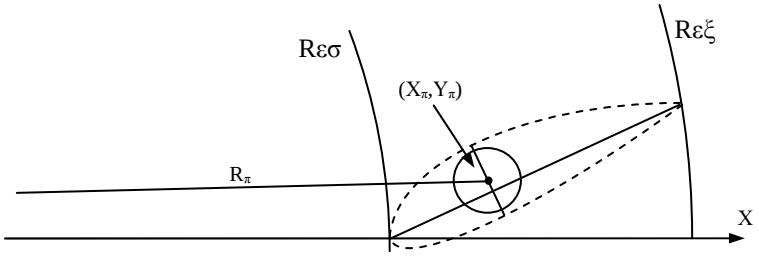
και για χώρο ο οποίος είναι ενιαίος και βρίσκεται κοντά στην εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου. Βρίσκοντας τους α/α p και q της διαμέρισης του άνω και κάτω χείλους που αφορούν την τροχιές, ο σχεδιαστής προχωράει με την ίδια μεθοδολογία για όλα τα i καλύπτοντας πλήρως τον χώρο που χρειάζεται κοπή. Στο τέλος μπορεί να γίνει γραφικός έλεγχος για την ορθότητα όλων των ανωτέρω επιλογών, σχήμα 3.28.



Εύρεση των σημείων έναρξης και λήξης των πάσων. Αυτά είναι πάνω σε σημεία των τροχιών. Βρίσκονται με την βοήθεια της ακτίνας και της διαμέτρου του κοπτικού εργαλείου από την εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου. Οι κόκκινες ακτίνες είναι οι ακτίνες των πάσων ενώ οι μαύρες δείχνουν τον χώρο που σαρώνει το εργαλείο στα πάσα. Τα σημεία βρίσκονται με εφαρμογή συνθήκης για την απόσταση τους από το κέντρο του δακτυλίου.

Σχήμα 3.28 Εύρεση σημείων έναρξης και λήξης των πάσων ενδιάμεσα του χώρου των αεροτομών

Για την δημιουργία των πείρων χρειαζόμαστε την το προφίλ της αεροτομής. Από τα σημεία που έχουμε και με βάση την διαμέριση βρίσκουμε το α/α του σημείου που έχει το μεγαλύτερο πάχος, ως το α/α του ξ για το οποίο ισχύει $\max\left[(\eta_u)-(\eta_l)\right]$.
Εφόσον αυτό ισχύει για την αδιάστατη αεροτομή τότε το α/α είναι το ίδιο και στην τελική αεροτομή, αφού αυτός ο αριθμός παραμένει αναλλοίωτος καθ'όλη την διάρκεια των περιστροφών και μεταφορών της.
Τότε για αυτό το ξ βρίσκεται το μήκος $\sqrt{(X_u^2+Y_u^2)-(X_l^2+Y_l^2)}$, το οποίο στρογγυλοποιείται προς το μηδέν, και θα αποτελεί την διάμετρο του πείρου. Εν συνεχεία βρίσκεται το κέντρο του πείρου ως το μέσο του σημείου με το μεγαλύτερο πάχους ως $X_\pi=\frac{(X_u-X_l)}{2}$ και $Y_\pi=\frac{(Y_u-Y_l)}{2}$, άρα και η ακτίνα $R_\pi=\sqrt{(X_\pi^2+Y_\pi^2)}$, σχήμα 3.29.



Σχήμα 3.29 Εύρεση ακτίνας και κέντρο του πείρου συγκράτησης

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τους κύκλους που πρέπει να κάνει το κοπτικό γύρω από το κέντρο (X_π,Y_π). Το μήκος της περιφέρειας του δακτυλίου στην ακτίνα R_π είναι $S=2\pi R_\pi$, επομένως το μήκος μεταξύ δυο κέντρων των πείρων είναι $S_\pi=2\pi R_\pi/N$, όπου N ο αριθμός των πτερύγιων. Τότε επιλέγεται να γίνουν ομόκεντροι κύκλοι γύρω από το κέντρο με ακτίνες R=i*D/2 και όρια τα $\frac{rounddown\sqrt{(X_u^2+Y_u^2)-(X_l^2+Y_l^2)}}{2}+\frac{D\varepsilon\rho\gamma}{2}\le R\le(S_\pi-\frac{D\varepsilon\rho\gamma}{2})$, όπου ο πρώτος όρος είναι η ακτίνα η οποία διαμορφώνει το τελικό σχήμα του πείρου, ενώ ο τελευταίος όρος είναι η μέγιστη ακτίνα που θα φτάσει το κοπτικό. Σε αυτό το σημείο ισχύει ότι η μέγιστη ακτίνα δεν θα φτάνει ποτέ την τροχιά διαμόρφωσης του επόμενου πείρου, αφού ισχύει ότι

$$\frac{rounddown\sqrt{(X_u^2+Y_u^2)-(X_l^2+Y_l^2)}}{2}+\frac{D\varepsilon\rho\gamma}{2}\le S_\pi-\frac{D\varepsilon\rho\gamma}{2}\Rightarrow$$

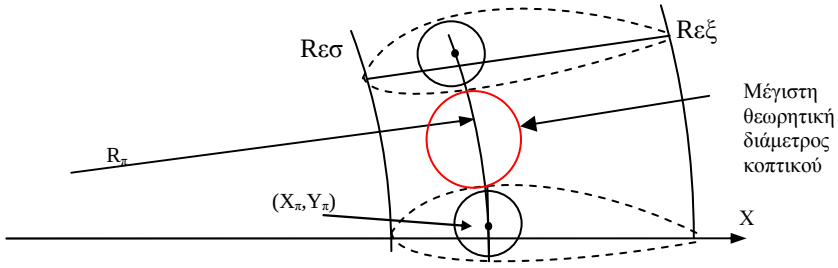
$$\Rightarrow\frac{rounddown\sqrt{(X_u^2+Y_u^2)-(X_l^2+Y_l^2)}}{2}+D\varepsilon\rho\gamma\le S_\pi$$

Στην ακραία περίπτωση, θεωρούμε οι δυο αεροτομές έχουν απόσταση όση με τη Dεργmax στο σημείο του μέγιστου πάχους της αεροτομής και η πρώτη αεροτομή έχει μηδενική κλίση, σχήμα 3.30. Τότε θα ισχύει ότι

$$\mathrm{D}\varepsilon\rho\gamma\max\le\frac{\mathrm{S}-\mathrm{N}*\delta(\xi\max)}{N}=\mathrm{S}_\pi-\delta(\xi\max)\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\mathrm{D}\varepsilon\rho\gamma\max+\delta(\xi\max)<=\mathrm{S}_\pi\Rightarrow$$

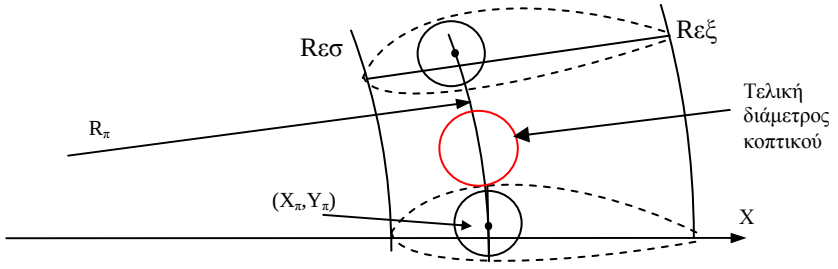
$$\Rightarrow\mathrm{D}\varepsilon\rho\gamma\max+\mathrm{rounddown}\,\delta(\xi\max)<\mathrm{S}_\pi$$



Σχήμα 3.30 Εύρεση μέγιστης διαμέτρου κοπτικού εργαλείου

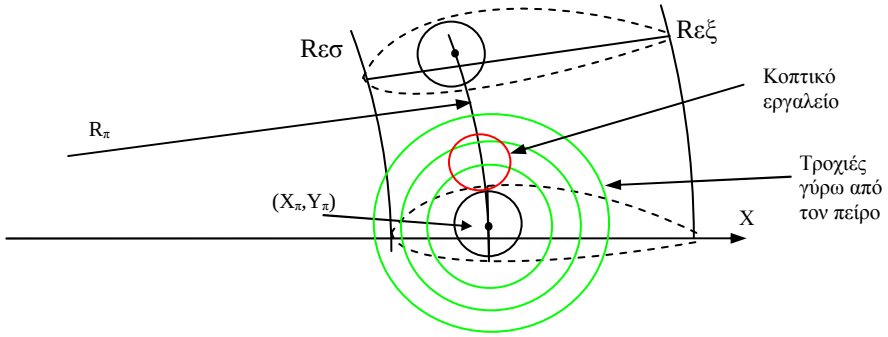
Τα σημεία προφανώς του κοπτικού που ακουμπάνε πάνω στις αεροτομές δεν είναι αυτά που αντιστοιχούν στους α/α των σημείων με μέγιστο πάχος, όμως με την στρογγύλευση προς μικρότερο πάχος αεροτομής, είμαστε εξασφαλισμένοι για την γενίκευση που κάνουμε. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της περιστρεμμένης αεροτομής.

Επομένως με αυτούς τους συλλογισμούς καταλήγουμε σε ακτίνα εργαλείου όπου η ανώτερη ανίσωση να ισχύει. Ο σχεδιαστής προς επαλήθευση μπορεί να λάβει και άλλες τιμές του εργαλείου όπως στην εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου, διότι σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά μικρό το S, και ύστερα να επιλέξει την μικρότερη μέγιστη διάμετρο του εργαλείου, από τους δυο υπολογισμούς. Αφού γνωρίζει την μέγιστη διάμετρο του εργαλείου τυποποιεί την διάμετρο τελικά στην αμέσως μικρότερη, ή σε όποια άλλη μικρότερη διάμετρο είναι βολική, βάση των καταλόγων των κατασκευαστών εργαλείων, σχήμα 3.31.



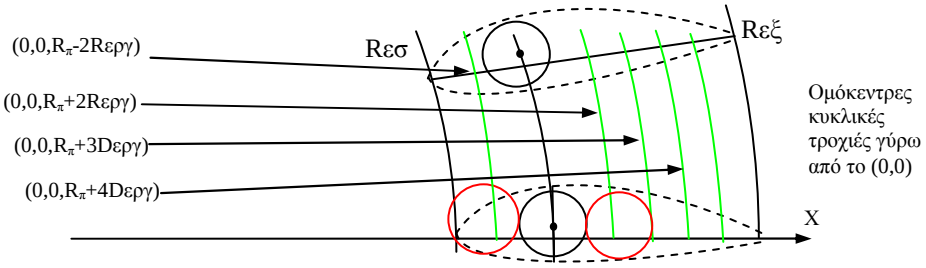
Σχήμα 3.31 Επιλογή τελικής διαμέτρου κοπτικού εργαλείου

Άρα επειδή Dεργ<=Dεργmax τότε ισχύει και η ανώτερη συνθήκη με την προϋπόθεση ότι οι ακτίνες θα έχουν επαρκή αριθμό i ώστε να μην υπερβαίνεται ο δεύτερος όρος. Ο έλεγχος γίνεται πάλι στο excel με λογικές συνθήκες. Γνωρίζοντας το κέντρο και τις απαραίτητες ακτίνες για την δημιουργία του πείρου έχουμε παραμετροποιήσει τον πείρο στην πρώτη αεροτομή και τα αναγκαία πάσα για την δημιουργία του, σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.32 Ομόκεντρες κυκλικές τροχιές γύρω από τον πείρο της πρώτης αεροτομής

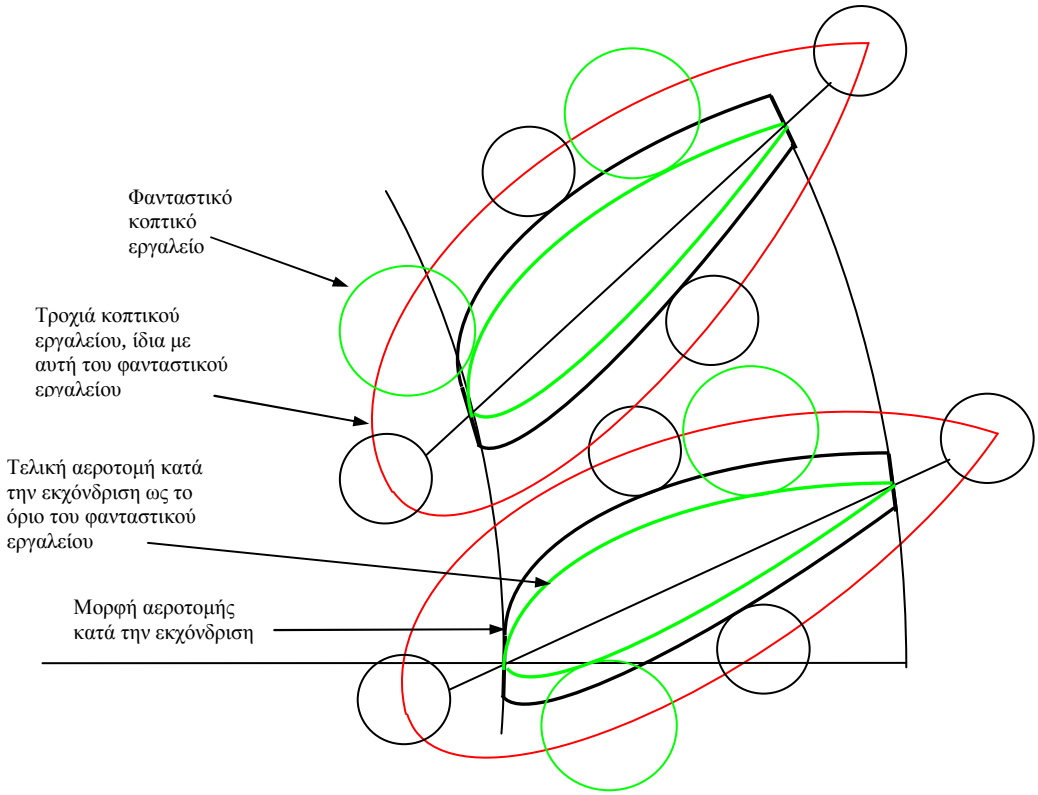
Τέλος, προς βεβαίωση ότι δεν θα υπάρχει χώρος που δεν έχει κοπεί στο επίπεδο των πείρων, διαγράφονται κυκλικές κινήσεις από την εσωτερική ακτίνα του δακτυλίου έως το αριστερό ακραίο σημείο του πείρου και από την εξωτερική ακτίνα του πείρου έως το δεξί ακραίο σημείο του πείρου, σχήμα 3.33.



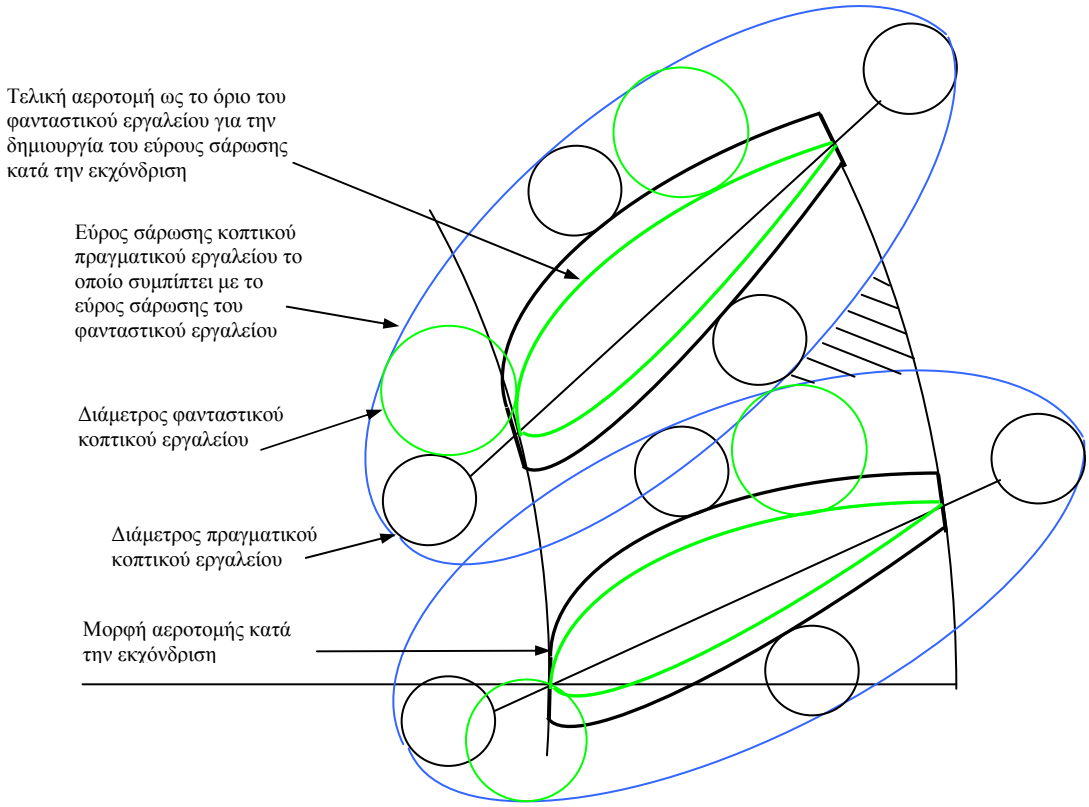
Σχήμα 3.33 Ομόκεντρες κυκλικές τροχιές γύρω από το κέντρο του δακτυλίου

Όπως εξηγήθηκε η ανάλυση αυτή ισχύει για εργαλείο το οποίο πραγματοποιεί την κοπή χωρίς διακριτές φάσεις στην κατεργασία. Επειδή, όπως έχει αναπτυχθεί, χρειαζόμαστε τις φάσεις της εκχόνδρισης, ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης, όλη η ανωτέρω ανάλυση δεν αλλάζει παρά μόνο στην διάσταση που χρησιμοποιούμε για το εργαλείο κοπής. Όπως ορίζεται και στο φασεολόγιο, και για την χρησιμοποίηση ενός ενιαίου τρόπου υπολογισμού, με την άποψη του ότι δεν θα αλλάζουμε πολλές μεταβλητές αλλά μια, θέτουμε σε κάθε κατεργασία ένα εικονικό εργαλείο με ακτίνα όση επιβάλλει το φασεολόγιο, ενώ στην πραγματικότητα η κατεργασία θα γίνεται με άλλο εργαλείο που θα έχει άλλη διάμετρο.

Έτσι το μόνο που αλλάζει για την φάση της εκχόνδρισης και της ημι-αποπεράτωσης είναι τα φύλλα ‘Tool path’ και ‘Tool range’. Συγκεκριμένα, στην φάση της εκχόνδρισης και για το φύλλο ‘Tool path’ ορίζουμε απόσταση του κέντρου του φανταστικού εργαλείου ίση με Rεργim=Rεργreal+Df+Dc, άρα και την διάμετρο Dεργim=2*(Rεργreal+Df+Dc), σχήμα 3.34, ενώ στο φύλλο ‘Tool range’ υπολογίζουμε την διάμετρο του φανταστικού εργαλείου ως Dεργim=Dεργreal+Df+Dc, σχήμα 3.35. Οι δυο αυτές μεταβλητές θα εισαχθούν στα αντίστοιχα φύλλά υπολογισμού τα οποία θα δώσουν τις συντεταγμένες για την φάση της εκχόνδρισης.

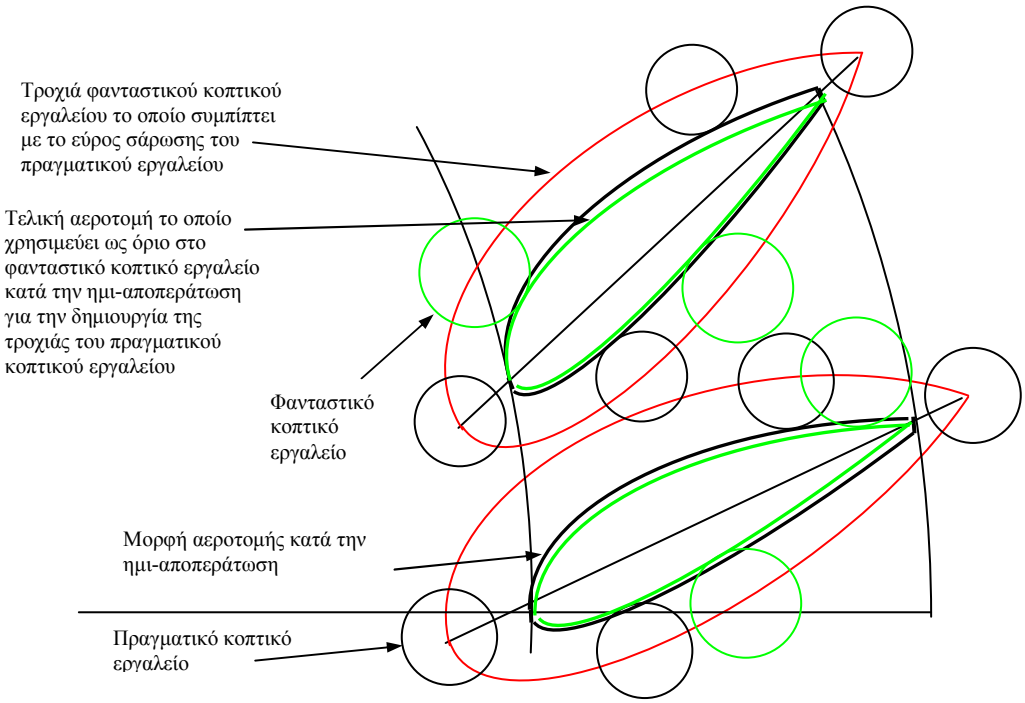


Σχήμα 3.34 Προφίλ αεροτομής με το πραγματικό και το φανταστικό εργαλείο για την δημιουργία της τελικής τροχιάς κατά την φάση της εκχόνδρισης

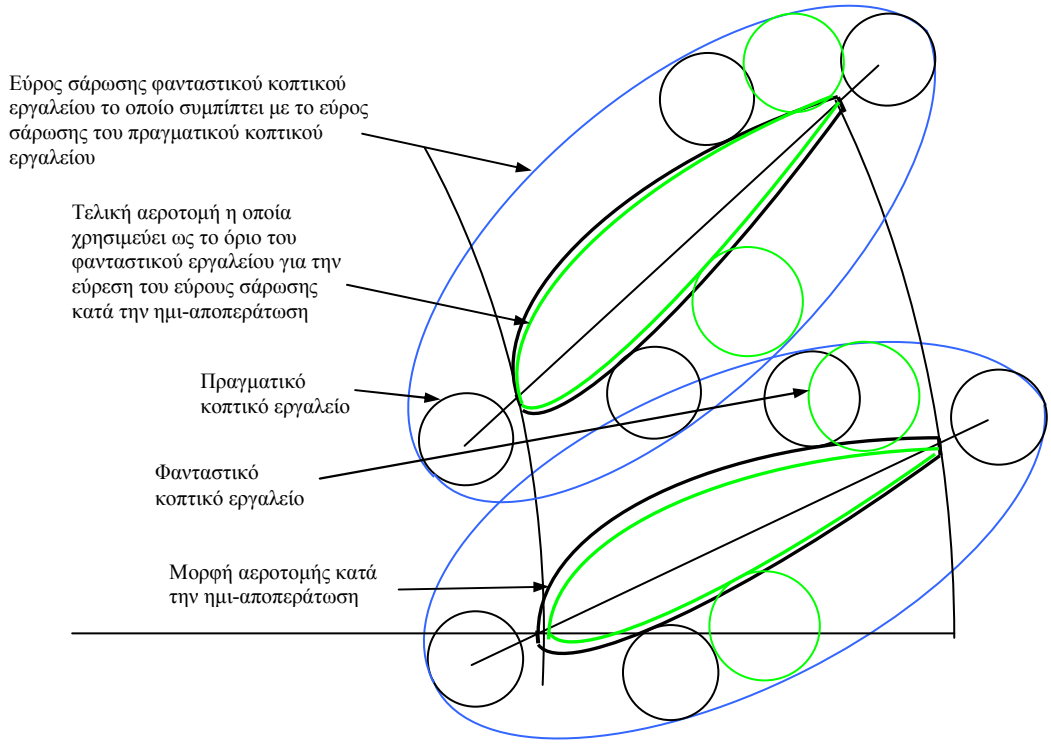


Σχήμα 3.35 Προφίλ αεροτομής με το πραγματικό και το φανταστικό εργαλείο για την δημιουργία της τελικού χώρου της σάρωσης κατά την φάση της εκχόνδρισης

Στην συνέχεια πράττουμε το ίδιο και για την φάση της ημι-αποπεράτωσης. Τότε θα έχουμε για το φύλλο ‘Tool path’ την ακτίνα του φανταστικού εργαλείου ίση με Rεργim=Rεργreal+Df, σχήμα 3.36 άρα και την διάμετρο Dεργim=2*(Rεργreal+Df), ενώ στο φύλλο ‘Tool range’ υπολογίζουμε την διάμετρο του φανταστικού εργαλείου ως Dεργim=Dεργreal+Df, σχήμα 3.37. Οι δυο αυτές μεταβλητές θα εισαχθούν στα αντίστοιχα φύλλά υπολογισμού τα οποία θα δώσουν τις συντεταγμένες για την φάση της ημι-αποπεράτωσης.

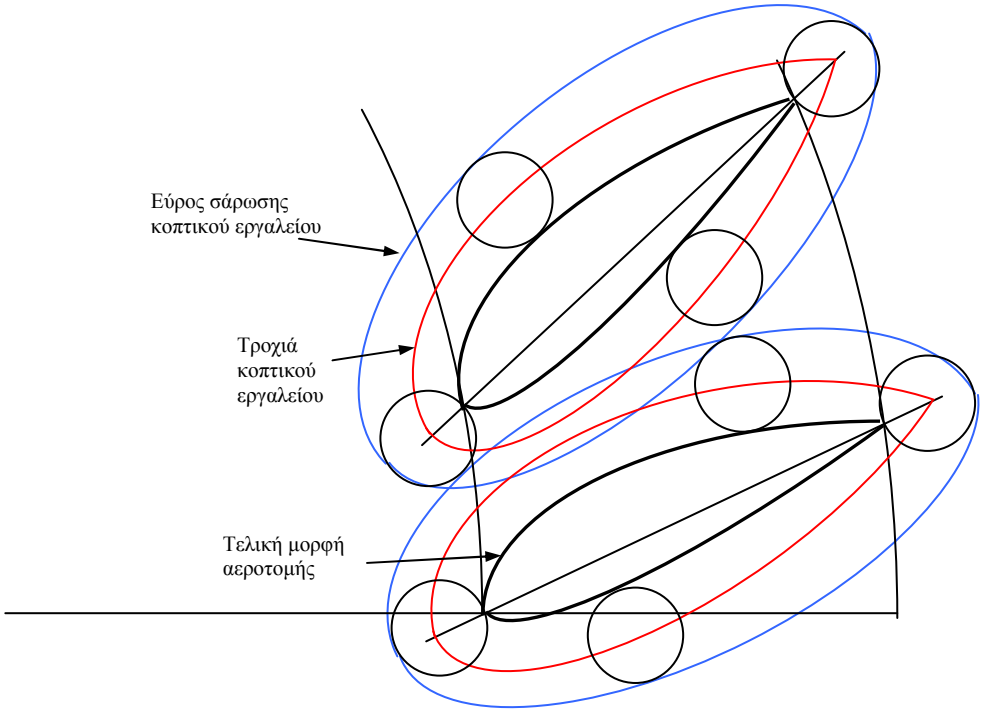


Σχήμα 3.36 Προφίλ αεροτομής με το πραγματικό και το φανταστικό εργαλείο για την δημιουργία της τελικής τροχιάς κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης



Σχήμα 3.37 Προφίλ αεροτομής με το πραγματικό και το φανταστικό εργαλείο για την δημιουργία της τελικού χώρου της σάρωσης κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης

Τέλος, για την αποπεράτωση δεν επηρεάζεται τίποτα αφού η φανταστική ακτίνα του εργαλείου του excel είναι η ίδια με την πραγματική ακτίνα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή, σχήμα 3.38. Σε όλες τις περιπτώσεις οι έλεγχοι αλλάζουν, με την άποψη ότι ο σχεδιαστής πρέπει να προσέξει τις αντίστοιχες συνθήκες ελέγχου, ώστε να αναφέρουν την πραγματική ακτίνα του εργαλείου και όχι την φανταστική. Επιπλέον, στις τροχιές των πάσων και της δημιουργίας των πείρων δεν χρησιμοποιούμε τα φανταστικά εργαλεία, αλλά μόνο την διάμετρο του πραγματικού εργαλείου. Στην φάση της ημι-αποπεράτωσης, όπως ορίζεται και από το φασεολόγιο δεν πραγματοποιούνται πάσα καθόλου.



Σχήμα 3.38 Στην φάση της αποπεράτωσης χρησιμοποιείται η πραγματική ακτίνα του εργαλείου

Με τα αρχεία excel μπορέσαμε να παραμετροποιήσουμε όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για να κατασκευαστεί οποιαδήποτε μορφή αεροτομής. Αυτό έγινε σε όλες τις φάσεις που απαιτεί η κατασκευή μας, είτε εκχόνδρισης είτε αποπεράτωσης, είτε ημι-αποπεράτωσης. Επιπλέον, κατέστη δυνατός ο υπολογισμός των σημείων που πρέπει να προσεγγίσει το εργαλείο για την εξάλειψη του ενδιαμέσου χώρου διαδοχικών αεροτομών καθώς επίσης καθορίστηκαν τα σημεία και οι παράμετροι των πείρων συγκράτησης του άνω και κάτω δακτυλίου.

Κάθε αρχείο excel που αφορά συγκεκριμένη φάση, έχει ένα φύλλο που ονομάζεται ‘Coordinates’. Σε αυτό αποθηκεύονται όλες οι συντεταγμένες που θα ακολουθήσει τελικά το εργαλείο από το φύλλο ‘Tool path’ καθώς και οι ακτίνες των κυκλικών παρεμβολών που έχουμε υπολογίσει για το άνω και το κάτω χείλος. Οι συντεταγμένες αυτές αφορούν μόνο την πρώτη αεροτομή, και θα είναι αυτές που θα χρησιμοποιήσει τελικά και ο κώδικάς εξαγωγής των εντολών G.

3.5 Αρχεία εξαγωγής εντολών G κώδικα

Τα φύλλα “Coordinates’ των φάσεων εκχόνδρισης, ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης αντιγράφονται σε αντίστοιχα φύλλα .txt και ονομάζονται ‘coordinates.txt’, ‘coordinatessf.txt’ και ‘coordinatesf.txt’ με το συγκεκριμένο format που δίνεται από το αρχεία excel για τις αντίστοιχες φάσεις. Τότε ο σχεδιαστής χρησιμοποιεί το script comma2point_overwrite.m για να αλλάξει το format των αριθμών στα αρχεία .txt, ώστε να είναι αναγνωρίσιμα από την matlab, μετατρέποντας την στίξη της υποδιαστολής από κόμμα σε τελεία. Οι τιμές και στα τρία αρχεία .txt αναφέρονται στην πρώτη, δεύτερη και τρίτη στήλη στις συντεταγμένες της τροχιάς του άνω χείλους, ενώ η τέταρτη, Πέμπτη και έκτη στήλη στο κάτω χείλος της πρώτης

αεροτομής. Και στις δυο περιπτώσεις οι αριθμοί αφορούν το X, το Y και το R του α/α του σημείου της αεροτομής. Τα αρχεία που δημιουργήθηκαν από την εξαγωγή των συντεταγμένων από τα αντίστοιχα αρχεία excel για την αεροτομή NACA 4412 παρατίθενται με τις ονομασίες Coordinates.txt, Coordinatessf.txt, Coordinatesf.txt.

Έχοντας λοιπόν τις συντεταγμένες των τροχιών του εργαλείου γύρω από την αεροτομή για όλες τις φάσεις δημιουργούμε δυο αρχεία εξαγωγής εντολών G κώδικα. Το πρώτο θα αφορά την κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης και το δεύτερο στο κέντρο κατεργασιών. Αυτά ονομάζονται gcodelathe.m και gcodecnc.m αντίστοιχα. Σε αυτά παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές που αφορούν την πτερύγωση με αεροτομές τύπου NACA 4412. Στην συνέχεια, όμως, παραθέτουμε την φιλοσοφία με την οποία δημιουργούμε αυτά τα αρχεία.

Στο αρχείο για το κέντρο τόρνευσης έχουμε:

Καθαρίζεται η μνήμη και το περιβάλλον του προγράμματος

```
clc
clear all
```

Γίνεται εισαγωγή των διαστάσεων του άνω και κάτω δακτυλίου όπως ορίζεται στο γραφικό περιβάλλον στο σχήμα 3.10 σε mm.

```
D(1)=
D(2)=
D(3)=
D(4)=
D(5)=
D(6)=
D(7)=
D(8)=
D(9)=
D(10)=
D(11)=
D(12)=
D(13)=
D(14)=
D(15)=
D(16)=
```

Γίνεται εισαγωγή των βάθων κοπής κατά το φινίρισμα και την εκχόνδριση και του πάχους της λεπίδας του πριονιού. Δίνονται παραδείγματα τιμών.

```
%Βάθος φινιρίσματος, στο φασεολόγιο αναφέρεται ως ap2
Lf=0.2;
%Βάθος κοπής, στο φασεολόγιο αναφέρεται ως ap1
Lc=1;
%Πάχος λεπίδας πριονιού, στο φασεολόγιο αναφέρεται ως Lc
Lm=2;
```

Γίνεται εισαγωγή των προώσεων και των στροφών της ατράκτου όπως αναφέρονται στο φασεολογιο.

```
%Πρόωση εργαλείου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της εκχόνδρισης
F1=
%Πρόωση εργαλείου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της αποπεράτωσης
F2=
%Στροφές ατράκτου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της εκχόνδρισης
S1=
%Στροφές ατράκτου κέντρου τόρνευσης κατά την φάση της αποπεράτωσης
S2=
```

Δημιουργούνται τα stock models με εισαγωγή των διαστάσεων τους για το άνω (1) και κάτω (2) δακτύλιο. Αυτές οι διαστάσεις αναφέρονται στο περιβάλλον {R,L} του σχήματος 3.10.

```
%Διαστάσεις των stock models
%Ακτίνες=R και μήκη=L, το 1 είναι το άνω τεμάχιο
%και το 2 το κάτω τεμάχιο
Rstock1=
Lstock1=
Rstock2=
Lstock2=
```

Δημιουργούνται οι διαστάσεις του τελικού τεμαχίου. Τα πρώτα εννέα σημεία αφορούν τον άνω δακτύλιο ενώ τα επόμενα δέκα τον κάτω. Ο πίνακας αυτός είναι ένας πίνακας [19,2] όπου η πρώτη σειρά του αφορά τα X, ενώ, η δεύτερη σειρά του πίνακα αφορά τα Y των σημείων που ορίζουν τους δακτύλιους. Παρόμοιος πίνακας δημιουργείται και για τα σημεία προ του φινιρίσματος.

```
%Δημιουργία τελικών διαστάσεων των τεμαχίων
%Από την γεωμετρία προκύπτει ότι έχουμε 9 σημεία για τον άνω δακτύλιο και
%10 σημεία για τον κάτω δακτύλιο
RL(1,1)=D(7)+D(14)+D(16)+D(13);
RL(2,1)=0;
RL(1,2)=D(7)+D(14)+D(16)+D(13);
RL(2,2)=D(12)-D(15);
RL(1,3)=D(7)+D(14)+D(16)+D(13)-D(15);
RL(2,3)=D(12);
RL(1,4)=D(7)+D(14)+D(16);
RL(2,4)=D(12);
RL(1,5)=D(7)+D(14);
RL(2,5)=D(12)+D(16);
RL(1,6)=D(7)+D(14);
RL(2,6)=D(11);
RL(1,7)=D(7);
RL(2,7)=D(11);
RL(1,8)=D(7);
RL(2,8)=D(12)+D(16);
RL(1,9)=D(7);
RL(2,9)=0;
RL(1,10)=D(3);
RL(2,10)=0;
RL(1,11)=D(3);
RL(2,11)=D(5)-D(4);
RL(1,12)=D(3)-D(4);
RL(2,12)=D(5);
RL(1,13)=D(3)-D(6);
RL(2,13)=D(5);
RL(1,14)=D(3)-D(6);
RL(2,14)=D(9)+D(1)+D(8)+D(10)+D(12);
RL(1,15)=D(7);
RL(2,15)=D(9)+D(1)+D(8)+D(10)+D(12);
RL(1,16)=D(7);
RL(2,16)=D(9)+D(1);
RL(1,17)=D(3)-D(2)-D(1);
RL(2,17)=D(9)+D(1);
RL(1,18)=D(3)-D(2);
RL(2,18)=D(9);
RL(1,19)=D(3)-D(2);
RL(2,19)=0;

%Δημιουργία διαστάσεων γεωμετρίας πριν από την φάση της αποπεράτωσης
RLf(1,1)=RL(1,1)+Lf;
RLf(2,1)=RL(2,1)-Lf;
RLf(1,2)=RL(1,2)+Lf;
RLf(2,2)=RL(2,2);
RLf(1,3)=RL(1,3);
RLf(2,3)=RL(2,3)+Lf;
RLf(1,4)=RL(1,4);
RLf(2,4)=RL(2,4)+Lf;
RLf(1,5)=RL(1,5)+Lf;
```

```
RLf(2,5)=RL(2,5);
RLf(1,6)=RL(1,6)+Lf;
RLf(2,6)=RL(2,6)+Lf;
RLf(1,7)=RL(1,7)-Lf;
RLf(2,7)=RL(2,7)+Lf;
RLf(1,8)=RL(1,8)-Lf;
RLf(2,8)=RL(2,8);
RLf(1,9)=RL(1,9)-Lf;
RLf(2,9)=RL(2,9)-Lf;
RLf(1,10)=RL(1,10)+Lf;
RLf(2,10)=RL(2,10)-Lf;
RLf(1,11)=RL(1,11)+Lf;
RLf(2,11)=RL(2,11);
RLf(1,12)=RL(1,12);
RLf(2,12)=RL(2,12)+Lf;
RLf(1,13)=RL(1,13)+Lf;
RLf(2,13)=RL(2,13)+Lf;
RLf(1,14)=RL(1,14)+Lf;
RLf(2,14)=RL(2,14)+Lf;
RLf(1,15)=RL(1,15)-Lf;
RLf(2,15)=RL(2,15)+Lf;
RLf(1,16)=RL(1,16)-Lf;
RLf(2,16)=RL(2,16)-Lf;
RLf(1,17)=RL(1,17);
RLf(2,17)=RL(2,17)-Lf;
RLf(1,18)=RL(1,18)-Lf;
RLf(2,18)=RL(2,18);
RLf(1,19)=RL(1,19)-Lf;
RLf(2,19)=RL(2,19)-Lf;
```

Δημιουργούνται οι διαστάσεις των τεμαχίων και των stock models στο σύστημα $\{X,Y\}_1$ του γραφικού περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Για τα σημεία των δακτυλίων δημιουργούνται για αυτό δυο πίνακες [19,2], και αφορούν τα τελικά σημεία της γεωμετρίας και τα σημεία προ του φινιρίσματος. Για τα stock models δημιουργούνται απλά τέσσερις μεταβλητές, οι οποίες με αρίθμηση αντιστοιχούν στο ανω δακτύλιο (1) ή στον κάτω δακτύλιο (2) και το σετάρισμα (1).

```
%Καθορισμός διαστάσεων για την περιστροφή -90 μοιρών
%των stock models, των τελικών διαστάσεων των τεμαχίων
u=-pi/2;
x1stock1=Lstock1*(-sin(u));
y1stock1=Rstock1*(sin(u));
x1stock2=Lstock2*(-sin(u));
y1stock2=Rstock2*(sin(u));
for i=1:19
    x1(i)=RL(2,i)*(-sin(u));
    y1(i)=RL(1,i)*sin(u);
end
%Καθορισμός διαστάσεων για την περιστροφή -90 μοιρών
%των διαστάσεων προ του φινιρίσματος των τεμαχίων
for i=1:19
    xf1(i)=RLf(2,i)*(-sin(u));
    yf1(i)=RLf(1,i)*sin(u);
end
```

Εισάγεται ο αριθμός offset για την απόσταση του αρχικού σημείου προ των κοπών από τα αρχικά stock models και βρίσκονται αυτά τα σημεία επιλέγοντας τον μεγαλύτερο αριθμό των διαστάσων σε αυτό το σετάρισμα. Ο αριθμός offset πρέπει βάση γεωμετρίας να είναι μεγαλύτερος από το βάθος εκχόνδρισης, αποπεράτωσης και το πάχος της λεπίδας του πριονιού.

```
%Καθορισμός Offset για τα αρχικά σημεία προ των κοπών
offset=
%Το offset πρέπει να είναι μεγαλύτερο του Lm+Lc+Lf
%Γίνεται διαλόγή για τα σημεία του πάνω και του κάτω δακτυλίου με τα δυο
%επόμενα for
for i=1:19
    if i<=9
        x1p(i)=x1(i);
```

```
    else
        x1p(i)=0;
    end
    arxi(1,1)=max(x1p);
    if i<=9
        y1p(i)=y1(i);
    else
        y1p(i)=0;
    end
    arxi(2,1)=min(y1p);
end
for i=1:19
    if i<=9
        x1d(i)=0;
    else
        x1d(i)=x1(i);
    end
    arxi(1,2)=max(x1d);
    if i<=9
        y1d(i)=0;
    else
        y1d(i)=y1(i);
    end
    arxi(2,2)=min(y1d);
end
x1arxi1=arxi(1,1)+offset;
y1arxi1=y1stock1-offset;
x1arxi2=arxi(1,2)+offset;
y1arxi2=y1stock2-offset;
```

Γίνεται ‘mirror’ στον Υ άξονα, όπως ορίζεται από το σχήμα 3.10, βρίσκονται οι τελικές διαστάσεις των τεμαχίων, καθώς και αυτές πριν από το φινίρισμα, βρίσκονται τα αρχικά σημεία προ των ενάρξεων της κοπής των κοπτικών. Το σετάρισμα αυτό έχει α/α (2), οπότε και όλες οι μεταβλητές για αυτά τα σεταρίσματα αναφέρονται με αυτό τον αριθμό.

```
%Καθορισμός διαστάσεων των τεμαχίων για τα δεύτερα σεταρίσματα
%Οι πίνακες με τα σημεία x1(i) και xf1(i) γίνονται mirror στον άξονα των Υ
%και δημιουργούνται οι x2(i) και xf2(i).
%Επειδή έχουν γίνει οι κοπές με το πριόνι τα μήκη των τεμαχίων αλλάζουν
%και απο τα αρχικά μήκη και ύψη δημιουργούνται τα αντίσοιχα όπως ορίζονται
%στο φασεολόγιο.(τα μήκη αυξάνονται κατά +Lf+Lc ή -Lf ανάολογα)
x2stock1=arxi(1,1)+Lf+Lc;
y2stock1=arxi(2,1)-Lf;
x2stock2=arxi(1,2)+Lf+Lc;
y2stock2=arxi(2,2)-Lf;
for i=1:19
    x2(i)=x1(i)*(-1);
    y2(i)=y1(i)*1;
end
%Καθορισμός διαστάσεων των τεμαχίων για τα δευτερα σεταρίσματα
%πριν από την φάση της αποπεράτωσης
for i=1:19
    xf2(i)=xf1(i)*(-1);
    yf2(i)=yf1(i)*1;
end
%Καθορισμός αρχικών σημείων προ των κατεργασιών
x2arxi1=Lf+offset;
y2arxi1=y2stock1-offset;
x2arxi2=Lf+offset;
y2arxi2=y2stock2-offset;
```

Εισάγονται οι αρχές των Σ.Σ. των τεμαχίων στα αντίστοιχα σεταρίσματα. Το SS1 και SS2 αφορά τον άνω δακτύλιο στο (1) και (2) σετάρισμα, ενώ το SS3 και SS4 αφορά τον κάτω δακτύλιο στο (1) και (2) σετάρισμα. Εδώ γίνεται η παραδοχή ότι το σύστημα αναφοράς της μηχανής είναι πάνω στο τσοκ, οπότε αν αυτό αλλάξει τότε ο σχεδιαστής θα πρέπει να μεριμνήσει για την αλλαγή και των Σ.Σ.

```
%Καθορισμός συστημάτων συντεταγμενων για τα τέσσερα σεταρίσματα
%Προσοχή ο καθορισμός γίνεται σε σχέση με το συστημα αναφοράς το οποίο
%βρίσκεται πάνω στο κέντρο του τσοκ
SS1=[0 0 x1stock1-Lc-Lf-arxi(1,1)];
SS2=[0 0 arxi(1,1)];
SS3=[0 0 x1stock2-Lc-Lf-arxi(1,2)];
SS4=[0 0 arxi(1,2)];
```

Δημιουργείται αρχείο εξαγωγής όλων των εντολών του G κώδικα σε αρχείο .txt. Για τον άνω δακτύλιο δημιουργείται το 'latheup1sim.txt' που αφορά το (1) σετάρισμα, το 'latheup2sim.txt', που αφορά το (2) σετάρισμα. Για τον κάτω δακτύλιο δημιουργείται το 'lathedown1sim.txt', που αφορά το (1) σετάρισμα και το 'lathedown2sim.txt', που αφορά το (2) σετάρισμα. Σε κάθε ένα αρχείο γράφονται οι βασικές εντολές για τις συνθήκες που πρόκειται να ακολουθηθούν από την μηχανή, όπως οι διαστάσεις σε mm, έναρξη της ατράκτου, αρχικές προώσεις, έναρξη ελαίου, αρχική επιλογή εργαλείου, όπως ορίζει το φασεολόγιο και τα αντίστοιχα διαγνωστικά μηνύματα προς τον σχεδιαστή. Βεβαίως, οι συντεταγμένες για την μεταφορά των στο σύστημα της μηχανής τροποποιούνται, ώστε όλες οι Y στο γραφικό περιβάλλον να διπλασιάζονται και να αποκτούν θετική τιμή, για να αντιστοιχούν στην τετμημένη X του περιβάλλοντος της μηχανής. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η μηχανή θα διαβάζει τιμές διαμέτρων.

Σε κάθε σετάρισμα εισάγεται στη μηχανή το αντίστοιχο τεμάχιο, το οποίο σε πραγματικό χρόνο είναι το τεμάχιο που ορίζεται από την αλληλουχία των διεργασιών του φασεολογίου. Στην προσομοίωση, όμως, αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει, οπότε ο σχεδιαστής πρέπει να δημιουργήσει αντίστοιχα τεμάχια στην αρχή του κάθε σεταρίσματος, τα οποία θα αποτυπώνουν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι απαραίτητα για την συνέχιση των κατεργασιών.

