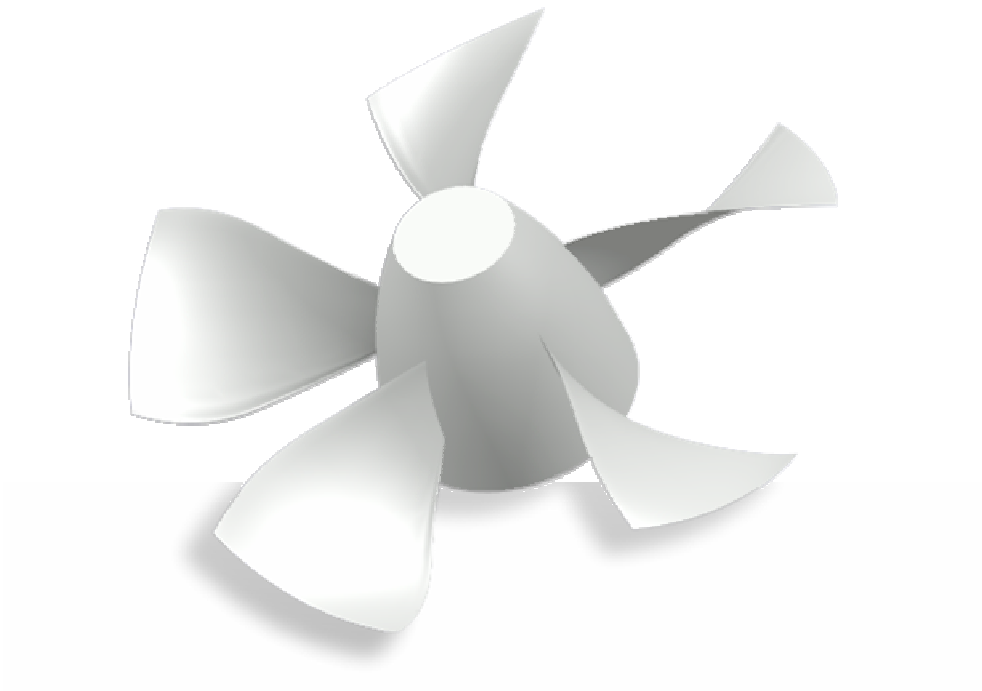


Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

*Ανάπτυξη λογισμικού για την παραμετρική σχεδίαση
πολυβάθμιων πτερυγώσεων στροβιλομηχανών*



Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό
Γεωργίας Ν. Κοΐνη

Χανιά 2007

Η διατριβή της Γεωργίας Ν. Κοΐνη, εγκρίνεται

Ιωάννης Κ. Νικολός
Λέκτορας, Επιβλέπων

Βασίλειος Σ. Κουϊκόγλου
Καθηγητής

Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης
Αναπληρωτής Καθηγητής

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	iv
Ευρετήριο Εικόνων	vi
Ευρετήριο Πινάκων	xi
Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα	xii
Ευχαριστίες	xiii
Πρόλογος	1

Κεφάλαιο 1 - Επισκόπηση των διαθέσιμων προγραμμάτων σχεδίασης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών

1.1. Εισαγωγή	2
1.2. BezBlade	4
1.3. BladeCAD	4
1.4. BladeModeler	6
1.5. CFTurbo	7
1.6. FINE/Design3D™	8
1.7. AGILE	9
1.8. PropCAD	11
1.9. TurboDesign ⁻¹ & TurboDesign ⁻²	12
1.10. Vista	13
1.11. T4T	14

Κεφάλαιο 2 - Μεθοδολογία

2.1. Εισαγωγή	15
2.2. Διδιάστατη Απεικόνιση	15
2.2.1. Ορισμός των διατομών ενός πτερυγίου	15
2.2.2. Πλήμνη & Κέλυφος (Hub & Shroud)	28
2.3. Τριδιάστατη Απεικόνιση	30
2.3.1. Ορισμός ενός τριδιάστατου πτερυγίου	30
2.3.2. Ορισμός των επιφανειών της πλήμνης & του κελύφους	35
2.3.3. Τριδιάστατη απεικόνιση της πτερωτής	38

Κεφάλαιο 3 - Παρουσίαση Λειτουργίας του λογισμικού T4T

3.1. Κεντρικό Παράθυρο του T4T	42
3.1.1. Δέντρο Γεωμετρίας	44
3.1.2. Γραμμή Εντολών	45
3.1.3. Επιφάνεια Εργασίας	47
3.1.4. Γραμμή Εργαλείων	47

3.2.	Ορισμός Επιφάνειας Πτερυγίου	49
3.2.1.	Παράθυρο ορισμού πτερυγίου	49
3.2.2.	Παράθυρο προεπισκόπησης – ορισμού του πτερυγίου	56
3.2.3.	Σφάλματα Σχεδίασης	61
3.3.	Κωνικές Επιφάνειες	61
3.3.1.	Παράθυρο ορισμού κωνικών επιφανειών	61
3.3.2.	Προεπισκόπηση Πλήμνης και Κελύφους	65
3.3.3.	Σφάλματα Σχεδίασης	68
3.4.	Προσαρμογή Επιφανειών – Skinning	69
3.4.1.	Παράθυρο ορισμού της σύμμορφης απεικόνισης	69
3.4.2.	Προεπισκόπησης προσαρμογής επιφανειών	73
3.4.3.	Σφάλματα Σχεδίασης	78
3.5.	Η δομή του πηγαίου κώδικα	80

Κεφάλαιο 4 - Εφαρμογές

4.1.	Εισαγωγή	82
4.2.	Στρόβιλοι	82
4.3.	Συμπιεστές	89
4.4.	Υδροστρόβιλοι τύπου Turgo	95

Κεφάλαιο 5 – Μελλοντικές Επεκτάσεις 100

Βιβλιογραφία 101

Ευρετήριο Εικόνων

Κεφάλαιο 1 - Επισκόπηση των διαθέσιμων προγραμμάτων σχεδίασης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών

Εικόνα 1.1. Το γραφικό περιβάλλον του BezBlade[13].	4
Εικόνα 1.2. Ορισμός της μέσης γραμμής κυρτότητας σύμφωνα με το BladeCAD[14].	5
Εικόνα 1.3. Φόρμα εισόδου δεδομένων του λογισμικού BladeCAD[14]	5
Εικόνα 1.3. Παραγόμενες γεωμετρίες του λογισμικού BladeCAD[14]	5
Εικόνα 1.4. Το γραφικό περιβάλλον του BladeModeler [15].	6
Εικόνα 1.5. Το γραφικό περιβάλλον του BladeModeler [15].	7
Εικόνα 1.6. Παραγόμενες γεωμετρίες του BladeModeler. (α) φυγόκεντρη αντλία (β) αξονικός στρόβιλος (γ) ακτινικός συμπιεστής[15].	7
Εικόνα 1.7. Παραγόμενες γεωμετρίες του CFturbo [16].	8
Εικόνα 1.8. Το γραφικό περιβάλλον του AutoBlade [18].	9
Εικόνα 1.9. Παραγόμενες γεωμετρίες του FINE/Design3D™ [17].	9
Εικόνα 1.10. Παραγόμενη γεωμετρία του AXCAD[20].	10
Εικόνα 1.11. Το γραφικό περιβάλλον του CCAD/ COMIG[21].	10
Εικόνα 1.12. Γεωμετρίες ελίκων που σχεδιάστηκαν με τη χρήση του PropCAD[22].	11
Εικόνα 1.13. Η φόρμα Prop Builder [22].	12
Εικόνα 1.14. Η κύρια φόρμα του PropCAD [22].	12
Εικόνα 1.15. Παραγόμενες γεωμετρίες του TURBODesign ⁻¹ [23].	13
Εικόνα 1.16. Επιμέρους φόρμες του γραφικού περιβάλλοντος του TURBODesign ⁻¹ [23].	13

Κεφάλαιο 2 - Μεθοδολογία

Εικόνα 2.1. Διατομή πτερυγίου που ορίζεται από 2 καμπύλες, τη μέση γραμμή κυρτότητας και τη γραμμή υποπίεσης- υπερπίεσης	16
Εικόνα 2.2. Σχεδιαστικοί παράμετροι για την κατασκευή διατομής πτερυγίου(β_{1m} , β_{2m} , L_{ref} , γ).	17
Εικόνα 2.3. Γενική μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας του πτερυγίου.	17
Εικόνα 2.4. Η μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας για την περίπτωση $\beta_{1m}=0$ και $\beta_{2m} \neq 0$.	18
Εικόνα 2.5. Η μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας για την περίπτωση $\beta_{1m}= \beta_{2m}= \gamma$.	18
Εικόνα 2.6. Η μέση γραμμή για $\beta_{1m}= 50^\circ$, $\beta_{2m}= -40^\circ$, $L_{ref}= 100$, $\gamma = -10^\circ$.	19
Εικόνα 2.7. Τα κάθετα διανύσματα, για κάθε πλευρά της μέσης γραμμής κυρτότητας , υπολογίζονται στα σημεία που δίδονται τα αντίστοιχα πάχη. Ο αριθμός και η θέση των σημείων δύναται να διαφέρει για κάθε πλευρά.	20
Εικόνα 2.8. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της διατομής του πτερυγίου, στην οποία εφαρμόζεται διαστατή κατανομή πάχους. (α) Υπολογισμός των κάθετων διανυσμάτων βάση της εφαρμοζόμενης κατανομής, (β) Υπολογισμός των σημείων ελέγχου της διατομής, (γ) Υπολογισμός του πολυγώνου ελέγχου της διατομής και (δ) Υπολογισμός της διατομής.	24
Εικόνα 2.9. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της διατομής του πτερυγίου, στην οποία εφαρμόζεται αδιάστατη κατανομή πάχους. (α) Υπολογισμός της μέσης γραμμής της διατομής, (β) Υπολογισμός των σημείων ελέγχου της διατομής βάση της εφαρμοζόμενης κατανομής, (γ) Υπολογισμός του πολυγώνου ελέγχου της διατομής και (δ) Υπολογισμός της διατομής.	25
Εικόνα 2.10. Ο σχεδιασμός της διατομής του πτερυγίου γίνεται με διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα.	26

Εικόνα 2.11. Το κέντρο βάρους της διατομής του πτερυγίου.	26
Εικόνα 2.12. (α) οι διατομές του πτερυγίου στοιβαγμένες με κοινό κέντρο βάρους (β) οι διατομές του πτερυγίου στοιβαγμένες με κοινό σημείο προσβολής.	27
Εικόνα 2.13. Οι καμπύλες πλήμνης - κελύφους και τα αντίστοιχα σημεία και πολύγωνα ελέγχου.	29
Εικόνα 2.14. Οι γεννήτριες καμπύλες πλήμνης - κελύφους και οι ενδιάμεσες καμπύλες, που προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή των πρώτων.	29
Εικόνα 2.15. Τέσσερις πιθανές «γραμμές στοίβαξης» ενός πτερυγίου. (α)-(γ) Οι διατομές στοιβάζονται με σημείο αναφοράς τα σημεία προσβολής τους. (β)-(δ) Οι διατομές στοιβάζονται με σημείο αναφοράς τα κέντρα βάρους τους.	31
Εικόνα 2.16. Έλεγχος εγκυρότητας για την σύμμορφη απεικόνιση των διατομών του πτερυγίου.	31
Εικόνα 2.17. Η σύμμορφη απεικόνιση της διατομής του πτερυγίου πάνω στην κωνική επιφάνεια που παράχθηκε από την αντίστοιχη μεσημβρινή καμπύλη	33
Εικόνα 2.18. «Skinning» μέσω νέφους σημείων (α) Το νέφος σημείων από το οποίο πρέπει να περνάει το πτερύγιο (β) Παρεμβολή καμπυλών στην περιμετρική διεύθυνση – οι καμπύλες είναι όσες και ο αριθμός διατομών του πτερυγίου (γ) Παρεμβολή καμπυλών στην διαμήκη διεύθυνση – οι καμπύλες είναι όσες και ο αριθμός των σημείων κάθε διατομής, για αυτό και όλες οι διατομές πρέπει να περιγράφονται από τον ίδιο αριθμό σημείων.	34
Εικόνα 2.19. Μεσημβρινή διατομή του πτερυγίου. Η σύμμορφη απεικόνιση των διατομές στις αντίστοιχες επιφάνειες.	35
Εικόνα 2.20. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πτερυγίου με καμπύλες (αριστερά) και επίπεδες διατομές (δεξιά).	35
Εικόνα 2.21. Δημιουργία περιστρεφόμενης επιφάνειας. (α) Τα σημεία ελέγχου της γενέτειρας καμπύλης στρέφονται γύρω από τον άξονα περιστροφής z δημιουργώντας κύκλους (β) Η μεσημβρινή καμπύλη της πλήμνης που περιστρέφεται. (γ) Τα σημεία ελέγχου ενός κύκλου, P_0 είναι τα σημεία ελέγχου της γεννήτριας καμπύλης	36
Εικόνα 2.22. Η επιφάνεια της πλήμνης (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού Rhinoceros).	38
Εικόνα 2.23. Η επιφάνεια του κελύφους (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού Rhinoceros).	38
Εικόνα 2.24. Η Διαδικασία της περιφερειακής μεταφοράς και αντιγραφής. Το σημείο ελέγχου P_i στρέφεται κατά γωνία φ και μετατρέπεται σε P_i . Η διαδικασία πραγματοποιείται για το σύνολο των σημείων ελέγχου του αρχικού πτερυγίου και έτσι αντιγράφεται στη νέα του θέση.	39
Εικόνα 2.25. Ολοκληρωμένη πτερύγωση αποτελούμενη από 16 πτερύγια (18 NURBS επιφάνειες).	41

Κεφάλαιο 3 - Παρουσίαση Λειτουργίας του λογισμικού T4T

Εικόνα 3.1. Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού T4T κατά την έναρξη του προγράμματος.	42
Εικόνα 3.2. Στιγμιότυπο του λογισμικού αφού έχει δημιουργηθεί η διδιάστατη γεωμετρία της πτερωτής.	43
Εικόνα 3.3. Το δέντρο γεωμετρίας μετά τον ορισμό της διδιάστατης γεωμετρίας της πτερύγωσης.	44
Εικόνα 3.4. Το μενού τροποποίησης/ διαγραφής γεωμετρίας του πτερυγίου Blade 1 εμφανίζεται με δεξί κλικ του ποντικού στο κόμβο Blade 1.	44
Εικόνα 3.5. Το τελικό δέντρο γεωμετρίας της πτερύγωσης.	45
Εικόνα 3.6. Η γραμμή εργαλείων κατά την εκκίνηση του προγράμματος.	45
Εικόνα 3.7. Δημιουργία της επιφάνειας της πλήμνης. Με το πάτημα του πλήκτρου Hub, εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας το παράθυρο ορισμού τη επιφάνειας της πλήμνης. Αφού οριστεί η επιφάνεια της πλήμνης (πάτημα πλήκτρου Set), εμφανίζεται στο δέντρο γεωμετρίας ο κόμβος Hub και απενεργοποιείται το πλήκτρο Hub.	46
Εικόνα 3.8. Προεπισκόπηση της τριδιάστατης πτερωτής. Με το πάτημα του πλήκτρου Viewer,	47

εμφανίζεται το παράθυρο προεπισκόπησης της τριδιάστατης γεωμετρίας.	
Εικόνα 3.9. Το κεντρικό μενού Αρχείο (<i>File</i>) του λογισμικού.	48
Εικόνα 3.10. Το παράθυρο ορισμού του φακέλου εργασίας.	49
Εικόνα 3.11. Το παράθυρο ορισμού ενός πτερυγίου.	50
Εικόνα 3.12. Παρουσίαση της φόρμας δεδομένων των πτερυγίων.	51
Εικόνα 3.13. Το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας του πτερυγίου.	52
Εικόνα 3.14. Το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας πτερυγίου.	52
Εικόνα 3.15. Το παράθυρο εισόδου του βάρους του μεσαίου σημείου ελέγχου της μέσης γραμμής κυρτότητας της επιλεγμένης διατομής	53
Εικόνα 3.16. (α) Παράθυρο δημιουργίας νέας κατανομής πάχους (αριστερά), (β) Παράθυρο επεξεργασία υπάρχουσας κατανομής πάχους (δεξιά).	54
Εικόνα 3.17. Το παράθυρο εισόδου του βήματος σχεδίασης του πτερυγίου.	54
Εικόνα 3.18. Τα Pop-Up μενού της λίστας διατομών για μονή (α) και πολλαπλή (β) επιλογή διατομών.	55
Εικόνα 3.19. Το παράθυρο εισόδου της θέσης του σημείου προσβολής της επιλεγμένης διατομής	55
Εικόνα 3.20. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου (περιοχή σχεδίασης των διατομών).	56
Εικόνα 3.21. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων του πτερυγίου).	57
Εικόνα 3.22. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων.	57
Εικόνα 3.23. Προεπισκόπηση των επιλεγμένων διατομών (1 & 3) με ταυτισμένα σημεία προσβολής.	59
Εικόνα 3.24. Προεπισκόπηση της επιλεγμένης διατομής και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.	59
Εικόνα 3.25. Προεπισκόπηση της επιλεγμένης διατομής, της αντίστοιχης μέσης γραμμής και του πολύγωνου ελέγχου της.	60
Εικόνα 3.26. Μεγέθυνση της επιλεγμένης διατομής, της αντίστοιχης μέσης γραμμής και του πολύγωνου ελέγχου της.	60
Εικόνα 3.27. Το παράθυρο σφάλματος κατανομής. Πρέπει να οριστεί η κατανομή πάχους της διατομής 2.	61
Εικόνα 3.28. Το παράθυρο σφάλματος αξονικής χορδής. Η αξονική απόσταση της διατομής 1 πρέπει να είναι θετική.	61
Εικόνα 3.29. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών γωνιών.	61
Εικόνα 3.30. Το παράθυρο σφάλματος διατομών.	61
Εικόνα 3.31. Τα παράθυρα ορισμού της πλήμνης (αριστερά) και του κελύφους (δεξιά).	62
Εικόνα 3.32. Το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας του κελύφους (το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας της πλήμνης είναι παρόμοιο).	63
Εικόνα 3.33. Το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας κελύφους (το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας πλήμνης είναι παρόμοιο).	63
Εικόνα 3.34. Το παράθυρο εισόδου του βήματος σχεδίασης της μεσημβρινής καμπύλης.	64
Εικόνα 3.35. Παρουσίαση της περιοχής δεδομένων της πλήμνης και του κελύφους.	64
Εικόνα 3.17. Το Pop-Up μενού του πίνακα συντεταγμένων σημείων.	65
Εικόνα 3.37. Οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος για τον ορισμό της πλήμνης της πτερωτής. Τα σημεία ορίζονται ως σημεία ελέγχου (αριστερά) ή ως σημεία παρεμβολής (δεξιά).	65
Εικόνα 3.38. Τα παράθυρα προεπισκόπησης των μεσημβρινών καμπυλών (περιοχή σχεδίασης).	66
Εικόνα 3.39. Το παράθυρο προεπισκόπησης των μεσημβρινών καμπυλών (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων).	66

Εικόνα 3.40. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων της πλήμνης (αριστερά) και του κελύφους (δεξιά).	67
Εικόνα 3.41. Προεπισκόπηση της πλήμνης και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.	68
Εικόνα 3.42. Προεπισκόπηση του κελύφους και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.	68
Εικόνα 3.43. Το παράθυρο σφάλματος καμπύλης πλήμνης/ κελύφους.	69
Εικόνα 3.44. Το παράθυρο σφάλματος βαθμού πλήμνης/ κελύφους.	69
Εικόνα 3.45. Το παράθυρο ορισμού της σύμμορφης απεικόνισης των πτερυγίων.	70
Εικόνα 3.46. Παρουσίαση της φόρμας της καμπύλης απεικόνισης για το (επιλεγμένο) πτερύγιο Blade 1.	72
Εικόνα 3.47. Το παράθυρο προεπισκόπησης της σύμμορφης απεικόνισης (περιοχή σχεδίασης) πριν τον ορισμό παραμέτρων – απεικονίζονται οι μεσημβρινές καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους.	73
Εικόνα 3.48. Το παράθυρο προεπισκόπησης της σύμμορφης απεικόνισης (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων) πριν τον ορισμό παραμέτρων – στην περιοχή σχεδίασης απεικονίζονται οι μεσημβρινές καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους	74
Εικόνα 3.49. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων.	74
Εικόνα 3.50. Προεπισκόπηση των μεσημβρινών καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους καθώς και των αντίστοιχων πολυγώνων ελέγχου.	76
Εικόνα 3.51. Προεπισκόπηση των επίπεδων καμπυλών του πτερυγίου Blade 1 καθώς και των αντίστοιχων ορίων σχεδίασης και της ακτίνας στοίβαξής του.	76
Εικόνα 3.52. Προεπισκόπηση των καμπυλών του πτερυγίου Blade 1 (μετά τη σύμμορφη απεικόνιση του) καθώς και των αντίστοιχων ενδιάμεσων μεσημβρινών καμπυλών και της ακτίνας στοίβαξής του.	77
Εικόνα 3.53. Προεπισκόπηση όλων των μεσημβρινών καμπυλών του πτερυγίου Blade 1, βάσει των οποίων γίνεται η σύμμορφη απεικόνιση του πτερυγίου.	77
Εικόνα 3.54. Το παράθυρο σφάλματος βαθμού.	78
Εικόνα 3.55. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών πτερυγίων.	78
Εικόνα 3.56. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών πτερυγίων.	78
Εικόνα 3.57. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών διαδοχικών πτερυγίων.	78
Εικόνα 3.58. Μη εφικτή σχεδίαση πτερυγίου. Η περιοχή σχεδίασης του πτερυγίου υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια σχεδίασης του.	79
Εικόνα 3.59. Μη εφικτή σχεδίαση πτερυγίων. Οι περιοχές σχεδίασης των πτερυγίων Blade 1 και Blade 2 επικαλύπτονται.	79
Εικόνα 3.60. Η κεντρική κλάση του T4T.jar, T4T_MDI και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.	80
Εικόνα 3.61. Η κλάση BLADE και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.	80
Εικόνα 3.62. Οι κλάσεις HUB και SHROUD και οι συνδεόμενες με αυτές κλάσεις.	81
Εικόνα 3.63. Η κλάση MAPPING και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.	81

Κεφάλαιο 4 - Εφαρμογές

Εικόνα 4.1. Γεωμετρία πολυβάθμιου στροβίλου που δημιουργήθηκε με τη χρήση του T4T.	82
Εικόνα 4.2. Οι παράμετροι σχεδίασης του πρώτου πτερυγίου του στροβίλου.	83
Εικόνα 4.3. Η διαστατή κατανομή πάχους που εφαρμόζεται στο πτερύγιο.	84
Εικόνα 4.4. Οι παράμετροι ορισμού της κατανομής πάχους.	84
Εικόνα 4.5. Οι επίπεδες διατομές του πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το σημείο προσβολής τους.	85
Εικόνα 4.6. Οι παράμετροι σχεδίασης του δευτέρου πτερυγίου του στροβίλου (ρότορας).	85
Εικόνα 4.7. Οι διατομές του πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.	86
Εικόνα 4.8. Ορισμός των καμπυλών πλήμνης και κελύφους.	86
Εικόνα 4.9. Τα δεδομένα της σύμμορφης απεικόνισης των δύο πτερυγίων.	87

Εικόνα 4.10. Μεσημβρινή όψη των διατομών των δύο πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνισή τους.	87
Εικόνα 4.11. Αξονικός μονοβάθμιος στρόβιλος, σχεδιασμένος με 35 επιφάνειες NURBS (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).	88
Εικόνα 4.12. Ο στρόβιλος της εικόνας 4.11 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους.	88
Εικόνα 4.13. Ο στρόβιλος της εικόνας 4.11 από άλλη οπτική γωνία	89
Εικόνα 4.14. Γεωμετρία πολυβάθμιου συμπιεστή που παράχθηκε με τη χρήση του λογισμικού T4T.	89
Εικόνα 4.15. Οι παράμετροι σχεδίασης του πτερυγίου του ρότορα της 1 ^{ης} βαθμίδας του συμπιεστή.	90
Εικόνα 4.16. Οι παράμετροι σχεδίασης του δευτέρου πτερυγίου του συμπιεστή.	91
Εικόνα 4.17. Η προεπισκόπηση των διατομών του πρώτου πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.	91
Εικόνα 4.18. Η προεπισκόπηση των διατομών του δευτέρου πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.	92
Εικόνα 4.19. Η μη διαστατή κατανομή πάχους first, που εφαρμόζεται στα πτερύγια.	93
Εικόνα 4.20. Τα σημεία ορισμού των καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους.	93
Εικόνα 4.21. Μεσημβρινή όψη των διατομών των πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνιση τους.	93
Εικόνα 4.22. Ο συμπιεστής τριών βαθμίδων με 213 πτερύγια, σχεδιασμένος με 215 επιφάνειες NURBS (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).	94
Εικόνα 4.23. Ο συμπιεστής της Εικόνας 4.22 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους.	94
Εικόνα 4.24. Ο συμπιεστής της Εικόνας 4.22 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους, από άλλη οπτική γωνία.	95
Εικόνα 4.25. Η γεωμετρία της πτερωτής υδροστροβίλου τύπου Turgo που παράχθηκε με τη χρήση του λογισμικού T4T.	95
Εικόνα 4.26. Οι παράμετροι σχεδίασης του πτερυγίου πτερωτής υδροστροβίλου Turgo.	96
Εικόνα 4.27. Οι επίπεδες διατομές του πτερυγίου.	96
Εικόνα 4.28. Τα σημεία ορισμού των καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους της πτερωτής του υδροστροβίλου.	97
Εικόνα 4.29. Η φόρμα της σύμμορφης απεικόνισης της γεωμετρίας .	98
Εικόνα 4.30. Μεσημβρινή όψη των διατομών των πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνισή τους.	98
Εικόνα 4.31. Πτερωτή υδροστροβίλου τύπου Turgo με 16 πτερύγια, σχεδιασμένη με 18 επιφάνειες NURBS. Το κέλυφος χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον ορισμό των πτερυγίων (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).	99
Εικόνα 4.32. Λεπτομέρεια ενός πτερυγίου της πτερωτής του υδροστροβίλου τύπου Turgo.	99

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 2 - Μεθοδολογία

Πίνακας 2.1. Υπολογισμός σημείων της μέσης γραμμής και των αντίστοιχων κάθετων διανυσμάτων.	23
Πίνακας 2.2. Οι σχεδιαστικές παράμετροι για τις τέσσερις διατομές του πτερυγίου με κοινή κατανομή πάχους.	27
Πίνακας 2.3. Συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης της πλήμνης	29
Πίνακας 2.4. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης του κελύφους	29
Πίνακας 2.5. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης της πλήμνης.	37
Πίνακας 2.6. Τα σημεία ελέγχου της επιφάνειας εκ περιστροφής που προκύπτουν από τα σημεία ελέγχου του Πίνακα 2.5.	37
Πίνακας 2.7. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης του κελύφους	37
Πίνακας 2.8. Οι συντεταγμένες πέντε σημείων ελέγχου του πρώτου πτερυγίου (P_0) και τα αντίστοιχα πέντε σημεία ελέγχου του δευτέρου (P_i'). Τα P_i' προέκυψαν με περιστροφή των P_0 κατά γωνία $22,5^\circ$ γύρω από τον άξονα Z.	40

Κεφάλαιο 4 - Εφαρμογές

Πίνακας 4.1. Οι τιμές της αξονικής χορδής των διατομών του πρώτου, του τρίτου και του πέμπτου πτερυγίου.	90
Πίνακας 4.2. Οι τιμές της αξονικής χορδής των διατομών του δευτέρου, του τέταρτου και του έκτου πτερυγίου.	91

Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Η Γεωργία Ν. Κοΐνη γεννήθηκε στη Τρίπολη το 1982, μεγάλωσε και ολοκλήρωσε τη βασική της εκπαίδευση στην Αθήνα στο 1^ο Ενιαίο Λύκειο Βύρωνα. Το 2000 εισήχθη στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στα Χανιά. Το 2005 αποφοίτησε με βαθμό 7.55 και στη συνέχεια εισήχθη στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του ιδίου τμήματος, στο τομέα των Συστημάτων Παραγωγής. Με την εργασία αυτή ολοκληρώνει τις μεταπτυχιακές σπουδές της.

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Λέκτορα κ. Νικολό Ιωάννη για την προθυμία, την υπομονή και την αμέριστη συμβολή του κατά την διεκπεραίωση της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή κ. Κουϊκόγλου Βασίλειο και Αν. Καθηγητή Τσουρβελούδη Νικόλαο για την τιμή που μου κάνανε να συμμετέχουν στην εξέταση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου, με τους οποίους έζησα πολλές και ευχάριστες στιγμές σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Τέλος, θέλω να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την ηθική και υλική συμπαράσταση της όλα αυτά τα χρόνια.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφιερώνεται στη οικογένεια μου.

Πρόλογος

Στην παρούσα ερευνητική μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζεται η ανάπτυξη της σχετικής μεθοδολογίας και του αντίστοιχου λογισμικού T4T (Tools for Turbomachinery), για την παραμετρική σχεδίαση τρισδιάστατων πολυβάθμιων πτερυγώσεων στροβιλομηχανών. Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια της διπλωματικής εργασίας, στην οποία είχε αναπτυχθεί αντίστοιχη μεθοδολογία και λογισμικό σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0. Η προηγούμενη μεθοδολογία, λόγω της γλώσσας προγραμματισμού και της έλλειψης αντικειμενοστραφούς δομής, έθετε σοβαρούς περιορισμούς, όσον αφορά τη γενικότητα και την επεκτασιμότητα της μεθοδολογίας. Έτσι, η προηγούμενη μεθοδολογία δεν μπορούσε να εφαρμοστεί σε πολυβάθμιες μηχανές, ή σε πολύπλοκες πτερυγώσεις με μεγάλο αριθμό διατομών. Επίσης, η προηγούμενη έκδοση του λογισμικού υστερούσε ως προς τη γραφική απεικόνιση των γεωμετριών σε τρεις διαστάσεις. Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η αλλαγή αυτή κρίθηκε αναγκαία γιατί η Java προσφέρει αντικειμενοστραφή λογική, πολύ καλές βιβλιοθήκες γραφικών, ενώ είναι και ανεξάρτητη πλατφόρμας (λειτουργικού συστήματος).

Η εργασία αναπτύσσεται σε 5 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται προηγούμενες εργασίες σχετικές με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, καθώς και πακέτα λογισμικού, εμπορικά και ακαδημαϊκά, που ειδικεύονται στη σχεδίαση τμημάτων στροβιλομηχανών. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον γεωμετρικό ορισμό των πτερυγώσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος εφαρμογής της μεθοδολογίας στο λογισμικό που αναπτύχθηκε, με λεπτομερή αναφορά στις δυνατότητες του λογισμικού και στη λειτουργία του. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός ορισμένων τυπικών πτερυγώσεων στροβιλομηχανών, ώστε να φανούν οι δυνατότητες της μεθοδολογίας που προτείνεται και του λογισμικού που αναπτύχθηκε (turgo, συμπίεστων και στροβίλων) με τη χρήση του T4T. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη παρούσα εργασία, ενώ προτείνονται και μελλοντικές επεκτάσεις της.

1

Επισκόπηση διαθέσιμων προγραμμάτων σχεδίασης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών

1.1. Εισαγωγή

Τα σημερινά σχεδιαστικά πακέτα παρέχουν χρήσιμα εργαλεία για την παραμετρική περιγραφή περίπλοκων γεωμετριών. Εντούτοις, οι τεχνικές σχεδίασης που χρησιμοποιούν είναι γενικές και η χρησιμοποίησή τους για τη σχεδίαση τμημάτων στροβιλομηχανών είναι χρονοβόρα και απαιτεί σημαντική επένδυση σε χρόνο και εμπειρία. Αιτία είναι το γεγονός ότι για το συγκεκριμένο αντικείμενο σχεδίασης απαιτείται η χρήση ειδικών παραμέτρων, των οποίων η εισαγωγή και διαχείριση από τα προγράμματα CAD είναι συνήθως δύσκολη. Επίσης, με τη χρήση προγραμμάτων CAD απαιτείται η δημιουργία διαφορετικών παραμετρικών μοντέλων για κάθε διαφορετικού τύπου στροβιλομηχανής.

Είναι αναγκαία, επομένως, η ύπαρξη ειδικών σχεδιαστικών εργαλείων, τα οποία ειδικεύονται στην παραμετρική σχεδίαση στροβιλομηχανών. Τα συγκεκριμένα εργαλεία είναι πιο εύκολα στη χρήση, αφού χρησιμοποιούν φυσικές παραμέτρους σχεδίασης (π.χ. γωνίες εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής). Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης υλοποιεί το σχεδιασμό πολύπλοκων γεωμετριών με αποδοτικό τρόπο. Επίσης, τα εργαλεία αυτά έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης με λογισμικά δημιουργίας πλέγματος και ανάλυσης, καθώς και με λογισμικά βελτιστοποίησης και CAD, για περαιτέρω τροποποιήσεις των παραγόμενων γεωμετριών [1].

Παρά το γεγονός ότι πολλοί ερευνητές ασχολούνται με τη σχεδίαση και τη βελτιστοποίηση πτερυγώσεων στροβιλομηχανών, είναι λίγες οι μεθοδολογίες που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για την παραμετρική μοντελοποίηση τους. Ο Pritchard [2] πρότεινε ένα γεωμετρικό μοντέλο για τις διατομές πτερυγίων αξονικών στροβίλων που χρησιμοποιεί 11 βασικές παραμέτρους. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία οι πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης (suction & pressure sides) προσεγγίζονται με χρήση κυκλικών τόξων και τριτοβάθμιων πολυωνύμων. Ένα όμως από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν εξασφαλίζεται συνέχεια 2^{ου} βαθμού στις ακμές προσβολής και εκφυγής, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται ασυνέχειες στη διανομή του αριθμού Mach στην επιφάνεια του πτερυγίου. Μια τροποποίηση της μεθόδου αυτής προτάθηκε από τον Trigg [3], η οποία αντικατέστησε τα πολυώνυμα και το κυκλικό τόξο με καμπύλες Bezier. Με την εισαγωγή των καμπυλών Bezier αυξήθηκε ο αριθμός των παραμέτρων από 11 σε 17, παρόλα αυτά οι παραγόμενες γεωμετρίες εξακολουθούσαν να παρουσιάζουν προβλήματα ασυνέχειας.

Οι Anders et al. [4] χρησιμοποίησαν δύο 5^{ης} τάξης καμπύλες Bezier και δύο κύκλους (ή ελλείψεις) στις ακμές προσβολής και εκφυγής για τον προσδιορισμό των διατομών των πτερυγίων. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία εξασφαλίζει συνέχεια 1^{ου} βαθμού αλλά παρουσιάζει ασυνέχειες καμπυλότητας στις ενώσεις των διαφόρων τμημάτων. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να παράγει πτερύγια διαφόρων σχημάτων για συμπίεστρες και στροβίλους.

Ο Κορακιανίτης [5], [6], [7], πρότεινε τρία γεωμετρικά μοντέλα πτερυγίων, για τα οποία η

περιοχή της ακμής προσβολής δημιουργείται με δύο κατανομές πάχους, που εφαρμόζονται κάθετα σε δύο παραβολικές μέσες γραμμές κυρτότητας (camber lines). Στο πρώτο μοντέλο, η πλευρά υποπίεσης ορίζεται από τρία πολυώνυμα 3^{ης}, 5^{ης} και 3^{ης} τάξης κατ' ακολουθία και κατά τον ίδιο τρόπο ορίζεται και η πλευρά υπερπίεσης. Το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζει ασυνέχειες καμπυλότητας, για αυτό το λόγο στο δεύτερο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο καμπυλών 4^{ης} τάξης. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται συνέχεια έως και 3^{ου} βαθμού στα κρίσιμα σημεία αλλά αυξάνεται και ο υπολογιστικός χρόνος. Στην τρίτη μέθοδο χρησιμοποιήθηκε ένα αναλυτικό πολυώνυμο για το πίσω μέρος της πλευράς υποπίεσης, ενώ η κεντρική περιοχή περιγράφεται με μία καμπύλη Bezier, που προσεγγίζει μία επιθυμητή κατανομή καμπυλότητας. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο οδηγεί σε ομαλές κατανομές του αριθμού Mach, η χρήση κατανομών καμπυλότητας για τον έλεγχο του σχήματος των διατομών των πτερυγίων καθιστά τη μέθοδο δύσχρηστη.

Πολλοί ερευνητές έχοντας ως στόχο τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των αεροτομών, χρησιμοποίησαν καμπύλες Bezier ή B-Splines για τη μοντελοποίηση τους. Οι καμπύλες χρησιμοποιούνται ή ως ξεχωριστές καμπύλες, ή ως μία ανοιχτή ή κλειστή καμπύλη με ή χωρίς τη προσθήκη ενός κύκλου στην ακμή προσβολής και/ή στην ακμή εκφυγής [8]. Εντούτοις, η χρήση των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου ως παραμέτρους σχεδίασης ταιριάζει περισσότερο στις αεροτομές και όχι στις διατομές των πτερυγίων. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να εισαχθούν παράμετροι σχεδίασης με φυσική σημασία.

