

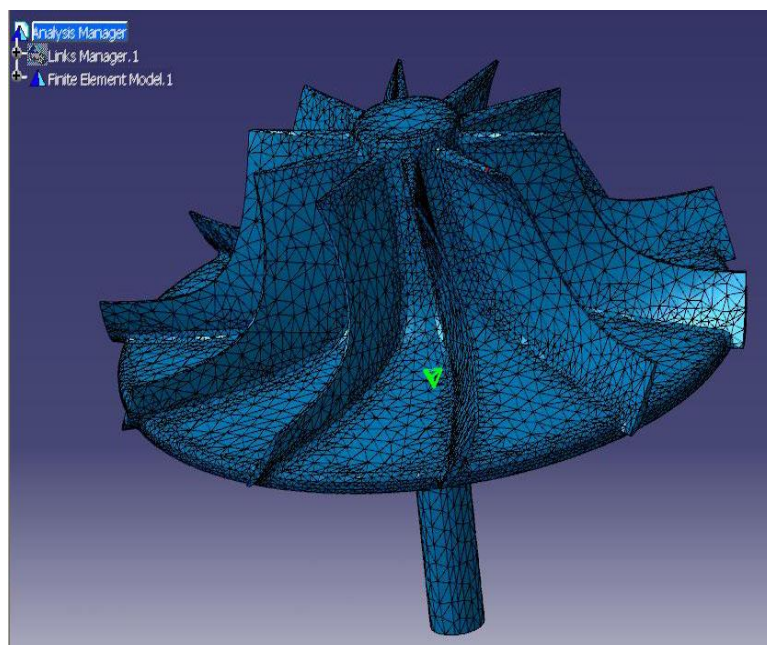


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Συμβολή στη σχεδίαση στροβίλων ακτινικής ροής



Υπό του

Σαμαρόπουλου Μιχαήλ

ΑΜ: 2001010030

Επιβλέπων: Ιωάννης Κ. Νικολός, Λέκτορας

Χανιά, 2008

Περιεχόμενα

Περίληψη

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1. «Οι Στρόβιλοι ακτινικής ροής»

1.1 Σύγκριση στροβίλων ακτινικής και αξονικής ροής

1.2 Βασικές πληροφορίες για την σχεδίαση ενός στροβίλου ακτινικής ροής

1.3 Περιορισμοί κατά τον σχεδιασμό του στροβίλου

1.4 Παράγοντες αστοχίας ενός στροβίλου

1.4.1 Χαμηλής συχνότητας καταπονήσεις (L.C.F.)

1.4.2 Ερπυσμός

1.4.3 Διάδοση ρωγμών

1.4.4 Υψηλής συχνότητας καταπονήσεις (H.C.F.)

1.4.5 Οριακή τάση παραμόρφωσης

1.4.6 Οξείδωση – Διάβρωση

1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση ενός στροβίλου

1.6 Υλικά Κατασκευής Στροβίλων

Κεφάλαιο 2. «Σχεδιασμός και ανάλυση της γεωμετρίας της πτερωτής»

2.1 Σχεδιασμός πτερωτής στροβίλου ακτινικής ροής

2.1.1 Παραμετρική σχεδίαση της γεωμετρίας με χρήση του shape design

2.1.2 Part design

2.2 Παράμετροι προς βελτιστοποίηση

2.3 Ανάλυση καταπονήσεων της πτερωτής

2.3.1 Δημιουργία Πλέγματος

2.3.1.1 Δομημένο & μη δομημένο Πλέγμα

2.3.1.2 Χαρακτηριστικά πλέγματος

2.3.2 Δεδομένα Ανάλυσης

2.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης καταπονήσεων

Κεφάλαιο 3. «Βελτιστοποίηση γεωμετρίας πτερωτής ακτινικής ροής»

3.1 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας της πλάτης πτερωτής ακτινικής ροής με την χρήση διαφορικού εξελικτικού αλγορίθμου

3.2 Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος

3.3 Το πρόγραμμα DEoptimizer

Κεφάλαιο 4. «Συμπεράσματα»

4.1 Συμπεράσματα

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Στρόβιλοι ακτινικής ροής

Σχήμα 1.2: Στρόβιλος ακτινικής ροής (περωτή και οδηγητικά πτερύγια)

Σχήμα 1.3: Ποσοστό χρήσης των υλικών στους στροβίλους τα τελευταία έτη.

Σχήμα 2.1: Η καμπύλη που προέκυψε από ένωση της κάθετης καμπύλης spline και την Bezier, καθώς και η επιφάνεια της πλήμνης, που σχηματίζεται από αυτή με περιστροφή.

Σχήμα 2.2: Επτά εσωτερικά σημεία ελέγχου που ορίζουν τη βοηθητική καμπύλη bezier για τον ορισμό των πτερυγίων.

Σχήμα 2.3: Πέντε σημεία καταναμεμένα με λόγο επί μήκους πάνω στη βοηθητική καμπύλη bezier, συν τα δύο σημεία στην επέκταση αυτής κατά τον άξονα X (ακτινική διεύθυνση).

Σχήμα 2.4: Μεταβολή του ύψους του πτερυγίου ως προς το ύψος της πλήμνης.

Σχήμα 2.5: Επτά αρχικά σημεία και τα επτά που προέκυψαν από την περιστροφή τους, τα οποία ορίζουν και την κλίση του πτερυγίου.

Σχήμα 2.6: Τα 7 σημεία που ορίζουν την κλίση του πτερυγίου και τα 14 σημεία (7 αριστερά – 7 δεξιά) που ορίζουν το πάχος του πτερυγίου.

Σχήμα 2.7: Καμπύλες splines με βάση τις οποίες θα δημιουργηθούν οι πλευρικές επιφάνειες των πτερυγίων.

Σχήμα 2.8: Επτά σημεία ελέγχου καθώς και η επιφάνεια του κελύφους που δημιουργείται.

Σχήμα 2.9: Η καμπύλη του κελύφους, τα πέντε σημεία πάνω σε αυτή και το επίπεδο plane.1

Σχήμα 2.10: Το τόξο επέκτασης της καμπύλης bezier.

Σχήμα 2.11: Το βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα και η επιφάνεια εκ περιστροφής που δημιουργήθηκε από αυτό. Η τελευταία χρησιμοποιείται για την κατάλληλη κοπή των επιφανειών που ορίζουν το πτερύγιο στη μέγιστη ακτίνα της περωτής.

Σχήμα 2.12: Οι τέσσερις καμπύλες splines, με βάση τις οποίες θα δημιουργηθούν οι πλευρικές επιφάνειες των πτερυγίων.

Σχήμα 2.13: Οι δύο πλευρικές επιφάνειες του πτερυγίου. Οι μαύρες γραμμές οπτικοποιούν το «coupling» των αντίστοιχων σημείων.

Σχήμα 2.14: Οι πλευρικές επιφάνειες μετά το κόψιμο με τη βοηθητική επιφάνεια.

Σχήμα 2.15: Το «tritanget fillet» στην έξοδο του πτερυγίου καθώς οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για να κλείσουν τα κενά ανάμεσα στις δύο πλευρές του πτερυγίου.

Σχήμα 2.16: Pattern του πτερυγίου κάθε 36 μοίρες.

Σχήμα 2.17: Trim της επιφάνειας της πλήμνης με τα πτερύγια.

Σχήμα 2.18: Τα πέντε σημεία ελέγχου καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη Bezier, που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της πλάτης της πτερωτής.

Σχήμα 2.19: Η επιφάνεια της πλάτης της πτερωτής μαζί με τον άξονα.

Σχήμα 2.20: Η πτερωτή χωρίς τα «fillets».

Σχήμα 2.21: Στην άνω εικόνα φαίνονται τα δύο μικρά «fillets» στην βάση του πτερυγίου, ενώ στην κάτω φαίνεται το «fillet» σε ολόκληρη την επιφάνεια της πλήμνης.

Σχήμα 2.22: Η πτερωτή μετά την εφαρμογή των «fillets».

Σχήμα 2.23: Η μέση επιφάνεια του πτερυγίου με κίτρινο χρώμα.

Σχήμα 2.24: Η καμπύλη που προέκυψε με τομή της μέσης επιφάνειας του πτερυγίου και της επιφάνειας της πλήμνης.

Σχήμα 2.25: Οι δύο επιφάνειες με τις οποίες έγινε η διαχώριση της μία φέτας της πτερωτής.

Σχήμα 2.26: Το τελικό τμήμα της πτερωτής, στο οποίο θα γίνει ανάλυση των καταπονήσεων.

Σχήμα 2.27: Μεταβολές στις παραμέτρους που ορίζουν το μήκος και την εξωτερική ακτίνα της πτερωτής έχουν ως αποτέλεσμα τη συνολική μεταβολή της γεωμετρίας, χωρίς να απαιτείται τροποποίηση των υπολοίπων παραμέτρων.

Σχήμα 2.28: Μεταβολή στην εξωτερική ακτίνα της πλάτης της πτερωτής.

Σχήμα 2.29: Μη δομημένο πλέγμα με μεταβολές στην πυκνότητα.

Σχήμα 2.30: Κατασκευή πλέγματος σε ολόκληρη την πτερωτή.

Σχήμα 2.31: Αποτελέσματα ανάλυσης καταπονήσεων βασικής σχεδίασης πριν τη βελτιστοποίηση.

Σχήμα 3.1: Όρια παραμέτρων προς βελτιστοποίηση

Σχήμα 3.2: Τελικά αποτελέσματα παραμέτρων βελτιστοποίησης

Σχήμα 3.3: Διάγραμμα σύγκλισης ΔΕ αλγορίθμου με το λογισμικό DEoptimizer.

Σχήμα 3.4: Διαδικασία λειτουργίας Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου

Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής του Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου.

Σχήμα 3.6: Βασική φόρμα του προγράμματος DEoptimizer και βήματα.

Σχήμα 3.7: Φόρμα επιλογής ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης.

Σχήμα 3.8: Εμφάνιση των ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης στη βασική φόρμα.

Σχήμα 3.9: Φόρμα εισαγωγής ορίων ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης.

Σχήμα 3.10: Εμφάνιση ορίων των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης στη βασική φόρμα.

Σχήμα 3.11: Παράθυρο διαλόγου προσδιορισμού αρχείου της ανάλυσης.

Σχήμα 3.12: Φόρμα επιλογής παραμέτρου ανάλυσης.

Σχήμα 3.13: Φόρμα εισαγωγής μαθηματικών συμβόλων και αριθμών.

Σχήμα 3.14: Φόρμα επιλογής παραμέτρου σχεδίασης.

Σχήμα 3.15: Εμφάνιση της αντικειμενικής συνάρτησης στη βασική φόρμα.

Σχήμα 3.16: Προσδιορισμός των ρυθμιστικών παραμέτρων του ΔΕ αλγορίθμου.

Σχήμα 3.17: Επιλογή για δυναμική ανανέωση της γεωμετρίας.

Σχήμα 3.18: Φόρμα προόδου του αλγορίθμου.

Σχήμα 3.19: Βελτιστοποίηση σχεδίασης στο CATIA με χρήση του ενσωματωμένου λογισμικού DEoptimizer

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Λέκτορα Ιωάννη Κ. Νικολό για την καθοδήγηση, την βοήθειά του καθώς και τη στήριξη που μου παρείχε και τον χρόνο που μου αφιέρωσε. Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές μου, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, που με τίμησαν με το να συμμετέχουν στην εξέταση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερα πολύτιμη ήταν και η συμβολή του συναδέλφου Ιωάννη Βαλάκου, που με βοήθησε με την εμπειρία του στο CATIA, σε πολλές δυσκολίες που συνάντησα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Του οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια του και τη συμπαράσταση.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αρχικά αναλύεται η κατασκευή ενός πλήρως παραμετρικού τρισδιάστατου μοντέλου της περωτής ενός μικρού στροβίλου ακτινικής ροής σε περιβάλλον CATIA V5. Στην συνέχεια γίνεται υπολογισμός και ανάλυση των καταπονήσεων της περωτής σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, λόγω της περιστροφής της. Τέλος γίνεται βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της πλάτης (back-face) της περωτής του στροβίλου, με την χρήση ενός διαφορικού εξελικτικού αλγόριθμου, με σκοπό την μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων και την αύξηση της αντοχής της.

Εισαγωγή

Στρόβιλοι ακτινικής ροής χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως είναι μικρές γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος, στροβιλοϕεραλειτουργίες μηχανών εσωτερικής καύσεως, καθώς και εφεδρικές μονάδες παραγωγής ισχύος για αεροσκάφη [1].

Ο στόχος κατά την δημιουργία μία στροβιλομηχανής είναι να έχει υψηλή απόδοση και να είναι αξιόπιστη. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες υπολογιστικής μηχανικής, που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να υπολογίσουν με ακρίβεια τα πεδία ροής εντός του στροβίλου, καθώς και τις μηχανικές καταπονήσεις, ειδικά της πτερωτής του στροβίλου. Οι μεθοδολογίες όμως αυτές δεν παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού της βέλτιστης σχεδίασης, παρά μόνο εάν συνδυαστούν κατάλληλα με μεθόδους βελτιστοποίησης [2]. Η κλασική τεχνική σχεδίασης βασίζεται στην προηγούμενη εμπειρία του σχεδιαστή (ή γενικότερα της εταιρίας) για τη δημιουργία ενός αρχικού μοντέλου στροβιλομηχανής, το οποίο στη συνέχεια βελτιώνεται με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος, μέχρι να προκύψει κάποιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα, το οποίο κάτω από την πίεση του χρόνου δεν είναι πάντα το βέλτιστο [3].

Η απόδοση ενός στροβίλου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την γεωμετρία του. Κακή γεωμετρία ενός στροβίλου οδηγεί σε περισσότερες καταπονήσεις, οι οποίες, για να αντιμετωπισθούν, μειώνεται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, μειώνεται ο αριθμός των πτερυγίων και αυξάνεται το πάχος των πτερυγίων, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αδράνειας της πτερωτής. Το τελευταίο έχει το αρνητικό αποτέλεσμα της μείωσης της ταχύτητας της απόκρισης του στροβίλου σε μεταβολές του φορτίου. Όλοι οι παραπάνω συμβιβασμοί οδηγούν στην μείωση της απόδοσης του στροβίλου.

Ο ανταγωνισμός στην αγορά σε συνδυασμό με την ανάγκη για μέγιστη απόδοση οδήγησε στην εισαγωγή μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού κατά τη φάση σχεδίασης των στροβιλομηχανών, που επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των στροβιλομηχανών σε μικρότερο χρόνο από τις παραδοσιακές μεθόδους, με καλύτερο τελικό αποτέλεσμα και με μικρότερο συνολικό κόστος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση της κλασικής μεθόδου της δοκιμής και σφάλματος, που χρησιμοποιούταν στο παρελθόν, από αλγορίθμους που υπολογίζουν την βέλτιστη γεωμετρία με βάση τα κριτήρια και τους περιορισμούς που θέτουν οι σχεδιαστές.

Τα προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού συνήθως συνδέονται με δεκάδες περιορισμούς και μεταβλητές σχεδίασης, που προσδίδουν δυσκολία στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Μία οικογένεια μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βέλτιστου σχεδιασμού γεωμετρίας είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Πρόκειται για μια οικογένεια μεθόδων στοχαστικής βελτιστοποίησης, με μεγάλη ευρωστία, ικανότητα αντιμετώπισης διαφορετικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και ευκολία προσαρμογής στο υπό εξέταση πρόβλημα. Έχουν όμως το μειονέκτημα ότι μπορεί να χρειασθούν χιλιάδες επαναλήψεις για την εύρεση της βέλτιστης (ή υποβέλτιστης) λύσης. Ο συνδυασμός των εξελικτικών αλγορίθμων με μεθόδους υπολογιστικής μηχανικής απαιτεί την πολλαπλή κλήση των δευτέρων για την αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης, κάτι που αυξάνει ιδιαίτερα το συνολικό υπολογιστικό κόστος [4].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένας Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση της πλάτης της πτερωτής στροβίλου ακτινικής ροής, με σκοπό τη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Αρχικά δίδονται μερικά στοιχεία σχετικά με την κατασκευή και τη λειτουργία των στροβίλων ακτινικής ροής. Στη συνέχεια περιγράφεται η παραμετρική γεωμετρική μοντελοποίηση της πτερωτής, με χρήση του λογισμικού CATIA. Η διαδικασία της μοντελοποίησης περιγράφεται αναλυτικά, διότι η ευρωστία της μοντελοποίησης είναι ουσιαστική προϋπόθεση για την επιτυχή υλοποίηση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης του πεδίου των τάσεων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος αναλύεται η μεθοδολογία της βελτιστοποίησης, με τη χρήση Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου. Η εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1

Οι Στρόβιλοι ακτινικής ροής

1.1 Σύγκριση στροβίλων ακτινικής και αξονικής ροής

Οι λόγοι για την επιλογή ενός ακτινικού στροβίλου αντί ενός αξονικού είναι διάφοροι. Ορισμένοι από αυτούς μπορεί να είναι συγκεκριμένες απαιτήσεις κατά την εγκατάσταση ή το γεγονός ότι ένας στρόβιλος ακτινικής ροής μπορεί να κατασκευαστεί ως ένα τμήμα, σε αντίθεση με έναν αξονικής ροής, που συνήθως απαιτεί ξεχωριστά πτερύγια. Οι τομείς στους οποίους κυρίως προτιμώνται ακτινικής ροής στρόβιλοι είναι εκεί που το χαμηλό κόστος κατασκευής ενός μικρού μονοβάθμιου στροβίλου είναι μείζονος σημασίας. Γενικότερα το κόστος παραγωγής ενός ακτινικού στροβίλου είναι μικρότερο από αυτό ενός αξονικού, για συγκεκριμένες τιμές απόδοσης που θέλουμε να επιτύχουμε. Επίσης, οι στρόβιλοι ακτινικής ροής έχουν πιο συμπαγείς διαστάσεις και μπορούν να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες ισχύος, σε σχέση με έναν αντίστοιχου μεγέθους στρόβιλο αξονικής ροής [5].

Ένα άλλο πλεονέκτημα των στροβίλων ακτινικής ροής είναι η δυνατότητα που έχουν να λειτουργούν με αντίθετη φορά αρκεί να περιστραφούν κατάλληλα τα οδηγητικά πτερύγια. Η απόδοσή τους, όταν λειτουργούν με αντίθετη φορά, είναι μειωμένη αλλά υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη [5].

Οι ακτινικής ροής στρόβιλοι έχουν το μειονέκτημα ότι η πτώση της ενθαλπίας που προκαλούν είναι μικρότερη από αυτή που προκαλεί ένας αντιστοίχου μεγέθους αξονικός στρόβιλος. Επίσης οι ακτινικής ροής στρόβιλοι έχουν μεγαλύτερη αδράνεια περιστροφής από ένα αντίστοιχο στρόβιλο αξονικής ροής. Αυτό είναι αποτέλεσμα των μεγάλων σε διάμετρο πτερυγίων και της μεγάλης διαμέτρου της πλήμνης [5].



Σχήμα 1.1: Στρόβιλοι αξονικής ροής [6].



Σχήμα 1.2: Στρόβιλος ακτινικής ροής (πτερωτή και οδηγητικά πτερύγια) [6].

1.2 Βασικές πληροφορίες για την σχεδίαση ενός στροβίλου ακτινικής ροής

Ο αρχικός σχεδιασμός ενός στροβίλου ακτινικής ροής φαίνεται απλός αλλά η περίπλοκη ροή μεταξύ των πτερυγίων της πτερωτής τον κάνει ιδιαίτερα περίπλοκο. Τα βασικά χαρακτηριστικά του στηρίζονται σε προηγούμενη εμπειρία σχεδιασμού στροβίλων, με βάση τους στόχους που θέτει ο σχεδιαστής, όπως είναι οι ονομαστικές στροφές λειτουργίας, η ονομαστική ισχύς, ο βαθμός απόδοσης και η αντοχή του στροβίλου.

Η πτερωτή του στροβίλου είναι το πιο κρίσιμο τμήμα του, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων και της υψηλής ταχύτητας περιστροφής της, που προκαλεί ισχυρή καταπόνηση του υλικού κατασκευής της. Αρχικά επιλέγονται οι βασικές της διαστάσεις, όπως οι διάμετροι εισόδου και εξόδου και το ύψος των πτερυγίων σε κάθε διάμετρο. Στην συνέχεια, επιλέγονται χαρακτηριστικά όπως ο αριθμός, το πάχος αλλά και η κλίση των πτερυγίων, τα οποία επηρεάζουν την γωνία εισόδου και εξόδου του ρευστού στον στρόβιλο (σε συνδυασμό με την ταχύτητα περιστροφής). Επίσης πρέπει να επιλεγθούν κατάλληλα προφίλ για την πλήμνη και το κέλυφος του στροβίλου στο μεσημβρινό επίπεδο, τα οποία επίσης επηρεάζουν την ροή του ρευστού μέσα από την πτερωτή, ενώ παράλληλα πρέπει να επιλεγεί ο τρόπος μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων από την είσοδο στην έξοδο του στροβίλου.

Η σχεδίαση της μορφής των πτερυγίων του στροβίλου χωρίζεται σε δύο περιοχές για κατασκευαστικούς λόγους, στο τμήμα της πλήμνης και στο τμήμα του κελύφους. Η γεωμετρία των πτερυγίων προκύπτει με κατάλληλη παρεμβολή μεταξύ των δύο τμημάτων [7].

1.3 Περιορισμοί κατά τον σχεδιασμό του στροβίλου

Η κύρια δυσκολία κατά τον σχεδιασμό της γεωμετρίας ενός στροβίλου είναι ο συμβιβασμός που πρέπει να γίνει ανάμεσα στους αεροδυναμικούς και στους κατασκευαστικούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, κατά την κατασκευή ενός στροβίλου με χύτευση πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο πάχος πτερυγίου, ανάλογα πάντα με το υλικό που χρησιμοποιείται. Στις περισσότερες περιπτώσεις το κόστος κατασκευής αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό περιοριστικό παράγοντα [1].

Επίσης ο αριθμός των πτερυγίων αποτελεί έναν άλλο περιορισμό. Μικρός αριθμός πτερυγίων οδηγεί σε μείωση των καταπονήσεων αλλά και κακή ψύξη του στροβίλου. Η μείωση των πτερυγίων έχει το πλεονέκτημα της μικρότερης επιφάνειας πτερυγίων με την οποία παράγει τριβή το ρευστό, αλλά υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα αποκόλλησης της ροής του ρευστού οπότε αυξάνονται οι αντίστοιχες απώλειες ολικής πίεσης [1]. Σε κάθε στρόβιλο ακτινικής ροής υπάρχει ένας διαφορετικός βέλτιστος αριθμός πτερυγίων, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται ανάμεσα σε δέκα και είκοσι πτερύγια [1].

Το ύψος των πτερυγίων στην είσοδο του ρευστού είναι ένας άλλος περιορισμός, που επηρεάζει τις καταπονήσεις του πτερυγίου και της πλήμνης του στροβίλου. Μικρό ύψος του πτερυγίου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των φυγοκεντρικών δυνάμεων λόγω της μείωσης του βάρους του πτερυγίου, αλλά ταυτόχρονα μπορεί να μειώσει την απόδοση του στροβίλου όταν έχουμε μία συγκεκριμένη γωνία εισόδου του ρευστού στην είσοδο [1].

Το σχήμα της πλήμνης του στροβίλου επηρεάζει τόσο τη ροή του ρευστού όσο και τις καταπονήσεις του στροβίλου. Η μικρή διάμετρος της πλήμνης μειώνει τις καταπονήσεις, που προκαλούνται από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις, και μπορεί κατά κάποιο τρόπο να αντισταθμίσει το απαιτούμενο ύψος του πτερυγίου στην είσοδο. Μελέτες όμως έχουν δείξει πως μικρή διάμετρος της πλήμνης μπορεί να δημιουργήσει αποκολλήσεις στην ροή του ρευστού [1].

1.4 Παράγοντες αστοχίας ενός στροβίλου

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται οι παράγοντες αστοχίας που χρήζουν προσοχής κατά τον αρχικό σχεδιασμό κάθε συσκευής, η οποία δέχεται φορτία πιο περίπλοκα από μία απλή τάση. Τα περύγια της πτερωτής του στροβίλου είναι το τμήμα εκείνο που δέχεται την μεγαλύτερη καταπόνηση, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων και της υψηλής ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε τους παράγοντες στους οποίους οφείλεται η καταπόνηση τους.

1.4.1 Χαμηλής συχνότητας καταπονήσεις (L.C.F.)

Χαμηλή συχνότητα καταπόνησης είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για μεγάλες διακυμάνσεις στην καταπόνηση σε αραιά χρονικά διαστήματα. Κάθε φορά που ένας στρόβιλος ξεκινά να περιστρέφεται, οι τιμές των φορτίων εξαιτίας της περιστροφής μεταβάλλονται από μηδενικές σε μέγιστες. Όσο μεγαλύτερη η αδράνεια του στροβίλου τόσο μεγαλύτερα είναι και τα φορτία που δέχεται. Συνήθως υπάρχει μία πλαστική μεταμόρφωση στην πλήμνη γύρω από τις βάσεις των πτερυγίων κατά την εκκίνηση της περιστροφής και μία ελαστική παραμόρφωση όταν ο στρόβιλος σταματά να λειτουργεί [5]. Μετά από διαδοχικές εκκινήσεις και σταματήματα της λειτουργίας του στροβίλου, ο στρόβιλος αποκτά ιστορικό κύκλων καταπόνησης. Στην περίπτωση που μία περιοδική καταπόνηση είναι αρκετά έντονη, ώστε να έχουμε εμφάνιση ρωγμών σε λιγότερο από 10.000 κύκλους καταπόνησης τότε έχουμε καταπόνηση χαμηλής συχνότητας [8].

Μία επίσης πολύ σημαντική χαμηλής συχνότητας καταπόνηση είναι αυτή της θερμικής καταπόνησης. Υλικά που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες έχουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα και υψηλότερη θερμική διαστολή από μέταλλα που χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες κάτω των 500° C. Μεγάλες διακυμάνσεις στην θερμική καταπόνηση συμβαίνουν κυρίως κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό της λειτουργίας του στροβίλου και αν δεν έχει γίνει σωστή μελέτη κατά τον σχεδιασμό μπορεί να οδηγήσουν στην δημιουργία ρωγμών [5].

1.4.2 Ερπυσμός

Ο ερπυσμός είναι ένα φαινόμενο που περιγράφει την πρόσθετη παραμόρφωση του υλικού, που προκύπτει υπό την πολύωρη λειτουργία του στροβίλου σε υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία κατά την οποία η συνεχόμενη παραμόρφωση είναι σημαντική μπορεί να είναι πολύ πιο χαμηλή από το όριο της ελαστικής παραμόρφωσης. Για παράδειγμα η αντοχή ενός μετάλλου σε θερμοκρασία δωματίου μειώνεται πάρα πολύ σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Συνήθως οι μηχανές μεγάλων βιομηχανιών σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχουν ως και 100.000 ώρες λειτουργίας υπό υψηλές θερμοκρασίες [5].

1.4.3 Διάδοση ρωγμών

Όταν στο υλικό εφαρμόζεται μία δυναμική φόρτιση οι διαταραχές στην κρυσταλλική δομή μετακινούνται ώστε να προστεθούν η μία στην άλλη, δημιουργώντας μία ρωγμή. Σε κάθε αλλαγή της φοράς της φόρτισης αυτή η ρωγμή μεγαλώνει κατά ένα βαθμό, ώσπου να φτάσει σε ένα κρίσιμο μέγεθος, οπότε και ο στροβίλος θα σπάσει [9]. Σε αντίθεση με τον ερπυσμό, η διάδοση των ρωγμών απαιτεί περιοδική καταπόνηση.

Μία ανάλυση των ρωγμών δεν μπορεί να προσδιορίσει το όριο αντοχής σε κόπωση, δίνει ένα κατώτατο όριο αντοχής και επιπλέον παρέχει το μέγεθος της κρίσιμης ρωγμής και της ρωγμής η οποία δεν διαδίδεται. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για τον ποιοτικό έλεγχο, έτσι ώστε οι αποδεκτές ατέλειες να είναι μικρότερες από το μέγεθος των ρωγμών που δεν διαδίδονται και από την άλλη μεριά το μέγεθος της κρίσιμης ρωγμής μας βοηθά στην διάγνωση επιφανειών στις οποίες θα υπάρξει θραύση [9].

1.4.4 Υψηλής συχνότητας καταπονήσεις (H.C.F.)

Η υψηλής συχνότητας καταπόνηση είναι ένας από τους κύριους λόγους αστοχίας των πτερυγίων ενός στροβίλου και προστίθεται σε αυτή της χαμηλής συχνότητας. Δονήσεις στα πτερύγια ενός στροβίλου αποτελούν καταπόνηση υψηλής συχνότητας. Η πίεση που αναπτύσσεται στα πτερύγια σύγχρονων στροβίλων είναι αυξημένη και οι αποστάσεις μεταξύ των πτερυγίων μικρότερες, οπότε αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερα προβλήματα [9]. Η συχνότητα της δόνησης των πτερυγίων εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα τους αλλά και από τους τύπους της δόνησης. Η

συχνότητα των δονήσεων μπορεί να είναι ακόμα και τις τάξης των 10.000Hz και να οδηγήσει στην εμφάνιση ρωγμών [5].