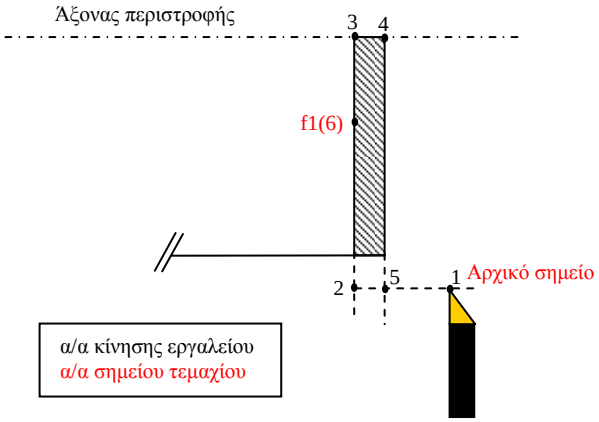
Στο πρώτο αρχείο εξαγωγής εντολών 'latheup1sim.txt' αρχίζουμε με τις βασικές εντολές που καθορίζουν την κατεργασία, ονομαζόμενη στον προσομοιωτή 'Latheup1' και περνάμε στην πρώτη φάση, όπως ορίζει το φασεολόγιο. Το Part 1 αφορά το stock model του άνω δακτυλίου.

```
fileID=fopen('latheup1sim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'Latheup1\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Lathe (Alarm if not lathe machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 1\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
```

Για την επεξεργασία του άνω δακτυλίου έχουμε ότι:
Φάση 1 σετάρισμα 1 Κοπή προσώπου

Εφαρμόζεται το Σ.Σ.1=W1 βάσει του φασεολογίου. Ορίζονται η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Το εργαλείο πάει στην αρχική θέση και κόβει, μειώνοντας την τιμή της διαμέτρου, μια φέτα από το stock model.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 1 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G92 Z+%-5.3f\r\n',x1stock1-Lc-Lf-arxi(1,1));
fprintf(fileID,'T1\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M4 F%-5.0f S%-
5.0f\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1),F1,S1);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(6));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',0);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(6)+Lc);
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1arxi1));
```



Σχήμα 3.39 Φάση 1 Κοπή προσώπου άνω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 2 σετάρισμα 1 Κοπή προφίλ

Το εργαλείο βρίσκεται σε μια αρχική θέση και κόβει, με επαναλήψεις, φέτες από το stock model, έως ότου φτάσει στην διάμετρο προ φινιρίσματος του άνω δακτυλίου. Ο αριθμός των επαναλήψεων Ε γίνεται βρίσκοντας την διαφορά της αρχικής με την επιθυμητή διάσταση, a. Αυτή διαιρείται με το επιθυμητό βάθος κοπής, από όπου εξάγεται ένας θετικός αριθμός (εντολή abs). Στην συνέχεια αυτός ο αριθμός στρογγυλεύεται προς τον πρώτο μικρότερο ακέραιο θετικό αριθμό (εντολή fix) που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των επαναλήψεων. Αν αυτός ο αριθμός Ε είναι μηδέν ή ένα τότε δεν γίνεται ο κύκλος των επαναλήψεων. Τότε το εργαλείο θα πρέπει να κόψει πάχος υλικού μικρότερο από το επιθυμητό βάθος κοπής, οπότε και πραγματοποιείται άμεσα η κοπή για την τελική διάσταση. Αν ο αριθμός είναι μεγαλύτερος από την μονάδα τότε γίνονται κοπές μειούμενης της διαμέτρου κατά το βάθος κοπής, τόσες φορές όσες ορίζεται από τον αριθμό Ε. Στην συνέχεια το πρόγραμμα βγαίνει από την επανάληψη και το εργαλείο θα πραγματοποιήσει το τελικό πάσο, με βάθος κοπής μικρότερο από αυτό που έχει οριστεί, ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή γεωμετρία της τελικής διάστασης.

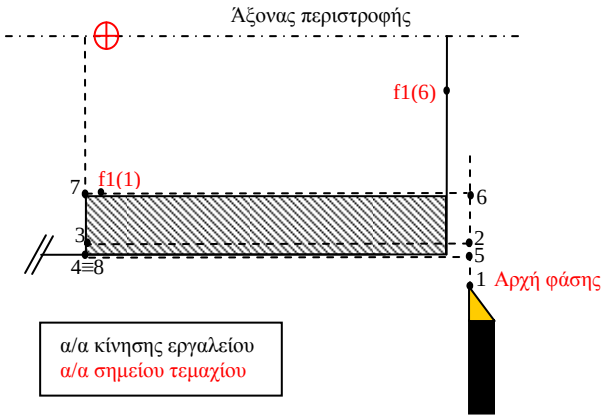
Η μεταβλητή i αφορά βοηθητικό αριθμό που αυξάνεται ανάλογα με τον κύκλο της επανάληψης, ώστε από τιμή 1 να φτάσει στην τιμή Ε. Είναι προφανές ότι όταν γίνεται επανάληψη μειούμενης ακτίνας, επειδή γίνεται διπλασιασμός στις τιμές των ακτινών ώστε να διαβάζονται διάμετροι, η τιμή του i διπλασιάζεται και αυτή με την σειρά της.

Επίσης, πρέπει να δοθεί έμφαση στο τελικο σημείο αυτής της φάσης, το xf1(1)-Lm-Lc, σημείο που δημιουργήθηκε κατά την κατάστρωση του φασεολογίου. Αυτό δεν τέθηκε αυθαίρετα και δεν πρέπει να αλλάξει διότι θα αλλοιώσει την δομή των κατεργασιών που θα ακολουθήσουν και συγκεκριμένα την κοπή στο πριόνι και το δεύτερο σετάρισμα.

Το σχήμα 3.40 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 2 ΚΟΠΗ ΠΡΟΦΙΛ" 4 0)\r\n');
a=abs(y1stock1-yf1(1))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(y1stock1)-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(1)-Lm-Lc);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1stock1));
        fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(6)+Lc);
        fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1stock1)-2*Lc*i);
    end
```

```
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf1(1)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(1)-Lm-Lc);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1stock1));
```



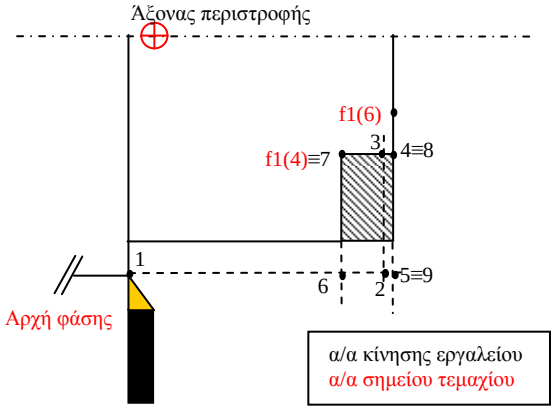
Σχήμα 3.40 Φάση 2 Κοπή προφίλ άνω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 3 σετάρισμα 1 Κοπή προσώπου

Με την λογική που αναπτύχθηκε προηγουμένως γίνονται όλες οι επαναλήψεις για όσες φάσεις χρειάζονται επαναληπτικές κοπές. Στην παρούσα φάση γίνονται επαναλήψεις. Αυτές, προφανώς, θα πραγματοποιηθούν αν και εφόσον οι αντίστοιχες μεταβλητές της γεωμετρίας το επιτρέπουν.

Το σχήμα 3.41 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 3 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
a=abs(xf1(6)-xf1(4))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E;
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(6)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(6));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(1)));
        fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(6)-Lc*i);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',xf1(4));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(6));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(1)));
```

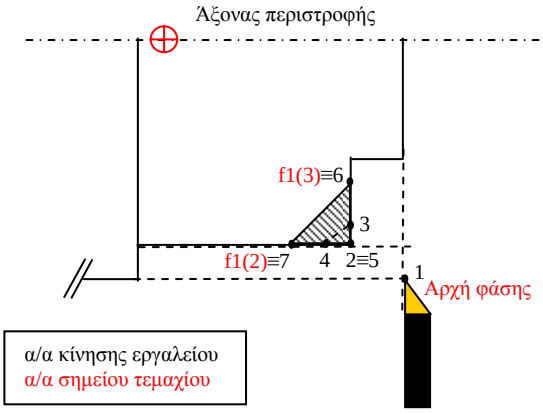


Σχήμα 3.41 Φάση 3 Κοπή προσώπου άνω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 4 σετάρισμα 1 Κοπή σπασίματος

Όμοια γίνεται και εδώ επαναληπτικός κύκλος αν χρειάζεται. Εννοείται ότι το αρχικό σημείο της φάσης είναι το τελικό σημείο της προηγούμενης. Το σχήμα 3.42 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 4 ΚΟΠΗ ΣΠΑΣΙΜΑΤΟΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(3),2*abs(yf1(2)));
a=abs(xf1(3)-xf1(2)/Lc);
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(2))-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',abs(xf1(3))-Lc*i,2*abs(yf1(2)));
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',(xf1(3)));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(3)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(2),2*abs(yf1(2)));
```

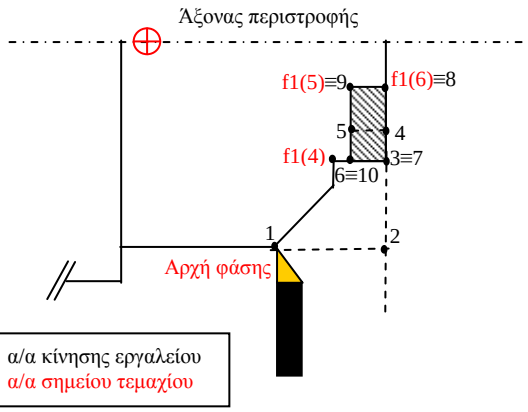


Σχήμα 3.42 Φάση 4 Κοπή σπασίματος άνω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 5 σετάρισμα 1 Κοπή προσώπου

Γίνεται η κοπή του προσώπου επαναληπτικά, ώστε να είναι εφικτή η κοπή του τεταρτοκυκλίου που θα ακολουθήσει.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 5 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(6));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
a=abs(yf1(6)-yf1(4))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf1(4))-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(5));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(6));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(6)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(5));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
```

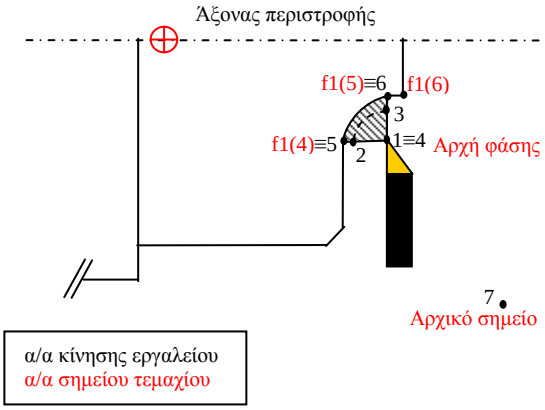


Σχήμα 3.43 Φάση 5 Κοπή προσώπου άνω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

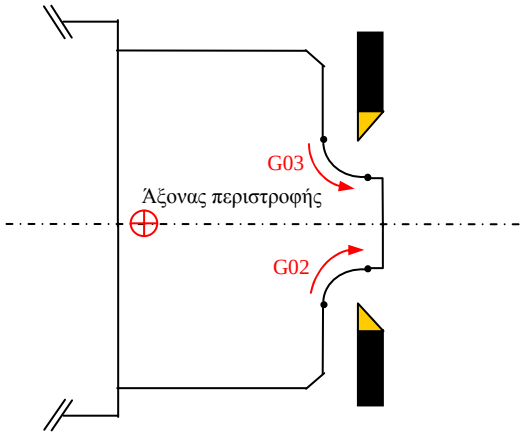
Φάση 6 σετάρισμα 1 Κοπή τεταρτοκυκλίου

Σε αυτή την φάση γίνεται επίσης επαναληπτικός κύκλος. Ο σχεδιαστής πρέπει να μεριμνήσει για τον έλεγχο της εντολής G03, αν αλλάξει κάτι στα δεδομένα εισαγωγής, ή στα εργαλεία. Όπως γίνεται κατανοητό από το σχήμα 3.45 η φορά αλλάζει στις διάφορες συνθήκες κοπής.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 6 ΚΟΠΗ ΓΩΝΙΑΣ" 4 0)\r\n');
a=abs(xf1(5)-xf1(4))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(5)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',xf1(5),2*abs(yf1(4))-
2*i*Lc,Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(4)));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(4));
fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',xf1(5),2*abs(yf1(5)),abs(xf1(5)-
xf1(4)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
```



Σχήμα 3.44 Φάση 6 Κοπή τεταρτοκυκλίου άνω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

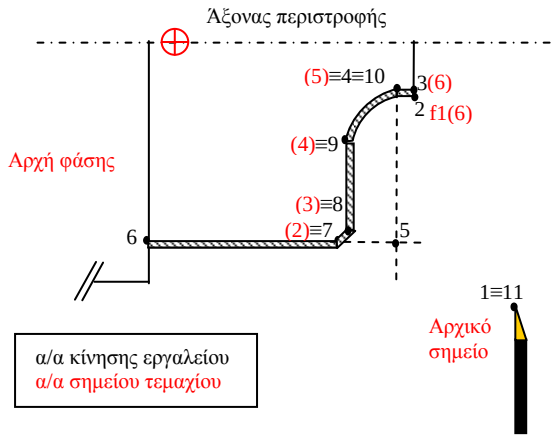


Σχήμα 3.45 Φάση 6 Χρειάζεται προσοχή στην εντολή της φοράς κοπή του τεταρτοκυκλίου

Φάση 7 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση

Γίνεται αλλαγή του εργαλείου, ορίζονται η προώση και στροφές της ατράκτου για αυτή την φάση. Το νέο κοπτικό διαγράφει τροχιά η οποία δημιουργεί την τελική γεωμετρία στο τεμάχιο. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η ακραία περίπτωση, αυτή που χρησιμοποιείται και στην προσομοίωση που θα γίνει, όπου το εργαλείο δεν είναι λοξό αλλά κάθετο, ώστε να μην υπάρχει σύγκρουση στο τμήμα με α/α 3-4 Για αυτό τον λόγο διαγράφονται οι κινήσεις όπως ορίζονται στο επόμενο σχήμα 3.46.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 7 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T2\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(6),2*abs(yf1(6)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f M08\r\n',x1(6),2*abs(y1(6)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1(5),2*abs(y1(5)));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(1)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x1(1)-Lm-Lc);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x1(2));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1(3),2*abs(y1(3)));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(4)));
fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',x1(5),2*abs(y1(5)),abs(y1(5)-y1(4)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
```

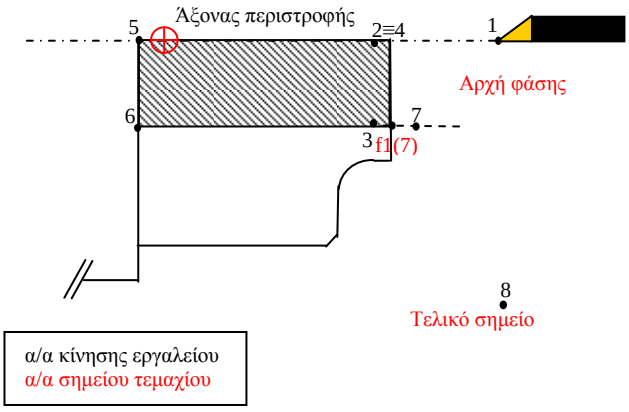


Σχήμα 3.46 Φάση 7 Αποπεράτωση άνω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 8 σετάρισμα 1 Κοπή οπής

Γίνεται αλλαγή του εργαλείου, ορίζονται οι στροφές και η πρόωση για αυτή την φάση. Με την επαναληπτική κοπή δημιουργείται ο εσωτερικός κενός χώρος του άνω δακτυλίου. Το σχήμα 3.47 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 8 ΚΟΠΗ ΟΠΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T3\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F1,S1);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi1,0);
a=abs(xf1(7)-(xf1(1)-Lm-Lc))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',x1(7)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(7)));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',0);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(1)-Lm-Lc);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(7)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(7)+Lc);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
```

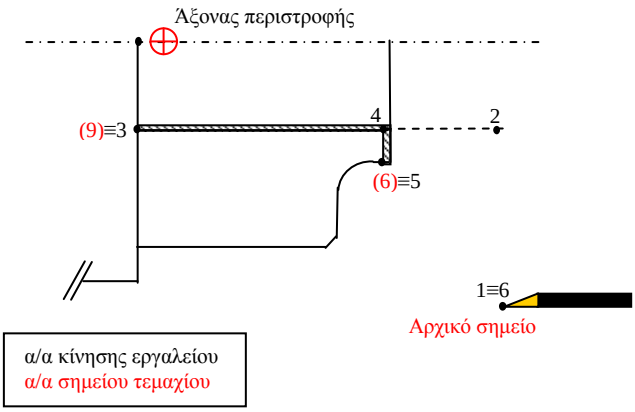


Σχήμα 3.47 Φάση 8 Κοπή οπής άνω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 9 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση οπής και προσώπου

Γίνεται αλλαγή του εργαλείου, των στροφών της ατράκτου και της πρόωσης. Όμοια λαμβάνεται υπόψη η φορά των κοπών για να μην υπάρξει σύγκρουση τεμαχίου εργαλείου. Μετά το πέρας της φάσης η άτρακτος σταματάει, ομοίως και το έλαιο λίπανσης, το πρόγραμμα τερματίζεται και κλείνει το αρχείο που αφορά το συγκεκριμένο σετάρισμα στον άνω δακτύλιο.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 9 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ ΟΠΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T4\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(9)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',x1(9));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(9))-2*Lc);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',x1(7));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(6)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi1,2*abs(y1arxi1));
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```



Σχήμα 3.48 Φάση 9 Αποπεράτωση οπής και προσώπου άνω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

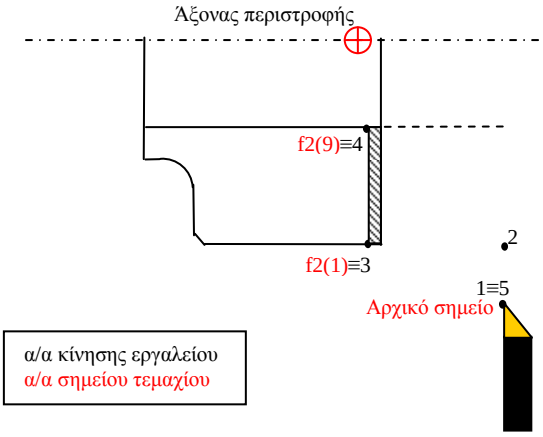
Φάση 10 Κοπή σε πριόνι

Το τεμάχιο αλλάζει μηχανή επεξεργασίας, τοποθετείται στο πριόνι και κόβεται έτσι ώστε το πλαινό επίπεδο της λάμας να εφάπτεται στο τεμάχιο, όπως φαίνεται στο φασεολόγιο. Σε αυτό το σημείο γίνεται κατανοητό για ποιο λόγο πρέπει να ορίζεται το πάχος της λάμας του πριονιού στα προγράμματα του κέντρου τόρνευσης, είτε είναι για τον άνω δακτύλιο, είτε για τον κάτω.

Φάση 11 σετάρισμα 2 Κοπή προσώπου

Οι εντολές των κινήσεων που αφορούν αυτό το σετάρισμα και τον άνω δακτύλιο εξάγονται στο αρχείο ‘latheup2sim.txt’, ενώ για το πρόγραμμα της προσομοίωσης η συγκεκριμένη κατεργασία ονομάζεται ‘Latheup2’. Εφαρμόζεται το Σ.Σ.2=W2 βάσει του φασεολογίου. Ορίζονται η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Το εργαλείο πάει στην αρχική θέση και κόβει, μειώνοντας την τιμή της διαμέτρου, μια φέτα από το stock model.

```
fileID=fopen('latheup2sim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'Latheup2\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Lathe (Alarm if not lathe machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 2\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 11 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G92 Z+%-5.3f\r\n',arxi(1,1));
fprintf(fileID,'T1\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09 M4\r\n',x2arxi1,2*abs(y2arxi1));
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F1,S1);
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(1)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(1));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf2(9)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x2arxi1,2*abs(y2arxi1));
```

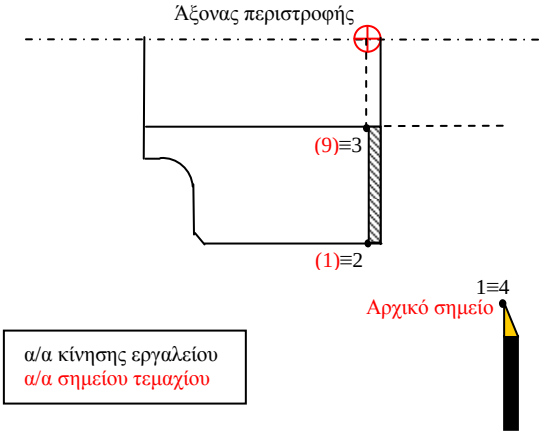


Σχήμα 3.49 Φάση 11 Κοπή προσώπου άνω τεμαχίου 2ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 12 σετάρισμα 2 Αποπεράτωση προσώπου

Το εργαλείο αλλάζει, το ίδιο και οι στροφές και η πρόωση. Γίνεται κοπή μιας φέτας υλικού που καθορίζει την κατεργασία της αποπεράτωσης. Μετά το πέρας αυτής της κατεργασίας ο άνω δακτύλιος ολοκλήρωσε την επεξεργασία του στο κέντρο τόρνευσης.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 12 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T2\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x2arxi1,2*abs(y2arxi1));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y2(1)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',0);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y2(9)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x2arxi1,2*abs(y2arxi1));
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```



Σχήμα 3.50 Φάση 12 Αποπεράτωση προσώπου άνω τεμαχίου 2ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

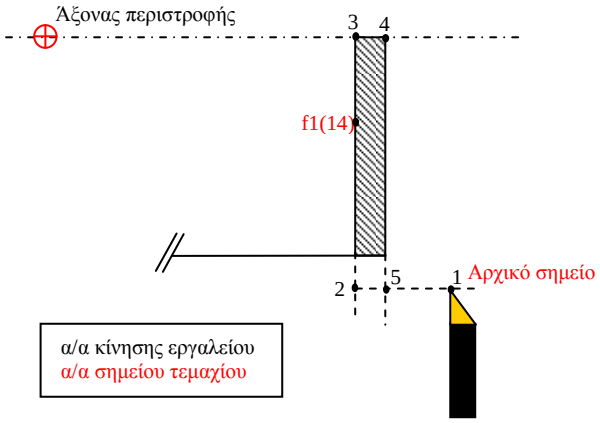
Συνεχίζουμε στην επεξεργασία κάτω δακτυλίου. Εχουμε λοιπόν ότι:

Φάση 1 σετάρισμα 1 Κοπή προσώπου

Εφαρμόζεται το Σ.Σ.3=W3 βάσει του φασεολογίου. Ορίζονται η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Το εργαλείο πάει στην αρχική θέση και κόβει, μειώνοντας την τιμή της διαμέτρου, μια φέτα από το stock model. Οι εντολές των κινήσεων που αφορούν αυτό το σετάρισμα και τον άνω δακτύλιο εξάγονται στο αρχείο

‘lathedown1sim.txt’, ενώ για το πρόγραμμα της προσομοίωσης η συγκεκριμένη κατεργασία ονομάζεται ‘Lathedown1’.

```
fileID=fopen('lathedown1sim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'Lathedown1\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Lathe (Alarm if not lathe machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 3\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 1 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G92 Z+%-5.3f\r\n',x1stock2-Lc-Lf-arxi(1,2));
fprintf(fileID,'T1\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09 M4\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F1,S1);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',xf1(14));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',0);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(14)+Lc);
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f M09\r\n',2*abs(y1arxi2));
```

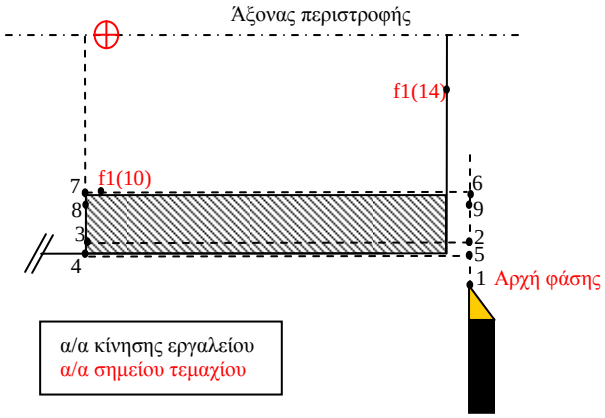


Σχήμα 3.51 Φάση 1 Κοπή προσώπου κάτω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 2 σετάρισμα 1 Κοπή προφίλ

Γίνεται επαναληπτική κοπή, αν χρειάζεται για την μείωση της διαμέτρου του stock model στην μέγιστη του δακτυλίου. Το σχήμα 3.52 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 2 ΚΟΠΗ ΠΡΟΦΙΛ" 4 0)\r\n');
a=abs(y1stock2-yf1(10)/Lc);
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(y1stock2)-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(10)-Lm-Lc);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1stock2));
        fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f\r\n',xf1(14)+Lc);
        fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1stock2)-2*Lc*i);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(10)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(10)-Lm-Lc);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(10)-Lc));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(14));
```

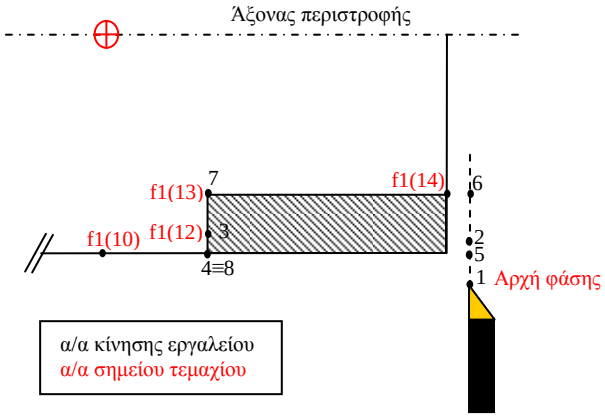


Σχήμα 3.52 Φάση 2 Κοπή προφιλ κάτω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 3 σετάρισμα 1 Κοπή προφίλ

Γίνεται πάλι επαναληπτική κοπή, αν απαιτείται, ώστε να διαμορφωθεί το προφίλ του κάτω δακτυλίου. Το σχήμα 3.53 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 3 ΚΟΠΗ 2ου ΠΡΟΦΙΛ" 4 0)\r\n');
a=abs(yf1(10)-yf1(14)/Lc);
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf1(10))-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(12));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(10)));
        fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf1(14)+Lc);
        fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(10))-2*Lc*i);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf1(14)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(13));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(10)));
```

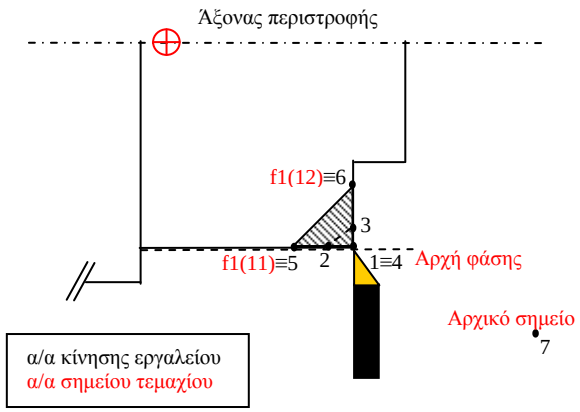


Σχήμα 3.53 Φάση 3 Κοπή 2ου προφιλ κάτω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 4 σετάρισμα 1 Κοπή σπασίματος

Το σχήμα 3.54 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία. Επίσης έχει ληφθεί υπόψη η φορά κίνησης του κοπτικού για την αποφυγή σύγκρουσης τεμαχίου-εργαλείου.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 4 ΚΟΠΗ ΣΠΑΣΙΜΑΤΟΣ" 4 0)\r\n');
a=abs(xf1(12)-xf1(11)/Lc);
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(12)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(12),2*abs(yf1(11))-2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(11)));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(11));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(12),2*abs(yf1(12)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
```

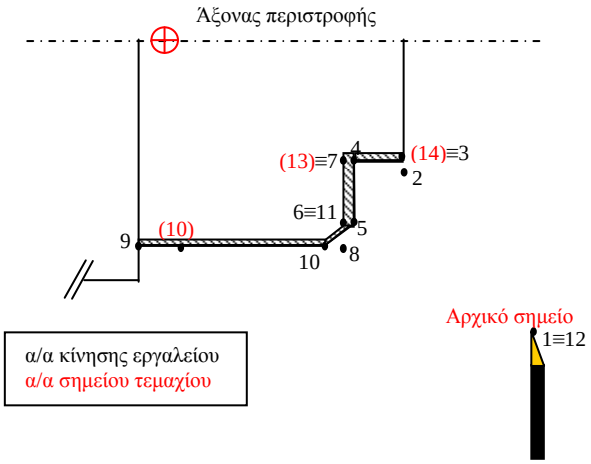


Σχήμα 3.54 Φάση 4 Κοπή σπασίματος κάτω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 5 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση

Ορίζονται οι στροφές, η πρόωση και το εργαλείο για την αποπεράτωση του προφίλ του τεμαχίου. Στο επίπεδο του α/α (13) του τεμαχίου διακόπτεται η συνεχής κοπή ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση του εργαλείου με το τεμάχιο. Το σχήμα 3.55 αναπαριστά την ακολουθία των κινήσεων του κοπτικού.

```
fprintf(fileID,'T2\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 5 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',xf1(14),2*abs(yf1(14)-Lc));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(y1(14)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(13));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(12)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x1(12));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(13)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(13));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(10)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(10)-Lm-Lc);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x1(11));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1(12),2*abs(y1(12)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
```

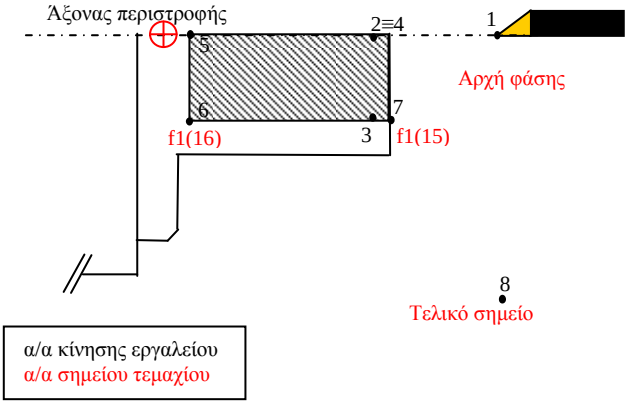


Σχήμα 3.55 Φάση 5 Αποπεράτωση κάτω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 6 σετάρισμα 1 Κοπή εσωτερικής οπής

Αλλάζει πάλι το εργαλείο, ώστε να γίνει εφικτή η πλάγια κοπή του τεμαχίου. Ορίζονται οι στροφές της ατράκτου και της πρόωσης για την φάση της εκχόνδρισης και ακολουθείται επαναληπτική κοπή.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 6 ΚΟΠΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΠΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T3\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F1,S1);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi2,0);
a=abs(xf1(15)-xf1(16))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',xf1(15)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(15)));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',0);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(16));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(16)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(15));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
```

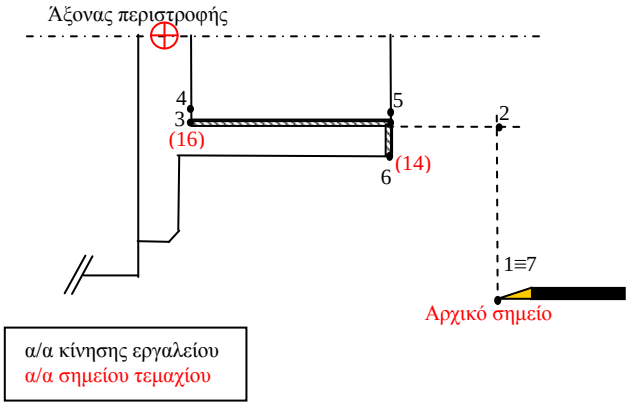


Σχήμα 3.55 Φάση 6 Κοπή εσωτερικής οπής κάτω τεμαχίου 1ου σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 7 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση εσωτερικής οπής και προσώπου

Αλλάζει το κοπτικό για την φάση της αποπεράτωσης, το ίδιο και οι στροφές και η πρόωση. Γίνεται κοπή μιας φέτας υλικού από το τεμάχιο, όπως ορίζεται από το σχήμα 3.56. Μετά το πέρας αυτής της φάσης έχουν ολοκληρωθεί όλες οι φάσεις που αφορούν το πρώτο σετάρισμα.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 7 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΠΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T4\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',2*abs(y1(15)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf1(16));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(15)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x1(15));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf1(14)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x1arxi2,2*abs(y1arxi2));
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```



Σχήμα 3.56 Φάση 7 Αποπεράτωση εσωτερικής οπής και προσώπου κάτω τεμαχίου 1^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 8 Κοπή σε πριόνι

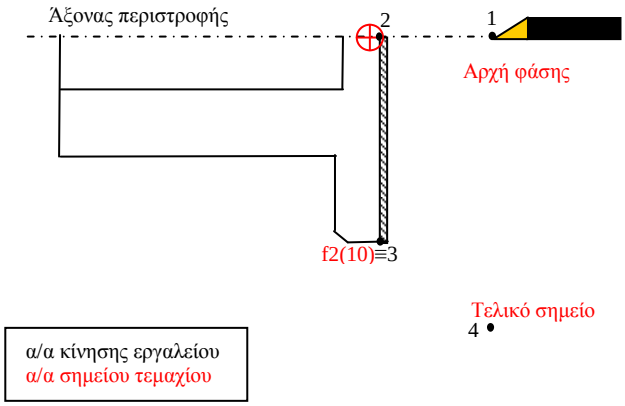
Το τεμάχιο αλλάζει μηχανή επεξεργασίας, τοποθετείται στο πριόνι και κόβεται έτσι ώστε το πλαινό επίπεδο της λάμας να εφάπτεται στο τεμάχιο, όπως φαίνεται στο φασεολόγιο.

Φάση 9 σετάρισμα 2 Κοπή προσώπου

Εφαρμόζεται το Σ.Σ.4=W4 βάσει του φασεολογίου. Ορίζονται η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Το εργαλείο πάει στην αρχική θέση και κόβει, μειώνοντας την τιμή της διαμέτρου, μια φέτα από το stock model. Οι εντολές των κινήσεων που αφορούν αυτό το σετάρισμα και τον άνω δακτύλιο εξάγονται στο αρχείο ‘lathedown2sim.txt’, ενώ για το πρόγραμμα της προσομοίωσης η συγκεκριμένη κατεργασία ονομάζεται ‘Lathedown2’.

```
fileID=fopen('lathedown2sim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'Lathedown2\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Lathe (Alarm if not lathe machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 4\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 9 ΚΟΠΗ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G92 Z+%-5.3f\r\n',arxi(1,2));
```

```
fprintf(fileID,'T3\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09 M4\r\n',x2arxi2,0);
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F1,S1);
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(10));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(yf2(10)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x2arxi2,2*abs(y2arxi2));
```

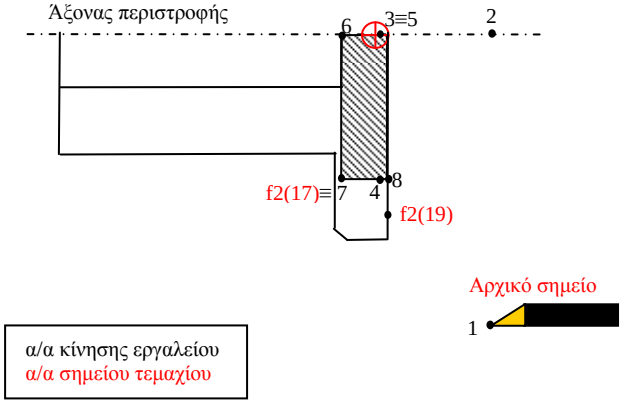


Σχήμα 3.56 Φάση 9 Κοπή προσώπου 2^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 10 σετάρισμα 2 Κοπή 1^{ου} μπλοκ στην εσωτερική οπή

Στην συνέχεια διαμορφώνεται το εσωτερικό του κάτω δακτυλίου. Σε πρώτη φάση γίνεται κοπή μέχρι το σημείο με α/α (17). Το σχήμα 3.57 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 10 ΚΟΠΗ 1ου Block ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΠΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f\r\n',0);
a=abs(xf2(17)-xf2(19))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',xf2(19)-Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17)));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M09\r\n',0);
    end
end
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f M08\r\n',xf2(17));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(19));
```

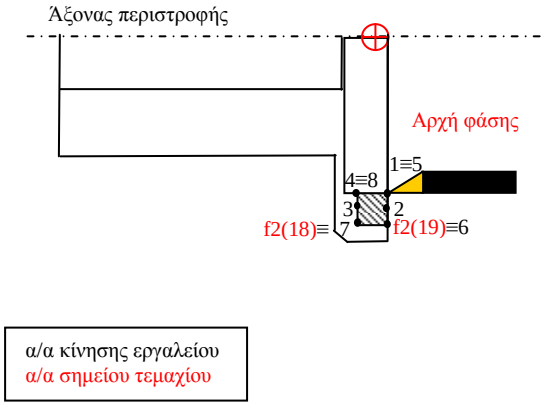


Σχήμα 3.57 Φάση 10 Κοπή 1^{ου} block εσωτερικής οπής 2^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 11 σετάρισμα 2 Κοπή 2^{ου} μπλοκ στην εσωτερική οπή

Έπειτα διαμορφώνεται σε δεύτερη φάση το εσωτερικό του κάτω δακτυλίου έως το σημείο με α/α (18). Το σχήμα 3.58 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 11 ΚΟΠΗ 2ου Block ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΠΗΣ" 4 0)\r\n');
a=abs(yf2(19)-yf2(17))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17))+2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(18));
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17)));
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(19));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(19)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(18));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17)));
```

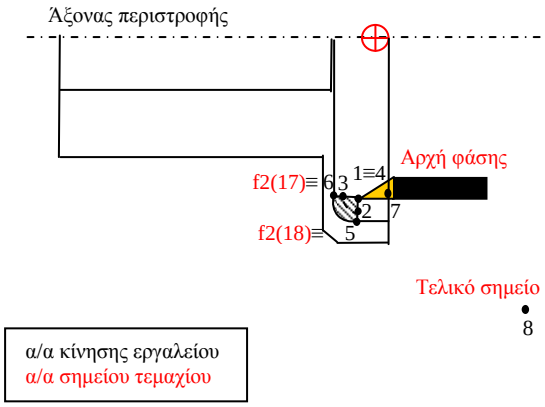


Σχήμα 3.58 Φάση 11 Κοπή 2^{ου} block εσωτερικής οπής 2^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 12 σετάρισμα 2 Κοπή τεταρτοκυκλίου στην εσωτερική οπή

Τέλος γίνεται η διαμόρφωση του τεταρτοκυκλίου στο εσωτερικό του δακτυλίου, με επαναληπτική διαδικασία. Όμοια πρέπει να δοθεί σημασία στην φορά της κυκλικής κίνησης, αν αλλάξουν οι συνθήκες κοπής.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 12 ΚΟΠΗ ΓΩΝΙΑΣ" 4 0)\r\n');
a=abs(yf2(18)-yf2(17))/Lc;
E=fix(a);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(17))+2*Lc*i);
        fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',xf2(18)-
Lc*i,2*abs(yf2(17)),Lc*i);
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',xf2(18));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(18)));
fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',xf2(17),2*abs(yf2(17)),abs(xf2(18)-
xf2(17)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f M09\r\n',xf2(19));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x2arxi2,2*abs(y2arxi2));
```

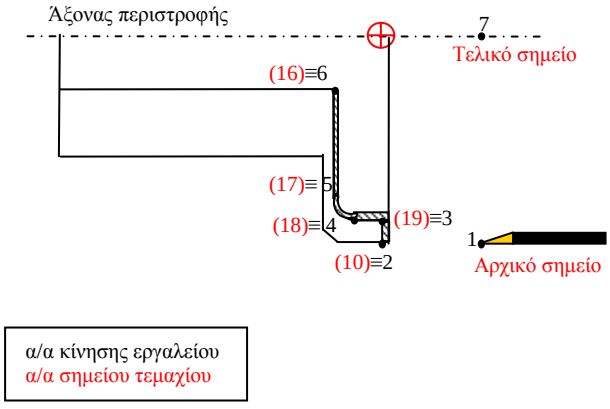


Σχήμα 3.59 Φάση 12 Κοπή τεταρτοκυκλίου εσωτερικής οπής 2^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

Φάση 13 σετάρισμα 2 Αποπεράτωση εσωτερικής οπής και προσώπου

Ορίζονται το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί, οι στροφές και η πρόωση. Το σχήμα 3.60 αναπαριστά τις κινήσεις για μια επανάληψη και την τελική κοπή που διαμορφώνει την επιθυμητή γεωμετρία. Με την φάση της αποπεράτωσης ο εσωτερικός χώρος του κάτω δακτυλίου γίνεται διαμπερής. Η κατεργασία του τεμαχίου έχει τελειώσει στο κέντρο τόρνευσης με το πέρας αυτής της φάσης. Η άτρακτος ακινητοποιείται, το πρόγραμμα τερματίζεται και το αρχείο με τις εντολές του G- κώδικα κλείνει.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 13 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΠΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΩΠΟΥ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T4\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F2,S2);
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f\r\n',x2arxi2,2*abs(yf2(10)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x2(10));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f M08\r\n',2*abs(y2(19)));
fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',x2(18));
fprintf(fileID,'G03 Z%-5.3f X%-5.3f R%-5.3f\r\n',x2(17),2*abs(y2(17)),abs(y2(18)-
y2(17)));
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',2*abs(yf2(16)));
fprintf(fileID,'G00 Z%-5.3f X%-5.3f M09\r\n',x2arxi2,0);
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```

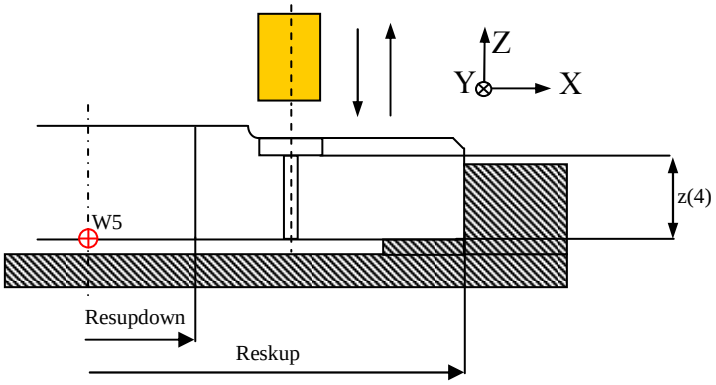


Σχήμα 3.60 Φάση 13 Αποπεράτωση εσωτερικής οπής και προσώπου 2^{ου} σεταρίσματος στο κέντρο τόρνευσης

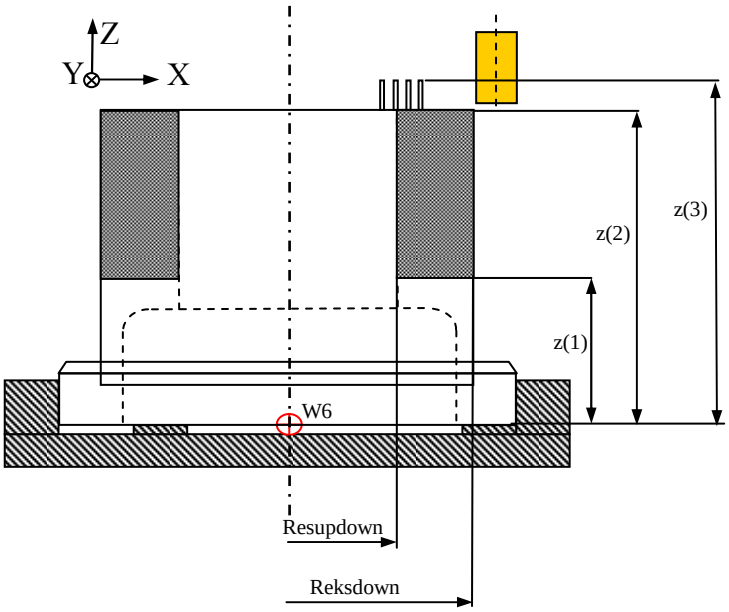
Στην συνέχεια μεταβαίνουμε στο αρχείο εξαγωγής αρχείων εντολών G-κώδικα gcodecnc.m. Πλέον, οι κατεργασίες που απομένουν αφορούν το κέντρο κατεργασιών και όταν ολοκληρωθούν και αυτές τότε σειρά θα πάρει η συγκόλληση του άνω και του κάτω δακτυλίου.

Όμοια με το αρχείο gcodelahte.m, έτσι και εδώ εξάγονται δυο αρχεία .txt, το cncup.txt και cncdown.txt, τα οποία όπως υποδηλώνουν και τα ονόματά τους αφορούν τις εντολές των κατεργασιών του άνω και του κάτω δακτυλίου αντίστοιχα.

Στο αρχείο αυτό, λοιπόν, γίνεται εισαγωγή των σημαντικών επιπέδων που θα φτάσουν οι κατεργασίες. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 3.61 και 3.62.



Σχήμα 3.61 Προσδιορισμός απαραίτητου ύψους και ακτινών του άνω δακτυλίου για τις κατεργασίες στο κέντρο κατεργασιών



Σχήμα 3.62 Προσδιορισμός απαραίτητων υψών και ακτινών του κάτω δακτυλίου για τις κατεργασίες στο κέντρο κατεργασιών

Καθαρίζεται η μνήμη και τα τυχόν δεδομένα στη μνήμη της matlab και ορίζεται το offset, το οποίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την μεγαλύτερη ακτίνα των εργαλείων για την αποφυγή σύγκρουσης τεμαχίου εργαλείου. Ορίζονται τα βάθη που θα οδηγείται κάθε φορά το εργαλείο ανάλογα με την φάση και το πάχος των

επιπέδων που θα κατεργασθούν στην φάση της αποπεράτωσης. Χαρακτηριστικές τιμές δίνονται στο παρακάτω τμήμα του προγράμματος. Ο σχεδιαστής μπορεί να τις αλλάξει κατά βούληση με περιορισμό τις μέγιστες που ορίζονται από τον κατασκευαστή των εργαλείων που θα χρησιμοποιήσει. Τέλος ορίζονται οι στροφές και οι πρώσεις για τις φάσεις της εκχόνδρισης, ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης καθώς και των συνθηκών που αφορά την κατεργασία στο λεπτότοιχο των πτερυγίων.

```
clc
clear all

%Εισαγωγή διαστάσεων γεωμετρίας όπως ορίζεται στο σχέδιο σε mm
z(1)=
z(2)=
z(3)=
z(4)=3.5;
Resupdown=79.4;
Reksup=107;
Reksdown=113;
%Καθορισμός offset για τα αρχικά σημεία του κοπτικού. Ο αριθμός αυτός
%πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τη διάμετρο του μεγαλύτερου εργαλειου
offset=10;

%Βάθος κοπής εργαλείου κατά την φάση της εκχόνδρισης
ap3=1;
%Βάθος κοπής εργαλείου κατά την φάσης της ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης
ap4=1;
%Πάχος στα κάθετα επίπεδα της βάσης των πείρων και των πτερυγίων κατά την
%φάση της αποπεράτωσης στο τεμάχιο
ap5=0.2;

%Πρόωση εργαλείου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της εκχόνδρισης
F3=300;
%Πρόωση εργαλείου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης
F4=200;
%Πρόωση εργαλείου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης
F5=200;
%Πρόωση εργαλείου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης στο
%λεπτότοιχο της αεροτομής
F6=50;

%Στροφές ατράκτου του κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της εκχόνδρισης
S3=2000;
%Στροφές ατράκτου του κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης
S4=2500;
%Στροφές ατράκτου του κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης
S5=2500;
%Στροφές ατράκτου του κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της αποπεράτωσης
%στο λεπτότοιχο της αεροτομής
S6=3000;
```

Ορίζεται η πρόωση και οι στροφές κατά την φάση της διάτρησης των οπών στο άνω τεμάχιο.