Οι Goel et al. [9] χρησιμοποίησαν πολυώνυμα Bezier-Bernstein για την μοντελοποίηση μίας αεροτομής στροβίλου (turbine airfoil). Τα σημεία ελέγχου κοντά στα σημεία προσβολής και εκφυγής ρυθμίζονται ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια κλίσης. Άλλες γεωμετρικές παράμετροι, όπως η γωνία κλίσης (stagger angle), χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα ως παράμετροι ελέγχου της γεωμετρίας. Ο Li Jun [10] χρησιμοποίησε καμπύλες Spline 4^{ης} τάξης κατά μήκος τμημάτων των πλευρών υποπίεσης και υπερπίεσης, για την σχεδίαση διηχητικών πτερυγώσεων στροβίλου. Οι Yamamoto και Inoue [11] συνδύασαν την απεικόνιση των αεροτομών βάσει των καμπυλών B-Spline με την κλασική απεικόνιση των αεροτομών χρησιμοποιώντας τη μέση γραμμή κυρτότητας. Οι θέσεις των σημείων ελέγχου της B-Spline υπολογίζονται συνδυάζοντας τη μέση γραμμή κυρτότητας με τη διανομή του πάχους πτερυγίου σε διαδοχικά επίπεδα ορισμού της γεωμετρίας (αυξανόμενης πολυπλοκότητας).

Ο Pierret [12] χρησιμοποίησε ένα γεωμετρικό μοντέλο βασισμένο στις καμπύλες Bezier για τον ορισμό αξονικών στροβίλων δύο και τριών διαστάσεων καθώς και πτερυγίων συμπίεστών. Η μέση γραμμή κυρτότητας κάθε διδιάστατη διατομής ορίζεται από μια Bezier καμπύλη τριών σημείων ελέγχου, των οποίων η θέση ορίζεται χρησιμοποιώντας την αξονική χορδή, τις γωνίες του πτερυγίου στις ακμές εκφυγής και προσβολής και τη γωνία κλίσης. Οι πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης της αντίστοιχης διατομής ορίζονται από δύο ξεχωριστές καμπύλες Bezier, τα σημεία ελέγχου των οποίων υπολογίζονται συναρτήσει της μέσης γραμμής. Ένας κύκλος είναι τοποθετημένος στο σημείο εκφυγής και τα αντίστοιχα σημεία ελέγχου των καμπυλών Bezier τοποθετούνται έτσι ώστε οι καμπύλες υποπίεσης και υπερπίεσης να εφάπτονται στον κύκλο. Το πρώτο σημείο ελέγχου και των δύο καμπυλών συμπίπτει με το σημείο προσβολής, ενώ τα δεύτερα τοποθετούνται σε μία απόσταση από το σημείο προσβολής, κάθετα στη μέση γραμμή. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η δημιουργία δύο καμπυλών που ξεκινούν από το σημείο προσβολής κάθετες στην μέση γραμμή.

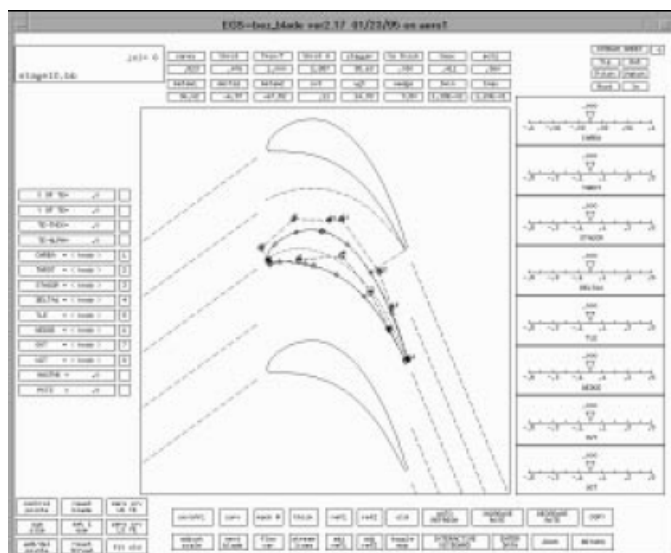
Η τριδιάστατη γεωμετρία του πτερυγίου ορίζεται χρησιμοποιώντας δύο «βασικές» διατομές, οι οποίες τοποθετούνται σε συγκεκριμένες κυλινδρικές επιφάνειες. Επιπλέον διατομές μπορούν να δημιουργηθούν με παρεμβολή των παραμέτρων σχεδίασης των «βασικών» διατομών. Ως σημείο αναφοράς για τη διαμήκη στοίβαξη των διατομών μπορεί να είναι το σημείο προσβολής, το σημείο εκφυγής ή το κέντρο βάρος τους. Η γραμμή στοίβαξης ορίζεται χρησιμοποιώντας δύο καμπύλες Bezier στα δύο άκρα και μία ευθεία γραμμή στο κεντρικό τμήμα του πτερυγίου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζονται διάφορα λογισμικά πακέτα (εμπορικά και ακαδημαϊκά), που ειδικεύονται στη σχεδίαση τμημάτων στροβιλομηχανών και εκπληρώνουν τις παραπάνω απαιτήσεις.

1.2. Bezblade

Το Bezblade [13] είναι ένα εργαλείο που αναπτύχθηκε από την εταιρία General Electric για το σχεδιασμό επίπεδων διατομών πτερυγίων. Οι διατομές που σχεδιάζονται χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή της τριδιάστατης γεωμετρίας της πτερωτής. Ο σχεδιασμός τόσο των επίπεδων διατομών όσο και ολόκληρης της πτερωτής γίνεται με τη χρήση καμπυλών Bezier.

Το πρόγραμμα διαθέτει φιλικό προς το χρήστη γραφικό περιβάλλον (Εικόνα 1.1), μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο έλεγχος των σχεδιαστικών παραμέτρων των πτερυγίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί έναν γρήγορο επιλύτη της ροής σε δύο διαστάσεις, προκειμένου να υπολογίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα οι επιδράσεις στη ροή των αλλαγών στις παραμέτρους σχεδίασης.



Εικόνα 1.18. Το γραφικό περιβάλλον του BezBlade[13].

1.3. BladeCAD

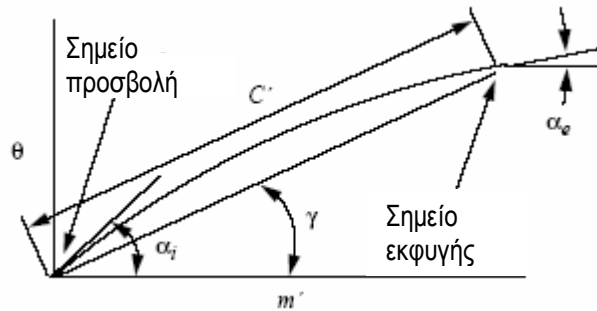
Το BladeCAD [14], είναι ένα γεωμετρικό εργαλείο σχεδίασης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών, που αναπτύχθηκε υπό την εποπτεία της NASA και εισήγαγε μία νέα μεθοδολογία για τον τρόπο σχεδιασμού των πτερυγίων. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μεθοδολογία αρχικά ορίζονται οι διατομές των πτερυγίων σε δύο διαστάσεις και στην συνέχεια με lofting¹ προκύπτει η τρισδιάστατη γεωμετρία τους.

Αναλυτικότερα, για τον ορισμό μιας διδιάστατης διατομής πτερυγίου χρησιμοποιούνται τρεις καμπύλες. Η πρώτη καμπύλη είναι μία κυβική καμπύλη Bezier και προσδιορίζει τη μέση γραμμή κυρτότητας (mean camber line²), η οποία ορίζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους: μέση γωνία εισόδου, μέση γωνία εξόδου, γωνία κλίσης και χορδή (Εικόνα 1.2). Οι άλλες δύο

¹ **lofting**: η λειτουργία προσαρμογής επιφάνειας από καμπύλες στο χώρο

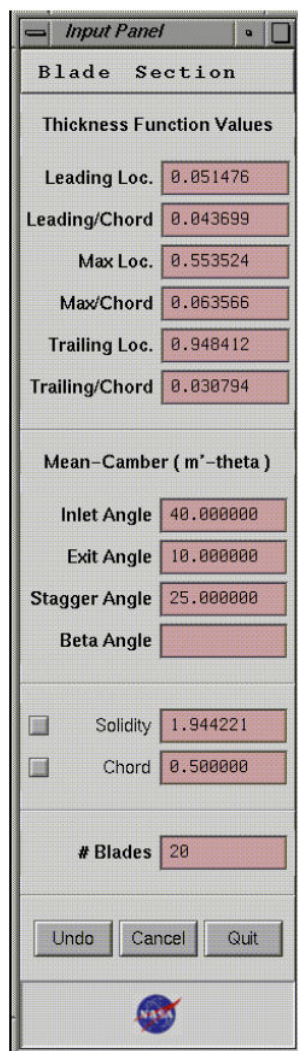
² **mean camber line**: η γραμμή που ισαπέχει από τις επιφάνειες υποπίεσης και υπερπίεσης του πτερυγίου

καμπύλες προσδιορίζουν τις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης του πτερυγίου συναρτήσει της μέσης γραμμής κυρτότητας.

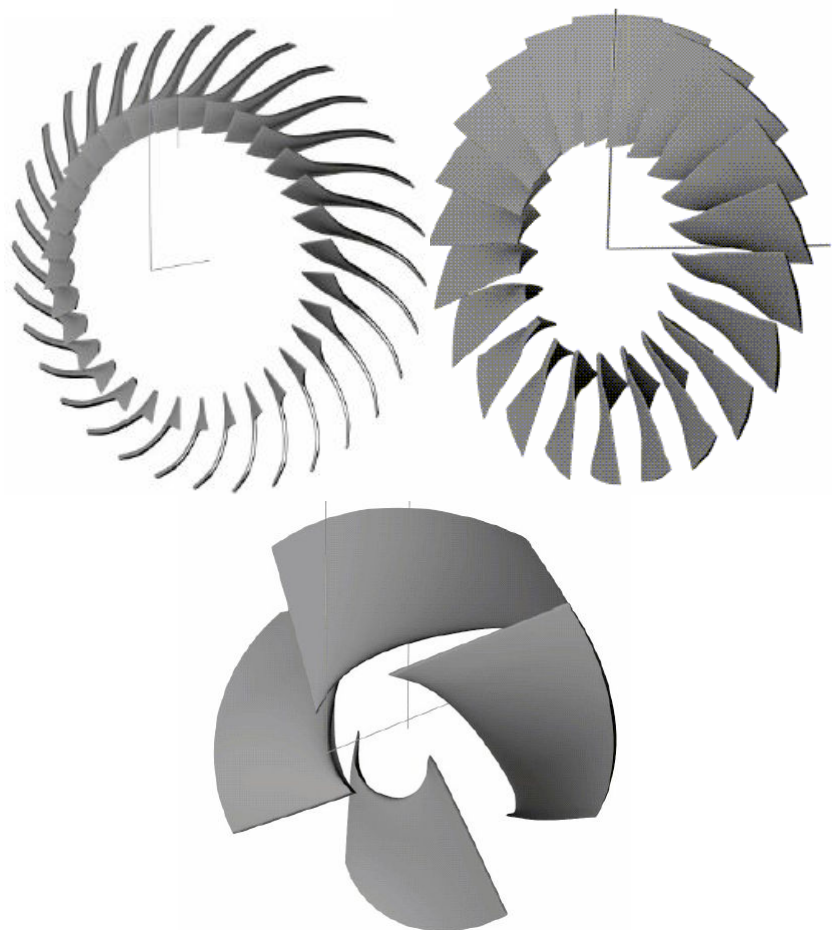


Εικόνα 1.19.Ορισμός της μέσης γραμμής κυρτότητας σύμφωνα με το BladeCAD[14].

Στην Εικόνα 1.3, παρουσιάζεται η φόρμα εισόδου δεδομένων του BladeCAD από την οποία ο χρήστης εισάγει τα απαιτούμενα δεδομένα των διατομών, ενώ στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές του BladeCAD.



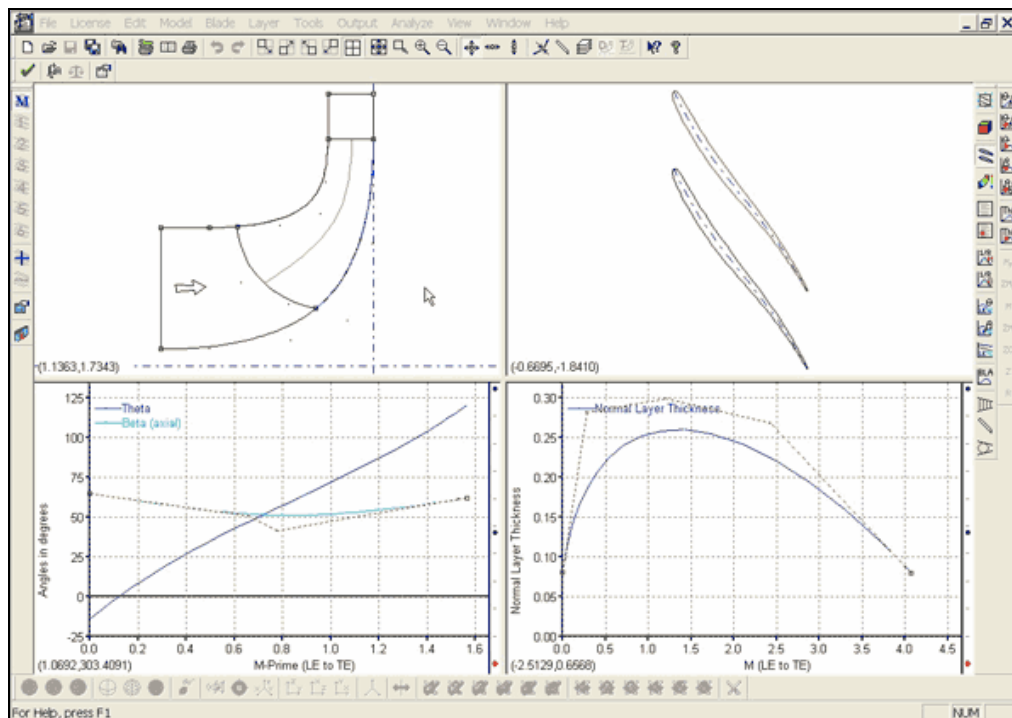
Εικόνα 1.3. Φόρμα εισόδου δεδομένων του λογισμικού BladeCAD[14]



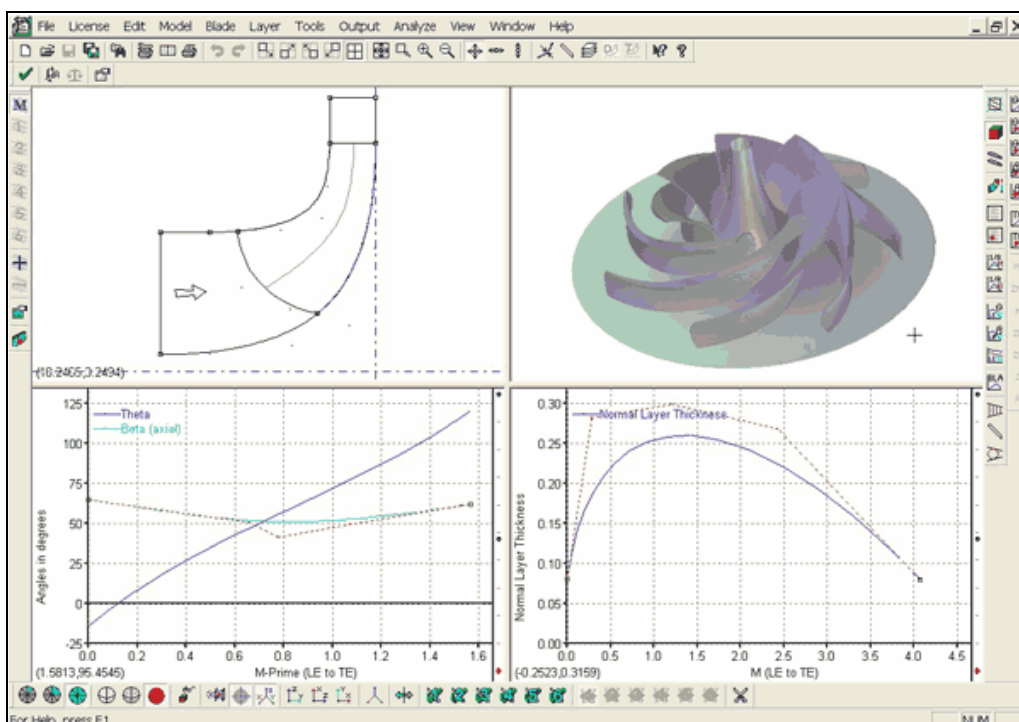
Εικόνα 1.20. Παραγόμενες γεωμετρίες του λογισμικού BladeCAD[14]

1.4. BladeModeler

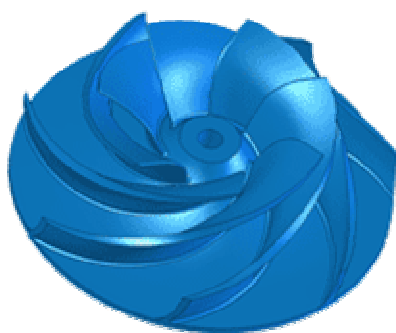
Η εταιρεία ANSYS δημιούργησε το BladeModeler [15], ένα λογισμικό που ειδικεύεται στην τρισδιάστατη σχεδίαση τμημάτων στροβιλομηχανών. Το συγκεκριμένο λογισμικό συνδέεται με διάφορους κώδικες προσομοίωσης, όπως υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) και ανάλυσης αντοχής. Μέσω των διαφόρων όψεων (2-D και 3-D) των παραγόμενων γεωμετριών, που παρέχονται από το λογισμικό (Εικόνες 1.4-1.5), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί άμεσα και ξεκάθαρα τις σχεδιαστικές τροποποιήσεις που επιφέρει. Επίσης, του δίνεται η δυνατότητα χρήσης πολλών παραμέτρων σχεδίασης, όπως γωνιές πτερυγίων, μεσημβρινή διατομή, κατανομές πάχους κ.α., ενώ, σύμφωνα με τη διαδικασία σχεδίασης που θα ακολουθηθεί (και τις αντίστοιχες παραμέτρους), καθορίζεται το επίπεδο λεπτομέρειας της παραγόμενης γεωμετρίας. Η τελική παραγόμενη γεωμετρία μπορεί να εξαχθεί σε διαφόρους τύπους αρχείων (όπως AutoCAD, IGES, ProE, Parasolid).



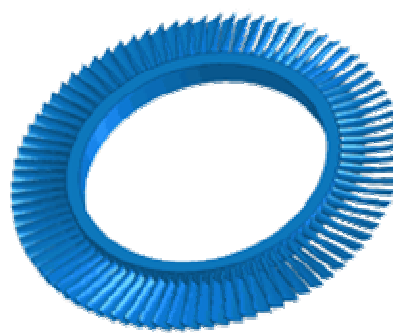
Εικόνα 1.21. Το γραφικό περιβάλλον του BladeModeler [15].



Εικόνα 1.22. Το γραφικό περιβάλλον του BladeModeler [15].



(α) Φυγόκεντρη αντλία



(β) Αξονικός στρόβιλος



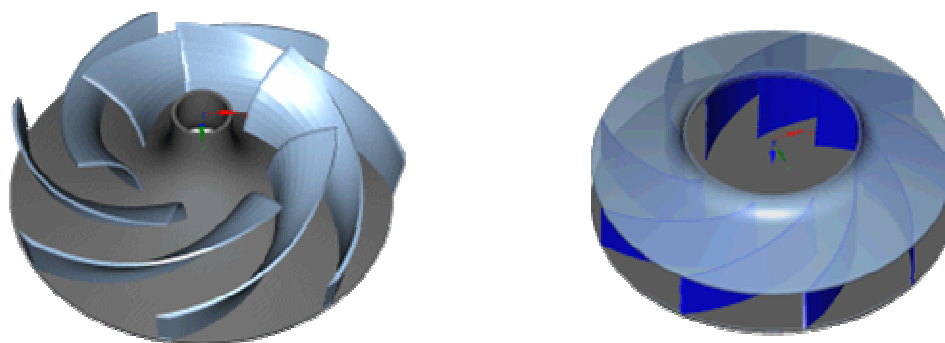
(γ) Ακτινικός συμπίεστής

Εικόνα 1.23. Παραγόμενες γεωμετρίες του BladeModeler. (α) φυγόκεντρη αντλία (β) αξονικός στρόβιλος (γ) ακτινικός συμπίεστής[15].

1.5. CFturbo

Το CFturbo [16] είναι ένα αξιόλογο αλληλεπιδραστικό λογισμικό, που αναπτύχθηκε από την εταιρία CFDnetwork Engineering για τη σχεδίαση τμημάτων στροβιλομηχανών. Το CFturbo ειδικεύεται στη σχεδίαση ακτινικών και μικτής ροής αντλιών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα

σχεδιασμού αντλιών είτε από την αρχή είτε τροποποιώντας υπάρχουσες γεωμετρίες. Η τελική παραγόμενη γεωμετρία μπορεί να εξαχθεί σε διαφόρους τύπους αρχείων για περαιτέρω διαχείριση.



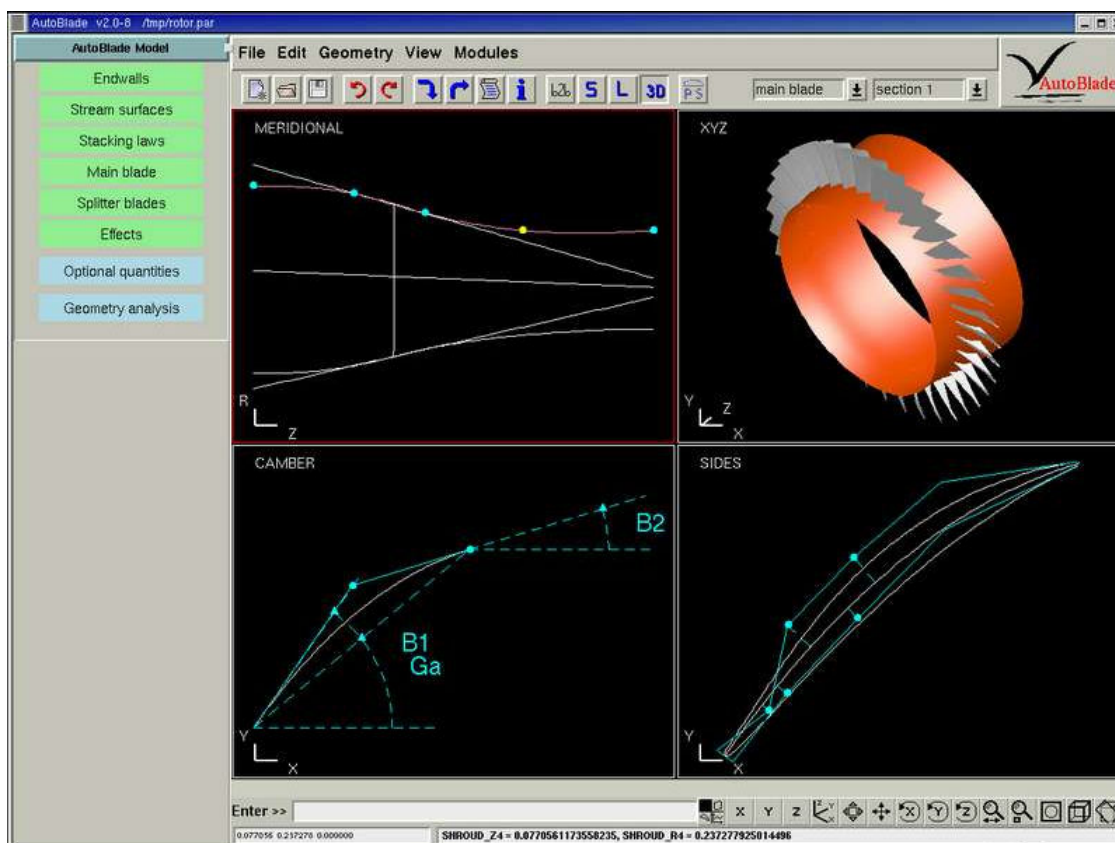
Εικόνα 1.24. Παραγόμενες γεωμετρίες του CFturbo [16].

1.6. FINE/Design3D™

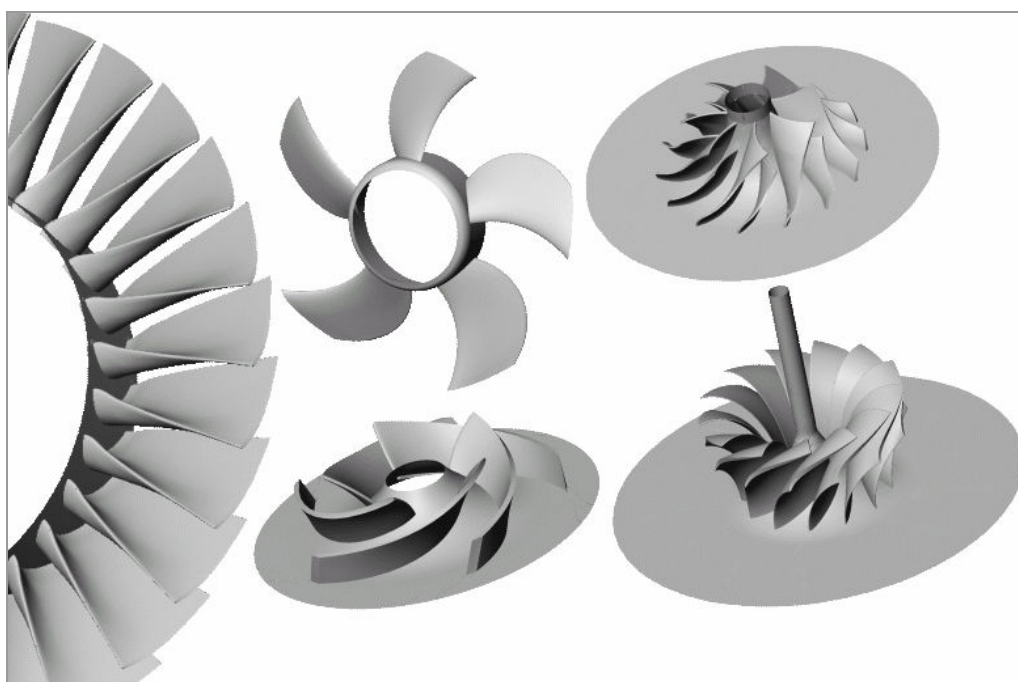
Υπάρχουν ορισμένα λογισμικά πακέτα που σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση της απόδοσης στροβιλομηχανών και διαθέτουν κάποιο υποσύστημα σχεδίασης. Ένα από τα πιο αξιόλογα του είδους, είναι το FINE/Design3D™ [17] της NUMECA International.

Το FINE/Design3D™ είναι ένα λογισμικό πακέτο βελτιστοποίησης της απόδοσης περιστρεφόμενων πτερυγώσεων στροβιλομηχανών. Το εν λόγω λογισμικό έχει ενσωματωμένο ένα ευπροσάρμοστο παραμετρικό εργαλείο σχεδίασης (το Autoblade [18]), συνδεδεμένο με αλγορίθμους βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο του FINE/Design3D™ είναι ότι διαθέτει βάση δεδομένων, η οποία συνδέεται με ένα νευρωνικό δίκτυο για γρήγορη βελτιστοποίηση της σχεδίασης, χωρίς να απαιτούνται αναλύσεις της ροής με χρήση λογισμικού CFD. Εντούτοις, παρέχεται και συνδεσιμότητα με κώδικες CFD, μέσω τυποποιημένων αρχείων ανταλλαγής δεδομένων γεωμετρίας (IGES).

Το Autoblade (Εικόνα 1.8) χρησιμοποιείται για την ακριβή σχεδίαση όλων των τύπων πτερυγώσεων. Ο καθορισμός της γεωμετρίας τους στο AutoBlade είναι γενικός και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε με το προσδιορισμό των πλευρών υποπίεσης και υπερπίεσης, είτε με τον προσδιορισμό της μέσης γραμμής και της κατανομής πάχους του πτερυγίου.



Εικόνα 1.25. Το γραφικό περιβάλλον του AutoBlade [18].



Εικόνα 1.26. Παραγόμενες γεωμετρίες του FINE/Design3D™ [17].

1.7. AGILE™

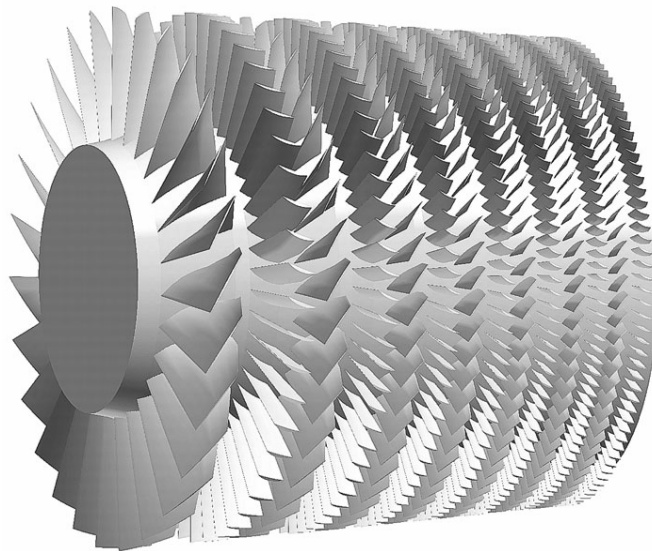
Το AGILE™ Engineering Design System®[19] αναπτύχθηκε από την εταιρεία Concepts NREC και είναι το μοναδικό εμπορικό σχεδιαστικό λογισμικό που περιγράφει ολόκληρη τη

μηχανική σχεδιαστική διαδικασία τμημάτων στροβιλομηχανών. Το AGILE™ περιέχει εργαλεία που ασχολούνται αποκλειστικά με το σχεδιασμό των διαφόρων τμημάτων, όπως το AXCAD, και το CCAD/ COMIG.

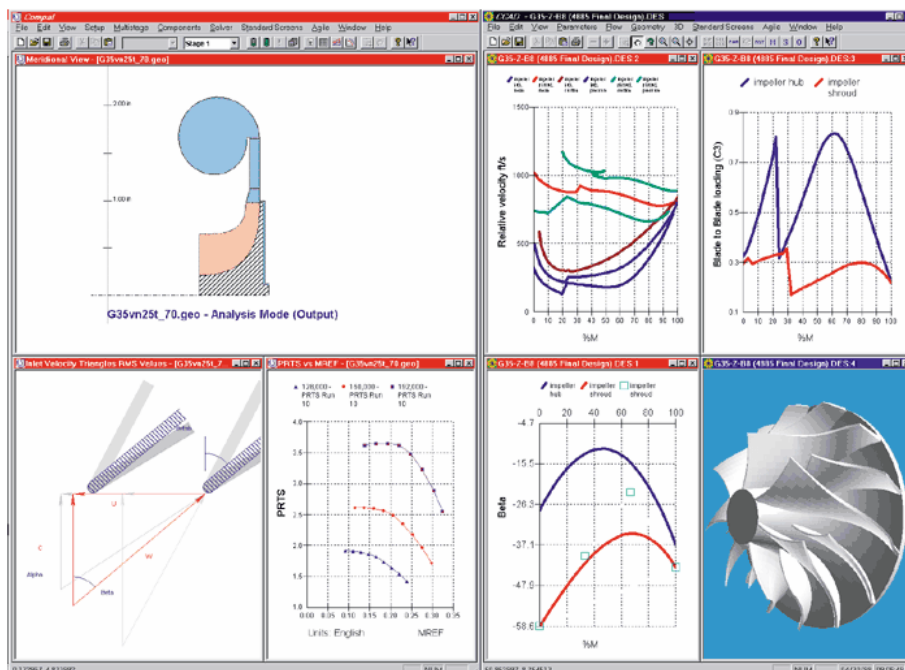
Το AXCAD [20] είναι ένα εργαλείο σχεδίασης περωτών για μονού ή πολλαπλών σταδίων αξονικούς συμπιεστές, στροβίλους και αντλίες. Η γεωμετρία των περωτών παράγονται με προσαρμογή NURBS επιφανειών (lofting) στις διατομές των περυγίων, που παράγονται με καμπύλες Bezier.

Το λογισμικό CCAD/ COMIG [21] σχετίζεται με τη σχεδίαση και ανάλυση περωτών για φυγόκεντρους και μεικτής ροής συμπιεστές και αντλίες και για ακτινικούς και μεικτής ροής στροβίλους. Όλες οι παραγόμενες γεωμετρίες του λογισμικού ορίζονται με πολυώνυμα Bezier-Bernstein και NURBS επιφάνειες.

Το AGILE™ συνδέεται με προγράμματα CFD και FEA (Fine Element Analysis), για περαιτέρω ανάλυση, μέσω των αρχείων IGES που εξαγάγουν.



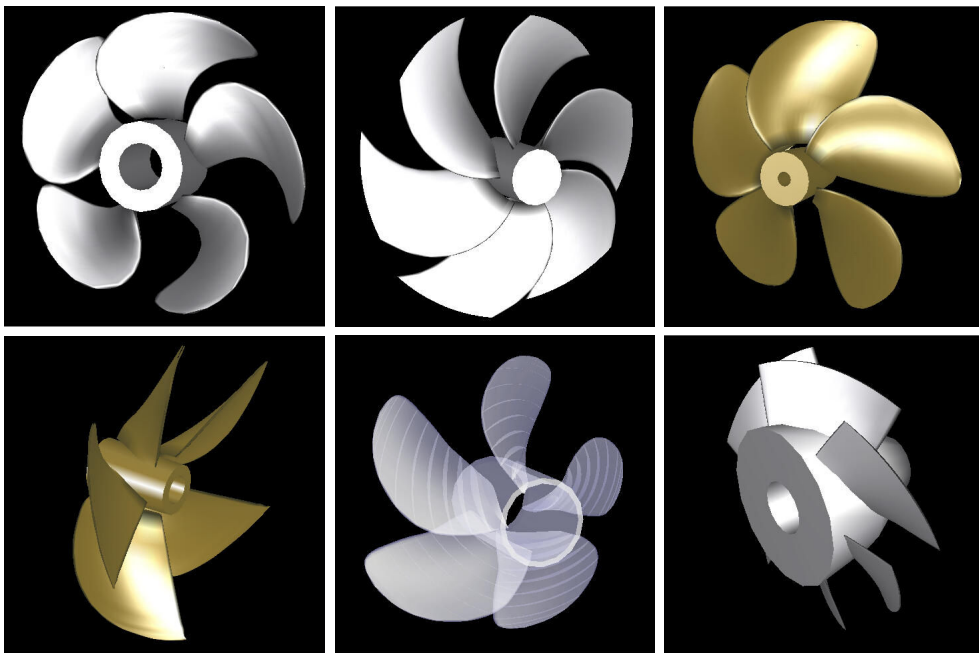
Εικόνα 1.27. Παραγόμενη γεωμετρία του AXCAD[20].



Εικόνα 1.28. Το γραφικό περιβάλλον του CCAD/ COMIG[21].

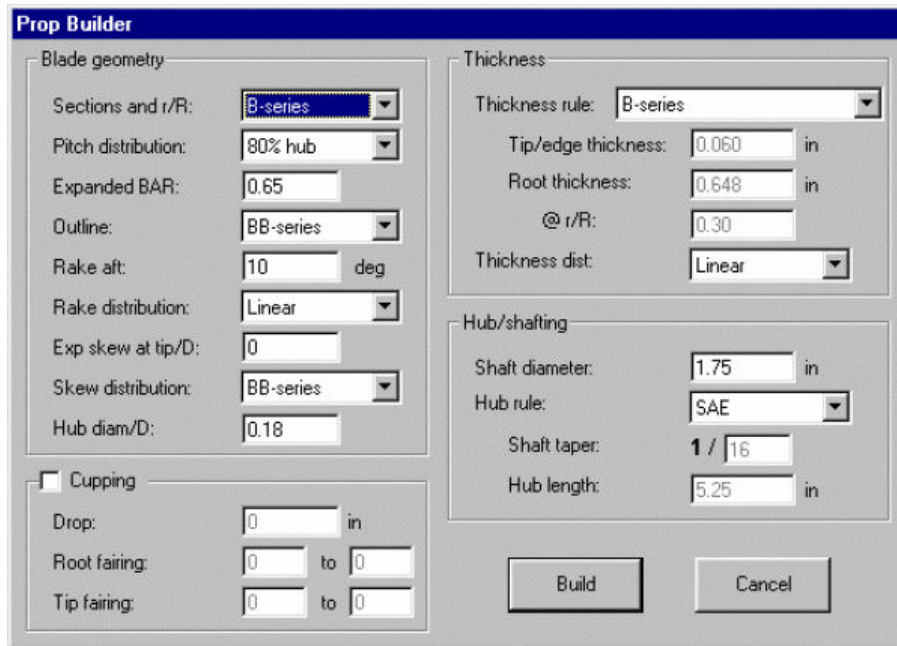
1.8. PropCAD

Το PropCAD [22] αναπτύχθηκε από την εταιρία HydroComp.Inc και είναι το μόνο λογισμικό που σχετίζεται με το σχεδιασμό-κατασκευή ναυτικών ελίκων (Εικόνα 1.13). Ωστόσο, το PropCAD έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει και άλλα περιστρεφόμενα τμήματα μηχανών, όπως πτερυγώσεις στροβίλων και έλικες αεροσκαφών. Η κατασκευή των 3D γεωμετριών επιτυγχάνεται με τη χρήση της ενσωματωμένης συλλογής βιομηχανικών μοντέλων ελίκων (π.χ. Gawn, B-series, Kaplan, AU, SK), τα οποία χρησιμοποιούνται ως πρότυπα σχεδίασης. Όλες οι παραγόμενες γεωμετρίες του PropCAD μπορούν να μεταφερθούν σε άλλους υπολογιστικούς κώδικες για περαιτέρω ανάλυση.