1.4.5 Οριακή τάση παραμόρφωσης

Η ελάχιστη διατομή ενός στροβίλου καθορίζεται από την οριακή τάση παραμόρφωσης, η οποία εμφανίζεται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων πάνω στο πτερύγιο και την πλήμνη. Οι οριακές στροφές λειτουργίας κατά τον σχεδιασμό, στις οποίες εμφανίζεται η οριακή τάση, είναι συνήθως 20% ή 25% μεγαλύτερες από τις ονομαστικές στροφές λειτουργίας του στροβίλου [5].

1.4.6 Οξείδωση – Διάβρωση

Οι σύγχρονοι στρόβιλοι, που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι επικαλυμμένοι ώστε να προστατεύονται από την οξείδωση και την διάβρωση. Η ομαλότητα στη σύνδεση ανάμεσα στο πτερύγιο και την βάση του είναι πολύ κρίσιμη, διότι στη συγκεκριμένη περιοχή δημιουργούνται αεροδυναμικές απώλειες. Σε περίπτωση που δημιουργηθεί κάποια ανωμαλία στη ροή σε αυτή την περιοχή τότε η προστατευτική επικάλυψη μπορεί να αφαιρεθεί και τότε ο στρόβιλος εκτίθεται σε διάβρωση [5].

1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση ενός στροβίλου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση συνοψίζονται στη συνέχεια.

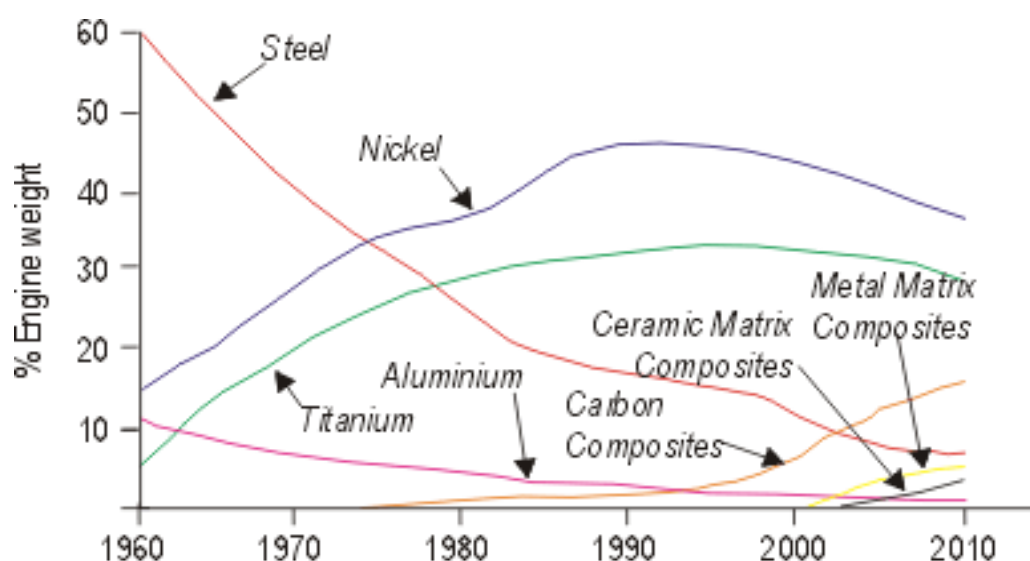
Κύριος παράγοντας είναι η ποιότητα των επιφανειών ενός στροβίλου. Επιφάνειες χωρίς επιφανειακές ρωγμές και σημάδια επιμηκύνουν την ζωή ενός στροβίλου. Επίσης οι ρωγμές δημιουργούνται και διαδίδονται στα πιο αδύναμα σημεία ενός στοιχείου. Αυτό γενικότερα σημαίνει πως μεγάλα στοιχεία έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να εμπεριέχουν αδύναμα σημεία άρα και περισσότερες πιθανότητες να έχουν μικρότερη αντοχή. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή είναι η θερμοκρασία. Η σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία και την αντοχή είναι πολύπλοκη, αφού η αντοχή σε κόπωση υπάρχει περίπτωση να αυξάνεται όσο αυξάνεται και η θερμοκρασία ως ένα λογικό όριο. Τέλος η αντοχή επηρεάζεται από την επιλογή των υλικών. Υλικά με υψηλή σκληρότητα ή υψηλή αντοχή σε φορτία δεν διαθέτουν πάντα υψηλότερη αντοχή σε

κόπωση. Μεγάλη σκληρότητα σε πολλά μέταλλα σημαίνει μειωμένη ελαστικότητα, κάτι που κάνει το στοιχείο του στροβίλου να έχει μειωμένη αντοχή σε κόπωση [8].

1.6 Υλικά Κατασκευής Στροβίλων

Ένας άλλος τομέας εκτεταμένης έρευνας τα τελευταία έτη, είναι αυτός των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των στροβίλων. Η επιλογή υλικών τα οποία πρέπει να ικανοποιούν ταυτόχρονα πολλούς περιορισμούς και να αντέχουν σε διάβρωση, οξείδωση, υψηλές τάσεις και απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας δεν είναι εύκολη υπόθεση. Ένας άλλος λόγος, για τον οποίο δοκιμάζονται συνεχώς καινούργια υλικά, είναι η ελαχιστοποίηση της αδράνειας κάτι απαραίτητο για γρήγορες αντιδράσεις και επιταχύνσεις των στροβίλων.

Νέα κράματα μετάλλων με αυξημένη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες μελετούνται συνεχώς καθώς και υλικών με κεραμική βάση. Η χρήση των κεραμικών υλικών, τα οποία έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό κόστος, μελετάται όλο και περισσότερο. Σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες, έχουν δημιουργηθεί κεραμικά υλικά που μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες ως και 1.370°C σε εφαρμογές στροβίλων για κινητήρες αυτοκινήτων [1]. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των κεραμικών υλικών είναι πως δεν παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση, οπότε καταστρέφονται ξαφνικά χωρίς μόνιμη παραμόρφωση πριν την θραύση [8]. Αυτό τα κάνει ιδιαίτερα ευπαθή σε κρουστικά φορτία.



Σχήμα 1.3: Ποσοστό χρήσης των υλικών στους στροβίλους τα τελευταία έτη [10].

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός και ανάλυση της γεωμετρίας της πτερωτής

2.1 Σχεδιασμός πτερωτής στροβίλου ακτινικής ροής

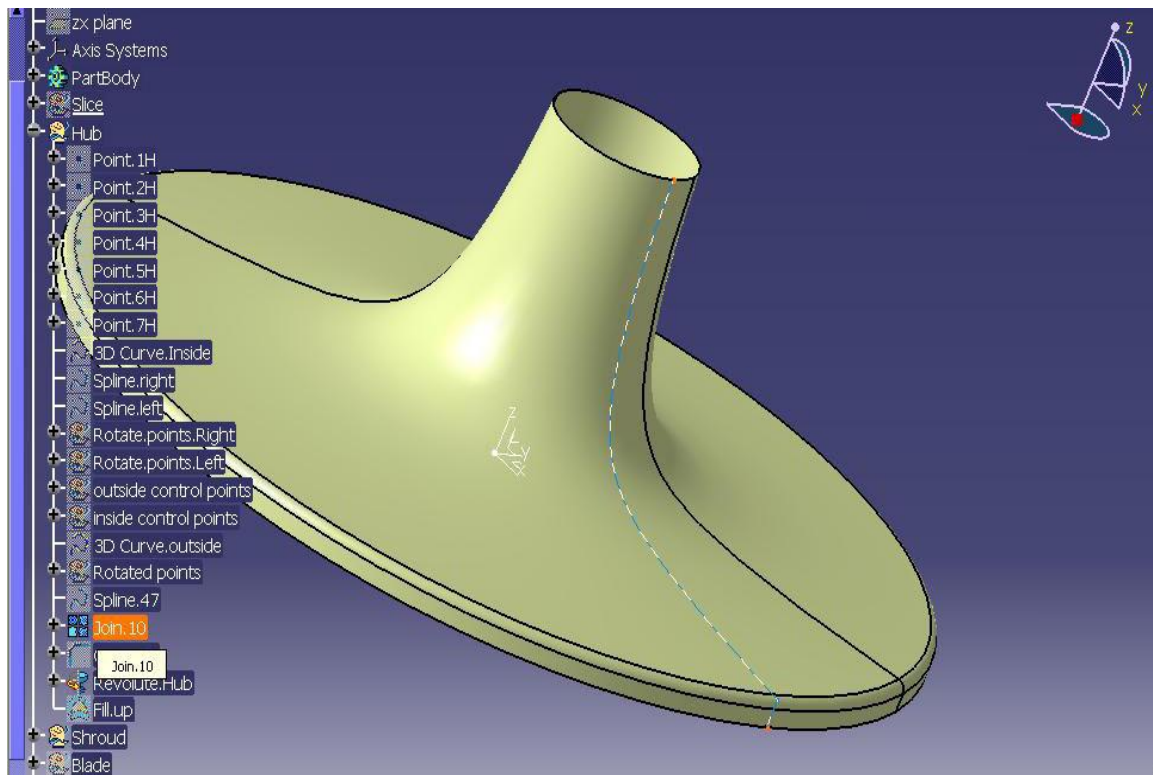
2.1.1 Παραμετρική σχεδίαση της γεωμετρίας με χρήση του *shape design*

Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης της πτερωτής του στροβίλου στο Generative shape design workbench του λογισμικού CAD CATIA. Η παραμετροποίηση της γεωμετρίας είναι πολύ κρίσιμη για την μετέπειτα βελτιστοποίηση της και πρέπει το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να μπορεί να πάρει πολλά διαφορετικά σχήματα με μερικές αλλαγές στις παραμέτρους και χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα συμβατότητας κατά την αυτοματοποιημένη μεταβολή των μεταβλητών σχεδίασης.

Αρχικά μοντελοποιήθηκαν η πλήμνη και το κέλυφος του στροβίλου, ενώ στη συνέχεια προέκυψαν τα περύγια με βάση τα στοιχεία αυτών. Για την κατασκευή της επιφάνειας της πλήμνης δημιουργήθηκαν επτά σημεία στο επίπεδο XZ, από τα οποία ορίζεται μία καμπύλη Bezier. Οι συντεταγμένες των σημείων στον άξονα X (ακτινική διεύθυνση) ορίζονται ως ποσοστά επί της εξωτερικής ακτίνας R του στροβίλου, ενώ οι συντεταγμένες στον άξονα Z (αξονική διεύθυνση) είναι ποσοστά επί του συνολικού μήκους της πτερωτής, έτσι ώστε σε οποιαδήποτε αλλαγή των συνολικών διαστάσεων να αλλάζουν και οι συντεταγμένες του κάθε σημείου. Αυτό επιτρέπει την εύκολη μεταβολή της κλίμακας μεγέθους της πτερωτής και των σχετικών διαστάσεων μεταξύ ακτινικής και αξονικής διεύθυνσης. Η αρίθμηση των σημείων ορισμού της πλήμνης ξεκινά από την περιοχή εισόδου της ροής στην πτερωτή.

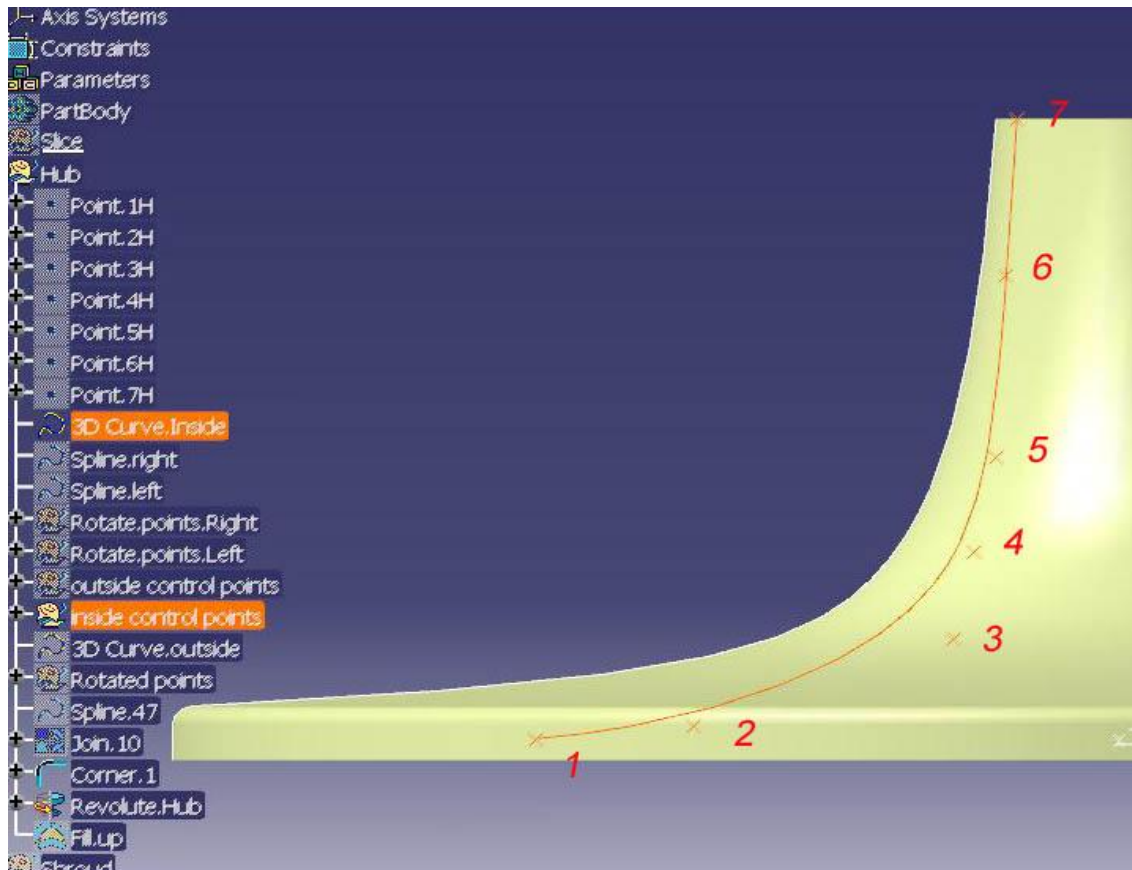
Στην συνέχεια κατασκευάζεται ένα ευθύγραμμο τμήμα ανάμεσα στο πρώτο σημείο ελέγχου της bezier και σε ένα άλλο σημείο που έχει πάντα την ίδια ακτίνα X με το πρώτο σημείο ελέγχου (πάντα πάνω στο επίπεδο XZ και προς την αρνητική διεύθυνση του άξονα Z). Το σημείο αυτό θα χρησιμοποιηθεί αργότερα για την κατασκευή της πλάτης στροβίλου. Το κάθετο ευθύγραμμο τμήμα ενώνεται (με χρήση της εντολής join) με την καμπύλη bezier, ενώ στη συνέχεια δημιουργείται καμπύλη στην ένωση τους με τη χρήση της εντολής “corner” και ακτίνα που ορίζεται από τον σχεδιαστή (παράμετρος της

σχεδίασης). Ο λόγος που δημιουργήθηκε η καμπύλη είναι ώστε να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων στη γωνία της πλήμνης και η αποφυγή εισαγωγής περιττών «fillets» στην συνέχεια. Στη συνέχεια δημιουργείται η επιφάνεια της πλήμνης με χρήση της εντολής «revolute» (Σχήμα 2.1). Το ανοιχτό τμήμα της επιφάνειας στην έξοδο της πλήμνης κλείνει με τη δημιουργία μία νέας επιφάνειας με την εντολή «fill».



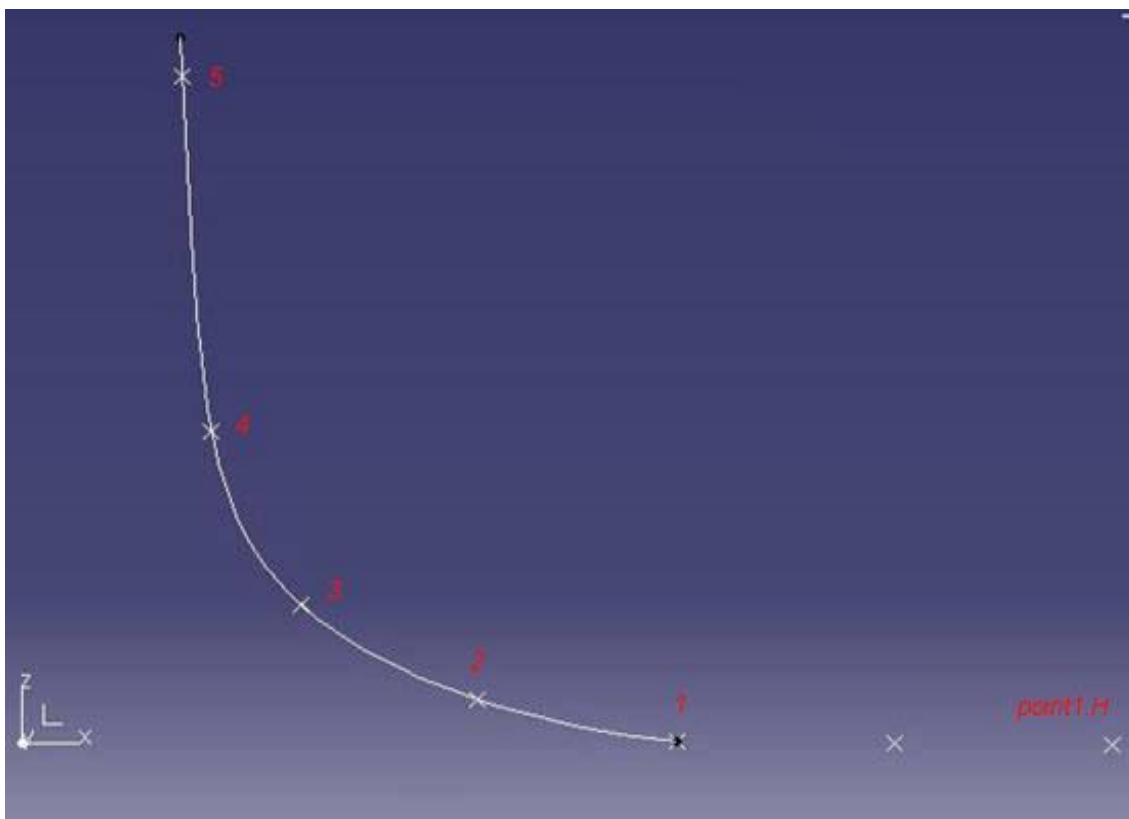
Σχήμα 2.1: Η καμπύλη που προέκυψε από ένωση της κάθετης καμπύλης spline και την Bezier, καθώς και η επιφάνεια της πλήμνης, που σχηματίζεται από αυτή με περιστροφή.

Για τον ορισμό της διατομής του περυγίου στην πλήμη (βάση του περυγίου) ορίστηκε μία βοηθητική καμπύλη με τη χρήση επτά διαφορετικά σημεία ελέγχου πάνω στο επίπεδο XZ εσωτερικά της επιφάνειας της πλήμνης (Σχήμα 2.2). Με βάση τα επτά εσωτερικά σημεία δημιουργήθηκε μία καμπύλη Bezier, πάνω στην οποία στην συνέχεια ορίστηκαν πέντε καινούργια σημεία καταναμεμένα με λόγο επι μήκους (Σχήμα 2.3). Με βάση αυτά τα στοιχεία θα γίνει στην συνέχεια ο έλεγχος του πάχους αλλά και ο έλεγχος της κλίσης των περυγίων.

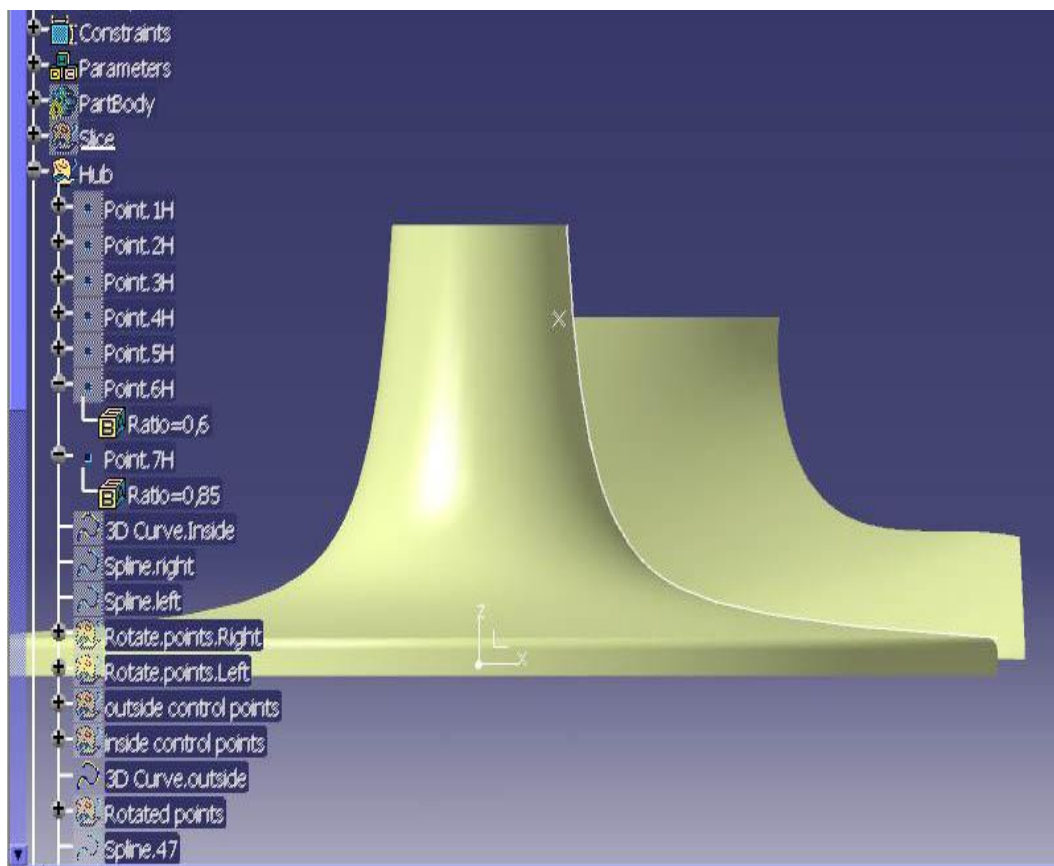
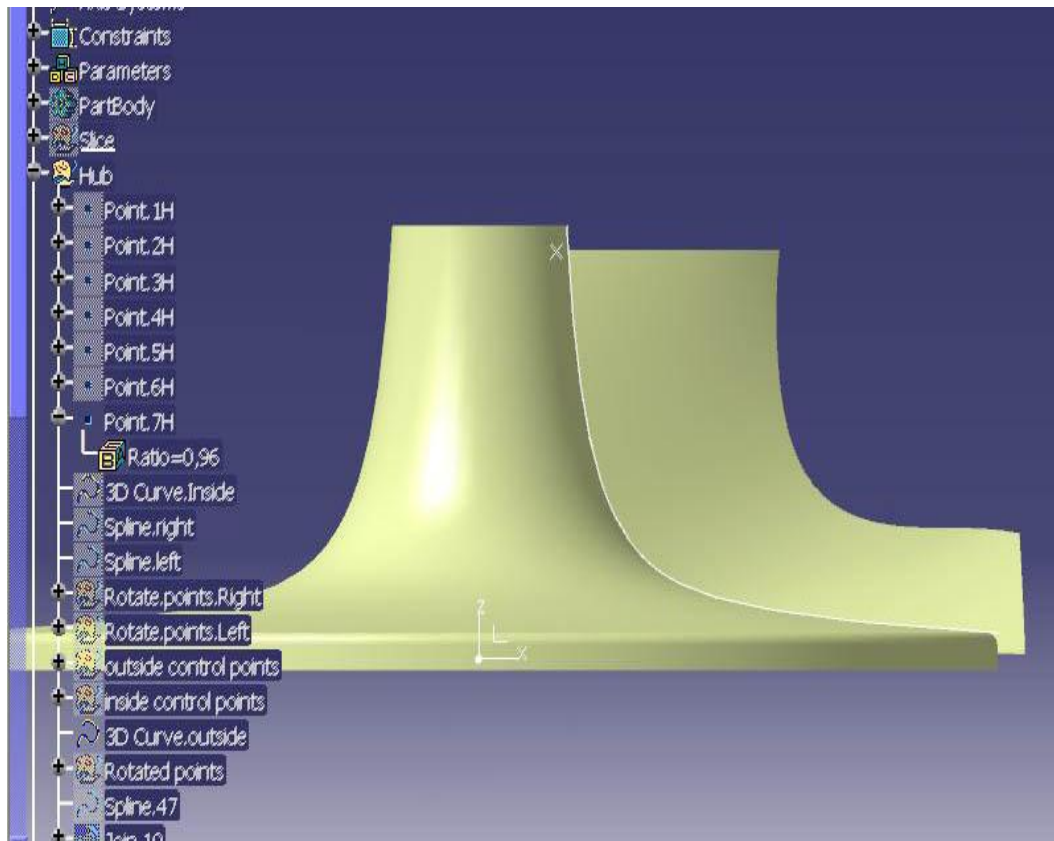


Σχήμα 2.2: Επτά εσωτερικά σημεία ελέγχου που ορίζουν τη βοηθητική καμπύλη bezier για τον ορισμό των πτερυγίων.

Με την χρήση του λόγου επί μήκους (ratio) αποκτούμε την δυνατότητα να ελέγχουμε ευκολότερα το πάχος και την κλίση του πτερυγίου στα σημεία που εμείς θέλουμε, απλά αλλάζοντας τον λόγο επί μήκους των σημείων και όχι τις συντεταγμένες τους. Αυτό επιτρέπει την πολύ ευκολότερη μεταβολή του μεγέθους της πτερωτής και είναι συμβατό με την έννοια της παραμετρικής σχεδίασης. Η αρίθμηση των σημείων ξεκινάει από την είσοδο της πτερωτής. Το πέμπτο σημείο ελέγχει το αξονικό μήκος του πτερυγίου ως ποσοστό επί του συνολικού μήκους της πλήμνης του στροβίλου, που φτάνει μέχρι το τέλος της αντίστοιχης καμπύλης bezier. Με αυτό τον τρόπο έχουμε την δυνατότητα να μεταβάλουμε το μήκος των πτερυγίων (κατά τη διεύθυνση Z), σε σχέση με το συνολικό μήκος της πλήμνης (Σχήμα 2.4). Το προφίλ του πτερυγίου δεν έχει όμως τη δυνατότητα να επεκταθεί πέραν την επιφάνειας της πλήμνης (ως προς το μέγιστο αξονικό μήκος Z). Για αυτόν τον λόγο τα μήκη Z του έβδομου κατά σειρά σημείου της εσωτερικής και της εξωτερικής bezier τίθενται υποχρεωτικά ίσα με το συνολικό μήκος του στροβίλου.



Σχήμα 2.3: Πέντε σημεία κατανομημένα με λόγο επί μήκους πάνω στη βοηθητική καμπύλη bezier, συν τα δύο σημεία στην επέκταση αυτής κατά τον άξονα X (ακτινική διεύθυνση).



Σχήμα 2.4: Μεταβολή του ύψους του πετερυγίου ως προς το ύψος της πλήμνης.

Αρχικά δοκιμάστηκε τα σημεία που κατανεμηθήκαν με λόγο επί μήκους πάνω στην εσωτερική καμπύλη bezier, να βρίσκονται πάνω στην bezier που ορίζει την επιφάνεια της πλήμνης. Στην συνέχεια όμως παρατηρήθηκε ότι σε ακραίες γωνίες κλίσης του πτερυγίου αλλά και σε πολύ μεγάλες τιμές της διαμέτρου των πτερυγίων υπήρχε πρόβλημα αποκόλλησης των επιφανειών. Η πλευρική επιφάνεια του πτερυγίου είχε την τάση να αποκολλάται από την επιφάνεια της πλήμνης παρόλο που είχε τεθεί η επιφάνεια της πλήμνης ως υποστηρικτική επιφάνεια (geometry on support). Ως συνέπεια αυτών ήταν η ασυνέχεια των επιφανειών και για αυτό τον λόγο προτιμήθηκε η δημιουργία ξεχωριστής βοηθητικής καμπύλης bezier εσωτερικά της επιφάνειας της πλήμνης (Σχήμα 2.2).