```
%Πρόωση εργαλείου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της διάτρησης
APd=300;
%Στροφές ατράκτου στο κέντρου κατεργασιών κατά την φάση της διάτρησης
Sd=2000;
```

Ορίζονται τα επίπεδα προ της φάσης της αποπεράτωσης

```
%Δημιουργία διαστάσεων καθ'ύψος προ της φάσης της αποπεράτωσης
zf(1)=z(1)+ap5;
zf(2)=z(2)+ap5;
zf(3)=z(3);
zf(4)=z(4);
```

Στην συνέχεια εισάγονται οι μεταβλητές που ορίζουν την διαμόρφωση των οπών και των πείρων συγκράτησης. Έχουμε την ακτίνα και τις απόλυτες συντεταγμένες του κέντρου του πρώτου πείρου, άρα και του κέντρου της οπής.

```
%Μεταβλητές σημείου connection
xcon=
ycon=
Rcon=
```

Συνεχίζουμε στην μελέτη του κάτω δακτυλίου και των πείρων. Ορίζονται οι ακτίνες των ομόκεντρων κύκλων γύρω από τον κάθε πείρο, οι οποίες προφανώς μπορεί να διαφέρουν σε αριθμό ανάλογα τον αριθμό των πτερυγίων. Είναι ευθύνη του σχεδιαστή να ερευνήσει, όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, και με την βοήθεια του αρχείου excel, το πόσες διαδρομές θα κάνει το κοπτικό για να εξαλείψει τους χώρους όπως φαίνεται στο σχήμα 3.32. Για την φάση της εκχόνδρισης έχουμε, έστω δυο ακτίνες:

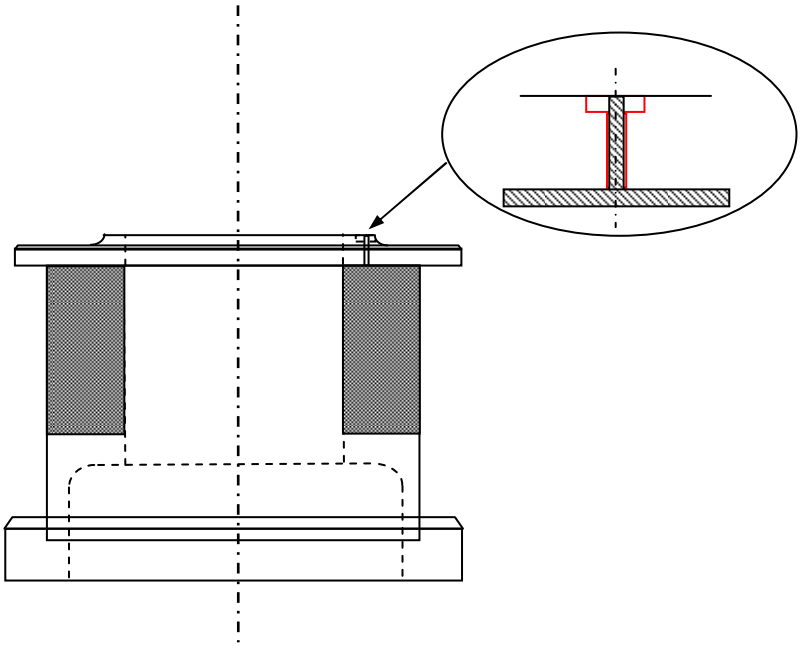
```
Rconp(1)=
Rconp(2)=
```

Ενώ για την φάση της αποπεράτωσης έχουμε, έστω τέσσερις:

```
Rconf(1)=4.45; %(2,9/2+3 όπου 2,9 η διάμετρος του καρφιού για να χωράει στην οπή
%του άνω δακτυλίου και 3 η ακτίνα του εργαλείου αποπεράτωσης
Rconf(2)=7.45;
Rconf(3)=10.45;
Rconf(4)=13.45;
```

Όπως αναφέρεται και στις αντίστοιχες τιμές του αρχείου excel, οι τιμές των ακτινών βαίνουν αύξουσες. Για παράδειγμα Rconp(1)<Rconp(2) κ.ο.κ. Το ίδιο συμβαίνει και για τις ακτίνες κατά την φάση της αποπεράτωσης. Αυτό είναι σημαντικής σημασίας διότι στο αρχείο προγραμματισμού η κατεργασία ορίζεται έτσι ώστε να γίνονται οι κοπές από την μεγαλύτερη ακτίνα προς την μικρότερη, ουσιαστικά αρχίζοντας εκτός του χώρου του τεμαχίου και φτάνοντας προς την διάμετρο του πείρου. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή το κοπτικό επιχειρήσει κοπή από την ακτίνα γύρω από τον πείρο με κινήσεις αυξανομένης ακτίνας το πρόγραμμα πρέπει να αλλάξει.

Λαμβάνοντας υπόψη όμως το γεγονός ότι θα ακολουθήσει η τοποθέτηση του άνω δακτυλίου στον κάτω δακτύλιο, και ύστερα η συγκόλληση τους, ο σχεδιαστής πρέπει να μεριμνήσει ώστε η συναρμογή να μην είναι σε καμία περίπτωση σφιχτή, αλλά χαλαρή, σχήματα 3.63. Για αυτό τον λόγο ο σχεδιαστής πρέπει να μεριμνήσει για τον υπολογισμό της πρώτης ακτίνας κατά την φάση της αποπεράτωσης ώστε να είναι κατά άτι πιο μικρή από την τιμή της διαμέτρου της οπής. Κατ’επιλογή, μπορεί να μειωθεί η διάμετρος του πείρου κατά 0,1mm σε σχέση με την διάμετρο του πείρου. Δίνεται αριθμητικό παράδειγμα για τις ακτίνες.



Σχήμα 3.63 Η συναρμογή πρέπει να είναι δυνατή και για αυτό τον λόγο ο πείρος στο κάτω τεμάχιο έχει μικρότερη διάμετρο κατά άτι σε σχέση με την διάμετρο της οπής στο άνω τεμάχιο.

Ορίζονται οι ακτίνες των κυκλικών κινήσεων όπως φαίνονται στο σχήμα 3.33 ως Reks, Res για την φάση της εκχόνδρισης και Reksf, Resf για την φάση της αποπεράτωσης. Πάλι είναι ευθύνη του σχεδιαστή να υπολογίσει τον αριθμών των αναγκαίων ακτινών. Επίσης, είναι ευνόητο ότι οι ακτίνες βαίνουν αυξανόμενες, όπως ορίζεται στο αρχείο excel.

```
%Μεταβλητές των κυκλικών δακτυλίων
Reks(1)=
Reks(2)=
Reks(3)=
Res(1)=
Resf(1)=
Resf(2)=
Reksf(1)=
Reksf(2)=
Reksf(3)=
Reksf(4)=
Reksf(5)=
```

Στην συνέχεια ορίζονται όλες οι παράμετροι των τροχιών. Αρχικά, ορίζεται ο αριθμός των πτερυγίων:

```
%Μεταβλητές τροχιών
%Αριθμός πτερυγίων
N=28;
```

Στην συνέχεια διαβάζονται οι συντεταγμένες των τροχιών γύρω από την αεροτομή για την φάση της εκχόνδρισης, της ημι-αποπεράτωσης και της αποπεράτωσης. Να υπενθυμηθεί ότι τα αρχεία αυτά (coordinates.txt, coordinatessf.txt και coordinatesf.txt) έχουν εξαχθεί από τα αρχεία excel και έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα με το script για την μορφοποίηση των τιμών των. Δημιουργούμε τους αντίστοιχους πίνακες coor, coorsf και coorf για την φάση της εκχόνδρισης, της ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης αντίστοιχα.

```
%Ανάγνωση τιμών συντεταγμένων για τις τρεις φάσεις
coor=dlmread('coordinates.txt');
coorsf=dlmread('coordinatessf.txt');
coorf=dlmread('coordinatesf.txt');
```

Αυτοί δημιουργούνται ως εξής. Κατά την ανάγνωση των τιμών από τα αρχεία .txt ξεχωρίζουμε τις συντεταγμένες της τροχιάς του άνω (xup, yup) και του κάτω (xdown, ydown) χείλους. Το ίδιο γίνεται για τις συντεταγμές των τροχιών των δυο άλλων φάσεων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όπως ορίζονται οι συντεταγμένες στα αρχεία excel, έτσι πρέπει να διαβαστούν και από το πρόγραμμα της matlab (χρειάζεται προσοχή ώστε να μην διαβαστεί κάποια τιμή που πρέπει να είναι x ως y).

Το ίδιο γίνεται και για τις ακτίνες των ενδιάμεσων τροχιών. Η μόνη διάφορά έγκειται στον αριθμό των μεταβλητών. Όπως έχει αναφερθεί αν έστω ο αριθμός της διαμέρισης που γίνεται κατά μήκος του πτερυγίου είναι 100, τότε τα σημεία που θα την ορίζουν θα είναι 101. Όμως, ο αριθμός των σημείων που θα ορίζει την τροχιά γύρω από την αεροτομή θα είναι κατά 1 αυξημένος από τον αριθμό των σημείων της αεροτομής, για τον λόγο του ότι υπάρχει το τελικό σημείο στο οποίο το κοπτικό θα αλλάζει πλευρά και από το άνω χείλος θα κατευθύνεται στο κάτω, ή ανάποδα.

Επομένως, τα σημεία των τροχιών που θα διαβαστούν θα είναι 102, ενώ οι ακτίνες που αφορούν την μετάβαση του εργαλείου, ώστε να κάνει κυκλική παρεμβολή μεταξύ των σημείων, θα είναι αριθμός κατά 1 μικρότερος, άρα 101.

```
%Δημιουργία πινακών με τις τιμές των συντεταγμένων
for k=1:102
    xup(k)=coor(k,1);
    yup(k)=coor(k,2);
    xsfup(k)=coorsf(k,1);
    ysfup(k)=coorsf(k,2);
    xfup(k)=coorf(k,1);
    yfup(k)=coorf(k,2);
    xdown(k)=coor(k,4);
    ydown(k)=coor(k,5);
    xsfdown(k)=coorsf(k,4);
    ysfdown(k)=coorsf(k,5);
    xfdown(k)=coorf(k,4);
    yfdown(k)=coorf(k,5);
end
%Δημιουργία πινακών με τις ακτίνες των κυκλικών κινήσεων μεταξύ των σημείων
%που ορίζουν τις τροχιές
for k=1:101
    Rup(k)=coor(k,3);
    Rsfup(k)=coorsf(k,3);
    Rfup(k)=coorf(k,3);
    Rdown(k)=coor(k,6);
    Rsfdown(k)=coorsf(k,6);
    Rfdown(k)=coorf(k,6);
end
```

Στην συνέχεια ορίζονται οι μεταβλητές των πάσων που χρειάζεται να γίνει για να εξαλειφθεί ο χώρος μεταξύ δυο διαδοχικών αεροτομών. Στο πρόγραμμα που αναπτύσσεται επιλέγεται το εργαλείο να πραγματοποιεί διαδοχή κοπών όπως φαίνεται στα σχήμα 2.61 και 2.65α. Πιο συγκεκριμένα ακολουθείται η γενική ωρολογιακή φορά του εργαλείου γύρω από την αεροτομή και σε σημεία απαραίτητα το κοπτικό πραγματοποιεί κυκλικά πάσα μέχρι το κάτω χείλος της επόμενης αεροτομής. Ο σχεδιαστής βρίσκει από τα αρχεία excel τα αντίστοιχα α/α του άνω χείλους της πρώτης αεροτομής κατά τα οποία πρέπει να γίνει το πάσο, με βάσει των όσων αναπτύχθηκαν στην επεξήγηση του σχήματος 3.28. Αυτό που πρέπει να καθοριστεί είναι το σημείο λήξης του πάσου, το οποίο βρίσκεται όπως αναπτύχθηκε από το αντίστοιχο α/α του κάτω χείλους της δεύτερης αεροτομής, το οποίο και καθορίζεται και ως xpaso, ypaso, Rpaso. Προφανώς, ο σχεδιαστής αν κρίνει ότι απαιτούνται περισσότερα πάσα κατά την φάση της εκχόνδρισης τότε δημιουργεί αντίστοιχο πίνακα και εισάγει τις αντίστοιχες τιμές. Αυτό για παράδειγμα γίνεται στην συνέχεια όπου ο αριθμός των πάσων κατά την φάση της αποπεράτωσης είναι μεγαλύτερος του ενός. Αναφέρεται ότι σε αυτή την περίπτωση τα πάσα αναγράφονται

μειούμενης της ακτίνας από το κέντρο της πτερύγωσης. Επομένως, κατά την γενική ωρολογιακή κίνηση του κοπτικού στην φάσης της αποπεράτωσης θα πραγματοποιούνται με σειρά τα πάσα (5), (4), (3), (2) και τέλος (1). Για παράδειγμα:

```
%Μεταβλητές πάσων
xpaso=100.096;
ypaso=20.305;
Rpaso=Reksup-5; %το 5 είναι η ακτίνα του εργαλείου εκχόνδρισης
xfpaso(1)=104.147;
yfpaso(1)=24.378;
Rfpaso(1)=106;
xfpaso(2)=97.731;
yfpaso(2)=21.870;
Rfpaso(2)=100;
xfpaso(3)=92.114;
yfpaso(3)=19.571;
Rfpaso(3)=94;
xfpaso(4)=86.509;
yfpaso(4)=17.078;
Rfpaso(4)=88;
xfpaso(5)=80.868;
yfpaso(5)=14.956;
Rfpaso(5)=82;
```

Τέλος, καθορίζονται οι αρχές συντεταγμένων για τα συστήματα W5 και W6. Πρέπει να ληφθεί υπόψη τυχόν τοποθέτηση των τάκων στήριξης κάτω από τα τεμάχια και να αναγραφεί στις επόμενες τιμές.

```
%Καθορισμός συστημάτων συντεταγμένων για τα δυο σεταρίσματα
%Προσοχή στο ύψος, z, αν υπάρχουν τάκοι συγκράτησης
SS1=[Reksup Reksup 0];
SS2=[Reksdown Reksdown 0];
```

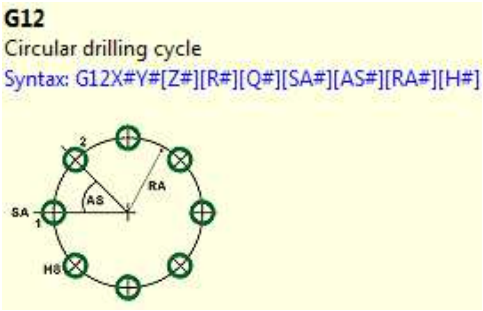
Επομένως, για την επεξεργασία του άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών έχουμε ότι:

Φάση 1 σετάρισμα 1 Κοπή οπών πείρων

Εφαρμόζεται το Σ.Σ.1=W5 βάσει του φασεολογίου. Οι εντολές των κινήσεων που αφορούν αυτό το σετάρισμα και τον άνω δακτύλιο εξάγονται στο αρχείο ‘cncupsim.txt’, ενώ για το πρόγραμμα της προσομοίωσης η συγκεκριμένη κατεργασία ονομάζεται ‘CNCup’.

```
fileID=fopen('cncupsim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'CNCup\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Mill (Alarm if not a milling machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 4, 0, 0 (Load workpiece)\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
fprintf(fileID,'G92 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',SS1(1),SS1(2),SS1(3));
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 1 ΚΟΠΗ ΟΠΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T1\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f M08 M3\r\n',Rcon,0,zf(4)+offset);
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',APd,Sd);
fprintf(fileID,'G12 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f R%-5.3f Q%-5.3f SA%-5.3f AS%-5.3f RA%-5.3f
H%-5.3f\r\n',0,0,0,zf(4)+offset,2,0,360/N,Rcon,N);
fprintf(fileID,'M09\r\n');
```

Το εργαλείο πηγαίνει πάνω από το κέντρο της πρώτης οπής πάνω στον άξονα των X και σε ακτίνα Rcon. Εκεί με την χρήση εντολής G12 γίνεται επαναληπτική διάτρηση. Αυτή είναι μια βοηθητική εντολή του προγράμματος προσομοίωσης και ορίζεται με την βοήθεια του επόμενου σχήματος 2.64.



Σχήμα 3.64 Εντολή G12 για την δημιουργία κυκλικού μοτίβου διάτρησης

Σε αυτή την εντολή ορίζεται ως X,Y το κέντρο του κύκλου που θα ακολουθεί το εργαλείο. Στην περίπτωση μας είναι το Σ.Σ.1=W5, Z είναι το ύψος του επιπέδου στο οποίο θα είναι το πέρας της κάθε διάτρησης, στην περίπτωσή μας 0, R είναι το ύψος του επιπέδου στο οποίο θα κινείται το εργαλείο κατά την μετάβαση του από την μία οπή στην άλλη, Q είναι η μεταβλητή του ύψους του επιπέδου από το επίπεδο R κατά το οποίο θα αρχίζει η διάτρηση, SA η γωνία σε μοίρες της πρώτης διάτρησης άρα 0^o, AS η γωνία μεταξύ των δυο διατρήσεων, άρα 360/N, RA είναι η ακτίνα του κύκλου, άρα Rcon και H είναι ο αριθμός των οπών, άρα N.

Αν και η συγκεκριμένη εντολή εφαρμόζεται στον συγκεκριμένο controller της προσομοίωσης, γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι όλα τα κέντρα κατεργασιών έχουν μια εντολή η οποία να πραγματοποιεί διατρήσεις κάνοντας κυκλικό μοτίβο. Και για αυτό τον λόγο και χρησιμοποιείται. Αν ο σχεδιαστής κρίνει απαραίτητη την απεξάρτηση του προγράμματος από την εντολή G12, τότε μπορεί να πραγματοποιήσει την διαδικασία με συμβατικό τρόπο προγραμματισμού, προσθέτοντας απλά μερικές γραμμές εντολών. Επίσης, ορίζεται η πρόωση και οι στροφές κατά την φάση της διάτρησης ως APd και Sd αντίστοιχα.

Φάση 2 σετάρισμα 1 Κοπή χώρων συγκόλλησης

Γίνεται αλλαγή εργαλείου, πρόωσης και στροφών και χρησιμοποιείται πάλι η εντολή G12 για την δημιουργία των χώρων που θα εγχέεται το συγκόλλημα. Το μόνο που αλλάζει στην εντολή της επανάληψης είναι το τελικό ύψος που θα φτάνει το εργαλείο, το οποίο στον κώδικα έχει τιμή z(4). Να σημειωθεί ότι το εργαλείο πρέπει να πραγματοποιεί κοπή κατά την κατεύθυνση των z, αλλιώς τότε θα υπάρξει σύγκρουση. Στον προγραμματισμό του παρόντος κώδικα επιλέχθηκε να γίνεται χρήση του εργαλείου αποπεράτωσης, το οποίο και απαιτείται να πραγματοποιεί τέτοιου είδος κοπή, κάτι που για το εργαλείο εκχόνδρισης δεν απαιτείται. Στο τέλος, σταματάει η άτρακτος, το έλαιο λίπανσης και το τεμάχιο είναι έτοιμο.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 2 ΚΟΠΗ ΧΩΡΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T2\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G00 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f M08 M3\r\n',Rcon,0,zf(4)+offset);
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F3,S3);
fprintf(fileID,'G12 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f R%-5.3f Q%-5.3f SA%-5.3f AS%-5.3f RA%-5.3f
H%-5.3f\r\n',0,0,zf(4),zf(4)+offset,2,0,360/N,Rcon,N);
fprintf(fileID,'M09\r\n');
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```

Για την επεξεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών έχουμε ότι:
Φάση 1 σετάρισμα 1 Κοπή πείρων συγκράτησης

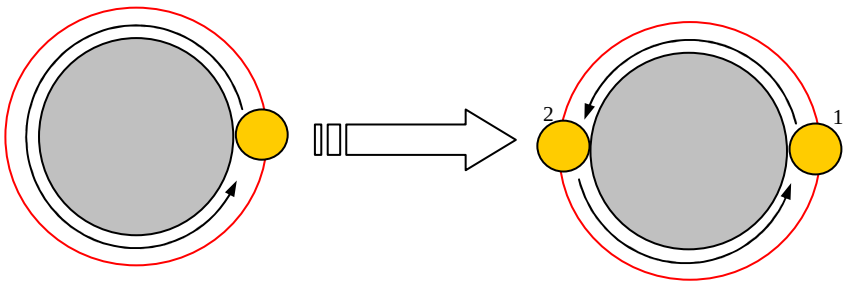
Εφαρμόζεται το Σ.Σ.2=W6 βάσει του φασεολογίου. Οι εντολές των κινήσεων που αφορούν αυτό το σετάρισμα και τον άνω δακτύλιο εξάγονται στο αρχείο ‘cncdownsim.txt’, ενώ για το πρόγραμμα της προσομοίωσης η συγκεκριμένη κατεργασία ονομάζεται ‘CNCdown’. Επιλέγεται το εργαλείο εκχόνδρισης, οι στροφές και η αντίστοιχη πρόωση. Σημαντική είναι η επιλογή της φοράς της ατράκτου ώστε να γίνεται, όπως έχει αναφερθεί, αντίρροπη κοπή. Το εργαλείο κινείται πάνω από το τεμάχιο έξω από την εξωτερική ακτίνα του στον άξονα των X.

```
fileID=fopen('cncdownsim.txt','a');
fprintf(fileID,'#region\r\n');
fprintf(fileID,'CNCdown\r\n');
fprintf(fileID,'$Millimeters (Alarm if not mm machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$Mill (Alarm if not a milling machine)\r\n');
fprintf(fileID,'$AddRegPart 2, 0, 0 (Load workpiece)\r\n');
fprintf(fileID,'#endregion\r\n');
fprintf(fileID,'\r\n');
fprintf(fileID,'G92 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',SS2(1),SS2(2),SS2(3));
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 1 ΚΟΠΗ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T3\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f M4 M08\r\n',SS2(1)+offset,0,z(3)+offset);
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F3,S3);
```

Αρχικά γίνονται οι κοπές των εξωτερικών κύκλων μειούμενης ακτίνας, ύστερα των εσωτερικών και τέλος η κοπή των ομόκεντρων κύκλων γύρω από κάθε πείρο. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται έτσι ώστε το κοπτικό σε κάθε κύκλο να μειώνει το ύψος από το αρχικό z(3) μέχρι του zf(2), όπου zf(2)>z(2), διότι θα ακολουθήσει η αποπεράτωση. Η επανάληψη για την μείωση του ύψους γίνεται με τις εντολές του προγραμματισμού που έχουν αναφερθεί κατά την φάση των κατεργασιών στο κέντρο τόρνευσης.

Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται η G03 για την ανθωρολογιακή φορά της κίνησης. Επισης, επειδή η μηχανή λαμβάνει ως σφάλμα την εισαγωγή του ίδιου σημείου και ακτίνας διάφορης του μηδενός ώστε να πραγματοποιηθεί κύκλος, η διαδρομή χωρίζεται σε δυο ημικύκλια, με αντιδιαμετρικές συντεταγμένες ως προς την αρχή του Σ.Σ.2. Αυτό θα ακολουθείται στην συνέχεια σε όλες τις κινήσεις των κοπτικών που χρειάζεται να πραγματοποιήσουν κοπή πλήρους κύκλου, σχήμα 3.65.

Για τη δημιουργία των κύκλων χρησιμοποιείται βοηθητικός δείκτης k ο οποίος βαίνει μειούμενος ώστε να γίνεται επιλογή της κατάλληλης ακτίνας του κυκλου. Η αρχική τιμή του σαφώς και θα διαφοροποιηθεί εφόσον υπάρχουν και άλλες ακτίνες προς κατεργασία. Τέλος, το κοπτικό πηγαίνει σε ύψος άνω του τεμαχίου.



Σχήμα 3.65 Μετατροπή πλήρους κυκλικής κίνησης σε δυο διαδοχικές ημικυκλικές κινήσεις

```
%Δημιουργία εξωτερικών κύκλικών δακτυλίων
for k=3:-1:1 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',Reks(k));
    a=abs(z(3)-zf(2)/ap3);
```

```
    E=fix(a);
    if E>1
        for i=1:E
            fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)-ap3*i);
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Reks(k),0,Reks(k));
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Reks(k),0,Reks(k));
        end
    end
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',zf(2));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Reks(k),0,Reks(k));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Reks(k),0,Reks(k));
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end
```

Ακολουθούν οι εντολές που δηλώνουν την κατεργασία για την δημιουργία των εσωτερικών κύκλων. Το κοπτικό αρχικά πηγαίνει στο εσωτερικό της οπής και άνω του τεμαχίου από όπου και αρχίζει την κατεργασία αυξανομένης της ακτίνας. Προφανώς, ισχύουν τα ίδια με την κατεργασία των εξωτερικών κύκλων. Με το πέρας της κατεργασίας το κοπτικό επανέρχεται πάνω από το τεμάχιο.

```
%Δημιουργία εσωτερικών κύκλικών δακτυλίων
for k=1:1 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',Res(k));
    a=abs(z(3)-zf(2)/ap3);
    E=fix(a);
    if E>1
        for i=1:E
            fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)-ap3*i);
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Res(k),0,Res(k));
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Res(k),0,Res(k));
        end
    end
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',zf(2));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Res(k),0,Res(k));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Res(k),0,Res(k));
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end
```

Στην συνέχεια ακολουθεί η φάση κατά την οποία γίνονται οι ομόκετροι κύκλοι γύρω από κάθε πείρο. Η φιλοσοφία που γίνεται αυτό αναπτύσσεται στην συνέχεια. Αρχικά εκφράζουμε την γωνία που πρέπει να περιστραφεί κάθε πτερύγιο για την δημιουργία της πτερύγωσης ως u, αρχόμενης φυσικά από γωνία 0 για την πρώτη αεροτομή. Καθορίζεται η γωνία του κέντρου του πείρου, η οποία είναι σταθερή στο σχετικό σύστημα κάθε πτερυγίου. Επομένως, μπορούμε να βρούμε τις συντεταγμένες του κέντρο του πείρου κάθε πτερυγίου με την βοήθεια της απόστασης του από το κέντρο της πτερύγωσης και του δείκτη j, ο οποίος αλλάζει για αυτό τον σκοπό από 0 έως N-1. Ορίζουμε επίσης ένα αρχικό σημείο στο οποίο το κοπτικό θα πηγαίνει κάθε φορά πριν πραγματοποιήσει τις κοπές γύρω από έναν πείρο. Το κοπτικό στην συνέχεια θα πραγματοποιεί ομόκεντρους κύκλους γύρω από το κέντρο του πείρου μειούμενης της ακτίνας, για παράδειγμα απαιτούνται 2 κύκλοι άρα το k=2 και θα κινηθεί έως το 1 ώστε να αφορά τις ακτίνες που εισήχθησαν στην αρχή του προγράμματος. Αυτή η διαδικασία γίνεται σε ένα επίπεδο z και στην συνέχεια μειώνεται το ύψος κατεργασίας z κατά το βάθος κοπής του εργαλείου ap3. Αυτό γίνεται για τον πρώτο πείρο. Στην συνέχεια γίνεται η ίδια διαδικασία για όλους τους άλλους πείρους, απλά αλλάζοντας την γωνία u, άρα το j.

Πρέπει να αναφερθεί ότι για την εκπλήρωση της συνθήκης που αναπτύχθηκε προηγουμένως για την κυκλική κίνηση, εισάγουμε τέσσερις μεταβλητές που είναι οι συντεταγμένες του σημείου 1 και 2, όπως ορίζει το σχήμα 3.65 για κάθε κύκλο γύρω από κάθε πείρο. Είναι ευνόητο ότι αυτές εξαρτώνται από τις γωνίες και τις ακτίνες του κάθε πείρου και της επανάληψης. Τέλος, το εργαλείο πραγματοποιεί όλες τις

κοπές γύρω από κάθε πείρο έως το ύψος zf(2) και στην συνέχεια πηγαίνει σε ασφαλές ύψος πάνω από το τεμάχιο.

```
%Δημιουργία ομόκετρων κύκλων γύρω από τους πείρους συγκράτησης
for j=0:N-1
    u=2*pi/N*j;
    th=atan(ycon/xcon);
    x1con=Rcon*cos(u+th);
    y1con=Rcon*sin(u+th);
    xarxi=Resupdown*cos(th+u);
    yarxi=Resupdown*sin(th+u);
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    for k=2:-1:1 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        x1arcon=x1con-Rconp(k)*cos(th+u);
        y1arcon=y1con-Rconp(k)*sin(th+u);
        x2arcon=x1con+Rconp(k)*cos(th+u);
        y2arcon=y1con+Rconp(k)*sin(th+u);
        a=abs(z(3)-zf(2)/ap3);
        E=fix(a);
        if E>1
            for i=1:E
                fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,z(3)-
ap3*i);
                fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',x2arcon,y2arcon,Rconp(k));
                fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,Rconp(k));
            end
        end
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,zf(2));
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x2arcon,y2arcon,Rconp(k));
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,Rconp(k));
    end
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end
```

Φάση 2 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση πείρων συγκράτησης και επιπέδου z(2)

Επιλέγεται το εργαλείο αποπεράτωσης, η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Με την μεταβλητή j ορίζονται οι αντίστοιχες συντεταγμένες για το κάθε πτερύγιο, και προσδιορίζονται τα αρχικά σημεία από τα οποία θα αρχίσει η κοπή. Όπως έχει αναφερθεί καθε πείρος δημιουργείται με ακτίνα λίγο μικρότερη της ακτίνας της οπής στον άνω δακτύλιο.

Γίνεται λοιπόν κυκλική διαδικασία κοπής γύρω από κάθε πείρο μειώμενης καθ'ύψος, και στην συνέχεια το εργαλείο προχωρά στο τελικό ύψος z(2) όπου πραγματοποιεί ομόκεντρες κυκλικές κοπές γύρω από τον πείρο, αυξανόμενης της ακτίνας κοπής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η αποπεράτωση στο επίπεδο της βάσης των πείρων. Ο αριθμός τον ομόκετρων κύκλων γύρω από κάθε πείρο στο επίπεδο της βάσης των γίνεται πάλι με την βοήθεια του αρχείου excel, από όπου και σημειώνεται ο α/α αριθμός του δείκτη της μεταβλητής k, π.χ. από την 2 έως την 4 που θα είναι και η τελική ακτίνα κοπής.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 2 ΑΠΟΠΕΡΑΤΩΣΗ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T2\r\n');
fprintf(fileID,'M6\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F5,S5);
for j=0:N-1
    u=2*pi/N*j;
    th=atan(ycon/xcon);
    x1con=Rcon*cos(u+th);
    y1con=Rcon*sin(u+th);
    xarxi=Resupdown*cos(th+u);
    yarxi=Resupdown*sin(th+u);
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
```

```
    x1arcon=x1con-Rconf(1)*cos(th+u);
    y1arcon=y1con-Rconf(1)*sin(th+u);
    x2arcon=x1con+Rconf(1)*cos(th+u);
    y2arcon=y1con+Rconf(1)*sin(th+u);
    a=abs(z(3)-z(2)/ap4);
    E=fix(a);
    if E>1
        for i=1:E
            fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,z(3)-
ap4*i);
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',x2arcon,y2arcon,Rconf(1));
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,Rconf(1));
        end
    end
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,z(2));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x2arcon,y2arcon,Rconf(1));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,Rconf(1));

%Αποπεράτωση επιφάνειας xy στο επίπεδο z(2) με ομόκεντρους κύκλους γύρω από
%το κέντρου του πείρου
    for k=2:4 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        x1arcon=x1con-Rconf(k)*cos(th+u);
        y1arcon=y1con-Rconf(k)*sin(th+u);
        x2arcon=x1con+Rconf(k)*cos(th+u);
        y2arcon=y1con+Rconf(k)*sin(th+u);
        fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,z(2));
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x2arcon,y2arcon,Rconf(k));
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',x1arcon,y1arcon,Rconf(k));
    end
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end
```

Στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν έχει γίνει αποπεράτωση σε όλον τον χώρο του επιπέδου της βάσης των πείρων z(2), σχηματίζουμε ομόκεντρες κυκλικές τροχιές με κέντρο το κέντρο της πτερύγωσης. Αυτό γίνεται με την αύξηση της διαμέτρου όσο του εργαλείου αποπεράτωσης, από την εσωτερική ακτίνα έως την ακτίνα αποπεράτωσης του πείρου. Όμοια γίνεται και για την εξωτερική πλευρά του δακτυλίου από τους πείρους, αυτή την φορά όμως αρχίζοντας από την εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου και μειώνοντας τις τροχιές κοπής κατά την διάμετρο του εργαλείου, έως την ακτίνα αποπεράτωσης του πείρου. Είναι προφανές ότι οι α/α της μεταβλητής k για τον προσδιορισμό των κύκλων ορίζονται από το αρχείο excel και στην πρώτη περίπτωση αυξάνονται, ενώ στην δεύτερη μειώνονται.

```
%Δημιουργία εσωτερικών κύκλων αποπεράτωσης στο z(2)
 for k=1:2 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',Resf(k),0);
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(2));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Resf(k),0,Resf(k));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Resf(k),0,Resf(k));
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end

%Δημιουργία εξωτερικών κύκλων αποπεράτωσης στο z(2)
 for k=5:-1:1
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f\r\n',Reksf(k));
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(2));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',-Reksf(k),0,Reksf(k));
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',Reksf(k),0,Reksf(k));
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(3)+offset);
end
```

Φάση 3 σετάρισμα 1 Εκχόνδριση πτερυγίων

Επιλέγεται το εργαλείο εκχόνδρισης, η πρόωση και οι στροφές της ατράκτου. Το εργαλείο θα κινηθεί καθ’ύψος αφού διαμορφώσει ένα αρχικό προφίλ σε όλα τα

πτερύγια. Οι μεταβλητές συντεταγμένων αλλάζουν με την βοήθεια της j, του επιλεγμένου αριθμού των πτερυγίων που θα κατασκευαστούν και των συντεταγμένων της πρώτης αεροτομής. Επιπλέον, επειδή γνωρίζουμε τον α/α των σημείων που θα γίνει το πάσο μεταξύ των αεροτομών από την πρώτη στην δεύτερη αεροτομή, και του σημείου που αλλάζει η καμπυλότητα το κάτω χείλος οι μεταβλητές k μπορούν να καθοριστούν κάθε φορά παραμετρικά από το excel. Οι ίδιοι αριθμοί αλλάζουν σε κάθε πτερύγιο και αναδιαμορφώνονται σύμφωνα με την στροφή που δίνει η j.

Πρέπει να τονιστεί ότι στο συγκεκριμένο πρόγραμμα το εργαλείο έχει ως αρχικό σημείο στο εσωτερικό του δακτυλίου και πραγματοποιεί την τροχιά κοπής γύρω από κάθε πτερύγιο με γενική ωρολογιακή φορά όπου και θα τερματίζει στο εκάστοτε αρχικό σημείο, σχήμα 2.61. Επίσης κατά την πραγματοποίηση της κοπής του άνω χείλους θα γίνεται το πάσο του ενδιάμεσου χώρου των πτερυγίων, σχήμα 2.66. Το εργαλείο στην συνέχεια επιστρέφει στο α/α του άνω χείλους της αεροτομής και συνεχίζει στην τροχιά του άνω χείλους. Επίσης η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες χρειάζεται ώστε τα πάσα να ολοκληρώσουν την κοπή του ενδιάμεσου χώρου.

Χρειάζεται να αναφερθεί ότι στα πρώτα και στα τελευταία σημεία των α/α των αεροτομών το εργαλείο για να κινηθεί στο κάτω μέρος τη κάθε αεροτομής ακολουθεί εντολή G02 όπως υπαγορεύεται από την γενική κίνηση της κοπής.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε οι κυκλικές παρεμβολές μεταξύ των σημείων που ορίζουν το άνω ή κάτω χείλος να δημιουργούνται έτσι όπως υποδεικνύεται από το κέντρο του κύκλου κάθε κίνησης, σχήμα 2.56. Αυτό ορίζεται στο πρόγραμμα με την βοήθεια του αρχείου excel για την εποπτεία των κέντρων των κύκλων, και ανάλογα χρησιμοποιείται η εντολή G02 ή η εντολή G03.

Ένας άλλος παράγοντας που χρίζει προσοχής είναι αυτό της εντολής που ορίζει την φορά στροφών της ατράκτου. Επειδή έχουμε επιλέξει στην δημιουργία του προγράμματος γενική ωρολογιακή φορά κοπής, πρέπει να χρησιμοποιηθεί αντίστοιχη εντολή για τις στροφές ώστε να πραγματοποιείται αντίρροπο φρεζάρισμα σε κάθε φάση της διαμόρφωσης των πτερυγίων.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε, η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική μέχρι ενός συγκεκριμένου ύψους πάνω από το επίπεδο zf(1), ενώ οι ίδιες κινήσεις ορίζονται και για το επίπεδο zf(1) σε όλα τα πτερύγια.

Η ροή αυτή των κινήσεων μπορεί με κατάλληλες μετατροπές στο πρόγραμμα της matlab να αλλάξει και ή να ακολουθηθεί γενική ανθωρολογιακή φορά κοπής ή να γίνεται το πάσο κατά την πραγματοποίηση του κάτω χείλους κάθε πτερυγίου, αλλάζοντας φυσικά και τον τρόπο περιστροφής της ατράκτου, αν χρειάζεται.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 3 ΕΚΧΟΝΔΡΙΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T3 M06\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F3,S3);
a=abs(z(2)-zf(1)/ap3);
E=fix(a);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',Resupdown-offset,0);
if E>1
    for i=1:E
        fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(2)-ap3*i);
        for j=0:N-1
            u=2*pi/N*j;
            for k=1:102
                xa(k)=xup(k)*cos(u)-yup(k)*sin(u);
                ya(k)=xup(k)*sin(u)+yup(k)*cos(u);
                xk(k)=xdown(k)*cos(u)-ydown(k)*sin(u);
                yk(k)=xdown(k)*sin(u)+ydown(k)*cos(u);
            end
            xarxi=xa(1);
            yarxi=ya(1);
            xp=xpaso*cos(u)-ypaso*sin(u);
```

```
            yp=xpaso*sin(u)+ypaso*cos(u);
            fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
            for k=1:78 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rup(k));
            end
            fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp,yp,Rpaso);
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(79),ya(79),Rpaso);
%αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
            for k=79:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rup(k));
            end
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rdown(101));
            for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rdown(k));
            end
            for k=38:-1:1 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rdown(k));
            end
        end
    end
end

fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',zf(1));
for j=0:N-1
    u=2*pi/N*j;
    for k=1:102
        xa(k)=xup(k)*cos(u)-yup(k)*sin(u);
        ya(k)=xup(k)*sin(u)+yup(k)*cos(u);
        xk(k)=xdown(k)*cos(u)-ydown(k)*sin(u);
        yk(k)=xdown(k)*sin(u)+ydown(k)*cos(u);
    end
    xarxi=xa(1);
    yarxi=ya(1);
    xp=xpaso*cos(u)-ypaso*sin(u);
    yp=xpaso*sin(u)+ypaso*cos(u);
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    for k=1:78 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp,yp,Rpaso);
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(79),ya(79),Rpaso); %αλλαγή αν
αλλάξει κάτι στο excel
    for k=79:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rdown(101));
    for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rdown(k));
    end
    for k=38:-1:1  %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rdown(k));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',Resupdown-offset,0,z(3)+offset);
```

Φάση 4 σετάρισμα 1 Ημι-αποπεράτωση πτερυγίων

Κατά την ημι-αποπεράτωση επιλέγεται διαφορετικό εργαλείο διαφορετική πρόωση και διαφορετικές στροφές. Το εργαλείο σε αυτή την φάση και αφού εχουν κοπεί οι ενδιάμεσοι χώροι μεταξύ των πτερυγίων, διαγράφει απλά σε κάθε ένα πτερύγιο τις τροχιές της ημι-αποπεράτωσης, μειώνοντας το ύψος, έως το επίπεδο zf(1). Εδώ δεν χρειάζεται να γίνει κανένα ενδιάμεσο πάσο, αφού ο ρόλος της συγκεκριμένης φάσης είναι η προοδευτική μείωση του πάχους των πτερυγίων. Όμοια με την φάση της εκχόνδρισης ακολουθείται γενική ωρολογιακή κίνηση γύρω από τα

πτερύγια και βεβαίως η μεταβλητή k του α/α των σημείων των τροχιών ορίζεται με τη βοήθεια του αρχείου excel.

```
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 4 ΗΜΙ-ΑΠΟΠΕΡΑΤΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'T2 M06\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F4,S4);
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',Resupdown-offset,0,z(3)+offset);
for j=0:N-1
    u=2*pi/N*j;
    for k=1:102
        xa(k)=xsfup(k)*cos(u)-ysfup(k)*sin(u);
        ya(k)=xsfup(k)*sin(u)+ysfup(k)*cos(u);
        xk(k)=xsfdown(k)*cos(u)-ysfdown(k)*sin(u);
        yk(k)=xsfdown(k)*sin(u)+ysfdown(k)*cos(u);
    end
    xarxi=xa(1);
    yarxi=ya(1);
    a=abs(z(2)-zf(1)/ap4);
    E=fix(a);
    if E>1
        for i=1:E
            fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(2)-ap4*i);
            fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
            for k=1:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rsfup(k));
            end
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rsfdown(101));
            for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rsfdown(k));
            end
            for k=38:-1:1  %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rsfdown(k));
            end
        end
    end
    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',zf(1));
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    for k=1:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rsfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rsfdown(101));
    for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rsfdown(k));
    end
    for k=38:-1:1  %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rsfdown(k));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',Resupdown-offset,0,z(3)+offset);
```

Φάση 5 σετάρισμα 1 Αποπεράτωση πτερυγίων και επιπέδου z(1)

Σε αυτή την φάση το εργαλείο είναι το ίδιο με της ημι-αποπεράτωσης, όμως αλλάζουν οι στροφές και η πρόωση. Κατ'επιλογή αλλάζουν ξανά στο λεπτότοιχο της αεροτομής με μεταβλητές πάλι τις στροφές και την πρόωση καθώς επίσης και ο α/α από τον οποίο θα αρχίζουν και θα τελειώνουν οι νέες συνθήκες πάνω στην αεροτομή, δηλαδή το α/α στο άνω χείλος και το α/α στο κάτω χείλος. Αυτό γίνεται με την βοήθεια της εντολής if στο αντίστοιχο τμήμα του προγράμματος όπου το εργαλείο βρίσκεται στην περιοχή της επιλογής.

Όμοια λοιπόν με την ημι-αποπεράτωση, το εργαλείο κινείται διαγράφοντας τις τροχιές των τελικών διαστάσεων του, πτερυγίου καθ'υψος, φτάνοντας έως το τελικό επίπεδο z(1). Εκεί το πρόγραμμα φεύγει από τον κύκλο επανάληψης προσδιορισμού του ύψους και πρέπει να αποπερατώσει το επίπεδο στην βάση των πτερυγίων. Για να γίνει αυτό, γίνεται πάλι με την βοήθεια του αρχείου του excel ο προσδιορισμός των α/α της τροχιάς του άνω χείλους όπου θα πραγματοποιηθούν τα αναγκαία πάσα, όπως

ακριβώς έγινε και κατά την φάση της εκχόνδρισης. Ο προσδιορισμός των αντίστοιχων σημείων εκκίνησης λήξης των πάσων και των κυκλικών παρεμβολών των χειλών γίνεται πάλι με την μεταβλητή k. Τέλος, η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε πτερύγιο πάλι με την βοήθεια της μεταβλητής j που δηλώνει την στροφή των συντεταγμένων των τροχιών και μήκος του πτερύγίου, βάσει το κέντρο της πτερύγωσης.

Το τεμάχιο μετά το πέρας αυτής της φάσης έχει τελειώσει, όσον αφορά την κατεργασία του στο CNC, σταματάει το έλαιο κοπής, οι στροφές της ατράκτου και το πρόγραμμα.