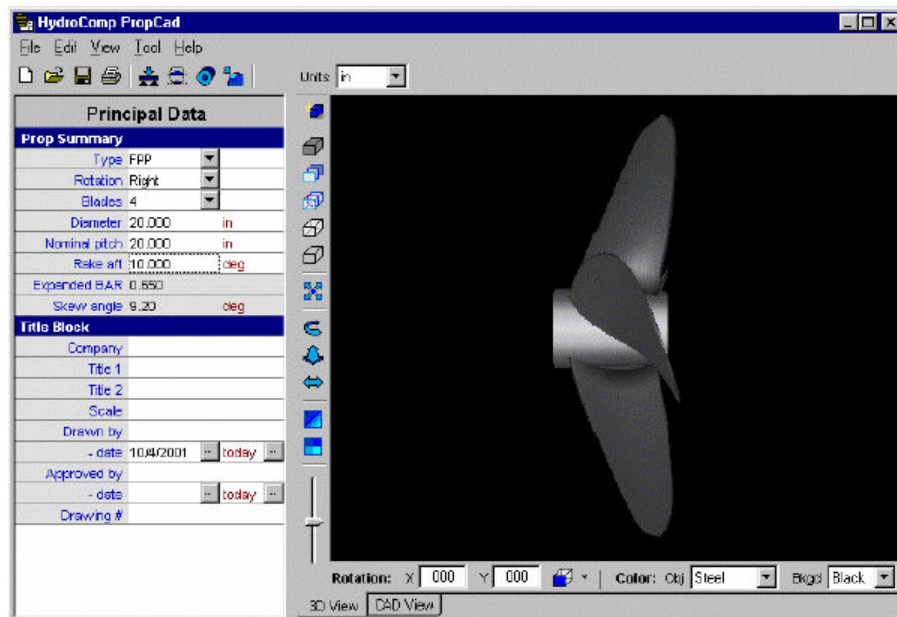


Εικόνα 1.29. Γεωμετρίες ελίκων που σχεδιάστηκαν με τη χρήση του PropCAD[22].

Στην Εικόνα 1.14, παρουσιάζεται η φόρμα Prop Builder, στην οποία ο χρήστης καθορίζει το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, ενώ στην Εικόνα 1.15 παρουσιάζεται η κύρια φόρμα του λογισμικού.



Εικόνα 1.30. Η φόρμα Prop Builder [22].



Εικόνα 1.31. Η κύρια φόρμα του PropCAD [22].

1.9. TURBODesign¹ & TURBODesign²

Το TURBODesign¹ [23] είναι ένα σχεδιαστικό λογισμικό για πτερυγώσεις στροβιλομηχανών, που βασίζεται στην μέθοδο της τρισδιάστατης αντίστροφης σχεδίασης, και αναπτύχθηκε από την Advanced Design Technology (ADT).

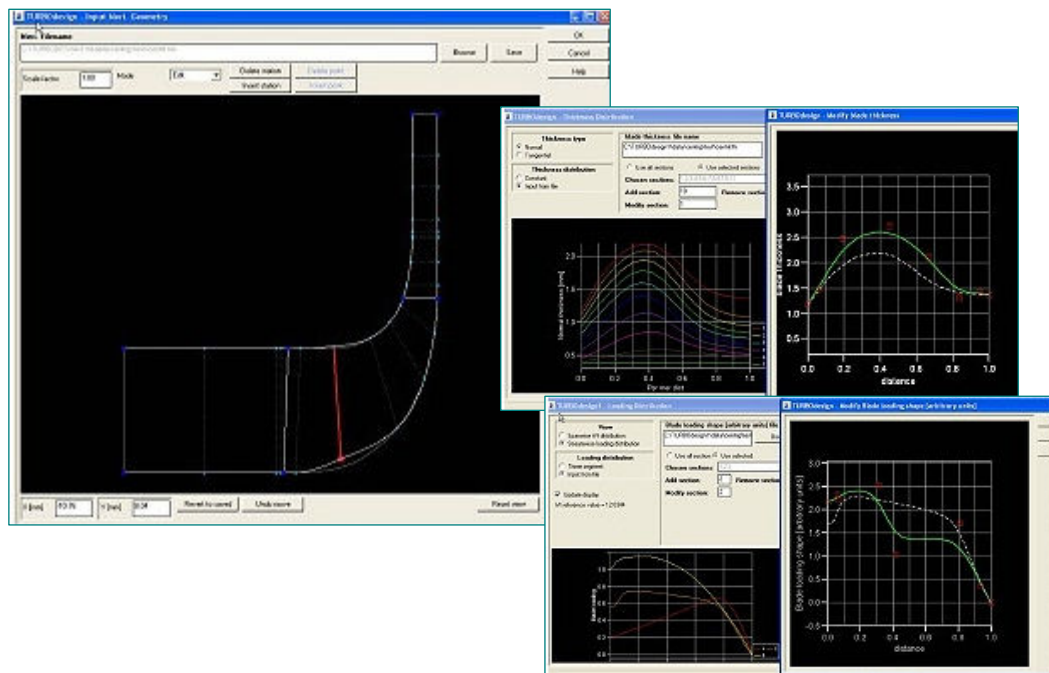
Το TURBODesign¹ είναι κατάλληλο για όλους τους τύπους στροβιλομηχανών, όπως ακτινικής, μεικτής και αξονικής ροής, σταθερές ή κινητές, με συμπιεστή ή ασυμπίεστη ροή (Εικόνα 1.16). Οι πτερυγώσεις παράγονται παρέχοντας στο λογισμικό ένα σύνολο δεδομένων, όπως ταχύτητα περιστροφής, κατανομή εισερχόμενη ροής, μεσημβρινή κατατομή, αριθμός

πτερυγίων και πάχος πτερυγίων. Όλες οι γεωμετρίες παράγονται με τη χρήση καμπυλών και επιφανειών B-Spline.

Τέλος, η ADT έχει αναπτύξει και το λογισμικό TURBODesign², επίσης σχεδιαστικό λογισμικό για πτερυγώσεις στροβιλομηχανών το οποίο όμως ειδικεύεται στη σχεδίαση πολυβάθμιων συμπίεστών με υψηλούς λόγους συμπίεσης.



Εικόνα 1.32. Παραγόμενες γεωμετρίες του TURBODesign¹ [23].



Εικόνα 1.33. Επιμέρους φόρμες του γραφικού περιβάλλοντος του TURBODesign¹ [23].

1.10. VISTA

Η εταιρεία PCA Engineers Limited έχει αναπτύξει το λογισμικό πακέτο VISTA (Visual Turbomachinery Analysis), το οποίο σχετίζεται με την σχεδίαση και ανάλυση

στροβιλομηχανών. Το VISTA-AT Blade και το VISTA-AC Blade είναι εργαλεία του λογισμικού, τα οποία σχεδιάζουν πτερυγώσεις για αξονικούς και για ακτινικούς στροβίλους, αντίστοιχα.

Το Vista-AT Blade [24], είναι ένα εύχρηστο και αλληλεπιδραστικό εργαλείο σχεδιασμού διατομών πτερυγώσεων για στροβίλους. Ο σχεδιαστής μπορεί να δημιουργήσει μέχρι και 9 διαφορετικές διατομές, που περιγράφονται από καμπύλες Bezier, τις οποίες μπορεί να τροποποιήσει εύκολα, μετακινώντας τα σημεία ελέγχου των καμπυλών στην οθόνη. Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των διατομών, πραγματοποιείται «lofting» από τις καμπύλες. Αντίστοιχα, το Vista-AC Blade [25], επικεντρώνεται στο σχεδιασμό διατομών πτερυγώσεων για συμπιεστές. Διαθέτει ενσωματωμένες σχεδόν όλες τις χρησιμοποιούμενες τυποποιημένες διατομές (όπως DCA, MCA, NACA 65, C4 - C7, SFN και DPA), οι οποίες μπορούν να επιλεγθούν είτε για χρήση, είτε για τροποποίηση.

1.11. T4T

Στη παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε και στον πρόλογο, σκοπός είναι η παρουσίαση του λογισμικού T4T (Tools for Turbomachinery), το οποίο ειδικεύεται στη σχεδίαση μονού ή πολλαπλών σταδίων πτερυγώσεων για στροβιλομηχανές.

Η πρώτη έκδοση του T4T αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic 6.0. Η Visual Basic αν και είναι μία από τις πιο διαδεδομένες γλώσσες προγραμματισμού, παρουσιάζει περιορισμένες δυνατότητες αντικειμενοστραφούς λογικής. Η έλλειψη αντικειμενοστραφούς δομής, περιορίζει τις δυνατότητες του λογισμικού, καθώς η εν λόγω μεθοδολογία δεν μπορούσε να εφαρμοστεί σε πολυβάθμιες μηχανές ή σε πολύπλοκες γεωμετρίες, όπου η περιγραφή των πτερυγώσεων απαιτούσε μεγάλο αριθμό διατομών. Επίσης, όσον αφορά στο γραφικό του περιβάλλον, το T4T δεν διέθετε τριδιάστατη απεικόνιση της γεωμετρίας για την άμεση προεπισκόπηση της.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η αλλαγή αυτή κρίθηκε αναγκαία γιατί η Java προσφέρει αντικειμενοστραφή λογική, πολύ καλές βιβλιοθήκες γραφικών, ενώ είναι και ανεξάρτητη πλατφόρμας (λειτουργικού συστήματος).

Το λογισμικό, χρησιμοποιώντας τέσσερις φυσικές παραμέτρους και την κατανομή πάχους των πτερυγίων, προσδιορίζει τις διατομές τους στις δύο διαστάσεις. Στη συνέχεια, με προσαρμογή επιφάνειας σε αυτές, παράγεται η τρισδιάστατη γεωμετρία τους. Επίσης, σχεδιάζονται η πλήμνη και το κέλυφος της πτερωτής.

Όλες οι παραγόμενες γεωμετρίες σχεδιάζονται αποκλειστικά με καμπύλες και επιφάνειες NURBS και μπορούν μέσω αρχείων IGES να μεταφερθούν και σε άλλα πακέτα λογισμικού (βελτιστοποίησης, ανάλυσης, κ.λπ.) για περαιτέρω επεξεργασία. Το T4T θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο της εργασίας.

2

Μεθοδολογία

2.1. Εισαγωγή

Το λογισμικό T4T (Tools for Turbomachinery), όπως προαναφέρθηκε, είναι μια συλλογή από γεωμετρικά εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και απεικόνιση τριδιάστατων πολυβάθμιων πτερωτών στροβιλομηχανών.

Η γεωμετρία μίας τυπικής πτερωτής αποτελείται από τριών ειδών επιφάνειες: τα πτερύγια, τη πλήμνη και το κέλυφος. Η γεωμετρία όμως των πτερυγίων είναι αυτή που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική γεωμετρία της πτερωτής. Για το λόγο αυτό, η μεθοδολογία σχεδίασης που ακολουθείται από το T4T έχει ως πυρήνα τη σχεδίαση των πτερυγίων. Όσον αφορά τις επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους, η δημιουργία τους είναι αρκετά απλή, χωρίς αυτό όμως να υποβαθμίζει τη σημαντικότητά τους, όπως θα φανεί και στην συνέχεια. Όλες οι παραγόμενες γεωμετρίες από το λογισμικό T4T σχεδιάζονται αποκλειστικά με τη χρήση καμπυλών και επιφανειών NURBS.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία, που ακολουθείται από το λογισμικό για την κατασκευή των τρισδιάστατων πτερυγώσεων:

- Διδιάστατη απεικόνιση: Ορισμός των διατομών των πτερυγίων και των μεσημβρινών καμπυλών, που ορίζουν την πλήμνη και το κέλυφος της πτερύγωσης (Παράγραφος 2.2).
- Τριδιάστατη απεικόνιση: «Lofting»³ για την παραγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας των πτερυγίων και περιστροφή των γεννητριών καμπυλών για την παραγωγή των επιφανειών της πλήμνης και του κελύφους (Παράγραφος 2.3).

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται θα χρησιμοποιηθούν ορισμένα αριθμητικά παραδείγματα. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι οι προεπιλεγμένες τιμές του λογισμικού.

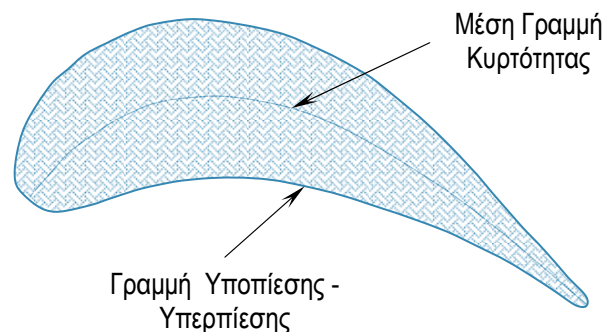
2.2. Διδιάστατη Απεικόνιση

2.2.1. Ορισμός των διατομών ενός πτερυγίου

Το λογισμικό T4T διαθέτει δύο μεθόδους για τη σχεδίαση των τριδιάστατων πτερυγίων, οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους μόνο ως προς τον ορισμό των διατομών τους. Η βασική

³ **lofting**: η λειτουργία προσαρμογής επιφάνειας από καμπύλες στο χώρο

μέθοδος σχεδίασης σχετίζεται με φυσικές παραμέτρους των πτερυγίων, όπως η αξονική τους χορδή και η γωνία κλίσης τους. Η δεύτερη μέθοδος δημιουργεί την επιφάνεια ενός πτερυγίου παρεμβάλλοντας μία επιφάνεια από ένα νέφος σημείων στο χώρο.



Εικόνα 2.1. Διατομή πτερυγίου που ορίζεται από 2 καμπύλες, τη μέση γραμμή κυρτότητας και τη γραμμή υποπίεσης- υπερπίεσης

Στη βασική μέθοδο σχεδίασης, για την κατασκευή μίας διατομής πτερυγίου χρησιμοποιούνται 2 καμπύλες. Η πρώτη περιγράφει την μέση γραμμή κυρτότητας του πτερυγίου και η δεύτερη που περιγράφει τις πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης του πτερυγίου (Εικόνα 2.1).

Η μέση γραμμή κυρτότητας περιγράφεται με μία 2^{ου} βαθμού NURBS⁴ καμπύλης με 3 σημεία ελέγχου, P_i , όπου $i = 0, 1, 2$. Το αρχικό σημείο ελέγχου P_0 της μέσης γραμμής συμπίπτει με το σημείο προσβολής της διατομής του πτερυγίου, ενώ το τελικό σημείο P_2 συμπίπτει με το σημείο εκφυγής της διατομής του πτερυγίου. Το πολύγωνο ελέγχου κάθε ανοικτής NURBS καμπύλης εφάπτεται στα άκρα της, επομένως η θέση του μεσαίου σημείου P_1 είναι το σημείο τομής των 2 ευθειών που περνάνε από τα σημεία προσβολής και εκφυγής και σχηματίζουν γωνίες β_{1m} και β_{2m} με την αξονική διεύθυνση, αντίστοιχα. Συνεπώς, ορίζοντας τις γωνίες του πτερυγίου (β_{1m} , β_{2m}) και χρησιμοποιώντας την αξονική χορδή (L_{ref}) και τη γωνία κλίσης (γ) υπολογίζονται οι θέσεις των P_1 και P_2 συναρτήσει του P_0 (Εικόνα 2.2).

Με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιούνται σχεδιαστικοί παράμετροι με φυσική σημασία για την κατασκευή της διατομής του πτερυγίου (Εικόνα 2.2).

Οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της μέσης γραμμής δίνονται από τις σχέσεις (2.1) στη γενική μορφή (Εικόνα 2.3). Στις περιπτώσεις ιδιομορφίας όπου $\beta_{1m}=0$ και $\beta_{2m} \neq 0$ (Εικόνα 2.4) και $\beta_{1m}=\beta_{2m}=\gamma$ (Εικόνα 2.5) οι συντεταγμένες δίνονται από τις σχέσεις (2.2) και (2.3), αντίστοιχα.

⁴ Θεωρία 1: Ορισμός Καμπύλης NURBS [26].

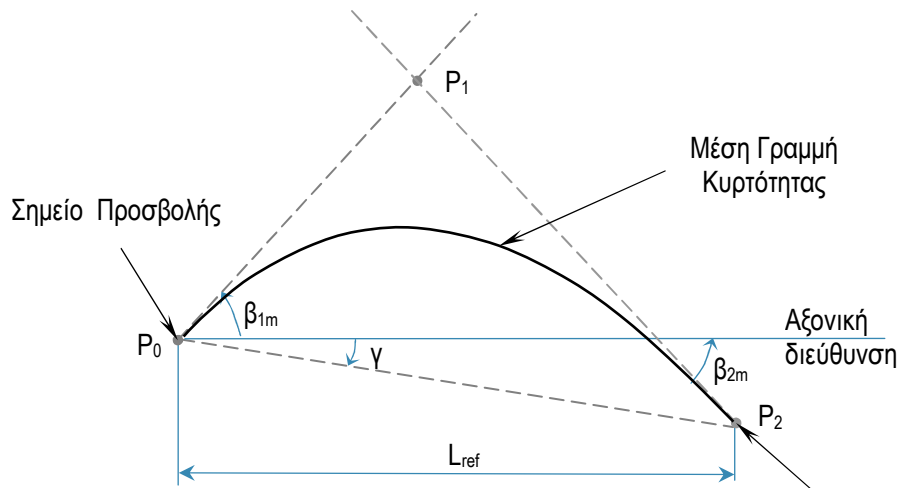
Μία p βαθμού καμπύλη NURBS ορίζεται από την παρακάτω σχέση ως εξής :

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i}, a \leq u \leq b$$

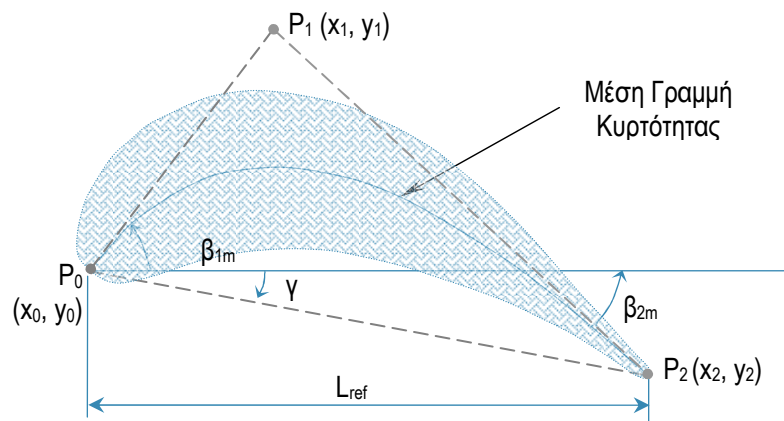
όπου τα $\{P_i\}$ είναι τα διανύσματα θέσης των σημείων ελέγχου που σχηματίζουν το πολύγωνο ελέγχου, τα $\{w_i\}$ είναι τα αντίστοιχα βάρη και οι $\{N_{i,p}(u)\}$ είναι οι p -βαθμού βασικές συναρτήσεις, που καθορίζονται από το διάνυσμα κόμβων:

$$U = \{\underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1}\}$$

Αν δεν ορισθεί κάτι διαφορετικό, γίνεται η υπόθεση ότι $a=0$, $b=1$ και $w_i > 0$ για όλα τα i .



Εικόνα 2.2. Σχεδιαστικοί παράμετροι για την κατασκευή διατομής περυγίου (β_{1m} , β_{2m} , L_{ref} , γ).



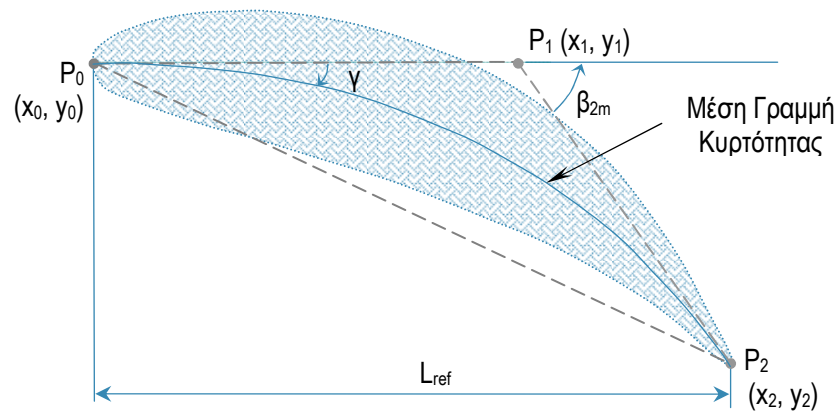
Εικόνα 2.3. Γενική μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας του περυγίου.

$$y_2 = y_0 + L_{ref} * \tan(\gamma) \quad (2.1.α)$$

$$x_2 = x_0 + L_{ref} \quad (2.1.β)$$

$$y_1 = \frac{(y_2 - L_{ref} * \tan(\beta_{1m}))}{(1 - \frac{\tan(\beta_{2m})}{\tan(\beta_{1m})})} \quad (2.1.γ)$$

$$x_1 = \frac{y_1}{\tan(\beta_{1m})} \quad (2.1.δ)$$



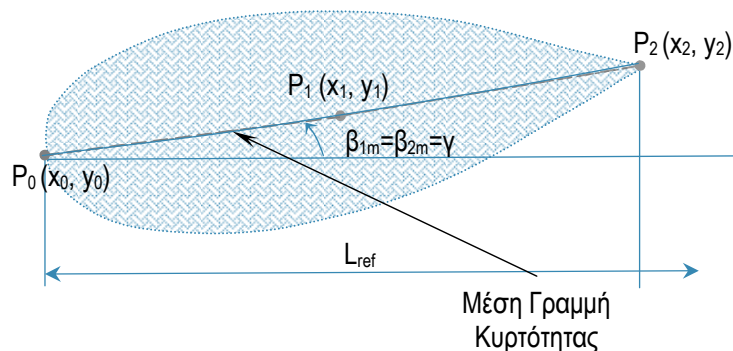
Εικόνα 2.4. Η μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας για την περίπτωση $\beta_{1m}=0$ και $\beta_{2m} \neq 0$.

$$y_2 = y_0 + L_{ref} * \tan(\gamma) \quad (2.2.α)$$

$$x_2 = x_0 + L_{ref} \quad (2.2.β)$$

$$y_1 = y_0 \quad (2.2.γ)$$

$$x_1 = L_{ref} - \frac{y_2}{\tan(\beta_{2m})} \quad (2.2.δ)$$



Εικόνα 2.5. Η μορφή της μέσης γραμμής κυρτότητας για την περίπτωση $\beta_{1m} = \beta_{2m} = \gamma$.

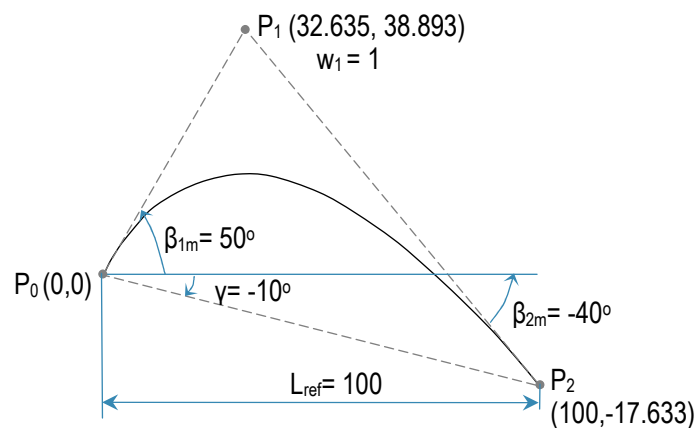
$$y_2 = y_0 + L_{ref} * \tan(\gamma) \quad (2.3.α)$$

$$x_2 = x_0 + L_{ref} \quad (2.3.β)$$

$$y_1 = \frac{y_0 + y_2}{2} \quad (2.3.γ)$$

$$x_1 = \frac{x_0 + x_2}{2} \quad (2.3.δ)$$

✓ Μέση Γραμμή Κυρτότητας: Έστω ότι οι τέσσερις σχεδιαστικοί παράμετροι της μέσης γραμμής παίρνουν τις τιμές: $\beta_{1m} = 50^\circ$, $\beta_{2m} = -40^\circ$, $L_{ref} = 100$, $\gamma = -10^\circ$ και οι συντεταγμένες του P_0 είναι $(0,0)$. Οι συντεταγμένες των P_1 και P_2 σύμφωνα με τις σχέσεις (2.1.α-δ) προκύπτουν $(32.635, 38.893)$, $(100, -17.633)$ αντίστοιχα (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6. Η μέση γραμμή για $\beta_{1m} = 50^\circ$, $\beta_{2m} = -40^\circ$, $L_{ref} = 100$, $\gamma = -10^\circ$. ■

Η επιφάνεια του πτερυγίου σχεδιάζεται με μία ανοικτή καμπύλη NURBS 3^{ου} βαθμού, η οποία «χτίζεται» γύρω από την μέση γραμμή κυρτότητας, σύμφωνα με την κατανομή πάχους πτερυγίου, που παρέχεται μέσω αρχείου κειμένου (τύπου *.wdb). Για τη δημιουργία αυτής της κλειστής επιφάνειας πρέπει το πρώτο σημείο ελέγχου της καμπύλης να συμπίπτει με το τελευταίο στο σημείο εκφυγής της διατομής του πτερυγίου, ενώ ένα σημείο ελέγχου πρέπει να βρίσκεται πάντα στο σημείο προσβολής της διατομής του πτερυγίου⁵. Οι συντεταγμένες των υπολοίπων σημείων υπολογίζονται με τη βοήθεια των κάθετων στην μέση γραμμή διανυσμάτων στις αντίστοιχες θέσεις και την κατανομή πάχους του πτερυγίου.

Όπως προαναφέρθηκε, η κατανομή πάχους του πτερυγίου δίνεται μέσω αρχείου. Για την συγκεκριμένη έκδοση του λογισμικού διατίθενται δύο τύποι αρχείων:

■ Διαστατή Κατανομή Πάχους

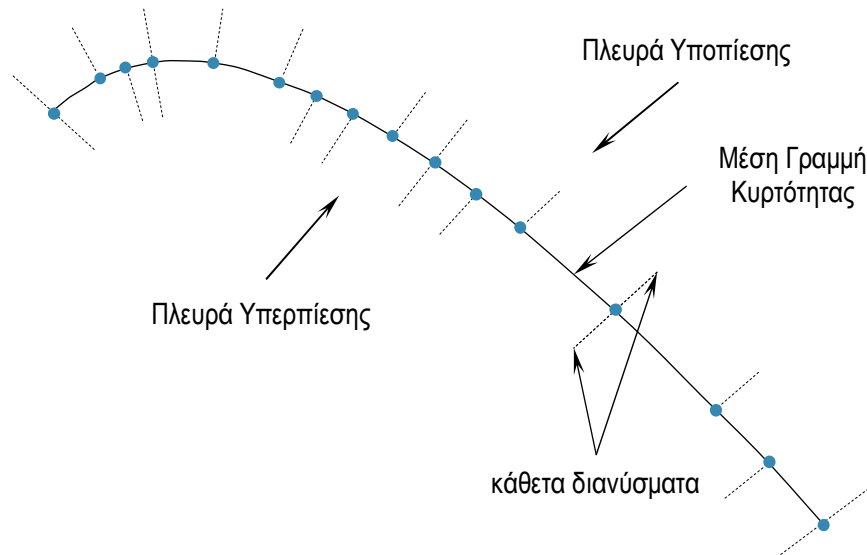
N	←	Αριθμός διατομών
$n_{ps}(i)$	←	Αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υπερπίεσης για την διατομή i
$n_{ss}(i)$	←	Αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υποπίεσης για την διατομή i
$\rho(i,j)$	$w(i,j)$	$\rho(i,j)$ οι θέσεις επί της μέσης γραμμής κυρτότητας για τις οποίες δίνονται τα πάχη (δίνονται ως ποσοστά της παραμέτρου u της μέσης γραμμής) και $w(i,j)$ τα αντίστοιχα πάχη. Όπου $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, n_{ps}(i)$ και $k = 1, \dots, n_{ss}(i)$
\vdots	\vdots	
$\rho(i,k)$	$w(i,k)$	
\vdots	\vdots	

■ Αδιάστατη Κατανομή Πάχους (Non-Dimensional distribution)

N	←	Αριθμός διατομών
$n_{ps}(i)$	←	Αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υπερπίεσης για την διατομή i
$n_{ss}(i)$	←	Αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υποπίεσης για την διατομή i
$\rho(i,j)$	$\rho w(i,j)$	$\rho(i,j)$ οι θέσεις επί της μέσης γραμμής κυρτότητας για τις οποίες δίνονται τα πάχη (δίνονται ως ποσοστά της παραμέτρου u της μέσης γραμμής) και $\rho w(i,j)$ τα αντίστοιχα πάχη (δίνονται ως ποσοστά του μήκους της χορδής της διατομής i). Όπου $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, n_{ps}(i)$ και $k = 1, \dots, n_{ss}(i)$
\vdots	\vdots	
$\rho(i,k)$	$\rho w(i,k)$	
\vdots	\vdots	

⁵ Στο σημείο εκφυγής βρίσκεται και το P_2 (3^ο σημείο ελέγχου της μέσης γραμμής). Επομένως τα ακραία σημεία ελέγχου της καμπύλης που περιγράφει την επιφάνεια του πτερυγίου έχουν συντεταγμένες (x_2, y_2) . Αντίστοιχα, το σημείο ελέγχου που βρίσκεται στο σημείο προσβολής έχει συντεταγμένες (x_0, y_0) .

Αρχικά υπολογίζεται η πρώτη παράγωγος της μέσης γραμμής⁶ και από αυτή τα κάθετα διανύσματα στις πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης του περυγίου για τα σημεία που δίδεται το πάχος του (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7. Τα κάθετα διανύσματα, για κάθε πλευρά της μέσης γραμμής κυρτότητας, υπολογίζονται στα σημεία που δίδονται τα αντίστοιχα πάχη. Ο αριθμός και η θέση των σημείων δύναται να διαφέρει για κάθε πλευρά.

Τα κάθετα διανύσματα για τις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους (2.4) και (2.5):

$$n = \frac{(\dot{y}, -\dot{x})}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \text{ και} \quad (2.4)$$

$$n = \frac{(-\dot{y}, \dot{x})}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (2.5)$$

⁶ Θεωρία 2: Ορισμός Παραγώγων Καμπύλης NURBS [26].

Η παράγωγος k-τάξης μίας NURBS καμπύλης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C^{(k)}(u) = \frac{A^{(k)}(u) - \sum_{i=1}^k \binom{k}{i} \cdot w^{(i)}(u) \cdot C^{(k-1)}(u)}{w(u)}$$

$$\text{όπου } A(u) = \sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) \cdot w_i \cdot P_i \text{ και } w(u) = \sum_{i=0}^{n-k} N_{i,p-k}(u) w_i$$

$$\text{και προκύπτει } A^{(k)}(u) = \sum_{i=0}^{n-k} N_{i,p-k}(u) Q_i^{(k-1)} \text{ και } w^{(k)}(u) = \sum_{i=0}^{n-k} N_{i,p-k}(u) w_i^{(k-1)}$$

$$\text{όπου } Q_i^{(k)} = \begin{cases} w_i \cdot P_i & \text{για } k = 0 \\ p \cdot \frac{Q_{i+1}^{(k-1)} - Q_i^{(k-1)}}{u_{i+p+1} - u_{i+k}} & \text{για } k > 0 \end{cases} \text{ και } w_i^{(k)} = \begin{cases} w_i & \text{για } k = 0 \\ p \cdot \frac{w_{i+1}^{(k-1)} - w_i^{(k-1)}}{u_{i+p+1} - u_{i+k}} & \text{για } k > 0 \end{cases}$$

όπου (\dot{x}, \dot{y}) είναι η πρώτη παράγωγος της μέσης γραμμής στο σημείο (x, y) .

Πολλαπλασιάζοντας τα κάθετα διανύσματα με τα αντίστοιχα πάχη υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων, που περιγράφουν την επιφάνεια του περυγίου. Ανάλογα με την επιλογή του χρήστη τα σημεία αυτά μπορεί να είναι είτε σημεία ελέγχου της επιφάνειας, είτε σημεία που την παρεμβάλουν (σημεία παρεμβολής). Στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται το πολύγωνο έλεγχου της επιφάνειας, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παρεμβολής καμπύλης από νέφος σημείων⁷.

✓ Διαστατή Κατανομή Πάχους: Έστω ότι η κατανομή πάχους της συγκεκριμένης διατομής του περυγίου είναι:

11	$n_{ps}(i)$ (ο αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υπερπίεσης)			
11	$n_{ss}(i)$ (ο αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υποπίεσης)			
1.0	p_1 (σημεία πάνω στη μέση γραμμή)	1	w_1 (το πάχος της διατομής στο σημείο p_1)	} πλευρά υπερπίεσης
0.9	p_2	2	w_2	
0.8	p_3	6	w_3	
0.7	p_4	9	w_4	
0.6	\vdots	11	\vdots	
0.5		12		
0.4		13		
0.3		13		
0.2		12		
0.1	\vdots	10	\vdots	
0.0	p_{11}	5	w_{11}	

⁷ Θεωρία 3: Παρεμβολή Καμπύλης Από Νέφος Σημείων [26].

Έστω ένα νέφος σημείων στο χώρο $\{Q_k\}$, $k = 0, \dots, n$, από τα οποία θα παρεμβληθεί μία p βαθμού καμπύλη B-Spline. Θέτοντας μία παράμετρο \bar{u}_k για κάθε σημείο Q_k του νέφους και διαλέγοντας το κατάλληλο διάνυσμα κόμβων $U = \{u_0, \dots, u_m\}$, δημιουργείται ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων $(n+1) \times (n+1)$, δεδομένου ότι η αντίστοιχη καμπύλη θα πρέπει να παρεμβάλει τα σημεία Q_k για τις τιμές \bar{u}_k :

$$Q_k = C(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_k) P_i, \quad k = 0, \dots, n$$

Τα σημεία ελέγχου P_i της καμπύλης είναι οι $(n+1)$ άγνωστοι του συστήματος. Η επιλογή των \bar{u}_k και U επηρεάζει το σχήμα και την παραμετροποίηση της καμπύλης.

Το μήκος της καμπύλης προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$d = \sum_{i=0}^n |Q_k - Q_{k-1}|$$

Ενώ η παράμετρος \bar{u}_k παίρνει τις τιμές:

$$\bar{u}_0 = 0, \quad \bar{u}_n = 1 \text{ και} \\ \bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|Q_k - Q_{k-1}|}{d}, \quad k = 1, \dots, n-1$$

και το διάνυσμα κόμβων U υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$u_0 = \dots = u_p = 0, \quad u_{m-p} = \dots = u_m = 1 \text{ και} \\ u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} \bar{u}_i, \quad j = 1, \dots, n-p$$

Επομένως, το σύστημα μπορεί να λυθεί με τη μέθοδο «Gaussian elimination without pivoting».

0.0	p_1 (σημεία πάνω στη μέση γραμμή)	5	w_1 (το πάχος της διατομής στο σημείο p_1)	} πλευρά υποπίεσης
0.1	p_2	10	w_2	
0.2	p_3	12	w_3	
0.3	p_4	13	w_4	
0.4	\vdots	13	\vdots	
0.5		12		
0.6		11		
0.7		9		
0.8		6		
0.9	\vdots	2	\vdots	
1.0	p_{11}	1	w_{11}	

Το ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων της μέσης γραμμής (2^{ου} βαθμού με 3 σημεία ελέγχου) είναι πάντα $U=\{0, 0, 0, 1, 1, 1\}$ ⁸, άρα $\max_u = 1$. Για να βρεθούν οι συντεταγμένες των σημείων της μέσης γραμμής κυρτότητας και τα αντίστοιχα κάθετα διανύσματα, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Βήμα 1: Για κάθε σημείο p_i της κατανομής υπολογίζεται το αντίστοιχο u_i από τη σχέση:

$$u_i = p_i * \max_u \quad (2.6)$$

- Βήμα 2: Αντικαθιστώντας το u_i στη σχέση ορισμού της μέσης γραμμής υπολογίζεται το σημείο της καμπύλης $C(u_i)$:

$$C(u_i) = \frac{\sum_{j=0}^n N_{i,p}(u_i) w_j P_j}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u_i) w_j} \quad (2.7)$$

- Βήμα 3: Αντικαθιστώντας το u_i στη σχέση ορισμού της πρώτης παραγώγου της μέσης γραμμής και με τη βοήθεια των σχέσεων (2.4) και (2.5) υπολογίζονται τα κάθετα σε αυτήν διανύσματα:

$$C^{(1)}(u_i) = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \frac{A^{(1)}(u_i) - w^{(1)}(u_i) C^{(0)}(u_i)}{w(u_i)} \quad (2.8)$$

⁸ Θεωρία 4: Ορισμός Ανοικτού Ομοιόμορφου Διανύσματος Κόμβων [26].