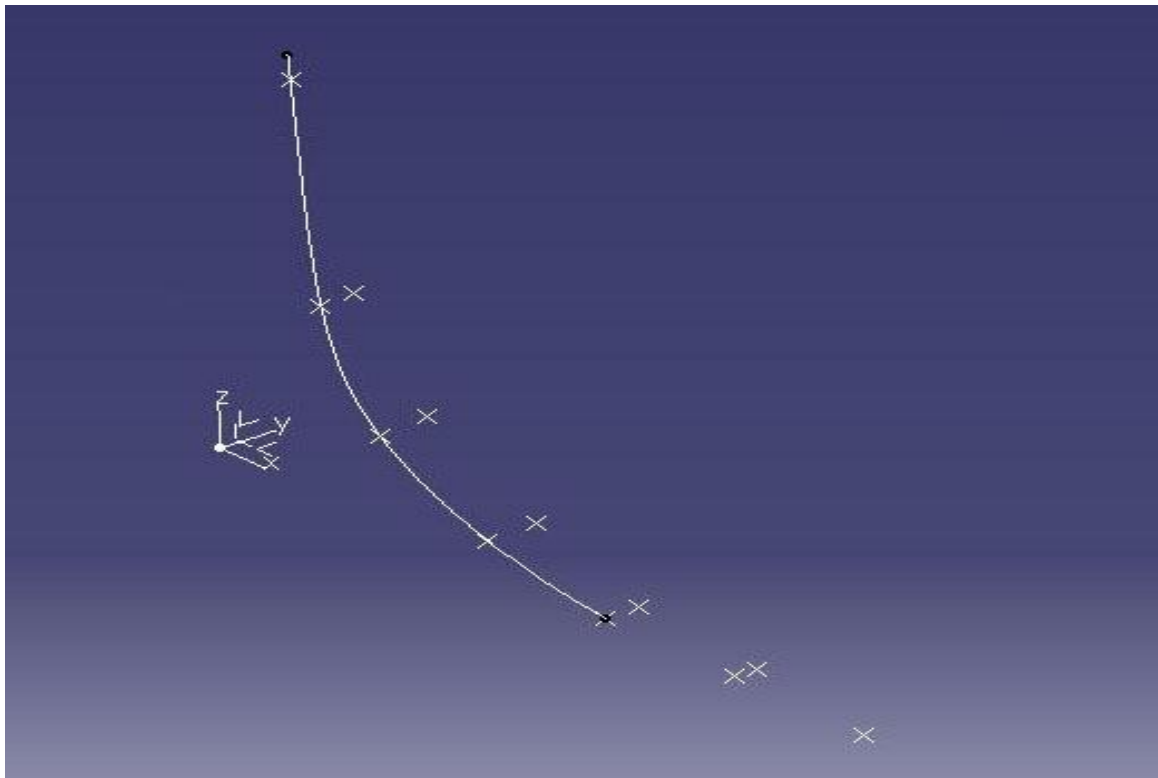
Επίσης, ένας από τους λόγους που ορίστηκαν ξεχωριστά σημεία για την δημιουργία της πλήμνης και ξεχωριστά για την βάση των πτερυγίων είναι για να υπάρχει η δυνατότητα να αυξάνεται το συνολικό μήκος των πτερυγίων ως προς τον άξονα X, ενώ η διάμετρος της πλήμνης παραμένει σταθερή (αλλά και το αντίστροφο). Ένας άλλος λόγος είναι πως το πτερύγιο επεκτείνεται εξωτερικά της πλήμνης ως προς τον άξονα X (ακτινική διεύθυνση) και πίσω από την επιφάνεια της πλήμνης ως προς τον άξονα Z. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με την τεχνική που υιοθετήθηκε (Σχήμα 2.4). Και σε αυτή την περίπτωση όμως παρατηρήθηκε πως για μεγάλες τιμές διαμέτρου των πτερυγίων, σε σχέση με την πλήμνη, υπήρχε αποκόλληση των επιφανειών του πτερυγίου από την επιφάνεια της πλήμνης. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο, οι συντεταγμένες των εσωτερικών σημείων ελέγχου εξαρτώνται με συναρτήσεις από τα εξωτερικά σημεία ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο τα σημεία που ορίζουν την εσωτερική bezier βρίσκονται πάντα εσωτερικά της επιφάνειας της πλήμνης.

Για τον καλύτερο έλεγχο του πάχους αλλά και της κλίσης των πτερυγίων εξωτερικά της πλήμνης δημιουργήθηκαν δύο ακόμα σημεία στην προέκταση της καμπύλης bezier ως προς τον άξονα X, από τα οποία το πρώτο (point.1H) έχει ακτίνα όση η συνολική ακτίνα του στροβίλου και το δεύτερο βρίσκεται ακριβώς στην μέση ως προς το άξονα X ανάμεσα στο σημείο point.1H και στο πρώτο σημείο της καμπύλης Bezier (Σχήμα 2.3).

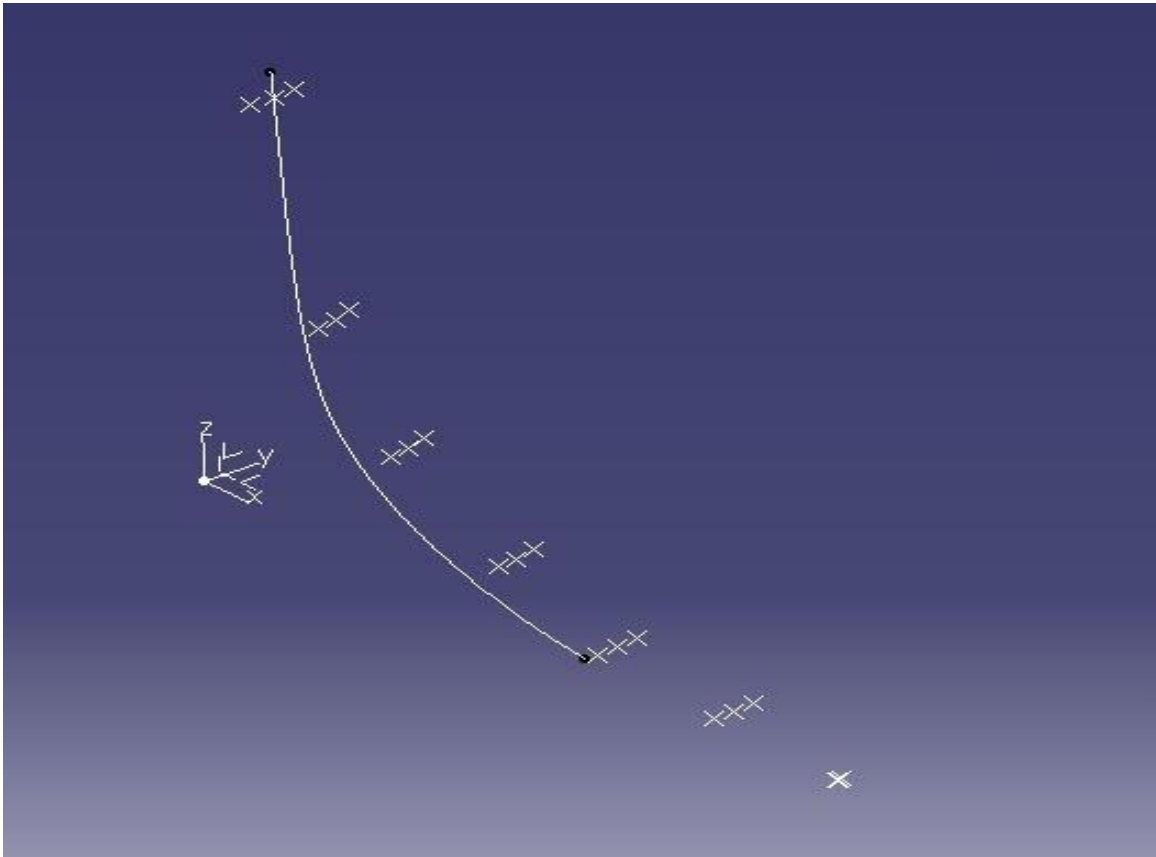
Στην συνέχεια ορίστηκαν επτά καινούργια σημεία, περιστρέφοντας τα πέντε σημεία της εσωτερικής Bezier, που ορίστηκαν με λόγο επί μήκους, καθώς και τα δύο σημεία που βρίσκονται στην προέκταση της. Κάθε σημείο περιστρέφεται ανεξάρτητα, σε γωνίες τις

οποίες ορίζει ο χρήστης. Οι γωνίες του κάθε σημείου ρυθμίζουν την κλίση των πτερυγίων πάνω στην πλήμνη (Σχήμα 2.5).

Από τα σημεία που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό της βάσης του πτερυγίου προκύπτουν άλλα 14 σημεία με περιστροφή (επτά για κάθε πλευρά του πτερυγίου) σε μήκος τόξου, το οποίο ρυθμίζεται από τον χρήστη και ορίζει το πάχος του πτερυγίου πάνω στην πλήμνη (Σχήμα 2.6).

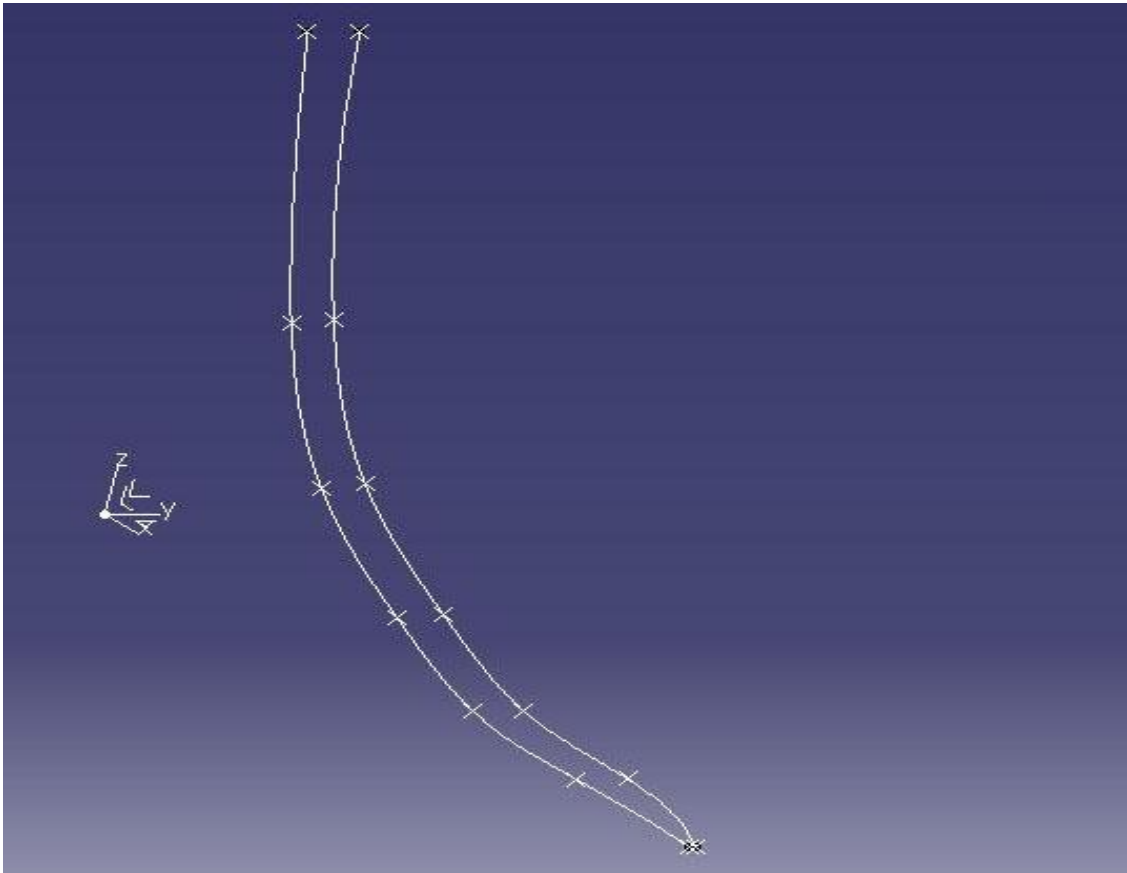


Σχήμα 2.5: Επτά αρχικά σημεία και τα επτά που προέκυψαν από την περιστροφή τους, τα οποία ορίζουν και την κλίση του πτερυγίου.



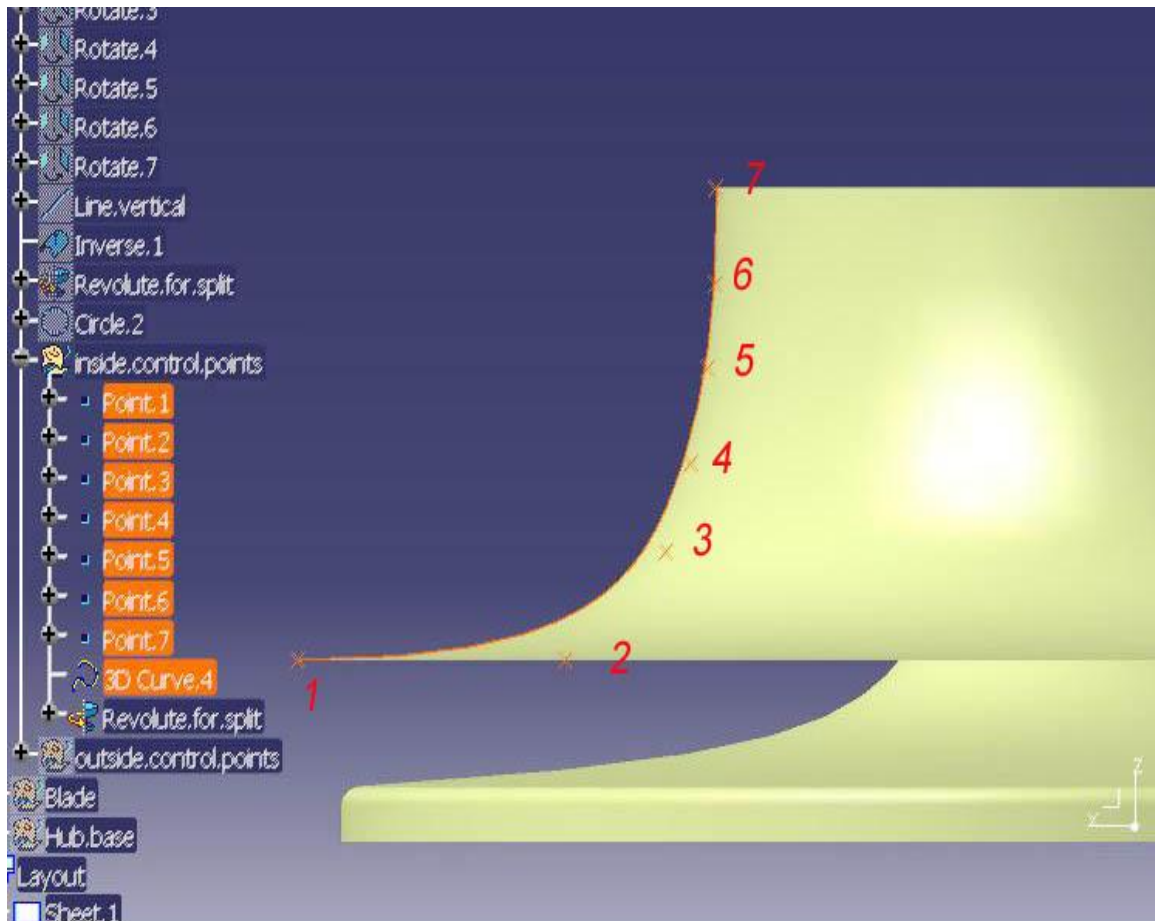
Σχήμα 2.6: Τα 7 σημεία που ορίζουν την κλίση του πτερυγίου και τα 14 σημεία (7 αριστερά – 7 δεξιά) που ορίζουν το πάχος του πτερυγίου.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο καμπύλες spline, μία αριστερά και μία δεξιά, οι οποίες αποτελούν τις βάσεις των πλευρικών επιφανειών του πτερυγίου και κάθε μία από αυτές στηρίζεται στα αντίστοιχα επτά σημεία που προέκυψαν με περιστροφή στα αριστερά και στα δεξιά της μέσης γραμμής και ελέγχουν το πάχος του πτερυγίου. (Σχήμα 2.7)



Σχήμα 2.7: Καμπύλες splines με βάση τις οποίες θα δημιουργηθούν οι πλευρικές επιφάνειες των πτερυγίων.

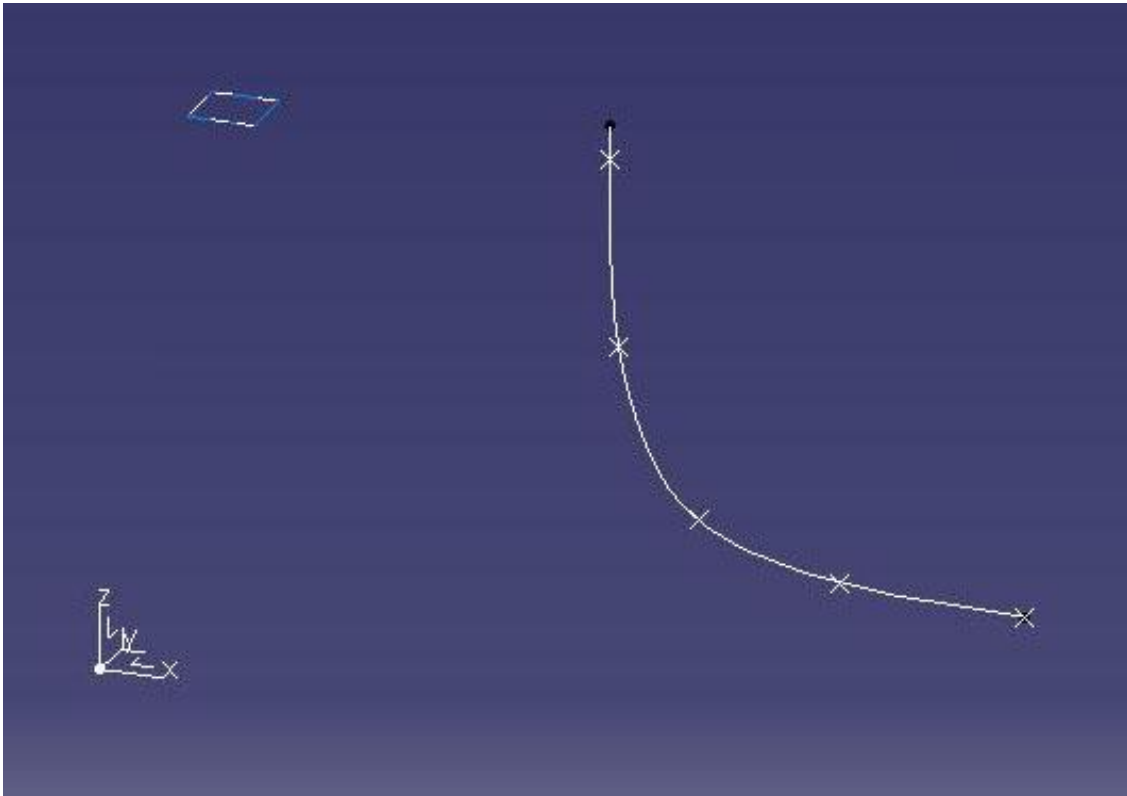
Για την δημιουργία του κελύφους της πτερωτής του στροβίλου ορίστηκαν και σε αυτή την περίπτωση επτά εσωτερικά και επτά εξωτερικά σημεία ελέγχου. Το πρώτο εσωτερικό και το πρώτο εξωτερικό σημείο ελέγχου έχουν συντεταγμένες στον άξονα X ίσες με την εξωτερική ακτίνα της πτερωτής του στροβίλου. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση η αρίθμηση των σημείων ξεκινά από την είσοδο στην πτερωτή. Από τα επτά εσωτερικά σημεία ελέγχου σχηματίζεται μία καμπύλη bezier και στη συνέχεια με την χρήση της εντολής «revolute» δημιουργείται μία επιφάνεια εκ περιστροφής (Σχήμα 2.8). Αυτή η επιφάνεια θα χρησιμοποιηθεί για να μας δώσει την επιφάνεια του ακροπτερυγίου.



Σχήμα 2.8: Επτά σημεία ελέγχου καθώς και η επιφάνεια του κελύφους που δημιουργείται.

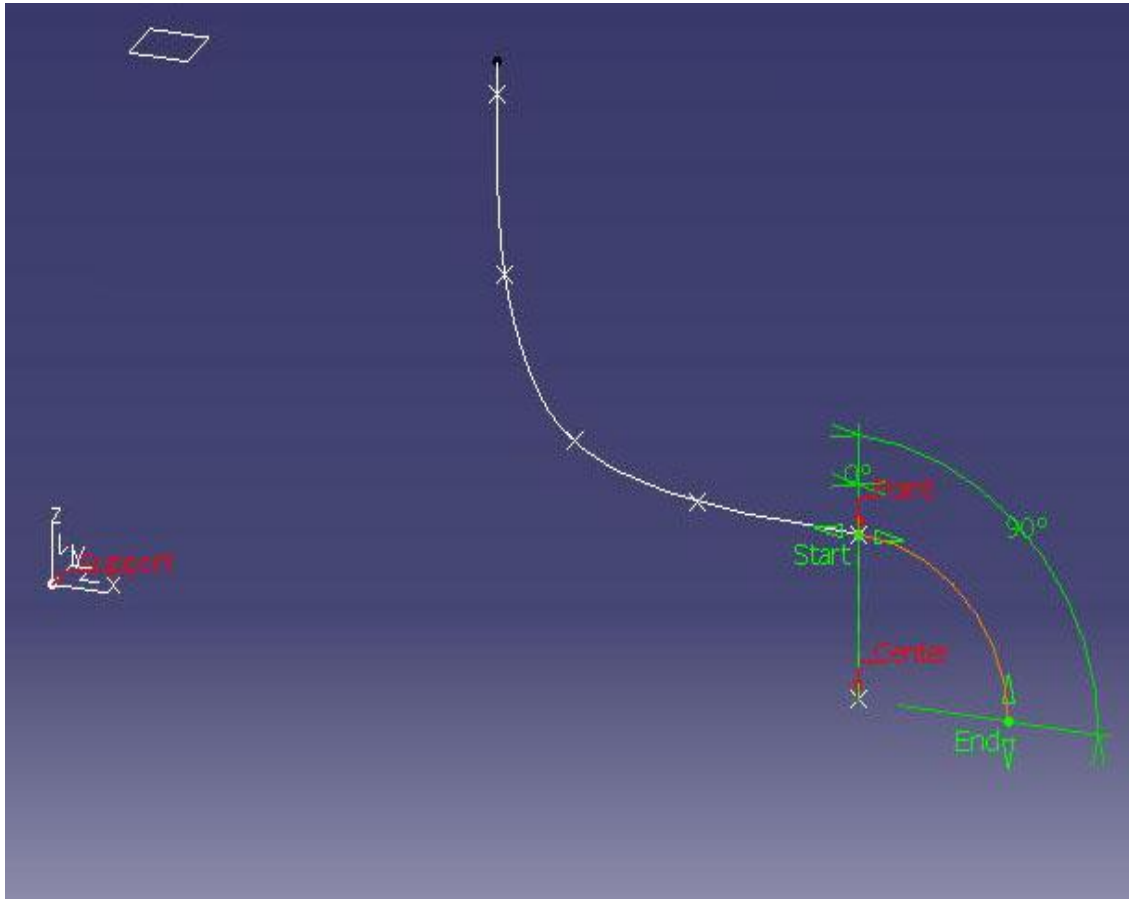
Από τα επτά εξωτερικά σημεία ελέγχου περνάει μία καμπύλη Bezier, πάνω στην οποία ορίζονται πέντε νέα σημεία. Τα τέσσερα πρώτα από αυτά τοποθετούνται πάνω στην bezier με λόγο επί μήκους, ενώ το τελευταίο ορίζεται με «intersect» μεταξύ της αντίστοιχης καμπύλης bBezier και του επιπέδου plane.1 (Σχήμα 2.9).

Το επίπεδο plane.1 είναι παράλληλο στο επίπεδο XY και στηρίζεται στο έβδομο σημείο που δημιουργήθηκε με λόγο επί μήκους πάνω στην εσωτερική bezier της πλήμνης. Το έβδομο σημείο στην εσωτερική bezier της πλήμνης είναι αυτό που ρυθμίζει το μήκος του πτερυγίου ως ποσοστό επί του συνολικού μήκους της πτερωτής του στροβίλου. Ο λόγος που δημιουργείται το τελευταίο σημείο με intersect του επιπέδου plane.1 είναι ώστε να διατηρεί πάντα το ίδιο Z με το έβδομο σημείο, που βρίσκεται στην εσωτερική bezier της πλήμνης. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε η άκρη του πτερυγίου να έχει διαφορετικό μήκος Z από την βάση του πτερυγίου.



Σχήμα 2.9: Η καμπύλη του κελύφους, τα πέντε σημεία πάνω σε αυτή και το επίπεδο plane.1

Στην συνέχεια δημιουργείται ένα τόξο 90 μοιρών με κέντρο το σημείο point1. Η και με δεύτερο σημείο (που καθορίζει και την ακτίνα του τόξου) το πρώτο σημείο που τοποθετήθηκε πάνω στη bezier του κελύφους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τόξο να αποτελεί προέκταση της αντίστοιχης bezier (Σχήμα 2.10). Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζουμε πως το σημείο point1.H είχε δημιουργηθεί στην προέκταση της εσωτερικής bezier της πλήμνης (Σχήμα 2.3) και έχει συντεταγμένη στον άξονα X ίση με την εξωτερική ακτίνα της περωτής του στροβίλου.

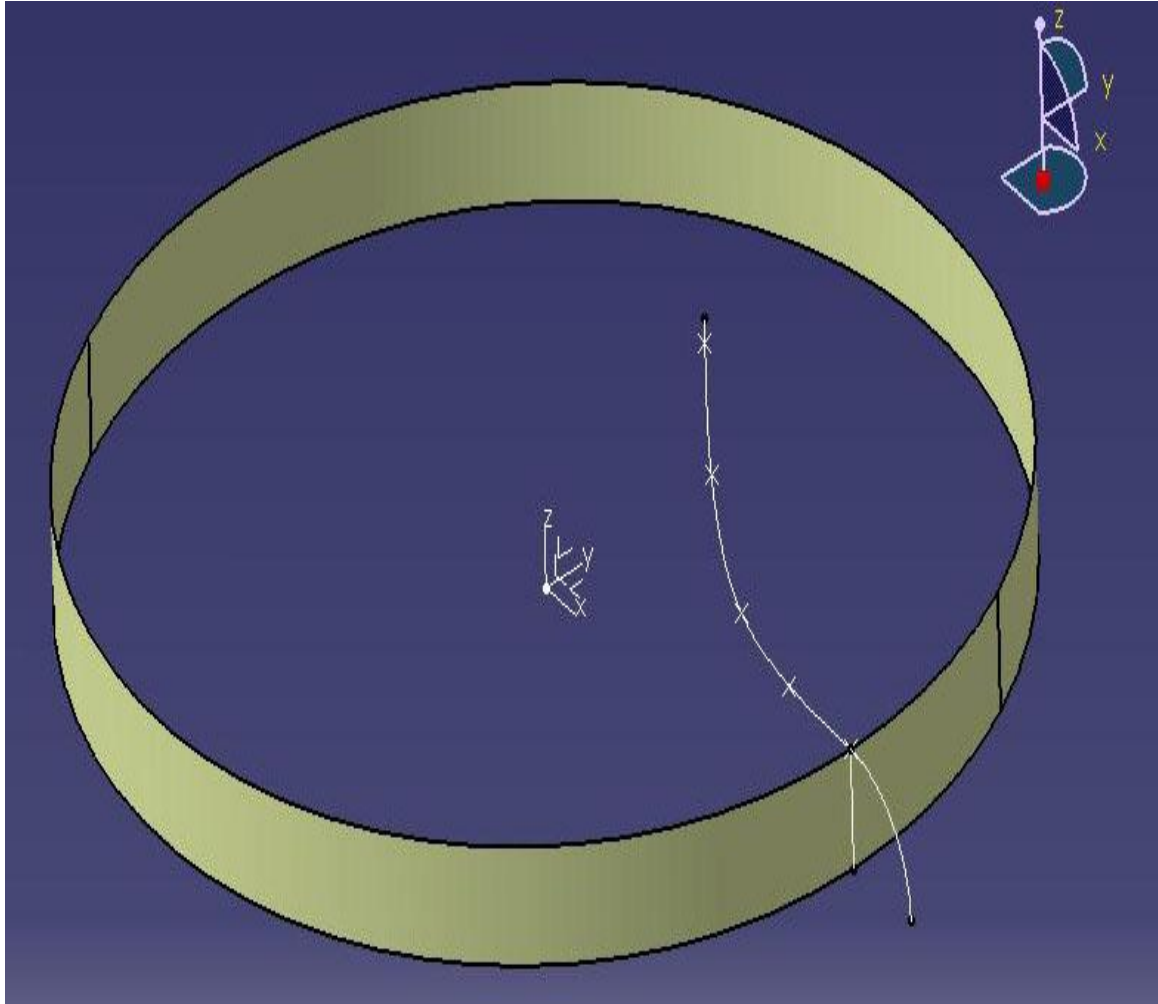


Σχήμα 2.10: Το τόξο προέκταση της καμπύλης bezier.

Πάνω στο συγκεκριμένο τόξο ορίζονται δύο ακόμα σημεία με λόγο επί μήκους, ένα στο τέλος και ένα στην μέση του τόξου. Τα δύο αυτά σημεία μαζί με τα πέντε σημεία που δημιουργήθηκαν πάνω στην αρχική bezier ορίζουν μία ομάδα επτά σημείων, τα οποία θα περιστραφούν, ώστε να ορίσουν την κλίση του πτερυγίου πάνω στο κέλυφος (όπως έγινε και στην περίπτωση της πλήμνης). Τα εν λόγω επτά σημεία περιστρέφονται στη συνέχεια αριστερά και δεξιά, δημιουργώντας επί πλέον 14 σημεία, τα οποία ελέγχουν το πάχος του πτερυγίου πάνω στο κέλυφος (όπως έγινε αντίστοιχα στην περίπτωση της πλήμνης).