```
%Ως σημείο αλλαγής των ανωτέρω επιλέγεται από τον σχεδιαστή στην
%συγκεκριμένη περίπτωση το σημείο με α/α=90
fprintf(fileID,'($Message "ΦΑΣΗ 5 ΑΠΟΠΕΡΑΤΩΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ" 4 0)\r\n');
fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F5,S5);
for j=0:N-1
    u=2*pi/N*j;
    for k=1:102
        xa(k)=xfup(k)*cos(u)-yfup(k)*sin(u);
        ya(k)=xfup(k)*sin(u)+yfup(k)*cos(u);
        xk(k)=xfdown(k)*cos(u)-yfdown(k)*sin(u);
        yk(k)=xfdown(k)*sin(u)+yfdown(k)*cos(u);
    end
    for k=1:5 %allagi an kati allaksei sto excel
        xp(k)=xfpaso(k)*cos(u)-yfpaso(k)*sin(u);
        yp(k)=xfpaso(k)*sin(u)+yfpaso(k)*cos(u);
    end
    xarxi=xa(1);
    yarxi=ya(1);
    a=abs(z(2)-z(1)/ap4);
    E=fix(a);
    if E>1
        for i=1:E
            fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(2)-ap4*i);
            fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
            for k=1:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
                if k==90
                   fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F6,S6);
                end
            end
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rfdown(101));
            for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
                fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-
5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rfdown(k));
                if k==90
                   fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F5,S5);
                end
            end
            for k=38:-1:1  %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
            fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rfdown(k));
            end
        end
    end

    fprintf(fileID,'G01 Z%-5.3f\r\n',z(1));
    fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f\r\n',xarxi,yarxi);
    for k=1:12 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp(5),yp(5),Rfpaso(5));
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(13),ya(13),Rfpaso(5)); %αλλαγή
αν αλλάξει κάτι στο excel
    for k=13:32 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp(4),yp(4),Rfpaso(4));
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(33),ya(33),Rfpaso(4)); %αλλαγή
αν αλλάξει κάτι στο excel
    for k=33:52 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
```