Στο ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων, υπάρχει μια πολλαπλότητα στους ακραίους κόμβους, η οποία ισούται με την τάξη $k = p+1$ της καμπύλης ενώ οι εσωτερικοί κόμβοι είναι ομοιόμορφα διατεταγμένοι δηλαδή:

$$u_i = u_1, \quad i \leq k$$

$$u_{i+1} - u_i = \text{σταθερό}, \quad k \leq i < n+2$$

$$u_i = u_{k+(n+1)}, \quad i \geq n+2$$

Συνήθως επιλέγεται $u_1=0$, $u_{i+1}-u_i = 1$ και προκύπτει $u_{k+(n+1)} = n+1-p$.

Για την παραπάνω κατανομή πάχους τα ρ_i είναι κοινά και για τις δύο πλευρές της διατομής, δηλαδή είναι κοινά τα σημεία στα οποία θα υπολογιστούν τα κάθετα διανύσματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1. Υπολογισμός σημείων της μέσης γραμμής και των αντίστοιχων κάθετων διανυσμάτων.

ρ_i	u_i	$C_u(x, y)$		$C'_u(x, y)$		Κάθετα Διανύσματα			
						Πλευρά Υπερπίεσης		Πλευρά Υποπίεσης	
1.0	1.0	100	-17.63	134.73	-113.05	-0.64	-0.77	-0.77	0.64
0.9	0.9	86.87	-7.28	127.78	-93.97	-0.59	-0.81	-0.63	0.78
0.8	0.8	74.44	1.16	120.84	-74.88	-0.53	-0.85	-0.45	0.89
0.7	0.7	62.71	-10.70	113.89	-55.80	-0.44	-0.90	-0.23	0.97
0.6	0.6	51.66	12.32	106.95	-36.72	-0.32	-0.95	-0.02	1.00
0.5	0.5	41.32	15.04	100	-17.63	-0.17	-0.98	0.17	0.98
0.4	0.4	31.66	15.85	93.05	1.45	0.02	-1.00	0.32	0.95
0.3	0.3	20.71	14.75	86.11	20.53	0.23	-0.97	0.44	0.90
0.2	0.2	14.44	11.74	79.16	39.62	0.45	-0.89	0.53	0.85
0.1	0.1	6.87	6.82	72.22	58.70	0.63	-0.78	0.59	0.81
0.0	0.0	0	0	65.27	77.79	0.77	-0.64	0.64	0.77

Η παραπάνω κατανομή είναι διαστατή, δηλαδή οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου (ή σημείων παρεμβολής)⁹ της διατομής του πτερυγίου προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τα πάχη (w_i) με τα αντίστοιχα κάθετα διανύσματα. Στις περιπτώσεις όμως που εφαρμόζεται αδιάστατη κατανομή πάχους, αν και τα κάθετα διανύσματα υπολογίζονται κατά τον ίδιο τρόπο ο υπολογισμός των σημείων ελέγχου (ή σημείων παρεμβολής) της διατομής διαφέρει.

Στην αδιάστατη κατανομή πάχους, δεν δίνονται πάχη (w_i) της διατομής για διάφορα σημεία (ρ_i) της μέσης γραμμής αλλά ποσοστά (ρw_i). Τα ποσοστά αυτά εκφράζουν τα πάχη της διατομής στις θέσεις ρ_i της μέσης γραμμής συναρτήσει του μήκους της καμπύλης - len .

Ο σχεδιασμός κάθε μέσης γραμμής, καθώς και όλων των υπολοίπων καμπυλών, πραγματοποιείται με ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν N σημεία της καμπύλης¹⁰. Επομένως, το μήκος len της καμπύλης της μέσης γραμμής υπολογίζεται προσεγγιστικά, αθροίζοντας τα ευθύγραμμα τμήματα από το σημείο $C(u_i=0)$ μέχρι το σημείο $C(u_i=\max_u)$, δηλαδή:

$$len = \sum_{j=0}^{n-1} C(u_{j+1}) - C(u_j) \quad (2.9)$$

όπου $n = \max_u / du$, $u_0 = 0$ και $u_n = \max_u$

και πολλαπλασιάζοντας το μήκος της μέσης γραμμής (len) με τα ρw_i προκύπτουν τα πάχη w_i της διατομής, από τα οποία, με τη χρήση των κάθετων διανυσμάτων, προκύπτουν τα σημεία ελέγχου (ή σημεία παρεμβολής) της διατομής του πτερυγίου.

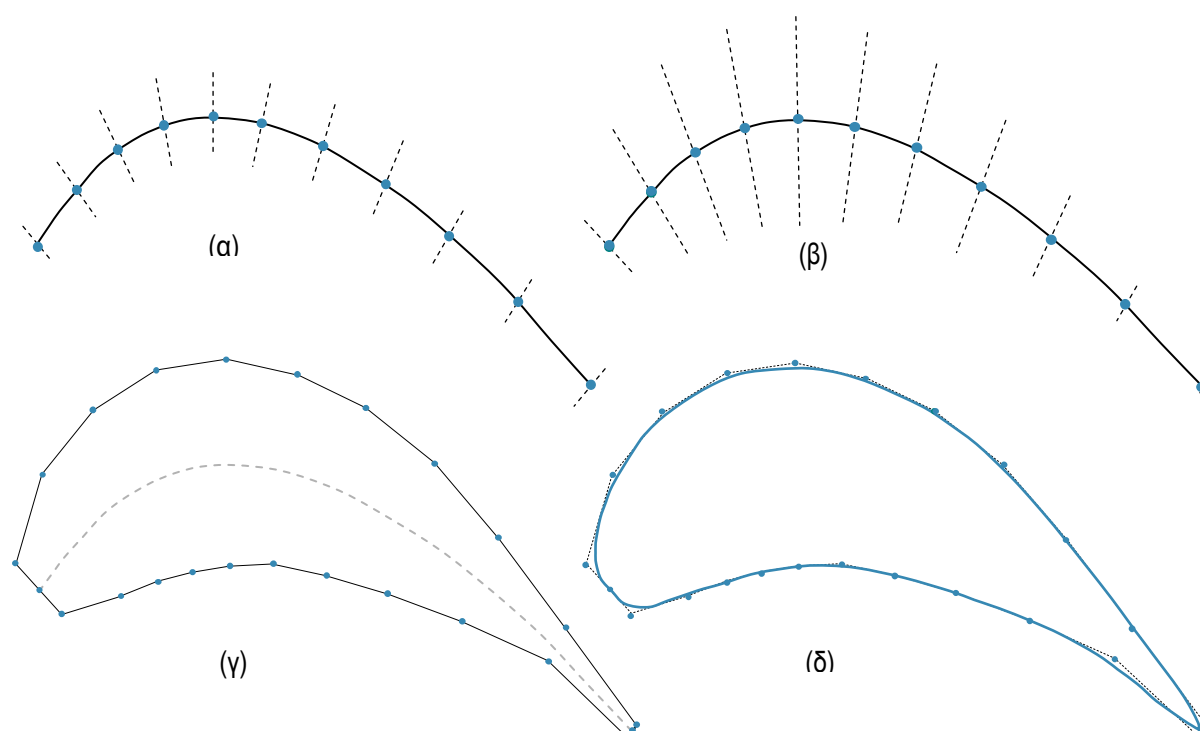
⁹ Ο χρήστης επιλέγει αν τα σημεία που υπολογίζονται θα οριστούν ως σημεία ελέγχου ή σημεία παρεμβολής της διατομής.

¹⁰ **Θεωρία 5: Υπολογισμός N σημείων καμπύλης.**

Έστω ότι η απόσταση 2 διαδοχικών σημείων καμπύλης είναι du , δηλ. $C_1=C(u)$ και $C_2=C(u+du)$. Για δεδομένο ανοικτό ομοιόμορφο διάνυσμα κόμβων U μπορούν να υπολογιστούν

$$N = \frac{u_{k+(n+1)}}{du} + 1$$

σημεία της καμπύλης. Καθένα από τα N σημεία $C_i=C(u_i)$ απέχει du από το προηγούμενο $C_{i-1}=C(u_{i-1})=C(u_i-du)$ και επόμενο $C_{i+1}=C(u_{i+1})=C(u_i+du)$ σημείο της καμπύλης. Το βήμα μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων ΠΡΕΠΕΙ να είναι σταθερό για να υλοποιηθεί η σωστή σχεδίαση και όσο πιο μικρό επιλεγεί το du , τόσο πιο ακριβής θα είναι.



Εικόνα 2.8. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της διατομής του περυγίου, στην οποία εφαρμόζεται διαστατή κατανομή πάχους. (α) Υπολογισμός των κάθετων διανυσμάτων βάση της εφαρμοζόμενης κατανομής, (β) Υπολογισμός των σημείων ελέγχου της διατομής, (γ) Υπολογισμός του πολυγώνου ελέγχου της διατομής και (δ) Υπολογισμός της διατομής.

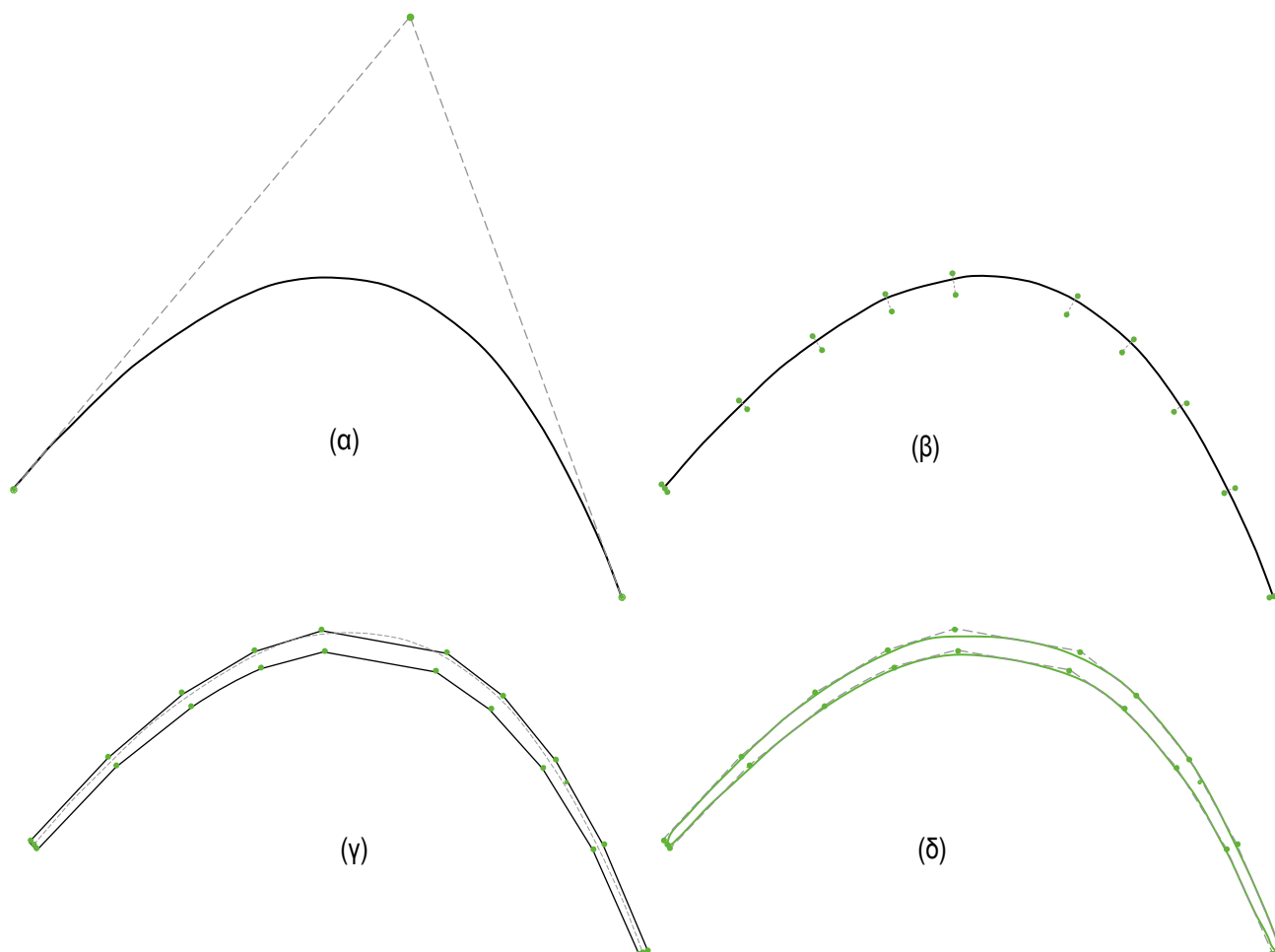
✓ Αδιάστατη Κατανομή Πάχους: Έστω μία διατομή με σχεδιαστικές παραμέτρους: $\beta_{1m} = 50^\circ$, $\beta_{2m} = -70^\circ$, $L_{ref} = 160$, $\gamma = -10^\circ$ και το σημείο προσβολής της βρίσκεται στο (0,0). Στην εν λόγω διατομή εφαρμόζεται η παρακάτω αδιάστατη κατανομή:

10	$n_{ps}(i)$ (ο αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υπερπίεσης)				
10	$n_{ss}(i)$ (ο αριθμός σημείων ελέγχου στην πλευρά υποπίεσης)				
1.0	p_1 (σημεία πάνω στη μέση γραμμή)	0.005	rw_1 (το ποσοστό πάχους της διατομής		
0.9	p_2	0.01	rw_2	στο σημείο p_1)	
0.8	p_3	0.015	rw_3		
0.7	p_4	0.02	rw_4		
0.6	\vdots	0.025	\vdots		
0.4		0.025			
0.3		0.02			
0.2		0.015			
0.1	\vdots	0.01	\vdots		
0.0	p_{10}	0.005	rw_{10}		
0.0	p_1 (σημεία πάνω στη μέση γραμμή)	0.005	rw_1 (το ποσοστό πάχους της διατομής		
0.1	p_2	0.01	rw_2	στο σημείο p_1)	
0.2	p_3	0.015	rw_3		
0.3	p_4	0.02	rw_4		
0.4	\vdots	0.025	\vdots		
0.6		0.025			
0.7		0.02			
0.8		0.015			
0.9	\vdots	0.01	\vdots		
1.0	p_{10}	0.005	rw_{10}		

πλευρά
υπερπίεσης

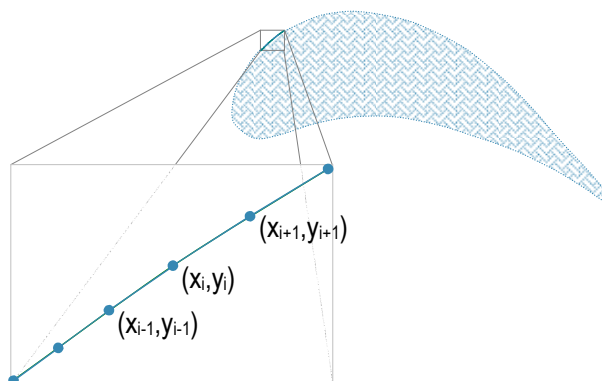
πλευρά
υποπίεσης

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε και νωρίτερα. Βάσει των παραμέτρων της διατομής υπολογίζεται η μέση γραμμή από τις σχέσεις 2.1 και το μήκος της από τη σχέση 2.9. Εν συνεχεία, υπολογίζονται για τα σημεία ρ_i της μέσης γραμμής τα κάθετα σε αυτήν διανύσματα (Σχέσεις 2.4 – 2.5). Πολλαπλασιάζοντας τα με τα αντίστοιχα ποσοστά ρw_i και το μήκος $l_{\text{m}} \rho_i$ της μέσης γραμμής προκύπτουν τα σημεία ελέγχου της διατομής (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού της διατομής του περυγίου, στην οποία εφαρμόζεται αδιάστατη κατανομή πάχους. (α) Υπολογισμός της μέσης γραμμής της διατομής, (β) Υπολογισμός των σημείων ελέγχου της διατομής βάση της εφαρμοζόμενης κατανομής, (γ) Υπολογισμός του πολυγώνου ελέγχου της διατομής και (δ) Υπολογισμός της διατομής.

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή της διατομής, υπολογίζεται το κέντρο βάρους της. Ο σχεδιασμός κάθε διατομής, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται με ευθύγραμμα τμήματα, που ενώνουν N σημεία της διατομής (Εικόνα 2.10). Επομένως, η διατομή μπορεί να θεωρηθεί ένα N -γωνο και οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της δίνονται από τις σχέσεις (2.10 - 2.12).



Εικόνα 2.10. Ο σχεδιασμός της διατομής του πτερυγίου γίνεται με διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα.

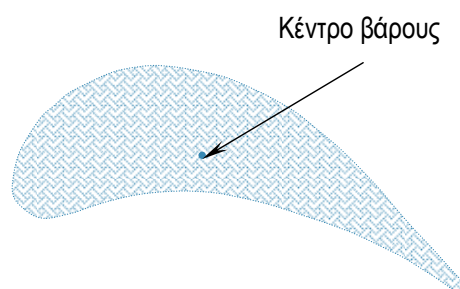
$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.10)$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.11)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (2.12)$$

όπου C_x, C_y : οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του πολυγώνου
 x_i, y_i : οι συντεταγμένες της κορυφής i του πολυγώνου
 A : το εμβαδόν του πολυγώνου

✓ Κέντρο Βάρους Διατομής: Το βήμα du που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της επιφάνειας του πτερυγίου είναι 0.01, ενώ το διάλυσμα κόμβων είναι:
 $U=\{0, 0, 0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 22, 22, 22\}$ ¹¹
 Άρα, υπολογίζονται 221 σημεία πάνω στη καμπύλη ($N=221$) και το κέντρο βάρους της διατομής, σύμφωνα με τις σχέσεις (2.10 – 2.12), βρίσκεται στο σημείο (40.30,10.13) (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11. Το κέντρο βάρους της διατομής του πτερυγίου.

Στη συγκεκριμένη έκδοση του λογισμικού δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των διατομών που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ενός τρισδιάστατου πτερυγίου¹². Ο

¹¹ Η καμπύλη είναι 3ου βαθμού και έχει 25 σημεία ελέγχου, άρα το ανοικτό ομοιόμορφο διάλυσμα κόμβων U έχει μέγεθος 28.

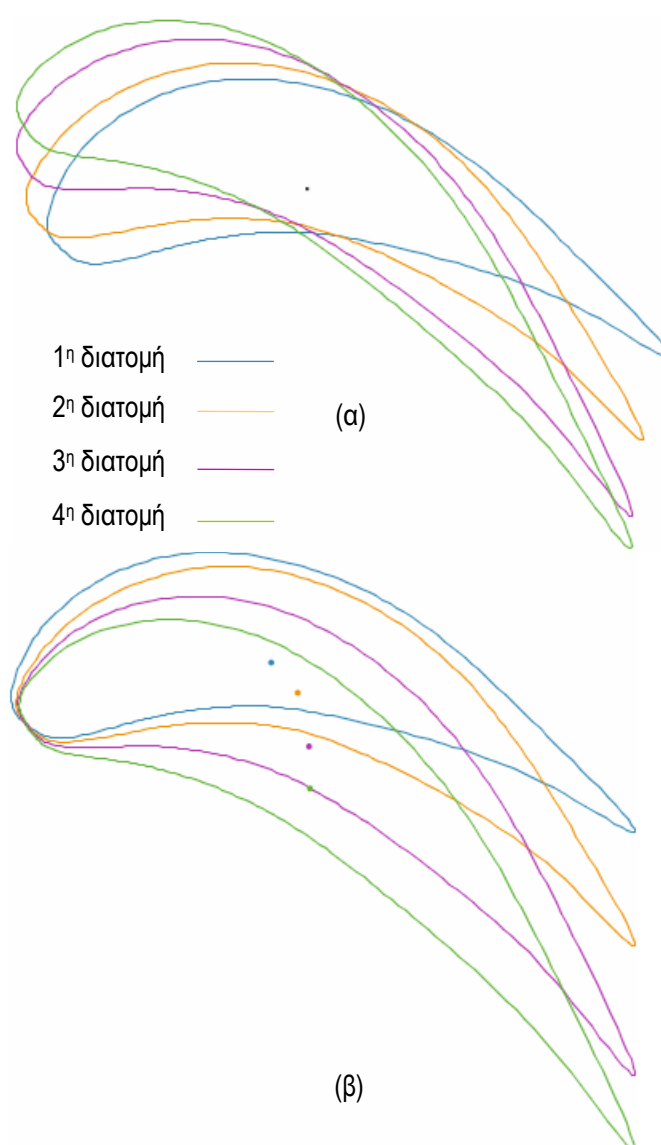
¹² Για τη δημιουργία ενός τριδιάστατου πτερυγίου απαιτούνται τουλάχιστον δύο διατομές.

χρήστης επιλέγει τον αριθμό των διατομών ανάλογα με το είδος της πτερύγωσης που επιθυμεί να υλοποιήσει. Επίσης δίδεται η δυνατότητα στοίβαξης των διατομών με εφαρμογή συστροφής, ταυτίζοντας τα κέντρα βάρους (Εικόνα 2.12).

✓ Ορισμός Διατομών: Έστω ότι το πτερύγιο σχεδιάζεται με τέσσερις διατομές, στις οποίες εφαρμόζεται η κατανομή πάχους που χρησιμοποιήθηκε και πιο πάνω, η διαφορετικότητα των διατομών έγκειται στις διαφορετικές σχεδιαστικές παραμέτρους των τεσσάρων μέσω γραμμών (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2 Οι σχεδιαστικές παράμετροι για τις τέσσερις διατομές του πτερυγίου με κοινή κατανομή πάχους.

	1 ^η διατομή	2 ^η διατομή	3 ^η διατομή	4 ^η διατομή
L_{ref}	100	100	100	100
β_{1m}	50	40	35	30
β_{2m}	-40	-55	-60	-60
γ	-10	-20	-30	-35



Εικόνα 2.12. (α) οι διατομές του πτερυγίου στοιβαγμένες με κοινό κέντρο βάρους (β) οι διατομές του πτερυγίου στοιβαγμένες με κοινό σημείο προσβολής.

Όμως, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ενώ η επιθυμητή γεωμετρία των πτερυγίων είναι γνωστή σε συγκεκριμένες διατομές δεν είναι γνωστές οι παράμετροι σχεδίασης του πτερυγίου (κατανομή πάχους, αξονική απόσταση, κ.λπ.). Ο υπολογισμός τους, εφαρμόζοντας τη διαδικασία δοκιμής και σφάλματος, θα αποβεί αρκετά χρονοβόρος, αφού ο χρήστης θα πρέπει να πειραματιστεί αρκετά με τις παραμέτρους της γεωμετρίας για να επιτύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς αυτό να είναι απόλυτα εξασφαλισμένο.

Για αυτές τις περιπτώσεις (αντίστροφης μηχανικής) το T4T παρέχει μία εναλλακτική μέθοδο σχεδίασης των πτερυγίων, που βασίζεται στην προσαρμογή επιφάνειας σε νέφος σημείων στο χώρο. Η γεωμετρία του πτερυγίου εισάγεται στο λογισμικό με τη μορφή αρχείου *.txt, η μορφή του οποίου είναι η ακόλουθη:

N	←	Αριθμός διατομών
num_points (i)	←	Αριθμός σημείων της διατομής i
Z(i,j)	R(i,j)	{ Z(i,j), R(i,j): οι συντεταγμένες των σημείων της διατομής i στο μεσημβρινό επίπεδο. Όπου i= 1,...,N, j= 1,...,num_points(i)
⋮	⋮	

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό από τη μορφή του παραπάνω αρχείου, το νέφος των σημείων που εισάγεται στο T4T είναι χωρισμένο σε N υποσύνολα σημείων, τα οποία αποτελούν σημεία διατομών του πτερυγίου. Από τη θεωρία των καμπυλών NURBS και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παρεμβολής καμπύλης από νέφος σημείων θα προκύψουν τα πολύγωνα ελέγχου όλων των διατομών, τα οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για τη τρισδιάστατη απεικόνιση των πτερυγίων (Παράγραφος 2.3). Ο υπολογισμός των κέντρων βάρους των διατομών καθώς και η σχεδίασή τους πραγματοποιούνται με τις μεθόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

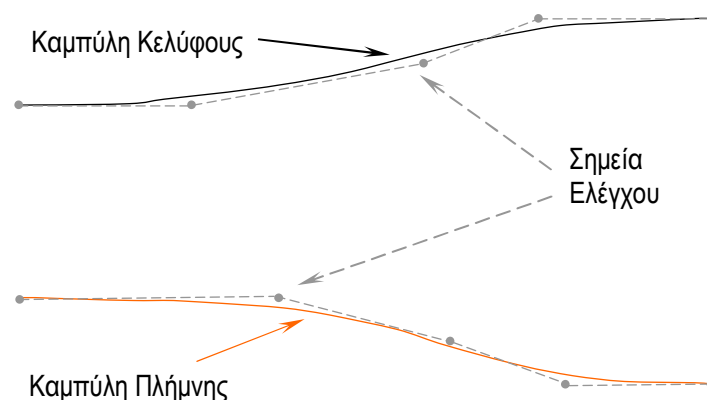
2.2.2. Πλήμνη & Κέλυφος (Hub & Shroud)

Οι κωνικές επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους ορίζονται ως επιφάνειες εκ περιστροφής [27], ενώ απαιτούνται δύο γεννήτριες καμπύλες και ο άξονας περιστροφής για τον ορισμό τους¹³.

Οι γεννήτριες καμπύλες περιγράφονται με NURBS καμπύλες, σχεδιασμένες στο μεσημβρινό επίπεδο, ενώ ως άξονας περιστροφής λαμβάνεται ο άξονας z. Ο βαθμός των καμπυλών (p) καθώς και τα σημεία (n+1) που τις καθορίζουν είναι κοινός και δίνονται από τον χρήστη. Τα σημεία μπορεί να επιλέξει να είναι είτε σημεία παρεμβολής των καμπυλών είτε σημεία ελέγχου (Εικόνα 2.13).

Παράλληλα με το σχεδιασμό των καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους σχεδιάζονται με γραμμική παρεμβολή αυτών, (N – 2) επιπλέον καμπύλες, όπου N ο αριθμός των διατομών του πτερυγίου. Η σχετική τους θέση, δίδεται ως ποσοστό της απόστασης των δύο ακραίων καμπυλών (πλήμνης και κελύφους). Οι βοηθητικές αυτές καμπύλες αποτελούν γεννήτριες καμπύλες για το ορισμό επιπλέον κωνικών επιφανειών, που απαιτούνται για την σύμμορφη απεικόνιση των διατομών του πτερυγίου, όπως θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο.

¹³ Ο ευκολότερος τρόπος για τον ορισμό μίας επιφάνειας περιστροφής είναι ο ορισμός μίας γενέτειρα καμπύλης στο χώρο και η περιστροφή της γύρω από έναν άξονα.



Εικόνα 2.13. Οι καμπύλες πλήμνης - κελύφους και τα αντίστοιχα σημεία και πολύγωνα ελέγχου.

- ✓ Έστω ότι οι καμπύλες είναι 3^{ου} βαθμού και δίνονται 5 σημεία ελέγχου για την κάθε μία:

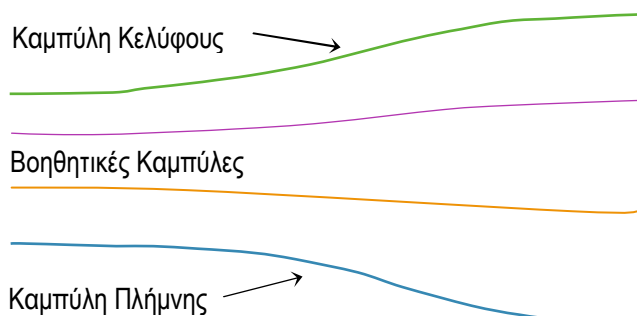
Πίνακας 2.3. Συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης της πλήμνης

Z	R
0	200
45	200
75	190
95	180
120	180

Πίνακας 2.4. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης του κελύφους

Z	R
0	250
30	250
70	260
90	270
120	270

Το περύγιο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο αποτελείτο από τέσσερις διατομές. Επομένως, δύο επιπλέον «βοηθητικές» καμπύλες χρειάζονται, οι οποίες τοποθετούνται στις θέσεις 35% και 70% μεταξύ των ακραίων καμπυλών. Το αποτέλεσμα που προκύπτει δίδεται στην Εικόνα 2.14.



Εικόνα 2.14. Οι γεννήτριες καμπύλες πλήμνης - κελύφους και οι ενδιάμεσες καμπύλες, που προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή των πρώτων.

2.3. Τριδιάστατη Απεικόνιση

2.3.1. Ορισμός ενός τριδιάστατου περυγίου

Η διαδικασία της τριδιάστατης κατασκευής του περυγίου πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά, πραγματοποιείται η σύμμορφη απεικόνιση των επίπεδων διατομών πάνω στις αντίστοιχες κωνικές επιφάνειες και εν συνεχεία με τη διαδικασία του «skipping» μέσω νέφους σημείων κατασκευάζεται μία NURBS επιφάνεια, που διατρέχει τα σημεία όλων των διατομών. Επίσης, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει τη φορά του συστήματος συντεταγμένων, στην ουσία να επιλέξει αν η τελική περρωτή θα είναι δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη.

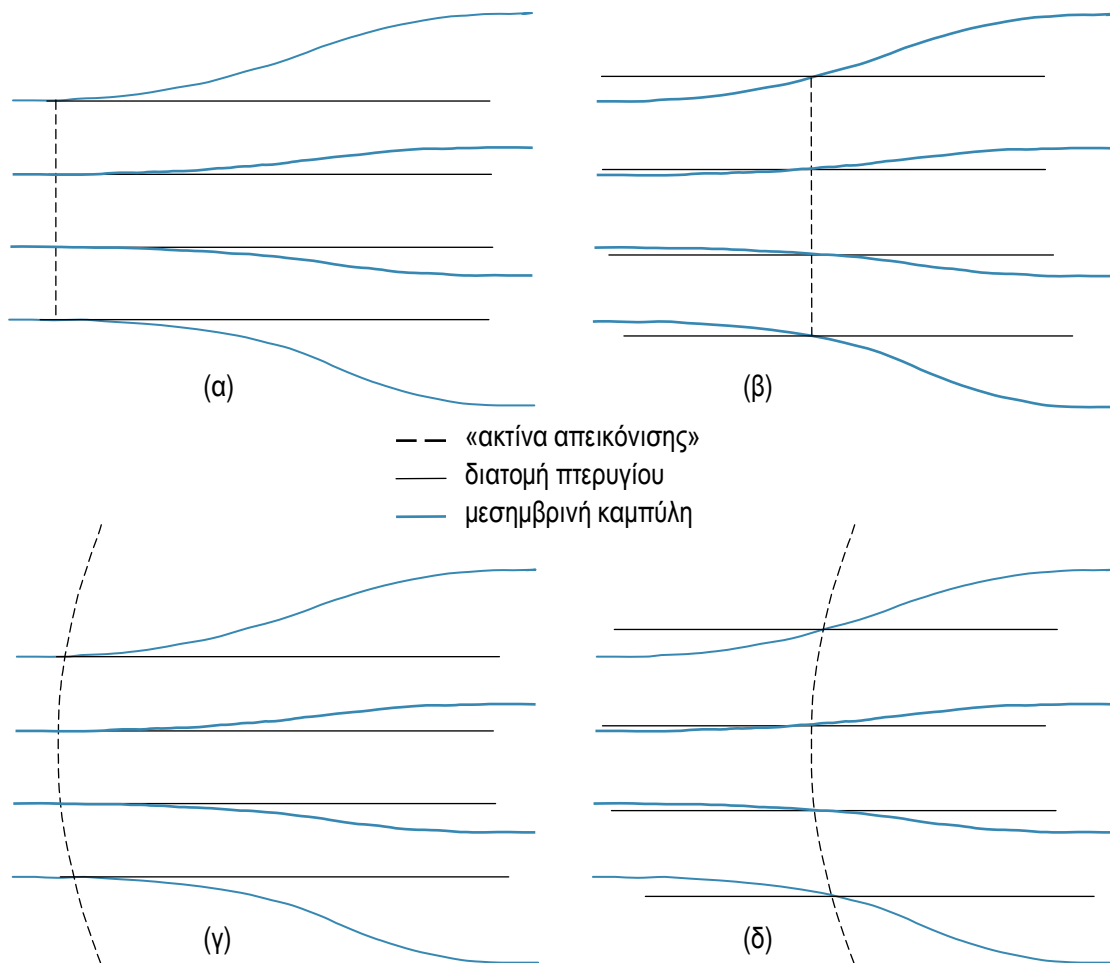
Σύμμορφη απεικόνιση της αεροτομής πάνω στην αντίστοιχη κωνική επιφάνεια είναι η μεταφορά των σημείων της αεροτομής πάνω στην καμπύλη επιφάνεια, αντιστοιχώντας το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων της επίπεδης αεροτομής στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων της κωνικής επιφάνειας.

Πριν τη σύμμορφη απεικόνιση των διατομών, ο χρήστης πρέπει να καθορίσει τη «γραμμή στοίβαξης» (stacking line), η οποία είναι κοινή για όλες τις διατομές και βάσει της οποίας πραγματοποιείται η στοίβαξη των διατομών στις τρεις διαστάσεις. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει αν οι διατομές θα απεικονιστούν έχοντας ως σημείο αναφοράς το σημείο προσβολής τους ή το κέντρο βάρους τους. Ως «γραμμή στοίβαξης» του περυγίου μπορεί να οριστεί είτε μια ακτίνα είτε μια τριδιάστατη καμπύλη (Εικόνα 2.15). Η τριδιάστατη καμπύλη μπορεί να δώσει κυρτότητα στο περύγιο και ως προς την μεσημβρινή και ως προς την περιφερειακή κατεύθυνση.

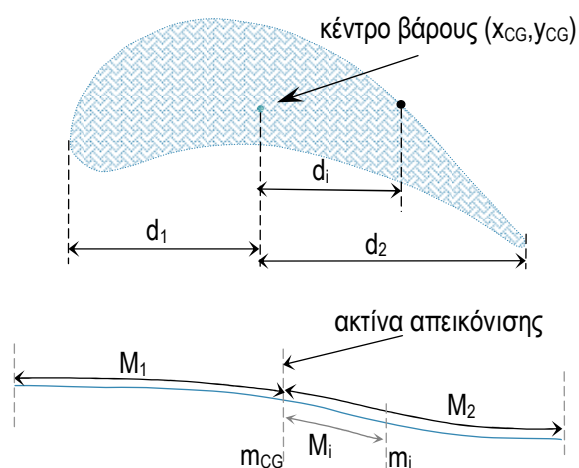
Με την ολοκλήρωση του ορισμού της «γραμμής στοίβαξης» πραγματοποιείται ο έλεγχος εγκυρότητας. Για να κατασκευαστεί το περύγιο θα πρέπει κάθε διατομή να εφάπτεται πλήρως πάνω στην αντίστοιχη κωνική επιφάνεια, επομένως ελέγχεται κατά πόσο το μήκος καθεμίας εκ των καμπυλών που ορίζουν τις επιφάνειες επαρκεί για την απεικόνιση της αντίστοιχης διατομής.

Αναλυτικότερα, για κάθε διατομή υπολογίζεται η απόσταση, ως προς την x-συντεταγμένη, του κέντρου βάρους της διατομής από τις ακμές προσβολής και εκφυγής. Έστω d_1 και d_2 οι δυο αποστάσεις αντίστοιχα. Για να θεωρηθεί έγκυρος ο έλεγχος θα πρέπει να ισχύουν οι συνθήκες $d_1 \leq M_1$ ΚΑΙ $d_2 \leq M_2$, όπου M_1 και M_2 τα μήκη από την αξονική θέση του κέντρου βάρους μέχρι τα άκρα της αντίστοιχης γενέτειρας καμπύλης (Εικόνα 2.16). Στην περίπτωση που οι συνθήκες δεν πληρούνται, ο χρήστης έχει τις εξής επιλογές:

- να μεγαλώσει το μήκος των μεσημβρινών καμπυλών,
- να τροποποιήσει την γραμμή στοίβαξης,
- να μικρύνει τις αξονικές χορδές (L_{ref}) των διατομών.