Σε αυτό το σημείο ορίζεται ευθύγραμμο τμήμα από το πρώτο σημείο, που δημιουργήθηκε πάνω στην bezier του κελύφους, προς το σημείο point1.H, που ορίστηκε στην επέκταση της bezier της πλήμνης. Και τα δύο αυτά σημεία έχουν συνταγμένη X ίση με την εξωτερική ακτίνα R της πτερωτής. Με βάση το ευθύγραμμο τμήμα θα δημιουργηθεί μία επιφάνεια εκ περιστροφής σαν δαχτυλίδι, η οποία στην συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί για να κόψει τις πλευρικές επιφάνειες του πτερυγίου στην μορφή που

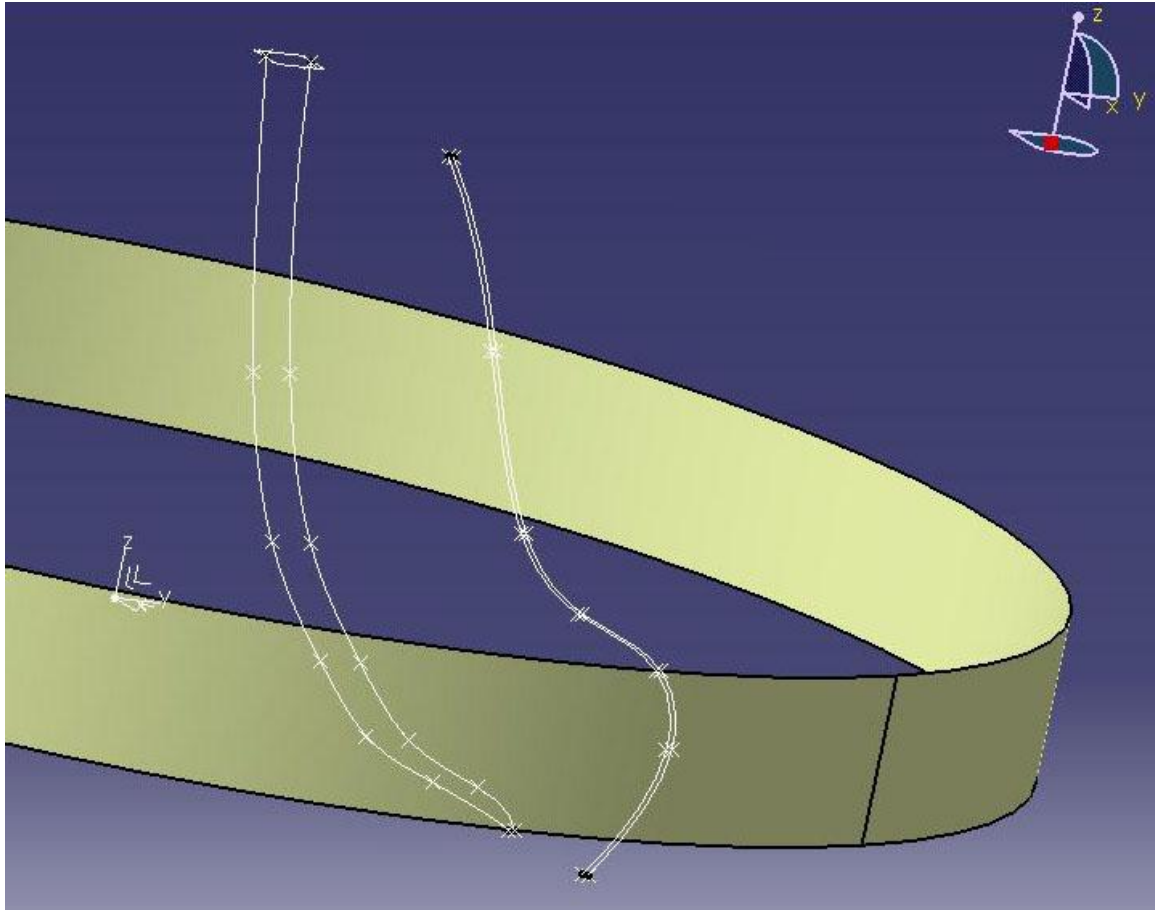
επιθυμούμε (Σχήμα 2.11). Ο λόγος που δεν δώσαμε εξαρχής στις πλευρικές επιφάνειες το σχήμα που θέλουμε είναι διότι η κάθετη γωνία στην άκρη του περυγίου δημιουργεί ανεπιθύμητες ακμές στις πλευρικές επιφάνειες.



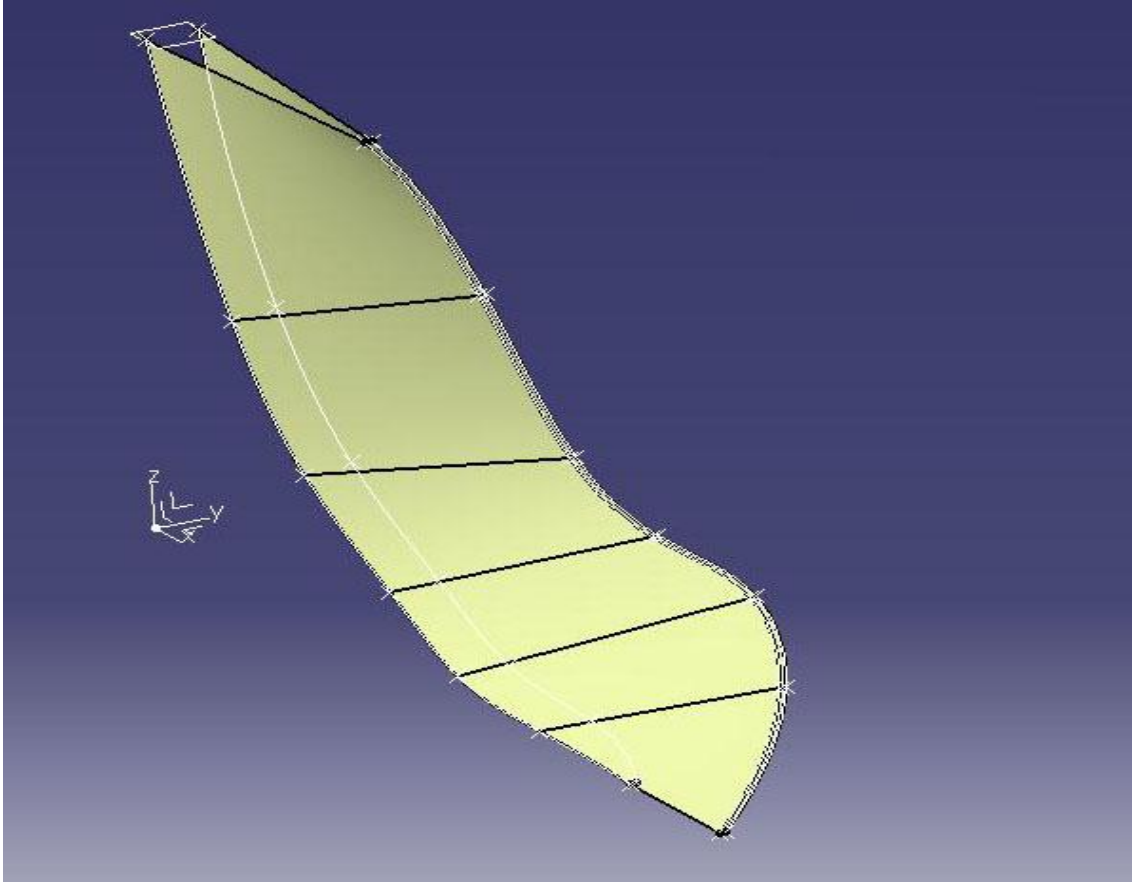
Σχήμα 2.11: Το βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα και η επιφάνεια εκ περιστροφής που δημιουργήθηκε από αυτό. Η τελευταία χρησιμοποιείται για την κατάλληλη κοπή των επιφανειών που ορίζουν το περύγιο στη μέγιστη ακτίνα της περωτής.

Στη συνέχεια ορίστηκαν δύο καμπύλες splines, μία αριστερά και μία δεξιά της μέσης γραμμής του περυγίου στο κέλυφος, με βάση τα αντίστοιχα σημεία που προέκυψαν με περιστροφή και ελέγχουν το πάχος του περυγίου πάνω στο κέλυφος. Από αυτές τις δύο καμπύλες splines σε συνδιασμό με αυτές της πλήμνης προκύπτουν οι δύο πλευρικές επιφάνειες του περυγίου, στις οποίες εφαρμόστηκε η τεχνική «coupling» των σημείων που σχηματίζουν τις αντίστοιχες καμπύλες splines (Σχήμα 2.12 & 2.13). Οι δύο

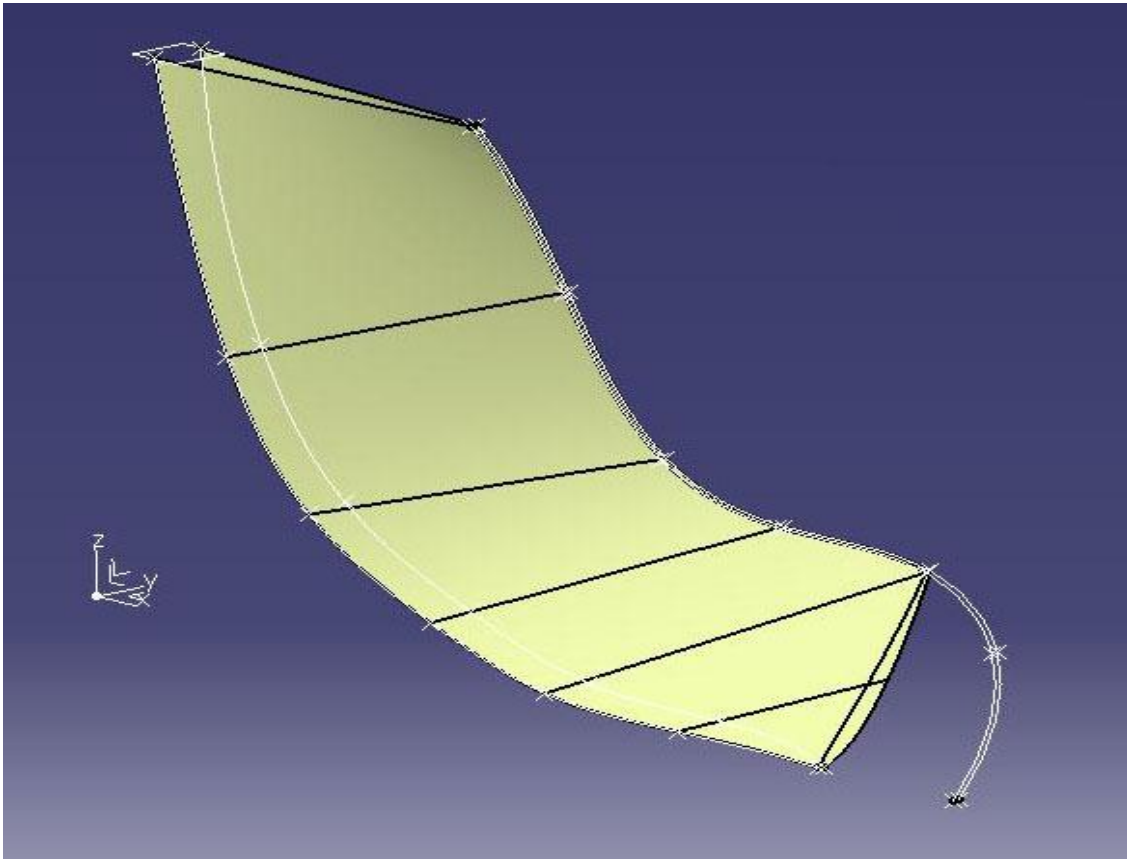
πλευρικές επιφάνειες του πτερυγίου κόβονται από την βοηθητική εξωτερική επιφάνεια (δαχτυλίδι) που δημιουργήσαμε, ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό σχήμα (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.12: Οι τέσσερις καμπύλες splines, με βάση τις οποίες θα δημιουργηθούν οι πλευρικές επιφάνειες των πτερυγίων.

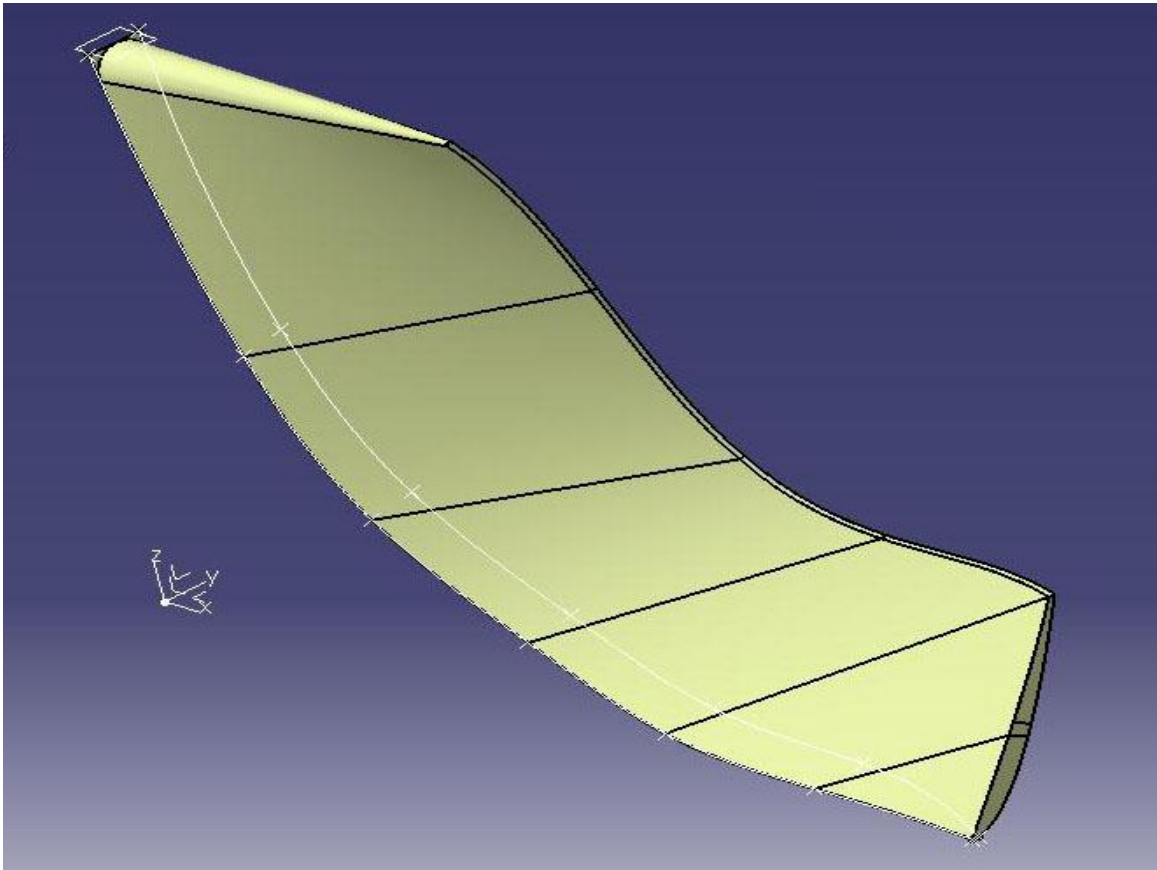


Σχήμα 2.13: Οι δύο πλευρικές επιφάνειες του πτερυγίου. Οι μαύρες γραμμές οπτικοποιούν το «coupling» των αντίστοιχων σημείων.

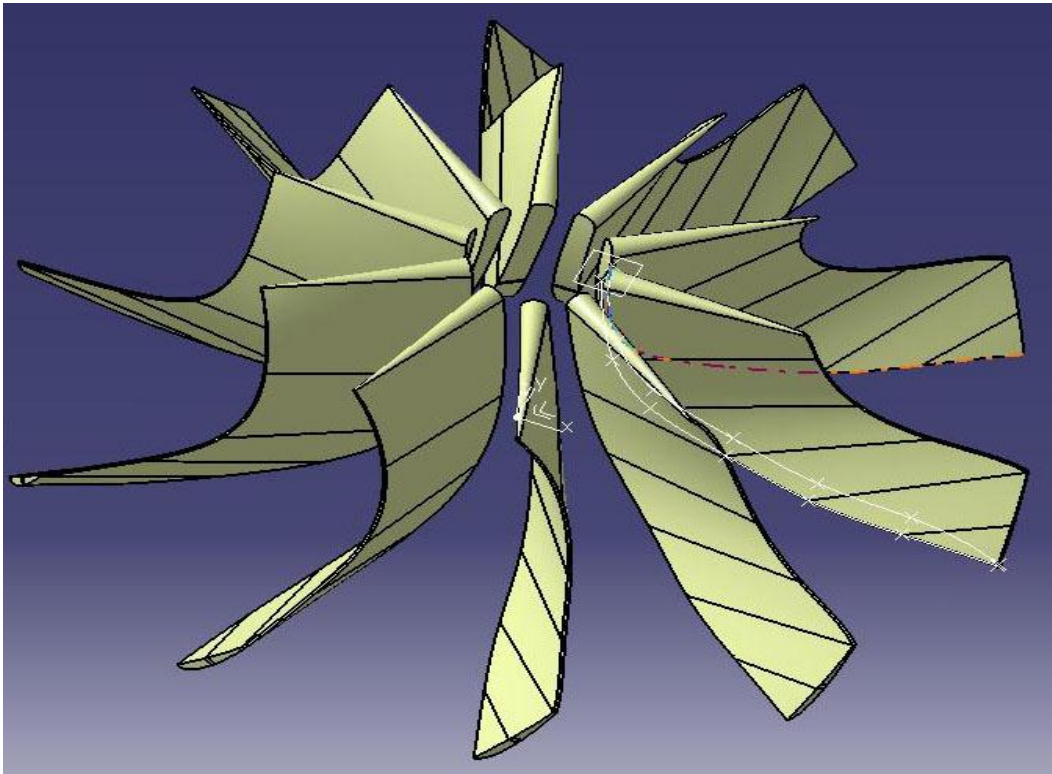


Σχήμα 2.14: Οι πλευρικές επιφάνειες μετά το κόνιμο με τη βοηθητική επιφάνεια.

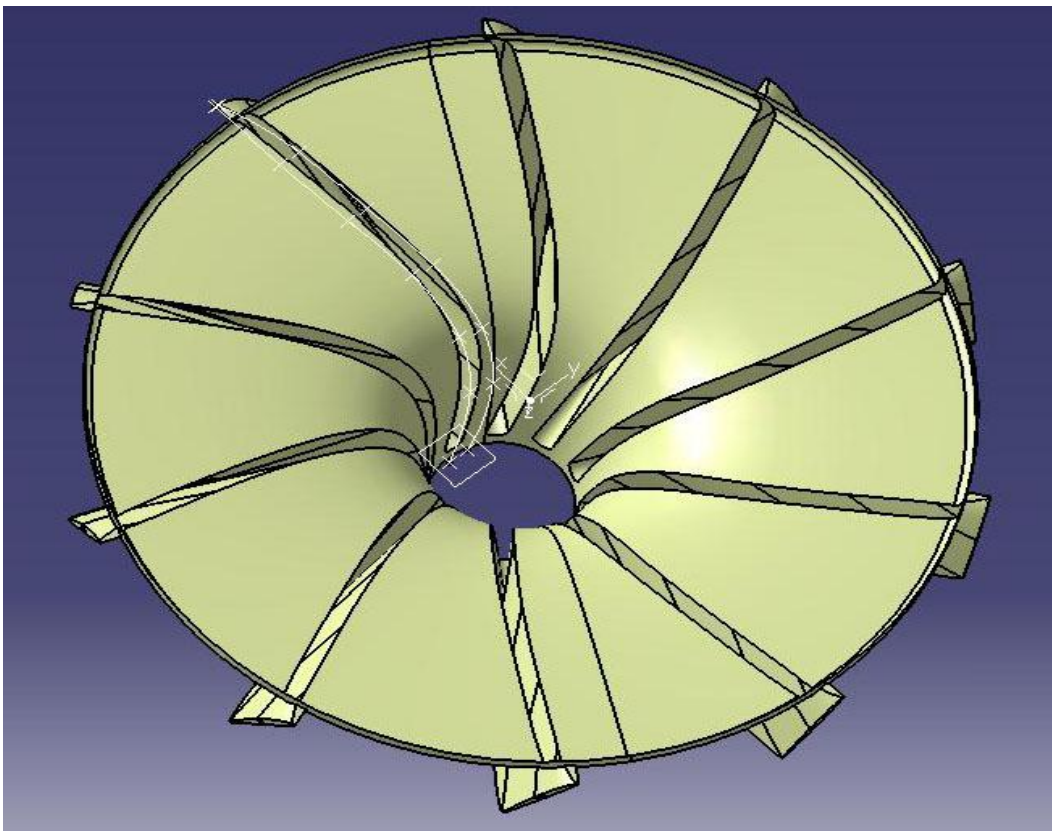
Στην συνέχεια ενώνονται οι δυο πλευρικές επιφάνειες του πτερυγίου μεταξύ τους με εντολή «blend» ενώ στην πάνω πλευρά του πτερυγίου εφαρμόζεται «tritangent fillet» (Σχήμα 2.15). Όλες οι επιφάνειες που συνθέτουν το πτερύγιο γίνονται μία κοινή επιφάνεια («join»), η οποία με εντολή «pattern» κάθε 36 μοίρες γύρω από τον άξονα Z μας δίνει συνολικά δέκα πτερύγια (Σχήμα 2.16). Με απώτερο σκοπό να γίνουν τα πτερύγια στερεά σαν ένα ενιαίο σώμα με την πλήμνη του στροβίλου εφαρμόζεται «trim» μεταξύ των πτερυγίων και της επιφάνειας της πλήμνης (Σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.15: Το «tritanget fillet» στην έξοδο του πτερυγίου καθώς οι επιφάνειες που χρησιμοποιήθηκαν για να κλείσουν τα κενά ανάμεσα στις δύο πλευρές του πτερυγίου.

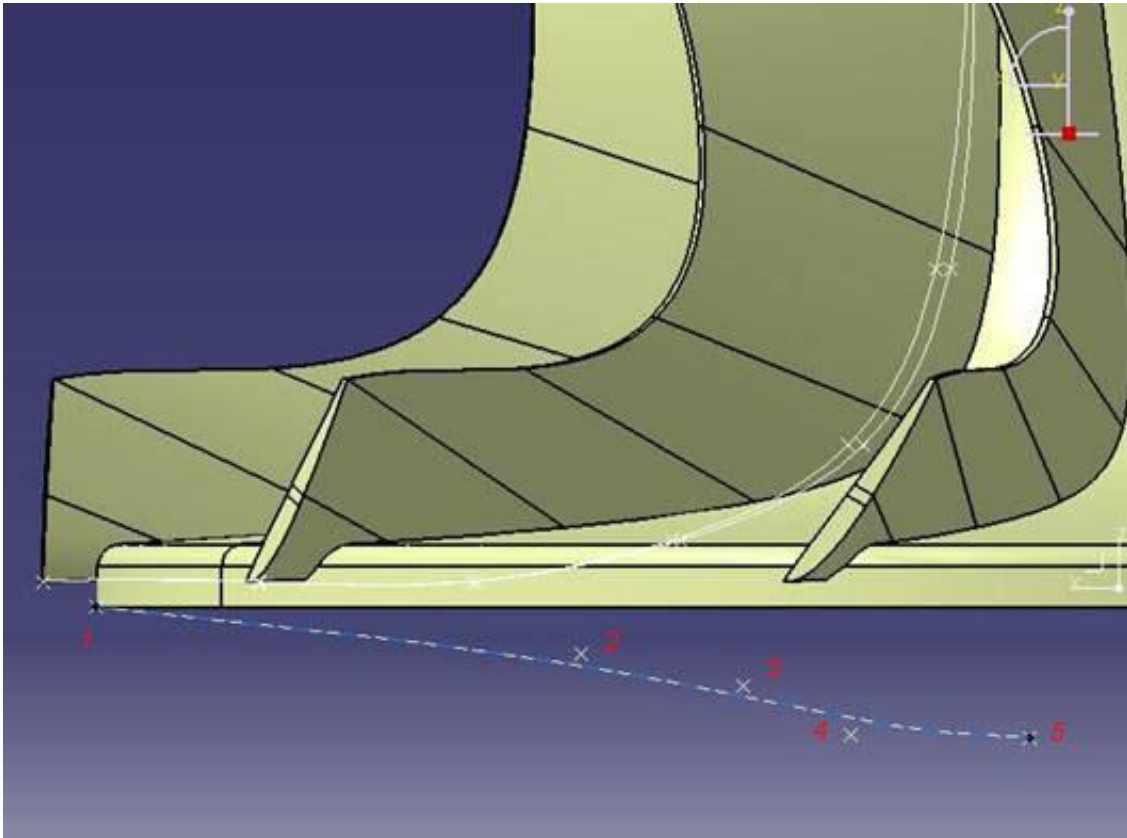


Σχήμα 2.16: Pattern του περυγίου κάθε 36 μοίρες.

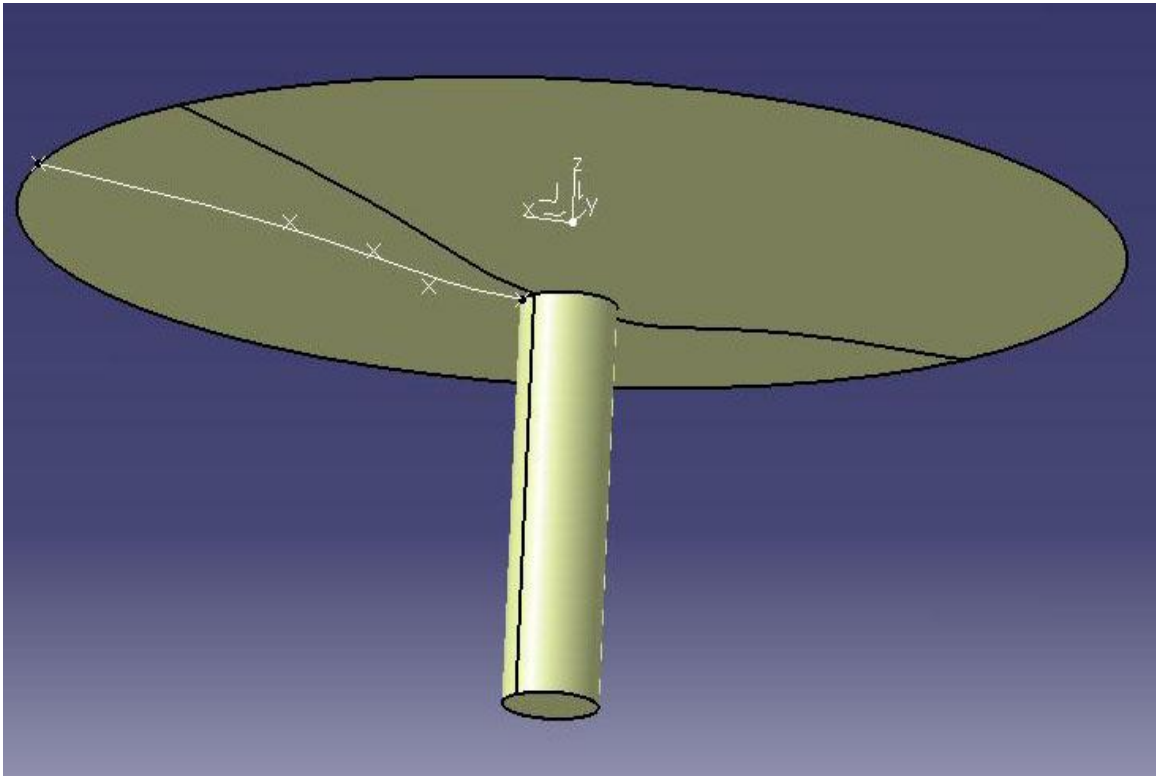


Σχήμα 2.17: Trim της επιφάνειας της πλήμνης με τα περύγια.

Για τον ορισμό της πλάτης της περωτής του στροβίλου ορίστηκαν πέντε σημεία ελέγχου, από τα οποία ορίζεται στη συνέχεια μία καμπύλη bezier. Το πρώτο σημείο έχει πάντα ακτίνα ίση με αυτή του εξωτερικού σημείου που ορίζει την πλήμνη. Η απόσταση του πέμπτου σημείου από τον άξονα Z καθορίζει και την διάμετρο του άξονα του στροβίλου, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο στρόβιλο (Σχήμα 2.18). Μία οπή στον στρόβιλο για την συναρμογή του με τον άξονα θα δημιουργούσε τάσεις σχεδόν διπλάσιες [3]. Η διάμετρος καθώς και το μήκος του άξονα ορίζονται από τον χρήστη. Το πίσω μέρος του στροβίλου δημιουργήθηκε με περιστροφή της εν λόγω καμπύλης bezier, ενώ η επιφάνεια του άξονα προέκυψε με extrude του εσωτερικού κύκλου της επιφάνειας της πλάτης, που προέκυψε με την περιστροφή (Σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.18: Τα πέντε σημεία ελέγχου καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη Bezier, που χρησιμοποιείται για τον ορισμό της πλάτης της περωτής.