```
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp(3),yp(3),Rfpaso(3));
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(53),ya(53),Rfpaso(3)); %αλλαγή
αν αλλάξει κάτι στο excel
    for k=53:73 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp(2),yp(2),Rfpaso(2));
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(74),ya(74),Rfpaso(2)); %αλλαγή
αν αλλάξει κάτι στο excel
    for k=74:96 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
        if k==90
           fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F6,S6);
        end
    end
    fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xp(1),yp(1),Rfpaso(1));
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(97),ya(97),Rfpaso(1)); %αλλαγή
αν αλλάξει κάτι στο excel
    for k=97:101 %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xa(k+1),ya(k+1),Rfup(k));
    end
    fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(101),yk(101),Rfdown(101));
    for k=100:-1:(38+1) %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G03 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rfdown(k));
        if k==90
           fprintf(fileID,'F%-5.0f S%-5.0f\r\n',F5,S5);
        end
    end
    for k=38:-1:1  %αλλαγή αν αλλάξει κάτι στο excel
        fprintf(fileID,'G02 X%-5.3f Y%-5.3f R%-5.3f\r\n',xk(k),yk(k),Rfdown(k));
    end
end
fprintf(fileID,'G01 X%-5.3f Y%-5.3f Z%-5.3f\r\n',Resupdown-offset,0,z(3)+offset);
fprintf(fileID,'M5\r\n');
fprintf(fileID,'M30\r\n');
fclose(fileID)
```

Μετά την διαδικασία κατασκευής των δακτυλίων στα κέντρα τόρνευσης και κατεργασιών για να ολοκληρωθεί το προϊόν πρέπει να γίνει συγκόλληση των δυο τεμαχίων απο εξειδικευμένο προσωπικό πραγματοποιώντας συγκόλληση τύπου MIG.

4

Εξαγωγή αποτελεσμάτων

4.1 Οδηγίες χρήσης αρχείων

Αρχικά, γίνεται επιλογή της αεροτομής που θα κατασκευστεί, από τον διαδικτυακό τόπο http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html. Ορίζεται ο αριθμός των πτερυγίων και η γωνία προσβολής για τις πτερυγώσεις. Επιπλέον, γίνεται ο προσδιορισμός όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της πτερύγωσης, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας προσδιορισμού των συναρτήσεων των χειλών από δικτυακό ιστότοπο zunzun.com. Τέλος, γίνεται μια αρχική επιλογή των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν βάσει καταλόγων και του γενικού υπολογισμού όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 3.

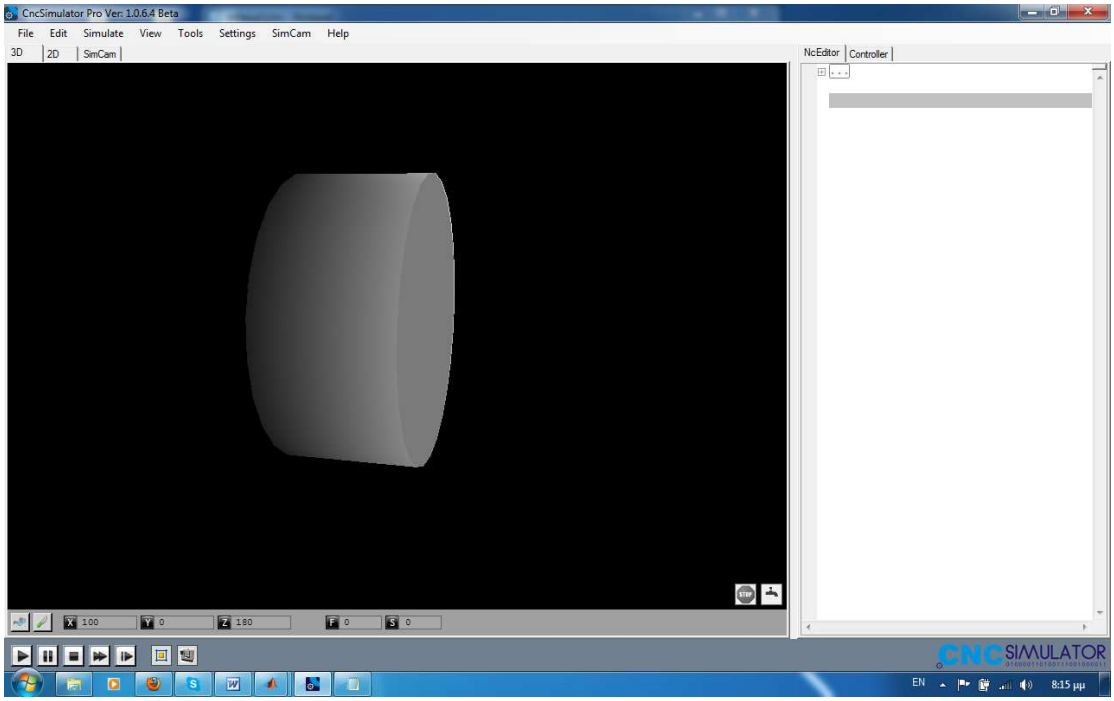
Χρησιμοποιείται το αντίστοιχο αρχείο excel Δακτύλιοι.xls για την επίβλεψη των σημείων της γεωμετρίας στον τόρνο και στην συνέχεια, ανάλογα με τις φάσεις της κατεργασίας που έχει επιλέξει ο σχεδιαστής (εκχόνδριση, ημιαποπεράτωση, ή αποπεράτωση), γίνεται χρήση αντίστοιχου αριθμού αρχείων excel και για τον προσδιορισμό και των έλεγχο των τροχιών του εργαλείου, γύρω από τις αεροτομές, χρησιμοποιώντας το Γενικό.xls.

Στην συνέχεια εξάγονται οι συντεταγμένες των τροχιών σε αρχεία .txt, τα οποία τροποποιούνται με το αντίστοιχο script στο περιβάλλον της matlab. Εν συνεχεία, δημιουργούνται τα αρχεία εξαγωγής των εντολών του G κώδικα, και με την βοήθεια των αρχείων excel (για τα πάσα, τους πείρους, και άλλα), να εξάγονται όλες οι αναγκαίες κινήσεις των κοπτικών όπως υποδεικνύεται από το φασεολόγιο. Τέλος, με την εξαγωγή των αρχείων .txt που προκύπτουν από το περιβάλλον της matlab, ο χειριστής μπορεί είτε να τα φορτώσει στις εργαλειομηχανές και να γίνει έλεγχος, είτε σε πρόγραμμα προσομοίωσης.

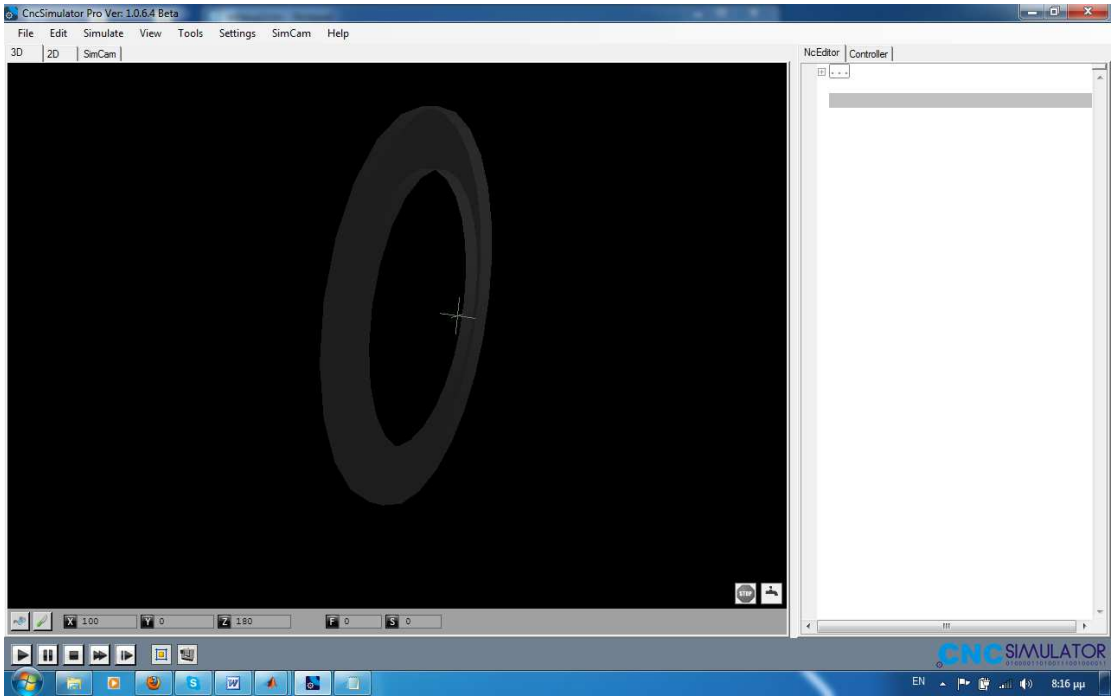
Για την προσομοίωση των κατεργασιών, ο σχεδιαστής πρέπει να δημιουργήσει ορισμένα αρχικά τεμάχια με τις απαραίτητες διαστάσεις, καθώς επίσης αν χρειάζεται, να δημιουργήσει εργαλεία κοπής που να αναπαριστούν τα πραγματικά και να αλλάξει τις αρχές συντεταγμένων, όπως αναπτύχθηκε προηγουμένως, ώστε να μπορεί να ελέγξει την διεξαγωγή των κινήσεων του κοπτικού.

4.2 Προσομοίωση στο CNC-simulator

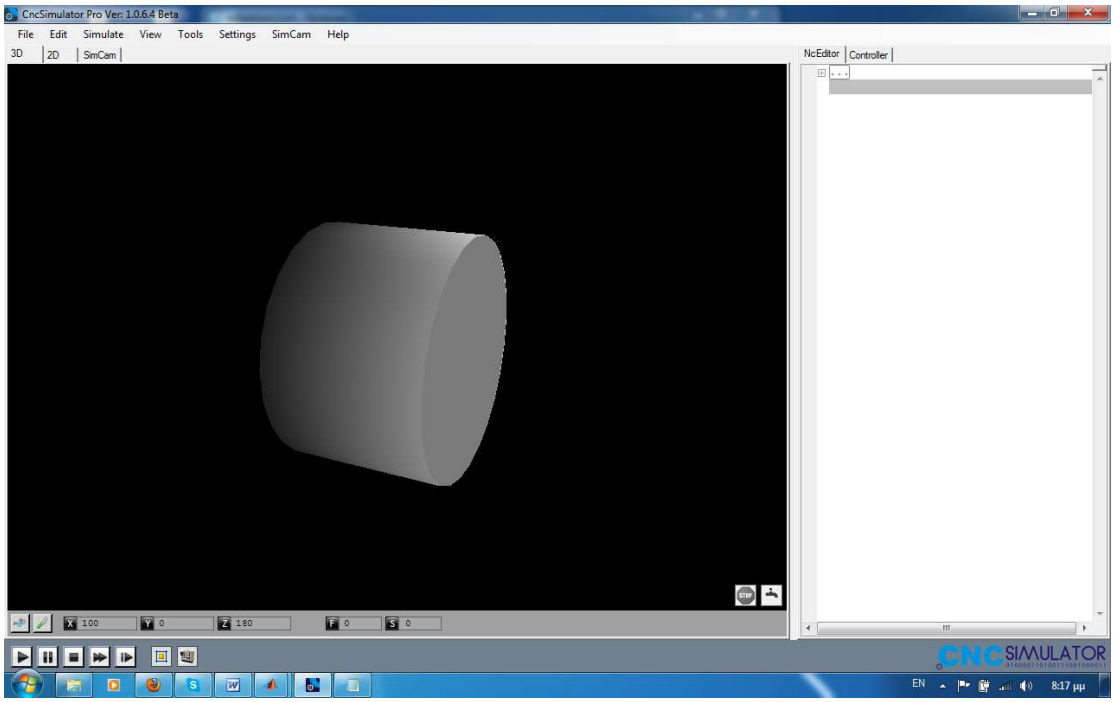
Για τις προσομοιώσεις που ακολουθήθηκαν και συγκεκριμένα για τις κατεργασίες στο κέντρο τόρνευσης τα σχήματα των αρχικών τεμαχίων ορίζονται ως



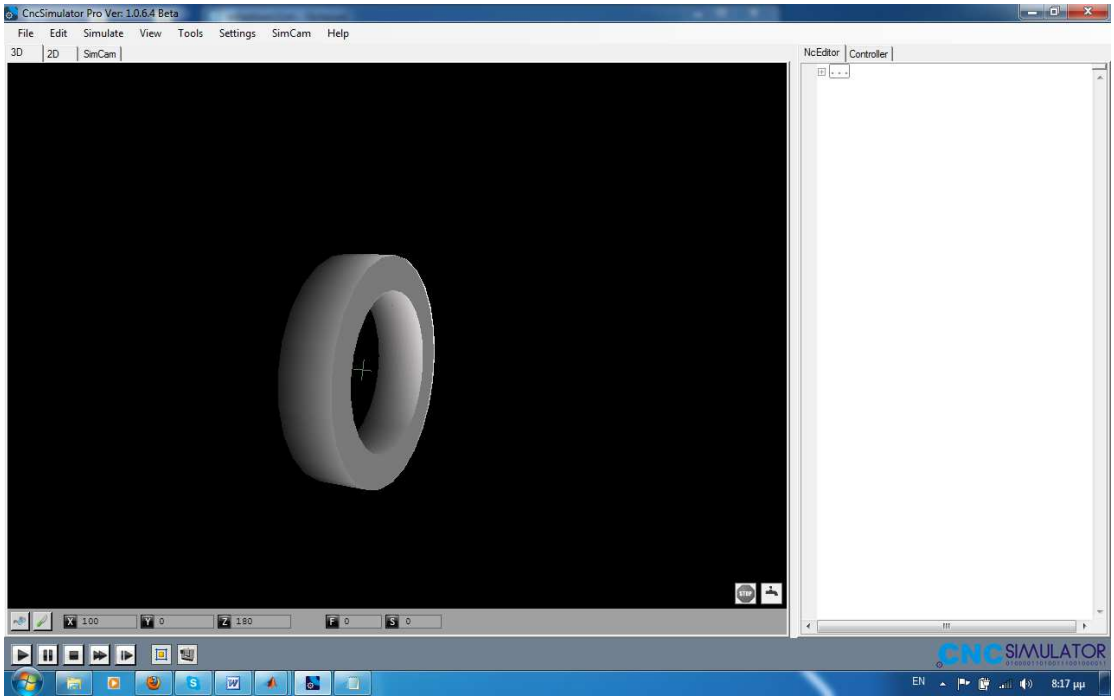
Σχήμα 4.1 Stock model για τον άνω δακτύλιο στο κέντρο τόρνευσης κατά το πρώτο σετάρισμα



Σχήμα 4.2 Stock model για τον άνω δακτύλιο στο κέντρο τόρνευσης κατά το δεύτερο σετάρισμα

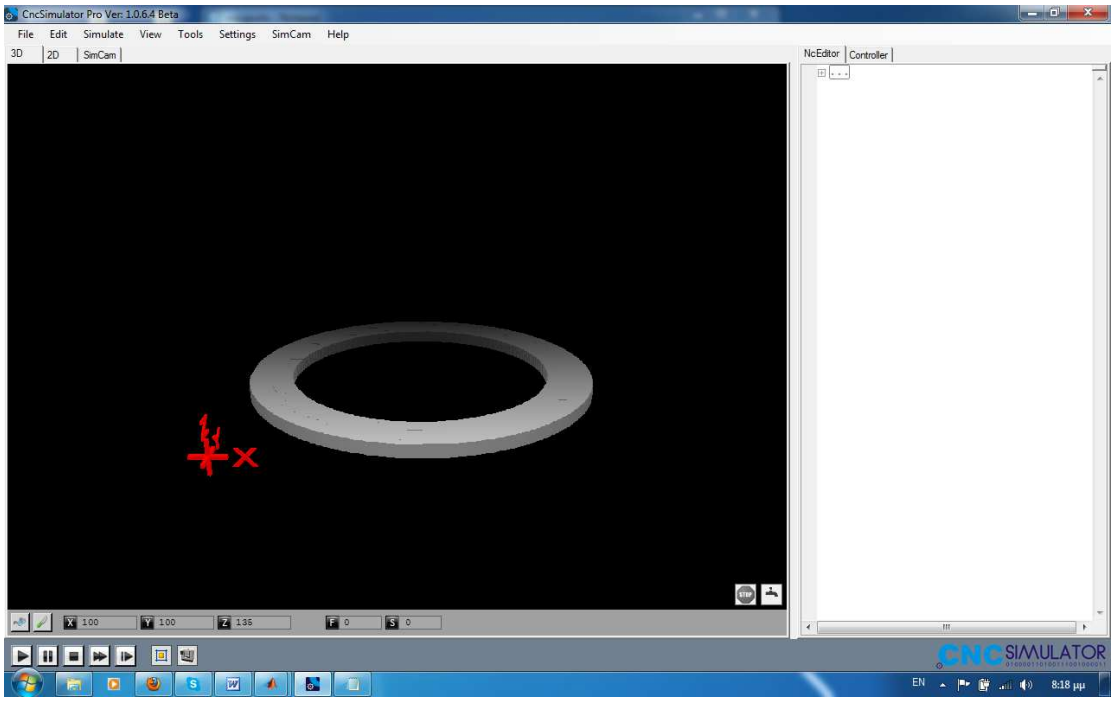


Σχήμα 4.3 Stock model για τον κάτω δακτύλιο στο κέντρο τόρνευσης κατά το πρώτο σετάρισμα

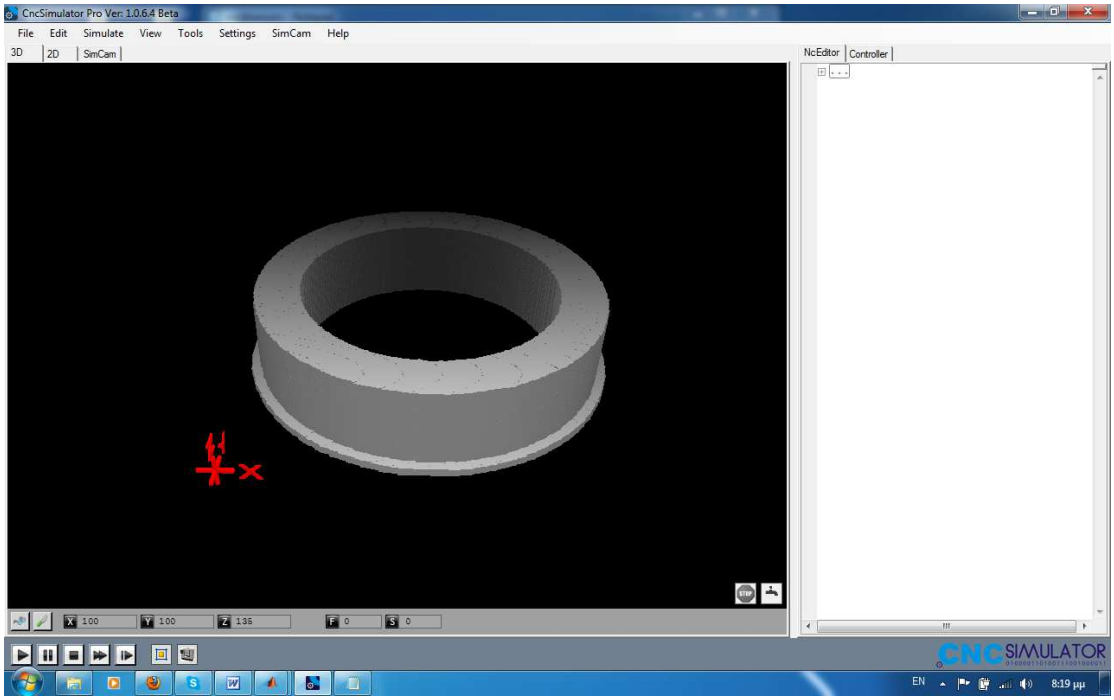


Σχήμα 4.4 Stock model για τον κάτω δακτύλιο στο κέντρο τόρνευσης κατά το δεύτερο σετάρισμα

Για τις κατεργασίες στο κέντρο κατεργασιών τα σχήματα των αρχικών τεμαχίων ορίζονται ως:



Σχήμα 4.5 Stock model για τον άνω δακτύλιο στο κέντρο κατεργασιών



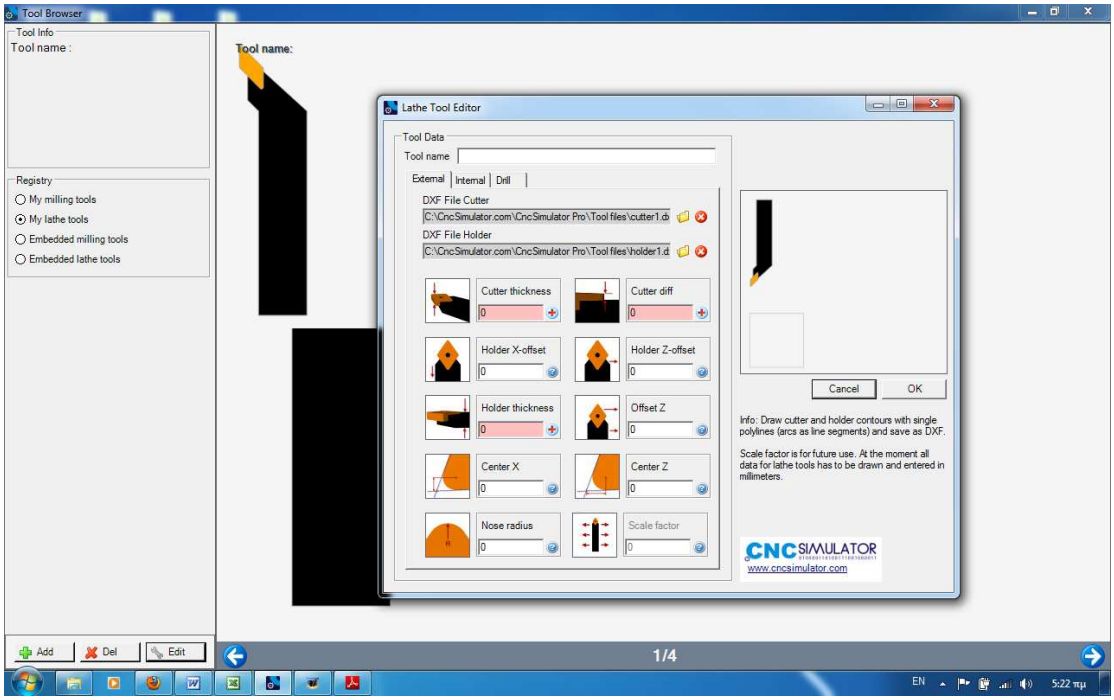
Σχήμα 4.6 Stock model για τον κάτω δακτύλιο στο κέντρο κατεργασιών

Για την δημιουργία των αρχικών τεμαχίων με σχήμα δακτυλίου χρησιμοποιήσαμε το φύλλο SimCam του Cnc-Simulator και με την βοήθεια του διαδικτυακού ιστότοπου του προγράμματος, http://cncsimulator.com/blog/?p=186, όπου εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία για το πως θα φτιάξουμε έναν δακτύλιο. Προφανώς, το τελικό τεμάχιο είναι η ένωση των όγκων των δυο δημιουργηθέντων δακτυλίων.

Πρέπει να αναφερθεί ότι τα αρχικά τεμάχια δείχνουν μόνο τις αναγκαίες διαστάσεις στην γεωμετρία των τεμαχίων, ανάλογα με την φάση που βρίσκεται η όλη κατεργασία της πτερύγωσης. Αυτό διότι, δεν κρίνεται σκόπιμο ο σχεδιαστής να αναλώνεται σε λεπτομερής σχεδίαση των τεμαχίων στην προσομοίωση, αλλά να έχει εποπτεία μόνο στις διαστάσεις που αλλάζουν και αφορούν κατά την κατεργασία της εκάστοτε φάσης. Για παράδειγμα στο σχήμα 4.6, κατά το οποίο δεν χρειάζεται να σχεδιαστεί η εσωτερική γεωμετρία του δακτυλίου.

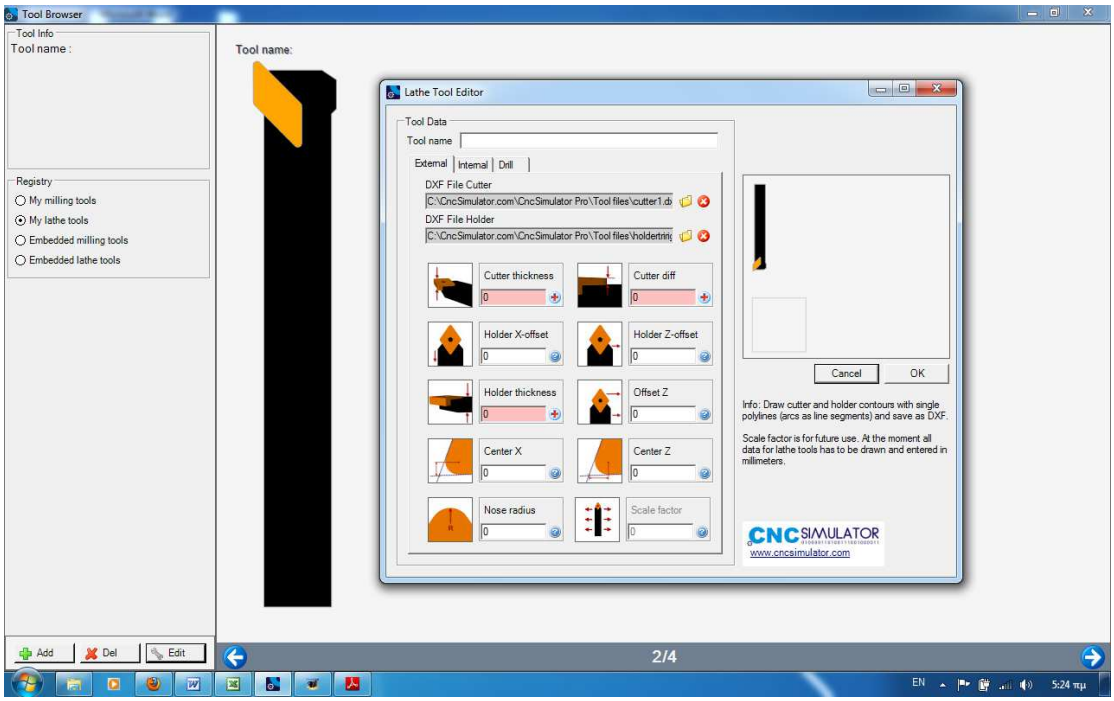
Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι σχεδιασμένα από τον χρήστη, ώστε να μπορεί να γίνει η προσομοίωση στη πλάγια πλευρά του τεμαχίου στον τόρνο, Στην περίπτωσή μας και επειδή η προσομοίωση χρησιμοποιεί τις θετικές τιμές στην κοπή, με βάση το σχήμα 2.37, χρησιμοποιούμε αριστερά εργαλεία. Αυτό δεν επιφέρει καμία αλλαγή στη ροή του φασεολογίου, παρόλο που το εργαλείο απεικονίζεται σε αντίθετη θέση από ότι θα γίνει στην προσομοίωση. Για τον τόρνο έχουμε:

Το εργαλείο εκχόνδρισης T0101 εξωτερικής κατεργασίας, με το στέλεχός του



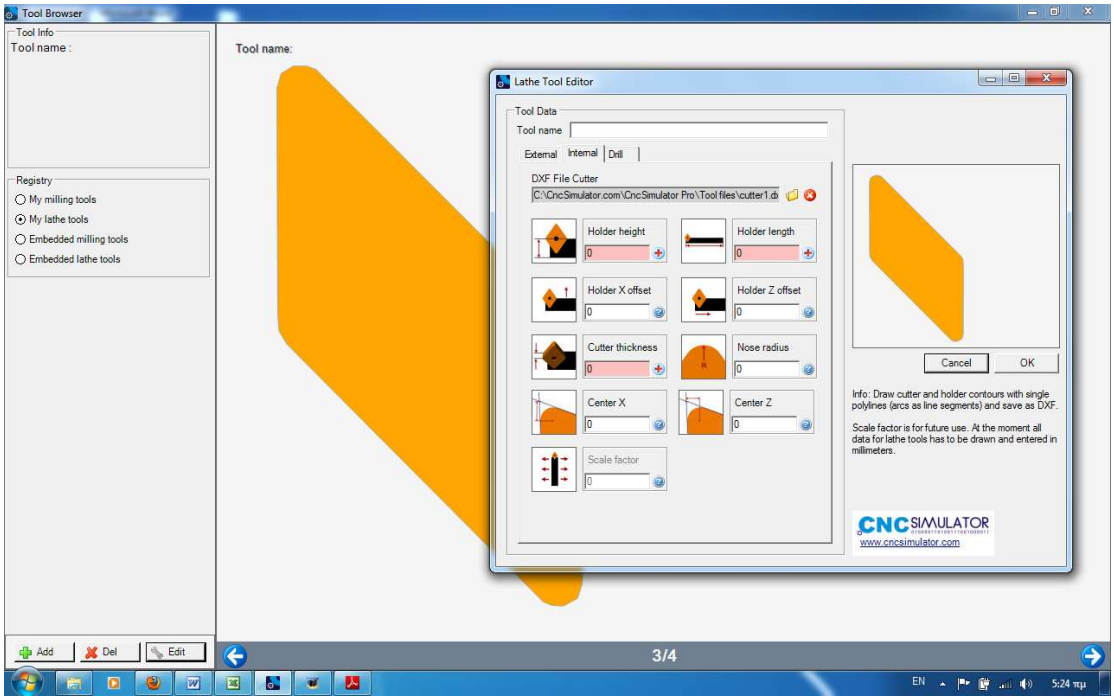
Σχήμα 4.7 Εργαλείο T0101 με την επιλογή του κοπτικού και του στελέχους κατά την φάση της επιλογής

Το εργαλείο αποπεράτωσης T0202 εξωτερικής κατεργασίας, με το στέλεχός του



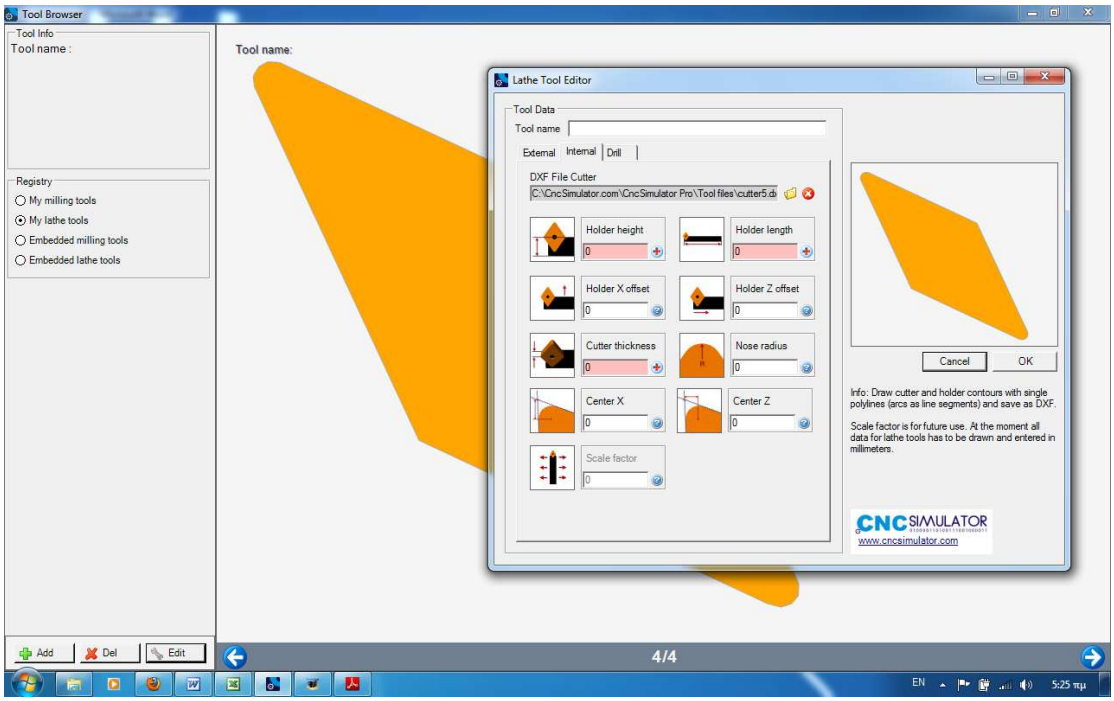
Σχήμα 4.8 Εργαλείο T0202 με την επιλογή του κοπτικού και του στελέχους κατά την φάση της επιλογής

Το εργαλείο εκχόνδρισης T0303 εσωτερικής κατεργασίας, χωρίς το στέλεχός του



Σχήμα 4.9 Εργαλείο T0303 με την επιλογή του κοπτικού κατά την φάση της επιλογής

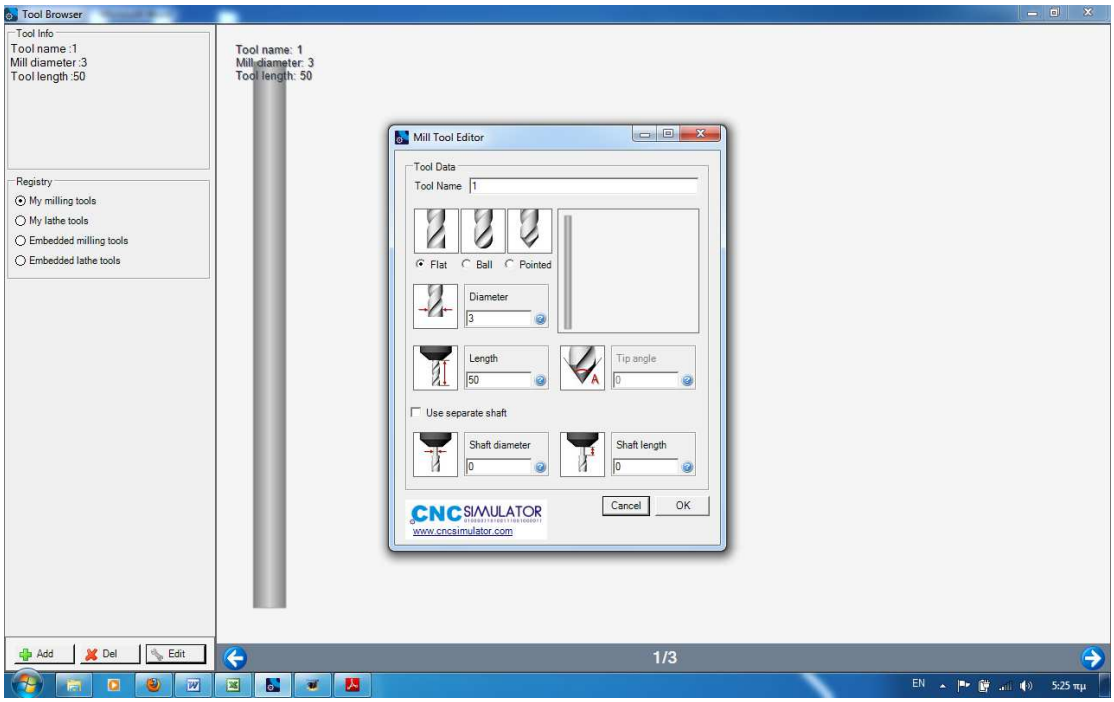
Και το τελευταίο για τον τόρνο εργαλείο αποπεράτωσης εσωτερικής κατεργασίας, χωρίς το στέλεχός του.



Σχήμα 4.10 Εργαλείο T0404 με την επιλογή του κοπτικού κατά την φάση της επιλογής

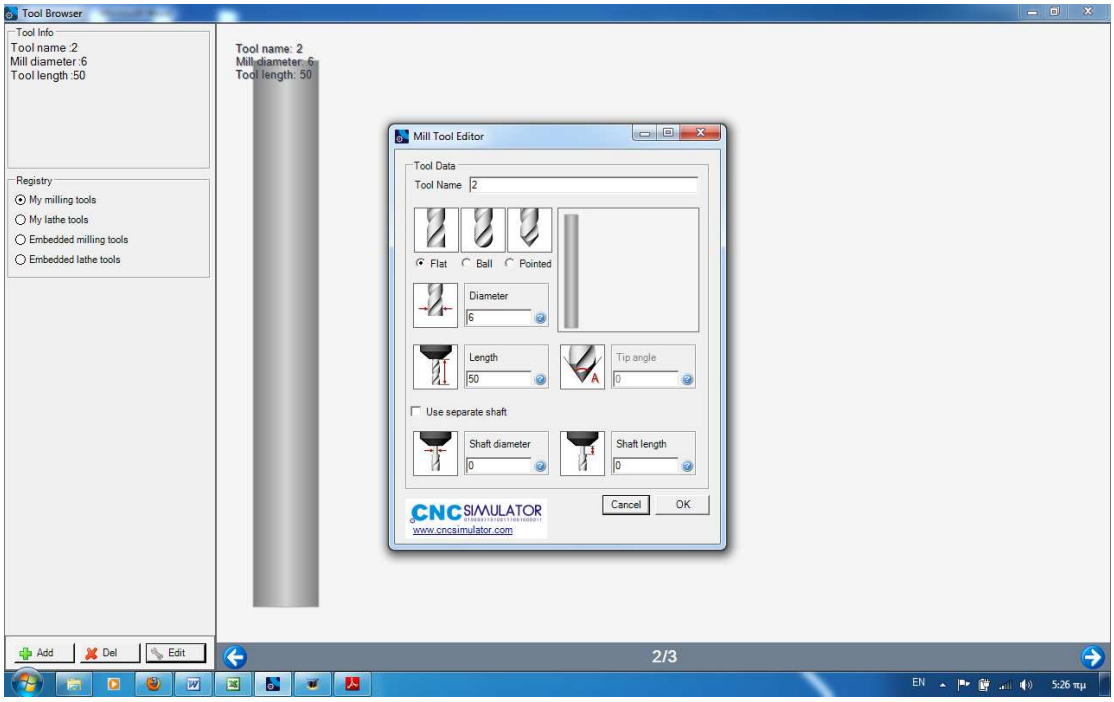
Για το κέντρο κατεργασιών έχουμε

Το εργαλείο T0101 ως τρυπάνι για τις οπές στον άνω δακτύλιο



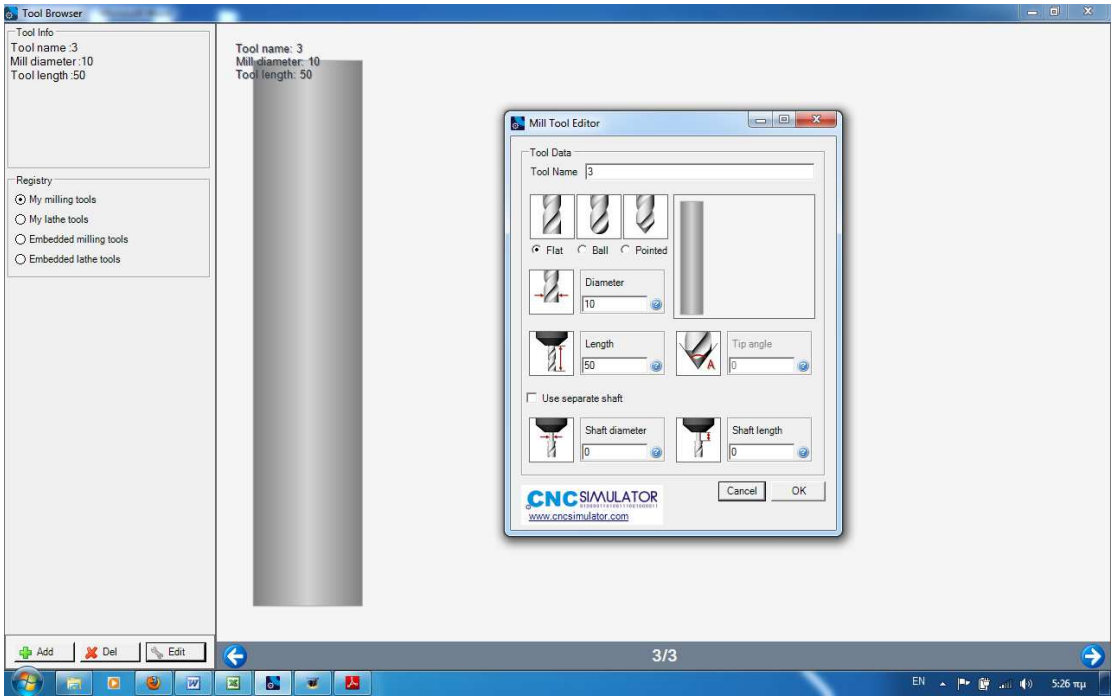
Σχήμα 4.11 Εργαλείο T0101 με την επιλογή του διαμέτρου κατά την φάση της επιλογής

Το εργαλείο T0202 ως δράπανο κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης



Σχήμα 4.12 Εργαλείο T0202 με την επιλογή του διαμέτρου κατά την φάση της επιλογής

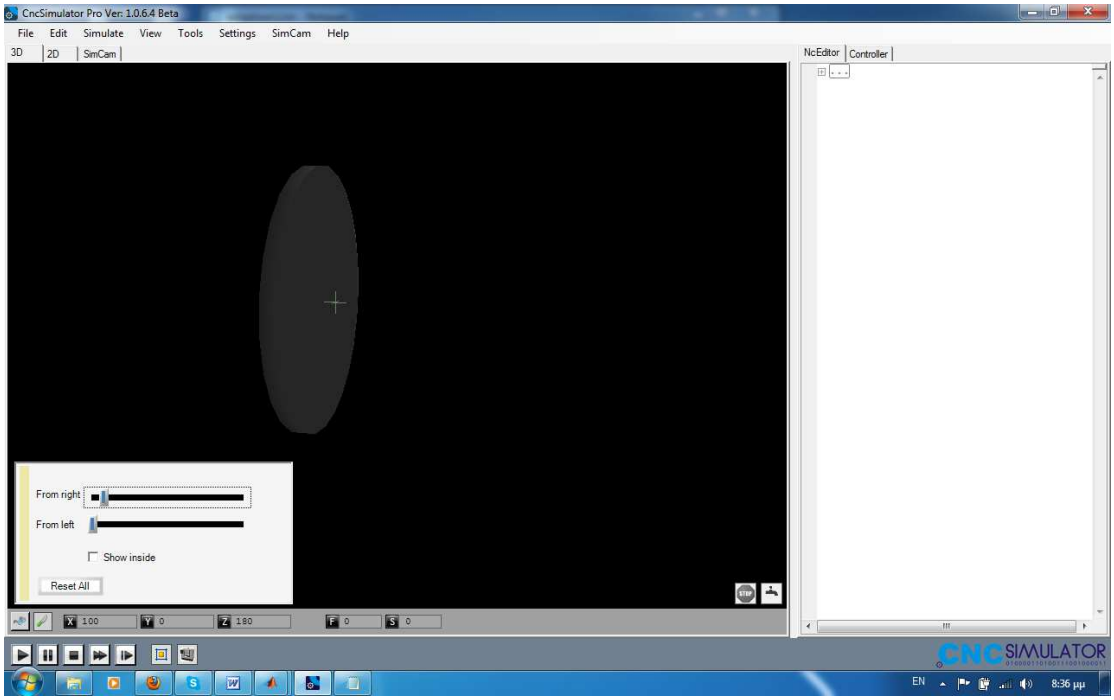
Και το τελευταίο T0303 δράπανο το οποίο χρησιμοποιείται κατά την φάση της εκχόνδρισης



Σχήμα 4.13 Εργαλείο T0303 με την επιλογή του διαμέτρου κατά την φάση της επιλογής

Είναι προφανές ότι οι τιμές που δίνει ο κατασκευαστής στα εργαλεία που έχουμε επιλέξει από καταλόγους, τις εισάγουμε στο πρόγραμμα προσομοίωσης, αναφερόμενοι δε στην διάμετρο και το μήκος του εργαλείου. Επίσης τονίζεται ότι το εργαλείο T0202 του κέντρου κατεργασιών πρέπει να δύναται να κάνει κάθετη προς το τεμάχιο κοπή.

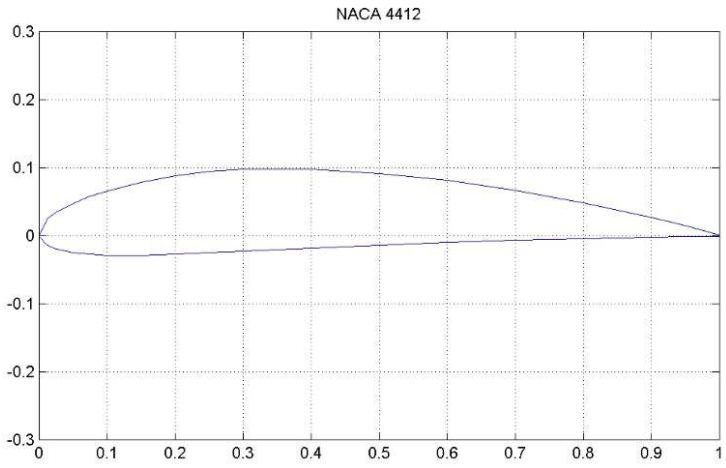
Από το πρώτο φόρτωμα του stock model στον προσομοιωτή διαπιστώνεται ότι η αρχή αναφοράς της μηχανής δεν τοποθετείται στο άκρο του τεμαχίου αλλά επιλέγεται από την μηχανή να βρίσκεται σε άλλο σημείο, στο τέλος του τσοκ. Για αυτό το λόγο γίνεται αλλαγή στην αρχή των συντεταγμένων στα αρχεία που εισάγονταν κάθε φορά στον προσομοιωτή κατά το αρχείο zero points.txt.



Σχήμα 4.14 Stock model για τον άνω δακτύλιο στο κέντρο τόρνευσης κατά το πρώτο σετάρισμα. «Κόβοντας» το τεμάχιο παρατηρείται ότι η αρχή αναφοράς της μηχανής δεν βρίσκεται στην αρχή του τσοκ, όπως είναι επιθυμητό. Οι αρχές συντεταγμένων πρέπει να αναπροσδιοριστούν πειραματικά.

4.3 *Εκτέλεση - παράδειγμα*

Τα σχήματα που μας παρέχονται από την βάση του διαδικτύου για την NACA4412 είναι



Σχήμα 4.15 NACA 4412ως επιλεγμένη αεροτομή.

Στα δεδομένα όπως αποθηκεύονται ξεχωρίζουμε τις τιμές για το άνω χείλος και το κάτω ως τις τιμές που αποκτούν μέγιστη τιμή το ξ=1

NACA 4412

1.0000	0.0013
0.9500	0.0147
0.9000	0.0271
0.8000	0.0489
0.7000	0.0669
0.6000	0.0814
0.5000	0.0919
0.4000	0.0980
0.3000	0.0976
0.2500	0.0941
0.2000	0.0880
0.1500	0.0789
0.1000	0.0659
0.0750	0.0576
0.0500	0.0473
0.0250	0.0339
0.0125	0.0244
0.0000	0.0000
0.0125	-0.0143
0.0250	-0.0195
0.0500	-0.0249
0.0750	-0.0274
0.1000	-0.0286
0.1500	-0.0288
0.2000	-0.0274
0.2500	-0.0250
0.3000	-0.0226
0.4000	-0.0180
0.5000	-0.0140
0.6000	-0.0100
0.7000	-0.0065
0.8000	-0.0039
0.9000	-0.0022
0.9500	-0.0016
1.0000	-0.0013

Οι οποίες γίνονται για το άνω χείλος

0.0000	0.0000
0.0125	0.0244
0.0250	0.0339
0.0500	0.0473
0.0750	0.0576
0.1000	0.0659
0.1500	0.0789
0.2000	0.0880
0.2500	0.0941
0.3000	0.0976

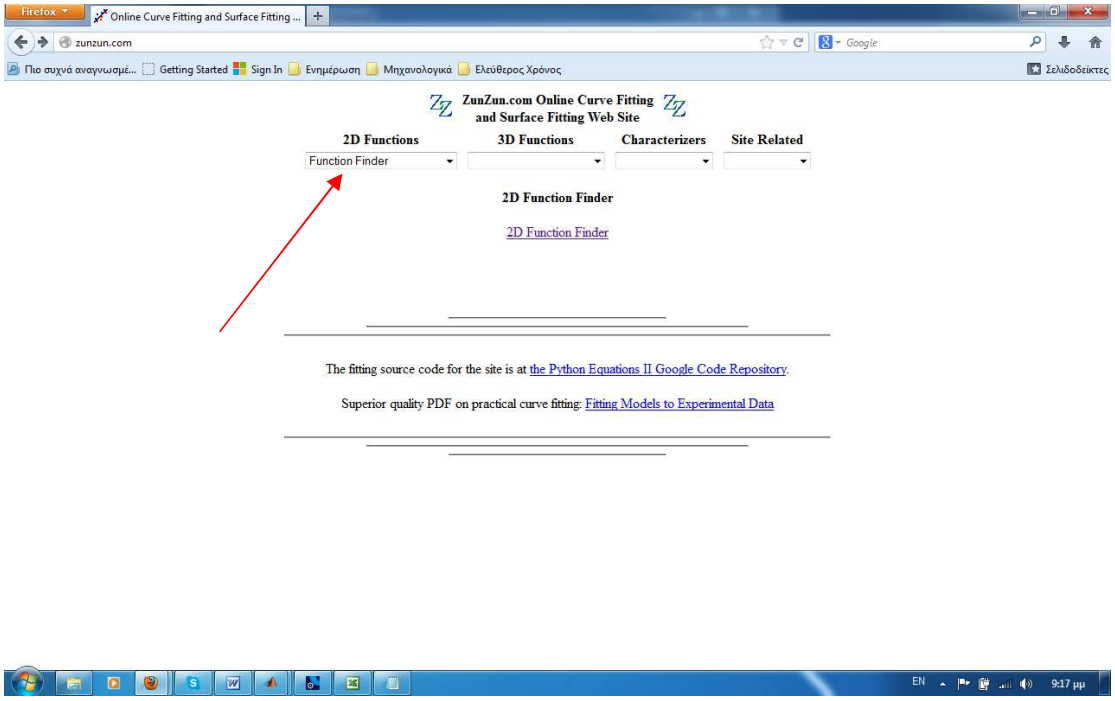
0.4000	0.0980
0.5000	0.0919
0.6000	0.0814
0.7000	0.0669
0.8000	0.0489
0.9000	0.0271
0.9500	0.0147
1.0000	0.0013

Ενώ για το κάτω χείλος

0.0000	0.0000
0.0125	-0.0143
0.0250	-0.0195
0.0500	-0.0249
0.0750	-0.0274
0.1000	-0.0286
0.1500	-0.0288
0.2000	-0.0274
0.2500	-0.0250
0.3000	-0.0226
0.4000	-0.0180
0.5000	-0.0140
0.6000	-0.0100
0.7000	-0.0065
0.8000	-0.0039
0.9000	-0.0022
0.9500	-0.0016
1.0000	-0.0013

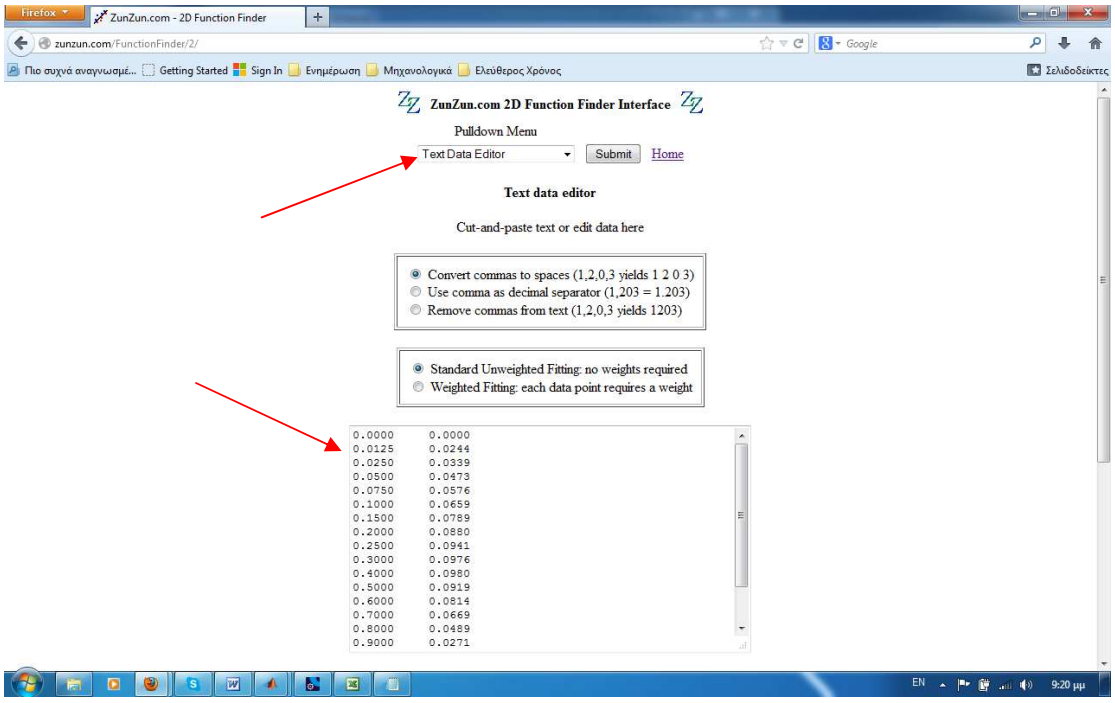
Σημειώνεται ότι η πρώτη τιμή του κάτω χείλους έχει ληφθεί ίση με 0,0 για τον λόγο του ότι δεν πρέπει να παίρνει διαφορετική τιμή, όπως ορίζεται και από τον κατασκευαστή, αλλιώς αλλοιώνεται η αεροτομή.

Οι τιμές αυτές εισάγονται στο διαδικτυακό τόπο που κάνει προσέγγιση σε καμπύλη ως εξής. Ορίζεται το πρώτο πεδίο το function finder



Σχήμα 4.16 Ορισμός εύρεσης συνάρτηση από διαδικτυακό τόπο

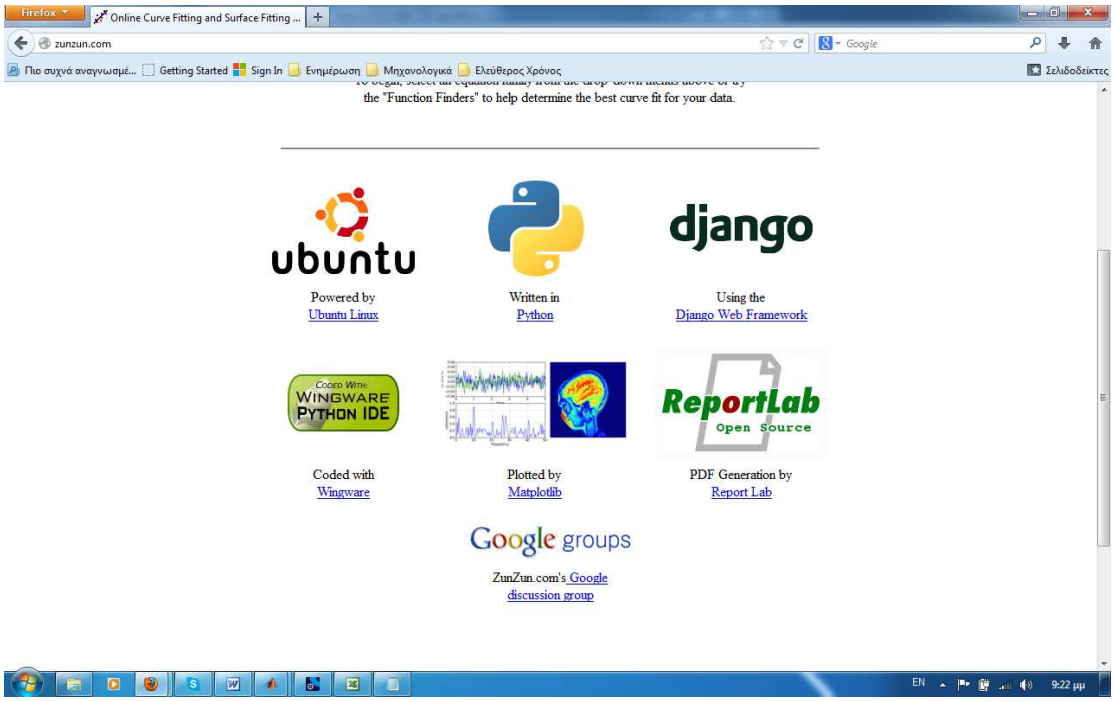
Επιλέγεται το 2D Function Finder και στην συνέχεια επιλέγεται το text data editor και προσθέτονται οι τιμές για το άνω και κάτω χείλος αντίστοιχα.



Σχήμα 4.17 Εισαγωγή τιμών της προς εύρεση συνάρτησης

Γίνεται υποβολή των τιμών και στην συνέχεια αποθηκεύεται το αποτέλεσμα ως pdf το οποίο είναι και η τεκμηρίωση που δίνεται για όλες τις προσεγγίσεις που έγιναν

από τις αντίστοιχες μηχανές. Στην περίπτωση μας τα αρχεία τεκμηρίωσης έχουμε αποθηκευτεί με το χαρακτηριστικό ‘up’ ή ‘low’ για την συνάρτηση του άνω και του κάτω χείλους αντίστοιχα.



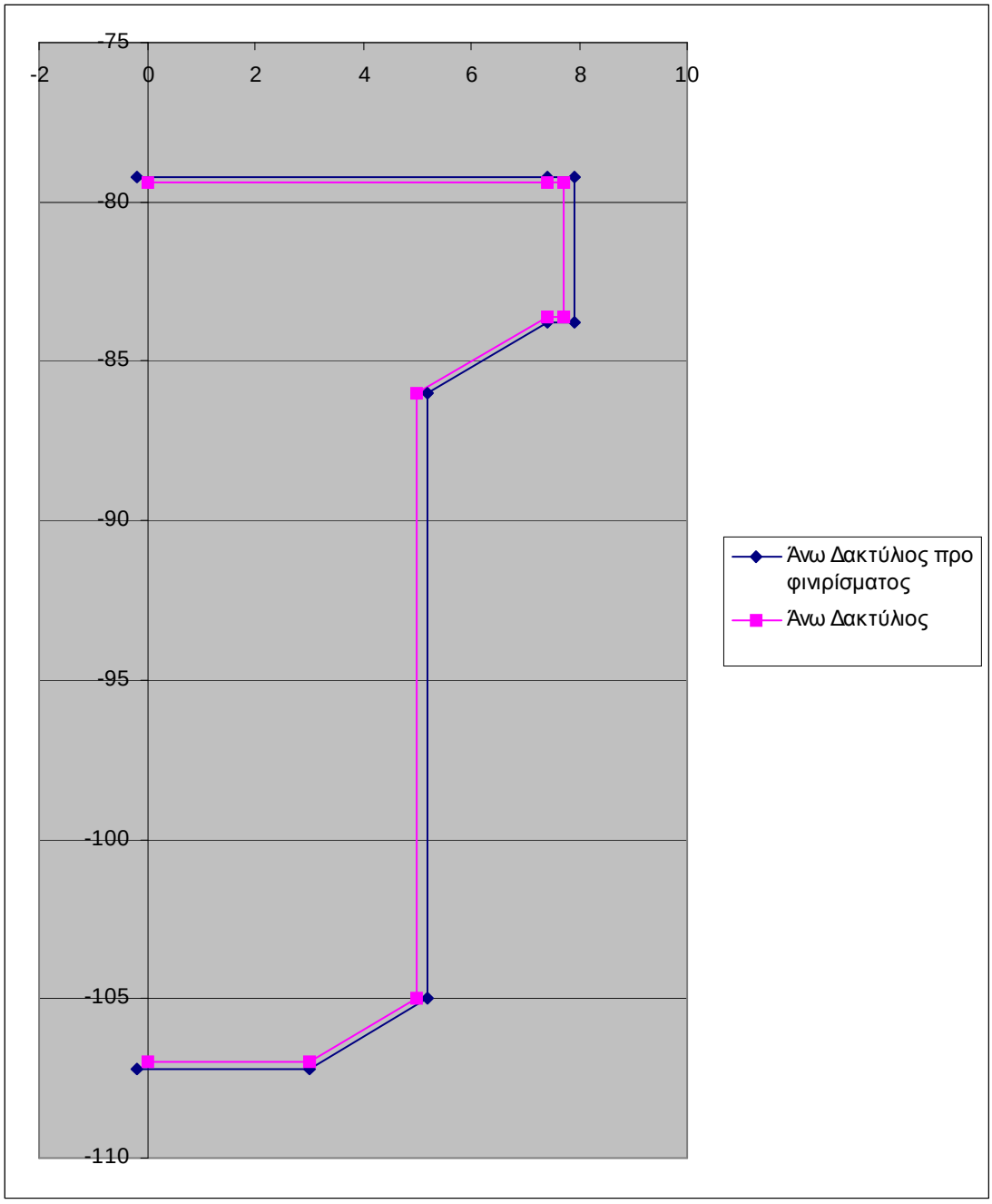
Σχήμα 4.18 Μηχανές και οργανισμοί που τεκμηριώνουν τα αποτελέσματα του ιστοτόπου

Για το κέντρο τόρνευσης έχουμε το αντίστοιχο αρχείο excel που δείχνει τα σημεία και τα σεταρίσματα των τεμαχίων. Επιλέγοντας τα αντίστοιχα κελιά ο σχεδιαστής έχει πλήρη εικόνα για τις διαστάσεις των τελικών τεμαχίων και των τεμαχίων προ της φάσης της αποπεράτωσης.

Να αναφερθεί ότι στο αρχείο αυτό γίνεται εισαγωγή των δεδομένων των διαστάσεων των δακτυλίων {R,L}, και των διαστάσεων των stock models τα οποία τροποποιούνται στην συνέχεια με τους τύπους αλληλοσυσχέτισης των, ώστε να κατασκευάσουν τις τελικές γεωμετρίες των τεμαχίων. Ουσιαστικά αυτή η διαδικασία γίνεται πρώτα στο αρχείο excel και η ίδια συνεχίζεται και στο αντίστοιχο αρχείο της matlab.

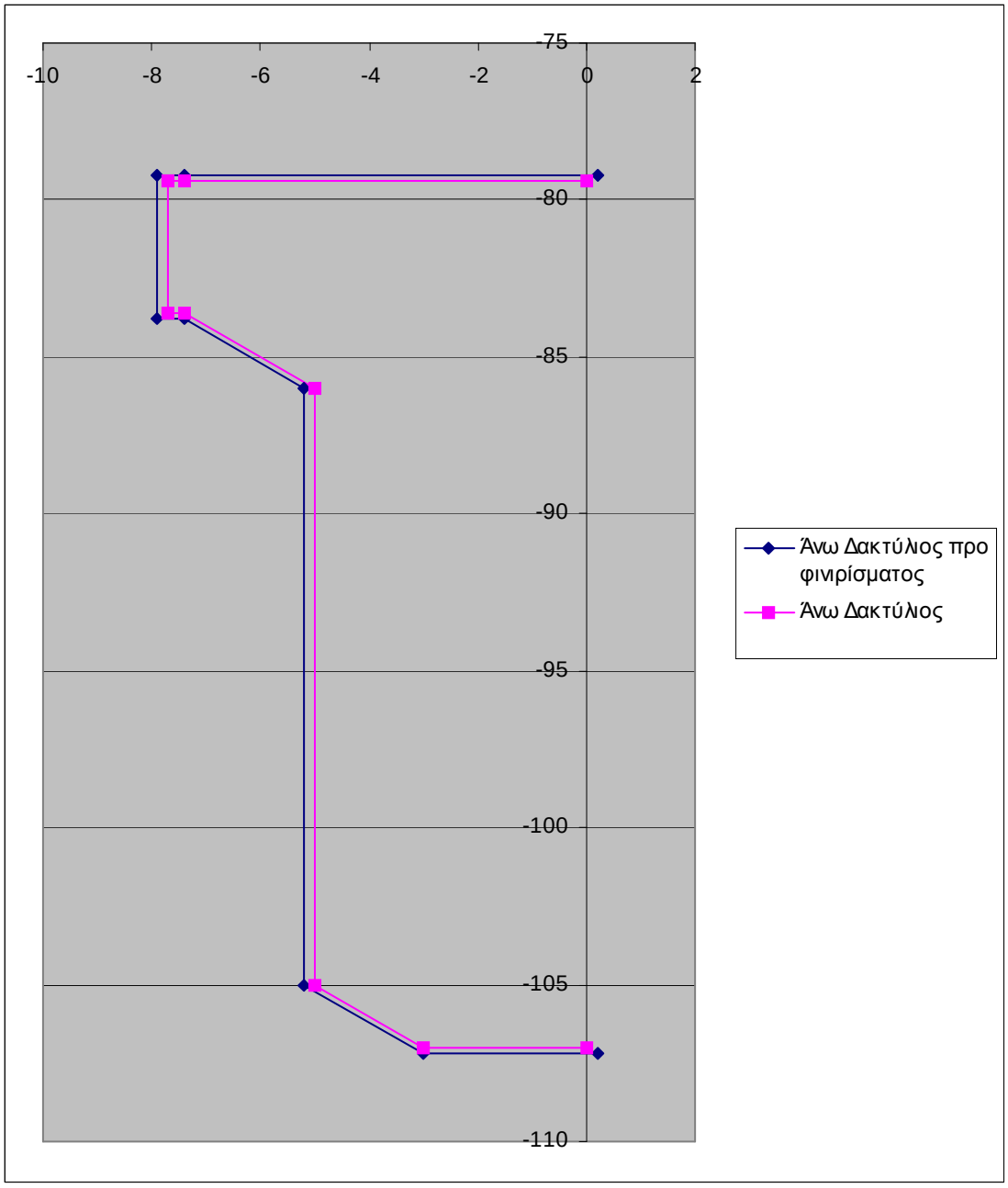
Έτσι λοιπόν στο Δακτύλιοι.xls έχουμε από τα αντίστοιχα κελιά και για μια ορισμένη γεωμετρία που ορίζεται στις τιμές Di:

Άνω δακτύλιος $1^{ο}$ σεταρισμα



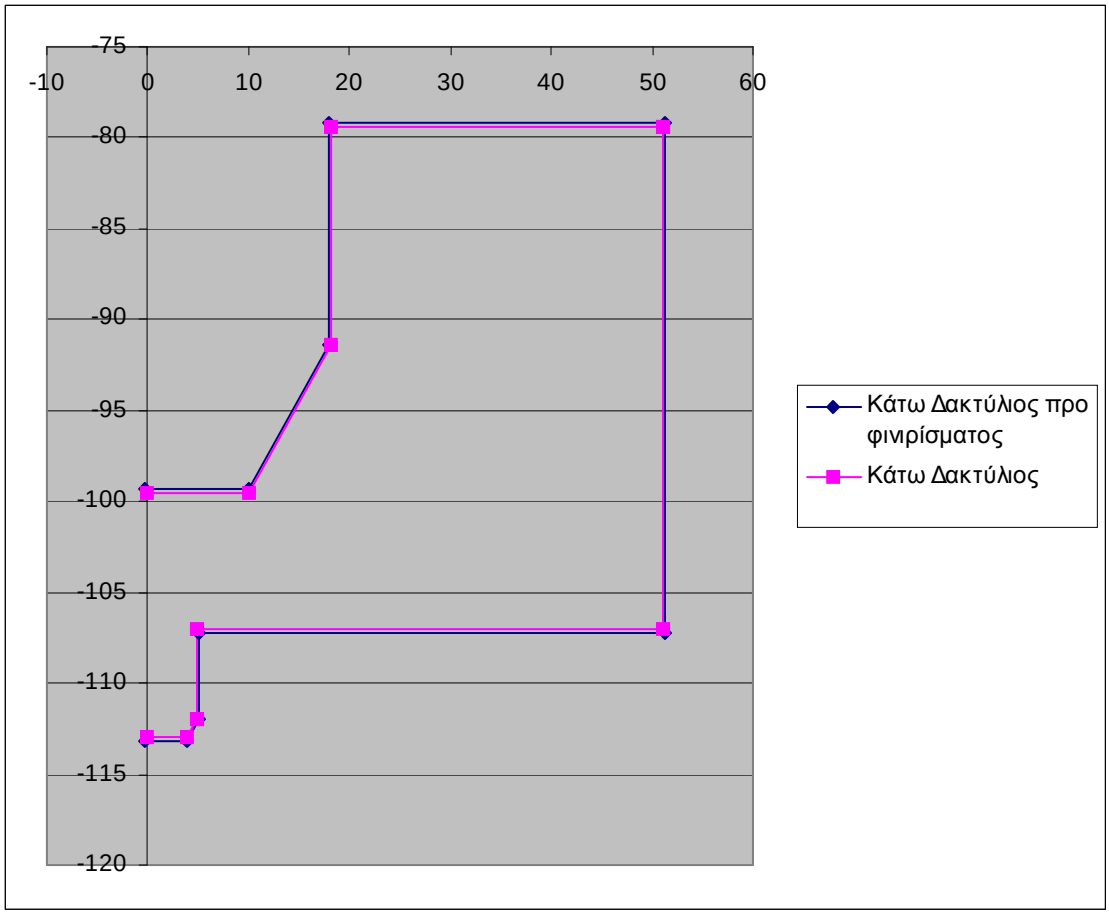
Σχήμα 4.19 Συντεταγμένες σημείων άνω δακτυλίου προ της φάσης της αποπεράτωσης και του τελικού τεμαχίου

Άνω δακτυλιος 2^{ο} σεταρισμα



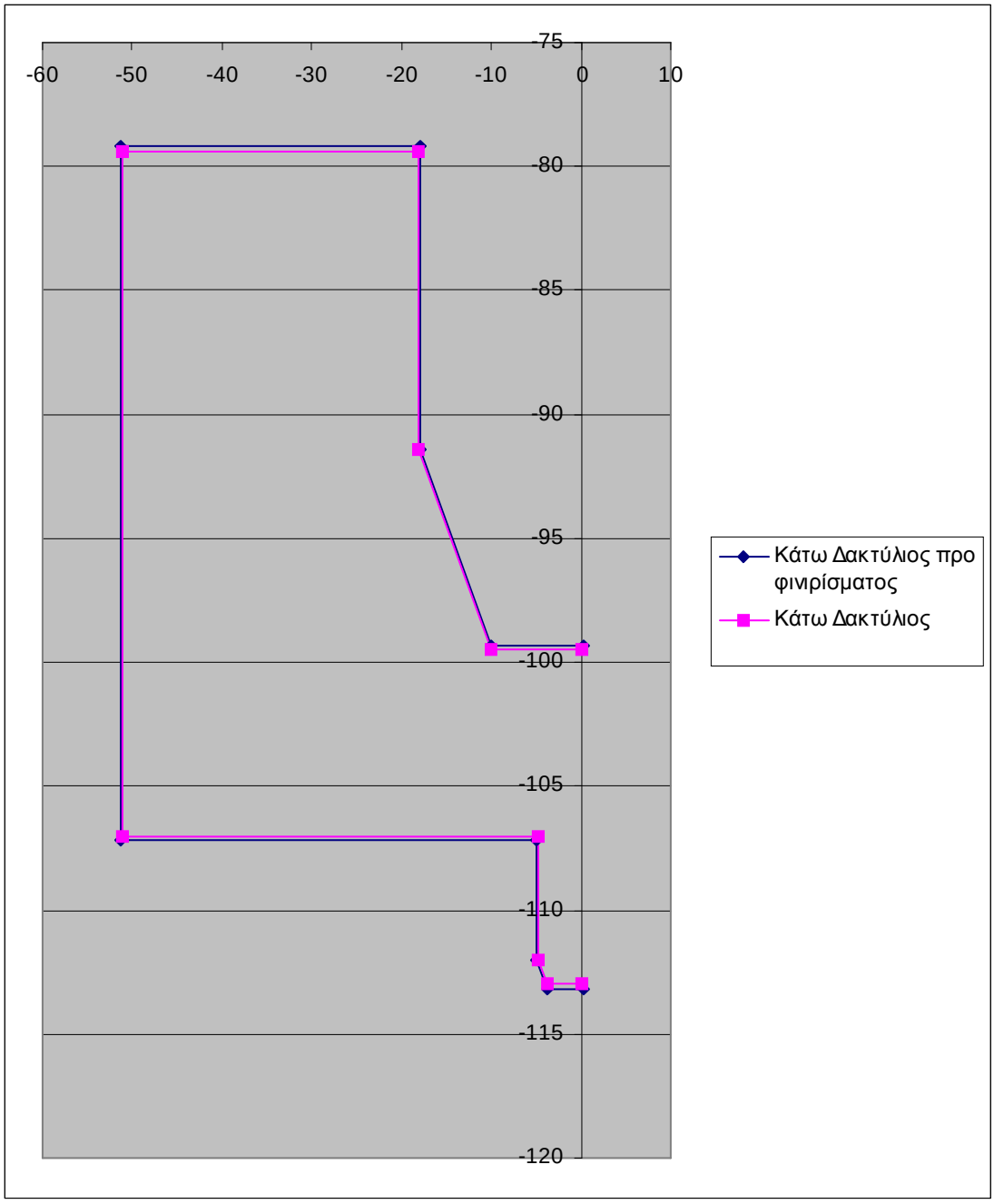
Σχήμα 4.20 Συντεταγμένες σημείων άνω δακτύλιου προ της φάσης της αποπεράτωσης και του τελικού τεμαχίου

Κάτω δακτύλιος 1^{ο} σετάρισμα



Σχήμα 4.21 Συντεταγμένες σημείων κάτω δακτύλιου προ της φάσης της αποπεράτωσης και του τελικού τεμαχίου

Κάτω δακτύλιος 2^{ο} σετάρισμα



Σχήμα 4.22 Συντεταγμένες σημείων κάτω δακτύλιου προ της φάσης της αποπεράτωσης και του τελικού τεμαχίου

Για το κέντρο κατεργασιών έχουμε στα αρχεία των αεροτομών Εκχόνδριση αεροτομών.xls, Ημι-αποπεράτωση αεροτομών.xls, Αποπεράτωση αεροτομών.xls, τα οποία βασίζονται στο γενικό αρχείο Γενικό.xls. Αυτό διότι η μόνη διαφορά μεταξύ αυτών των αρχείων είναι η απόσταση του κέντρου του εργαλείου της συγκεκριμένης φάσης από το προφίλ της αεροτομής, μέγεθος το οποίο ορίζεται με την φανταστική ακτίνα του εργαλείου στα φύλλα των τροχιών και των ευρών. Το φύλλο της αεροτομής Airfoil παραμένει το ίδιο σε όλα τα αρχεία, αφού το προφίλ της αεροτομής δεν αλλάζει.

Επιπρόσθετα με τις αναφερόμενες πληροφορίες στο αρχείο Εκχόνδριση.xls αναφέρονται όλα τα μεγέθη για τις μεταβλητές της κατεργασίας του άνω δακτυλίου

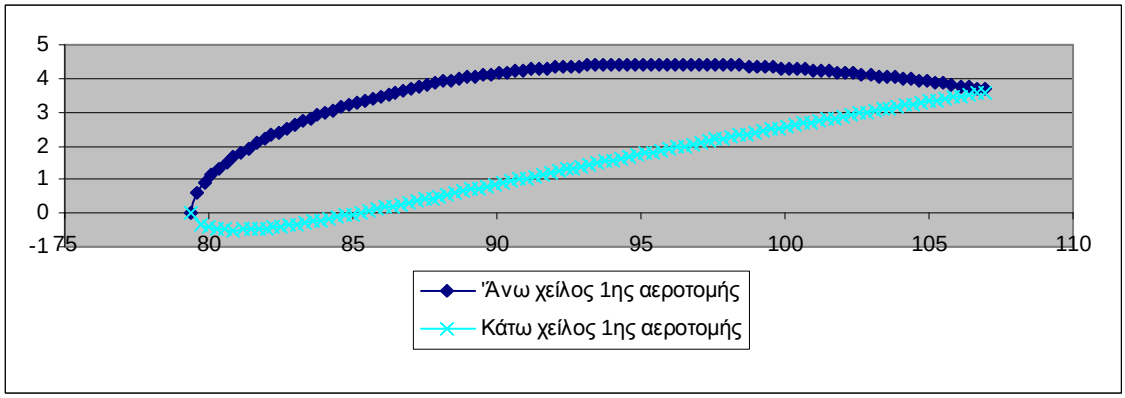
και της διαμόρφωσης των πείρων συγκράτησης. Επιλέγουμε αριθμό πτερυγίων N=28 και εκφράζουμε τις συναρτήσεις από τον διαδικτυκό τόπο zunzun.com όπου για το άνω χείλος έχουμε την τεκμηρίωση LRP_9162_1355232514_59up.pdf και για το κάτω χείλος LRP_21131_1355230399_3low.pdf και έχουμε τελικά τις συναρτήσεις
Άνω χείλος: y = a(x0.5) + b(x2) + c(atan(x)) + d(tanh(x))
με
a = 2.1184770621839469E-01
b = -2.8093310934740895E-01
c = 2.3204474665070762E+00
d = -2.2997497985935240E+00
και απόλυτο σφάλμα 3.2949463187637176E-06

Κάτω χείλος: y = a(x0.5) + b(sinh(x)) + c(atan(x)) + d(tanh(x))
με
a = -1.6205715891831460E-01
b = -1.5802157448734622E-01
c = 2.0884944712547551E+00
d = -1.6987067141680812E+00
και απόλυτο σφάλμα 1.9624485058740721E-06

Διαλέγουμε μια τυπική γωνία πρόσπτωσης $\beta=\pi/24=7,5^{o}$ και δημιουργούμε τα τρια αρχεία excel. Έχουμε:

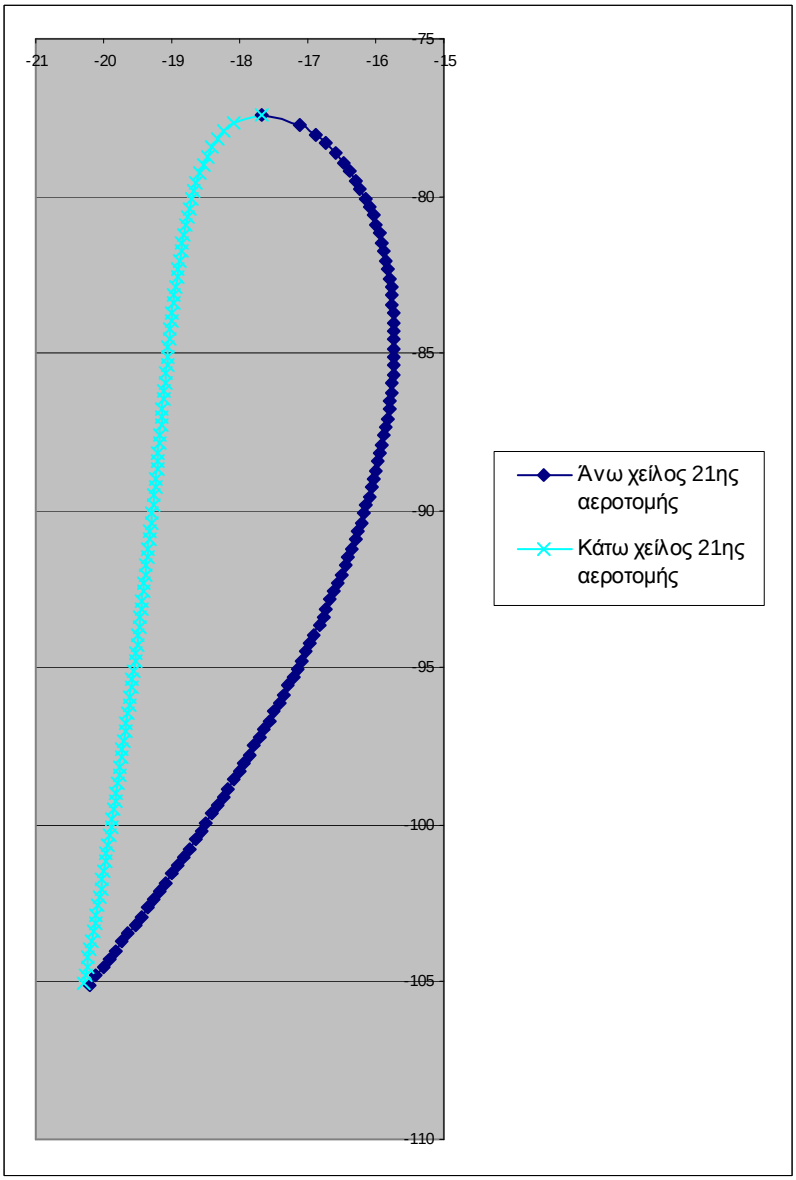
Εκχόνδριση αεροτομών.xls

Στο φύλλο Airfoil εισάγουμε στις πέντε πρώτες στήλες όλες τις αναγκαίες παραμέτρους που θα ορίσουν την αεροτομή μας. Από την στήλη F έως την BR σχηματίζεται προοδευτικά η αεροτομή, όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 3, ώσπου καταλήξει στην γενική έκφραση των τύπων των συντεταγμένων της αεροτομής. Ανάλογα με τον α/α που θα επιλέξει στην δεύτερη στήλη ο σχεδιαστής μπορεί να δει οποιοδήποτε προφίλ αεροτομής. Έχουμε λοιπόν για την επιλεγμένη NACA 4412 και για την πρώτη αεροτομή ότι (i=1)



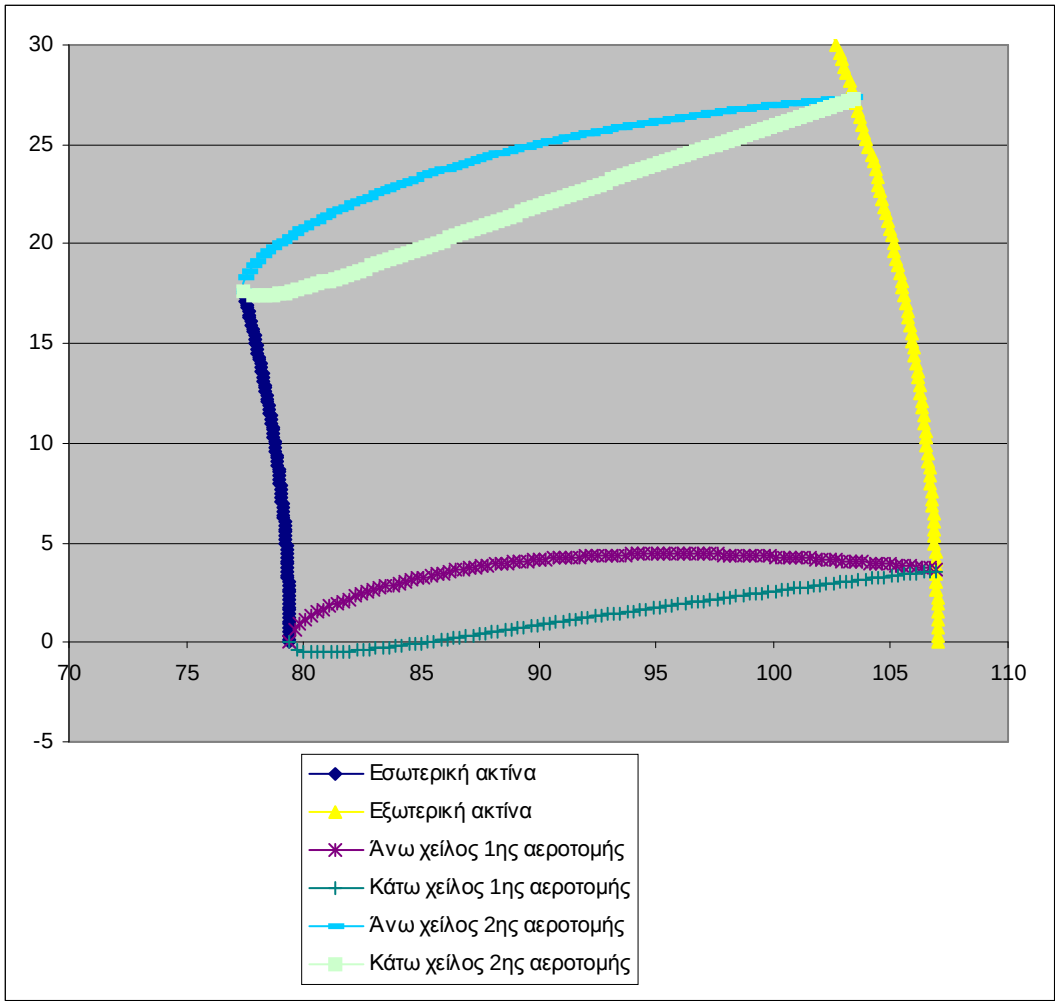
Σχήμα 4.23 Συντεταγμένες σημείων πρώτης αεροτομής για NACA 4414

Ενώ, για παράδειγμα για την 21 έχουμε, με την αλλαγή του i (i=21)



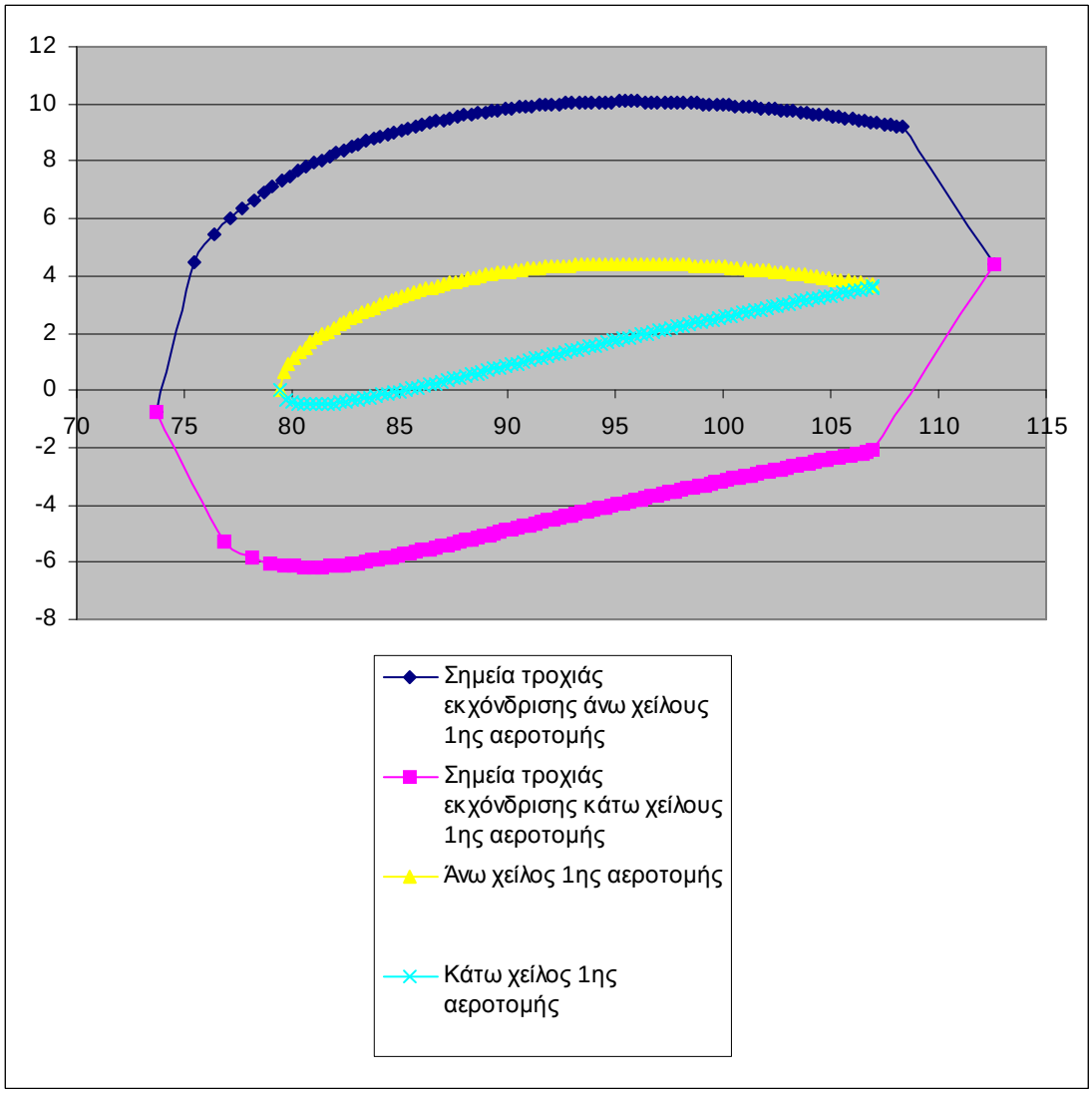
Σχήμα 4.24 Συντεταγμένες σημείων εικοστής πρώτης αεροτομής για NACA 4414

Στο τέλος αυτού του φύλλου υπάρχει ένα σετ στηλών (CA-CL) στο οποίο παρουσιάζονται οι δυο πρώτες διαδοχικές αεροτομές, ο εσωτερικός και ο εξωτερικός δακτύλιος. Αυτό βοηθά τον σχεδιαστή να έχει μια ολική εικόνα για τον έλεγχο των προφίλ των αεροτομών.



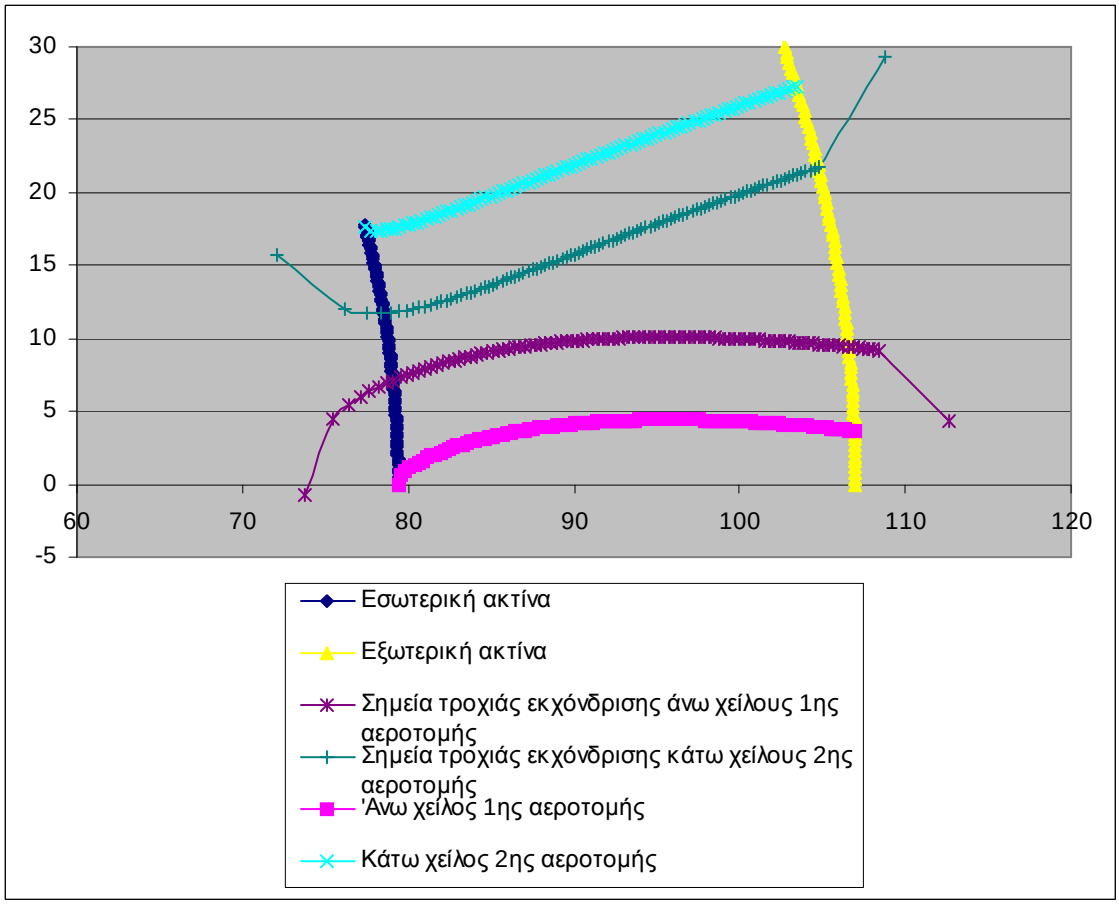
Σχήμα 4.25 Έλεγχος δυο πρώτων διαδοχικών αεροτομών

Στο φύλλο Tool path εισάγονται οι συναρτήσεις του προφίλ και με την βοήθεια των παράγώγων των συναρτήσεων βρίσκουμε τις παραγώγους στα σημεία των προφίλ της αεροτομής. Σχεδιάζονται όπως αναφέρθηκε εκτενέστερα προηγουμένως οι αεροτομές και στις στήλες (AI-AR) παρουσιάζονται οι γενικοί τύποι των τροχιών για κάθε αεροτομή. Και σε αυτό το φύλλο υπάρχει ο έλεγχος για τις τροχιές των δυο πρώτων διαδοχικών αεροτομών (AT-BB). Η διάμετρος του φανταστικού εργαλείου είναι τέτοια ώστε η απόσταση του κέντρου του πραγματικού εργαλείου να είναι υπολογισμένη έτσι ώστε, να λαμβάνεται υπόψη το βάθος ημι-αποπεράτωσης 0,5mm και αποπεράτωσης 0,2mm καθώς και η ακτίνα του πραγματικού εργαλείου για την εκχόνδριση θα είναι 5mm. Για την πρώτη αεροτομή έχουμε την τροχιά της



Σχήμα 4.26 Πρώτη αεροτομή και σημεία τροχιάς εκχόνδρισης

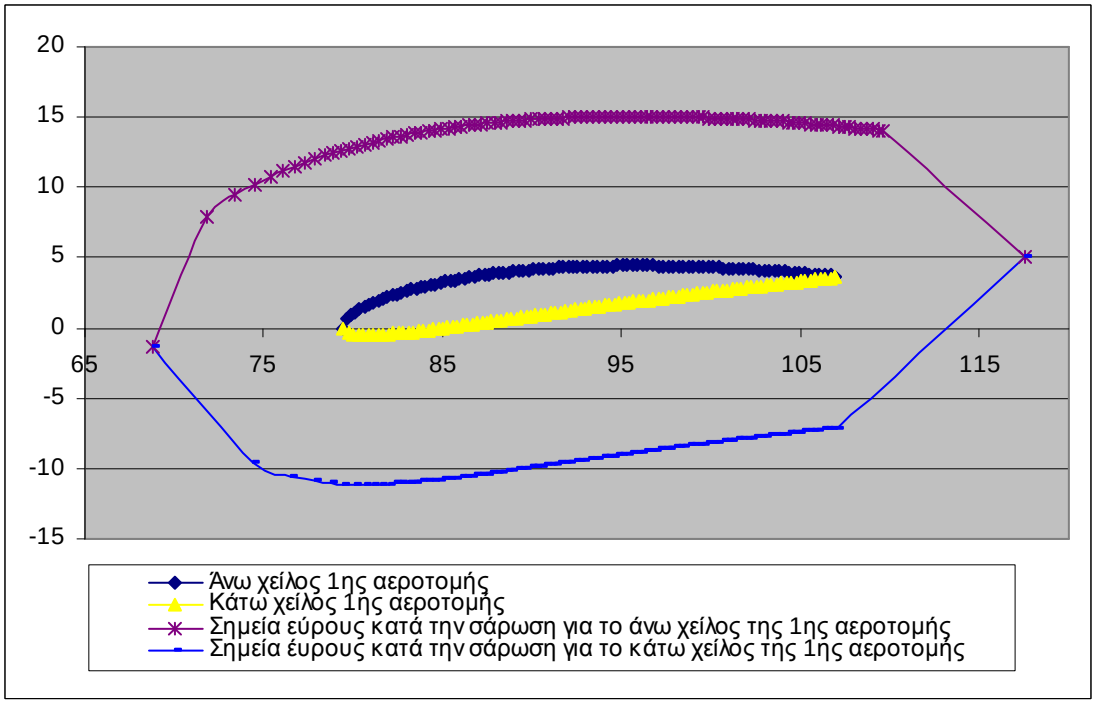
Ο έλεγχος για τις τροχιές των δυο πρώτων αεροτομών