Εικόνα 2.15. Τέσσερις πιθανές «γραμμές στοιβάξης» ενός πτερυγίου. (α)-(γ) Οι διατομές στοιβάζονται με σημείο αναφοράς τα σημεία προσβολής τους. (β)-(δ) Οι διατομές στοιβάζονται με σημείο αναφοράς τα κέντρα βάρους τους.



Εικόνα 2.16. Έλεγχος εγκυρότητας για την σύμμορφη απεικόνιση των διατομών του πτερυγίου.

Όταν ο χρήστη σχεδιάζει μια πολυβάθμια πτερωτή και αφού έχει ορίσει τις γραμμές στοίβαξης για κάθε ένα από τα πτερύγια, πραγματοποιείται ένας επιπλέον έλεγχος εγκυρότητας, που ελέγχει αν γειτονικά πτερύγια τέμνονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση που τέμνονται ο χρήστης μετατοπίζει αναλόγως ένα από τα δύο πτερύγια, αλλάζοντας την γραμμή στοίβαξής του.

Αφού ολοκληρωθούν επιτυχώς οι έλεγχοι, κάθε διατομή απεικονίζεται στην κωνική επιφάνεια, που ορίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη, συναρτήσει της γραμμής στοίβαξης. Οι κυλινδρικές συντεταγμένες των καμπύλων διατομών του πτερυγίου υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη αντιστοιχία μεταξύ των y -συντεταγμένων των επίπεδων διατομών με τις περιφερειακές συντεταγμένες ($u=R\cdot\theta$) των καμπύλων διατομών και μεταξύ των x -συντεταγμένων των επίπεδων διατομών με τις μεσημβρινές συντεταγμένες (m) των καμπύλων διατομών (Εικόνα 2.17).

Έστω ότι το σημείο αναφοράς είναι το κέντρο βάρους των διατομών και (x_i, y_i) οι συντεταγμένες ενός σημείου i μιας επίπεδης διατομής, ενώ (x_{CG}, y_{CG}) είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αρχικά υπολογίζεται η απόσταση ανάμεσα στο σημείο i και το κέντρο βάρους στην x - διεύθυνση:

$$d_i = x_i - x_{CG} \quad (2.13)$$

Εν συνεχεία, η μεσημβρινή συντεταγμένη (m_i) του σημείου i τίθεται ίση με d_i :

$$m_i = d_i = x_i - x_{CG} \quad (2.14)$$

Κατά αυτόν το τρόπο προκύπτει το σημείο (m_i, u_i) , που βρίσκεται πάνω στην κωνική επιφάνεια. Εντούτοις, για δεδομένη μεσημβρινή συντεταγμένη της καμπύλης (m_i), με γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται η ακτίνα R_i και η αντίστοιχη αξονική θέση Z_i . Η περιφερειακή συντεταγμένη $u_i=R_i\cdot\theta_i$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_i = y_i \quad (2.15)$$

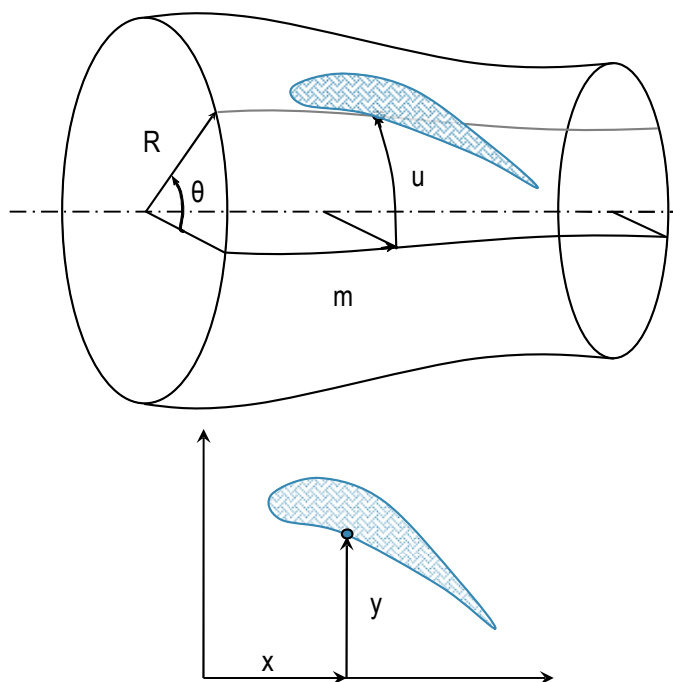
ενώ η γωνία θ_i από τη σχέση:

$$\theta_i = \frac{y_i}{R_i} \quad (2.16)$$

Μετατρέποντας στη συνέχεια τις κυλινδρικές συντεταγμένες σε καρτεσιανές (Σχέσεις 2.17 - 2.18), παράγεται η τρισδιάστατη μορφή του καμπύλου πτερυγίου και, όπως προαναφέρθηκε, με τη διαδικασία του «skinning» μέσω νέφους σημείων κατασκευάζεται η NURBS επιφάνεια του.

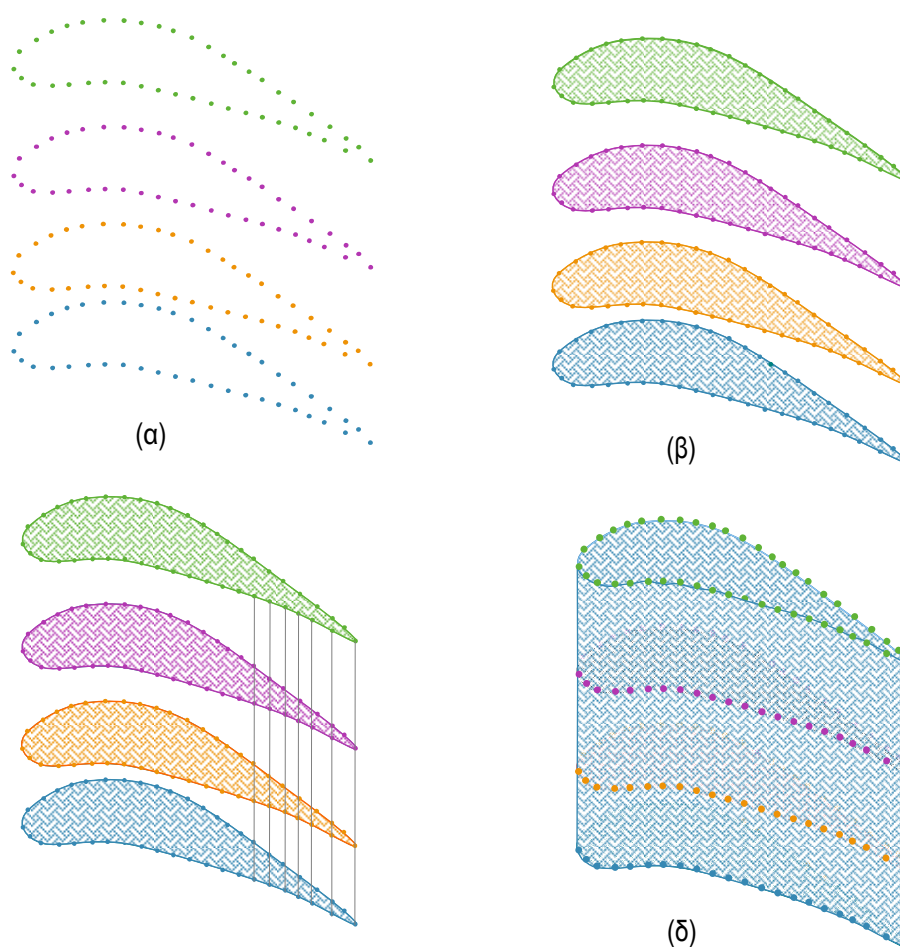
$$X_i = R_i \cdot \cos\theta_i \quad (2.17)$$

$$Y_i = R_i \cdot \sin\theta_i \quad (2.18)$$



Εικόνα 2.17. Η σύμμορφη απεικόνιση της διατομής του πτερυγίου πάνω στην κωνική επιφάνεια που παράχθηκε από την αντίστοιχη μεσημβρινή καμπύλη

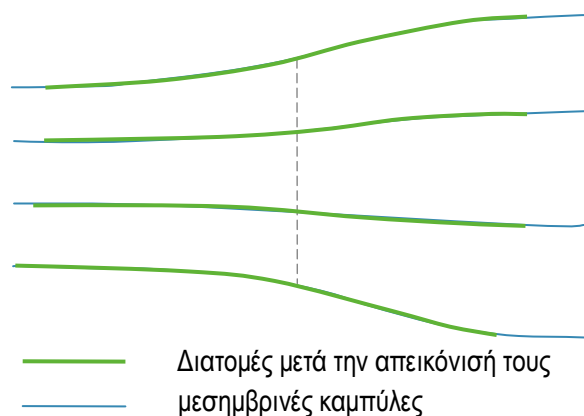
Σύμφωνα με τη διαδικασία του «skinning» πραγματοποιείται παρεμβολή καμπυλών και στις δύο διευθύνσεις (περιφερειακή και αξονική). Ο χρήστης δίνει το βαθμό (p, q) της επιφάνειας (p στην περιμετρική διεύθυνση, q στη διαμήκη διεύθυνση). Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία θα πρέπει κάθε διατομή να έχει τον ίδιο αριθμό σημείων. Αρχικά, γίνεται παρεμβολή καμπυλών στην περιμετρική διεύθυνση. Οι καμπύλες που προκύπτουν είναι όσες και οι διατομές του πτερυγίου (Εικόνα 2.18- β). Στην συνέχεια, στην διαμήκη διεύθυνση του πτερυγίου πραγματοποιούνται τόσες παρεμβολές όσες και ο αριθμός των σημείων που αποτελούν την κάθε διατομή (Εικόνα 2.18-γ). Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, έχει δημιουργηθεί το τρισδιάστατο πτερύγιο (Εικόνα 2.18- δ).



Εικόνα 2.18. «Skinning» μέσω νέφους σημείων (α) Το νέφος σημείων από το οποίο πρέπει να περνάει το περύγιο (β) Παρεμβολή καμπυλών στην περιμετρική διεύθυνση – οι καμπύλες είναι όσες και ο αριθμός διατομών του περυγίου (γ) Παρεμβολή καμπυλών στην διαμήκη διεύθυνση – οι καμπύλες είναι όσες και ο αριθμός των σημείων κάθε διατομής, για αυτό και όλες οι διατομές πρέπει να περιγράφονται από τον ίδιο αριθμό σημείων.

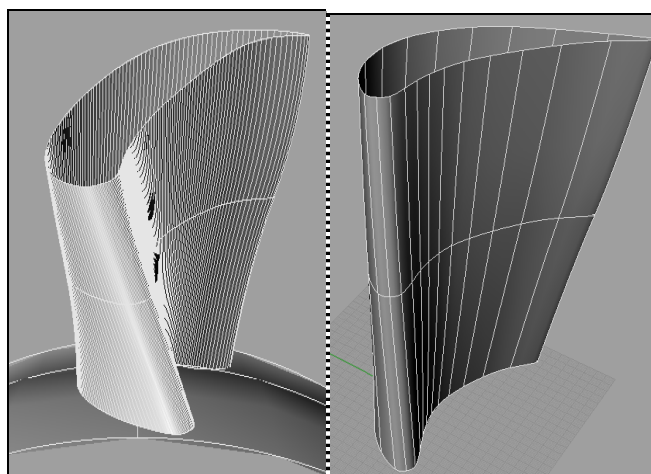
✓ Έστω ότι η επιφάνεια είναι 3^{ου} βαθμού στην περιμετρική διεύθυνση και 2^{ου} στην διαμήκη διεύθυνση, το σύστημα συντεταγμένων είναι δεξιόστροφο και η αξονική θέση των κέντρων βάρους είναι $z=60$. Έστω ότι χρησιμοποιείται μία ακτίνα ως γραμμή στοίβαξης.

Όπως προαναφέρθηκε, για το σχεδιασμό κάθε διατομής της συγκεκριμένης εφαρμογής υπολογίζονται 220 σημεία. Επομένως κατά τη διαδικασία του skinning πρέπει να παρεμβληθούν 4 καμπύλες από 220 σημεία η καθεμία στη περιμετρική διεύθυνση και 220 καμπύλες από 4 σημεία η καθεμία στη διαμήκη διεύθυνση, δηλαδή η επιφάνεια του περυγίου που προκύπτει περιγράφεται από 220×4 σημεία ελέγχου. Όμως, η επιφάνεια θα είναι πρακτικά η ίδια ακόμα και αν στην περιμετρική διεύθυνση παρεμβληθούν καμπύλες από 110 ή 55 ή 45 σημεία αντί για 220. Για το λόγο αυτό, το λογισμικό πριν προχωρήσει στη διαδικασία του skinning επιλέγει από ποια σημεία θα παρεμβληθούν οι 4 καμπύλες, παίρνοντας από τα 220 σημεία 45, με βήμα 5. Γενικά, το λογισμικό επιλέγει από τα M σημεία, που υπολογίζονται κατά το σχεδιασμό κάθε διατομής, τα $M/5$ με βήμα 5 για τη διαδικασία του «skinning». Ο μόνος περιορισμός που τίθεται είναι το τελευταίο σημείο να συμπίπτει με το πρώτο, ώστε να προκύπτει κλειστή επιφάνεια. Το παραπάνω γίνεται για μείωση του υπολογιστικού φόρτου.



Εικόνα 2.19. Μεσημβρινή διατομή του πτερυγίου. Η σύμμορφη απεικόνιση των διατομές στις αντίστοιχες επιφάνειες.

Με τη βοήθεια του σχεδιαστικού λογισμικού Rhinoceros, το τρισδιάστατο καμπύλο πτερύγιο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.20-α, ενώ στην Εικόνα 2.20-β παρουσιάζεται ένα αντίστοιχο επίπεδο πτερύγιο (χωρίς δηλαδή την σύμμορφη απεικόνιση σε κωνικές επιφάνειες).

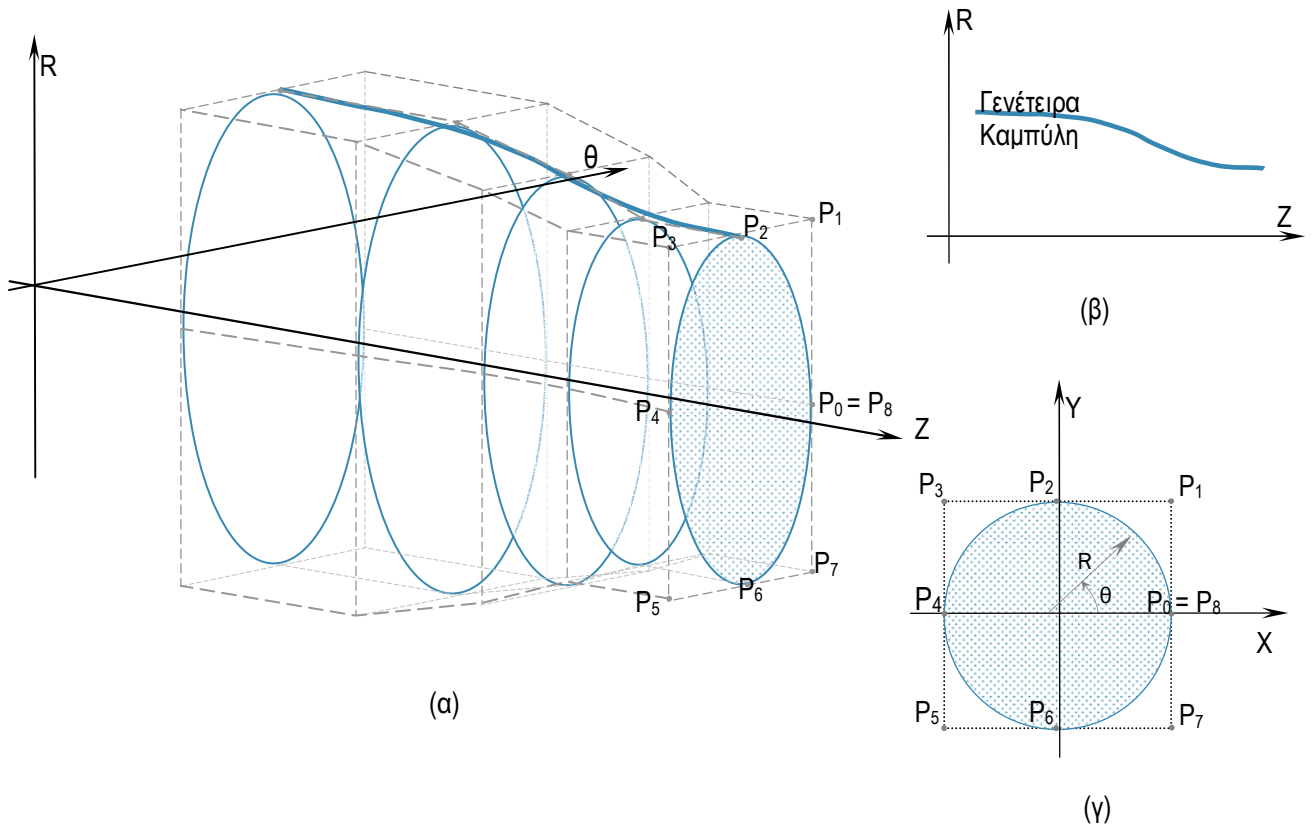


Εικόνα 2.20. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πτερυγίου με καμπύλες (αριστερά) και επίπεδες διατομές (δεξιά).

2.3.2. Ορισμός των επιφανειών πλήμνης και κελύφους

Οι επιφάνειες πλήμνης και κελύφους προκύπτουν με περιστροφή των αντίστοιχων μεσημβρινών γενετειρών καμπυλών γύρω από τον άξονα z (Εικόνα 2.21 -α).

Για την κατασκευή του κύκλου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του τετραγώνου, όπου 9 σημεία ελέγχου βρίσκονται στις ακμές ενός τετραγώνου με κέντρο τον άξονα της μηχανής. Το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου πρέπει να ταυτίζονται (Εικόνα 2.21 -γ).



Εικόνα 2.21. Δημιουργία περιστρεφόμενης επιφάνειας. (α) Τα σημεία ελέγχου της γενέτειρας καμπύλης στρέφονται γύρω από τον άξονα περιστροφής z δημιουργώντας κύκλους (β) Η μεσημβρινή καμπύλη της πλήμνης που περιστρέφεται. (γ) Τα σημεία ελέγχου ενός κύκλου, P₀ είναι τα σημεία ελέγχου της γεννήτριας καμπύλης

Από την Εικόνα 2.21-δ προκύπτει ότι οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ενός κύκλου είναι:

$$\{P_i\} = \{(R_i, 0, z_i), (R_i, R_i, z_i), (0, R_i, z_i), (-R_i, R_i, z_i), (-R_i, 0, z_i), (-R_i, -R_i, z_i), (0, -R_i, z_i), (R_i, -R_i, z_i), (R_i, 0, z_i)\} \quad (2.19)$$

ενώ τα αντίστοιχα βάρη τους και το διάνυσμα κόμβων είναι:

$$\{w_i\} = \left\{1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1\right\} \quad (2.20)$$

$$U = \left\{0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{2}{4}, \frac{2}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1\right\} \quad (2.21)$$

Επομένως, για να κατασκευαστούν οι περιστρεφόμενες επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους αρκεί να περιστρέφουν τα σημεία ελέγχου των γενετειρών καμπυλών τους¹⁴. Το σύνολο των σημείων που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία αποτελούν τα πολύγωνα ελέγχου των επιφανειών.

¹⁴ Περιστροφή των σημείων ελέγχου μίας καμπύλης ισοδυναμεί με περιστροφή της ίδιας της καμπύλης

✓ Τα σημεία ελέγχου της καμπύλης της πλήμνης, που χρησιμοποιήθηκαν και νωρίτερα, δίδονται στον Πίνακα 2.5:

Πίνακας 2.5. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης της πλήμνης.

Z	R
0	200
45	200
75	190
95	180
120	180

Σύμφωνα με τη σχέση (3,7), τα σημεία ελέγχου της επιφάνειας εκ περιστροφής (Εικόνα 3.20) δίδονται στον Πίνακα 2.6:

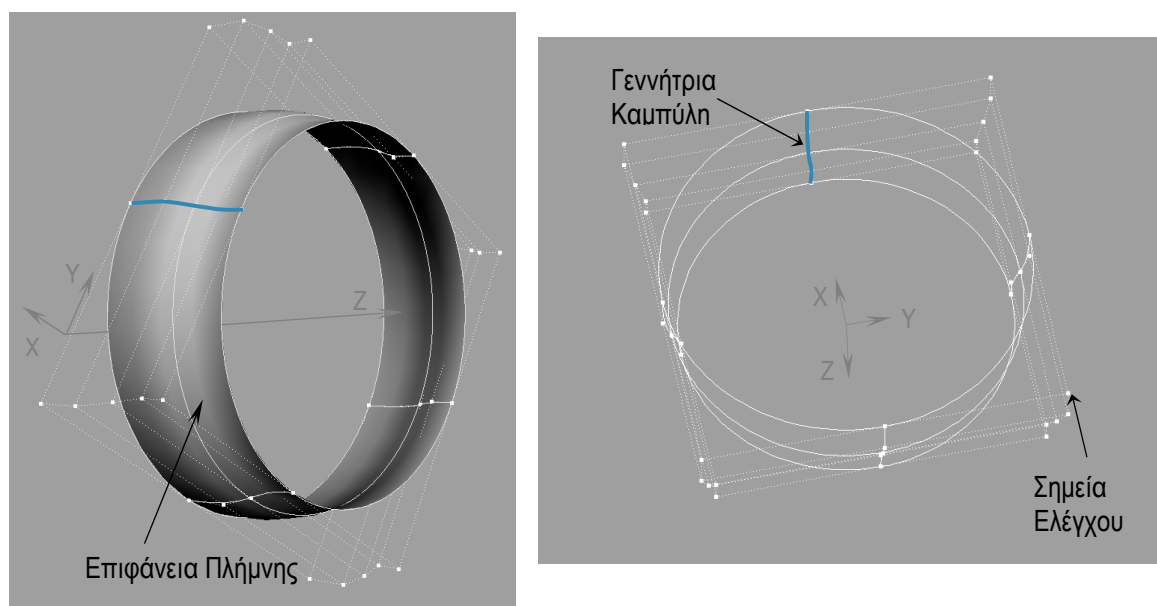
Πίνακας 2.6. Τα σημεία ελέγχου της επιφάνειας εκ περιστροφής που προκύπτουν από τα σημεία ελέγχου του Πίνακα 2.5.

P ₀	(200,0,0)	(200,0,45)	(190,0,75)	(180,0,95)	(180,0,120)
P ₁	(200,200,0)	(200,200,45)	(190,190,75)	(180,180,95)	(180,180,120)
P ₂	(0,200,0)	(0,200,45)	(0,190,75)	(0,180,95)	(0,180,120)
P ₃	(-200,200,0)	(-200,200,45)	(-190,190,75)	(-180,180,95)	(-180,180,120)
P ₄	(-200,0,0)	(-200,0,45)	(-190,0,75)	(-180,0,95)	(-180,0,120)
P ₅	(-200,-200,0)	(-200,-200,45)	(-190,-190,75)	(-180,-180,95)	(-180,-180,120)
P ₆	(0,-200,0)	(0,-200,45)	(0,-190,75)	(0,-180,95)	(0,-180,120)
P ₇	(200,-200,0)	(200,-200,45)	(190,-190,75)	(180,-180,95)	(180,-180,120)
P ₈	(200,0,0)	(200,0,45)	(190,0,75)	(180,0,95)	(180,0,120)

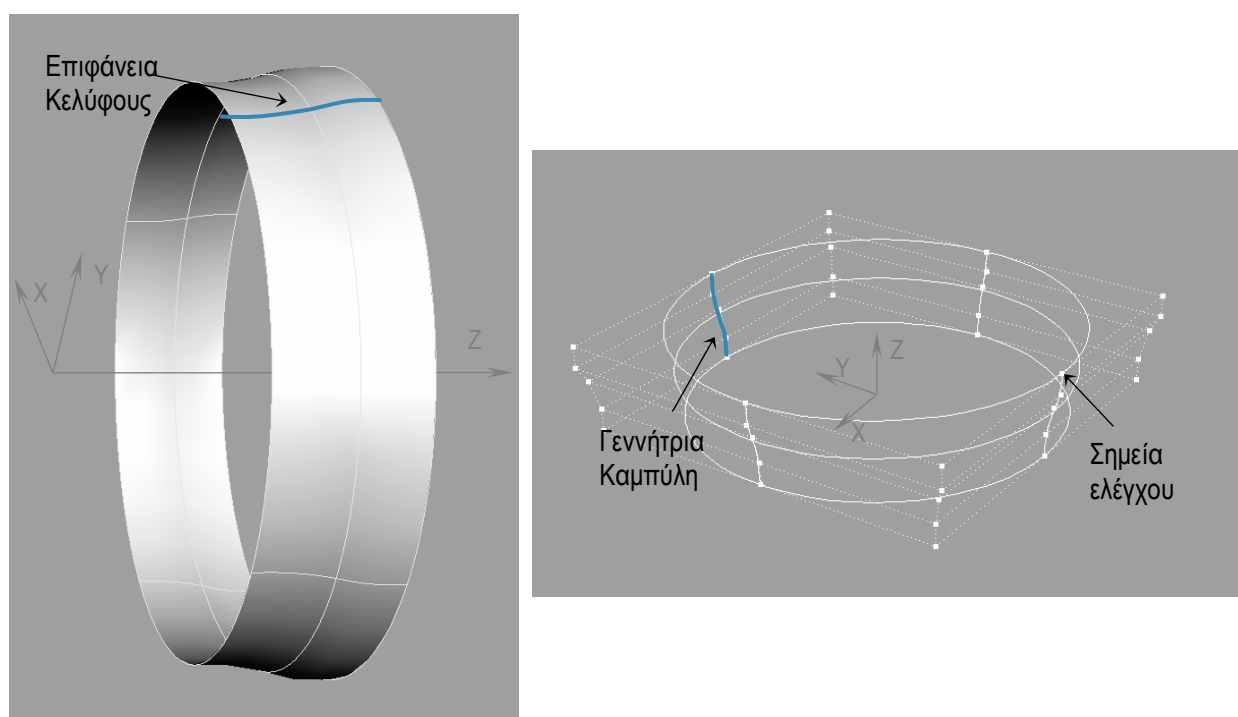
Με τον ίδιο τρόπο, το λογισμικό σχεδιάζει και την επιφάνεια του κελύφους. Στην Εικόνα 3.21, παρουσιάζεται η περιστρεφόμενη επιφάνεια του κελύφους, παίρνοντας ως σημεία ελέγχου της γεννήτριας καμπύλης τα σημεία του Πίνακα 2.7:

Πίνακας 2.7. Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της καμπύλης του κελύφους

Z	R
0	250
30	250
70	260
90	270
120	270



Εικόνα 2.22. Η επιφάνεια της πλήμνης (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού Rhinoceros).



Εικόνα 2.23. Η επιφάνεια του κελύφους (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού Rhinoceros).

2.3.3. Τριδιάστατη απεικόνιση πτερωτής

Αφού έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του πτερυγίου ή των πτερυγίων (αν πρόκειται για πολυβάθμια πτερύγωση), της πλήμνης και του κελύφους, για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της πτερύγωσης το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι ο καθορισμός του αριθμού των πτερυγίων και ο σχεδιασμός τους. Για το σχεδιασμό των επιπλέον πτερυγίων δεν χρειάζεται να

ακολουθηθεί ξανά η διαδικασία των παραγράφων 2.1.1 και 2.2.1. Απλά ακολουθείται η διαδικασία της περιφερειακής μεταφοράς και αντιγραφής («pattern»).

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη διαδικασία, τα σημεία ελέγχου του αρχικού περυγίου («πρότυπο»), περιστρέφονται κατά γωνία φ γύρω από τον άξονα περιστροφής Z και τα νέα σημεία που προκύπτουν αποτελούν σημεία ελέγχου του δεύτερου περυγίου της περρωτής (Εικόνα 2.24). Οι θέσεις των νέων σημείων προκύπτουν από τη σχέση:

$$P_i' = \text{Rot}(Z, \varphi) * P_i \quad (2.22)$$

όπου $\text{Rot}(Z, \varphi)$ ο πίνακας περιστροφής γύρω από τον άξονα Z κατά γωνία φ :

$$\text{Rot}(Z, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Άρα η σχέση (2.22) γίνεται:

$$P_{i_x} = P_{0_x} * \cos\varphi + P_{0_y} * \sin\varphi \quad (2.24-\alpha)$$

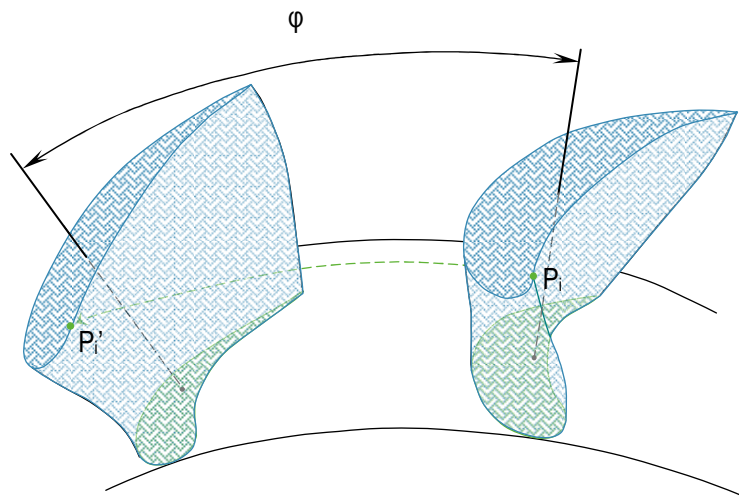
$$P_{i_y} = -P_{0_x} * \sin\varphi + P_{0_y} * \cos\varphi \quad (2.24-\beta)$$

$$P_{i_z} = P_{0_z} \quad (2.24-\gamma)$$

Η γωνία περιστροφής φ είναι η γωνία μεταξύ των γραμμών στοίβαξης δύο διαδοχικών περυγίων και καθορίζεται εμμέσως από τον χρήστη. Ο χρήστη παρέχει στο λογισμό τον αριθμό των περυγίων (Q) της περρωτής και η γωνία περιστροφής φ ορίζεται ως:

$$\varphi = \frac{360^\circ}{Q} \quad (2.25)$$

Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται όλα τα περύγια της περύγωσης. Κάθε περύγιο i προκύπτει με περιστροφή του πρώτου κατά γωνία $(i-1)*\varphi$ γύρω από τον άξονα z, όπου $i = 2, \dots, Q$.



Εικόνα 2.24. Η Διαδικασία της περιφερειακής μεταφοράς και αντιγραφής. Το σημείο ελέγχου P_i στρέφεται κατά γωνία φ και μετατρέπεται σε P_i' . Η διαδικασία πραγματοποιείται για το σύνολο των σημείων ελέγχου του αρχικού περυγίου και έτσι αντιγράφεται στη νέα του θέση.

✓ Έστω ότι αριθμός των περυγίων της περωτής είναι 16. Η γωνία περιστροφής φ είναι 22.5° και από τη σχέση (2.23) ο αντίστοιχος πίνακας περιστροφής είναι:

$$\text{Rot}(z, (i-1) * 22.5^\circ) = \begin{bmatrix} \cos(i-1) * 22.5^\circ & -\sin(i-1) * 22.5^\circ & 0 \\ \sin(i-1) * 22.5^\circ & \cos(i-1) * 22.5^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{όπου } i=2, \dots, 16.$$

Επομένως, προκύπτει:

$$P_{i_x} = P_{0_x} * \cos(i-1) * 22.5^\circ + P_{0_y} * \sin(i-1) * 22.5^\circ$$

$$P_{i_y} = -P_{0_x} * \sin(i-1) * 22.5^\circ + P_{0_y} * \cos(i-1) * 22.5^\circ$$

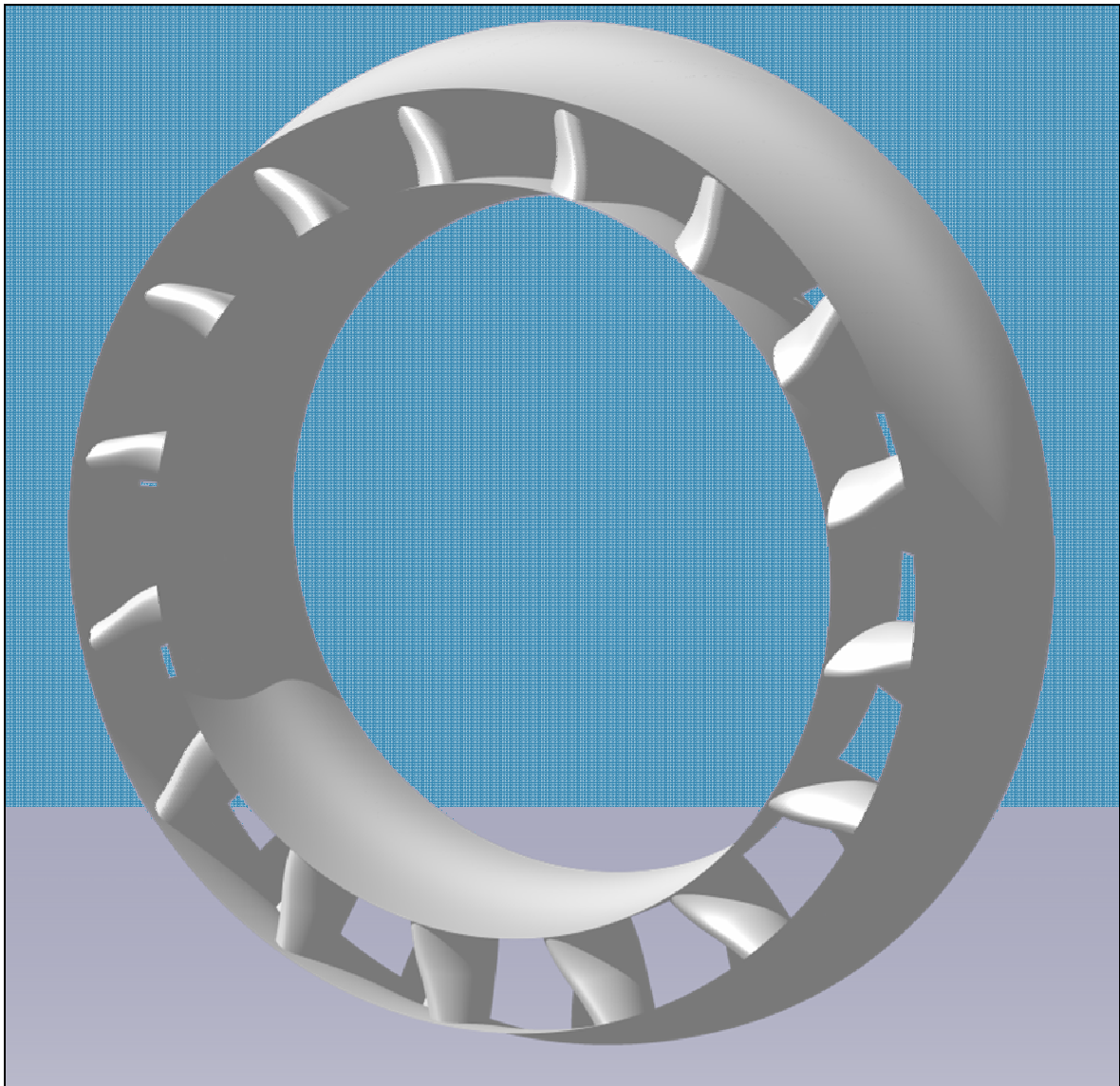
$$P_{i_z} = P_{0_z}$$

Χάριν παραδείγματος, 5 σημεία ελέγχου του αρχικού περυγίου και τα αντίστοιχα σημεία του δεύτερου περυγίου δίδονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8. Οι συντεταγμένες πέντε σημείων ελέγχου του πρώτου περυγίου (P_0) και τα αντίστοιχα πέντε σημεία ελέγχου του δεύτερου (P_i'). Τα P_i' προέκυψαν με περιστροφή των P_0 κατά γωνία $22,5^\circ$ γύρω από τον άξονα Z.

Σημεία Ελέγχου	P_0	$P_i' = \text{Rot}(z, 22.5^\circ) * P_0$
1	(179.15, 27.65, 100.66)	(176.10, -43.01, 100.66)
2	(180.14, 26.04, 95.99)	(176.39, -44.88, 95.99)
3	(182.18, 21.38, 89.78)	(176.49, -49.96, 89.78)
4	(185.80, 16.91, 80.89)	(178.13, -55.48, 80.89)
5	(188.84, 14.41, 74.08)	(179.98, -58.95, 74.08)

Στην περίπτωση σχεδίασης πολυβάθμιας περωτής, η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται για κάθε «πρότυπο» περύγιο ξεχωριστά.