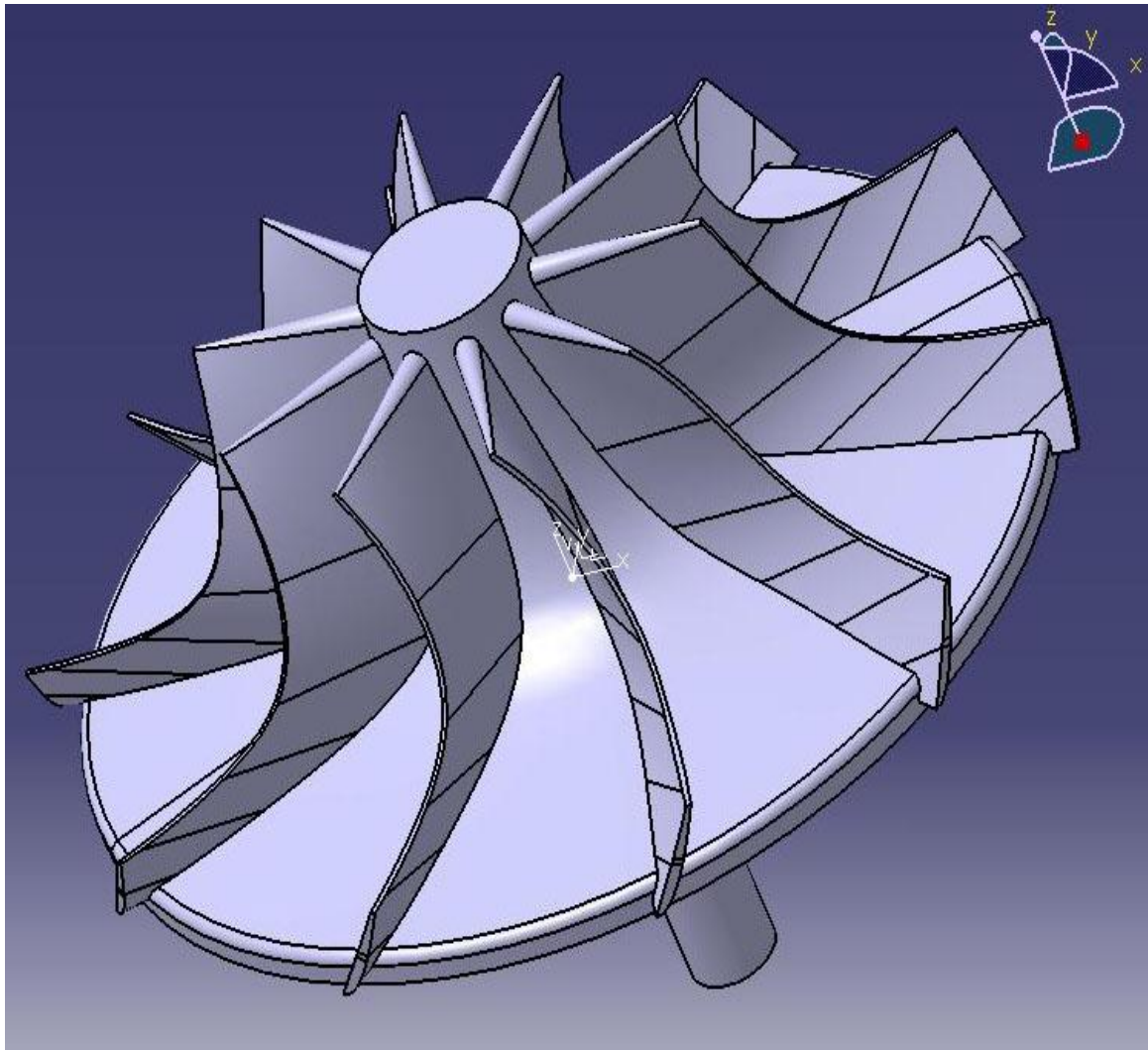
Σχήμα 2.19: Η επιφάνεια της πλάτης της πτερωτής μαζί με τον άξονα.

2.1.2 Part design

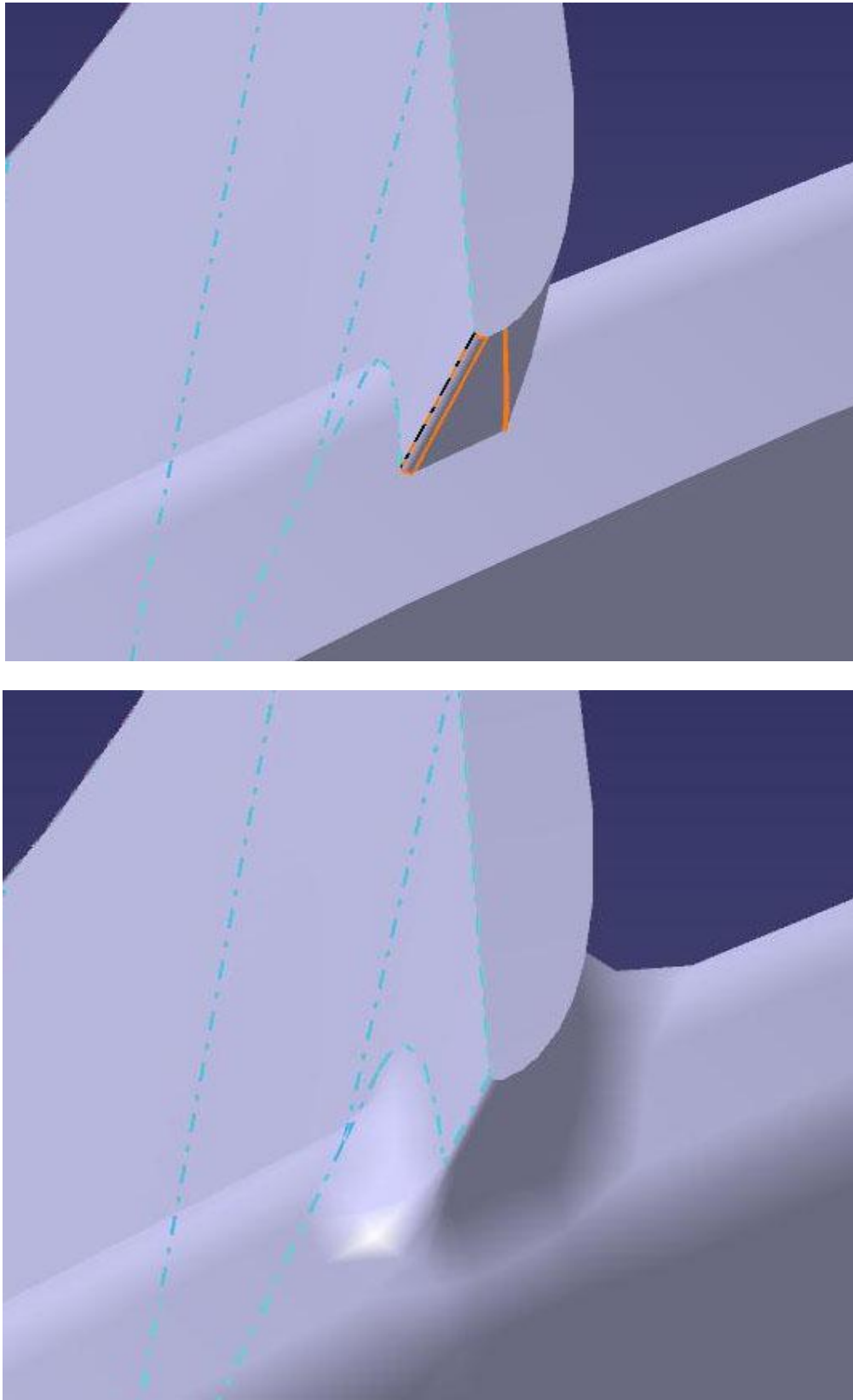
Στην συνέχεια αλλάζουμε workbench του CATIA και πλέον χρησιμοποιούμε το Part Design του Mechanical Design, για τον ορισμό πλέον στερεών αντικειμένων.

Ο όγκος του στροβίλου ορίζεται από τις επιφάνειες που σχεδιάσαμε στο shape design. Για αυτό τον λόγο όλες οι επιφάνειες που συνθέτουν τον στρόβιλο ενώθηκαν ώστε να δημιουργήσουν μία ενιαία επιφάνεια. Για να οριστεί ο όγκος του στροβίλου είναι απαραίτητη η απόλυτη εφαρμογή μεταξύ των επί μέρους επιφανειών. Καθώς οι επιφάνειες ορίζονται επιπλέον από το περίγραμμά τους, η εν λόγω εφαρμογή καθώς και το ότι η συνολική επιφάνεια θα πρέπει να είναι κλειστή μεταφράζονται στο ότι κάθε καμπύλη, ως περίγραμμα επιφανειών, θα πρέπει να ανήκει σε δύο συνεχόμενες επιφάνειες. Αν ανήκει σε μία, η συνολική επιφάνεια θα είναι ανοιχτή και έτσι δεν είναι δυνατόν να οριστεί ο όγκος. Αν ανήκει σε περισσότερες από δύο επιφάνειες τότε η συνολική επιφάνεια δεν είναι συνεχής και πιθανότατα να ορίζονται περισσότεροι του ενός όγκοι [9].

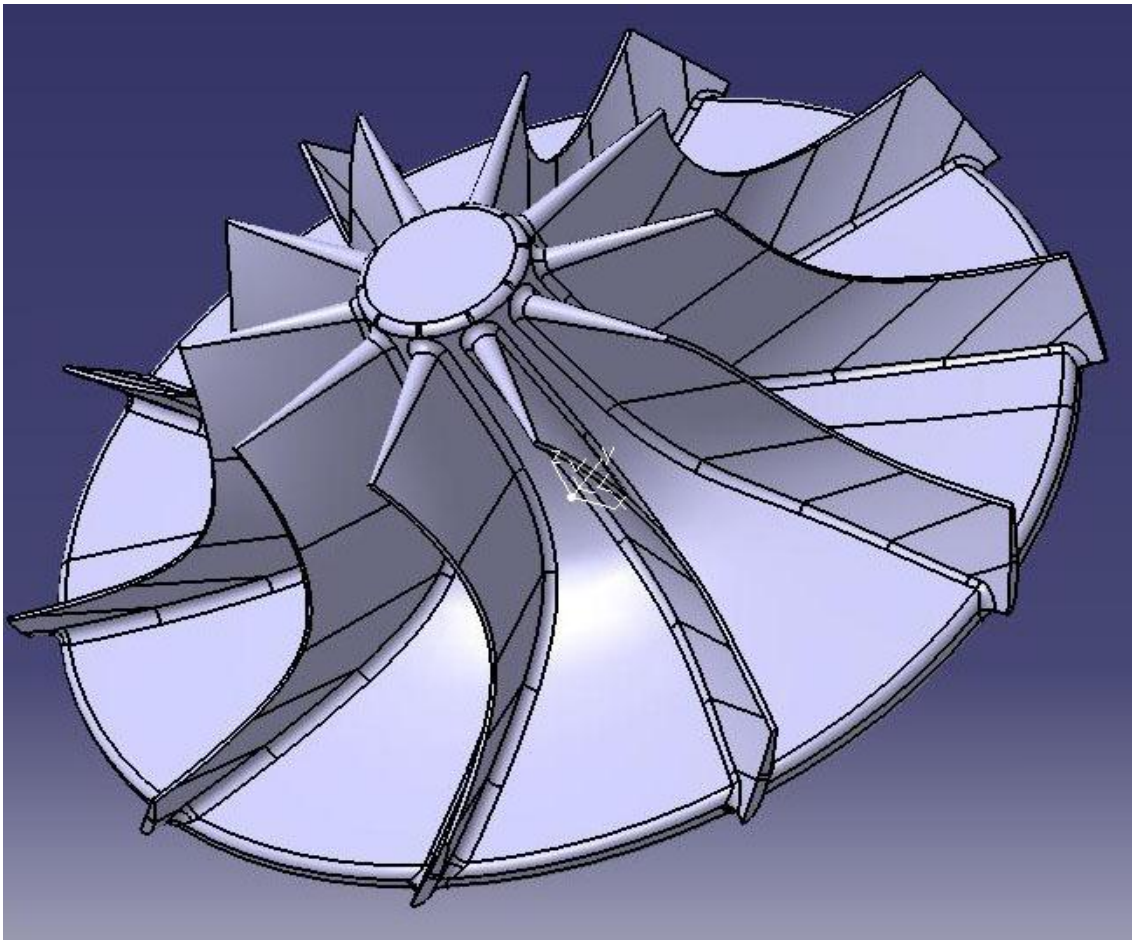
Με την χρήση της εντολής «close surface» στην τελική επιφάνεια προέκυψε ο όγκος της περωτής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20. Στην συνέχεια ορίστηκαν «fillets» στο κάτω μέρος των στερεών πλέον πτερυγίων, στο σημείο επαφής τους με την πλήμνη (Σχήμα 2.21). Οι ακτίνες των fillets αριστερά και δεξιά του πτερυγίου ελέγχονται από τον χρήστη ως παράμετροι σχεδίασης. Αφού δημιουργήθηκαν τα αρχικά «fillets» στα πτερύγια έγινε μετέπειτα «fillet» και σε ολόκληρη την επιφάνεια της πλήμνης του στροβίλου (Σχήμα 2.22). Τα «fillets» ανάμεσα στα πτερύγια και την πλήμνη του στροβίλου είναι απαραίτητα για την μείωση της συγκέντρωσης τάσεων σε αυτά τα σημεία, που προκαλείται από την απότομη αλλαγή της γεωμετρίας. Το σχήμα των «fillets» καθώς και το μέγεθος τους εξαρτάται από το πάχος των πτερυγίων. Η αντίστροφη δημιουργία των «fillets», επιλέγοντας πρώτα την πλήμνη και στην συνέχεια το κάτω μέρος των πτερυγίων δεν δημιουργούσε ομαλές επιφάνειες.



Σχήμα 2.20: Η περωτή χωρίς τα «fillets».



Σχήμα 2.21: Στην άνω εικόνα φαίνονται τα δύο μικρά «fillets» στην βάση του περυγίου, ενώ στην κάτω φαίνεται το «fillet» σε ολόκληρη την επιφάνεια της πλήμνης.

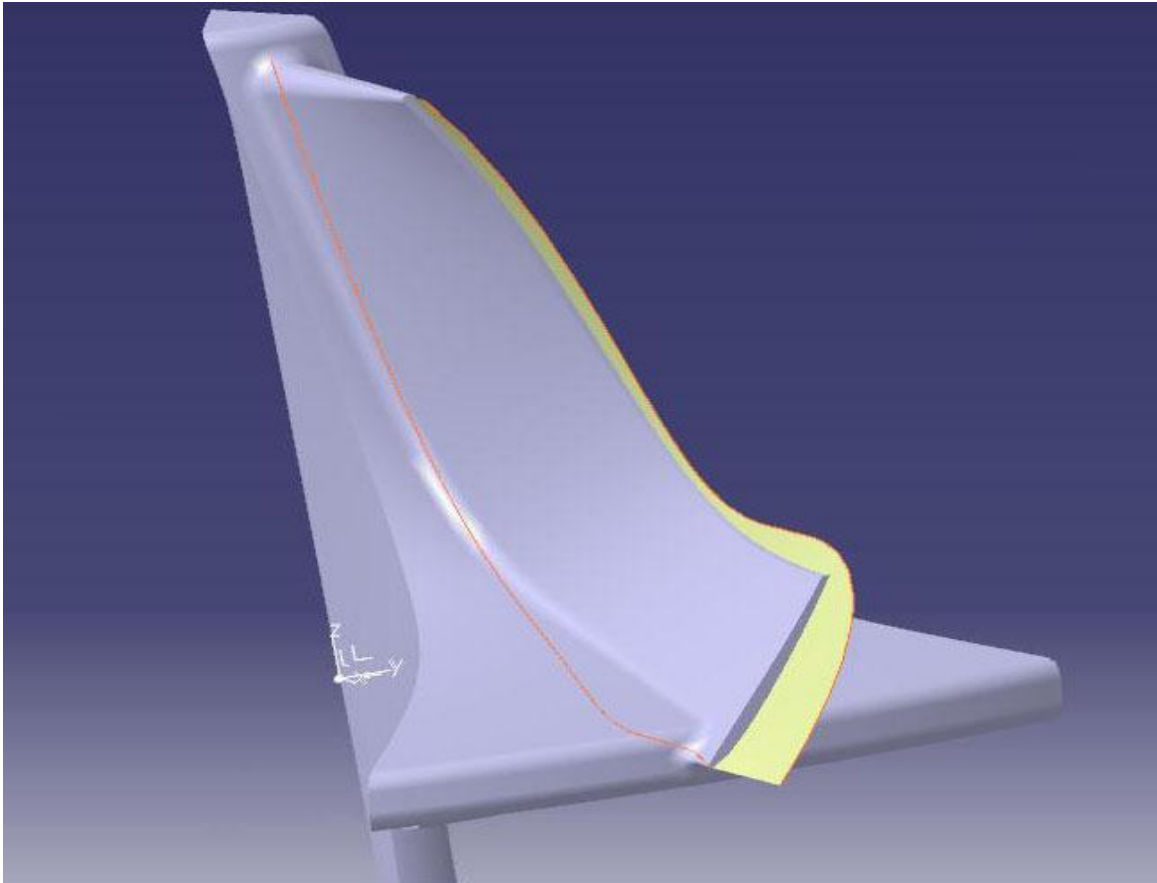


Σχήμα 2.22: Η πτερωτή μετά την εφαρμογή των «fillets».

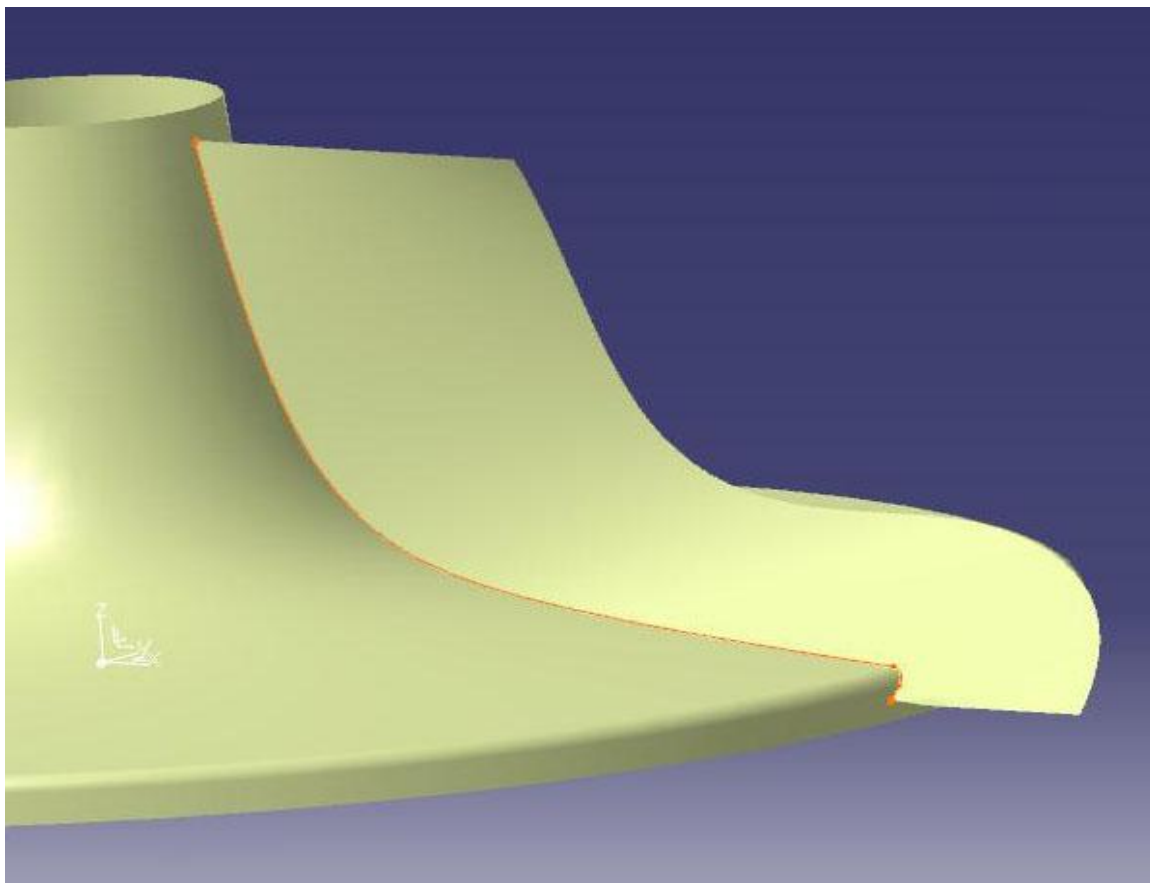
Για την απλούστευση της ανάλυσης των καταπονήσεων απομονώσαμε μία μόνο φέτα με ένα πτερύγιο από την μέση του ενός καναλιού ροής ως την μέση του επόμενου. Για τον λόγο αυτό, η επιφάνεια που κόβει την φέτα είναι παράλληλη στο μέση γραμμή του πτερυγίου και όχι μία επίπεδη επιφάνεια, η οποία θα ήταν πιο εύκολο να δημιουργηθεί. Αυτό θα βοηθήσει σημαντικά στην μείωση του χρόνου που απαιτείται για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων.

Για να πραγματοποιηθεί η τομή, αρχικά δημιουργήθηκαν δύο καμπύλες splines. Η πρώτη διερχόταν από τα 7 σημεία που καθορίζουν τη μέση γραμμή του πτερυγίου πάνω στην πλήμνη και η δεύτερη από τα 7 σημεία που καθορίζουν τη μέση γραμμή του πτερυγίου πάνω στο κέλυφος. Με βάση αυτές τις δύο καμπύλες splines δημιουργήθηκε μία επιφάνεια (blend.Central), η οποία ορίζει την μέση επιφάνεια του πτερυγίου (Σχήμα 2.23). Ο λόγος που δημιουργήθηκε αυτή η επιφάνεια είναι για να απομονωθεί (με

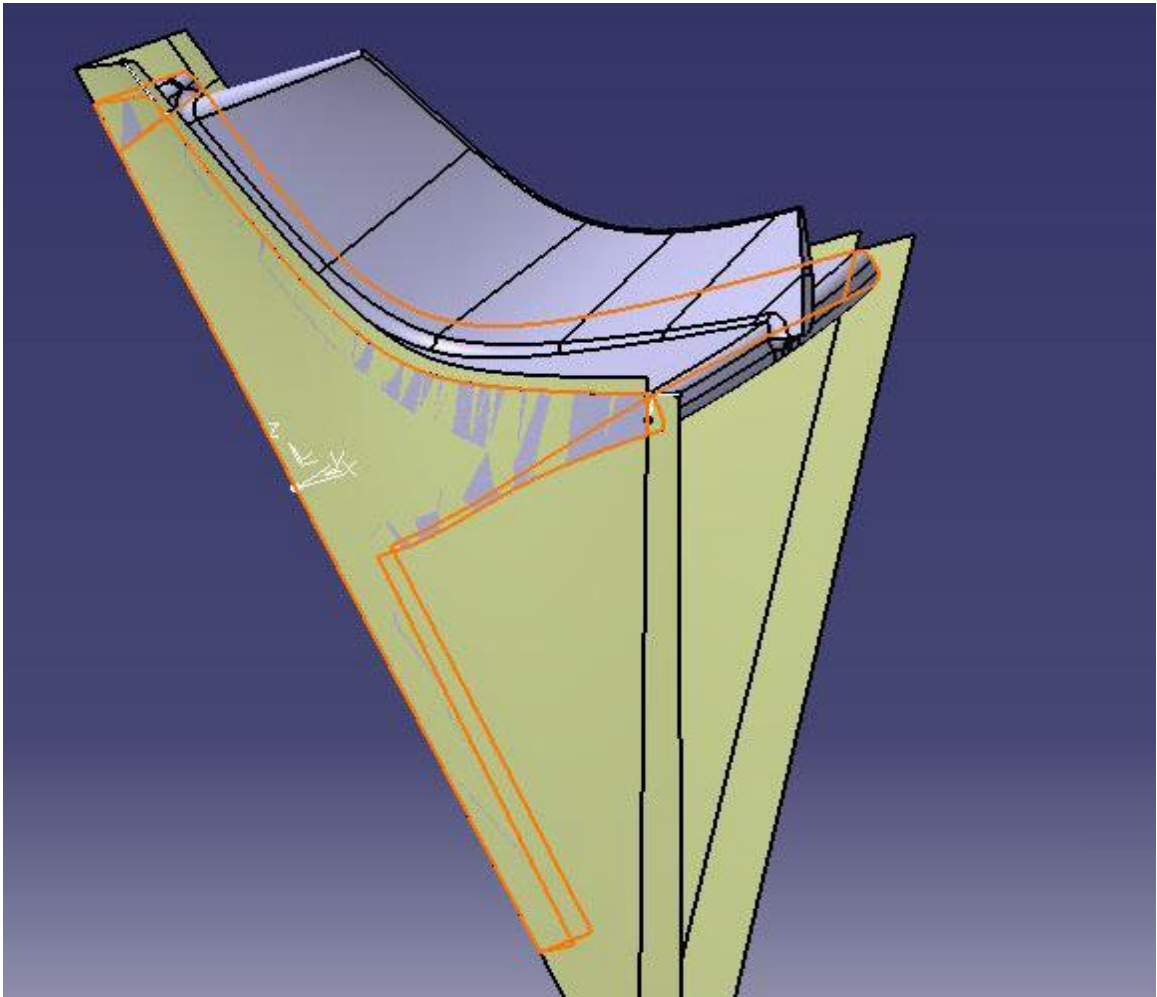
«intersect») η καμπύλη που τέμνει την επιφάνεια αυτή με την επιφάνεια της πλήμνης (Σχήμα 2.24). Η καμπύλη αυτή, που πρόκυψε από την τομή της μέσης επιφάνειας του πτερυγίου με την επιφάνεια της πλήμνης, περιστράφηκε 18 μοίρες και επεκτάθηκε προς τον άξονα Z με extrapolate. Ο λόγος που επεκτάθηκε προς τον άξονα των Z είναι για να μπορεί να κόβει την πτερωτή σε όλο το μήκος της και όχι μόνο μέχρι εκεί που τελειώνει το πτερύγιο. Μεταξύ αυτής τη καμπύλης και του άξονα περιστροφής του στροβίλου (Z) δημιουργήθηκε μία επιφάνεια, με σκοπό το κόψιμο της φέτας που χρειαζόμαστε. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε μία δεύτερη επιφάνεια για το κόψιμο της φέτας, με περιστροφή (rotate) της πρώτης κατά 36 μοίρες κατά την αντίθετη αυτή την φορά κατεύθυνση. Οι δύο επιφάνειες ενώνονται (με εντολή «join»), ενώ στη συνέχεια (με εντολή «split») απομονώνουν την φέτα που χρειαζόμαστε (Σχήματα 2.25 & 2.26).



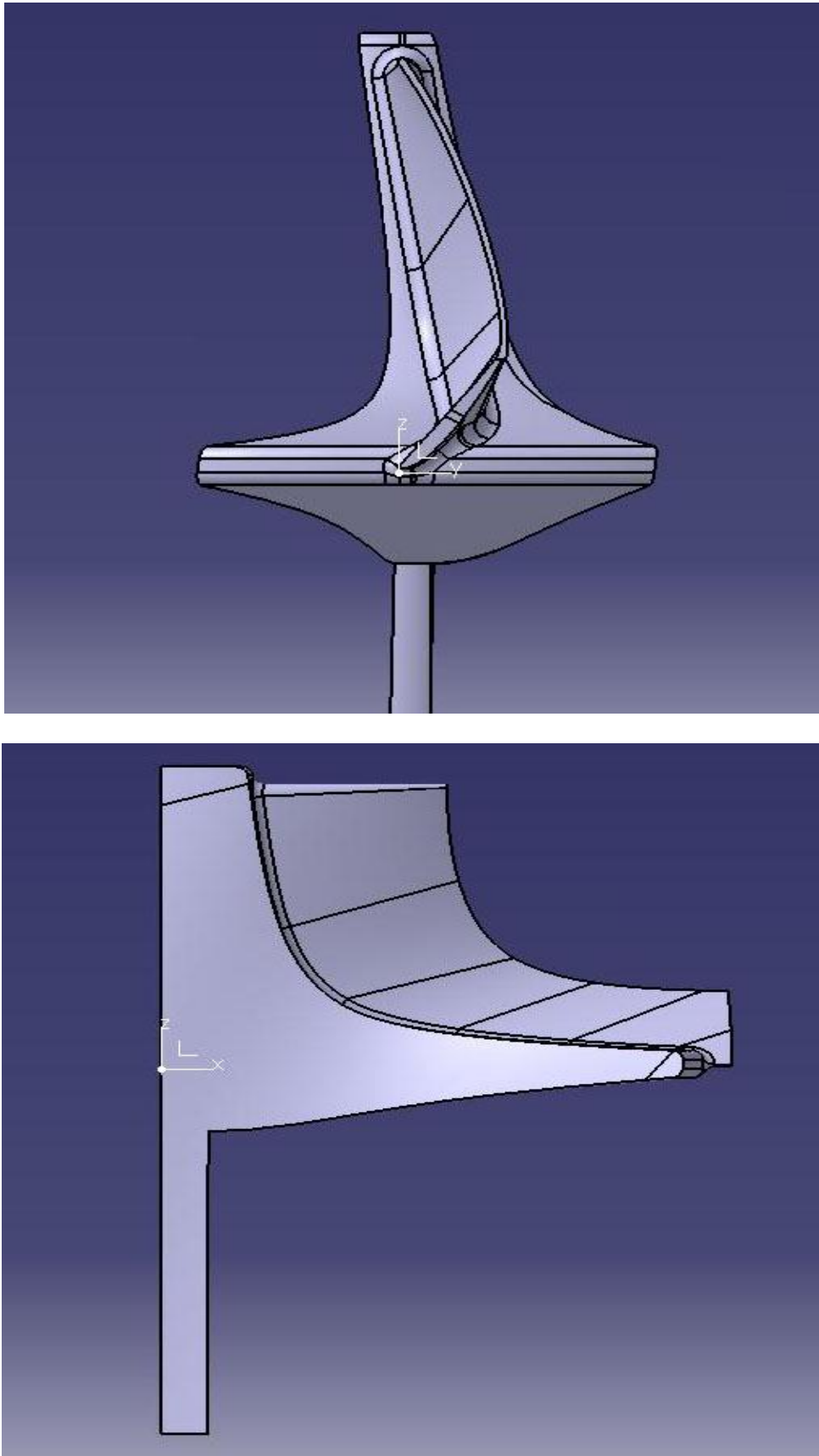
Σχήμα 2.23: Η μέση επιφάνεια του πτερυγίου με κίτρινο χρώμα.