Σχήμα 4.27 Έλεγχος σημείων τροχιών εκχόνδρισης για τις δυο πρώτες αεροτομές

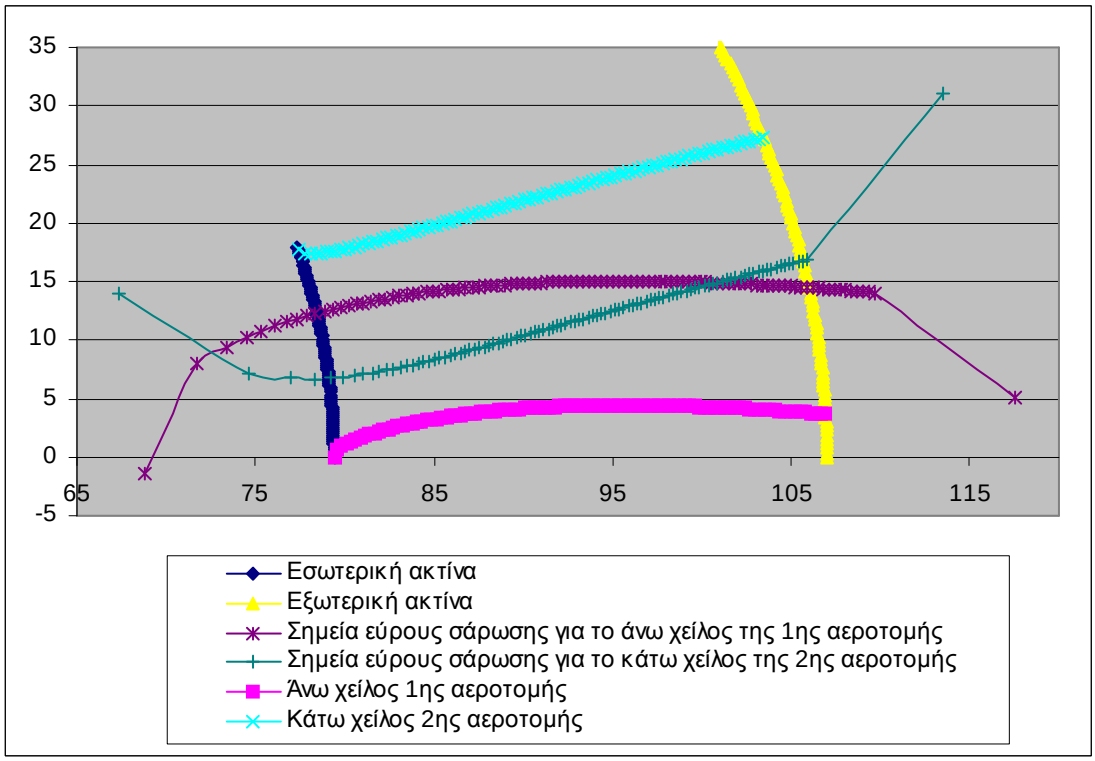
Για λόγους πληρότητας και καλύτερης εποπτείας έχουμε λάβει υπόψη μας στον ανώτερο πίνακα και τα αντίστοιχα χείλη των αεροτομών.

Στο φύλλο tool range ορίζεται για την αεροτομή το εύρος του εργαλείου με ορισμό της φανταστικής διαμέτρου εργαλείου ώστε να είναι σωστή η απόσταση που θα προκύπτει βάσει των υπολογισμών. Η διάμετρος του φανταστικού εργαλείου είναι τέτοια ώστε η απόσταση του κέντρου του πραγματικού εργαλείου να είναι υπολογισμένη έτσι ώστε, να λαμβάνεται υπόψη το βάθος ημι-αποπεράτωσης 0,5mm και αποπεράτωσης 0,2mm καθώς και η διάμετρος του πραγματικού εργαλείου για την εκχόνδριση θα είναι 10mm. Επομένως για το εύρος σάρωσης της πρώτης αεροτομής έχουμε ότι



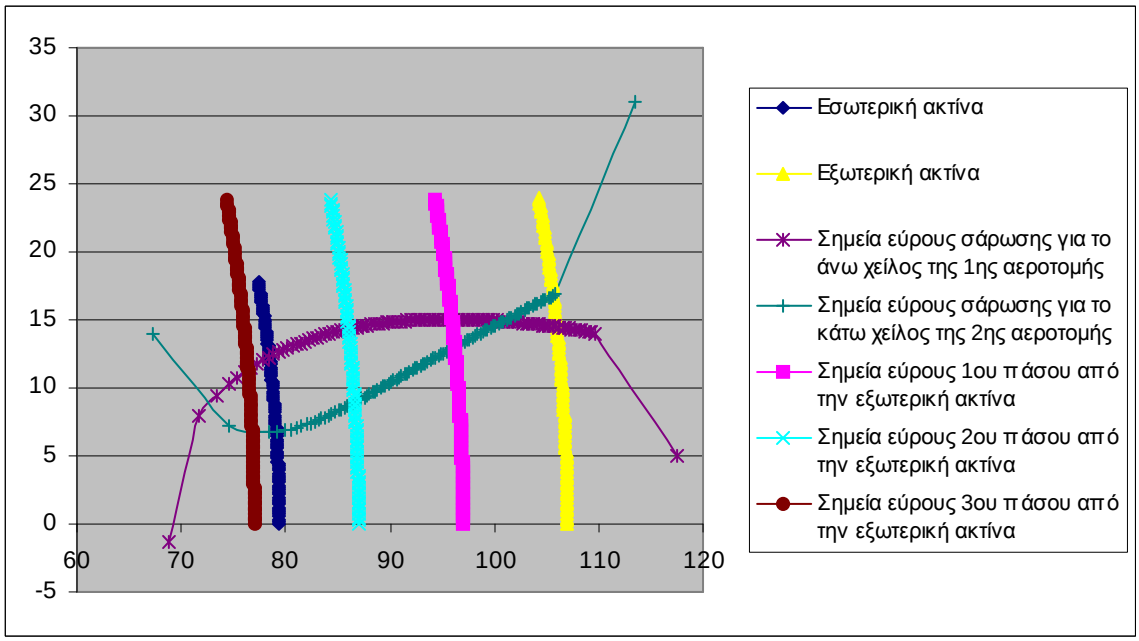
Σχήμα 4.28 Σημεία εύρους σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της εκχόνδρισης για την πρώτη αεροτομή

Στο τέλος του φύλλου έχουμε τον έλεγχο για τα εύρη σάρωσης των δυο πρώτων διαδοχικών αεροτομών καθώς και της εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας. Εννοείται και σε αυτή την περίπτωση για λόγους πληρότητας εμφανίζουμε στον πίνακα και τα προφίλ των αεροτομών.



Σχήμα 4.29 Έλεγχος σημείων ευρών σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της εκχόνδρισης για τις δυο πρώτες αεροτομές

Στο φύλλο routes διαμορφώνουμε με την πραγματική ακτίνα του εργαλείου τους ομοκέντρους κύκλους ως προς την πτερύγωση και βρίσκουμε τους χώρους που χρειάζεται να κάνει το εργαλείο, ώστε να καλύψει τον χώρο που δεν έχει κατεργαστεί. Όπως φαίνεται για τις συγκεκριμένες συνθήκες επιλέγουμε ένα πάσο.



Σχήμα 4.28 Σημεία εύρους σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της εκχόνδρισης για την επιλογή των πάσων μεταξύ των αεροτομών

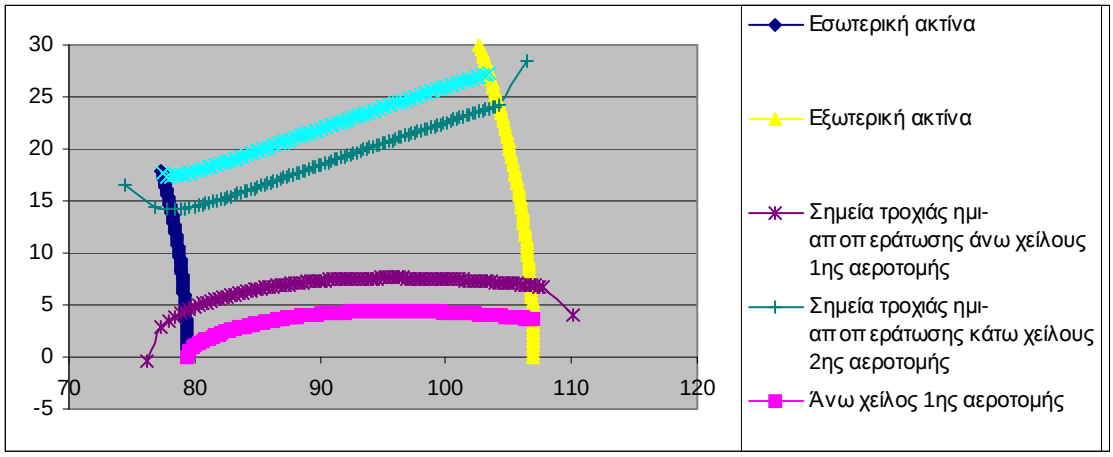
Στο φύλλο Connections ορίζεται τα σημεία των κέντρων των πείρων με την βοήθεια της αεροτομής και όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2. Όμως σε αυτή την φάση του υπολογισμού των συντεταγμένων δεν μπορούμε να πάρουμε κάποιο διάγραμμα ώστε να είναι περισσότερο αντιληπτές οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν από τον σχεδιαστή, για τον λόγο του ότι είναι απλά σημεία ή ακτίνες.

Στο φύλλο Coordinates ορίζονται οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν από το αρχείο της matlab, επομένως πρόκειται για τις συντεταγμένες της τροχιάς γύρω από την πρώτη πτερύγωση, καθώς και οι αντίστοιχες ακτίνες των κυκλικών παρεμβολών. Χρειάζεται προσοχή στην σειρά των μεγεθών σε σχέση με τις στήλες, διότι τυχόν αλλαγή της επιφέρει και αλλαγές κατά την ανάγνωση των δεδομένων από το αρχείο της matlab.

Σε αυτή την φάση έχει καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός όλων των κινήσεων που πρέπει να γίνουν γύρω από κάθε πτερύγιο με παραμετρικό τρόπο κατά την φάση της εκχόνδρισης. Συνεχίζουμε στην φάση της ημι-αποπεράτωσης. Στο αρχείο Ημι-αποπεράτωση αεροτομών.xls και στο φύλλο Airfoil έχουμε τον ορισμό της αεροτομής, όμοιο με αυτό κατά την φάση της εκχόνδρισης.

Στο φύλλο tool path η μόνη αλλαγή που πρέπει να γίνει είναι αυτή της φανταστικής διαμέτρου του εργαλείου, ώστε το πραγματικό να εκτελεί την

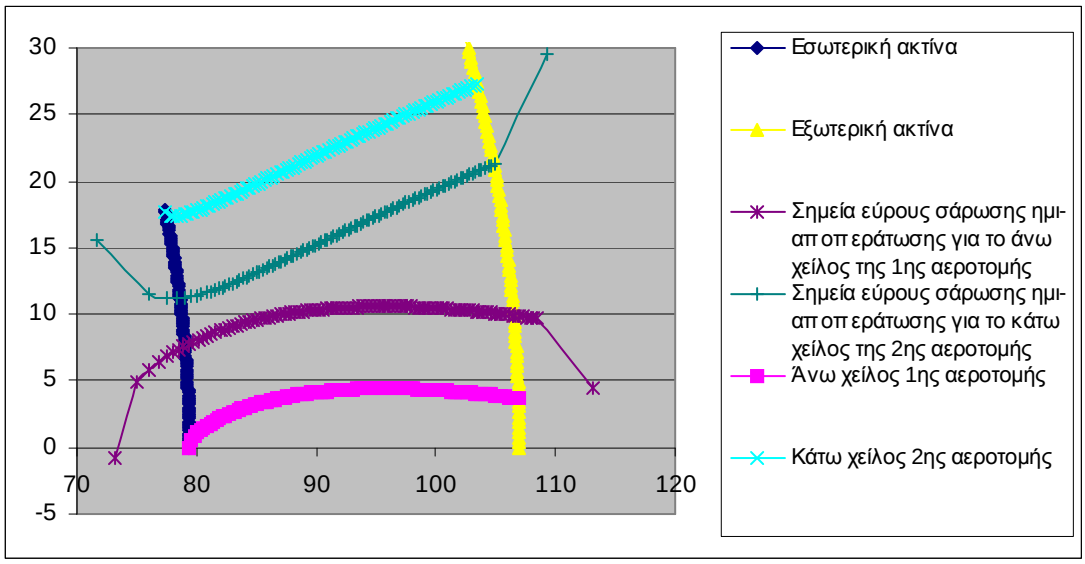
αντίστοιχή επιθυμητή κοπή με βάθος 0,5mm σε κάθε πτερύγιο. Πρέπει να υπενθυμηθεί ότι και το πραγματικό εργαλείο αλλάζει βάσει φασεολογίου, οπότε η διάμετρος που χρησιμοποιείται είναι 6mm. Υπάρχει πάλι η δυνατότητα του αυτόνομου ελέγχου της τροχιάς της κάθε αεροτομής.



Σχήμα 4.28 Σημεία τροχιάς εργαλείου κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης μεταξύ των δυο πρώτων αεροτομών

Αυτός ο έλεγχος, όπως αναμένεται, επειδή έχει αυξηθεί η απόσταση των τροχιών των εργαλείων είναι απλά προληπτικός. Αυτός ο οποίος είναι αναγκαίος να γίνει ήταν αυτός της δυσμενέστερης περίπτωσης, δηλαδή της εκχόνδρισης.

Στο φύλλο tool range διαμορφώνεται πάλι η διάμετρος του φανταστικού εργαλείου ώστε να εκπληρώνονται οι συνθήκες κοπής για το πραγματικό εργαλείο. Όμοια υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου αυτόνομα σε οποιαδήποτε αεροτομή καθώς και ο τελικός προληπτικός έλεγχος ότι όλα γίνονται σωστά για τις δυο πρώτες διαδοχικές αεροτομές.

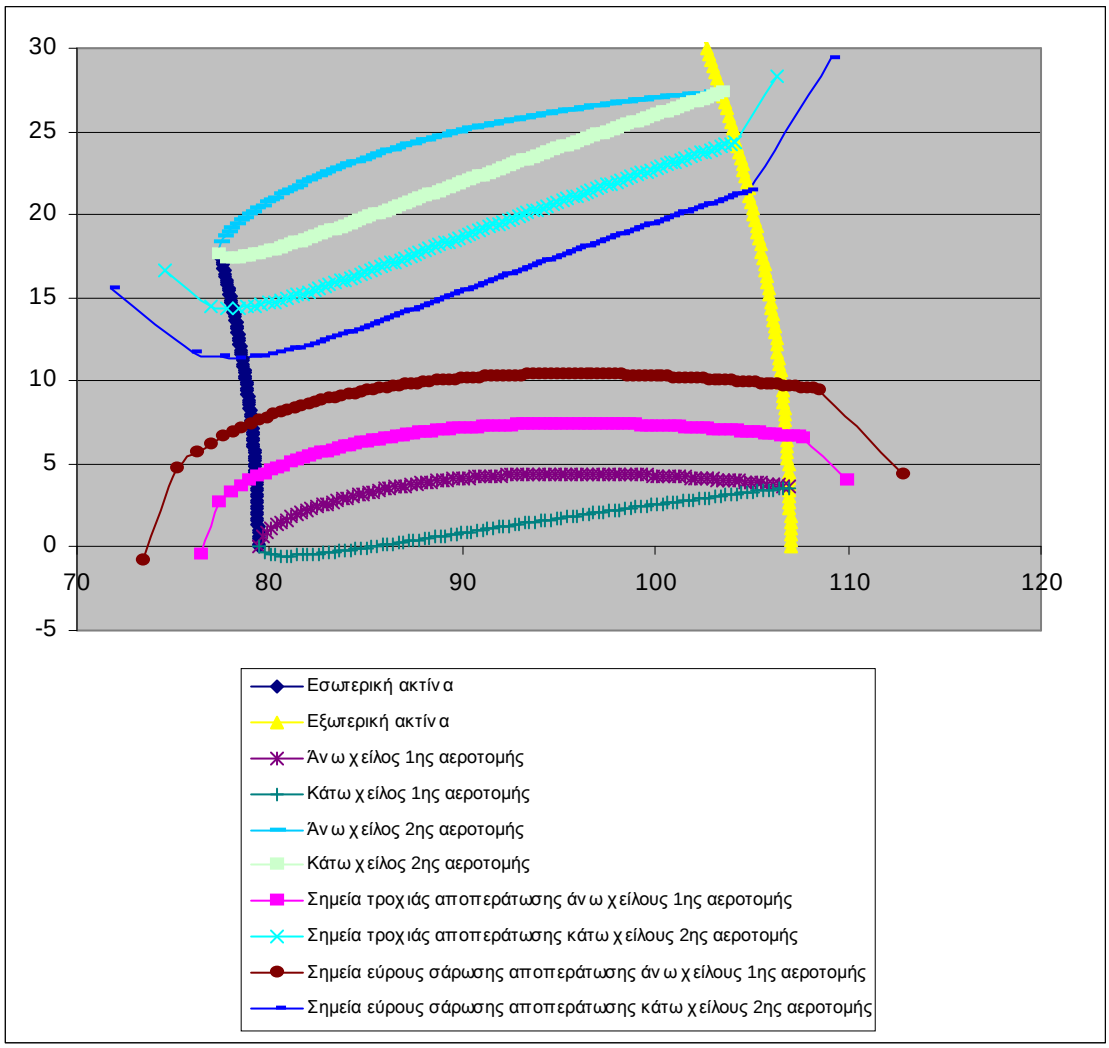


Σχήμα 4.29 Σημεία εύρους σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της ημι-αποπεράτωσης μεταξύ των δυο πρώτων αεροτομών

Στην φάση της ημι-αποπεράτωσης δεν χρειαζόμαστε τα φύλλα routes και connections αφού δεν προβλέπεται να γίνουν από το φασεολόγιο φάση ημι-

αποπεράτωσης στους πείρους συγκράτησης και πραγματοποίησης πάσων μεταξύ των αεροτομών. Στο φύλλο Coordinates, όμοια, αντιγράφονται οι σχετικές στήλες που ορίζουν την τροχιά γύρω από την πρώτη αεροτομή.

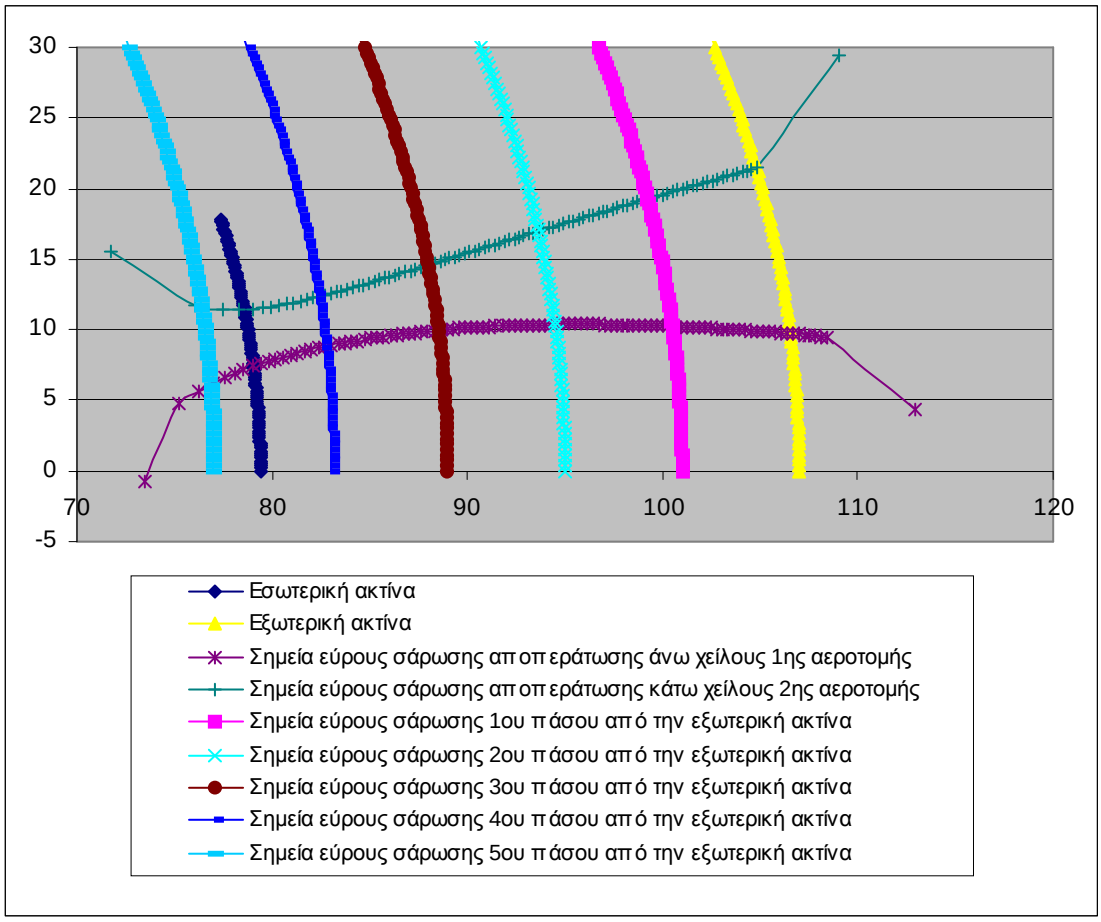
Τέλος έχουμε το αρχείο Αποπεράτωση αεροτομών.xls. Εκεί έχουμε το φύλλο Airfoil με την αεροτομή. Στα φύλλα tool path και tool range ορίζεται η φανταστική διάμετρος του εργαλείου αποπεράτωσης με διάμετρο 6mm, η οποία πλέον συμπίπτει με την φανταστική, αφού μετά το πέρας της αποπεράτωσης θα πρέπει η αεροτομή μας να έχει το επιθυμητό προφίλ. Πάλι ο αυτόνομος έλεγχος των αεροτομών είναι δυνατός καθώς και ο τελικός για τις δυο πρώτες διαδοχικές αεροτομές. Αυτός πρέπει να γίνεται προληπτικά, για την αποφυγή κάποιου υπολογιστικού λάθους, και όχι με τον φόβο ότι οι τροχίες δεν θα εκπληρώνουν τις συνθήκες μη κοινών χώρων, αφού δεν πρόκειται πάλι για την δυσμενέστερη περίπτωση.



Σχήμα 4.30 Ελέγχος σημείων αεροτομών, τροχιών και ευρών σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της αποπεράτωσης μεταξύ των δυο πρώτων αεροτομών

Στην φάση της αποπεράτωσης χρειαζόμαστε, βάσει του φασεολογίου, τα φύλλα routes και Connections, διότι θα γίνουν αντίστοιχες κοπές πάσων μεταξύ των

αεροτομών, καθώς και θα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες για την αποπεράτωση των πείρων συγκράτησης. Όπως και στην εκχόνδριση, μπορούμε να έχουμε οπτική παρουσίαση μόνο με τις κινήσεις των πάσων και όχι με τα δεδομένα του φύλλου Connections. Υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου στις τροχιές των πάσων, όπως και προηγουμένως, οι οποίες αναμένεται να είναι περισσότερες σε αριθμό από αυτόν των τροχιών των πάσων κατά την διάρκεια της εκχόνδρισης. Πράγματι παρατηρούμε ότι χρειάζονται πάσα στην αρχή και στο τέλος του άνω χείλους, σχήμα 4.31.

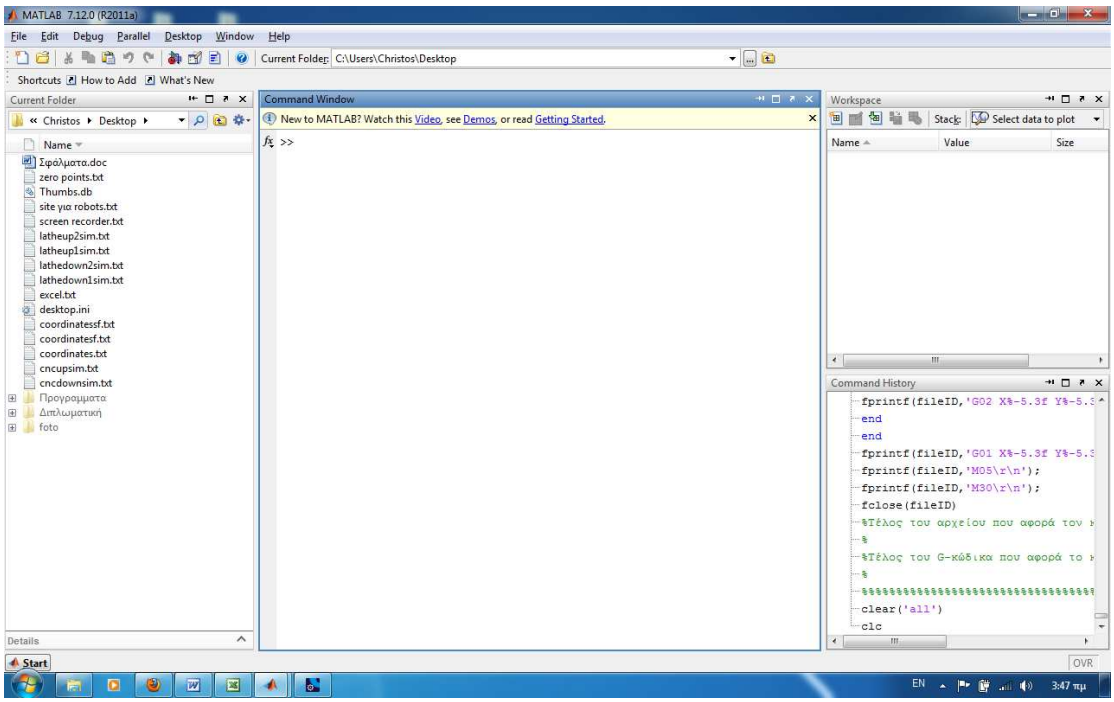


Σχήμα 4.31 Σημεία εύρους σάρωσης εργαλείου κατά την φάση της αποπεράτωσης για την επιλογή των πάσων μεταξύ των αεροτομών

Στο φύλλο Connections στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι ότι η τελική ακτίνα διαμόρφωσης του πείρου δεν είναι μειωμένη κατά 0,1mm ώστε να είναι δυνατή η συναρμογή, αλλά αυτό γίνεται στο αρχείο της matlab, προσθέτοντας μια ακόμα ακτίνα διαμόρφωσης, ύστερα από αυτές που ορίζει το παρόν φύλλο υπολογισμού. Κατά τα άλλα, όλες οι άλλες συνθήκες που θα ορίσουν τις τροχιές γύρω από τον κάθε πείρο είναι οι ίδιες με τις συνθήκες κατά την φάση της εκχόνδρισης και το μόνο που αλλάζει θα είναι προφανώς η ακτίνα του εργαλείου.

Τέλος, αντιγράφονται πάλι στο φύλλο Coordinates οι συντεταγμένες της τροχιάς γύρω από την πρώτη αεροτομή, μαζί με τις ακτίνες των κύκλων της κυκλικής παρεμβολής. Με αυτές τις ενέργειες έχει παραμετροποιηθεί πλήρως κάθε φάση της κατεργασίας γύρω από κάθε οποιαδήποτε πτερύγωση επιλέξει ο σχεδιαστής, τόσο για την δημιουργία των πτερυγίων, όσο και για την δημιουργία των συνδέσεων των δυο τεμαχίων, δηλαδή των πείρων και των οπών συγκράτησης.

Συνεχίζουμε την ροή των πληροφοριών και αντιγράφουμε όλες τις πληροφορίες που βρίσκονται στα φύλλα Coordinates σε αρχεία .txt τα οποία τα ονομάζουμε coordinates.txt, coordinatessf.txt και coordinatesf.txt για τις φάσεις της εκχόνδρισης, ημι-αποπεράτωσης και αποπεράτωσης αντίστοιχα. Στο περιβάλλον της matlab τρέχουμε το script, ώστε να αλλάξουμε το σημείο στήξης της υποδιαστολής από κόμμα σε τελεία, στα δεδομένα, ώστε να είναι σωστά αναγνώσιμα. Να σημειωθεί ότι το script δεν δημιουργεί άλλα αρχεία αλλά γράφει πάνω στα ήδη υπάρχοντα. Τότε τρέχουμε στο περιβάλλον της matlab, αφού έχουμε εισάγει τις απαραίτητες διαστάσεις του τεμαχίου, το αρχείο gcodelathe.m και εξάγονται τα τέσσερα αρχεία σε .txt για τα αντίστοιχα σεταρίσματα στο κέντρο τόρνευσης. Έπειτα τρέχουμε το αρχείο gcodecnc.m αφου εισαχθούν και εκεί οι αναγκαίες διαστάσεις των δακτυλίων και εξάγονται δυο αρχεία σε .txt για την κατεργασία του άνω δακτυλίου και του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών.



Σχήμα 4.32 Command Window της matlab. Αντιγράφονται τα αρχεία από τον editor και εκτελούνται. Χρειάζεται προσοχή στον ορισμό του σημείου των εξαγώγιμων αρχείων και στα μηνύματα για το πέρας της δημιουργίας κάθε αρχείου .txt (εμφανίζεται το μήνυμα ότι fclose==0)

Αντιγράφουμε με την σειρά που υποδεικνύεται από το φασεολόγιο τα αρχεία .txt και τα τρέχουμε στο Cnc-simulator. Εκεί έχουμε ήδη αποθηκευμένα τα stock models και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε όταν οι G-κώδικες τρέξουν να μην παρουσιάσουν κάποιο σφάλμα. Προφανώς τα stock models και τα εργαλεία είναι σχεδιασμένα με τις διαστάσεις της εκάστοτε κατασκευής.

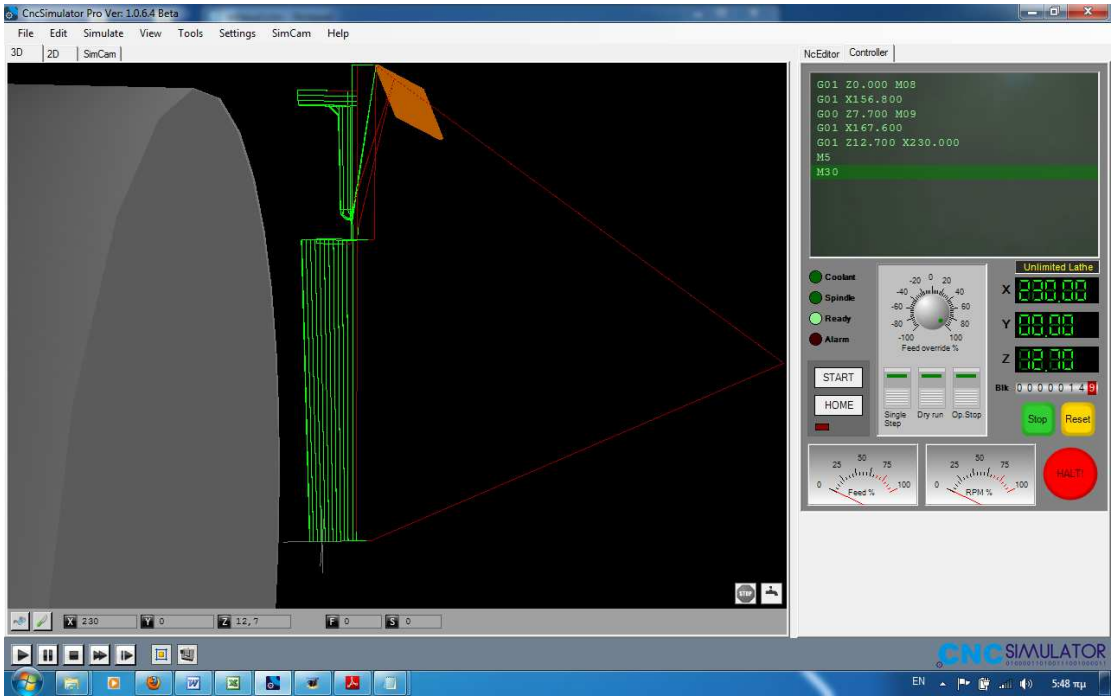
Σε αυτό το σημείο η μόνη παρέμβαση του σχεδιαστή που πρέπει να γίνει στον G-κώδικα που αφορά τις κατεργασίες στο κέντρο τόρνευσης, είναι στην αρχές των συστημάτων των συντεταγμένων, διότι όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2 το πρόγραμμα της προσομοίωσης λαμβάνει ως σημείο μηδέν, αφού οριστεί το μήκος των αρχικών τεμαχίων, σε κάθε φάση, ποσοστό του συνολικού μήκους το οποίο αντιστοιχεί στο τέλος του τσόκ και όχι στην αρχή του όπως θα ήταν επιθυμητό.

Αυτά τα σημεία σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να βρεθούν, όμως στο πρόγραμμα της προσομοίωσης βρέθηκαν προσεγγιστικά και έχουμε ότι για τα συστήματα συντεταγμένων λαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές, ώστε οι τροχιές να κατεργάζονται τα τεμάχια. Παρόλαυτά να σημειωθεί ότι ακόμα και αν δεν γίνεται στο περιβάλλον η κοπή, οι τροχίες μπορούν να ελεγχθούν ως προς την ορθότητά τους. Πειραματικά βρέθηκε για τα συγκεκριμένα μήκη των stock models τα συστήματα αναφοράς βρίσκονται στα σημεία:

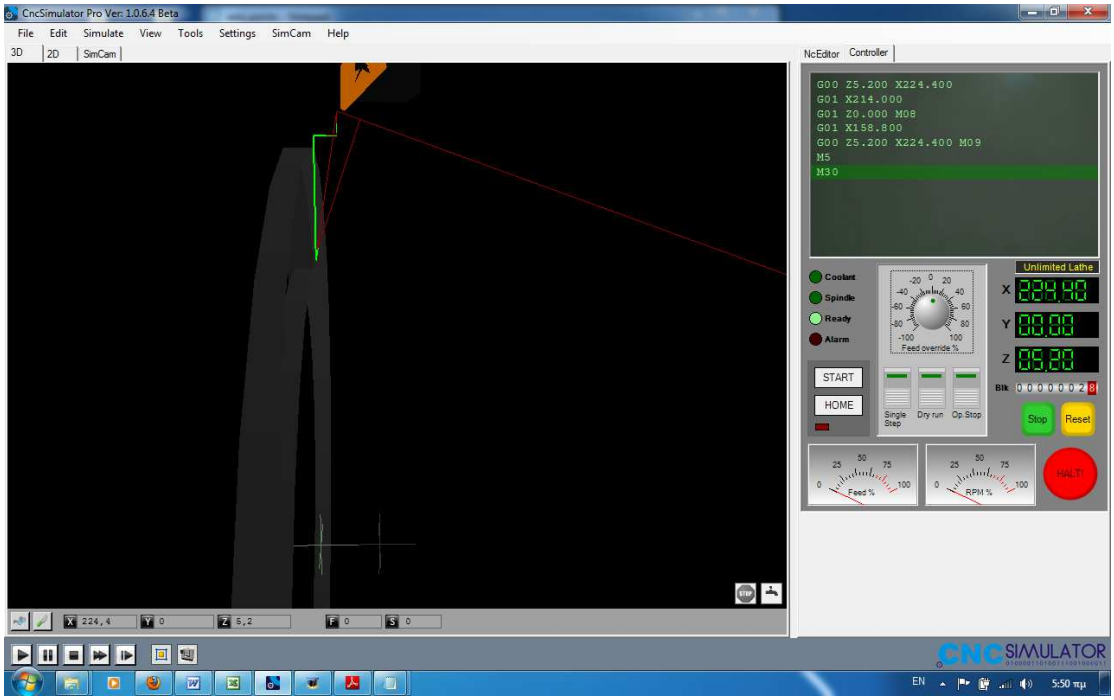
ΣΣ1= +67
ΣΣ2= -16
ΣΣ3= +74
ΣΣ4= +28

τα οποία και τοποθετούνται στο αντίστοιχο μέρος του κώδικα, δίπλα από την εντολή που ορίζει το εκάστοτε σύστημα G92 πρωτού αρχίσει η κάθε κατεργασία. Οι τιμές αυτές πρέπει να αλλάζουν από τον σχεδιαστή, αν χρησιμοποιηθεί άλλη αεροτομή, διαφορετικά χρησιμοποιούνται οι τιμές του κώδικα, αν ο προσομοιωτής της μηχανής έχει ως αρχή αναφοράς την αρχή του τσόκ.

Ακολουθούν στιγμιότυπα κατά τις φάσεις των κατεργασιών στο κέντρο τόρνευσης και κατεργασιών για κάθε δακτύλιο και κάθε σετάρισμά. Στο πέρας του κάθε G-κώδικα που αφορά τα παραπάνω το αντίστοιχο αρχείο αποθηκεύεται με την ονομάσία που δημιουργείται το αρχείο στην αρχή του, καθώς και υπάρχουν και οι καταγραφές όλης της διαδικασίας σε αρχεία .vlc με κωδικοποιήση divx.

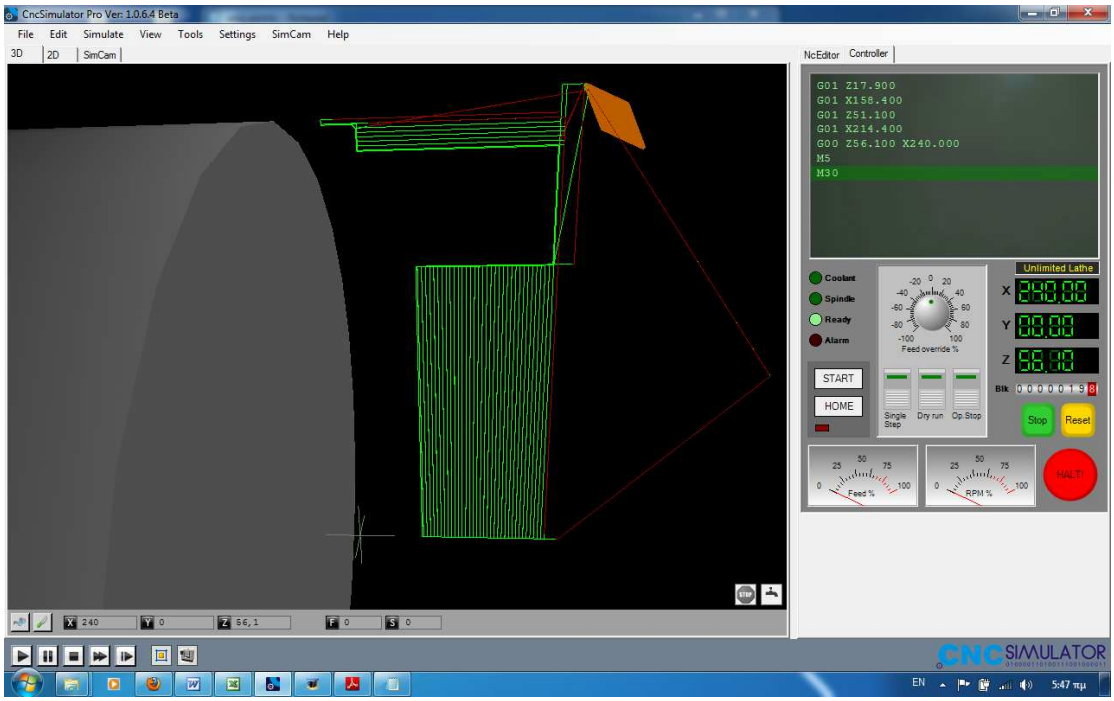


Σχήμα 4.33 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης κατά το πρώτο σετάρισμα

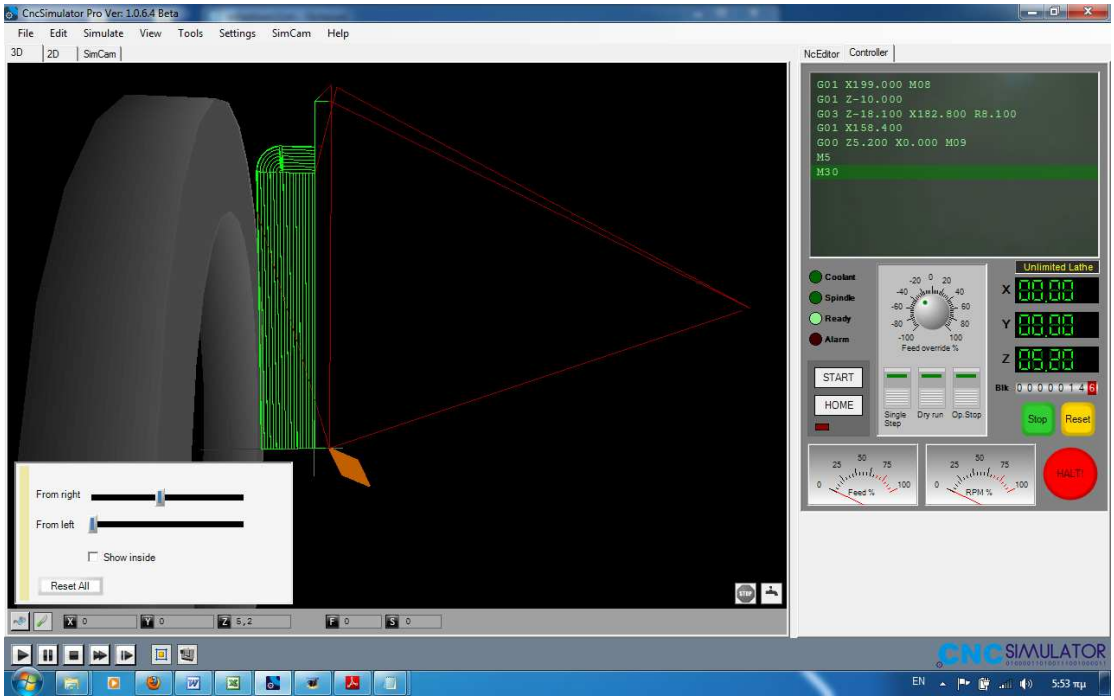


Σχήμα 4.34 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης κατά το δυτερο σετάρισμα

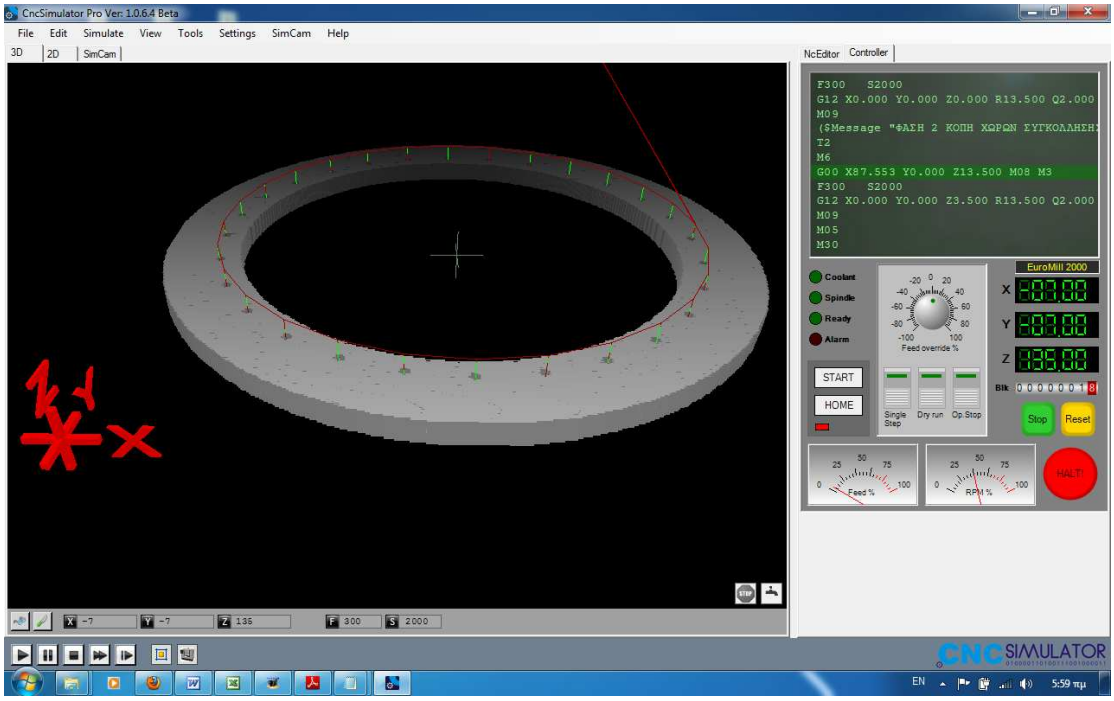
.



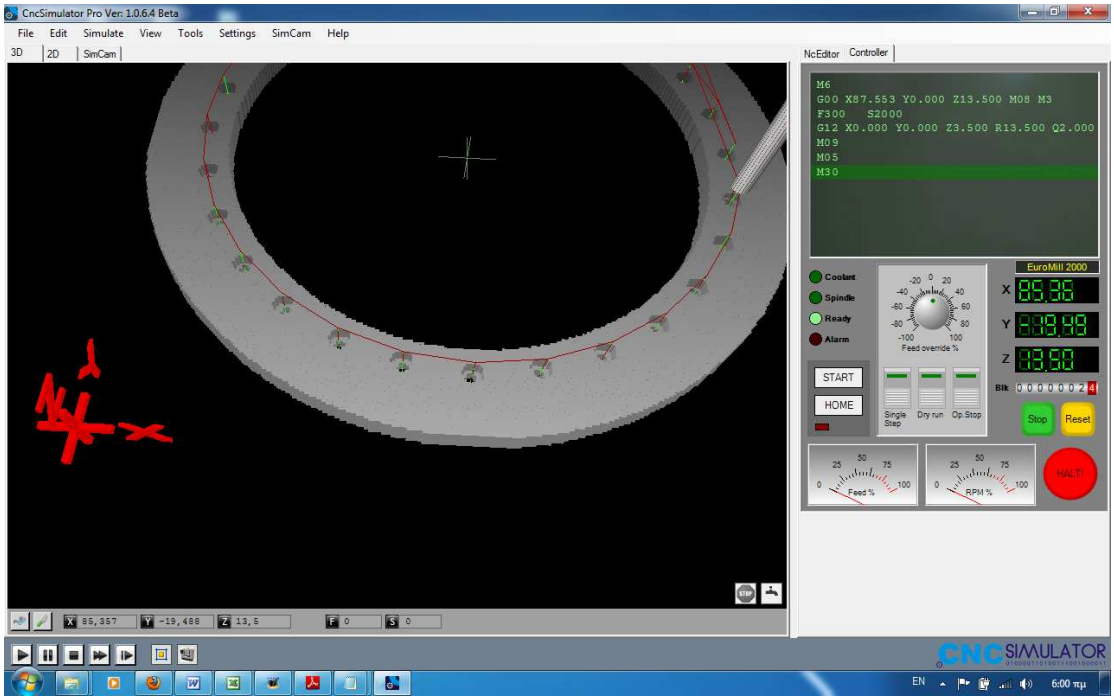
Σχήμα 4.35 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης κατά το πρώτο σετάρισμα



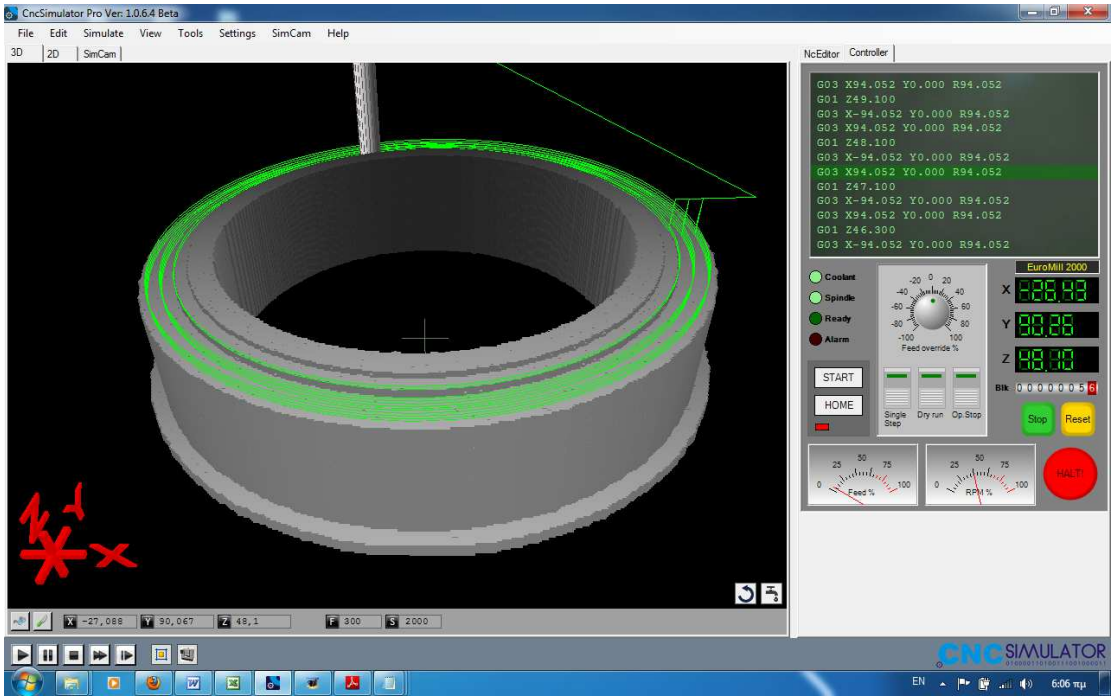
Σχήμα 4.36 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης κατά το δεύτερο σετάρισμα



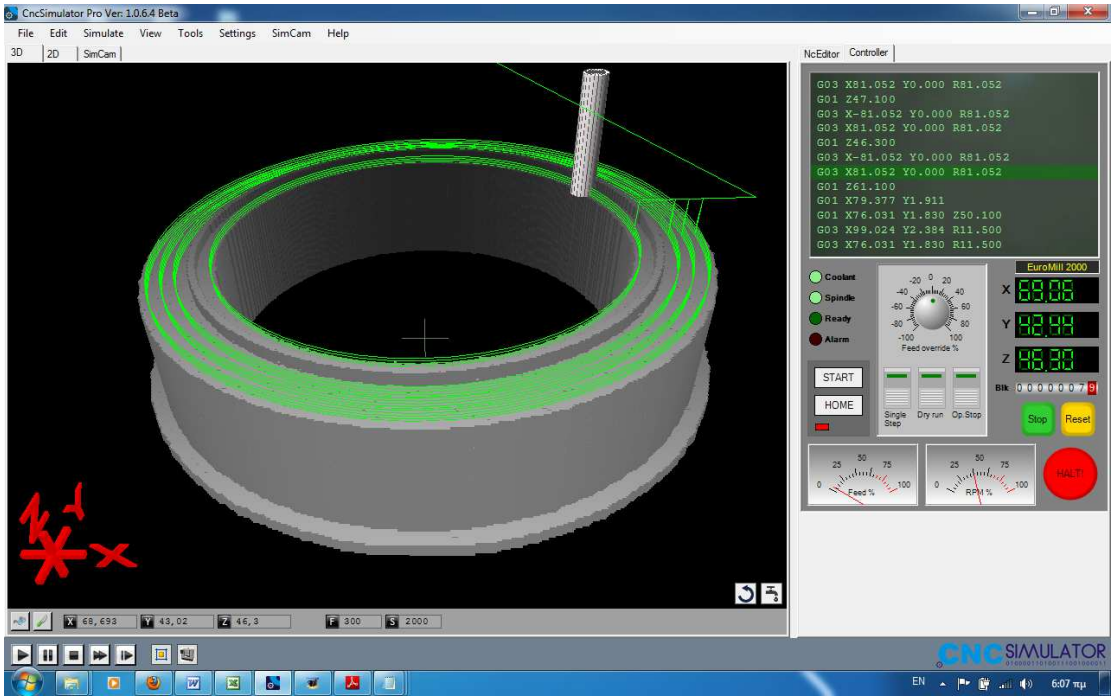
Σχήμα 4.37 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της δημιουργίας των οπών συγκράτησης



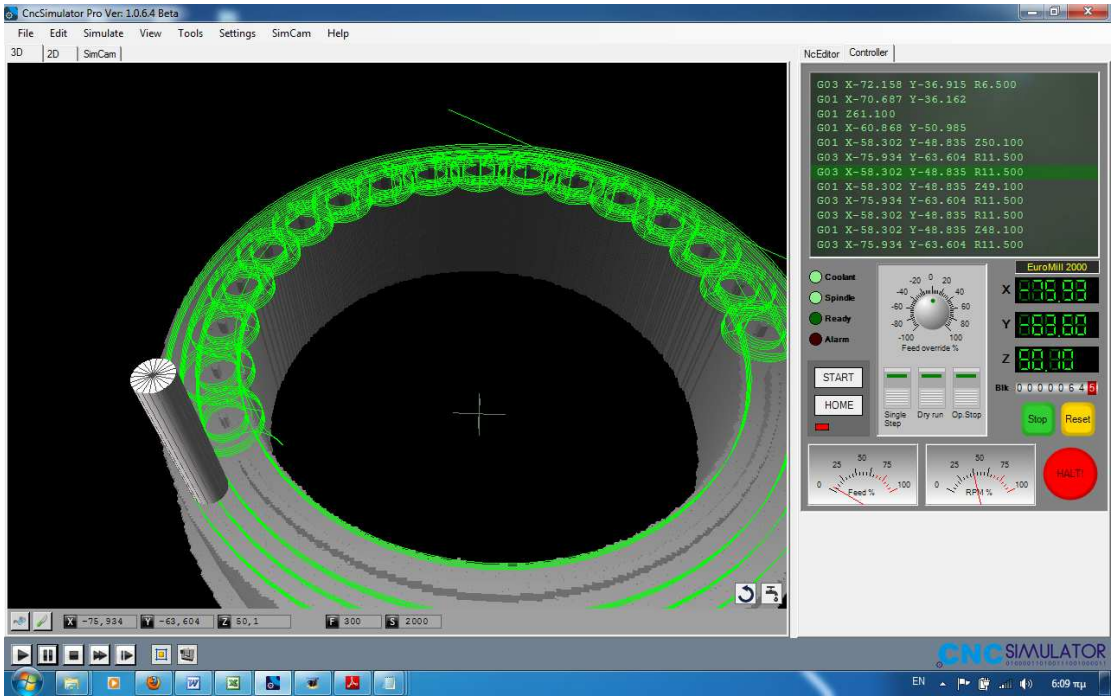
Σχήμα 4.38 Τροχιά εργαλείου μετά το πέρας της κατεργασίας του άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση της δημιουργίας των χώρων συγκόλλησης



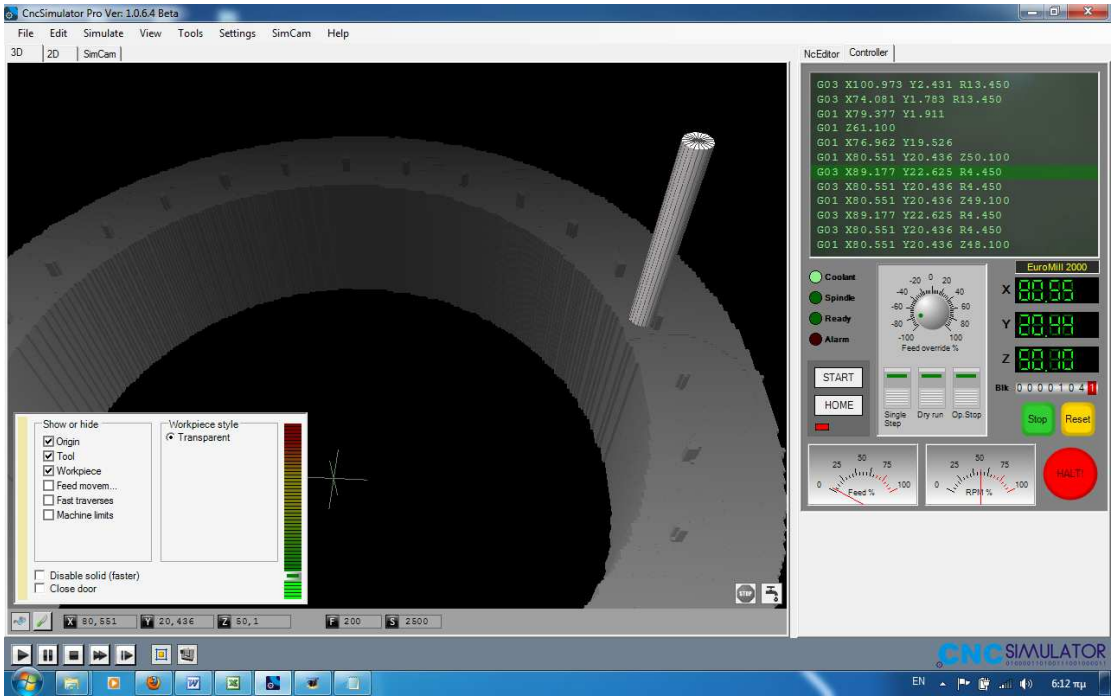
Σχήμα 4.39 Τροχιά εργαλείου κατά τηνκατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση κοπής ομόκεντρων εξωτερικών κύκλων γύρω από το κέντρο της πτερύγωσης



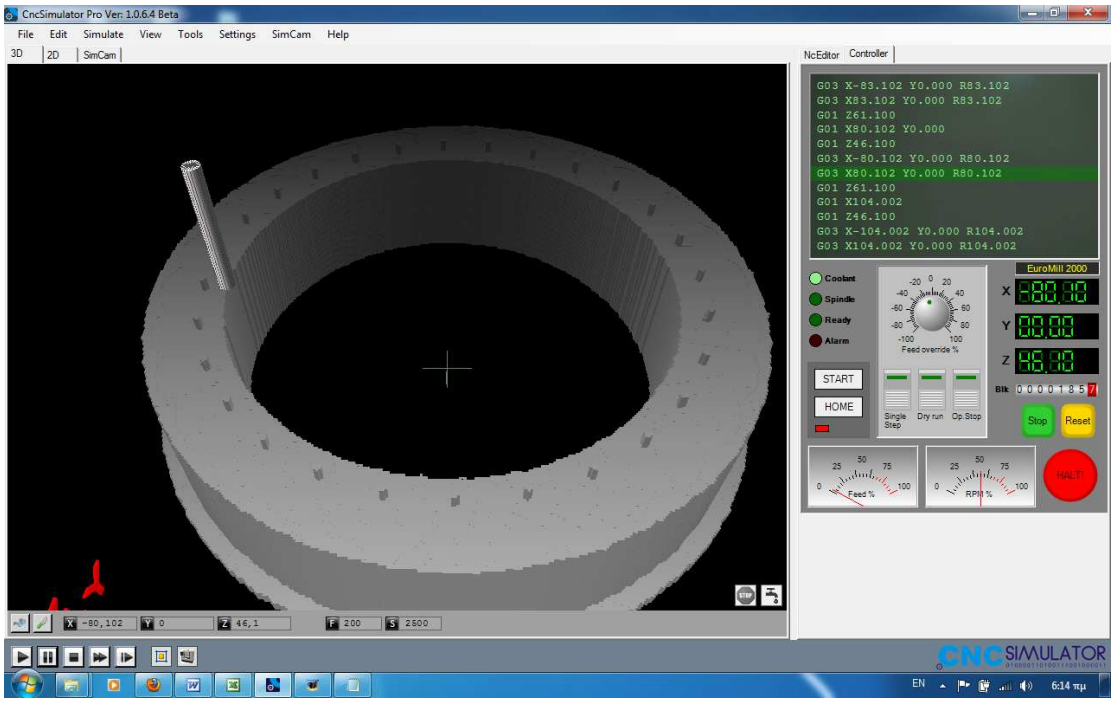
Σχήμα 4.40 Τροχιά εργαλείου κατά τηνκατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση κοπής ομόκεντρων εσωτερικών κύκλων γύρω από το κέντρο της πτερύγωσης



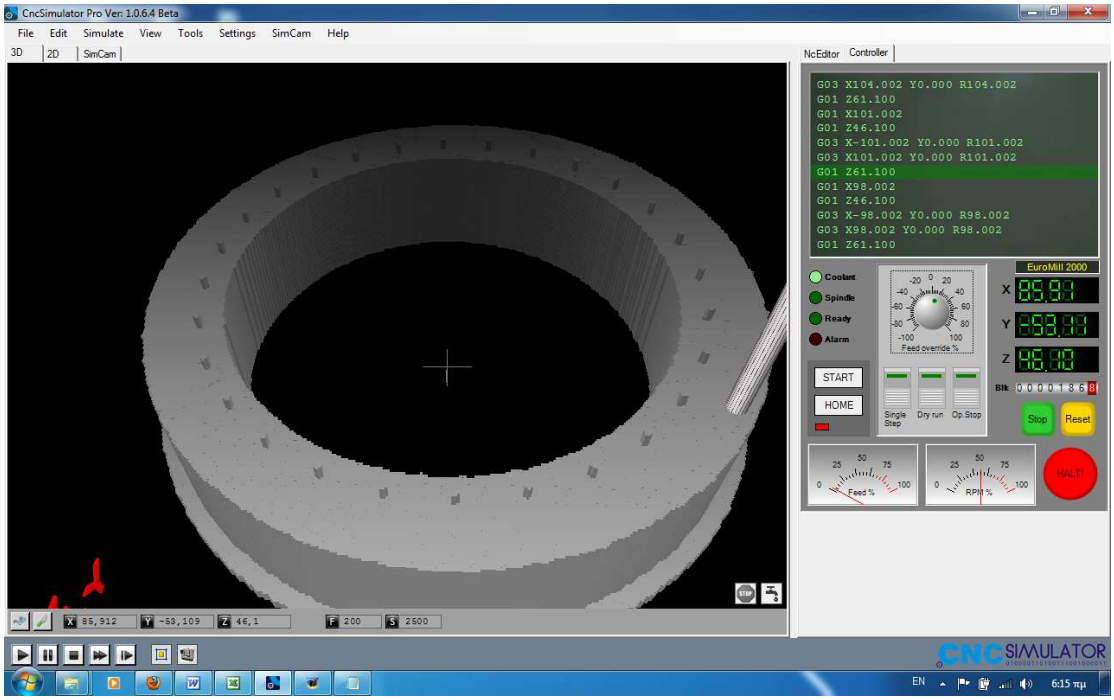
Σχήμα 4.41 Τροχιά εργαλείου κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση κοπής ομόκεντρων κύκλων γύρω από τα κέντρα του κάθε πείρου συγκράτησης. Αρχικά γίνονται οι μεγαλύτερης διαμέτρου κύκλοι και στη συνέχεια οι μικρότερης διαμέτρου, σε κάθε πείρο.



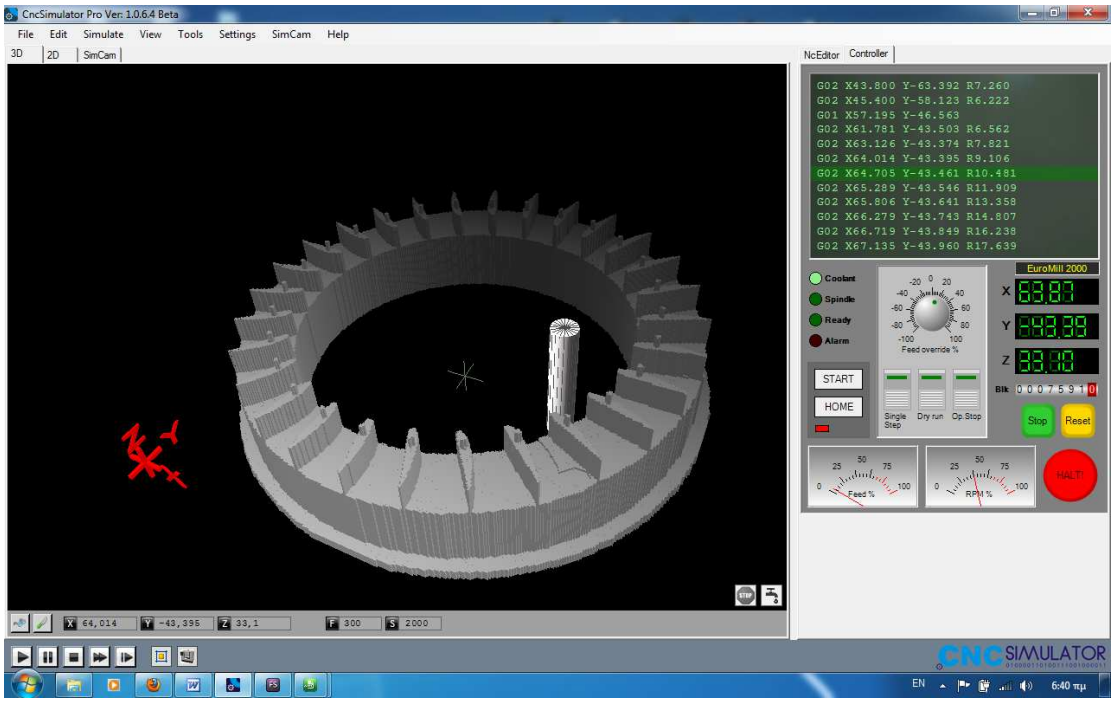
Σχήμα 4.42 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση αποπεράτωσης των πείρων συγκράτησης, καθώς και της επιφάνειας στο επίπεδο της βάσης των πείρων z(2)



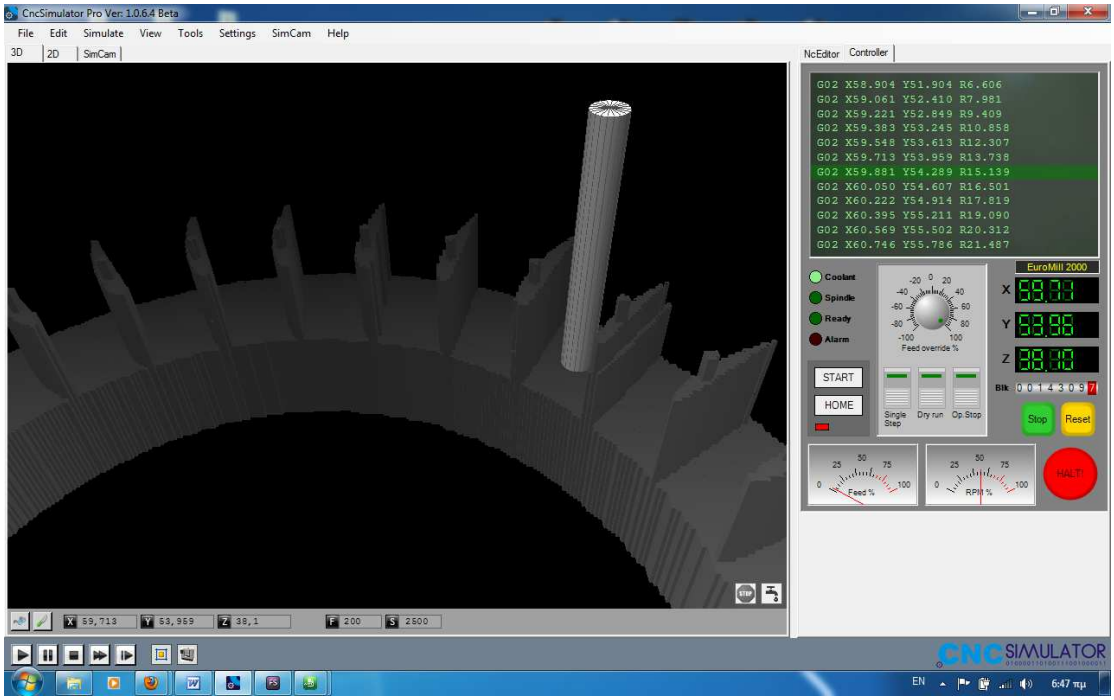
Σχήμα 4.43 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση αποπεράτωσης της επιφάνειας στο επίπεδο της βάσης των πείρων z(2), με εσωτερικούς ομόκεντρους κύκλους γύρω από το κέντρο της πτερύγωσης



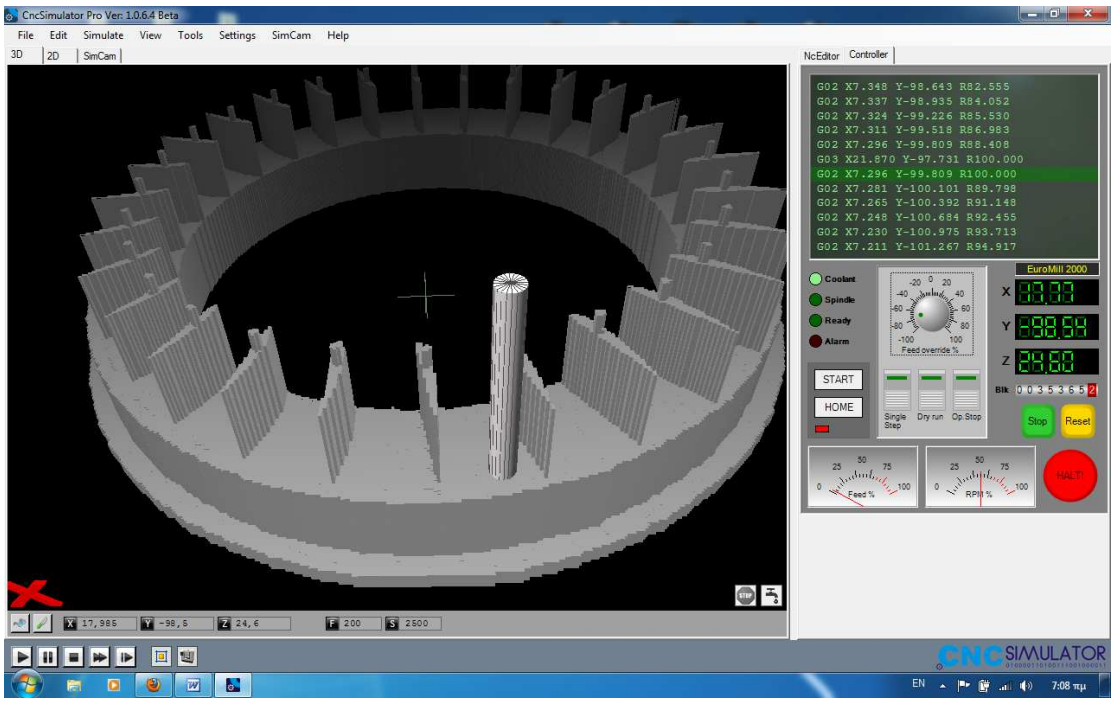
Σχήμα 4.44 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση αποπεράτωσης της επιφάνειας στο επίπεδο της βάσης των πείρων z(2), με εξωτερικούς ομόκεντρους κύκλους γύρω από το κέντρο της πτερύγωσης



Σχήμα 4.45 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση εκχόνδρισης γύρω από τα πτερύγια αποτελούμενη από τις κινήσεις των εφαπτομενικών τροχιών και του πάσου μεταξύ των αεροτομών



Σχήμα 4.46 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση ημι-αποπεράτωσης γύρω από τα πτερύγια



Σχήμα 4.47 Στιγμιότυπο κατά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών κατά την φάση αποπεράτωσης γύρω από τα πτερύγια αποτελούμενη από τις κινήσεις των εφαπτομενικών τροχιών και των πάσων μεταξύ των αεροτομών για την αποπεράτωση του επιπέδου z(1) στην βάση των πτερυγίων

5

Κατασκευή τεμαχίου

5.1 Διορθωτικές ενέργειες στα αρχεία

Σε πρώτη φάση, το υλικό του πραγματικού τεμαχίου επιλέχθηκε να είναι από Dow και αυτό για λόγους οικονομίας και ασφάλειας της κατασκευής. Τα stock models θα είναι ενωμένα φύλλα, σαν σάντουιτς, και θα σχηματίζουν τα αρχικά τεμάχια, όπως ακριβώς αναφέρονται και στην προσομοίωση. Αυτό δεν επιφέρει άμεση αλλαγή στα αρχεία της matlab, όμως έχει έμμεση επίδραση στις συνθήκες κοπής. Έτσι είναι εύλογο να ακυρωθούν σε όλες τις φάσεις και για τις δυο μηχανές οι εντολές χρήσης ελαίου λιπάνσεως. Ταυτόχρονα, γίνεται αναθεώρηση των συνθηκών κοπής (προώσεις, πάχη κοπής και ταχύτητες κοπής), όπως αυτές ορίζονται εμπειρικά από τον εργαστήριο για το υλικό μας. Και σε αυτή την περίπτωση, οι συνθήκες κοπής ορίζονται παραμετρικά στα αρχεία matlab, οπότε και δεν γίνεται κάποια αλλαγή στον κώδικα για αυτές. Τα αντίστοιχα τροποποιημένα αρχεία που αφορούν την πραγματική κατασκευή ορίζονται ως gcodelatheman.m και gcodecncman.m. Επιπλέον, τα εξαγόμενα αρχεία του G-κώδικα ορίζονται με όμοιο τρόπο όπως της προσομοίωσης με τελευταίο πρόθεμα όμως την κατάληξη «man» αντί για «sim». Είναι ευνόητο ότι εφόσον θα χρησιμοποιηθούν εργαλεία όμοια με αυτά της προσομοίωσης και ειδικά για το κέντρο κατεργασιών τα αρχεία των τροχιών (.xls) δεν θα υποστούν αλλαγές, άρα και τα αρχεία των συντεταγμένων (.txt) που εισάγωνται στα αρχεία της matlab.

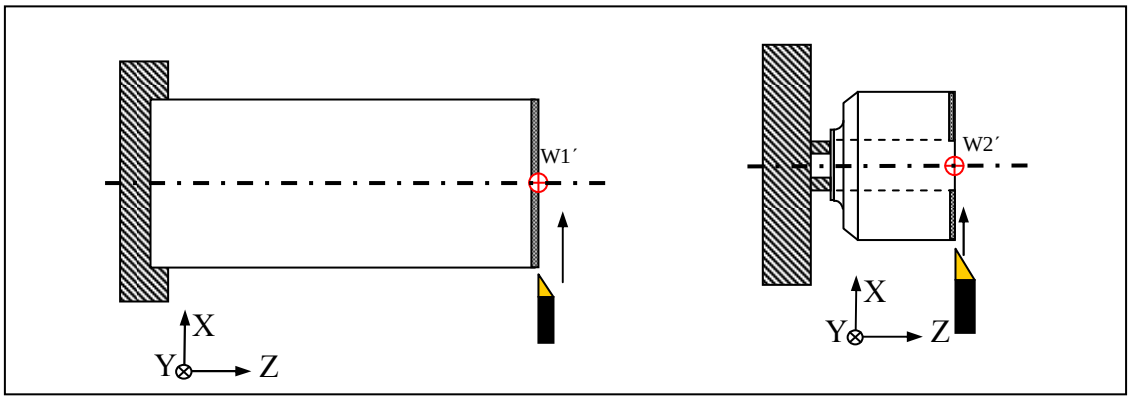
Η μετάβαση από τα προγραμματα της matlab που αφορούν αρχεία για την προσομοίωση σε αυτά για την πραγματική κατασκευή επιφέρει συγκεκριμένες αλλαγές στον κώδικά τους. Επειδή, δεν είναι εύκολος ο έλεγχος ορθότητας του G κώδικα που παράγεται από τα προγράμματα προσομοίωσης, οι μόνοι έλεγχοι περιορίζονται σε αυτόν της μηχανής πριν από την τελική κατασκευή και στην όποια εμπειρία του χρήστη της εργαλειομηχανής. Για αυτό τον λόγο ξεχωρίζουμε με αρκετά

διακριτό τρόπο τις άλλαγές που πρέπει να γίνουν, ώστε να μην αλλοιωθεί το σχετικά αξιοπιστο αποτέλεσμα που μας έδωσε η προσομοίωση (λ.χ. αλλάζοντας σειρά φάσεων, διαστάσεων εργαλείων και άλλων). Στην συνέχεια αναφέρονται όλες οι άλλαγές που γίνονται στα αρχεία της matlab.

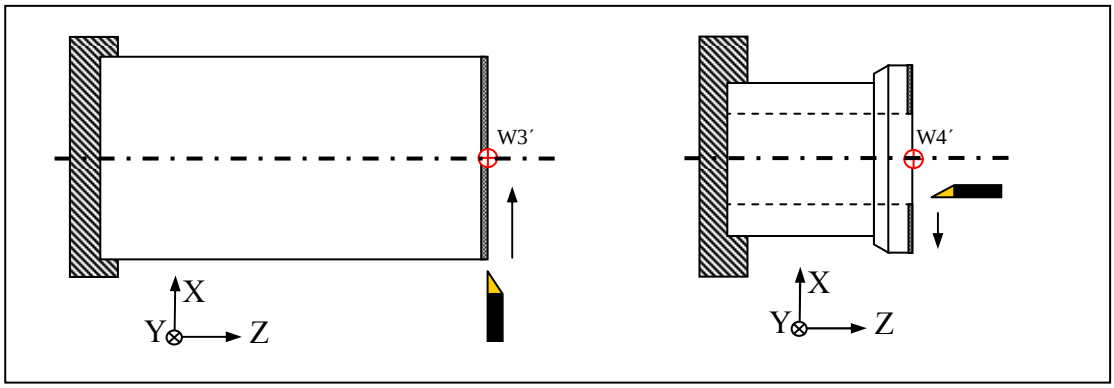
Αρχικά, δομούμε τα προγράμματα ώστε οι εξάγόμενοι G κώδικες να έχουν αντίστοιχες ονομασίες και O1000-O1050, κατά αυξουσα σειρά, όπως ορίζεται και στο φασεολόγιο. Οι επιπλέον εντολές προς σετάρισμα στο πρόγραμμα της προσομοίωσης διαγράφονται, ενώ στην θέση τους δίνονται εντολές για την επιλογή των εργαλείων, όπως πρέπει να ορίζονται στην μηχανή. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια αλλαγή των start-blocks για τον ορισμό των βασικών αρχικών εντολών στις μηχανές.