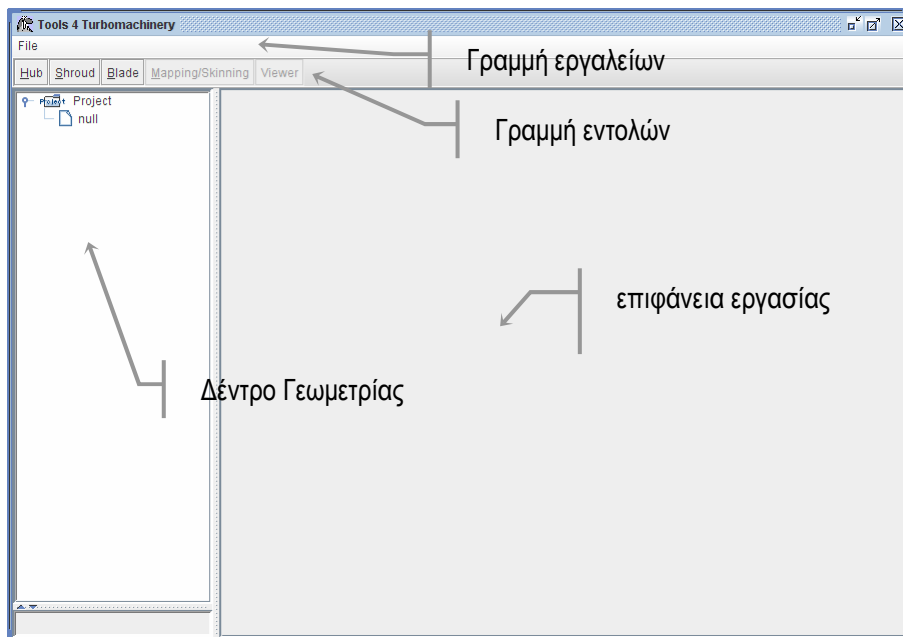
Εικόνα 2.25. Ολοκληρωμένη περύγωση αποτελούμενη από 16 περύγια (18 NURBS επιφάνειες).

3

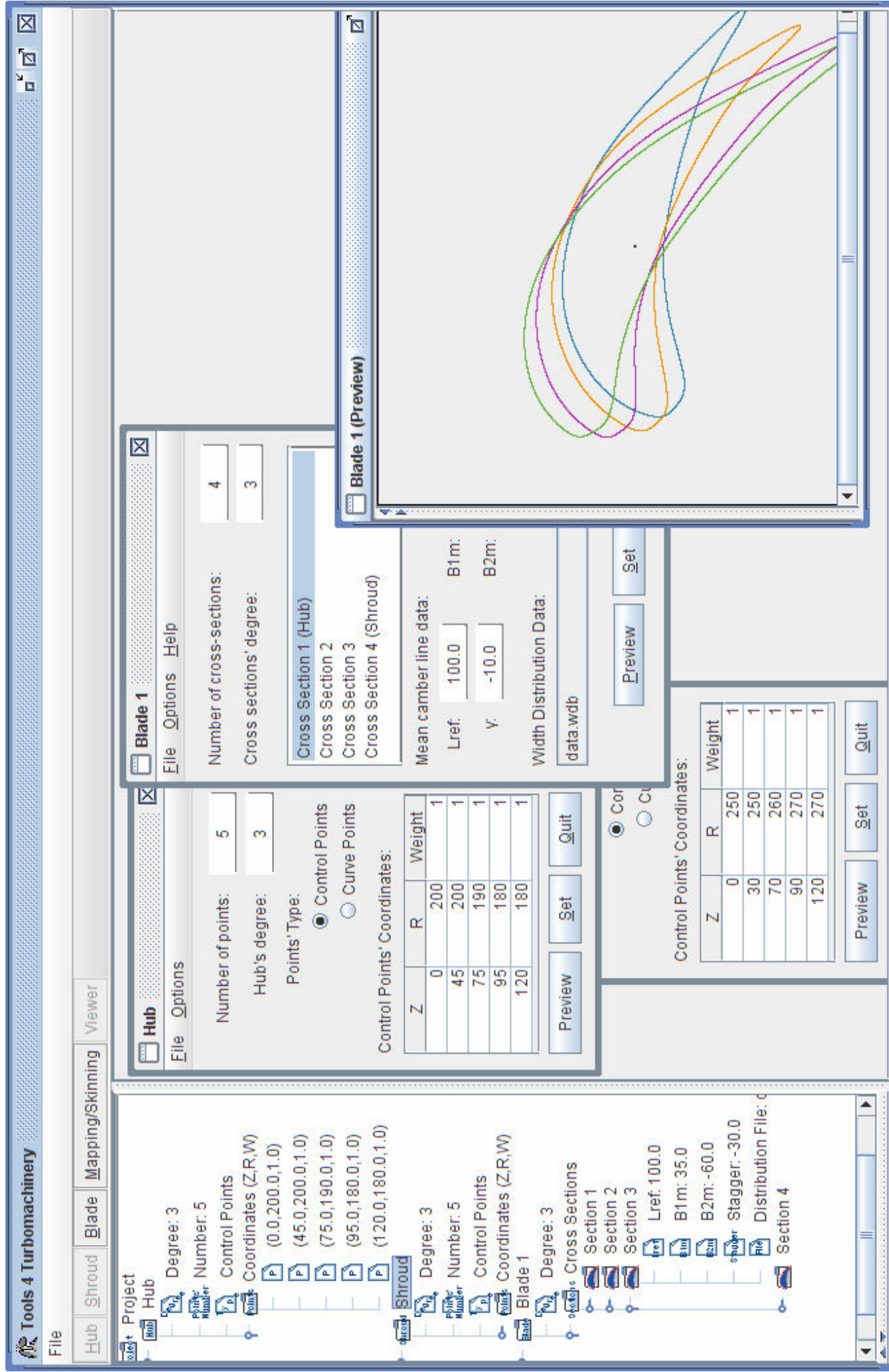
Παρουσίαση Λειτουργίας του λογισμικού T4T

3.1. Κεντρικό Παράθυρο του T4T

Εκτελώντας το πρόγραμμα **T4T.jar** εμφανίζεται στην οθόνη το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος. Το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος αποτελείται από το δέντρο γεωμετρίας, την επιφάνεια εργασίας και τις γραμμές εργαλείων και εντολών (Εικόνα 3.1).

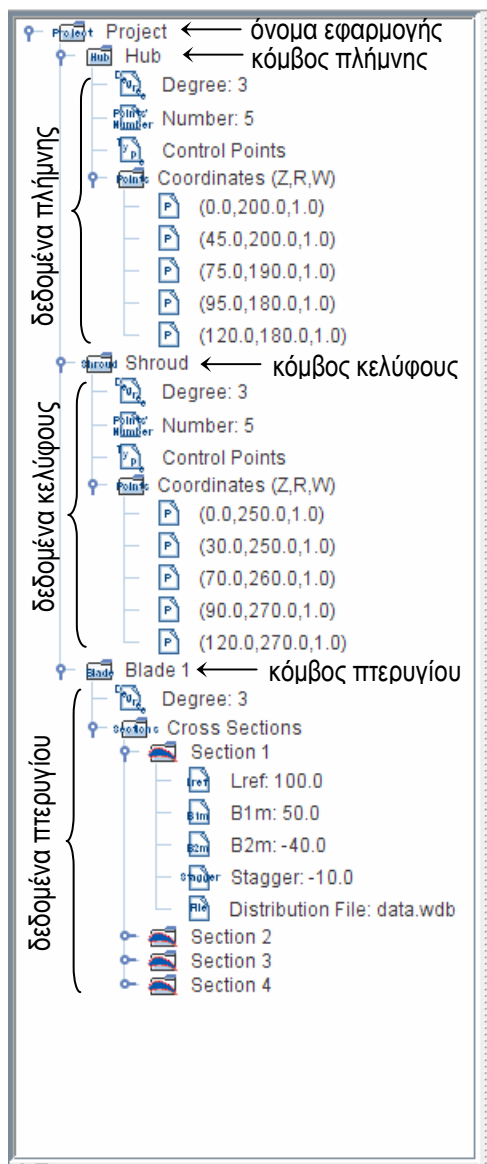


Εικόνα 3.1. Το κεντρικό παράθυρο του λογισμικού T4T κατά την έναρξη του προγράμματος.



Εικόνα 3.2. Στιγμιότυπο του λογισμικού αφού έχει δημιουργηθεί η διδιάστατη γεωμετρία της πτερωτής.

3.1.1. Δέντρο Γεωμετρίας



Εικόνα 3.3. Το δέντρο γεωμετρίας μετά τον ορισμό της διδιάστατης γεωμετρίας της πτερύγωσης.

Η ύπαρξη του δέντρου γεωμετρίας είναι καθοριστικής σημασίας, αφού αποτελεί τη «ραχοκοκαλιά» του λογισμικού.

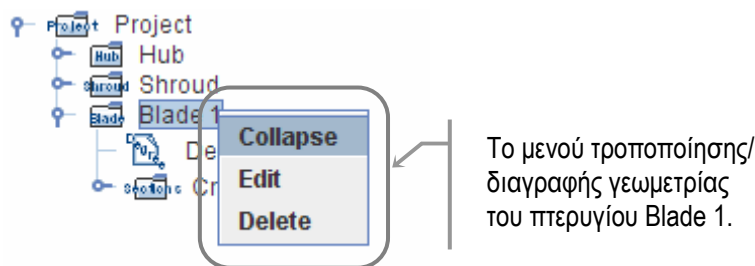
Για την υλοποίηση μίας τριδιάστατης περρωτής, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει τις γεωμετρίες της πλήμνης, του κελύφους και τουλάχιστον ενός «πρότυπου» περυγίου στο μεσημβρινό επίπεδο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με περιστροφή των μεσημβρινών καμπυλών και προσαρμογή επιφανειών στις διατομές των περυγίων.

Κάθε γεωμετρία που δημιουργείται από τον χρήστη (π.χ. πτερύγιο, πλήμνη κ.λπ.) αποθηκεύεται στο δέντρο γεωμετρίας, βάσει των χαρακτηριστικών της, σε συγκεκριμένη θέση και με συγκεκριμένη μορφή. Όταν ο χρήστης ολοκληρώσει τη διδιάστατη απεικόνιση της περρωτής, οι γεωμετρίες αυτές συνδυάζονται κατάλληλα (προσαρμογή επιφανειών – περιστροφή καμπυλών) για την υλοποίηση της τελικής γεωμετρίας.

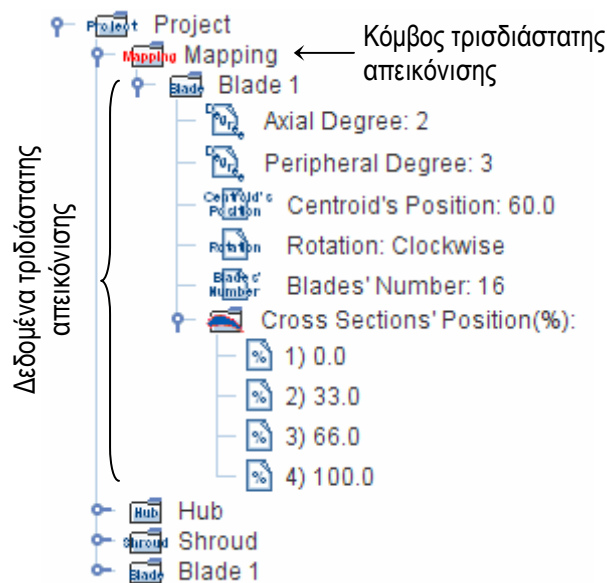
Με την ύπαρξη του δέντρου γεωμετρίας δίδεται στον χρήστη η δυνατότητα, οποιαδήποτε στιγμή θελήσει, να ανατρέξει στο δέντρο γεωμετρίας και να τροποποιήσει ή ακόμα και να διαγράψει μία από τις υπάρχουσες γεωμετρίες. Οι αλλαγές που θα γίνουν θα επηρεάσουν άμεσα την συνολική γεωμετρία.

Το μενού τροποποίησης / διαγραφής γεωμετρίας εμφανίζεται με δεξί κλικ του ποντικιού στον επιθυμητό κόμβο γεωμετρίας (Εικόνα 3.4).

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ένα τυπικό δέντρο γεωμετρίας. Κόμβοι του δέντρου είναι οι γεωμετρίες που έχουν ήδη οριστεί, ενώ στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το δέντρο γεωμετρίας της τριδιάστατης πτερύγωσης (ο κόμβος Mapping που περιέχει τα δεδομένα της τριδιάστατης απεικόνισης).



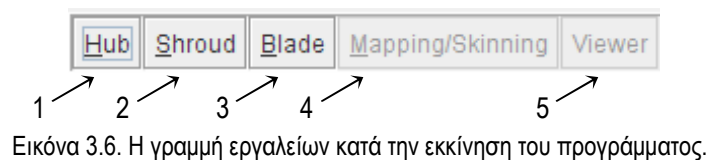
Εικόνα 3.4. Το μενού τροποποίησης/ διαγραφής γεωμετρίας του πτερυγίου Blade 1 εμφανίζεται με δεξί κλικ του ποντικιού στο κόμβο Blade 1.


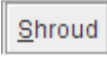

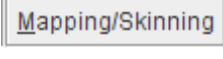


Εικόνα 3.5. Το τελικό δέντρο γεωμετρίας της πτερύγωσης.

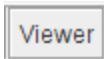
3.1.2. Γραμμή Εντολών

Στην εκκίνηση του προγράμματος, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα είτε να προχωρήσει στη διδιάστατη σχεδίαση των πτερυγίων είτε στη σχεδίαση των μεσημβρινών καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους. Στη γραμμή εργαλείων είναι ενεργοποιημένα μόνο τα αντίστοιχα κουμπιά (Εικόνα 3.6).



1.  **Πλήμνη – Hub:**
Εμφανίζει στην επιφάνεια εργασίας το παράθυρο ορισμού της επιφάνειας της πλήμνης (Παράγραφος 3.4). Είναι απενεργοποιημένο όταν είναι ήδη ορισμένη η επιφάνεια της πλήμνης (στο δέντρο γεωμετρίας υπάρχει η γεωμετρία της πλήμνης – Εικόνα 3.7).
2.  **Κέλυφος – Shroud:**
Εμφανίζει στην επιφάνεια εργασίας το παράθυρο ορισμού της επιφάνειας του κελύφους (Παράγραφος 3.4). Είναι απενεργοποιημένο όταν είναι ήδη ορισμένη η επιφάνεια του κελύφους (στο δέντρο γεωμετρίας υπάρχει η γεωμετρία του κελύφους).
3.  **(«Πρότυπο») Πτερύγιο – Blade:**
Εμφανίζει στην επιφάνεια εργασίας το παράθυρο ορισμού του διδιάστατου πτερυγίου (Παράγραφος 3.3).
4.  **Σύμμορφη Απεικόνιση/ Προσαρμογή Επιφανειών – Mapping/Skinning:**
Μη ενεργό. Ενεργοποιείται όταν ολοκληρωθεί η διδιάστατη σχεδίαση της πτερωτής. Εμφανίζει στην επιφάνεια εργασίας το

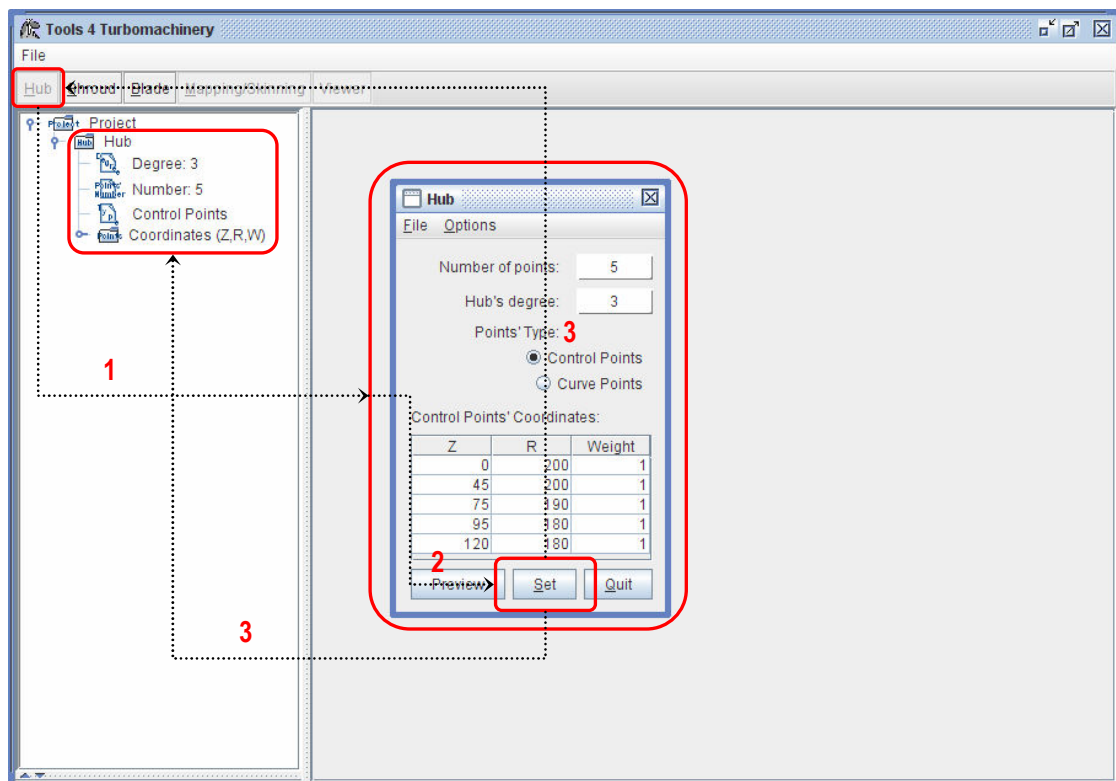
5.



παράθυρο ορισμού της σύμμορφης απεικόνισης των περυγίων ((Παράγραφος 3.5).

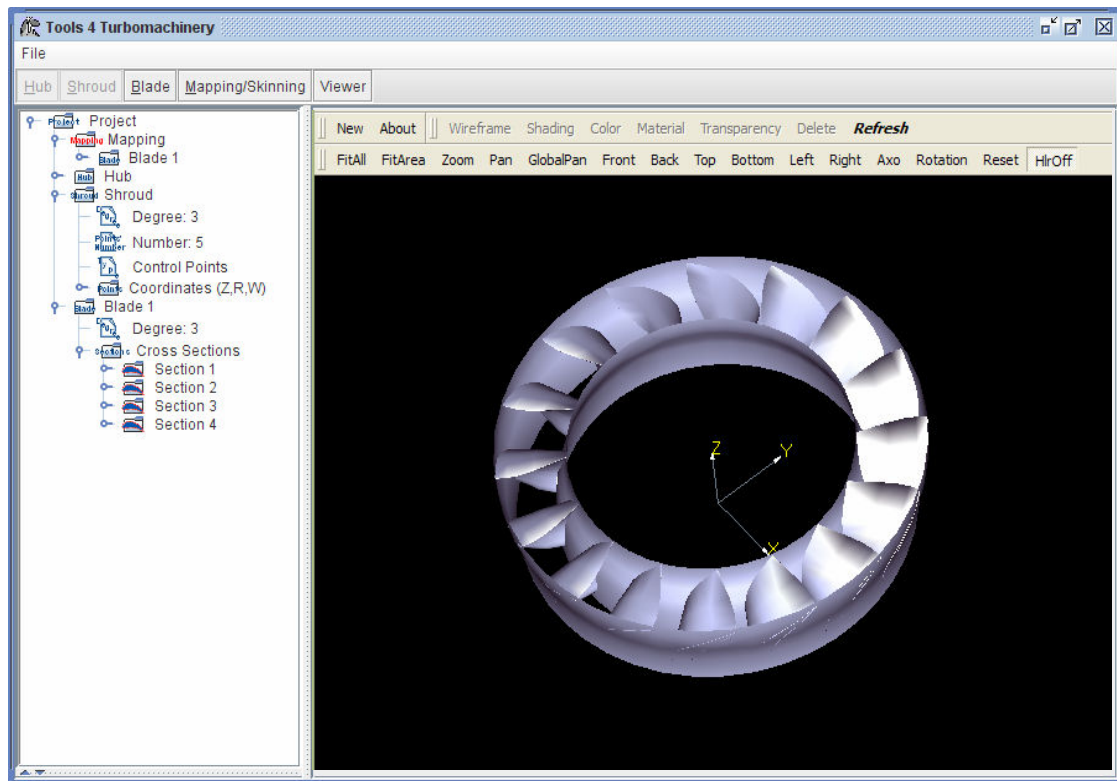
Επισκόπηση – Viewer:

Μη ενεργό. Ενεργοποιείται όταν έχει ολοκληρωθεί η σύμμορφη απεικόνιση των περυγίων, δηλαδή όταν έχει υπολογιστεί η τριδιάστατη γεωμετρία της περωτής. Εμφανίζει την τριδιάστατη γεωμετρία της περωτής μέσω του προγράμματος T4T Viewer¹⁵ (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.7. Δημιουργία της επιφάνειας της πλήμνης. Με το πάτημα του πλήκτρου Hub, εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας το παράθυρο ορισμού τη επιφάνειας της πλήμνης. Αφού οριστεί η επιφάνεια της πλήμνης (πάτημα πλήκτρου Set), εμφανίζεται στο δέντρο γεωμετρίας ο κόμβος Hub και απενεργοποιείται το πλήκτρο Hub.

¹⁵ T4T Viewer: είναι ένα εξωτερικό λογισμικό απεικόνισης τριδιάστατων γεωμετριών, που δημιουργήθηκε αποκλειστικά για το T4T και καλείται εσωτερικά από αυτό. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε από τον κ. Σωτήριο Σαρακηνό.



Εικόνα 3.8. Προεπισκόπηση της τριδιάστατης περρωτής. Με το πάτημα του πλήκτρου Viewer, εμφανίζεται το παράθυρο προεπισκόπησης της τριδιάστατης γεωμετρίας.

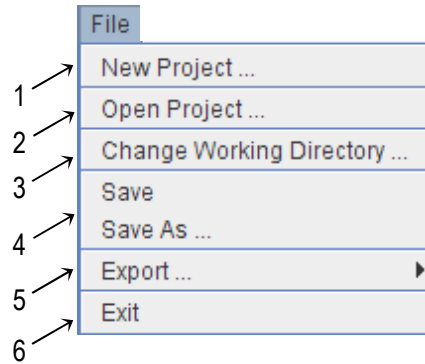
3.1.3. Επιφάνεια Εργασίας

Όλες οι γεωμετρίες που δημιουργούνται στο T4T συνοδεύονται από ένα παράθυρο ορισμού των παραμέτρων τους και το αντίστοιχο παράθυρο προεπισκόπησης της γεωμετρίας. Επομένως, είναι εύκολα αντιληπτό ότι, ανάλογα με το μέγεθος της τελικής γεωμετρίας που θα παραχθεί, αυξάνεται και ο αριθμός των παραθύρων ορισμού και προεπισκόπησης.

Το σύνολο των παραθύρων αυτών εμφανίζονται στην επιφάνεια εργασίας της κεντρικής φόρμας του T4T, η οποία καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο μέρος της. Η εμφάνιση, απόκρυψη και η διαγραφή των επιμέρους φορμών του λογισμικού ελέγχεται από το χρήστη μέσω του δέντρου γεωμετρίας.

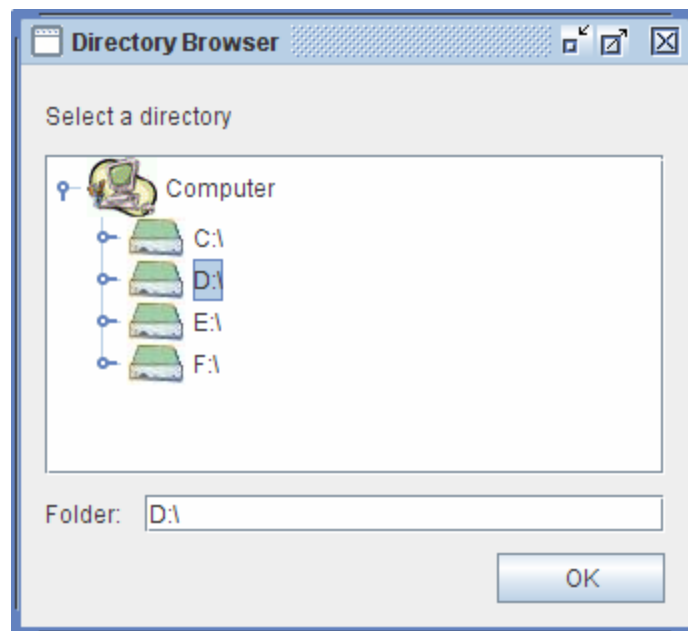
3.1.4. Γραμμή Εργαλείων

Η γραμμή εργαλείων της παρούσας έκδοσης του λογισμικού περιέχει μόνο το μενού Αρχείο (*File*). Το μενού Αρχείο περιέχει τις επιλογές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9. Το κεντρικό μενού Αρχείο (File) του λογισμικού.

- | | | |
|----|------------------------------|---|
| 1. | New Project ... | <p><i>Νέα Εφαρμογή (New Project):</i>
Έναρξη νέας εφαρμογή.</p> |
| 2. | Open Project ... | <p><i>Άνοιγμα Υπάρχουσας Εφαρμογής (Open Project):</i>
Άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας (*.t4t), που έχει παραχθεί παλιότερα, για περαιτέρω τροποποιήσεις.</p> |
| 3. | Change Working Directory ... | <p><i>(Change Working Directory):</i>
Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αλλαγής του φακέλου εργασίας της εφαρμογής (Εικόνα 3.10).
Ο προεπιλεγμένος φάκελος εργασίας (Default Working Directory) είναι ο φάκελος στον οποίο βρίσκεται το πρόγραμμα (T4T.jar).</p> |
| 4. | Save
Save As ... | <p><i>Αποθήκευση Εφαρμογής (Save – Save as):</i>
Αποθηκεύει τη συνολική γεωμετρία της πτερωτής σε αρχείο τύπου *.t4t στο φάκελο εργασίας. Το εν λόγω αρχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για περαιτέρω τροποποιήσεις.</p> |
| 5. | Export ... | <p><i>Εξαγωγή Αρχείων (Export):</i>
Μη ενεργό. Ενεργοποιείται αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της προσαρμογής επιφανειών.
Εξάγει αρχεία IGES (Initial Graphics Exchange Program) και TecPlot, που μπορούν να μεταφερθούν και σε άλλα λογισμικά πακέτα (βελτιστοποίησης, ανάλυσης, κ.λπ.) για περαιτέρω επεξεργασία.</p> |
| 6. | Exit | <p><i>Εξόδος (Exit):</i>
Τερματισμός του προγράμματος.</p> |

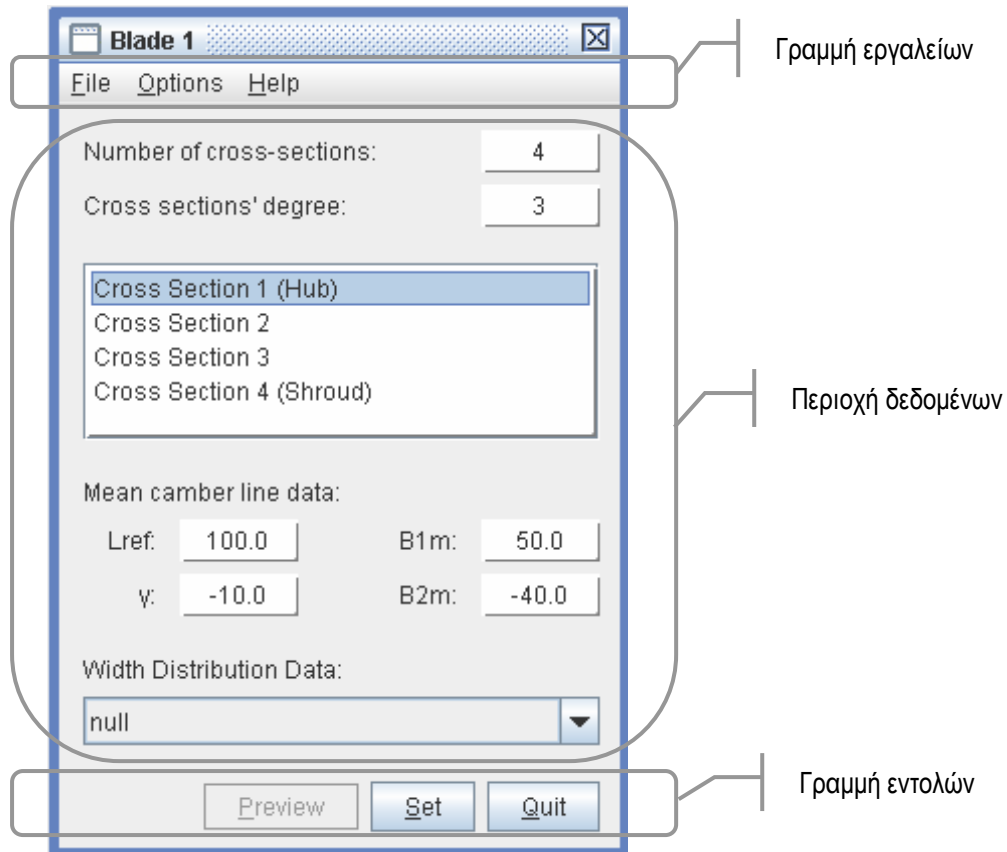


Εικόνα 3.10. Το παράθυρο ορισμού του φακέλου εργασίας.

3.2. Ορισμός Επιφάνειας Πτερυγίου

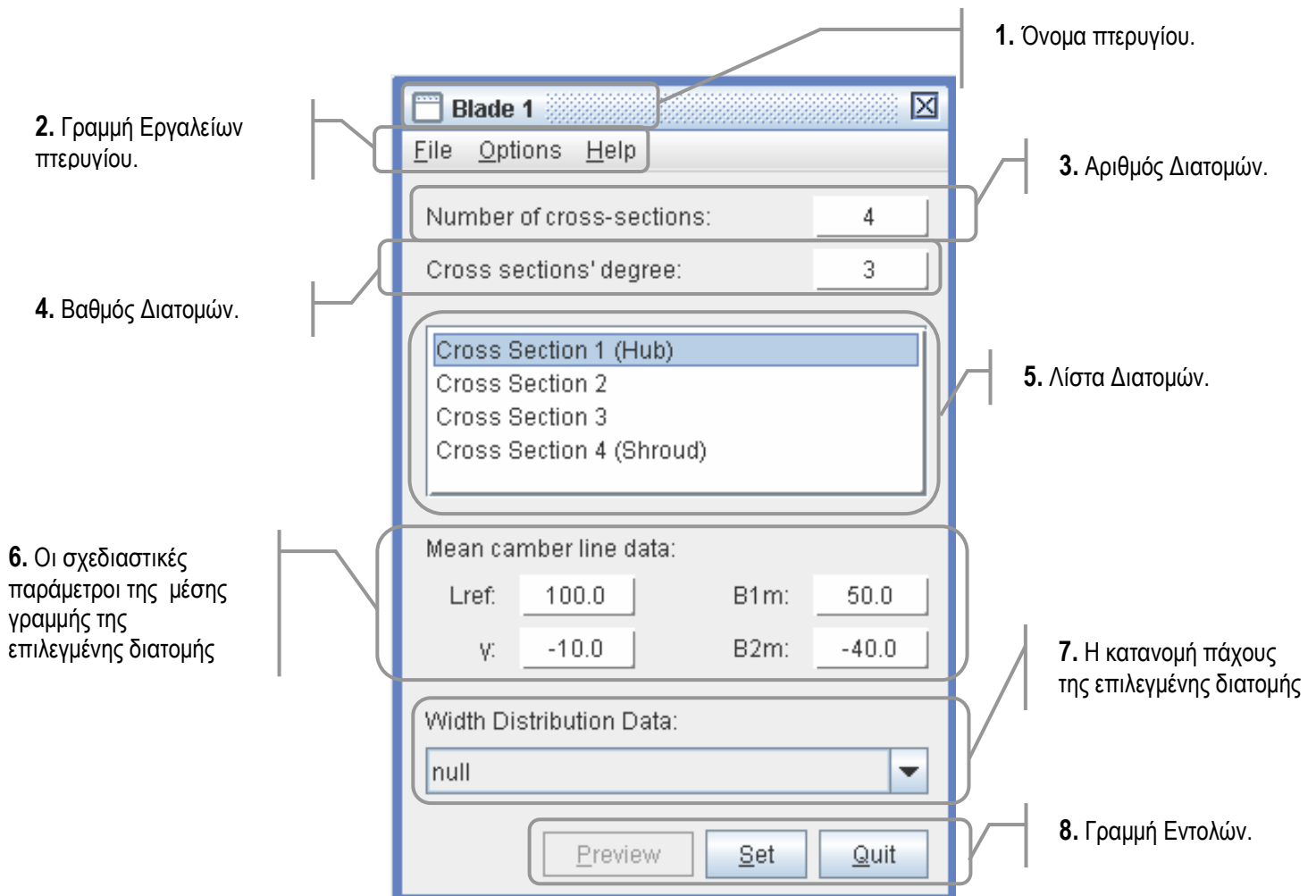
3.2.1. Παράθυρο ορισμού του πτερυγίου

Για την δημιουργία ενός πτερυγίου, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτείται, αρχικά, ο ορισμός των διατομών του. Στην Εικόνα 3.11 παρουσιάζεται η φόρμα του πτερυγίου, στην οποία ο χρήστης εισάγει όλες τις παραμέτρους ορισμού του πτερυγίου και η οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας του λογισμικού με το πάτημα του κουμπιού *Blade* (Παράγραφος 3.3.2).



Εικόνα 3.11. Το παράθυρο ορισμού ενός πτερυγίου.

Η φόρμα του πτερυγίου αποτελείται από τρεις περιοχές: την περιοχή δεδομένων, την γραμμή εργαλείων και τη γραμμή εντολών (Εικόνα 3.11). Η δομή της φόρμας αναλύεται στην Εικόνα 3.12.



Εικόνα 3.12. Παρουσίαση της φόρμας δεδομένων των πτερυγίων.

1.  **Blade 1**

2. **File Options Help**

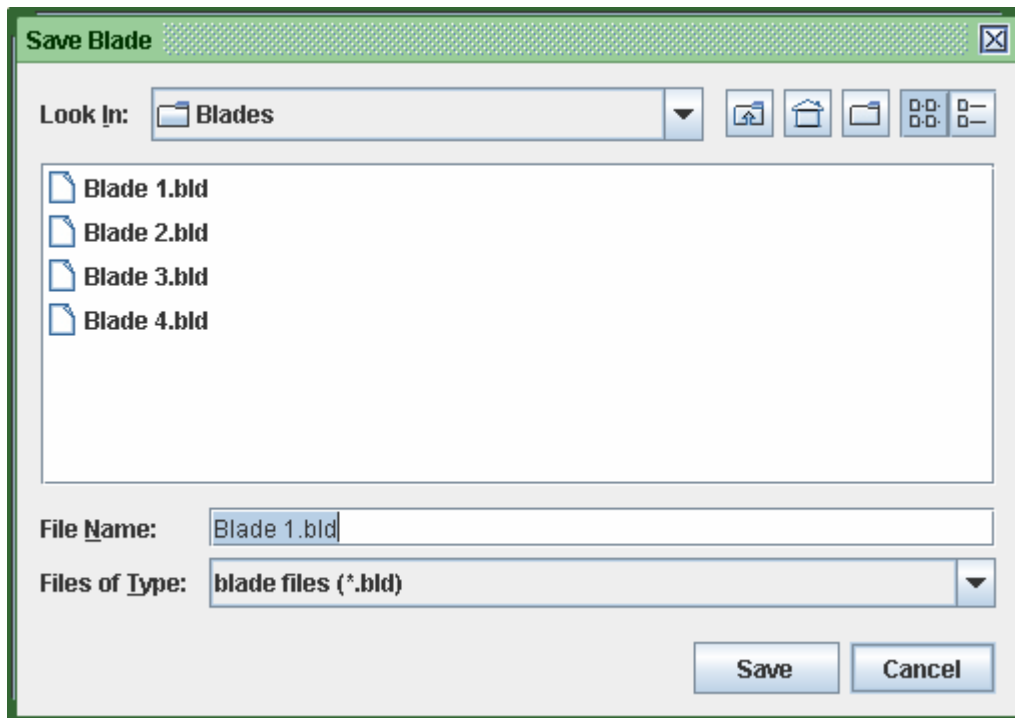
i.