Σχήμα 2.24: Η καμπύλη που προέκυψε με τομή της μέσης επιφάνειας του πτερυγίου και της επιφάνειας της πλήμνης.



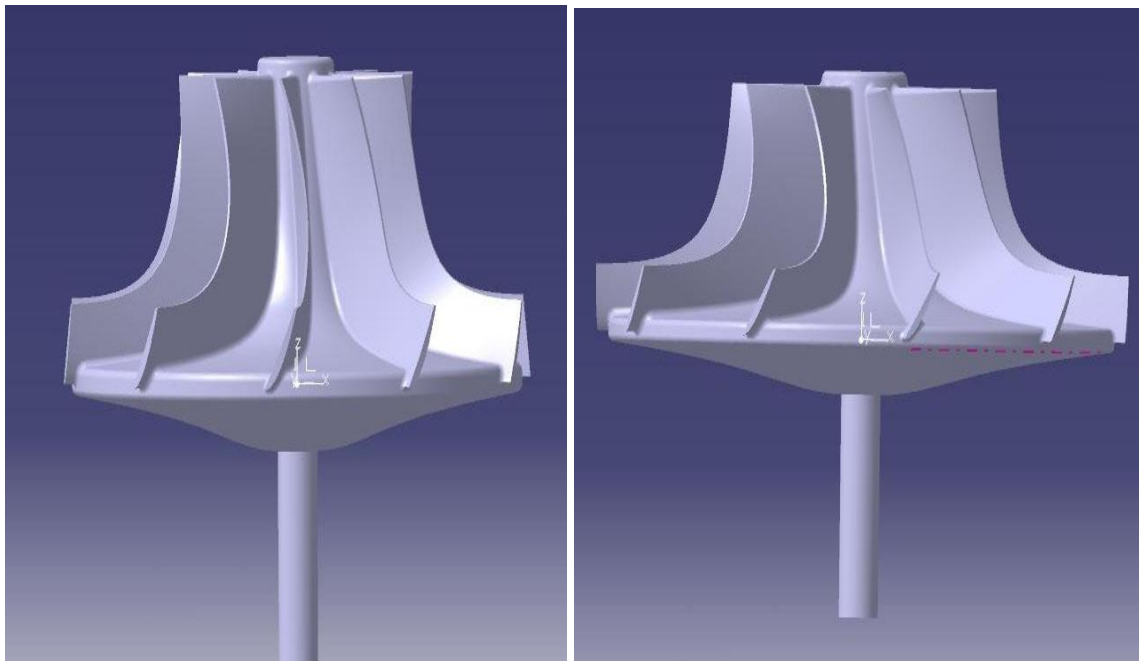
Σχήμα 2.25: Οι δύο επιφάνειες με τις οποίες έγινε η διαχώριση της μία φέτας της πτερωτής.



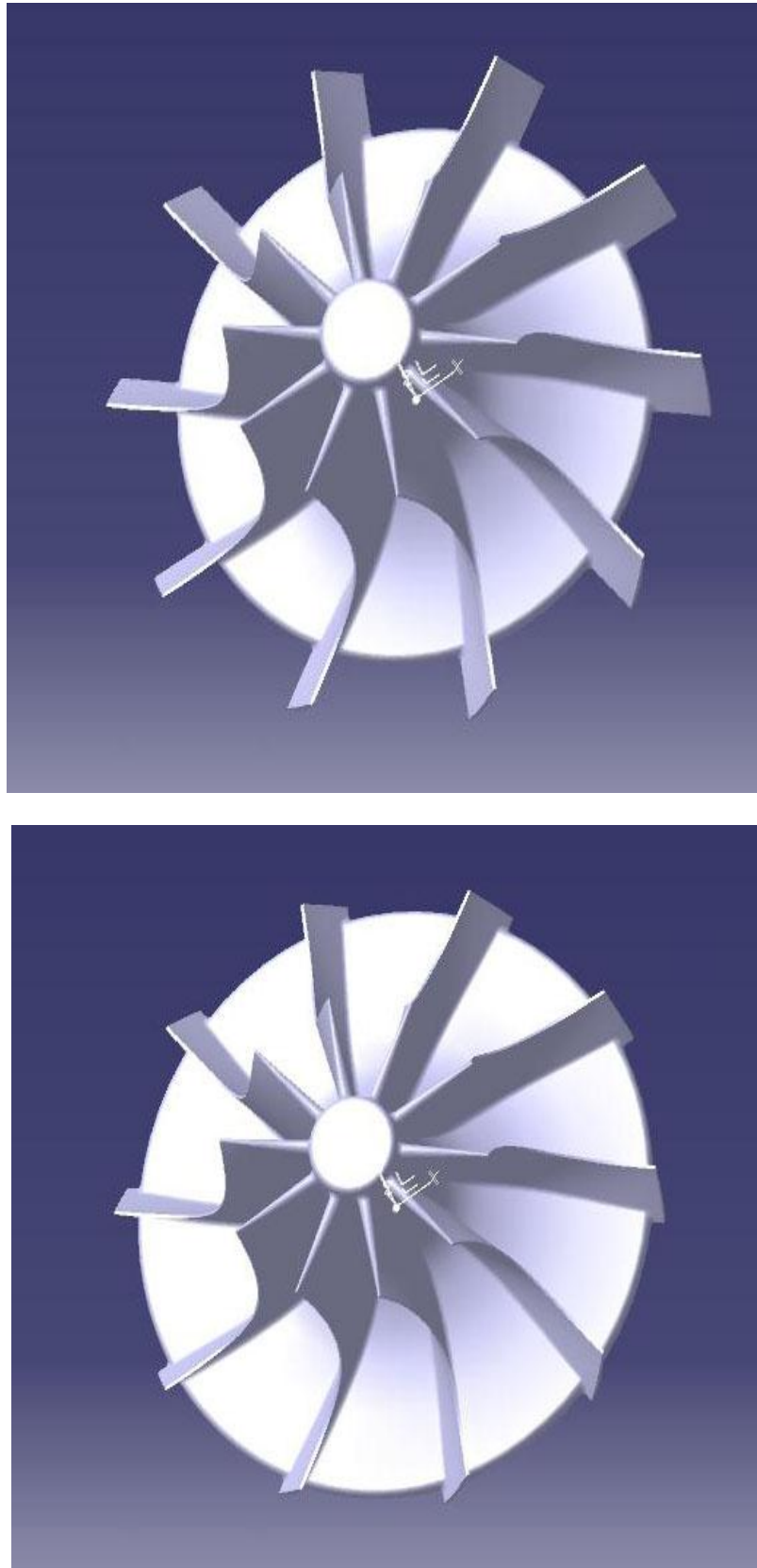
Σχήμα 2.26: Το τελικό τμήμα της περωτής, στο οποίο θα γίνει ανάλυση των καταπονήσεων.

2.2 Παράμετροι προς βελτιστοποίηση

Για την εύκολη και αυτόματη μεταβολή της γεωμετρίας, καθώς και των βασικών σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του στροβίλου, δημιουργήθηκε μία σειρά σχεδιαστικών παραμέτρων, τις οποίες ελέγχει ο χρήστης. Οι δύο βασικοί παράμετροι είναι το συνολικό αξονικό μήκος και η εξωτερική ακτίνα της περωτής (Σχήμα 2.27). Επιπλέον παράμετροι είναι το πάχος του περυγίου πάνω στην πλήμνη (διανομή), το πάχος του περυγίου πάνω στο κέλυφος (διανομή), η ακτίνα της πλάτης της περωτής ως ποσοστό της συνολικής ακτίνας της περωτής (Σχήμα 2.28), η διάμετρος του άξονα της περωτής, το μήκος του άξονα της περωτής, οι ακτίνες των «fillets» στα σημεία επαφής περυγίων και πλήμνης.



Σχήμα 2.27: Μεταβολές στις παραμέτρους που ορίζουν το μήκος και την εξωτερική ακτίνα της περωτής έχουν ως αποτέλεσμα τη συνολική μεταβολή της γεωμετρίας, χωρίς να απαιτείται τροποποίηση των υπολοίπων παραμέτρων.



Σχήμα 2.28: Μεταβολή στην εξωτερική ακτίνα της πλάτης της περωτής.

Τέλος ορίστηκε μία σειρά παραμέτρων που ελέγχουν τις συντεταγμένες X και Z του κάθε σημείου της πλάτης της περωτής ως ποσοστό επί της εξωτερικής ακτίνας και του συνολικού μήκους της περωτής του στροβίλου. Οι τελευταίες παράμετροι είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της περωτής. Όλες οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν επιτρέπουν την εύκολη και απροβλημάτιστη συνεργασία μεταξύ του διαφορικού εξελικτικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης της γεωμετρίας, της διαδικασίας ανάλυσης των καταπονήσεων αλλά και της κατασκευής του πλέγματος στο τμήμα της περωτής που αναλύεται. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κάθε μεταβολή σε παράμετρο να οδηγεί με ασφάλεια στην αυτόματη μεταβολή της γεωμετρίας, χωρίς προβλήματα, στην αυτόματη ανανέωση του πλέγματος και στην αυτόματη επίλυση του πεδίου των τάσεων. Σε διαφορετική περίπτωση δεν μπορεί να λειτουργήσει η αυτοματοποιημένη διαδικασία βέλτιστου σχεδιασμού. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η σωστή εφαρμογή της παραμετρικής σχεδίασης και ο προσεκτικός ορισμός της γεωμετρίας, ώστε το συνολικό γεωμετρικό μοντέλο να είναι ιδιαίτερα στιβαρό σε μεταβολές των παραμέτρων σχεδίασης.

2.3 Ανάλυση καταπονήσεων της περωτής

Για τον υπολογισμό και την ανάλυση των καταπονήσεων της περωτής του στροβίλου χρησιμοποιήθηκαν τα Advanced meshing tools και Generative structural analysis του λογισμικού CATIA. Η ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει τον υπολογισμό των τάσεων, που αναπτύσσονται στην περωτή λόγω περιστροφής. Στον υπολογισμό δεν λαμβάνονται υπόψη οι τάσεις λόγω αεροδυναμικών φορτίων. Η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται επαναληπτικά στη διαδικασία της βελτιστοποίησης για την αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης, που παράγει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

2.3.1 Δημιουργία Πλέγματος

2.3.1.1 Δομημένο & μη δομημένο Πλέγμα

Τα πλέγματα διαχωρίζονται σε δομημένα και μη δομημένα. Δομημένα πλέγματα ονομάζουμε τα πλέγματα στα οποία υπάρχει κάποιος νόμος μετάβασης μεταξύ των κόμβων, σε αντίθεση με τα μη δομημένα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα δομημένα πλέγματα γίνονται με τετραγωνικά κυβικά στοιχεία και τα μη δομημένα με τριγωνικά τετράεδρα [9].

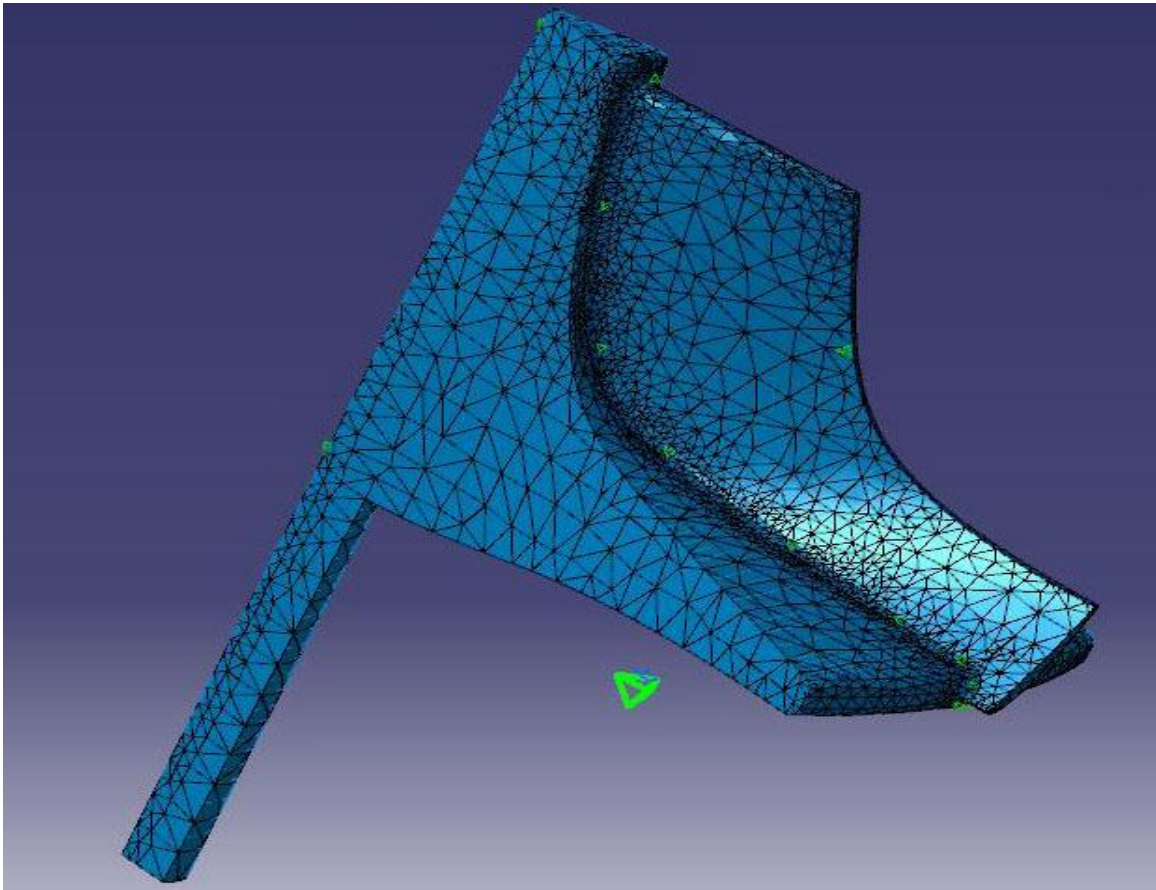
Τα μη δομημένα πλέγματα απαιτούν πιο περίπλοκους αλγορίθμους δημιουργίας, αλλά από την άλλη μεριά είναι πολύ πιο ευέλικτα στους περιορισμούς της γεωμετρίας και στις μεθόδους προσαρμοστικότητας. Τα δομημένα πλέγματα, πέραν της μεθόδου δημιουργίας τους, απαιτούν (στην περίπτωση τετραγωνικών-κυβικών στοιχείων) η επιφάνεια του στερεού να έχει τέσσερις πλευρές. Αν η γεωμετρία μας δεν το επιτρέπει αυτό μπορεί να επιτευχθεί διαχωρίζοντας το στερεό και χρησιμοποιώντας σε ορισμένες περιοχές τριγωνικά στοιχεία. Κάτι τέτοιο όμως σε μία γεωμετρία όπως αυτή της περωτής του στροβίλου είναι από πολύ δύσκολο ως αδύνατο να επιτευχθεί. Έτσι αποκλείστηκε η χρήση δομημένου πλέγματος, αφού αυτό παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα για την περίπτωση μας [9].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα στα δομημένα πλέγματα είναι ότι, λόγω του ότι υπάρχει κάποιος νόμος μετάβασης μεταξύ των κόμβων, είναι εύκολη και άμεση η δομή αποθήκευσης του πλέγματος και δεν είναι απαραίτητη η δημιουργία και η φύλαξη του πίνακα του αλγεβρικού συστήματος που προκύπτει. Τέλος είναι δυνατή η εύκολη δημιουργία του πλέγματος για σχετικά απλές γεωμετρίες [9].

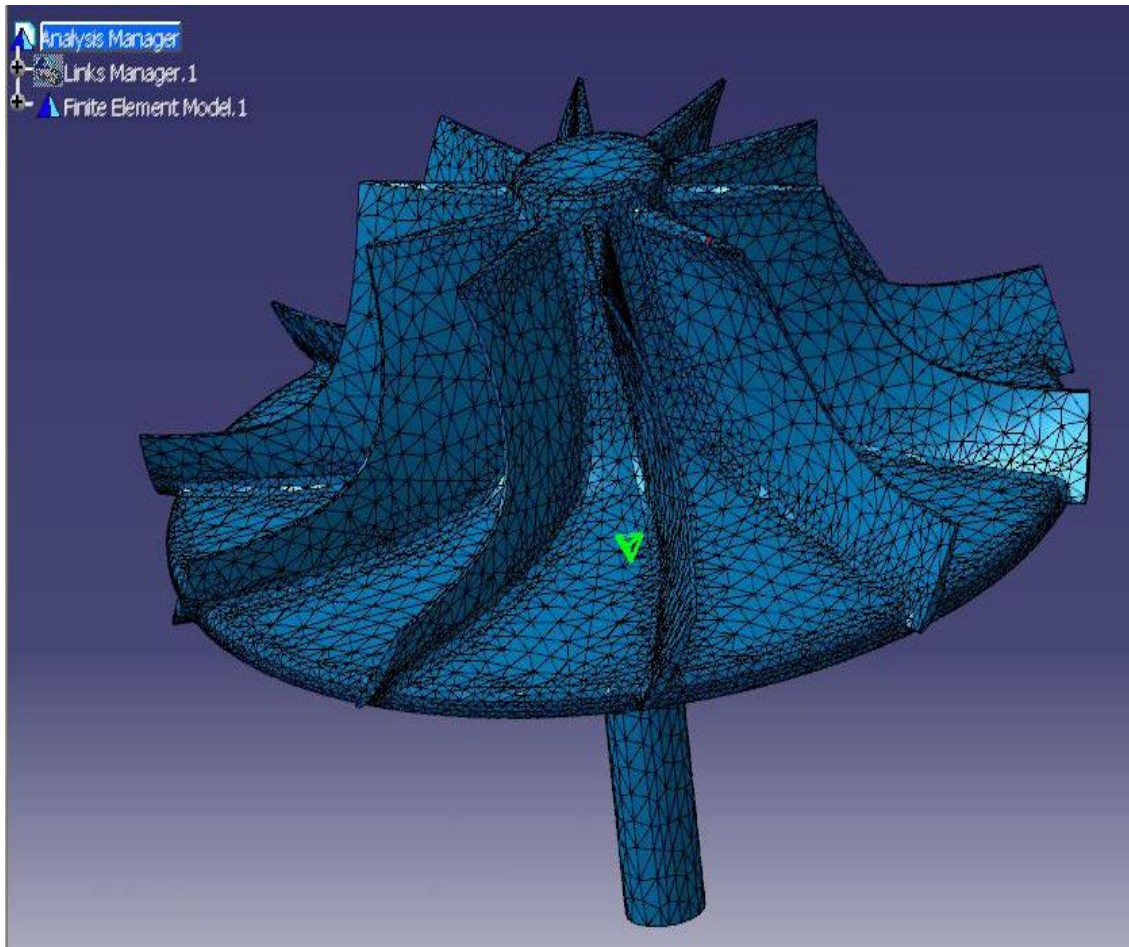
2.3.1.2 Χαρακτηριστικά πλέγματος

Η ανάλυση αντοχής της περωτής απαιτεί την δημιουργία πλέγματος με διαφορετική πυκνότητα ανάλογα με την πολυπλοκότητα του σχήματος και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε να λάβουμε. Η κατασκευή πλέγματος σε ολόκληρη την περωτή αντί για μία φέτα αυτής απαιτεί πολλαπλάσιο χρόνο υπολογισμού.

Το μη δομημένο πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σχηματίζεται από δευτέρου βαθμού τετράεδρα (με τυπικά μεγέθη 27.400 στοιχεία και 40.750 κόμβους, τα οποία μεταβάλλονται με τη μεταβολή της γεωμετρίας της πλάτης της πτερωτής). Το πλέγμα είναι ανομοιόμορφο με διαφορετική πυκνότητα ανάλογα με την περιοχή (Σχήμα 2.29). Οι περιοχές στις οποίες το πλέγμα είναι πυκνότερο είναι πάνω στο άξονα περιστροφής του στροβίλου, στα φιλέτα στην βάση του πτερυγίου καθώς και στην άκρη του πτερυγίου, όπου, όπως θα δούμε αργότερα, εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων. Αυτού του είδους τα πλέγματα απαιτούν περίπλοκους αλγόριθμους και αυξάνουν τον χρόνο του υπολογισμού των αποτελεσμάτων αλλά είναι απαραίτητα σε πολύπλοκα σχήματα όπως η πτερωτή που εξετάζουμε.



Σχήμα 2.29: Μη δομημένο πλέγμα με μεταβολές στην πυκνότητα.



Σχήμα 2.30: Κατασκευή πλέγματος σε ολόκληρη την περωτή.

2.3.2 Δεδομένα Ανάλυσης

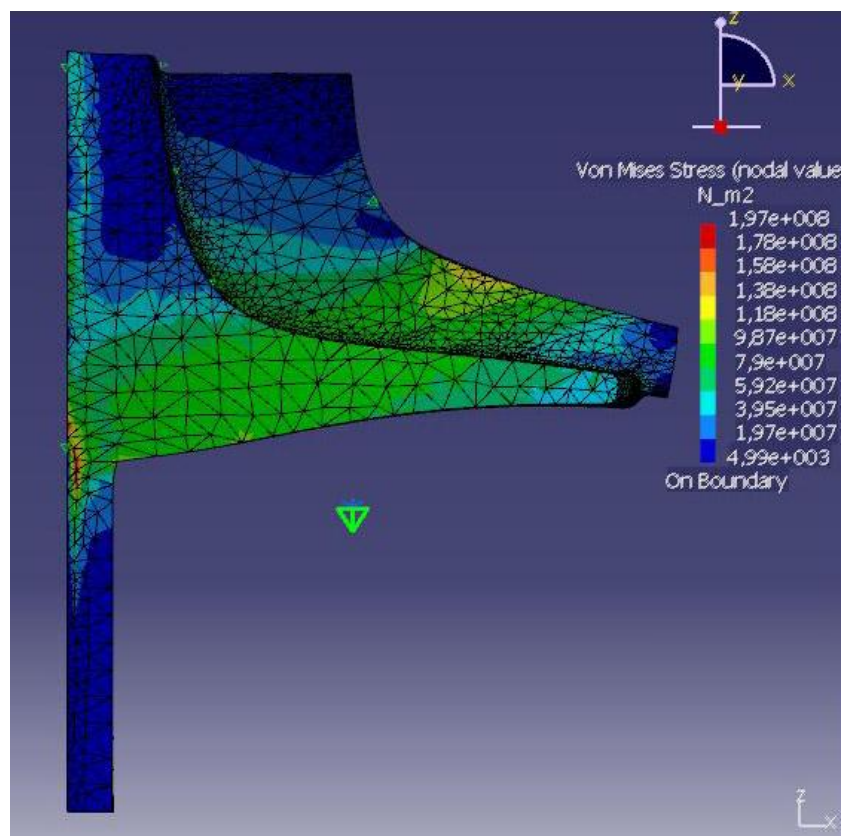
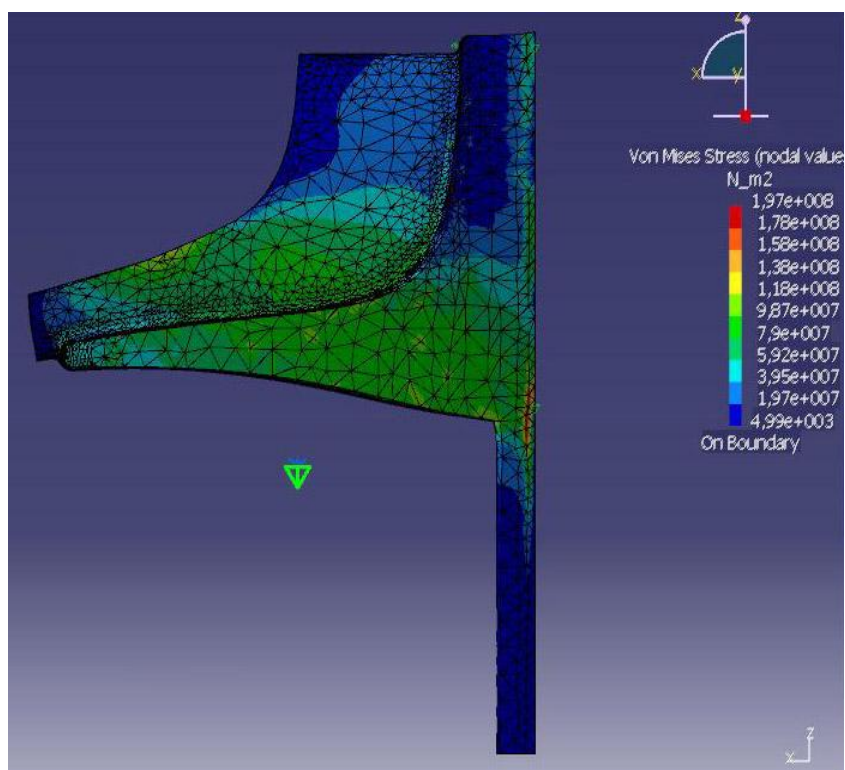
Οι στροφές περιστροφής της περωτής του στροβίλου ορίστηκαν στις 15.000 ανά λεπτό και είναι αυτές που δημιουργούν τις φυγοκεντρικές δυνάμεις, που καταπονούν την δομή της περωτής. Επίσης ορίστηκε συνθήκη περιοδικότητας στις πλευρικές επιφάνειες της φέτας της περωτής. Αυτή η συνθήκη ορίζει τους βαθμούς ελευθερίας του τμήματος που αναλύουμε και μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τις καταπονήσεις μόνο σε ένα μέρος της περωτής αλλά τα αποτελέσματα αντιπροσωπεύουν ολόκληρο την περωτή, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την δραστική μείωση του χρόνου υπολογισμού των καταπονήσεων. Επίσης ορίστηκε περιορισμός ως προς τον βαθμό ελευθερίας του τενμαίου στην ακμή που είναι πάνω στο άξονα περιστροφής (user defined restraint). Ο συγκεκριμένος περιορισμός είναι τύπου global, που σημαίνει ότι λειτουργεί με το γενικό σύστημα συντεταγμένων ενώ έχει restraint translation 1, 2 και 3, που σημαίνει ότι δεν επιτρέπεται καμία κίνηση ως προς τους άξονες X, Y και Z. Τέλος ορίστηκε ο άξονας περιστροφής

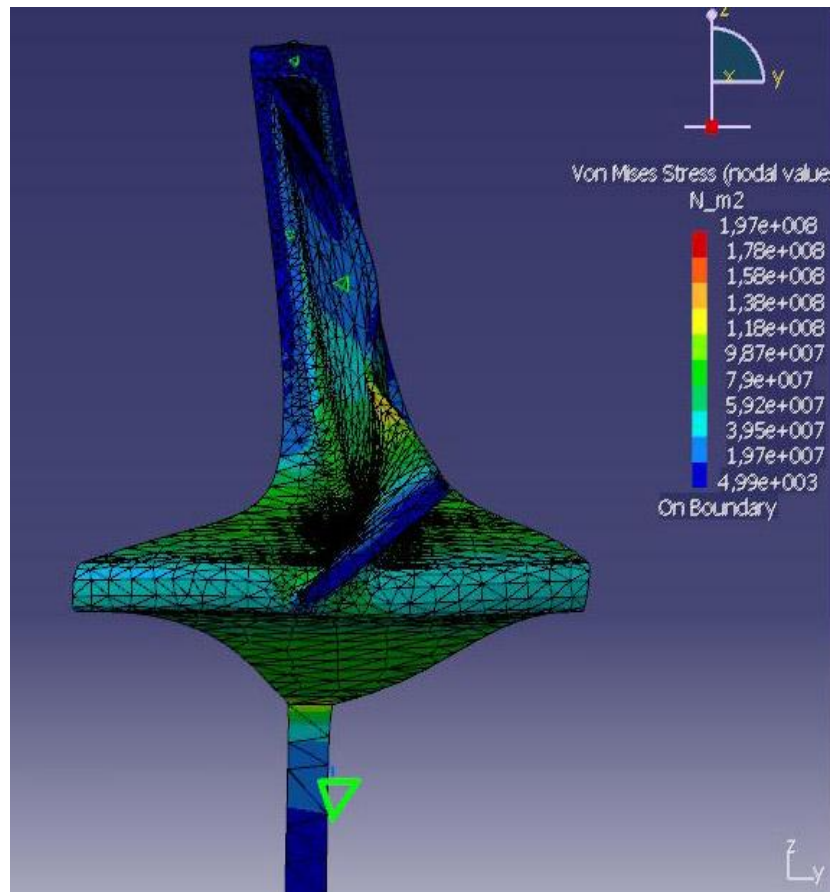
της περωτής, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο άξονας Z, καθώς και το υλικό του, που είναι χάλυβας (Young modulus= $2\text{E}+011\text{N/m}^2$, Poisson ratio= 0.266, Density= 7860 kg/m^3 , Thermal expansion= $1.17\text{E}-005\text{ /Kdeg}$, Yield strength= $2.5\text{E}+008\text{ N/m}^2$)

2.3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης καταπονήσεων

Στα παρακάτω σχήματα, που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Σχήμα 2.31), οι χρωματιστοί μας βοηθούν να αναγνωρίσουμε τις περιοχές με τις υψηλότερες ισοδύναμες τάσεις von Mises, οι οποίες παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα. Οι περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις είναι δύο. Η πρώτη είναι πάνω στον άξονα περιστροφής κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο και μειώθηκε όσο προσθέσαμε υλικό κοντά στον άξονα. Η δεύτερη περιοχή είναι στην μέση της άκρης του πτερυγίου, που είναι η περιοχή του πτερυγίου που έχει παραμορφωθεί περισσότερο, όπως φαίνεται στην τρίτη εικόνα. Αυτή η παραμόρφωση είναι λογική αφού, αφαιρώντας υλικό από την άκρη της πλάτης της περωτής, αυτό οδηγεί το πίσω μέρος να στηρίζεται κυρίως στα πτερύγια, τα οποία φορτίζονται περισσότερο. Η αφαίρεση υλικού στην άκρη της πλάτης όμως ήταν αναπόφευκτη για την αποφόρτιση της πρώτης περιοχής υψηλών τάσεων, που αναφέρθηκε νωρίτερα.