Όλα τα σχόλια πρέπει να γραφούν με το αντίστοιχο format της μηχανής και στα αγγλικά. Επίσης, ο χρήστης μπορεί στο τέλος κάθε φάσης να προσθέτει επιλεκτική παύση, ώστε να έχει προσεκτικότερη παρατηρηση της κατασκευής. Τέλος, θα χρειαστεί να ελεγχθεί η φορά της κοπής (ωρολογιακή-ανθωρολογιακή), ώστε να μειωθούν όσο το δυνατό οι δυνάμεις κοπής στο λεπτότοιχο της αεροτομής, όπως αναφέρεται στην ανωτέρω ανάλυση.

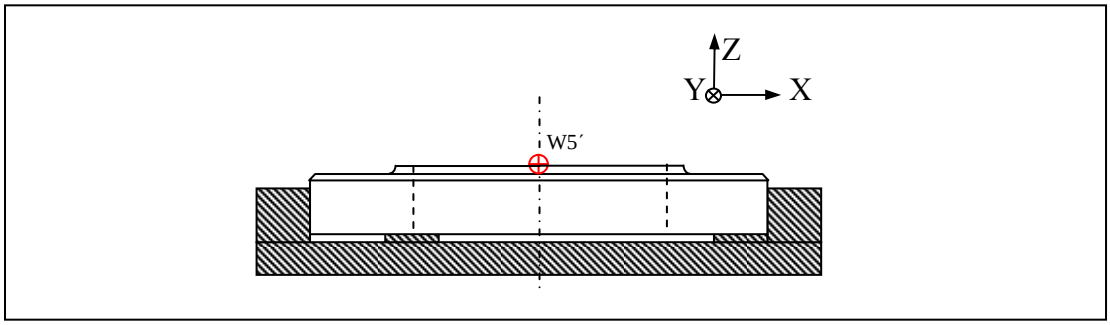
Η σημαντικότερη αλλαγή που πρέπει να γίνει στα αρχεία της matlab είναι αυτή της αλλαγής συστημάτων συντεταγμένων. Στις προσομοιώσεις χρειαζόταν, για να έχουμε οπτικό έλεγχο, να ορίσουμε σε κάθε σετάρισμα μια αρχή συντεταγμένων η οποία δεν ήταν πάντα η πλέον ενδεικνύμενη από κατασκευαστική άποψη. Δηλαδή αυτό ήταν αδύνατο να οριστεί με τον ελεγκτή, αφού ήταν εσωτερικό σημείο του stock model. Για αυτό τον λόγο επαναπροσδιορίζουμε τις αρχές των συστημάτων συντεταγμένων σε κάθε σετάρισμα για κάθε τεμάχιο και για κάθε μηχανή, όπως ορίζεται από τα σχήματα στην συνέχεια, σχήμα 5.1, για το κέντρο τόρνευσης του πρώτου τεμαχίου και σχήμα 5.2 για το κέντρο τόρνευσης του δεύτερου τεμαχίου. Στα σχήμα 5.3 και σχήμα 5.4 ορίζονται τα συστήματα συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθούν για το άνω και κάτω τεμάχιο αντίστοιχα, στο κέντρο κατεργασιών.



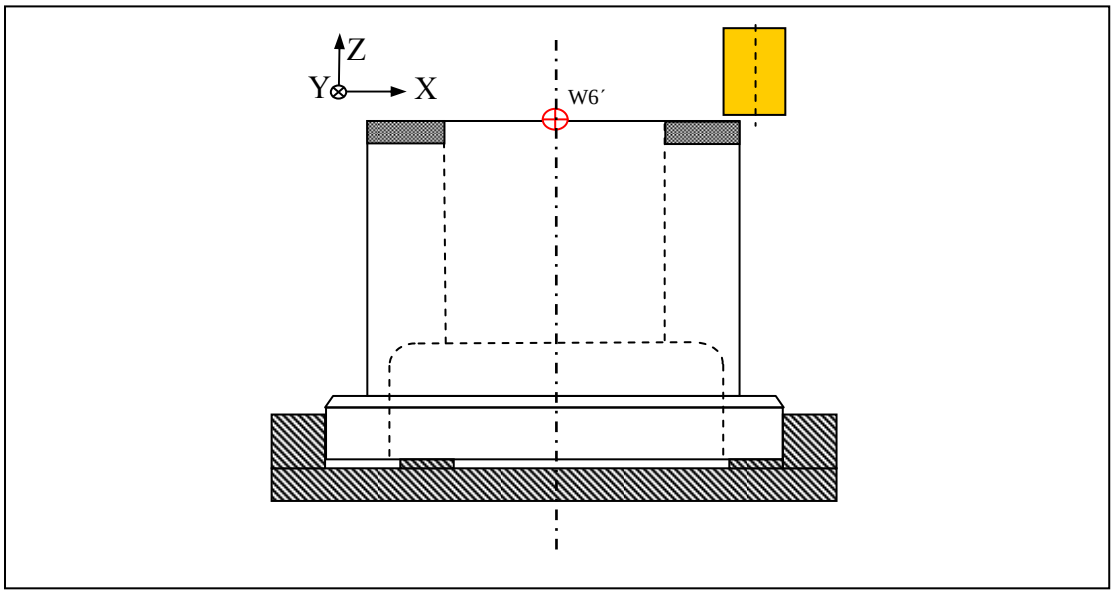
Σχήμα 5.1 Συστήματα συντεταγμένων κατασκευής (W1΄) και (W2΄) άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης



Σχήμα 5.2 Συστήματα συντεταγμένων κατασκευής (W3΄) και (W4΄) κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης



Σχήμα 5.3 Συστήματα συντεταγμένων κατασκευής (W5΄) άνω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών



Σχήμα 5.4 Συστήματα συντεταγμένων κατασκευής (W6΄) κάτω δακτυλίου στο κέντρο κατεργασιών

Τα ανώτερα συστήματα που θα χρησιμοποιήθούν στην κατασκευή είναι επιλεγμένα, έτσι ώστε οι αισθητήρες των μηχανών μπορούν πολύ ευκολότερα να

έχουν πρόσβαση σε αυτά σε σχέση με τα αντίστοιχα σημεία που επιλέχθηκαν κατά την προσομοίωση. Είναι ευνόητο ότι οι κώδικες στην matlab πρέπει να αλλαχθούν και να στην συνέχεια να ελεχθούν για τελευταία φορά από τον χρήστη κατά τον άξονα z. Για αυτές τις αλλαγές οι αναγκαίες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο αντίσοιχο αρχείο Δακτύλιοι.xls του χρήστη, καθώς και τα σχήματα στην σελίδα 95 και 144 του παρόντος. Τέλος, και για δυο κατεργασίες, στον τόρνο και στην φρέζα, εισαγουμε τον χαρακτήρα «%» στην αρχή και στο τέλος του κάθε εξαγόμενου αρχείου .txt.

5.2 Εκτέλεση

Μετά τον έλεγχο που έγινε στα αρχεία εξαγωγής του G κώδικα από τα αρχεία της matlab, αυτά εισήχθηκαν στις εργαλειομηχανές, επιλέχθηκαν τα εργαλεία, και οι συνθήκες. Για πρακτικούς λόγους της συγκράτησης των μοντέλων επιλέχθηκε να δημιουργηθεί με το πρώτο αρχείο ο πάνω δακτύλιος στον τόρνο μόνο στο πρώτο του σετάρισμα. Στην συνέχεια το τεμάχιο κόπηκε εμπειρικά στο σωστό μηκος χωρίς την χρήση του δεύτερου αρχείου που αφορά τον άνω δακτύλιο στον τόρνο. Επίσης, για τον ίδιο λόγο η κατεργασία του στην φρέζα δεν πραγματοποιήθηκε. Στην περίπτωση όμως που το δοκίμιο ήταν από πιο σκληρό υλικό, τότε δεν θα υπήρχε πρόβλημα στην συγκράτηση και οι αντίστοιχες κατεργασίες θα γίνονταν, π.χ. αν το υλικό ήταν αλουμίνιο ή χάλυβας.

Για την κατεργασία του κάτω δακτυλίου επιλέχθηκε να γίνει η κοπή στον τόρνο με το πρώτο σετάρισμα μόνο, και αυτό διότι, αφενός ο τρόπος στήριξης του τεμαχίου στο δεύτερο σετάρισμα θα κατέστρεφε το τελικό δοκίμιο, αφετέρου η ύπαρξη περίσσειας υλικού καθιστά πολύ ευκολότερη το δέσιμο του dow στην φρέζα. Έτσι το δεύτερο αρχείο για τον κάτω δακτύλιο που αφορά τον τόρνο δεν φορτώνεται στην μηχανή και γίνεται στην συνέχεια η κατεργασία στην φρέζα.

Σε πρώτη φάση ήταν αναγκαίο να βρεθούν οι συνθήκες κοπής με τις οποίες η επιφάνεια του dow θα έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα στον τόρνο. Σε πρώτη φάση γνωρίζουμε ότι σε μεγάλα βάθη κοπής το υλικό σπάει, οπότε το βάθος θα παραμείνει ως έχει με της προσομοίωσης, ήτοι 1mm. Επομένως, με πειράματα προσδιορίζουμε τις στροφές και το βήμα ανά περιστροφή.

Πειραματικά σε ένα πρώτο τεμάχιο παίρνοντας κάποια πάσα με πρόωση F=0,01 ανά περιστροφή ότι αλλάζοντας τις στροφές δεν επέφερε μεγάλη αλλαγή στην ποιότητα της επιφάνειας του δοκιμίου. Η διαπίστωση αυτή έγινε για τιμές στο εύρος S=500-2000rpm.

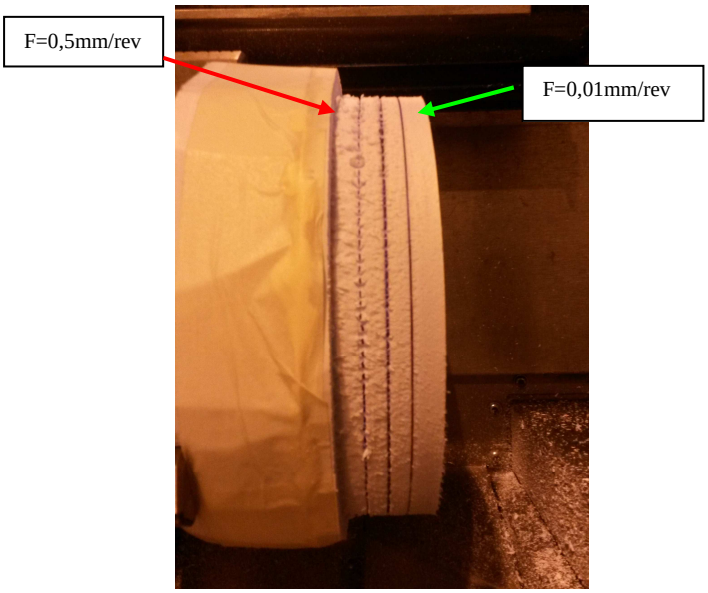
Όσον αφορά την πρόωση ανά στροφή έγιναν αντίστοιχα πειράματα με διαφορετικά πάσα στις τιμές F=0,01, 0,05, 0,1 και 0,5 mm/rev. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται σε μια διάμετρο η επίδραση της αλλαγής της F με σταθερές στροφές S=1000rpm και μικρό πάχος ap=1mm. Με αυτό το πείραμα καταλήγουμε ότι το υλικό για να μην σπάει χρειάζεται στην κατεργασία του αρκετά χαμηλή πρόωση ανά στροφή.

Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η ποιότητα της επιφανείας κατά την κατεργασία του προσώπου. Σε αυτό το σημείο φαίνεται ξεκάθαρα η φύση του υλικού όπου στο κέντρο του άξονα περιστροφής το κοπτικό δεν κάνει ξεκάθαρη κοπή αλλά και συμπίεση του dow και γιαυτό και η επιφάνεια φαίνεται σαν να έχει κατεργαστεί

σχεδόν ιδεατά. Παρακάτω φαίνεται ένας πίνακας ενδεικτικά με τις συνθήκες κατεργασιών που δοκιμάστηκαν.

Διάμετρος (mm)	**S (rpm)**	**F (mm/rev)**	**ap (mm)**	**Ποιότητα**
218	2000	0,01	1	ικανοποιητική
216	1000	0,01	1	ικανοποιητική
214	500	0,01	1	ικανοποιητική
206	1000	0,01/0,05/0,1/0,5	1	επίδραση
Πρόσωπο	2000	0,01	1	ικανοποιητική

Πίνακας 5.1 Συνθήκες κατεργασιάς του υλικού Dow στον τόρνο

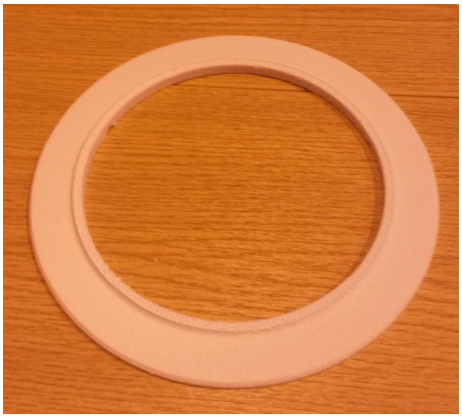


Σχήμα 5.5 Πείραμα στην διάμετρο D=216mm, S=1000rpm με διάφορες F.

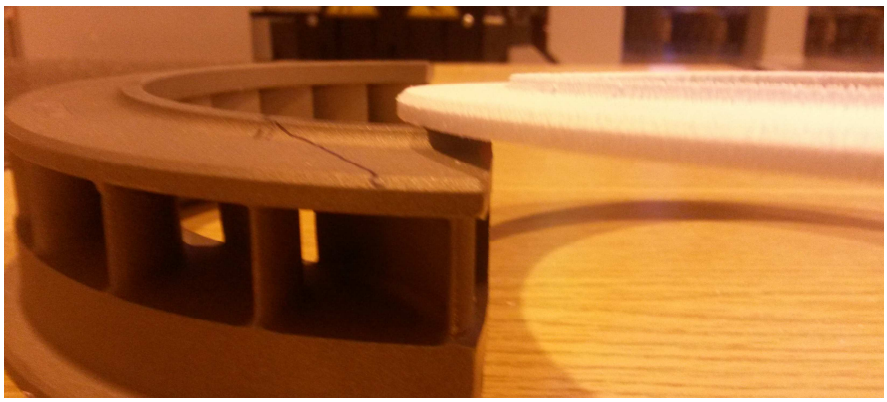
Σχήμα 5.6 Επιφάνεια στο πρόσωπο S=2000rpm, F=0,01mm/rev

Τελικά για τις κατεργασίες στον τόρνο επιλέχθηκαν οι συνθήκες S=2000rpm, F=0,01mm/rev και ap=1mm. Στο σχήμα 5.7 φαίνονται δυο φάσεις κατά την κατεργασία του άνω δακτύλιου στον τόρνο. Στο σχήμα 5.8 φαίνεται το τελικό τεμάχιο, ύστερα από την κοπή του στον τόρνο με χειροκίνητο τρόπο, ενώ στο σχήμα 5.9 η σύγκριση του με το πραγματικό τεμάχιο.

Σχήμα 5.7 Φάσεις κατά την κοπή του άνω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης

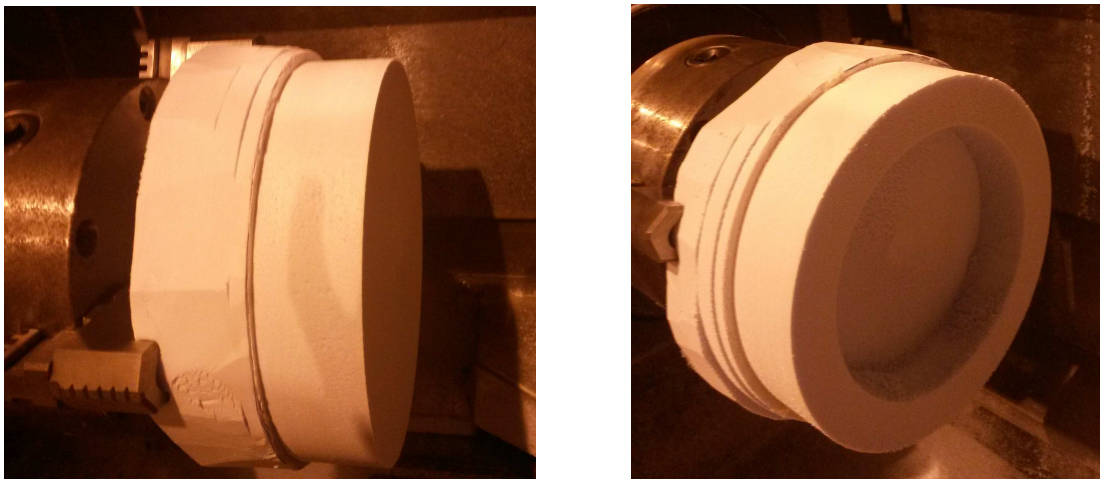


Σχήμα 5.8 Τεμάχιο άνω δακτυλίου, ύστερα από την κατεργασία της τόρνευης

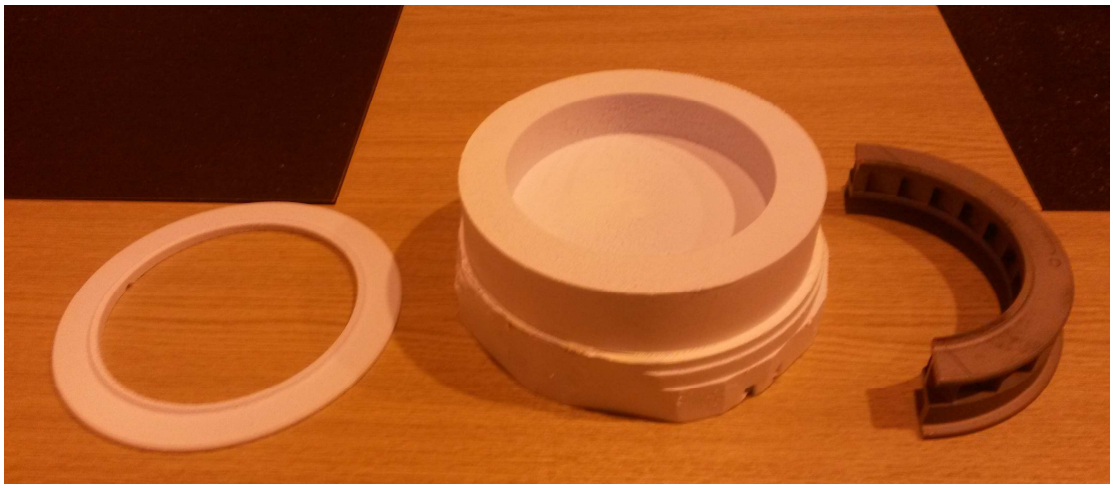


Σχήμα 5.9 Πραγματικό τεμάχιο και άνω δακτύλιος, ύστερα από την κατεργασία της τόρνευης

Στην συνέχεια φορτώθηκε στον τόρνο το stock model του δεύτερου δακτυλίου. Χρησιμοιποιώντας τις ίδιες συνθήκες κοπής και τα εργαλεία, αλλάζοντας τα start block του κώδικα, έγινε η κατεργασία του κάτω δακτυλίου στο ένα σετάρισμα. Το σχήμα 5.10 δείχνει φάσεις κατά την κατεργασία, ενώ το σχήμα 5.11 τα τελικά κομμάτια όπως βγήκαν από το κέντρο τόρνευσης.



Σχήμα 5.10 Φάσεις κατά την κοπή του κάτω δακτυλίου στο κέντρο τόρνευσης

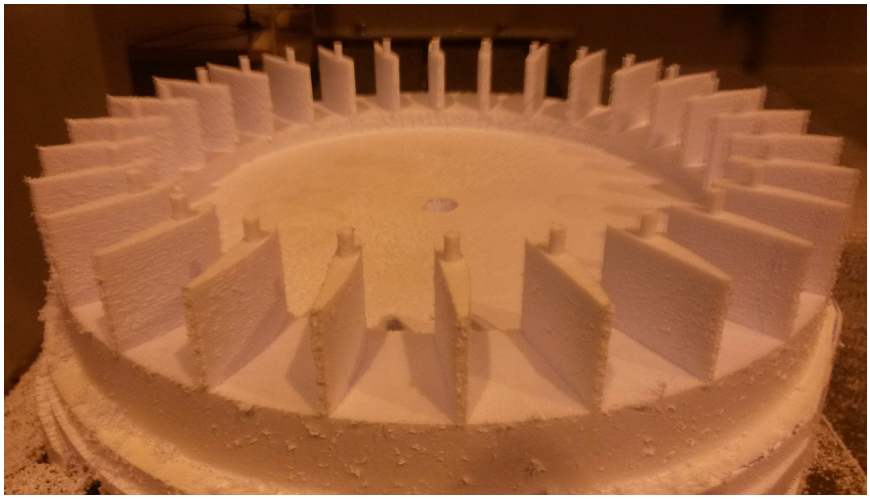


Σχήμα 5.11 Τεμάχια άνω και κάτω δακτυλίου ύστερα από την κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης

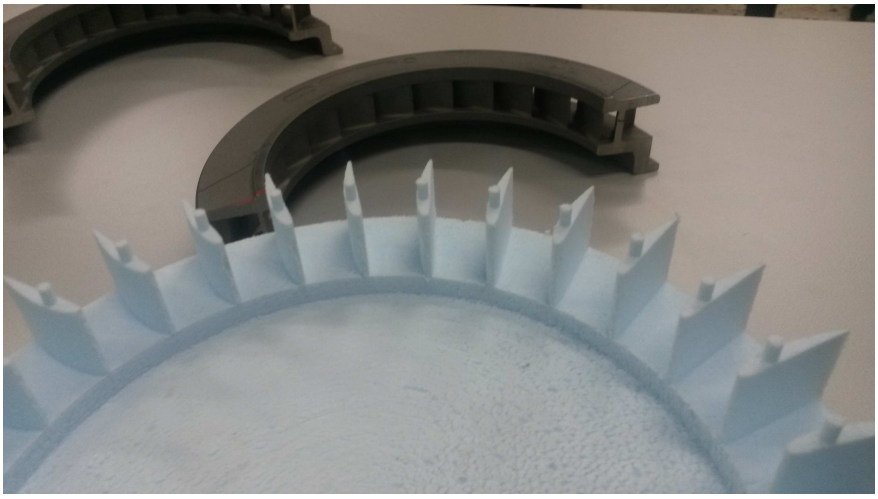
Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η κοπή στο κέντρο κατεργασιών. Το δοκιμαστικό stock model φορτώθηκε και εξετάστηκαν οι συνθήκες κοπής του υλικού. Οι πιο αιχμηρές ακμές των κοπτικών δείχνουν ότι οι στροφές μπορούν να πάρουν τιμές από ένα μεγάλο εύρος τιμών, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί κατά πολύ το F. Σε πρώτη φάση στον κώδικά φορτώθηκε η τιμή F=400mm/rev το οποίο είναι μια αναφορά στο πρόγραμμα. Όμως αυτή στην συνέχεια της κατασκευής άλλαζε.

Ως προς τον έλεγχο του παραγόμενου G κώδικα, ελέχθηκαν οι μέγιστες καμπυλες που μπορεί να κάνει η μηχανή σε σχέση με αυτές που βγάζουν από τις εντολές, ώστε να μην υπάρχει κάποιο «alarm» στην μηχανή, ελέγθηκαν τα εργαλεία και οι αρχικές θέσεις των ώστε να μην τρακάρει κάπου, καθώς εξακριβώθηκε και η σωστή χρήση των εντολών M (η μηχανή δεν μπορεί να διαβάσει δυο εντολές M σε ένα block). Τέλος, επιλέχθηκαν τα δυο αντίστοιχα εργαλεία και ξεκίνησε η κατεργασία.

Κατά την διάρκεια της κατεργασίας, διαπιστώθηκε ότι επειδή τα εργαλεία κόβαν με αρκετά καλή ποιότητα επιφανείας, γιαυτό τον λόγο αλλαξε χειροκίνητα η πρόωση σε F 220% της αρχικής και S σε 150% για την φάση της εκχόνδρισης, ενώ για την φάση της ημιαποπεράτωσης και αποπεράτωσης σε F 500% και S 250%. Στο σχήμα 5.12 φαίνεται η ολοκλήρωση της φασης της εκχόνδρισης στα πτερύγια. Επίσης φαίνεται και η ολοκληρωση των πείρων συγκράτησης, ήτοι η εκχόνδριση του υλικού και η αποπεράτωση στα σημεία. Όπως γίνεται φανερό το σχήμα των πτερυγίων έχει γίνει πλέον διακριτό, όπως επίσης και ότι στις ακμές πρόσπτωσης διαφυγής το πάχος του πτερυγίου είναι αισθητά μεγάλο.



Σχήμα 5.12 Τεμάχιο κάτω δακτυλίου ύστερα από την κατεργασία της εκχόνδρισης στο κέντρο κατεργασιών

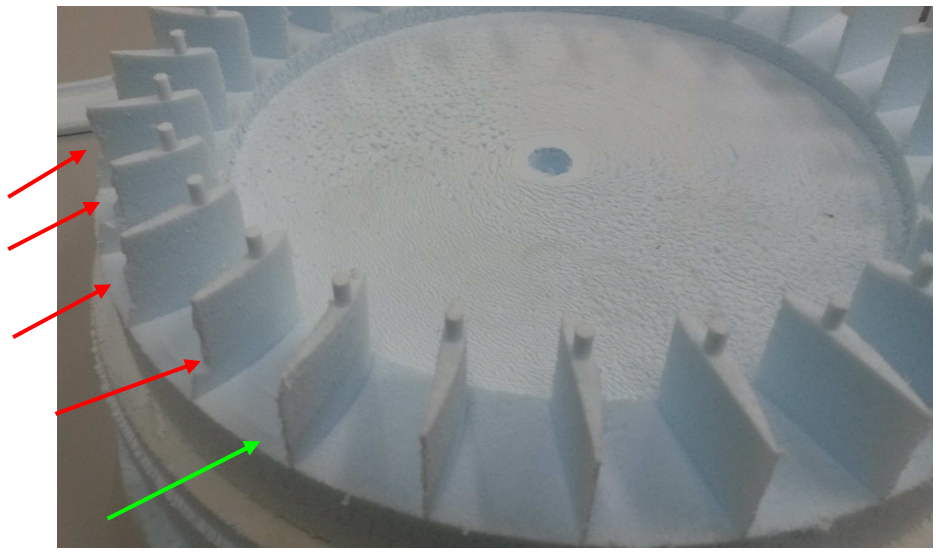


Σχήμα 5.13 Τεμάχιο κάτω δακτυλίου ύστερα από την κατεργασία της ημι-αποπεράτωσης στο κέντρο κατεργασιών

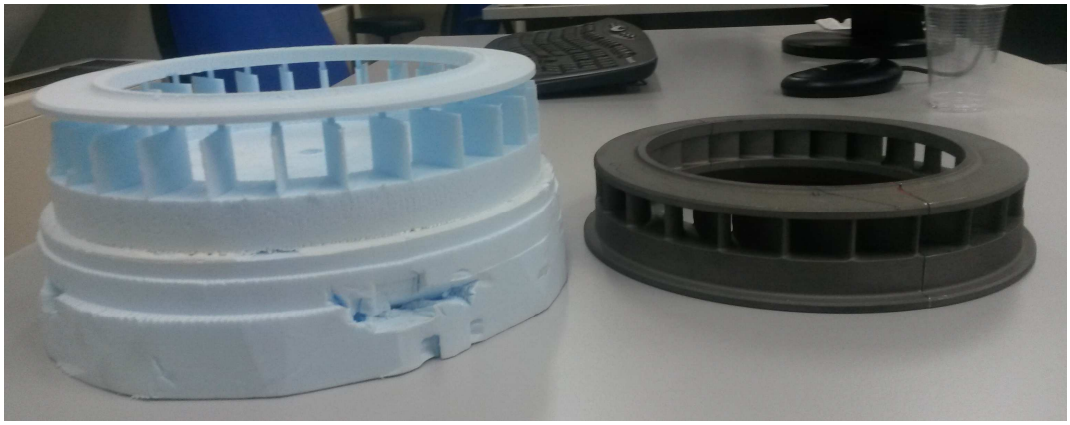
Στο σχήμα 5.13 φαίνεται ο κάτω δακτύλιος ύστερα από την φάση της ημι-αποπεράτωσης. Πλέον γίνεται αισθητό το σχήμα των πτερυγίων, στις ακμές πρόσπτωσης και διαφυγής το πάχος του υλικού έχει σχεδόν εκμηδενιστεί, όπως αναμενόταν. Στην συνέχεια ακολούθησε η φάση της αποπεράτωσης των πτερυγίων.

Μια αλλαγή που έγινε στον κώδικα, ήταν αυτή της ωρολογιακής φοράς της ατράκτου και αυτό για τον λόγο ότι στο εργαστήριο υπήρχαν μόνο δεξιά εργαλεία κοπής. Έτσι η κοπή κατά την φάση της αποπεράτωσης δεν ήταν αναμενόμενο να πετύχει πλήρως, αφού όπως έχει υποθεί ανωτέρω είναι πιο σωστό στο λεπτότοιχο της αεροτομής να γίνεται αντίρροπο φρεζάρισμα με την φορά της κοπής. Για αυτό τον λόγο έγινε πάλι μείωση της πρόωσης F κατά 75% και αύξηση των στροφών στις 200% των αρχικών S. Παρόλαυτά, διαπιστώθηκε στην συνέχεια ότι το υλικό δεν μπορεί να αντέξει και ως αποτελεσμα έσπαγε πολύ πριν την ακμή εκφυγής. Για αυτό τον λόγο αποφασίστηκε να διακοπεί η κατεργασία στο τέταρτο πτερύγιο και να μην καταστραφεί όλο το μοντέλο. Στην ακμή πρόσπτωσης η γεωμετρία έγινε σχεδόν τέλεια, λόγω της ύπαρξης πάχους υλικού. Επομένως, ανάγεται το συμπέρασμα ότι η καταστροφή των πτερυγίων δεν έγινε λόγω κάποιου σφάλματος, αλλά λόγω της φύσης του υλικού. Προφανώς, σε περίπτωση μετάλλου αυτό δεν θα συνέβαινε.

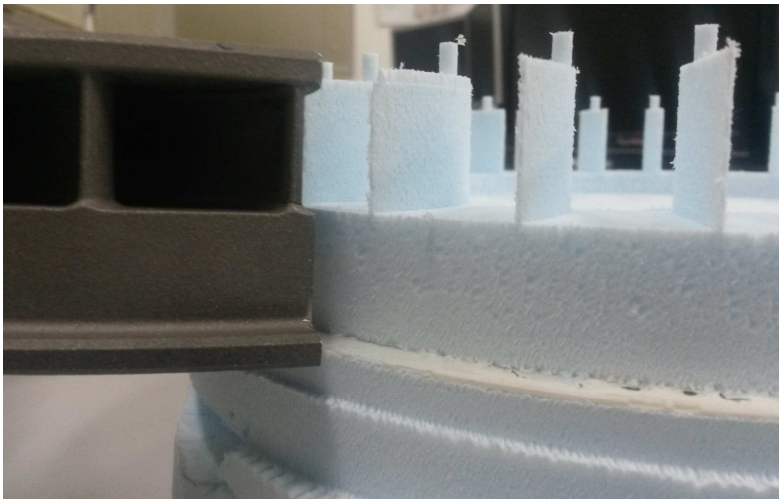
Στο σχήμα 5.14 φαίνεται το αποτελεσμα της αποπεράτωσης στα πρώτα πτερύγια, στο σχήμα 5.15 και σχήμα 5.16 η ολοκληρωμένη κατασκευή και το χυτό τεμάχιο. Στο σχήμα αυτό φαίνεται επίσης και η διεκόλυνση στη στήριξη που παρείχε το stock model στην φράζα (οι εγκοπές είναι τα σημεία συγκράτησης των νυχιών με όλο τον κάτω δακτύλιο.



Σχήμα 5.14 Καταστροφή των πρώτων πτερυγίων κατά την φάση της αποπεράτωσης λόγω φύσης υλικού



Σχήμα 5.15 Τελικό τεμάχιο και πραγματικό χυτό τεμάχιο



Σχήμα 5.16 Πρώτη σύγκριση μεταξύ πραγματικού και παραγώμενου τεμαχίου

5.3 Αποτελέσματα

Το τεμάχιο τελικά κατασκευάστηκε με επιτυχία. Ως μια απόπειρα αρχικού ελέγχου της κατασκευής έχουμε τους χρόνους κατασκευής, τους χρόνους των σεταρισμάτων, τις φθορές των εργαλείων, τις συνολικές ισχείς των κατεργασιών και άλλα. Είναι προφανές ότι ο ποιοτικός έλεγχος του αντικειμένου μπορεί να επεκταθεί σε πολλά άλλα μεγέθη, εντούτοις δεν είναι η εξαγωγή αξιοπιστων αποτελεσμάτων σε μη συγκρίσιμες, ειδικά, κατεργασίες. Αν και το υλικό δεν ήταν το ίδιο με αυτό του πραγματικού τεμαχίου, επομένως δεν μπορούμε να κάνουμε σύγκριση για το αν συμφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος ως προς αυτή της πραγματικής κατεργασίας, μπορούμε ενδεικτικά να πούμε τα εξής:

- Οι χρόνοι των σεταρισματων ήταν περίπου 2 ώρες σύνολικά (τοποθέτηση των stock models στις μηχανές, επιλογή εργαλείων και σετάρισματα των συστημάτων κατεργασίας

- Οι χρόνοι εύρεσης των συνθηκών για κοπή του συγκεκριμένου υλικού ήταν πολύ μεγάλοι, περίπου μια μέρα. Αυτοί οι χρόνοι δεν υπάρχουν σε κατεργασίες με υλικά τα οποία είναι γνωστές οι συνθήκες κοπής τους.
- Οι χρόνοι κατεργασίας στον τόρνο ήταν 2 ώρες για το άνω τεμάχιο και 4 για το κάτω τεμάχιο, ενώ για την κατεργασία στην φρέζα ήταν 4 ώρες.
- Η φθορά των εργαλείων ήταν μηδενική
- Οι συνολικές καταναλώσεις των μηχανών ήταν γενικά μικρές αφού οι απαιτούμενες ισχείς των κατεργασιών ήταν πολύ μικρές. Σίγουρα είναι πολύ μικρότερες από την απαιτούμενη ισχύ του φούρνου για την περίπτωση της χύτευσης
- Η ποιότητα των πτερυγίων είναι ανώτερη σε σχέση με την αντίστοιχη του υπάρχοντος τεμαχίου
- Υπάρχει η δυνατότητα παραμετροποίησης όλων των συνθηκών, και γεωμετριών του προϊόντος παρέχοντας την δυνατότητα της ποικιλίας των παραγωμενων τεμαχίων

Πρέπει να αναφερθεί ότι ένας τρόπος αξιολόγησης της κατασκευής μας, ο οποίος παρέχει και αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι αυτός της επαλήθευσης της γεωμετρίας με scanner ακτινών Laser. Με αυτό τον έλεγχο μπορεί να διαπιστωθεί αν όντως οι γεωμετρίες των πτερυγίων πληρούν τα πρότυπα σχήματα αεροτομών. Με την προϋπόθεση ότι δεν χρειάζεται κάποιο εξειδικευμένο λογισμό, η σάρωση των σημείων των επιφανειών των πτερυγίων, καθώς και η χρήση των διαδικτυακού τόπου όπου χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της συνάρτησης του προφίλ της αεροτομής (www.zunzun.com), μπορεί να εξακριβωθεί η ορθότητα του όλου εγχειρήματος.

5.4 Σφάλματα κατά την διεξαγωγή

Καθόλη τη διάρκεια των κατεργασιών δόθηκε η ευκαιρία να επισημανθούν τα οποιαδήποτε σφάλματα σχεδιασμού και υλοποίησης του τεμαχίου. Τα λάθη αυτά περιορίζονται στην επιλογή συγκεκριμένων στρατηγικών κοπής, καθώς και σε λάθη εκτελεστικά λόγω έλλειψης εμπειρίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο κέντρο τόρνευσης, όσον αφορά την στρατηγική που ακολουθείται, ως καλύτερη λύση για την κοπή της εσωτερικής οπής προτείνεται η χρήση ενός επιπλέον εργαλείου, ενός τρυπανιού, το οποίο θα άνοιγε μια μεγάλη οπή και στην συνέχεια θα εμπλεκόταν στην κατεργασία το εργαλείο εσωτερικής κοπής, μειώνοντας τον χρόνο κατεργασίας κατά πολύ. Επιπλέον, έγινε εκτεταμμένη χρήση της γραμμικής κίνησης με G01, σε περιπτώσεις όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ταχεία κίνηση με G00, μειώνοντας περαιτέρω τον χρόνο κατεργασίας. Προφανώς, αυτό το σφάλμα υπόκειται στην έλλειψη εμπειρίας του γράφοντος, αφού υπήρχαν περιθώρια για την ασφάλεια των κινήσεων.

Έπίσης, ένα άλλο εργαλείο που θα μπορούσε να έχει εισαχθεί στον κώδικα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε εως ενός βαθμού, είναι ένας σχιστήρας. Το αρνητικό σε αυτή την περίπτωση, σε σχέση με την αντίστοιχη φάση που στην παρούσα χρησιμοποιείται πριόνι, είναι ότι χρειάζεται να υπάρχει κάποια ιδιοσυσκευή, ώστε να μην εκτιναχθεί το αντικείμενο, όταν αυτό αποκοπεί από το περισσεύον υλικό.

Κατά την αλλαγή των εργαλείων πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ενέργεια αυτή θα πραγματοποιηθεί αρκετά μακρυά από το τεμάχιο κατά τους αντίστοιχους άξονες.

Στο πρόγραμμα υπήρχε μια τιμή η οποία απομάκρυνε στο τέλος της χρήσης του ενός εργαλείου, όχι όμως τόσο ώστε να γίνεται με πλήρη ασφάλεια η αλλαγή. Στην περίπτωση μας, η αλλαγή έγινε και το εργαλείο απομακρύνθηκε χειροκίνητα σε ασφαλή θέση, συνεχίζοντας τις υπόλοιπες φάσεις. Το σφάλμα αυτό οφείλεται στην μη γνώση των μηκών του εργαλείων, καθώς σε ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι οι τιμές του προγράμματος θα ήταν ασφαλείς, όμως για το συγκεκριμένο μέγεθος οι τιμές αυτές ήταν επισφαλείς.

Επιπρόσθετα, λόγω του ότι δεν ήταν εξαρχής γνωστά τα εργαλεία και η στρατηγικές που ακολουθούνται, δεν εισηχθηκαν στο πρόγραμμα οι αντισταθμίσεις των άκρων των εργαλείων. Αυτό έχει επίπτωση στην παραγώμενη γεωμετρία αφού στα σημεία με καμπυλότητες θα υπάρχουν υποκοπές και υπερκοπές. Εντούτοις, αυτό είναι ένα πρόβλημα που αφορά την κατεργασία της τόρνευσης, αφού στην κατεργασία του φρεζαρίσματος είναι υπολογισμένες, στην όλη διαδικασία, οι ακτίνες των κοπτικών.

Τέλος, σε δυο φάσεις υπήρξε λάθος στην στρατηγική της κοπής. Συγκεκριμένα, το φινίρισμα σε δυο επιφάνειες καταστράφηκε, λόγω του ότι το κοπτικό μετά την κατεργασία δεν απομακρύνθηκε από το κομμάτι, και κινήθηκε ανάποδα στην επιφάνεια. Αυτό το γεγονός το δεν είναι ορατό στο υλικό που κατεργαστήκαμε, αλλά σε μέταλλο θα ήταν.

Ως γενική παρατήρηση στην τόρνευση, και γνωρίζοντας τον controller της μηχανής που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, ίσως ο χρήστης θα μπορούσε να εισάγει κύκλους τόρνευσης προς διευκόλυνσή του.