File	
Open	Ctrl-O
Save	Ctrl-S
Save As	Ctrl-A
Exit	Ctrl-X

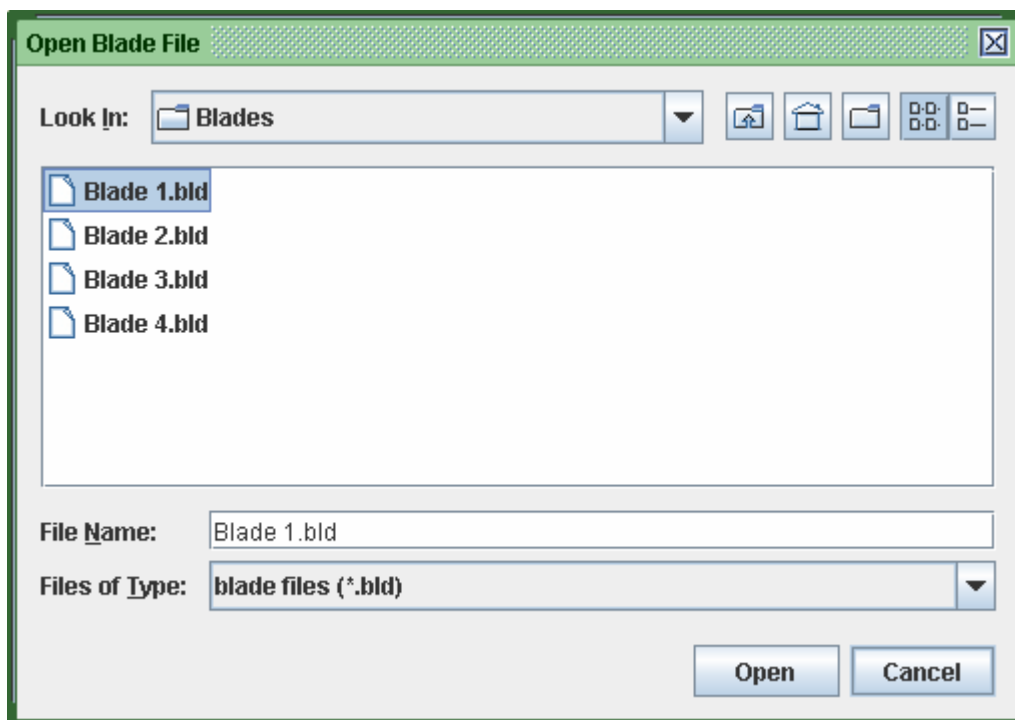
Όνομα πτερυγίου. Το όνομα του πτερύγιου αποτελεί την «ταυτότητά» του. Κάθε «πρότυπο» πτερύγιο που δημιουργείται αποθηκεύεται στο δέντρο γεωμετρίας της πτερωτής βάση του ονόματός του. Στις πολυβάθμιες πτερυγώσεις τα «πρότυπα» πτερύγια ΠΡΕΠΕΙ να έχουν διαφορετικό όνομα.

Γραμμή Εργαλείων πτερυγίου. Η γραμμή εργαλείων αποτελείται από τις επιλογές Αρχείο (2-i), Επιλογές(2-ii) και Βοήθεια.

Το μενού Αρχείο (*File*) έχει τις επιλογές Άνοιγμα (*Open*), Αποθήκευση (*Save*), Αποθήκευση ως (*Save As*) και Έξοδος (*Exit*). Το λογισμικό T4T παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τη γεωμετρία του πτερύγιου σε αρχείο τύπου *.bld (*Save*, *Save as*, Εικόνα 3.13) και να το χρησιμοποιήσει σε κάποια άλλη εφαρμογή (*Open*, Εικόνα 3.14).

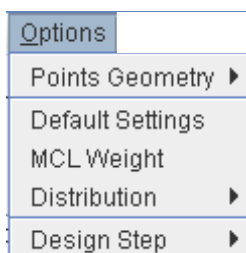


Εικόνα 3.13. Το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας του πτερυγίου.

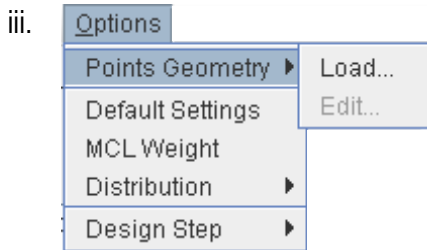


Εικόνα 3.14. Το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας πτερυγίου.

ii.



Το μενού Επιλογές (*Options*) έχει τις επιλογές Γεωμετρία Σημείων (*Points Geometry*, 2-iii), Προεπιλεγμένες Τιμές (*Defaults Settings*, 2-iv), Βάρος Μέσης Γραμμής (*MCL Weight*, 2-vi), Κατανομή Πάχους (*Distribution*, 2-vii) και Βήμα Σχεδίασης (*Design Step*, 2-viii).



Το μενού Γεωμετρία Σημείων έχει τις επιλογές Φόρτωμα (*Load*) και Επεξεργασία (*Edit*).

Φόρτωμα - Load:

Εισάγει στο λογισμικό ένα νέφος σημείων ενός περυγίου, μέσω αρχείου *.txt.

Επεξεργασία - Edit:

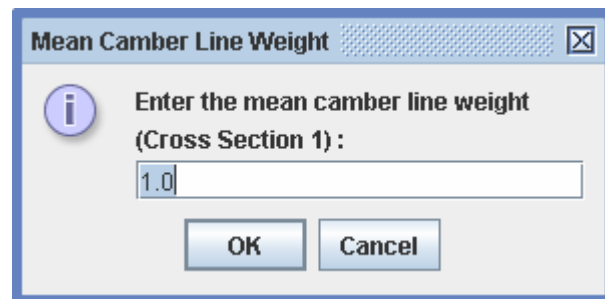
Μη ενεργό. Ενεργοποιείται εφόσον ο χρήστης έχει εισάγει ένα νέφος σημείων. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει το νέφος των σημείων, τροποποιώντας το αρχείο του.

Προεπιλεγμένες Τιμές - Default Settings:

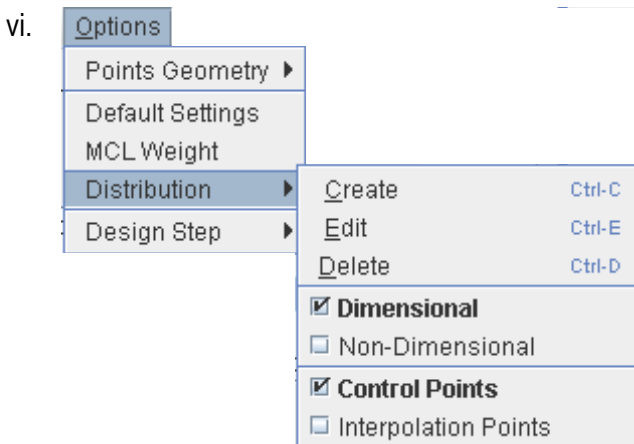
Επαναφέρει τις προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων του περυγίου.

Βάρος Μέσης Γραμμής - MCL Weight:

Εισάγει το βάρος του μεσαίου σημείου ελέγχου της μέσης γραμμής κυρτότητας της επιλεγμένης διατομής (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15. Το παράθυρο εισόδου του βάρους του μεσαίου σημείου ελέγχου της μέσης γραμμής κυρτότητας της επιλεγμένης διατομής



Το μενού Κατανομή Πάχους έχει τις επιλογές Δημιουργία (*Create*), Επεξεργασία (*Edit*), Διαγραφή (*Delete*), Διαστατή/ Αδιάστατη (*Dimensional/ Non-Dimensional*), Σημεία Ελέγχου/ Παρεμβολής (*Control Points/ Interpolation Points*).

Δημιουργία - Create: Ο χρήστης δημιουργεί μια νέα κατανομή πάχους (αρχείο τύπου *.wdb, Εικόνα 3.16-α).

Επεξεργασία - Edit:

Ο χρήστης επεξεργάζεται μια υπάρχουσα κατανομή πάχους (Εικόνα 3.16-β).

Διαγραφή - Delete:

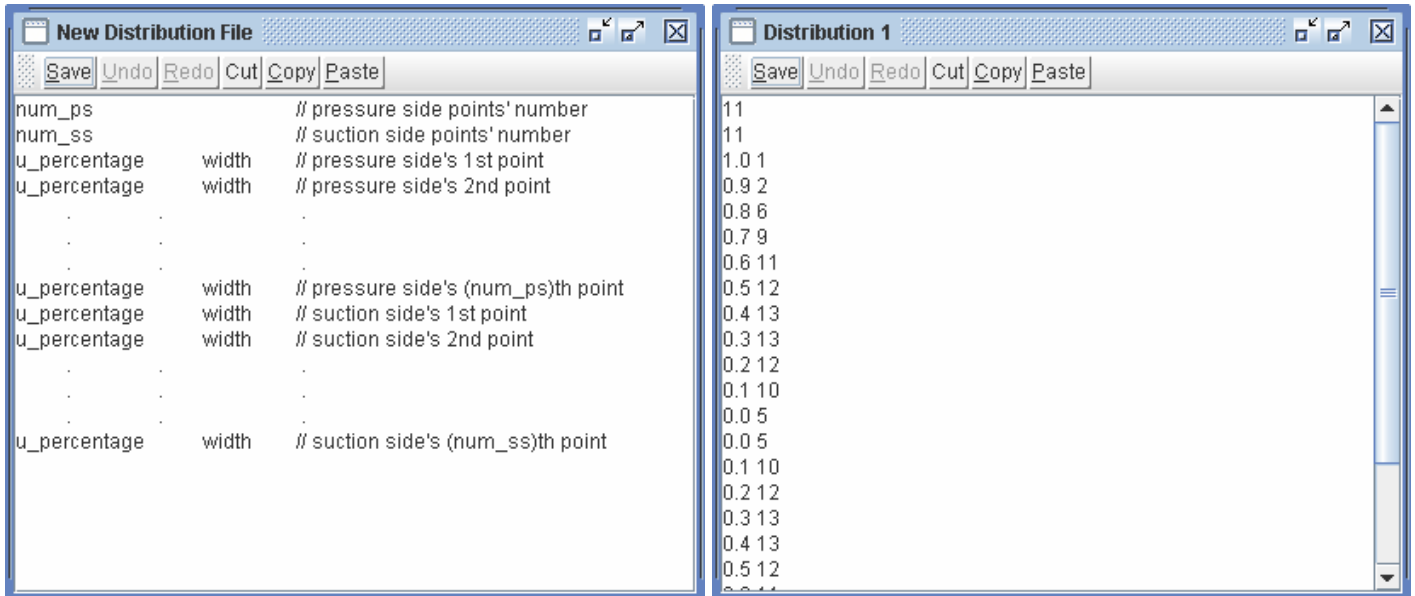
Ο χρήστης διαγράφει μια υπάρχουσα κατανομή πάχους.

Διαστατή/ Αδιάστατη - Dimensional/ Non-Dimensional:

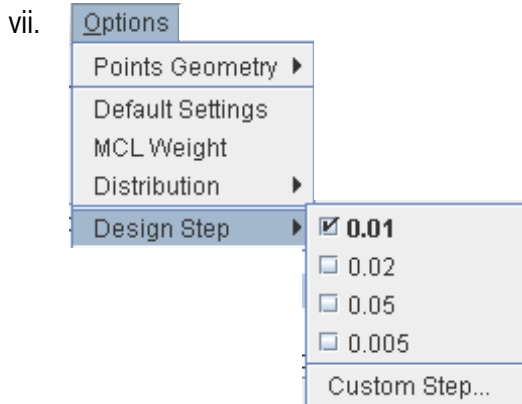
Επιλέγει αν η κατανομή πάχους θα εφαρμοστεί στο περύγιο ως διαστατή ή αδιάστατη (Παράγραφος 2.2.1). Προεπιλεγμένη τιμή: διαστατή κατανομή.

Σημεία Ελέγχου/ Παρεμβολής - Control Points/Interpolation Points:

Επιλέγει αν τα σημεία που θα προκύψουν με την εφαρμογή της επιλεγμένης κατανομής θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου ή παρεμβολής (Παράγραφος 2.2.1) Προεπιλεγμένη τιμή: σημεία ελέγχου.

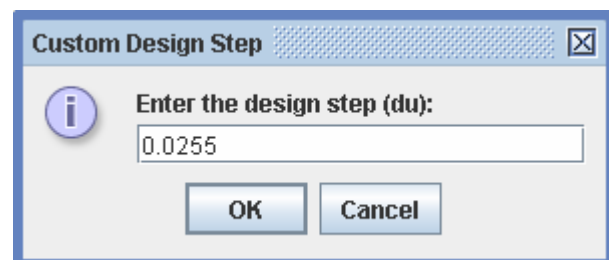


Εικόνα 3.16. (α) Παράθυρο δημιουργίας νέας κατανομής πάχους (αριστερά), (β) Παράθυρο επεξεργασία υπάρχουσας κατανομής πάχους (δεξιά).



Βήμα Σχεδίασης - Design Step:

Επιλέγει το βήμα σχεδίασης των διατομών του περυγίου. Υπάρχουν τέσσερα συγκεκριμένα βήματα σχεδίασης: 0.01, 0.02, 0.05, 0.005. Αλλά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποιο άλλο με την επιλογή Προσαρμοσμένο Βήμα (*Custom Step*) (Εικόνα 3.17). Προεπιλεγμένη τιμή : 0.01



Εικόνα 3.17. Το παράθυρο εισόδου του βήματος σχεδίασης του περυγίου.

3. Number of cross-sections:
4. Cross sections' degree:

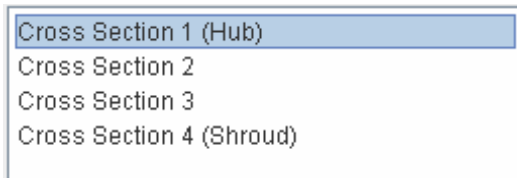
Αριθμός Διατομών:

Εισάγει τον αριθμό των διατομών που αποτελούν το περυγίο. Προεπιλεγμένη τιμή: 4.

Βαθμός Διατομών:

Εισάγει τον βαθμό των διατομών (είναι κοινός για όλες τις διατομές). Προεπιλεγμένη τιμή: 3.

5.

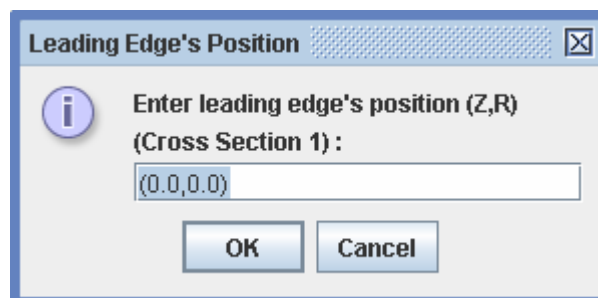


Στη λίστα των διατομών εμφανίζονται οι διατομές του πτερυγίου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μία ή και περισσότερες διατομές. Μόνο για τις επιλεγμένες διατομές εφαρμόζονται οι αλλαγές στις παραμέτρους του πτερυγίου.

Η λίστα των διατομών διαθέτει επίσης και δυο επιπλέον μενού (Pop-Up Menu), τα οποία εμφανίζονται με δεξί πάτημα του ποντικιού στην περιοχή της λίστας. Αν ο χρήστης έχει επιλέξει μία διατομή εμφανίζεται το μενού της Εικόνας 3.18-α και έχει τη δυνατότητα να εισάγει (*Add...*) μία νέα διατομή ή να διαγράψει (*Delete...*) την επιλεγμένη διατομή, χωρίς να χαθούν τα δεδομένα των υπολοίπων διατομών. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να εισάγει το βάρος (*Weight*) του μεσαίου σημείου ελέγχου της μέσης γραμμής (Εικόνα 3.15) και να ορίσει τη θέση του σημείου προσβολής (*Leading Edge*) της διατομής (Εικόνα 3.19). Αν ο χρήστης έχει επιλέξει παραπάνω από μια διατομές τότε εμφανίζεται το μενού της μέσης γραμμής (*Camber Line*) της Εικόνας 3.18-β.



Εικόνα 3.18. Τα Pop-Up μενού της λίστας διατομών για μονή (α) και πολλαπλή (β) επιλογή διατομών.



Εικόνα 3.19. Το παράθυρο εισόδου της θέσης του σημείου προσβολής της επιλεγμένης διατομής

6.

Mean camber line data:			
Lref:	<input type="text" value="0.0"/>	B1m:	<input type="text" value="0.0"/>
γ:	<input type="text" value="0.0"/>	B2m:	<input type="text" value="0.0"/>

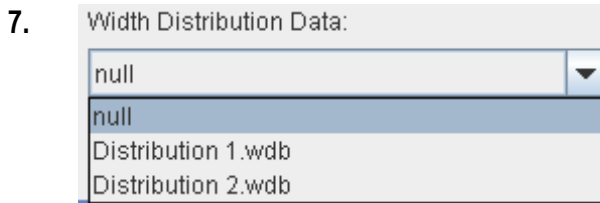
Δεδομένα της μέσης γραμμής: Εισάγει τις σχεδιαστικές παραμέτρους της μέσης γραμμής της επιλεγμένης διατομής.

L_{ref} : Η αξονική απόσταση μεταξύ σημείου προσβολής και σημείου εκφυγής (αξονική χορδή).

B_{1m} : Η μέση γωνία εισόδου του πτερυγίου.

B_{2m} : Η μέση γωνία εξόδου του πτερυγίου.

γ : Η γωνία κλίσης του πτερυγίου (stagger angle).



Εισάγει την κατανομή πάχους (αρχείο) της επιλεγμένης διατομής.



Στη Γραμμή Εντολών υπάρχουν τρία κουμπιά, Ορισμός (*Set*), Προεπισκόπηση (*Preview*) και Κλείσιμο (*Quit*).

Ορισμός - Set:

Εκτελεί την αλληλουχία εντολών για την δημιουργία των διατομών του πτερυγίου.

Προεπισκόπηση - Preview:

Μη ενεργό. Ενεργοποιείται εφόσον ο χρήστης έχει δημιουργήσει τις διατομές του πτερυγίου (*Set*). Προεπισκόπηση των διατομών που έχουν υπολογιστεί.

Κλείσιμο - Quit:

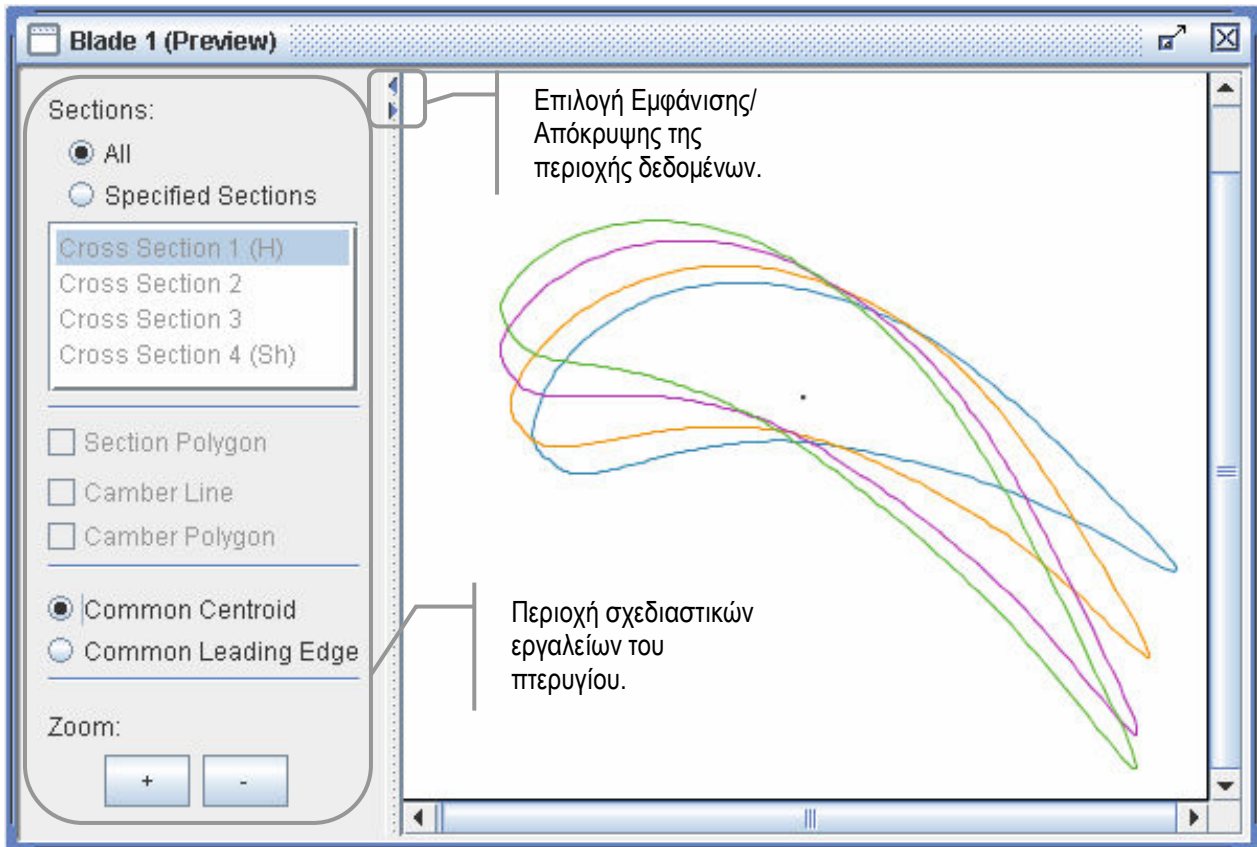
Κλείσιμο της φόρμας.

3.2.2. Παράθυρο προεπισκόπησης – ορισμού του πτερυγίου

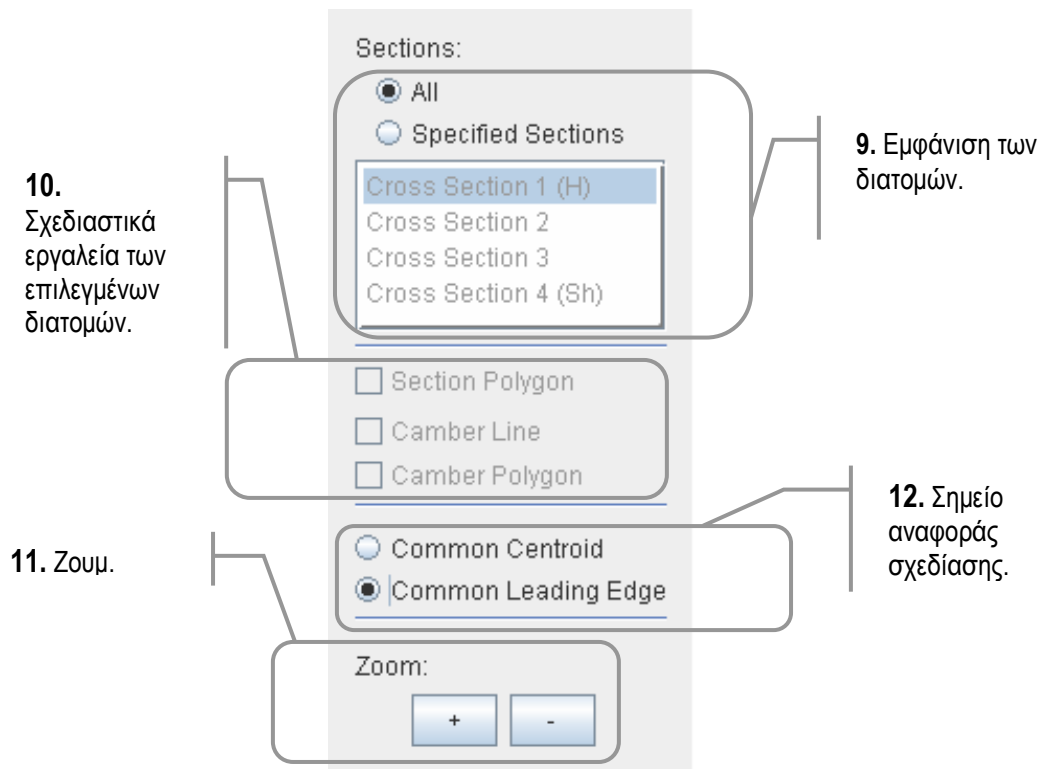
Αφού υπολογιστούν οι διατομές του πτερυγίου, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τη γεωμετρία του πτερυγίου μέσω της επιλογής *Preview* στη γραμμή εντολών της φόρμας του πτερυγίου. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου παρουσιάζεται στις Εικόνες 3.20 - 3.22.



Εικόνα 3.20. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου (περιοχή σχεδίασης των διατομών).

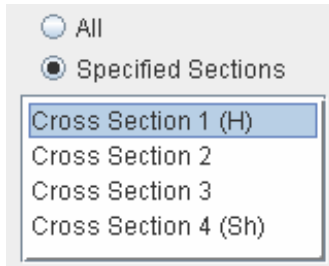


Εικόνα 3.21. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων του πτερυγίου).



Εικόνα 3.22. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων.

9.



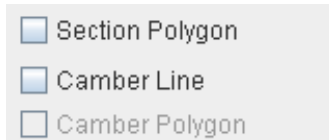
Όλες - All:

Όταν είναι ενεργοποιημένο στη περιοχή σχεδίασης εμφανίζονται όλες οι διατομές του περυγίου (Εικόνα 3.21).

Καθορισμένες Διατομές - Specified Sections:

Όταν είναι ενεργοποιημένο στη περιοχή σχεδίασης εμφανίζονται μόνο οι επιλεγμένες διατομές (Εικόνα 3.23)

10.



Τα σχεδιαστικά εργαλεία ενεργοποιούνται με την επιλογή Specified Sections.

Πολύγωνο Διατομής - Section Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου των επιλεγμένων διατομών στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.24)

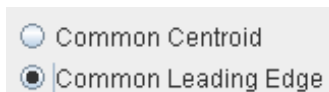
Μέση Γραμμή - Camber Line:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τη μέση γραμμή κυρτότητας των επιλεγμένων διατομών στην περιοχή σχεδίασης.

Πολύγωνο Μέσης Γραμμής - Camber Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου της μέσης γραμμής κυρτότητας των επιλεγμένων διατομών στην περιοχή σχεδίασης. (η δυνατότητα ενεργοποίησης παρέχεται εφόσον είναι ενεργή η επιλογή Camber Line, Εικόνα 3.25)

11.



Επιλογή σημείου αναφοράς σχεδίασης:

Common Centroid:

Όταν είναι επιλεγμένο στη περιοχή σχεδίασης οι επιλεγμένες διατομές σχεδιάζονται ταυτίζοντας τα κέντρα βάρους τους (Εικόνα 3.21).

Common Leading Edge:

Όταν είναι επιλεγμένο στη περιοχή σχεδίασης οι επιλεγμένες διατομές σχεδιάζονται ταυτίζοντας τα σημεία προσβολής τους (Εικόνα 3.23).

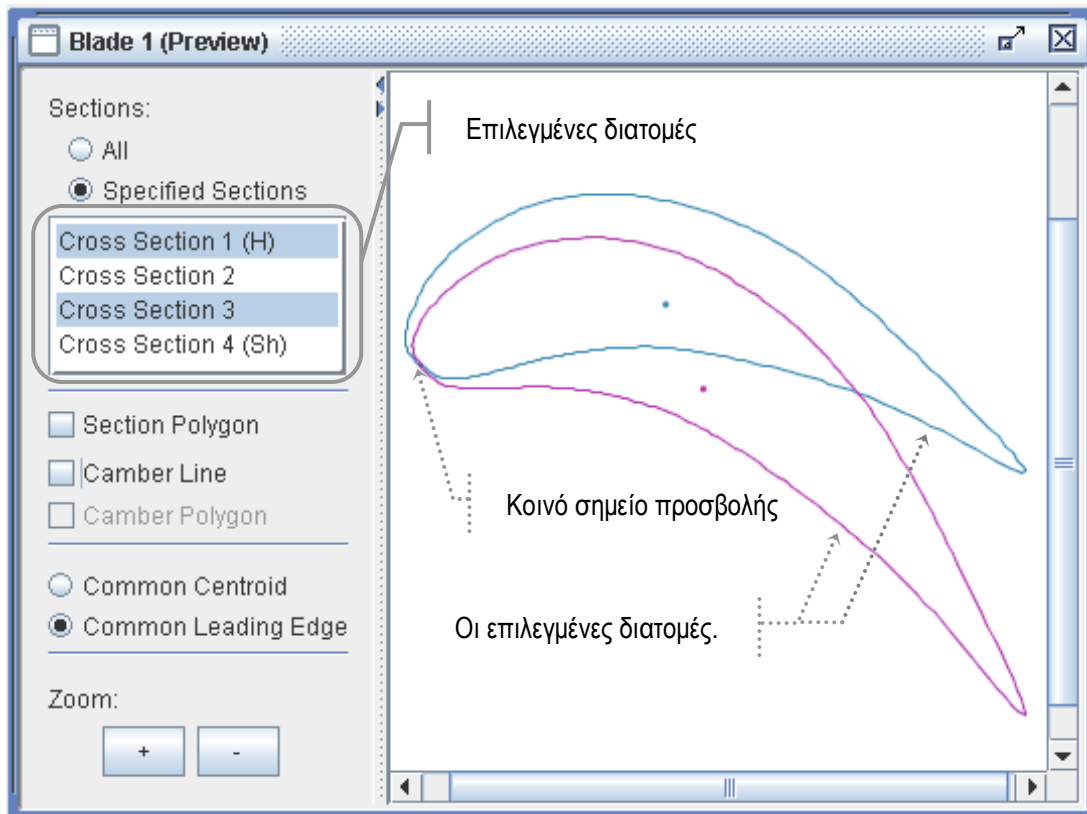
12.



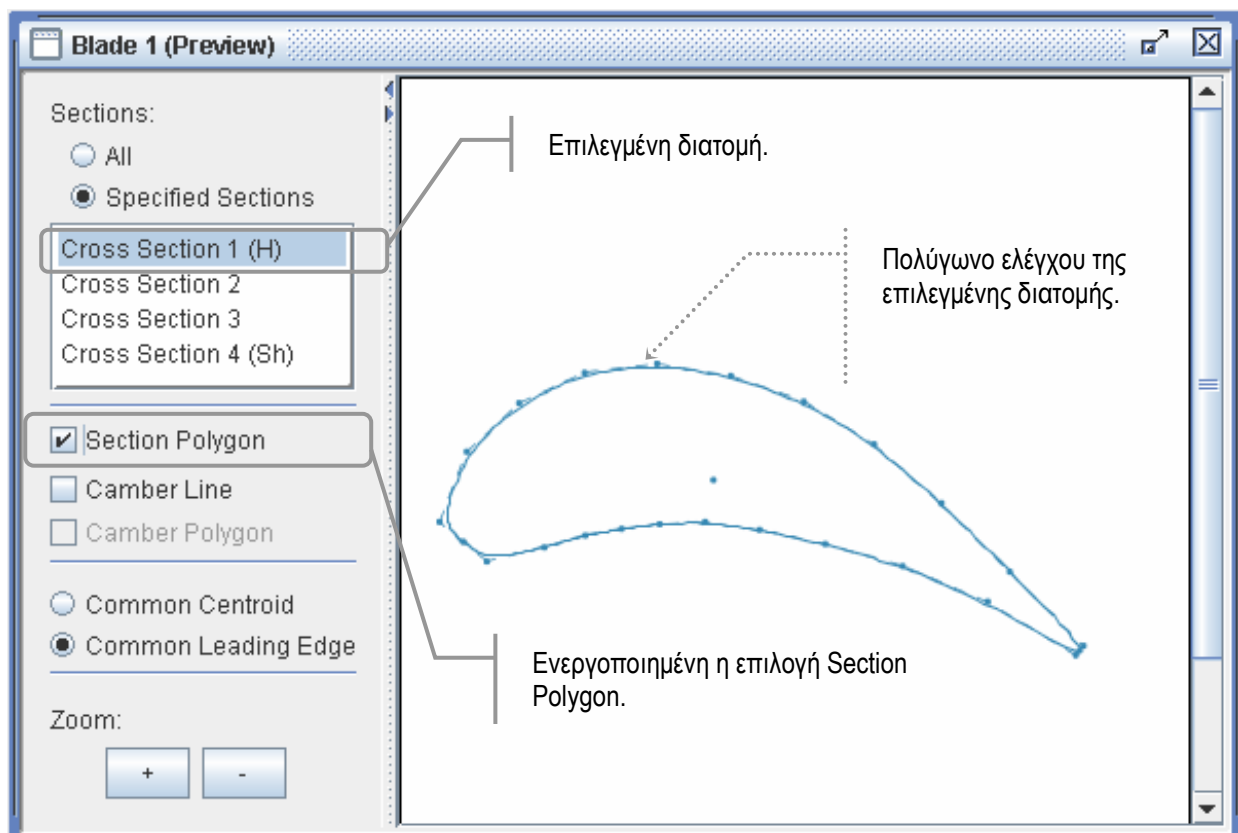
Ζουμ - Zoom:

Μεγέθυνση(+) ή σμίκρυνση (-) των επιλεγμένων διατομών που απεικονίζονται στη περιοχή σχεδίασης.

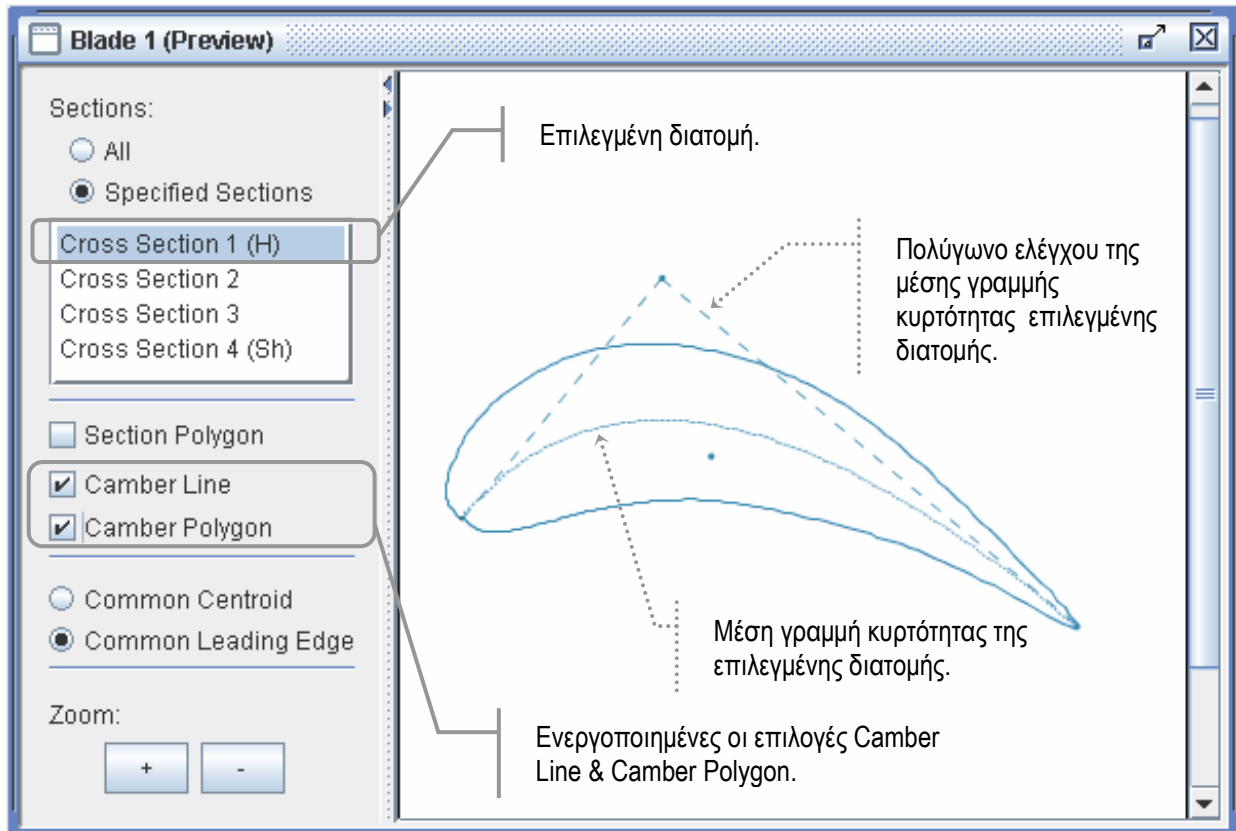
Μεγέθυνση και σμίκρυνση της σχεδίασης επιτυγχάνεται και με αριστερό ή δεξί κλικ του ποντικιού στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.26).