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης, εκτός από την μέγιστη von Mises τάση υπολογίσαμε και το συνολικό σφάλμα της επίλυσης, που πήρε τελική τιμή 6.034%, αποτέλεσμα ικανοποιητικό αφού είναι αρκετά κάτω από το απαραίτητο 10%. Επίσης υπολογίστηκε και η μέγιστη παραμόρφωση που προκλήθηκε από τα φορτία, που πήρε τιμή 0,058mm.





Σχήμα 2.31: Αποτελέσματα ανάλυσης καταπονήσεων βασικής σχεδίασης πριν τη βελτιστοποίηση.

Κεφάλαιο 3

Βελτιστοποίηση γεωμετρίας πτερωτής ακτινικής ροής

3.1 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας της πλάτης πτερωτής ακτινικής ροής με την χρήση διαφορικού εξελικτικού αλγορίθμου

Στόχος είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της πλάτης της πτερωτής θεωρώντας δεδομένη την γεωμετρία των πτερυγίων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των τάσεων που προκύπτουν κατά την περιστροφή της. Για τον σκοπό αυτό μοντελοποιήθηκε η πλάτη με παραμέτρους που ελέγχουν τις συντεταγμένες ως προς τους άξονες X και Z των σημείων που σχηματίζουν την επιφάνεια της πλάτης.

Ύστερα από τις πρώτες αναλύσεις των καταπονήσεων δοκιμάσαμε διάφορες γεωμετρίες για την πτερωτή, με σκοπό την μείωση τους. Με διαδοχικές δοκιμές καταλήξαμε σε μία αρχική σχεδίαση της πλάτης προσθέτοντας υλικό κοντά στον άξονα περιστροφής και αφαιρώντας μακριά από αυτόν. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μείωση των φυγόκεντρων δυνάμεων άρα και την μείωση και των καταπονήσεων. Ένα άλλο σημείο της αρχικής πτερωτής, το οποίο τροποποιήθηκε, ήταν το προφίλ του κελύφους και της πλήμνης στο μεσημβρινό επίπεδο. Όπως φάνηκε στις εικόνες της ανάλυσης των καταπονήσεων, υπήρχε μία συγκέντρωση τάσεων στην μέση περίπου του μήκους του προφίλ του πτερυγίου.

Για την βελτιστοποίηση της πλάτης της πτερωτής χρησιμοποιήθηκε κώδικας (Ι. Βαλάκος, Μ. Ντιπτένη, Ι. Νικολός) [12], ο οποίος έχει εξελιχθεί ώστε να συνεργάζεται με το CATIA. Αυτός ο αλγόριθμος δημιουργεί ένα τυχαίο πληθυσμό (το μέγεθος του πληθυσμού ορίζεται από τον χρήστη) και ύστερα ξεκινά μία διαδικασία που παράγει νέους πληθυσμούς για κάθε γενιά, μέχρι να ικανοποιηθεί μία συνθήκη τερματισμού. Τα στοιχεία του αρχικού πληθυσμού αντικαθίστανται από τα στοιχεία νεότερων γενιών στην περίπτωση που αυτά είναι καλύτερα. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε επιτρέπει στον χρήστη μέσω ενός εύχρηστου γραφικού περιβάλλοντος να χειριστεί τις παραμέτρους της σχεδίασης αλλά και την αντικειμενική συνάρτηση, ώστε να καθορίσει το πρόβλημα που τίθεται υπό βελτιστοποίηση.

Οι παράμετροι που τέθηκαν προς βελτιστοποίηση ήταν οι Z_2 , Z_3 , Z_4 και Z_5 . Ο κατάλληλος αριθμός παραμέτρων, που τίθενται κάθε φορά υπό βελτιστοποίηση, πρέπει

να επιλέγεται με προσοχή. Η χρήση πολύ λίγων παραμέτρων προς βελτιστοποίηση μπορεί να περιορίσει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και να αποκλίσει ενδιαφέρουσες γεωμετρίες. Στην αντίθετη περίπτωση η χρήση πολλών παραμέτρων περιπλέκει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και μπορεί να δημιουργήσει παρενέργειες στα αποτελέσματα όπως διατομές των επιφανειών μεταξύ τους.

Οι τιμές των παραμέτρων που τέθηκαν υπό βελτιστοποίηση είναι ποσοστά επί του συνολικού μήκους του στροβίλου στην αξονική διεύθυνση Z και τα άνω και κάτω όρια τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή κάθε παραμέτρου περιορίζονται σε κάποιες λογικές τιμές, με σκοπό τον αποκλεισμό γεωμετριών οι οποίες σίγουρα δεν δίνουν βέλτιστα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά είναι σίγουρο πως κάποιες τιμές των παραμέτρων μέσα σε αυτά τα όρια δίνουν μη επιθυμητά αποτελέσματα.

Σχήμα 3.1: Όρια παραμέτρων προς βελτιστοποίηση

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	Z2	Z3	Z4	Z5
ΚΑΤΩ ΟΡΙΟ	0,01	0,05	0,15	0,2
ΑΝΩ ΟΡΙΟ	0,2	0,25	0,35	0,6

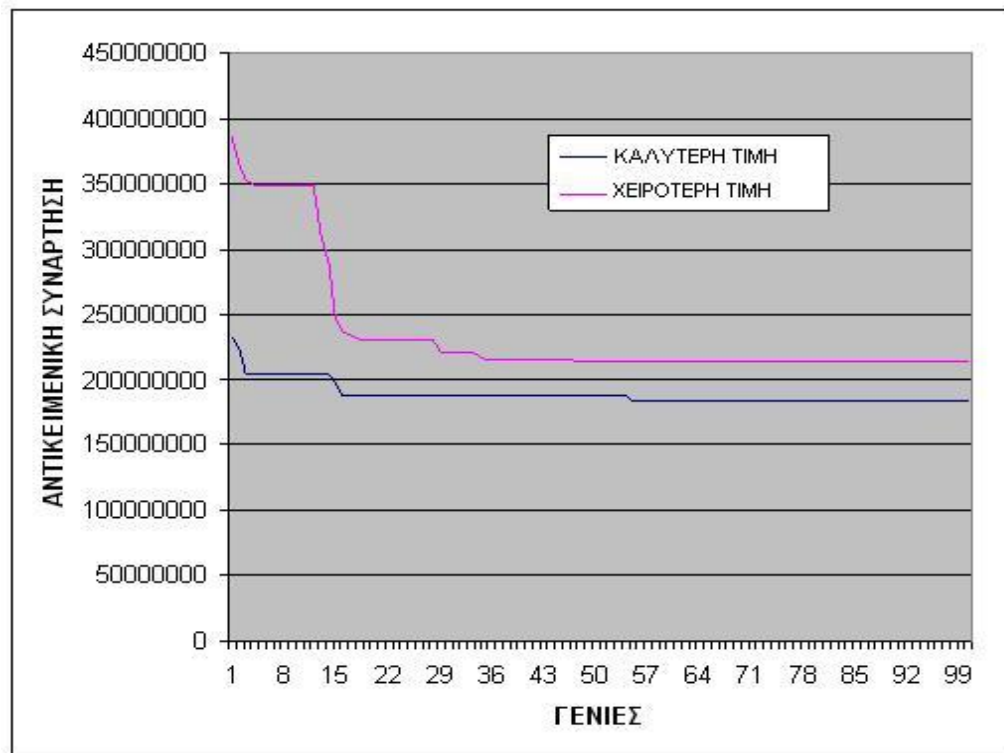
Η αντικειμενική συνάρτηση που τέθηκε υπό ελαχιστοποίηση ήταν το μέγεθος των Von Mises τάσεων (η μέγιστη τιμή τους). Επίσης ορίστηκαν το πλήθος των γενιών του γενετικού αλγορίθμου στις 100 και ο πληθυσμός κάθε γενιάς στο 15. Μικρότερου μεγέθους πληθυσμοί (<10) συγκλίνουν πρόωρα, χωρίς να έχουν καταλήξει στις βέλτιστες λύσεις, λόγω μικρού δείγματος στο αρχικό πληθυσμό. Μεγαλύτεροι πληθυσμοί (>25) αργούν πολύ να συγκλίνουν στην βέλτιστη γεωμετρία και μπορεί να επιτραπούν λιγότερες γενιές στην περίπτωση που ο αλγόριθμος έχει σταθερή τιμή. Οι παράμετροι F και C_r που επηρεάζουν το ρυθμό σύγκλισης του αλγορίθμου πήραν τιμές 0,6 και 0,45 αντίστοιχα. Επίσης επιλέχθηκε η εξέλιξη του αλγορίθμου χωρίς ανανέωση της απεικόνισης του στροβίλου, αφού κάτι τέτοιο θα καθυστέρουσε σημαντικά την διαδικασία.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την βελτιστοποίηση των παραμέτρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Ο χρόνος υπολογισμού των τελικών αποτελεσμάτων από τον υπολογιστή (Dual core AMD 3800+ processor) ήταν λίγο παραπάνω από 50 ώρες επεξεργασίας. Πριν ο αλγόριθμος καταλήξει στα τελικά αποτελέσματα ήταν πολλές οι φορές που τερματίστηκε η διαδικασία λόγω προβλημάτων στο πλέγμα. Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης η γεωμετρία του στροβίλου άλλαζε σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα το πλέγμα να παρουσιάζει ατέλειες και να χρειάζεται πολλές τοπικές διορθώσεις.

Σχήμα 3.2: Τελικά αποτελέσματα παραμέτρων βελτιστοποίησης

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΤΙΜΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ
Z2	0,090121864
Z3	0,134663664
Z4	0,202952244
Z5	0,206036735

Το αποτέλεσμα της μέγιστης Von Mises τάσης μετά την βελτιστοποίηση μέσω του αλγορίθμου ήταν μείωση 28% σε σχέση με το πρώτο μοντέλο που είχε ίσιο πίσω μέρος του στροβίλου και μείωση 15% σε σχέση με το μοντέλο που προέκυψε προσθέτοντας υλικό κοντά στον άξονα περιστροφής ύστερα από τις πρώτες αναλύσεις των καταπονήσεων. Έτσι η τελική τιμή της μέγιστης Von Mises τάσης μετά την βελτιστοποίηση είχε τιμή $1,813 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. Οι καλύτερες τιμές και οι χειρότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την διάρκεια σύγκλισης του ΔΕ αλγορίθμου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα σύγκλισης ΔΕ αλγορίθμου με το λογισμικό DEoptimizer.

3.2 Ο Διαφορικός Εξελικτικός αλγόριθμος

Ο Διαφορικός Εξελικτικός (ΔΕ) αλγόριθμος αποτελεί έναν τύπο Εξελικτικών Στρατηγικών και αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να διαχειρίζεται προβλήματα βελτιστοποίησης ορισμένα σε συνεχή πεδία, τα οποία συναντώνται συχνά στη μηχανολογική σχεδίαση. [13]

Ο κλασικός ΔΕ αλγόριθμος εξελίσσει ένα σταθερό μέγεθος πληθυσμού, ο οποίος αρχικοποιείται γεννώντας τυχαίες τιμές για τις παραμέτρους των χρωμοσωμάτων μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Έπειτα από την αρχικοποίηση του πληθυσμού, ξεκινάει μια επαναληπτική διαδικασία, όπου σε κάθε επανάληψη (γενιά), παράγεται ένας νέος πληθυσμός, μέχρι να ικανοποιηθεί μια συνθήκη τερματισμού. Σε κάθε γενιά κάθε άτομο του πληθυσμού μπορεί να αντικατασταθεί από ένα νέο άτομο. Το νέο άτομο είναι γραμμικός συνδυασμός μεταξύ ενός τυχαία επιλεγμένου ατόμου και τη διαφορά δύο άλλων τυχαία επιλεγμένων χρωμοσωμάτων. Πέρα από το μέγεθος του πληθυσμού, άλλες παράμετροι του αλγορίθμου είναι η πιθανότητα επιλογής στον τελεστή επιχiasμού (C_r) καθώς και ένας παράγοντας πολλαπλασιασμού που ενισχύει τη διαδικασία της διαφοράς (F). Εμπειρικές μελέτες έδειξαν ότι η σύγκλιση του ΔΕ αλγορίθμου εξαρτάται σημαντικά από τις παραμέτρους αυτές. [13]

Δεδομένης μιας αντικειμενικής συνάρτησης $f(X): \square^{n_{\text{παραμ}}} \rightarrow \square$, στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, βελτιστοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων της $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n_{\text{παραμ}}})$, $x \in \square$, όπου X το διάνυσμα που αποτελείται από τις $n_{\text{παραμ}}$ παραμέτρους της αντικειμενικής συνάρτησης (ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης). Αυτές οι παράμετροι παίρνουν τιμές μεταξύ καθορισμένων άνω και κάτω ορίων: $x_j^{(L)} \leq x_j \leq x_j^{(U)}$, $j=1, \dots, n_{\text{παραμ}}$. Ο ΔΕ αλγόριθμος εφαρμόζει πραγματική κωδικοποίηση για τις τιμές των παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης. Προκειμένου να υπάρξει κάποιο σημείο εκκίνησης για τον αλγόριθμο πραγματοποιείται αρχικοποίηση του πληθυσμού. Συχνά η μόνη διαθέσιμη πληροφορία είναι τα όρια των παραμέτρων, γι' αυτό και η αρχικοποίηση γίνεται δίνοντας τυχαίες τιμές στις παραμέτρους μεταξύ των δοσμένων ορίων: $x_{i,j}^{(0)} = r \cdot (x_j^{(U)} - x_j^{(L)}) + x_j^{(L)}$ όπου $i=1, \dots, n_{\text{πληθ}}$, $j=1, \dots, n_{\text{παραμ}}$ και r μια τυχαία τιμή ομοιόμορφης κατανομής στο $[0, 1]$. Το σχήμα αναπαραγωγής του πληθυσμού του ΔΕ παράγει ένα προσωρινό πληθυσμό ως ακολούθως:

$$x'_{i,j}^{(G+1)} = \begin{cases} x_{C_i,j}^{(G)} + F(x_{A_i,j}^{(G)} - x_{B_i,j}^{(G)}) & \text{εάν } r \leq C_r \quad \forall j=1, \dots, n_{\text{παραμ}} \\ x_{i,j}^{(G)} & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου

$$i=1, \dots, n_{\text{πληθ}}, j=1, \dots, n_{\text{παραμ}}$$

$$A=1, \dots, n_{\text{πληθ}}, B=1, \dots, n_{\text{πληθ}}, C=1, \dots, n_{\text{πληθ}}, A_i \neq B_i \neq C_i \neq i$$

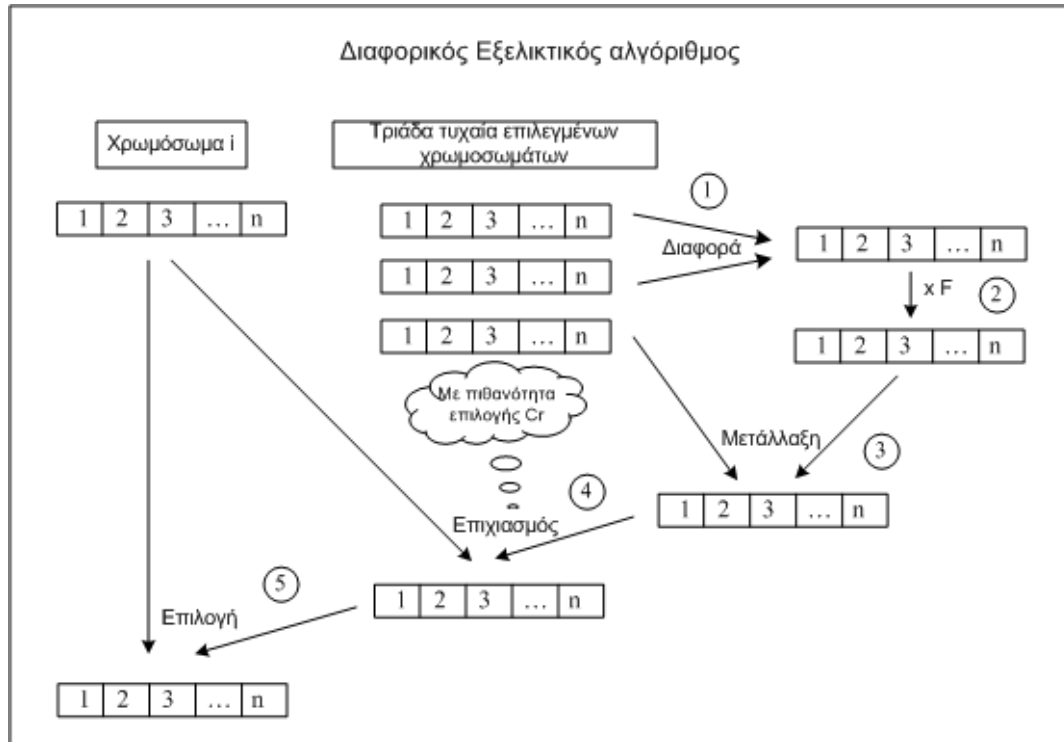
$$C_r \in [0,1], F \in [0,2], r \in [0,1]$$

Για κάθε υπό εξέλιξη χρωμόσωμα τα A , B και C είναι τυχαία επιλεγμένα χρωμοσώματα του πληθυσμού, τα οποία είναι διαφορετικά μεταξύ τους και διαφορετικά από το υπό εξέλιξη χρωμόσωμα. Ο τυχαίος αριθμός r γεννάται για κάθε παράμετρο του χρωμοσώματος. Οι F και C_r παραμένουν σταθερές κατά τη διαδικασία εξέλιξης, επηρεάζοντας την ταχύτητα σύγκλισης και τη συνολική ευρωστία του αλγορίθμου. Εξαρτώνται από την αντικειμενική συνάρτηση, τα χαρακτηριστικά του προβλήματος και το μέγεθος του πληθυσμού. Οι βέλτιστες τιμές αυτών των παραμέτρων λαμβάνονται συνήθως μέσω διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος. Το σχήμα επιλογής του ΔΕ αλγορίθμου περιγράφεται ως ακολούθως:

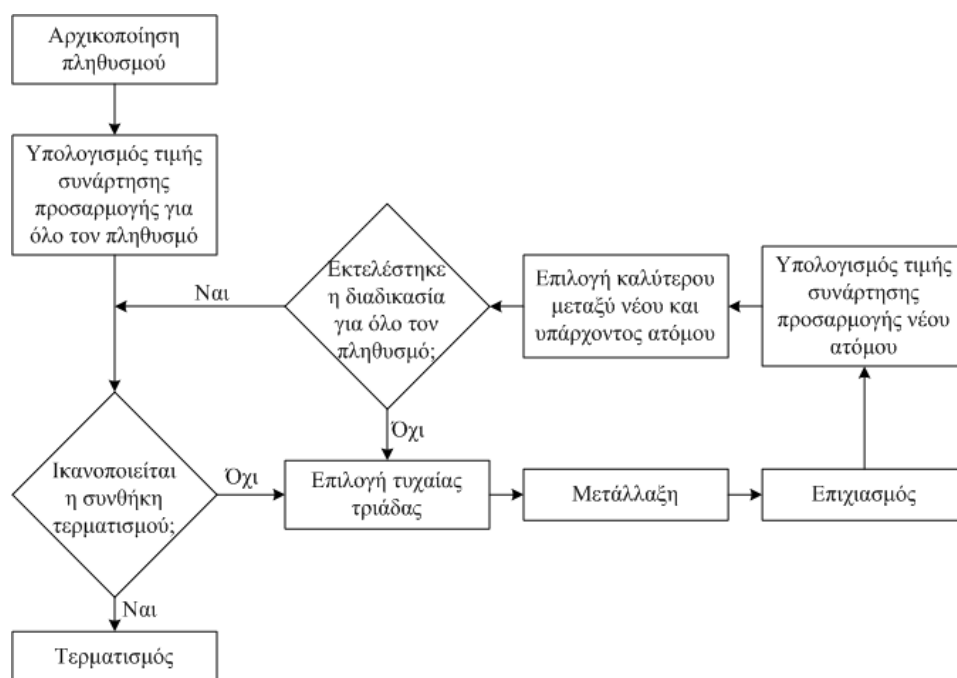
$$X_i^{(G+1)} = \begin{cases} X_i'^{(G+1)} & \text{εάν } f_{\text{κόστους}}(X_i'^{(G+1)}) \leq f_{\text{κόστους}}(X_i^{(G)}) \\ X_i^{(G)} & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Σύμφωνα με αυτό, επιλέγεται το προσωρινό ή το υπάρχον χρωμόσωμα βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης, ώστε να διαμορφωθεί τελικά ένας νέος πληθυσμός. Με αυτό τον τρόπο όλα τα άτομα της επόμενης γενιάς είναι εξίσου καλά ή καλύτερα από τα

αντίστοιχα τους στον υπάρχοντα πληθυσμό (ελιτιστικό μοντέλο). Η γενική διαδικασία που ακολουθείται σε ένα ΔΕ αλγόριθμο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Στο Σχήμα 3.5, που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής των βασικών λειτουργιών του ΔΕ αλγορίθμου.



Σχήμα 3.4: Διαδικασία λειτουργίας Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου [13].



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής του Διαφορικού Εξελικτικού αλγορίθμου [13].

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του ΔΕ αλγορίθμου συνοψίζονται παρακάτω:

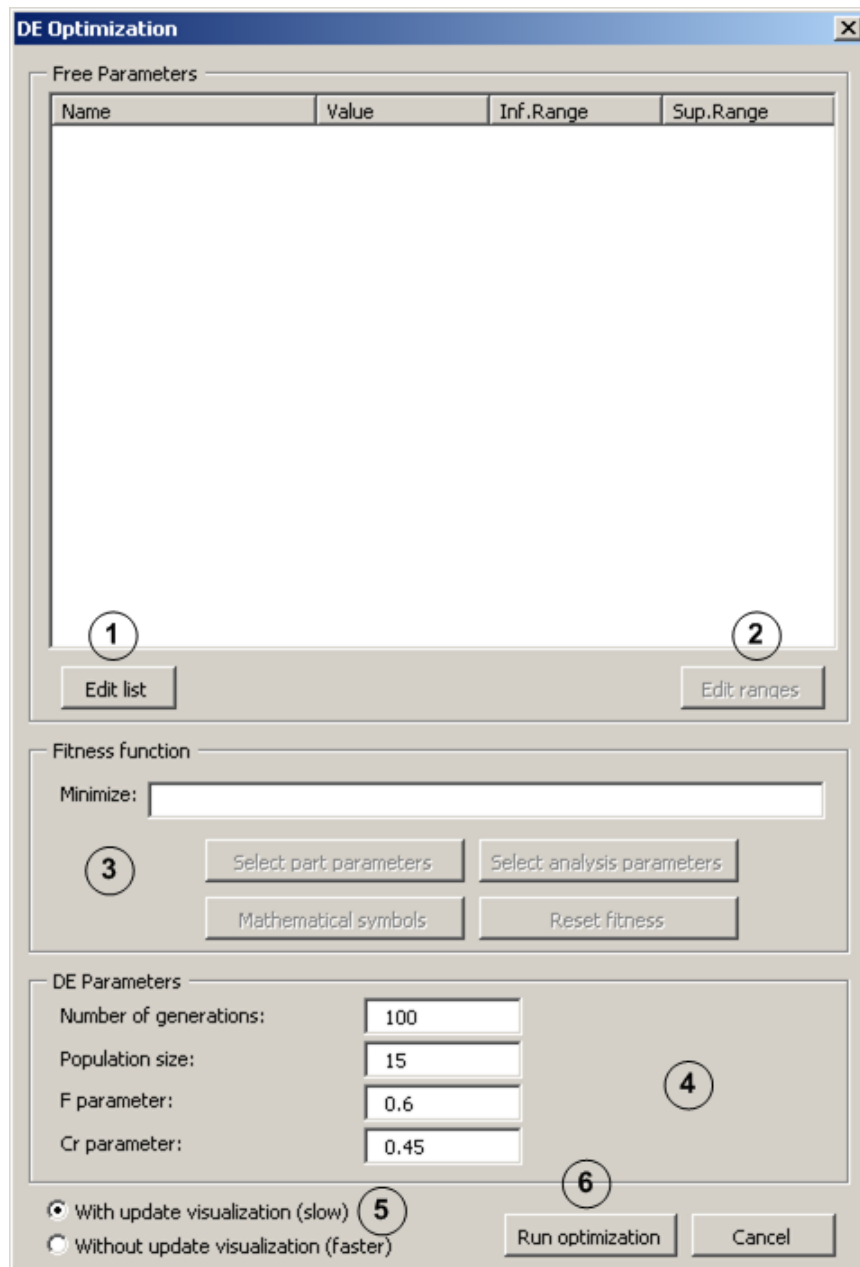
- Δεν απαιτείται μία αρχική εφικτή λύση για την έναρξη της λειτουργίας τους.
- Είναι ιδιαίτερα απλός στον προγραμματισμό και στην εφαρμογή.
- Διαθέτει μικρό αριθμό ρυθμιστικών παραμέτρων.
- Είναι εύρωστος και αξιόπιστος.
- Παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά σύγκλισης σε σχέση με τους τυπικούς Γενετικούς Αλγορίθμους.
- Μπορεί να χειριστεί προβλήματα με μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης.
- Μπορεί να χειριστεί ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης πραγματικού τύπου, ακέραιου τύπου καθώς και διακριτών τιμών [13].

3.3 Το πρόγραμμα DEoptimizer

Το λογισμικό που υλοποιεί τον ΔΕ αλγόριθμο αναπτύχθηκε από τον Ι. Βαλάκο [13] και είναι ενσωματωμένο στο CATIA (plug-in), χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού VBA (Visual Basic for Applications) σε συνδυασμό με την ανοικτή αρχιτεκτονική του CATIA (open CAA V5 – CATIA V5 Automation Architecture). Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει τη χρησιμοποίηση «εκτεθειμένων» αντικειμένων αυτοματοποίησης (exposed automation objects) και δίνει πρόσβαση στις αντίστοιχες ιδιότητες (properties) και μεθόδους (methods), μέσω της γλώσσας VBA. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης, μπορεί για παράδειγμα να διαχειριστεί πλήρως ένα αρχείο γεωμετρίας ή ανάλυσης, ώστε να αυτοματοποιήσει μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμής και σφάλματος (trial and error) [13].

Σκοπός του προγράμματος είναι, μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος, να δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα ξεκινώντας από τη σχεδιασμένη γεωμετρία, να προσδιορίζει: τις ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης, τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών αυτών, το αντίστοιχο αρχείο ανάλυσης, την επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον ΔΕ αλγόριθμο, να πραγματοποιεί τη βελτιστοποίηση, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση.

Τα προαπαιτούμενα στοιχεία είναι πρώτον η ύπαρξη του αρχείου της γεωμετρίας, η οποία έχει σχεδιαστεί και φορτωθεί στο πακέτο CATIA V5 (*.CATPart) και δεύτερον του αντίστοιχου αρχείου της ανάλυσης (*.CATAnalysis), το οποίο περιλαμβάνει, τη διασύνδεση (link) με την αρχική γεωμετρία, το μη-δομημένο πλέγμα, τις συνοριακές συνθήκες και τις φορτίσεις.



Σχήμα 3.6: Βασική φόρμα του προγράμματος DEoptimizer και βήματα.