Στην κατεργασία του φρεζαρίσματος αυτό είναι αναγκαίο, ειδικά για την κατεργασία του άνω δακτυλίου. Αν και δεν πραγματοποιηθήκε αυτή η φάση λόγω αδυναμίας στήριξης, η δημιουργία των οπών συγκράτησης και συγκόλλησης στον κώδικα χρησιμοποιεί συγκεκριμένη εντολή για το τρύπημα σε κυκλικό μοτίβο (pattern).

Όσον αφορά την κατεργασία του κάτω δακτυλίου, δεν υπάρχουν σφάλματα υλοποιήσης. Παρόλα αυτά, ως αντιπαράθεση της στρατηγικής της κοπής που ομαδοποιεί τις φάσεις (ημι-αποπεράτωση ύστερα αποπεράτωση καθ’ύψος κάθε πτερυγίου), μπορεί να επιλεγεί η ολοκληρωμένη κατεργασία κάθε πτερυγίου (ημι-αποπεράτωση και αποπεράτωση καθ’ύψος κάθε πτερυγίου). Αυτό είναι μηχανικά πιο σωστό, για τις ταλαντώσεις κατά την κοπή, πρακτικά όμως το ίδιο, αφού το πάχος των στρωμάτων του υλικού που αφαιρείται είναι εως 0,5mm. Επιπροσθέτως, η αδυναμία αυτή μπορεί να εξαλειφθεί, εφόσον ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ρυθμίσει άλλα πάχη κοπής, προώσεις και στροφές για τις κατεργασίες αυτές.

Σε κάθε περίπτωση, τα σφάλματα αυτά ίσως είναι ένα υποσύνολο σφαλμάτων που μπορεί να αντιμετωπίσει ο μελλοντικός χρήστης. Ωστόσο, αυτό που μπορεί να απηχηθεί σε όλο τον κώδικα είναι η δυνατότητα ριζικής αλλαγής ενεργειών που ακολουθήθηκαν, προς διευκόλυνση του χρήστη ή από επιβολή άλλων δεδομένων αλλης κατεργασίας.

6

Επίλογος

6.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με την παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια στην αποτύπωση όσο το δυνατό περισσότερων παραμέτρων που ορίζουν μια σταθερή πτερύγωση ακτινικής στροβιλομηχανής. Γίνεται ανάπτυξη όλων των σκέψεων που έγιναν για τον ορισμό των κινήσεων του κοπτικού γύρω από μια αεροτομή που μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή. Με επιφύλαξη της γενικότητας, ο κάθε ενδιαφερόμενος, στην συνέχεια, μπορεί να αναπτύξει αντίστοιχες πρακτικές, με μεταβολή των φάσεων ή/και των εργαλείων ή/και των συνθηκών κοπών που θα επιλεχθούν, ώστε να κατασκευαστεί το τελικό προϊόν.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της εργασίας αναπτύσσοντας μια μεθοδολογία για την κατασκευή πτερυγώσεων ακτινικών στροβιλομηχανών παρακάμπτωντας τα συστήματα CAD και CAM, αποφεύχθηκε σε μεγάλο ποσοστό η οικονομική επιβάρυνση πριν το στάδιο της πραγματικής κατασκευής. Επιπλέον, καθίσταται δυνατή η εισαγωγή οποιασδήποτε μορφής προφίλ επιλέξει ο σχεδιαστής, όπως εξισώσεις οι οποίες δεν είναι τυποποιημένες, γεγονός το οποίο έγινε με την τυχαία επιλογή μιας αεροτομής.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην παραμετροποίηση του προϊόντος, ώστε να μπορεί να γίνει αλλαγή των τιμών των μεταβλητών, ήτοι μεγέθυνση του κυκλικού δακτυλίου, αλλαγή αριθμού των πτερυγίων, αλλαγή του ύψους του συνόλου των πτερυγίων, αλλαγή του τύπου των αεροτομών, αλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης, αλλαγή της φοράς των αεροτομών για διαφορετικές περιπτώσεις φυγόκεντρης ή κεντρομόλου ροής πτερυγώσεις και άλλα. Επίσης, με την παραμετροποίηση μεγεθών στα αρχεία παραγωγής G κώδικα κατέστη δυνατή η επιλογή των συνθηκών κατασκευής, η αλλαγή των στροφών, της πρόωσης και των βαθών κοπής και άλλα.

Οι δυνατότητες αυτές ωστόσο απαιτούν πολύ καλή γνώση των ενεργειών του φασεολογίου καθώς και από πλευράς της ροής των πληροφοριών από τον σχεδιαστή. Προβλήματα στην χρήση της ανωτέρω μεθοδολογίας μπορούν να εντοπιστούν κατά τις ακραίες περιπτώσεις, π.χ. πολύ μεγάλης διαμέτρου πτερύγωση με πολύ λίγα πτερύγια, όπως όταν πρόκειται για μεγάλους κυλίνδρους συστημάτων αεραγωγών, ή σχετικά μικρής διαμέτρου δακτύλιοι με πολλά πτερύγια, πχ σε συστήματα κλιματισμού. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο σχεδιαστής μπορεί να κλιθεί να προσθέσει μια ή περισσότερες φάσεις στο φασεολογίου κατά τις οποίες θα γίνονται οι πρόσθετες τροχιές για την απομάκρυνση όλου του υλικού μεταξύ των πτερυγώσεων, να μην γίνονται δηλαδή υποκοπές. Όσον αφορά τις φάσεις κατά την κατεργασία στο κέντρο τόρνευσης ο σχεδιαστής μπορεί να αλλάξει την σειρά ορισμένων κοπών, εφόσον επιλέξει εργαλεία τα οποία δεν είναι τα προβλεπόμενα βάσει της ανάπτυξης που έγινε ανωτέρω. Για παράδειγμα, στον κώδικα χρησιμοποιείται εργαλείο αποπεράτωσης το οποίο δεν μπορεί να πραγματοποιήσει κοπή πλάγιου μετώπου. Η αλλαγή του όμως σε εργαλείο αποπεράτωσης με την δυνατότητα κοπής πλάγιου μετώπου οδηγεί σε μείωση των άσκοπών κινήσεων του κοπτικού και άρα του κώδικα ώστε να γίνει εκμετάλλευση και αυτής της ιδιότητας.

Σε επίπεδο επεξεργασίας των σημείων των τροχιών σε ακραία περίπτωση μεγάλης γωνίας πρόσπτωσης χρειάζεται ο ορισμός των κινήσεων να ελεγχθεί για τυχόν υπερκοπές στις γειτονικές περιοχές ενός πτερυγίου, αυτό να βρίσκεται πάνω στον χώρο που ορίζει ο δακτύλιος βάσης κτλ. Επίσης, στην περίπτωση των δακτυλίων πρέπει να είναι γνώριμες οι σχέσεις αλληλεξάρτησης των διαφόρων διαστάσεων, ώστε να μην υπάρξει κάποια αθέμιτη κοπή, ή κάποια κοπή η οποία δεν προσδιορίζει το τελικό αντικείμενο.

Στο επίπεδο των κατεργασιών υπάρχει το πρόβλημα του περιορισμού και της σύνθετης γεωμετρίας της κοπής. Αυτό σημαίνει ότι σε πολύ στενούς χώρους ο σχεδιαστής θα αναγκαστεί να χρησιμοποιήσει λεπτά εργαλεία, για να επιτεύξει την κατασκευή μιας αεροτομής. Όμως η χρήση λεπτών εργαλείων αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης ταλαντώσεων. Η λύση σε αυτό είναι να ορισθούν νέες συνθήκες κατεργασίας (πρόωση, βάθη, στροφές) τα οποία ωστόσο θα αυξήσουν τον χρόνο κατασκευής. Τέλος, ένα άλλο πρόβλημα είναι ο περιορισμός του ύψους των πτερυγίων, καθώς τα λεπτά εργαλεία έχουν σχετικά περιορισμένο ύψος. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί η χρήση του κέντρου κατεργασιών μπορεί να αντικατασταθεί από μηχανή υδροκοπής.

Εφόσον οι συνθήκες της κοπής είναι γενικά ορθά ορισμένες, υπάρχει το πρόβλημα με την χρήση του υλικού. Όμοια, σε ακραία περίπτωση αρκετά λεπτών αεροτομών, το κοπτικό μπορεί να διαλύσει το εναπομείναν υλικό καταστρέφοντας το προφίλ των πτερυγίων, επειδή το υλικό μπορεί να μην αντέξει τις τάσεις που αναπτύσσονται στο σώμα του πτερυγίου. Σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιαστής θα κρίνει την χρήση άλλου υλικού, σε συνδυασμό βέβαια με τον έλεγχο του ως προς την αντοχή του στις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Τέλος ένα σχετικά μικρό πρόβλημα το οποίο μπορεί να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής κατά την παραγωγή του αντικειμένου είναι ο όγκος των πληροφοριών που πρόκειται να διαβάσει η εργαλειομηχανή. Σε περίπτωση μεγάλου τεμαχίου, με πολλές αεροτομές, μεγάλο αριθμό διαμέρισης για την περιγραφή του προφίλ της κάθε αεροτομής, μικρό βάθος κοπής σε μεγάλο ύψος πτερυγίων, τότε το αρχείο με τον G κώδικα μπορεί να γίνει αρκετά μεγαλύτερο των 10MB, το οποίο σημαίνει την τμηματική αποστολή των εντολών στην εργαλειομηχανή. Σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιαστής μπορεί να ορίσει κάποιο ‘Break’ στον κώδικα και να δημιουργήσει όσα

αρχεία σε μέγεθος ενδεικνυόμενο που μπορεί να δεχτεί η μηχανή, ή αν υπάρχει στις εγκαταστάσεις της μονάδας παραγωγής, να χρησιμοποιήσει DNC.

6.2 Έλεγχος προϊόντος

Μετά το πέρας οποιαδήποτε κατασκευής ο έλεγχος του τελικού προϊόντος είναι αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής. Ομοίως και στην περίπτωσή μας η τελική πτερύγωση πρέπει αφενός να εξεταστεί όσον αφορά την θερμομηχανική της αντοχή, καθώς και την ρεολογική της απόδοση.

Ο θερμομηχανικός έλεγχος της αντοχής μπορεί να γίνει είτε με προσομοίωση χρησιμοποιώντας υπολογιστικά πακέτα, για την απόδοση και την κόπωση της στροβιλομηχανής ως ένα υποσύνολο μιας μεγαλύτερης μηχανής (Solidworks, Ansys, κλπ.), καθώς και με μετροτεχικό εξοπλισμό για τον ποσοτικό έλεγχο των διαστάσεων και τον ποιοτικό των επιφανειών του προϊόντος. Τέτοιοι έλεγχοι ίσως περιλαμβάνουν τον καθορισμό των συντελεστών αντίστασης c_D και άνωσης c_L, ποσότητες θερμότητας που διαχέονται στις συγκολλήσεις, και μπορούν να αλλοιώσουν την μεταλλική δομή τους, άρα και την αντοχή τους, έλεγχοι πτερυγισμού ή ενδεχόμενης εμφάνισης ταλαντώσεων κατά την λειτουργία της μηχανής.

Όσον αφορά το κατασκευαστικό στοιχείο, χρειάζεται να γίνει έλεγχος κατά τις φάσεις των κατεργασιών που έχουν επιλεχθεί, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αυτοσυντηρούμενων ταλαντώσεων, υπερθέρμανσης των εργαλείων, αυξημένης φθοράς των και άλλα. Τυχόν προδιαγραφές κατασκευής θα πρέπει να ακολουθούνται, μέσα στις οποίες συγκαταλέγονται και οι κανόνες ασφαλείας για το τεχνικό προσωπικό. Επίσης ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην φάση της συγκόλλησης, ώστε το συγκόλλημα να έχει επιθυμητή κρυσταλλική μικροδομή. Αυτό γίνεται με την ακολούθηση των χρόνων απόψυξης που ορίζουν οι καμπύλες απόψυξης CTT για κάθε μέταλλο.

6.3 Εναλλακτικές ενέργειες και μελλοντικές επεκτάσεις

Το τεμάχιο το οποίο πραγματεύτηκε η συγκεκριμένη εργασία έχει απλή γεωμετρία, γεγονός που καθιστά την παραμετροποιήση του γενικά επαρκή στις περισσότερες των περιπτώσεων χωρίς αλλαγές στο φασεολόγιο. Αυτό που χρειάζεται σε κάθε περίπτωση είναι ο έλεγχος από πλευράς του σχεδιαστή. Με βάση το φασεολόγιο, μπορούν να κατασκευαστούν διαφόρων ειδών σταθερές πτερυγώσεις για μηχανές με ακτινική διάταξη. Τέτοιες μπορεί να είναι στροβιλοσυμπιεστές σε μεσαίες και μεγάλες ΜΕΚ, σε ατμοπαραγωγούς όπου και σε αυτούς υπάρχουν ακτινικές πτερυγώσεις, σε απλές κατασκευές διακίνσης αέρα και γενικά οποιαδήποτε κατασκευή στροβιλομηχανής που έχει σχέση με το δοθέν σχήμα και διάταξη.

Απλοποιώντας το φασεολόγιο, απορρίπτοντας την χρήση κάποιας ορισμένης γεωμετρίας αεροτομής, μπορούν να παραχθούν με κατάλληλες μετατροπές οποιοδήποτε τεμάχιο που να περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες κοπές, δημιουργώντας ορισμένη τυποποιημένη γεωμετρία στους τομείς του κυκλικού δακτυλίου, ή δίσκου (πχ φλάντζες με δεδομένες πατούρες σε κυκλική διάταξη γύρω από το κέντρο για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία), κάποιο αντικείμενο το οποίο να έχει τη μορφή μύλου με ένθετα για συγκράτηση αντικειμένων ή μεταφορά υλικών,

σε στηρίγματα εδράσεων σε μεταλλικές κατασκευές, σε επόμενης γενιάς τροχούς, σε ηχητικά συστήματα, σαν στεγανωτικό εξάρτημα, και άλλα.

Η παρούσα εργασία έχει αναπτυχθεί με γνώμονα την όσο το δυνατόν καλύτερη εποπτεία των μεταβλητών που υπεισέρχονται σε κάθε φάση της κατασκευής. Το γεγονός αυτό την καθιστά να μην είναι βελτιστοποιημένη όσον αφορά τον ενδιαφερόμενο που πρόκειται να χρησιμοποιήσει τα αντίστοιχα αρχεία για την κατασκευή μιας άλλης πτερύγωσης. Χρειάζεται πρωτίστως να γίνουν κατανοητές όλες οι ενέργειες που γίνονται στα αρχεία των excel και της matlab, ώστε να μπορέσουν να τροποποιηθούν επιτυχώς. Μια διαφορετική σκέψη στον όλο σχεδιασμό της ροής της ανωτέρω διπλωματικής θα ήταν η ενοποίηση των πληροφοριών που βρίσκονται στα αρχεία excel σε ένα καθολικό αρχείο της matlab. Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση θα ήταν απαραίτητη η διαμόρφωση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος, ώστε οι έλεγχοι των τροχιών και οι επισκοπήσεις των αεροτομών να ήταν φιλικότερες προς τον χρήστη (π.χ. με χρήση δεικτών και flag).

Όσον αφορά την μοντελοποίηση των κινήσεων του κοπτικού, αναφερόμενοι στην παραπάνω ανάπτυξη ενός ενιαίου κώδικα στην matlab, θα μπορούσε να αναπτυχθεί η θεωρία εξισώσεων κατά COONS, να γίνει δηλαδή μοντελοποίηση των περιοχών μεταξύ δυο διαδοχικών αεροτομών στο επίπεδο {ξ,η} και να βρίσκονται οι βέλτιστες διαδρομές του κοπτικού. Προφανώς, θα πρέπει να γίνει έλεγχος για το πόσο αυτή η περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί στη γενικότητά της. Η επιλογή αυτή, ωστόσο, απορρίφθηκε από την αρχή της συγκεκριμένης διπλωματικής για το λόγο του ότι αποφασίστηκε να εκπονηθεί μια εργασία που να αναφέρεται με όσο το δυνατό πιο απλό τρόπο στην κατασκευή οποιασδήποτε μορφής αεροτομών, και όχι να βασίζεται σε ένα πολύπλοκο κώδικα.

7

Πηγές

7.1 Άρθρα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

[REN11] Ren, F.J., Zhou, S.Q., Li, J., Wan, Z.Q., Zhao, Y., Liu, Y., Research and development of UG-based CAD/CAM system for turbine blade, Advanced Materials Research, vol. 201-203, 2011, pp. 215-29

[MAD96] Madhavulu, G., Anil Sundar, S.V.N., Ahmed, Basheer CAD/CAM solutions for efficient machining of turbo machinery components Sturz milling method, IECON Proceedongs, vol. 3, 1996, pp. 1490-1495

[XUH12] Xu, F., He, Y., He, W., Li, H., The research of CAD system in three-plate parallel indexing cam mechanism, Advanced Materials Research, vol. 418-420, 2012, pp. 1896-1899

[PEN11] Peng, M.W., Yang, S.T., Jiang, X.L., Virtual manufacturing research of steam turbine blade technology based on UG and VERICUT software, Advanced Materials Research, vol. 189-193, 2011, pp. 4286-4290

[DHA02] Dhailwal, S., Gupta, S.K., Huang, J., Kumar, M., A step towards automated design of multi-piece sacrificial molds, Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, vol. 3, 2002, pp. 337-347

[CHE94] C.L.P. Chen, S.R. LeClair, Integration of design and manufacturing: solving setup generation and feature sequencing using an unsupervised-learning approach, Computer-Aided Design, vol. 26, Issue 1, 1994, pp. 59–75

[LEE01] D.-H. Lee, D. Kiritsis, P. Xirouchakis, Branch and fathoming algorithms for operation sequencing in process planning, International

Journal of Production Research, vol. 39, Issue 8, 2001, pp. 1649–1669.
[VOR11] Voronov, S.A., Kiselev, I.A., Dynamics of flexible detail milling, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multy body Dynamics, vol. 225, Issue 4, 2011, pp. 299-309
[TAN12] Tang, H., Deng, Z., Wan, L., Liu, W., Wu, Q., Application of cam lift fitting method based on alternative-point interpolation in grinding process, Jixie Gongheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering, vol. 48, Issue 23 2012, pp. 191-198
[XUS13] Xu, L., Shi, N., Duan, J., Li, A., Process route optimization of complex housing type parts based on feature machining element, Zhongguo Jixie Gongheng/China Mechanical Engineering, vol. 24, Issue 2, 2013, pp. 202-208
[GUN13] Günay, M., Yücel, E., Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, vol. 46, Issue 2, 2013, pp. 913-919
[YAN13] Yang, Z., Liu, L., Wang, Z., Zhang, S., Simulation analysis of feed system control characteristics in high-speed computer numerical control lathe based on MATLAB, Applied Mechanics and Materials, vol. 278-280, 2013, pp. 1620-1625
[TOK95] Tokunaga, H., Tanaka, F., Kishinami, T.,Method of offset surface generation based on configuration space, Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, 1995, pp.2740-2745
[LIU11] Liu, W., Chen, P., Gao, X., Shan, C., Wan, M., Study on machining deformation errors in spiral finish milling of thin-walled blades, Advanced Materials Research, vol. 314-316, 2011, pp. 1773-1777

7.2 Βιβλιογραφία συγγραφής

[ΣημΜΤ] Σημειώσεις μαθήματος Μηχανουργικής Τεχνολογίας
[ΣημΕρ] Σημειώσεις Μαθήματος Εργαλειομηχανές Ι
[ΣημΒΡ07] Σημειώσεις Μαθήματος Βιομηχανικής Ρευστομηχανικής 2007.
[ΒCNC03] Γ.Χ.Βοσνιάκος Εργαλειομηχανές CNC και CAM, Αθήνα 2003
[ΜΑΤ05] Δ.Σ.Μαθιουλάκης, Ι.Σ.Αναγνωστόπουλος, Δ.Γ.Τουζόπουλος Σημειώσεις Βιομηχανικής Ρευστομηχανικής, Αθήνα, 2005
[ΠΚΡομπ] Ε.Παπαδόπουλος, Κ.Κυριακόπουλος Σημειώσεις Ρομποτικής
[ΜΙ91] Α.Γ.Μάμαλης Κατεργασίες των υλικών Ι, Αθήνα 1991
[ΜΙΙ91] Α.Γ.Μάμαλης Κατεργασίες των υλικών ΙΙ, Αθήνα 1991
[ΣΙ05] Μ.Μ.Σφαντζικόπουλου Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών Ι, Αθήνα 2005
[ΠΜΓ00] Κ.Δ.Παπαηλίου Κ.Μ.Μαθιουλάκης Κ.Χ.Γιαννάκογλου Εισαγωγή στις θερμικές στροβιλομηχανές, Αθήνα 2000
[ΡΜεκ01] Κ.Ρακόπουλος Αρχές εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Αθήνα 2001
[ΡΑερ01] Κ.Ρακόπουλος Αρχές βιομηχανικών αεριοστροβίλων, Αθήνα 2001
[ΓΑΛ4] Ε.Γ.Γαλάνης Εισαγωγή στην πραγματική ανάλυση, συναρτήσεις μιας μεταβλητής, Αθήνα, 4η εκδοση

[ΑΠ2004] Ι.Αντωνιάδης, Χ.Προβατίδης Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές, Αθήνα 2004
[ΕΓΤ08] Εγχειρίδιο κέντρου τόρνευσης μηχανής HASS, Oxnard CA, 2008
[ΕΓΚ08] Εγχειρίδιο κέντρου κατεργασιών μηχανής HASS, Oxnard CA, 2008

7.3 Διαδικτυακοί ιστότοποι

[wiki12-13] www.wikipedia.com, 2012-2013
[seco12] www.secotools.com, 2012
[cncbl12] http://cncsimulator.com/blog/, 2012-2013
[cnc12] www.cncsimulator.com, 2012
[yout12] www.youtube.com, 2012-2013
[Haas12] www.haascnc.com, 2012
[sci12] www.sciencedirect.com, 2012
[boo2012] www.books.google.gr, 2012
[vel12] http://velos0.ltt.mech.ntua.gr, 2012
[mat12] www.mathworks.com, 2012
[uiuc12] http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html, 2012
[vos12] http://users.ntua.gr/vosniak/, 2012
[cwntua12] http://courseware.mech.ntua.gr/, 2012
[en.wiki12] http://en.wikipedia.org/wiki, 2012
[dgsch12] http://digitalschool.minedu.gov.gr,2012
[zun13] www.zunzun.com, 2013