Η κλήση του προγράμματος γίνεται είτε από το μενού του CATIA (Tools→Macro→Macros), είτε χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο πλήκτρο στην ειδικά διαμορφωμένη γραμμή εργαλείων (custom toolbar). Καλώντας το αρχείο DEoptimizer.catvba, ο χρήστης εισάγεται στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν είναι τα εξής:

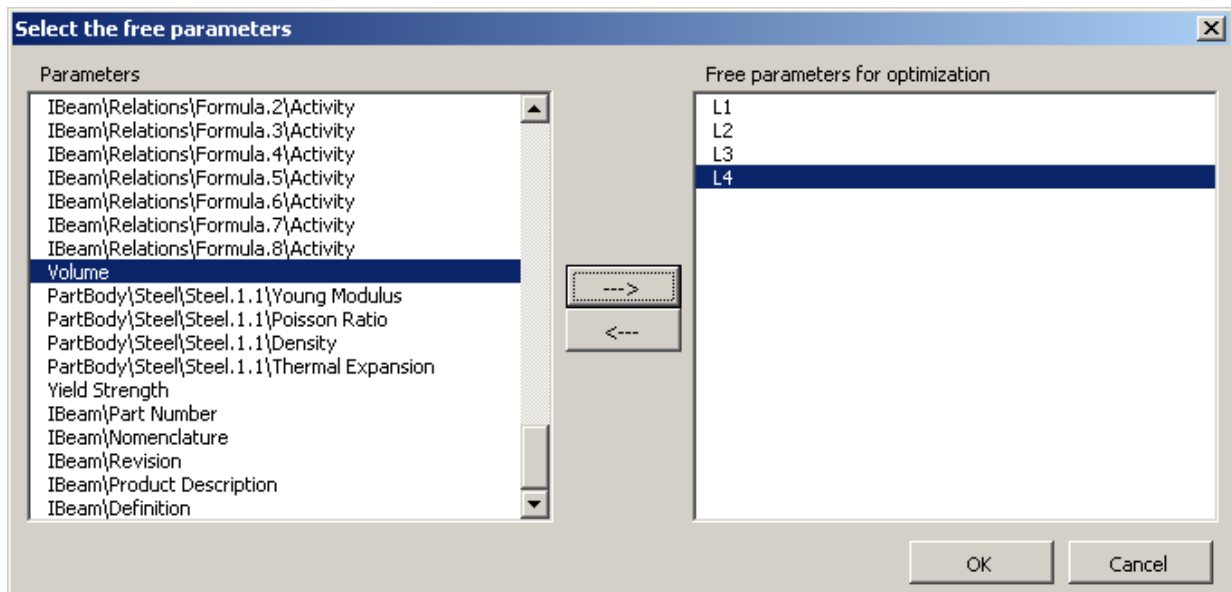
1. Προσδιορισμός των ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης, μέσω της εντολής “Edit list”.
2. Προσδιορισμός των άνω και κάτω ορίων των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης, μέσω της εντολής “Edit ranges”.

3. Προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση, μέσω των εντολών “Select part parameters”, “Select analysis parameters”, “Mathematical symbols” και “Reset fitness”.
4. Προσδιορισμός των ρυθμιστικών παραμέτρων του ΔΕ αλγορίθμου, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα πεδία.
5. Επιλογή για το εάν θα υπάρχει ή όχι δυναμική ανανέωση της γεωμετρίας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.
6. Επιβεβαίωση των επιλογών και εκτέλεση της βελτιστοποίησης, μέσω της εντολής “Run optimization” [13].

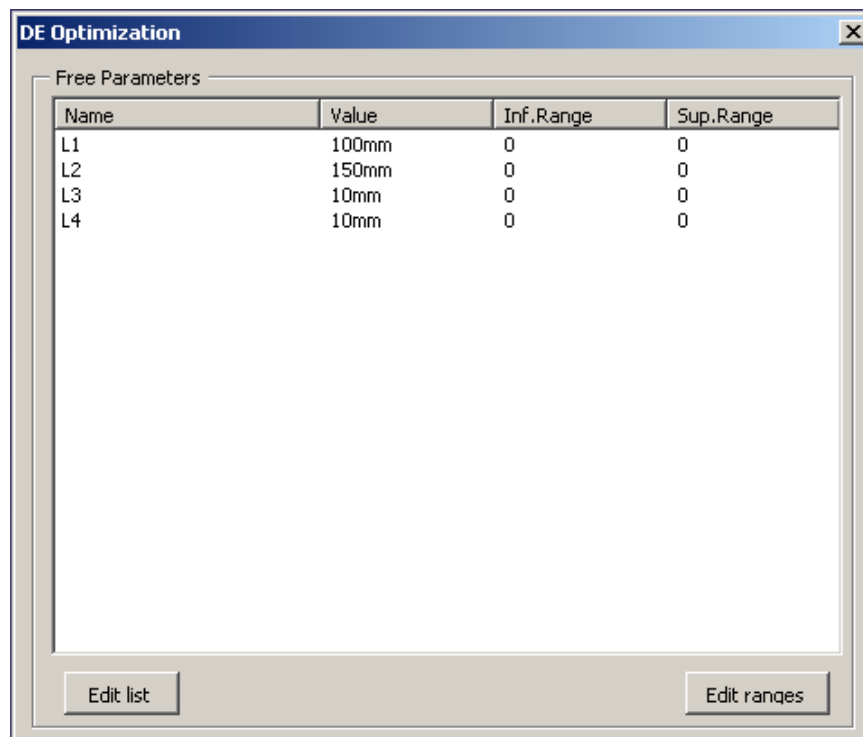
Παρακάτω αναλύονται εκτενέστερα τα έξι βασικά βήματα, με την εφαρμογή του προγράμματος DEoptimizer για τη βελτιστοποίηση σχεδίασης μιας κατασκευαστικής δοκού τύπου I (μονοκριτήρια βελτιστοποίηση) [13]. Η σχεδίαση της γεωμετρίας έχει ήδη πραγματοποιηθεί και φορτωθεί στο CATIA (IBeam.CATPart) και το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων έχει οριστεί κατάλληλα (IBeam.CATAnalysis). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης είναι οι L_1, L_2, L_3, L_4 και η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι η $\min f = \frac{\{\text{von Mises stress}\}_{\max}}{\text{material Yield Strength}}$.

⇒ Η εντολή “Edit list”

Με το πάτημα του πλήκτρου “Edit list” εμφανίζεται η φόρμα επιλογής των ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης (Σχήμα 3.7), η οποία χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο αριστερό τμήμα υπάρχει η λίστα όλων των μεταβλητών σχεδίασης, που αφορούν τη συγκεκριμένη γεωμετρία, και στο δεξί τμήμα τοποθετούνται οι επιλεγμένες ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτές είναι οι L_1, L_2, L_3, L_4 . Μετά την επιβεβαίωση του χρήστη, οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης εμφανίζονται στη βασική φόρμα του προγράμματος (Σχήμα 3.8). Εάν ο χρήστης επιθυμεί να προσθέσει και άλλες μεταβλητές σχεδίασης, μπορεί να επαναλάβει την παραπάνω διαδικασία, όσες φορές είναι απαραίτητο [13].



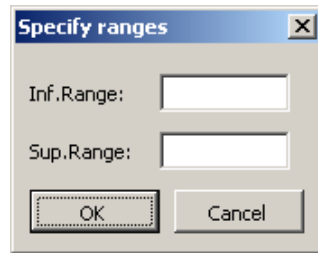
Σχήμα 3.7: Φόρμα επιλογής ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης.



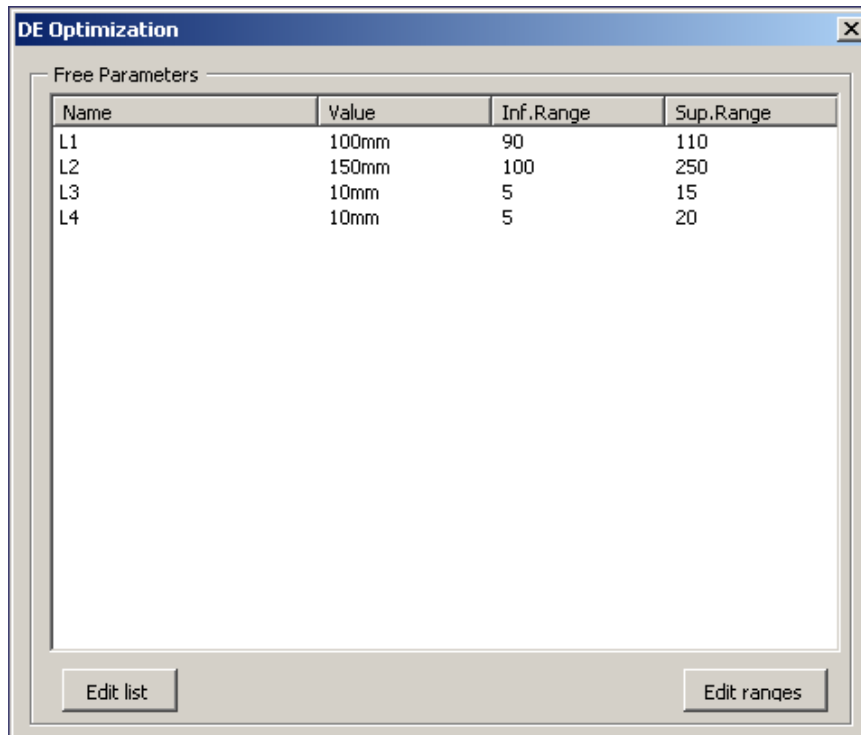
Σχήμα 3.8: Εμφάνιση των ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης στη βασική φόρμα.

⇒ Η εντολή “Edit ranges”

Αφού επιλεχθεί μια ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδίασης, με το πάτημα του πλήκτρου “Edit ranges” (ή με διπλό-κλικ στη μεταβλητή), εισάγονται τα άνω και κάτω όρια των επιλεγμένων μεταβλητών σχεδίασης, μέσω της φόρμας που φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδίασης εμφανίζονται κάθε φορά στη βασική φόρμα στα πεδία *Sup.Range* και *Inf.Range* αντίστοιχα (Σχήμα 3.10)



Σχήμα 3.9: Φόρμα εισαγωγής ορίων ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης.

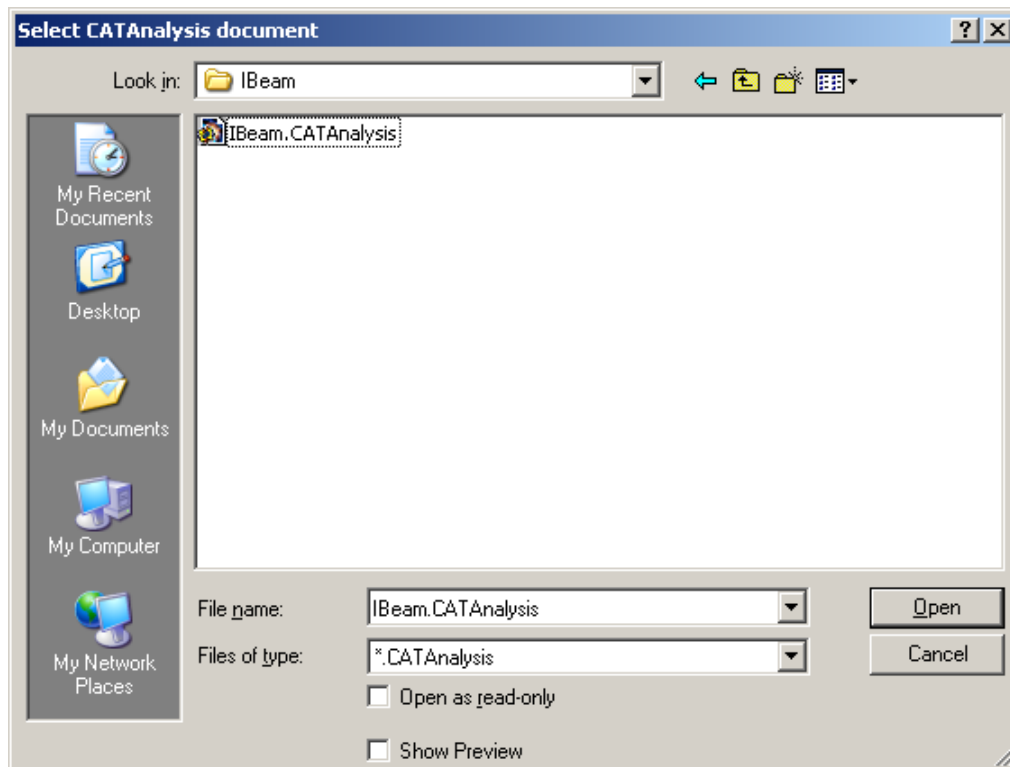


Σχήμα 3.10: Εμφάνιση ορίων των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης στη βασική φόρμα.

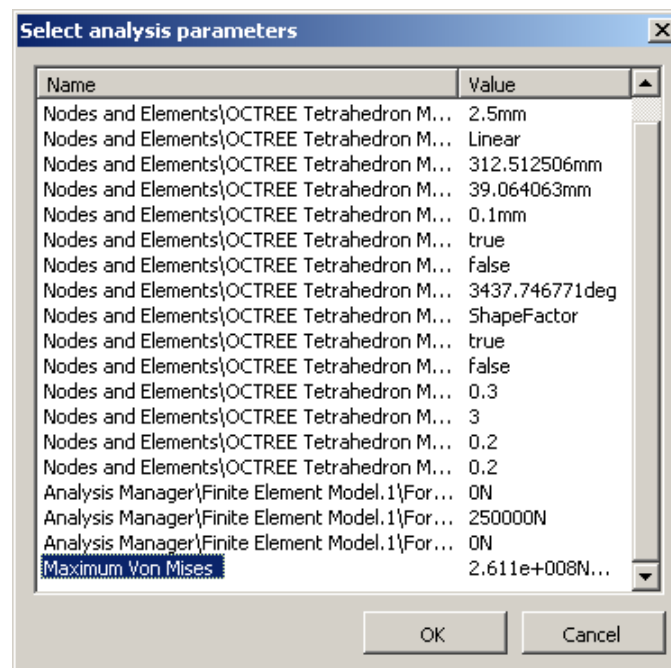
⇒ Προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση

Για τη σύνθεση της αντικειμενικής συνάρτησης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάποια από τις παραμέτρους της γεωμετρίας (εντολή “*Select part parameters*”) και τουλάχιστον μία από τις παραμέτρους της ανάλυσης (εντολή “*Select analysis parameters*”). Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα εισαγωγής κάποιου μαθηματικού συμβόλου ή αριθμού (εντολή “*Mathematical symbols*”) και σε περίπτωση που έχει συμβεί κάποιο λάθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή “*Reset fitness*”, για τον εκ νέου προσδιορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο παράδειγμα της δοκού χρησιμοποιείται αρχικά η εντολή “*Select analysis parameters*” για τον προσδιορισμό του αρχείου της ανάλυσης (Σχήμα 3.11) και την επιλογή της επιθυμητής παραμέτρου από τη λίστα των παραμέτρων της ανάλυσης (Σχήμα 3.12). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την εντολή “*Mathematical symbols*”, εισάγεται το σύμβολο της διαίρεσης από τη φόρμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13. Τέλος, χρησιμοποιώντας την εντολή “*Select part parameters*” εισάγεται και η κατάλληλη παράμετρος από τη

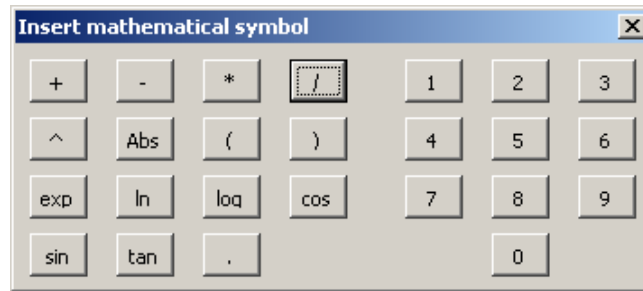
λίστα των παραμέτρων σχεδίασης (Σχήμα 3.14). Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση στο αντίστοιχο πεδίο της βασικής φόρμας [13].



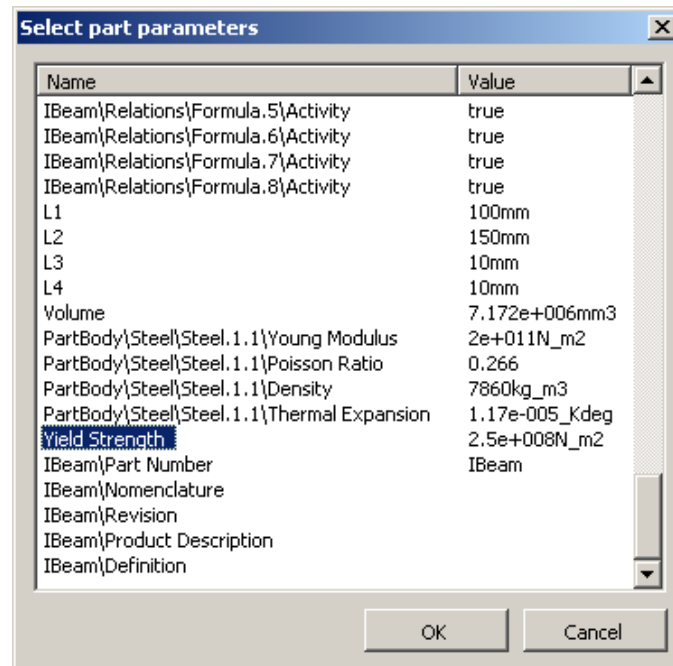
Σχήμα 3.11: Παράθυρο διαλόγου προσδιορισμού αρχείου της ανάλυσης.



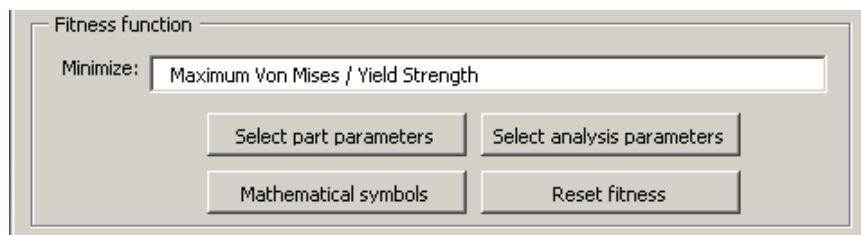
Σχήμα 3.12: Φόρμα επιλογής παραμέτρου ανάλυσης.



Σχήμα 3.13: Φόρμα εισαγωγής μαθηματικών συμβόλων και αριθμών.



Σχήμα 3.14: Φόρμα επιλογής παραμέτρου σχεδίασης.



Σχήμα 3.15: Εμφάνιση της αντικειμενικής συνάρτησης στη βασική φόρμα.

⇒ Προσδιορισμός των ρυθμιστικών παραμέτρων του ΔΕ αλγορίθμου

Οι ρυθμιστικοί παράμετροι του ΔΕ αλγορίθμου, που πρέπει να προσδιοριστούν στα αντίστοιχα πεδία (Σχήμα 3.16) πριν από την έναρξη της βελτιστοποίησης, από το χρήστη, είναι οι εξής:

1. **Number of generations:** Πλήθος γενεών (≥ 1).
2. **Population size:** Μέγεθος πληθυσμού (≥ 4).
3. **F parameter:** Τιμή παραμέτρου $F \in [0,1]$.

4. **C_r parameter:** Τιμή παραμέτρου $C_r \in [0,1]$.

Σχήμα 3.16: Προσδιορισμός των ρυθμιστικών παραμέτρων του ΔΕ αλγορίθμου.

⇒ Επιλογή για δυναμική ανανέωση της γεωμετρίας

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου, υπάρχει η δυνατότητα να φαίνονται δυναμικά οι αλλαγές των τιμών των ανεξαρτήτων μεταβλητών σχεδίασης, μεταβάλλοντας αντίστοιχα τη γεωμετρία, σε κάθε αξιολόγηση μιας υποψήφιας λύσης (Σχήμα 3.17). Η παραπάνω δυνατότητα, παρόλο που είναι χρήσιμη σε αρκετές περιπτώσεις, καλό είναι να απενεργοποιείται σε προβλήματα υψηλού υπολογιστικού κόστους, καθώς επιβραδύνει την όλη διαδικασία και μπορεί εύκολα να προκαλέσει κάποιο σφάλμα [13].

Σχήμα 3.17: Επιλογή για δυναμική ανανέωση της γεωμετρίας.

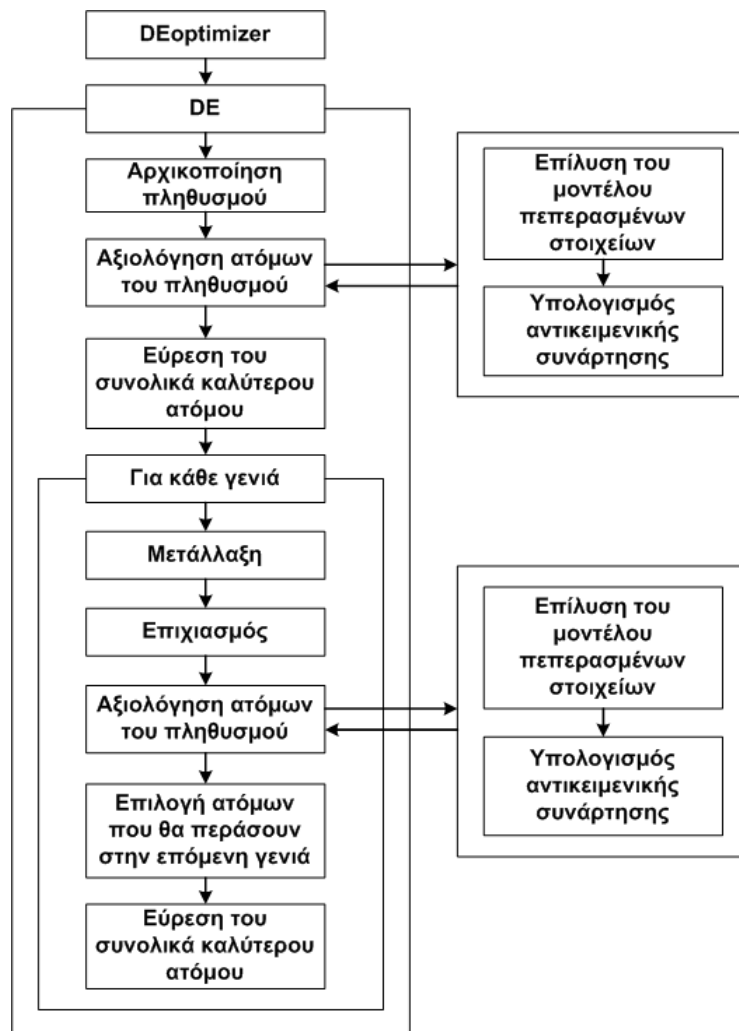
⇒ Η εντολή “Run optimization”

Μόλις ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα, η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να ξεκινήσει χρησιμοποιώντας την εντολή “Run optimization”. Η πρόοδος του αλγορίθμου παρακολουθείται μέσω της φόρμας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18. Στο πεδίο *Current fitness value* φαίνονται η συνολικά καλύτερη και χειρότερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση, στο πεδίο *Elapsed time* ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος, στο πεδίο *Evaluations* το πλήθος των αξιολογήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί και τέλος στο πεδίο *Generation* η τρέχουσα γενιά [13].

Σχήμα 3.18: Φόρμα προόδου του αλγορίθμου.

Τα ASCII αρχεία εξόδου, που γράφονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος, είναι τα currentbest.txt και convergence.txt. Το αρχείο currentbest.txt περιλαμβάνει τις τιμές και το πλήθος των χρωμοσωμάτων του καλύτερου ατόμου κάθε γενιάς, καθώς και την αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το αρχείο convergence.txt περιλαμβάνει όλο το ιστορικό σύγκλισης του αλγορίθμου. Σε περίπτωση διακοπής του προγράμματος από κάποιο σφάλμα, ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στα αρχεία αυτά, τα οποία βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία όπου υπάρχει το αρχείο της γεωμετρίας. Τέλος το αρχείο εξόδου case.txt δημιουργείται μετά τη λήξη του αλγορίθμου και περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για το συγκεκριμένο τρέξιμο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω περιγράφεται εν συντομία η όλη διαδικασία για την πραγματοποίηση βελτιστοποίησης σχεδίασης στο CATIA με χρήση του ενσωματωμένου λογισμικού DEoptimizer [13].



Σχήμα 3.19: Βελτιστοποίηση σχεδίασης στο CATIA με χρήση του ενσωματωμένου λογισμικού DEoptimizer [13].

Αρχικά πραγματοποιείται η σχεδίαση της γεωμετρίας και ορίζεται κατάλληλα το αντίστοιχο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο CATIA. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα DEoptimizer, προσδιορίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης μαζί με τα άνω και κάτω όρια τους και η επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος, αφού οριστούν και οι ρυθμιστικοί παράμετροι, χρησιμοποιείται ο ΔΕ αλγόριθμος, ο οποίος εξελίσσει τον πληθυσμό των λύσεων, εφαρμόζοντας τους τελεστές επιχiasμού και μετάλλαξης, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση. Το διάγραμμα ροής που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19 [13].

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκε και αναλύθηκε ως προς τις καταπονήσεις ένα παραμετρικό μοντέλο της πτερωτής ενός στροβίλου ακτινικής ροής και βελτιστοποιήθηκε η πλάτη της πτερωτής με τη χρήση ενός διαφορικού εξελικτικού αλγορίθμου.

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την ανάλυση του στροβίλου είναι πως υπάρχουν δύο περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται συγκέντρωση τάσεων όπου με τις κατάλληλες αλλαγές στην αρχική γεωμετρία καταφέραμε να μειώσουμε αρχικά το μέγεθος τους.

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τον Διαφορικό Εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της πλάτης της πτερωτής καταφέραμε να μειώσουμε ως και 28% τις τάσεις σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.

Είναι φανερό ότι η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης της γεωμετρίας αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη και αποτελεσματική στη διαδικασία σχεδίασης. Ο συγκεκριμένος διαφορικός εξελικτικός αλγόριθμος θα μπορούσε να μας δώσει αποτελέσματα βελτιστοποίησης για ποικίλων χαρακτηριστικών πτερωτές, οι οποίες θα στηρίζονταν στο πλήρως παραμετρικό μοντέλο που κατασκευάσαμε. Τα παραμετρικά γεωμετρικά μοντέλα είναι άκρως απαραίτητα για την υλοποίηση μιας διαδικασίας βέλτιστου σχεδιασμού, η οποία δεν μπορεί να υλοποιηθεί διαφορετικά, ειδικά για πολύπλοκες σχεδιάσεις.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στη διάρκεια της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός στιβαρού γεωμετρικού μοντέλου, το οποίο θα οδηγεί σε συμβατές σχεδιάσεις για μεγάλο εύρος αλλαγών στις παραμέτρους σχεδίασης και θα επιτρέπει την απροβλημάτιστη και αυτόματη δημιουργία πλέγματος και επίλυση του πεδίου των τάσεων. Αποδείχθηκε ότι κάτι τέτοιο είναι και δύσκολο και απαιτεί μεγάλη εμπειρία και τριβή με το αντικείμενο.

Τέλος οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης της γεωμετρίας ελαττώνουν τον χρόνο και το κόστος σχεδίασης και παραγωγής ενός νέου στροβίλου κάτι που τους καθιστά αναγκαίους στο σύγχρονο πεδίο της μηχανολογικής σχεδίασης.

Βιβλιογραφία

- [1] R. J. Roelke, “Radial turbine Cooling”, in *Radial Turbines*, VKI Lecture Series 1992-05.
- [2] A. Demeulenaere, and S. Pierret, “An Integrated Optimization System for Multistage Gas Turbine Design”, International Congress on Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems, EUROGEN 2003, Barcelona 2003.
- [3] R.A. Van Den Braumburssche, Z. Alsalihi, T. Verstraete, “Fast Multi-disciplinary – Multi Point Optimization With Application To Radial Turbomachinery Components”, Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, EUROGEN 2005, Munich 2005.
- [4] C. Hirsch, A. Demeulenaere, “Multipoint optimization for the design of Turbomachinery blades”, Design Optimization International Conference, Athens 2004.
- [5] D. G. Wilson, *The Design of High-Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines*, The Massachusetts Institute of Technology, 1984.
- [6] www.technologie-entwicklung.de
- [7] M. Hasenjager, B. Sendhoff, T. Sonoda and T. Arima “Three dimensional aerodynamic design optimization using single and multi-objective approaches”, Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, EUROGEN 2005, Munich 2005
- [8] W. D. Marscher, “Structural Analysis: Fatigue Life Assessment”, in *Radial Turbines*, VKI Lecture Series 1992-05.
- [9] Δ. Σκαμνάκης, *Δομική Ανάλυση & Σχεδιασμός Στροβιλομηχανής* Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2001.
- [10] S. Miller, “Advanced materials mean advanced engines”, www.azom.com

- [11] G. Keith Jr, M. A. Bakhle, J. S. Liu, J. Pavovsky, O. Mehmed, “Calculation and correlation of the unsteady flowfield in a high pressure turbine”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands.
- [12] I. M. Valakos, M. S. Ntipteni, I. K. Nikolos, “Structural Optimization of a Centrifugal Impeller Using Differential Evolution in CATIATM Environment”, *Operational Research an International Journal*, vol. 7, No. 2, 2007.
- [13] Ι. Βαλάκος, *Βελτιστοποίηση Σχεδίασης Τμημάτων Στροβιλομηχανών με χρήση Εξελικτικών Αλγορίθμων*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2006