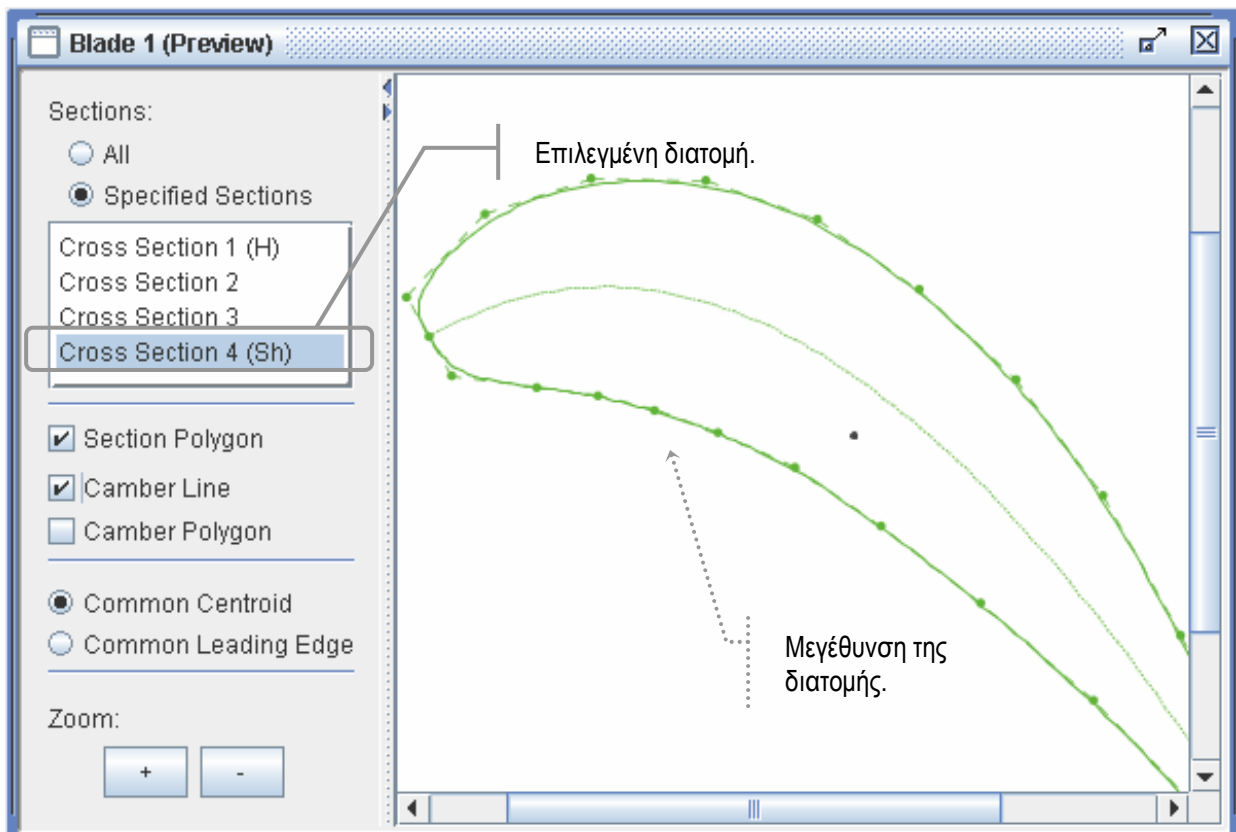
Εικόνα 3.23. Προεπισκόπηση των επιλεγμένων διατομών (1 & 3) με ταυτισμένα σημεία προσβολής.



Εικόνα 3.24. Προεπισκόπηση της επιλεγμένης διατομής και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.



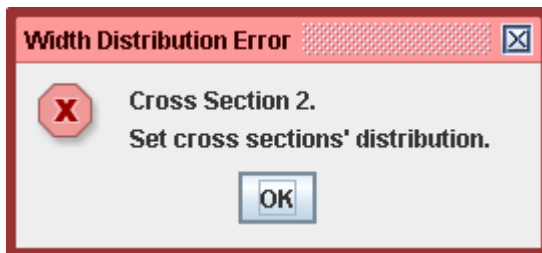
Εικόνα 3.25. Προεπισκόπηση της επιλεγμένης διατομής, της αντίστοιχης μέσης γραμμής και του πολύγωνου ελέγχου της.



Εικόνα 3.26. Μεγέθυνση της επιλεγμένης διατομής, της αντίστοιχης μέσης γραμμής και του πολύγωνου ελέγχου της.

3.2.3. Σφάλματα Σχεδίασης

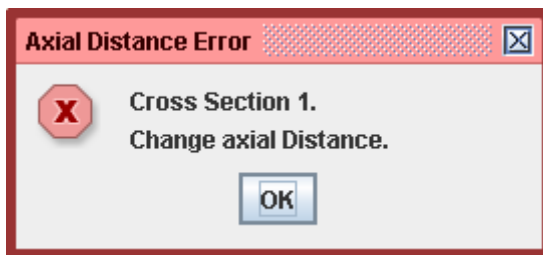
Σε ορισμένες περιπτώσεις η σχεδίαση των διατομών ενός πτερυγίου δεν είναι δυνατή. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε λανθασμένες επιλογές του χρήστη είτε σε μη ορισμένους σχεδιαστικούς παραμέτρων. Τα σφάλματα σχεδίασης, που μπορεί να παρουσιαστούν, είναι τα εξής:



Εικόνα 3.27. Το παράθυρο σφάλματος κατανομής. Πρέπει να οριστεί η κατανομή πάχους της διατομής 2.

Σφάλμα Κατανομής (Width Distribution Error):

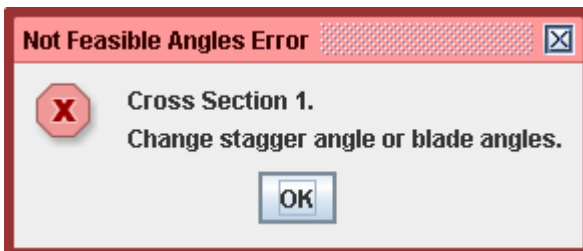
Ο χρήστης πρέπει να ορίσει την κατανομή πάχους όλων των διατομών για να πραγματοποιηθεί η σχεδίαση (Εικόνα 3.27).



Εικόνα 3.28. Το παράθυρο σφάλματος αξονικής χορδής. Η αξονική απόσταση της διατομής 1 πρέπει να είναι θετική.

Σφάλμα Αξονικής Χορδής (Axial Distance Error):

Η αξονική χορδή όλων των διατομών ενός πτερυγίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός (Εικόνα 3.28).

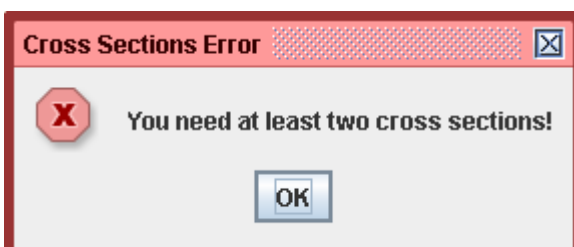


Εικόνα 3.29. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών γωνιών.

Σφάλμα μη αποδεκτών γωνιών (Not Feasible Angles Error):

Για ορισμένες τιμές των παραμέτρων η γεωμετρία των διατομών δεν είναι εφικτή.

Π.χ. $\beta_1 m = \beta_2 m = 0$ και $\text{stagger} \neq 0$.



Εικόνα 3.30. Το παράθυρο σφάλματος διατομών.

Σφάλμα Διατομών (Cross Sections Error):

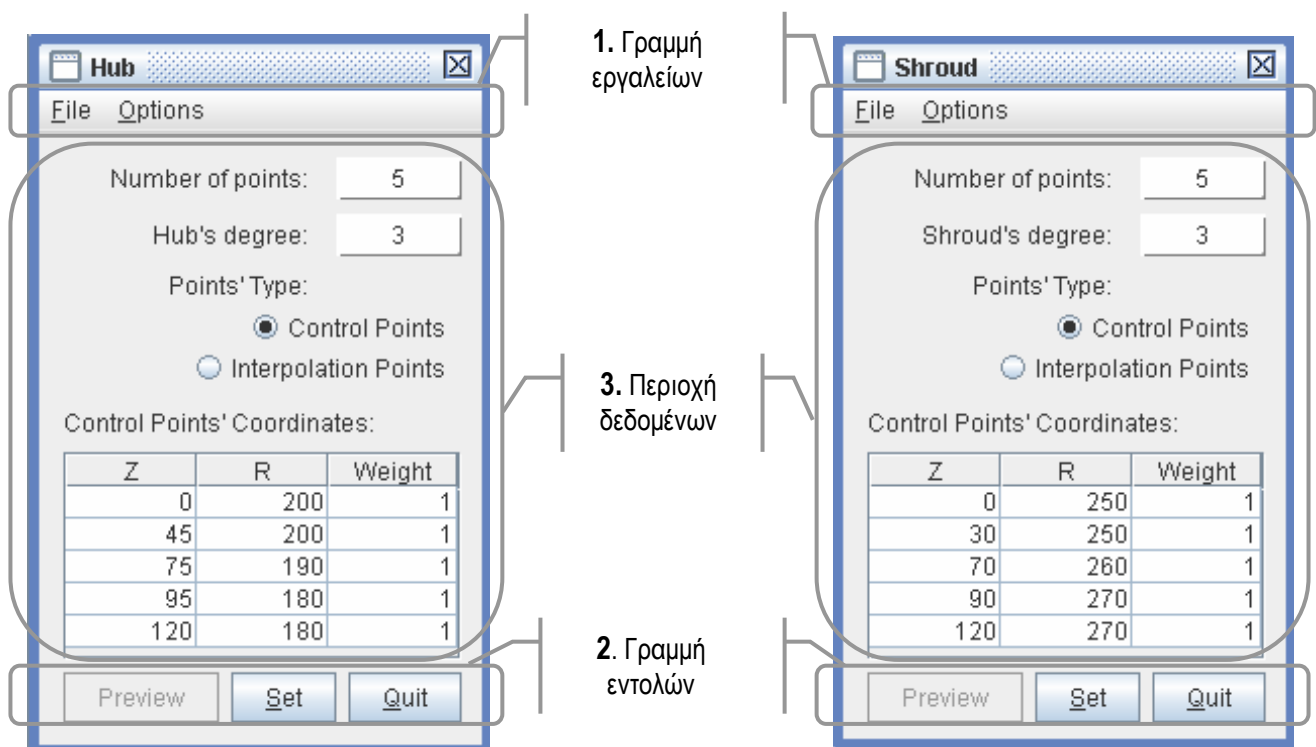
Για να σχεδιαστεί το πτερύγιο πρέπει να οριστούν τουλάχιστον δύο διατομές, διαφορετικά δεν θα μπορέσει να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του «skinning» κατά την τριδιάστατη απεικόνιση του πτερυγίου.

3.3. Κωνικές Επιφάνειες

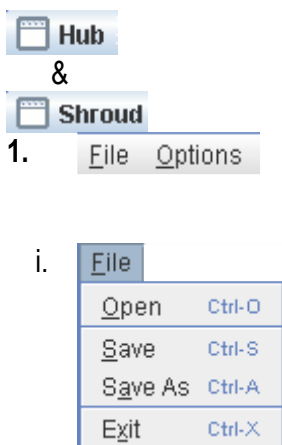
3.3.1. Παράθυρο ορισμού κωνικών επιφανειών

Οι κωνικές επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ορίζονται ως επιφάνειες εκ περιστροφής και απαιτούνται δύο γεννήτριες καμπύλες για τον ορισμό τους.

Στην Εικόνα 3.31 παρουσιάζονται οι φόρμες της πλήμνης και του κελύφους, στις οποίες εισάγονται οι παράμετροι ορισμού τους. Οι φόρμες έχουν την ίδια δομή και αποτελούνται από τρεις περιοχές, την περιοχή δεδομένων, τη γραμμή εργαλείων και τη γραμμή εντολών.



Εικόνα 3.31. Τα παράθυρα ορισμού της πλήμνης (αριστερά) και του κελύφους (δεξιά).

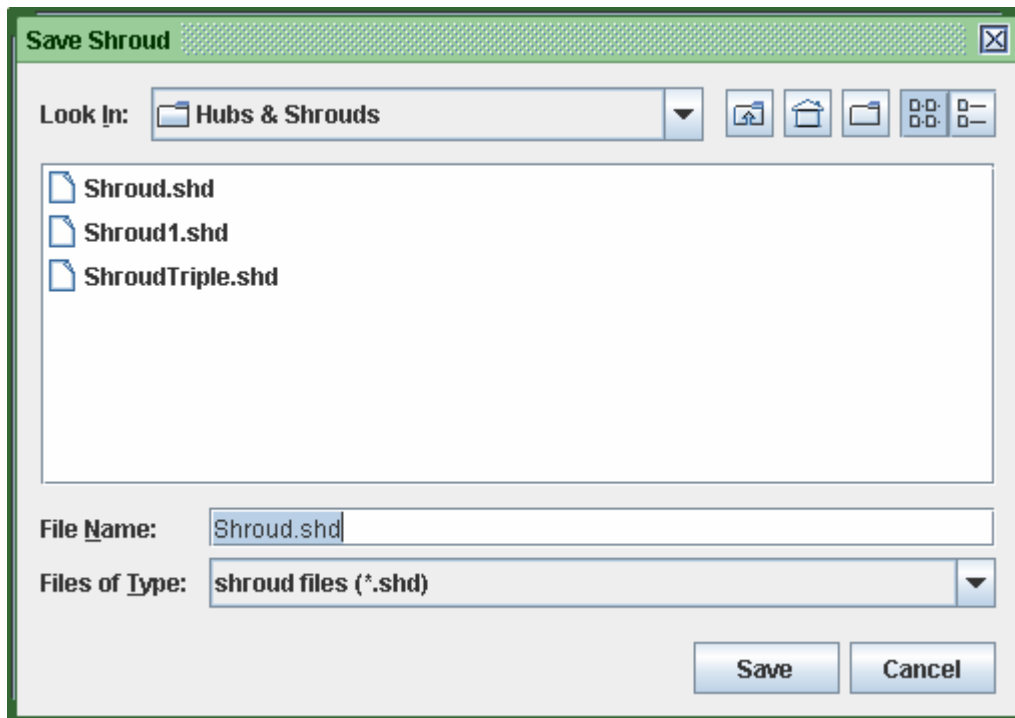


Όνομα πλήμνης και κελύφους. Οι γεωμετρίες της πλήμνης και του κελύφους αποθηκεύονται στο γεωμετρικό μοντέλο της πτερωτής βάσει των ονομάτων τους, Hub και Shroud αντίστοιχα.

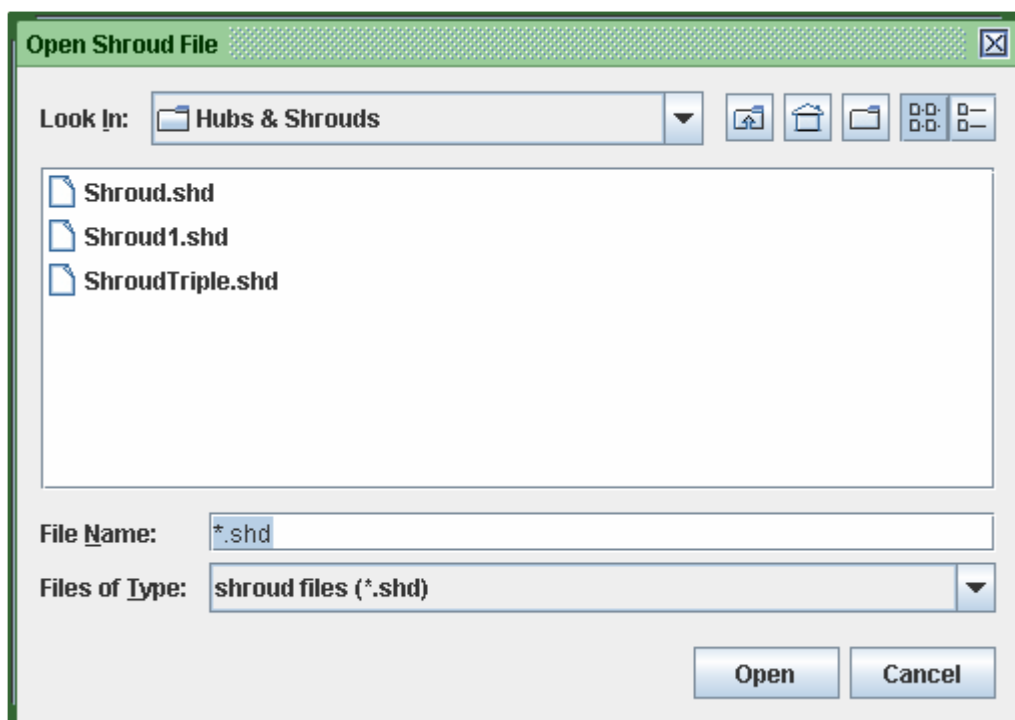
Γραμμή Εργαλείων Μεσημβρινής Καμπύλης (Κελύφους ή Πλήμνης): Η γραμμή εργαλείων αποτελείται από τις επιλογές *File* (1-i) και *Options* (1-ii).

Το μενού Αρχείο (*File*) έχει τις επιλογές Άνοιγμα (*Open*), Αποθήκευση (*Save*), Αποθήκευση ως (*Save As*) και Έξοδος (*Exit*).


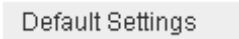
Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τη γεωμετρία της μεσημβρινής καμπύλης σε αρχείο (*Save*, *Save as*, Εικόνα 3.32) και να το χρησιμοποιήσει σε κάποια άλλη εφαρμογή (*Open*, Εικόνα 3.33). Τα αρχεία είναι τύπου *.shd για την καμπύλη κελύφους και τύπου *.hb για την καμπύλη πλήμνης.



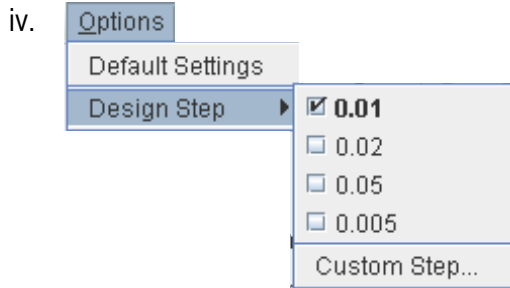
Εικόνα 3.32. Το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας του κελύφους (το παράθυρο διαλόγου για την αποθήκευση της γεωμετρίας της πλήμνης είναι παρόμοιο).



Εικόνα 3.33. Το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας κελύφους (το παράθυρο διαλόγου για άνοιγμα υπάρχουσας γεωμετρίας πλήμνης είναι παρόμοιο).

- ii.  Το μενού Επιλογές έχει τις επιλογές: Προεπιλεγμένες Τιμές (*Defaults Settings*, 2-iii) και Βήμα Σχεδίασης (*Design Step*, 2-iv).
- iii.  Προεπιλεγμένες Τιμές - *Default Settings*:

Επαναφέρει τις προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων της μεσημβρινής καμπύλης.



Βήμα Σχεδίασης - Design Step:

Επιλέγει το βήμα σχεδίασης της μεσημβρινής καμπύλης. Υπάρχουν τέσσερα συγκεκριμένα βήματα σχεδίασης: 0.01, 0.02, 0.05, 0.005. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποιο άλλο με την επιλογή Προσαρμοσμένο Βήμα (*Custom Step*)(Εικόνα 3.34). Προεπιλεγμένη τιμή : 0.01.



Εικόνα 3.34. Το παράθυρο εισόδου του βήματος σχεδίασης της μεσημβρινής καμπύλης.



Στη Γραμμή Εντολών υπάρχουν τρία κουμπιά, Ορισμός (*Set*), Προεπισκόπηση (*Preview*) και Κλείσιμο (*Quit*).

Ορισμός - Set:

Εκτελεί την αλληλουχία εντολών για την δημιουργία της μεσημβρινής καμπύλης.

Προεπισκόπηση - Preview:

Μη ενεργό. Ενεργοποιείται εφόσον ο χρήστης έχει δημιουργήσει τη μεσημβρινή καμπύλη (*Set*). Προεπισκόπηση της μεσημβρινής καμπύλης που έχει υπολογιστεί.

Κλείσιμο - Quit:

Κλείσιμο της φόρμας.



Εικόνα 3.35. Παρουσίαση της περιοχής δεδομένων της πλήμνης και του κελύφους.

4. Number of points:

5. Shroud's degree:

Hub's degree:

6. Points' Type:
☒ Control Points
☐ Interpolation Points

7. Control Points' Coordinates:

Z	R	Weight
0	250	1
30	250	1
70	260	1
90	270	1
120	270	1

Αριθμός σημείων ορισμού καμπύλης:

Εισάγει τον αριθμό των σημείων που καθορίζουν τη μεσημβρινή καμπύλη είτε ως σημεία ελέγχου, είτε ως σημεία παρεμβολής. Προεπιλεγμένη τιμή: 5.

Βαθμός καμπύλης:

Εισάγει το βαθμό της μεσημβρινής καμπύλης. Προεπιλεγμένη τιμή: 3.

Τύπος σημείων:

Επιλέγει αν τα σημεία που καθορίζουν τη μεσημβρινή καμπύλη θα οριστούν ως σημεία ελέγχου (Control Points) ή ως σημεία παρεμβολής (Interpolation Points). Προεπιλεγμένη τιμή: σημεία ελέγχου.

Πίνακας Συντεταγμένων Σημείων:

Εισάγει τις συντεταγμένες των σημείων της μεσημβρινής καμπύλης. Εάν τα σημεία είναι σημεία ελέγχου τότε εισάγει και τα αντίστοιχα βάρη (Εικόνα 3.37).

Ο πίνακας διαθέτει μενού, το οποίο εμφανίζεται με δεξί πάτημα του ποντικιού στην περιοχή του (Εικόνα 3.36). Με το συγκεκριμένο μενού έχει τη δυνατότητα να εισάγει (Add...) ένα νέο σημείο ή να διαγράψει (Delete...) το επιλεγμένο σημείο, χωρίς να χαθούν τα υπόλοιπα δεδομένα.

Add ...
Delete ...

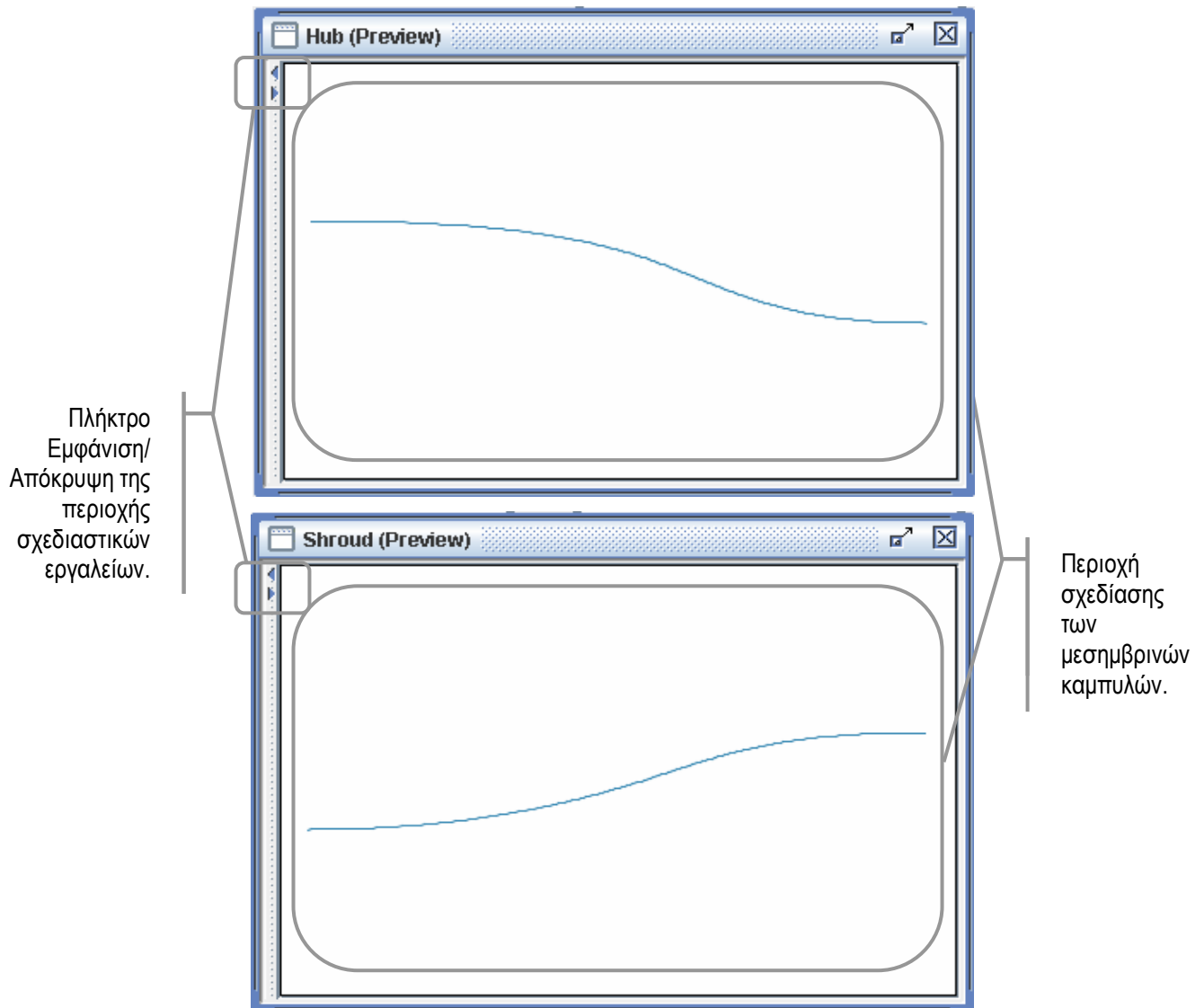
Εικόνα 3.36. Το Pop-Up μενού του πίνακα συντεταγμένων σημείων.

Control Points' Coordinates:			Interpolation Points' Coordinates:	
Z	R	Weight	Z	R
0	200	1	0	200
45	200	1	45	200
75	190	1	75	190
95	180	1	95	180
120	180	1	120	180

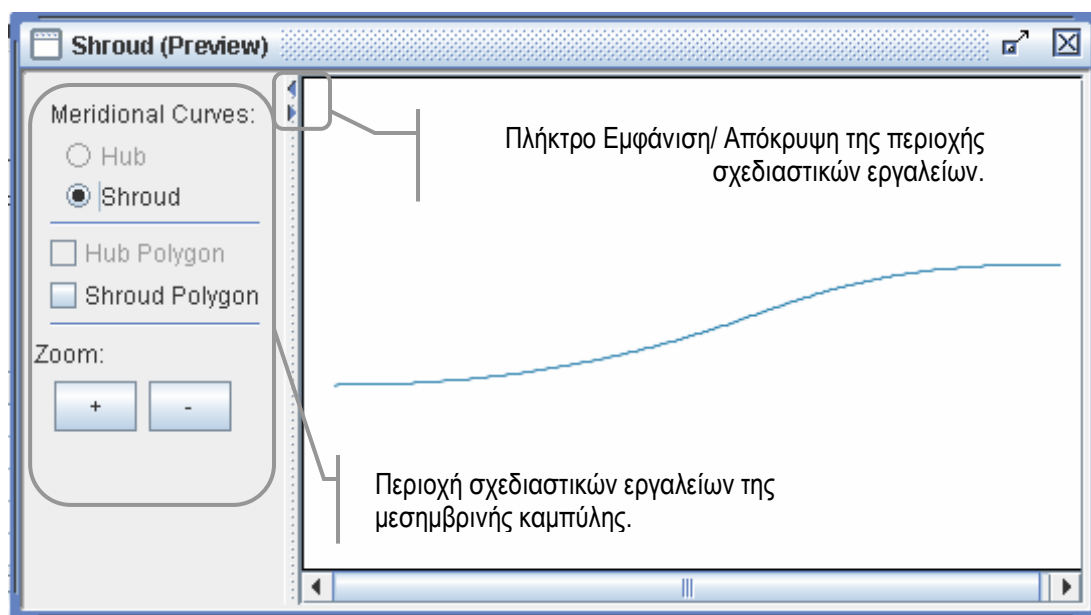
Εικόνα 3.37. Οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος για τον ορισμό της πλήμνης της πτερωτής. Τα σημεία ορίζονται ως σημεία ελέγχου (αριστερά) ή ως σημεία παρεμβολής (δεξιά).

3.3.2. Προεπισκόπηση Πλήμνης και Κελύφους

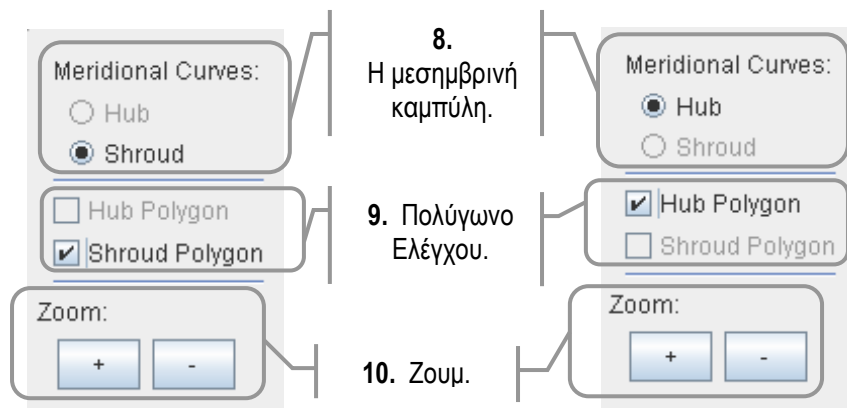
Αφού υπολογιστεί η καμπύλη ορισμού της κωνικής επιφάνειας, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τη γεωμετρία της μέσω της επιλογής *Preview* στη γραμμή εντολών της αντίστοιχης φόρμας. Το παράθυρο προεπισκόπησης της πλήμνης και του κελύφους παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.38 - 3.40.



Εικόνα 3.38. Τα παράθυρα προεπισκόπησης των μεσημβρινών καμπυλών (περιοχή σχεδίασης).



Εικόνα 3.39. Το παράθυρο προεπισκόπησης των μεσημβρινών καμπυλών (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων).



Εικόνα 3.40. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων της πλήμνης (αριστερά) και του κελύφους (δεξιά).

8.

Meridional Curves:

☒ Hub

☐ Shroud

Πλήμνη - Hub:

Όταν είναι ενεργοποιημένο στην περιοχή σχεδίασης απεικονίζεται η μεσημβρινή καμπύλη της πλήμνης.

Meridional Curves:

☐ Hub

☒ Shroud

Κελύφος - Shroud:

Όταν είναι ενεργοποιημένο στην περιοχή σχεδίασης απεικονίζεται η μεσημβρινή καμπύλη του κελύφους.

9.

☒ Hub Polygon

☐ Shroud Polygon

Πολύγωνο Πλήμνης - Hub Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου της μεσημβρινής καμπύλης του κελύφους στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.41).

☐ Hub Polygon

☒ Shroud Polygon

Πολύγωνο Κελύφους - Shroud Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου της μεσημβρινής καμπύλης της πλήμνης στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.42).

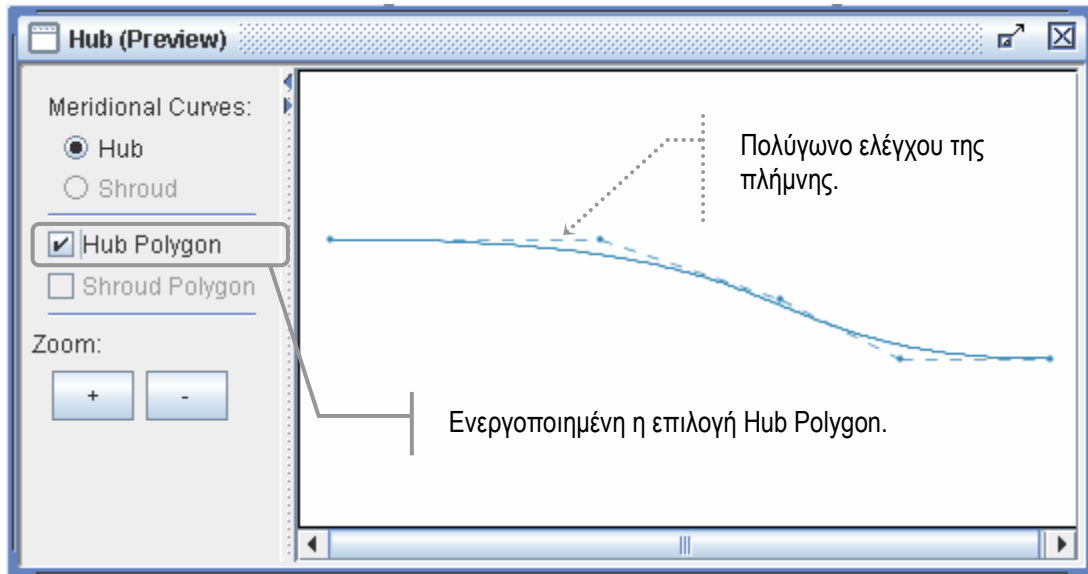
10.

Zoom:

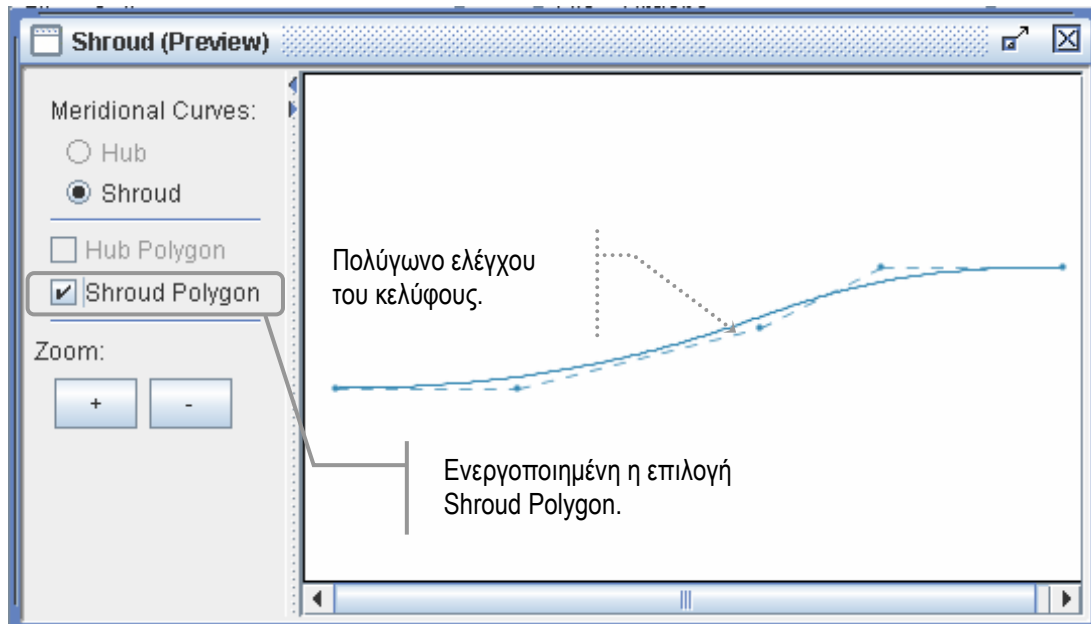
Ζουμ - Zoom:

Μεγέθυνση(+) ή σμίκρυνση (-) των επιλεγμένων διατομών που απεικονίζονται στη περιοχή σχεδίασης.

Μεγέθυνση και σμίκρυνση της σχεδίασης επιτυγχάνεται και με αριστερό ή δεξί κλικ του ποντικιού στην περιοχή.



Εικόνα 3.41. Προεπισκόπηση της πλήμνης και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.



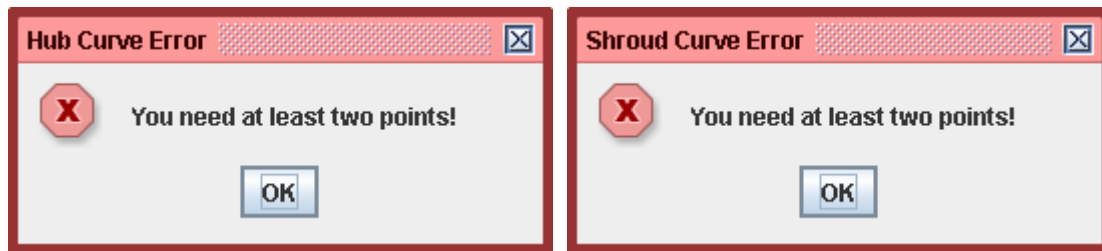
Εικόνα 3.42. Προεπισκόπηση του κελύφους και του αντίστοιχου πολύγωνου ελέγχου.

3.3.3. Σφάλματα Σχεδίασης

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως και στην περίπτωση των πτερυγίων, η σχεδίαση των μεσημβρινών καμπυλών δεν είναι δυνατή. Τα σφάλματα σχεδίασης που μπορεί να παρουσιαστούν είναι τα εξής:

Σφάλμα Καμπύλης Πλήμνης/ Κελύφους (Hub/Shroud Curve Error):

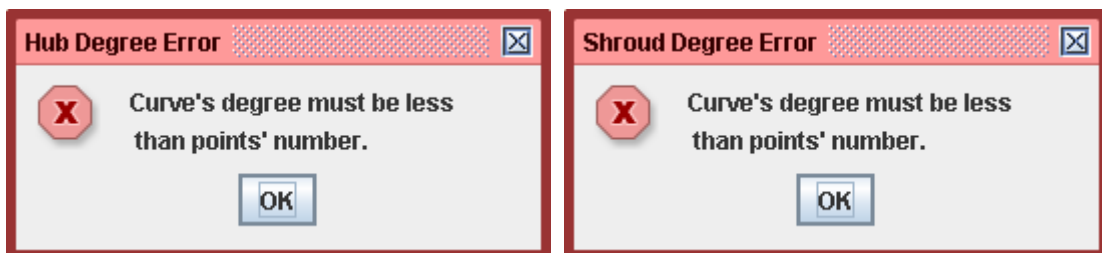
Για να σχεδιαστεί η μεσημβρινή καμπύλη πρέπει να οριστούν τουλάχιστον δύο σημεία, διαφορετικά δεν είναι δυνατή η σχεδίαση της καμπύλης



Εικόνα 3.43. Το παράθυρο σφάλματος καμπύλης πλήμνης/ κελύφους.

Σφάλμα Βαθμού Πλήμνης/ Κελύφους (Hub/Shroud Degree Error):

Για να σχεδιαστεί η μεσημβρινή καμπύλη πρέπει να είναι μικρότερος από τα σημεία που την ορίζουν.



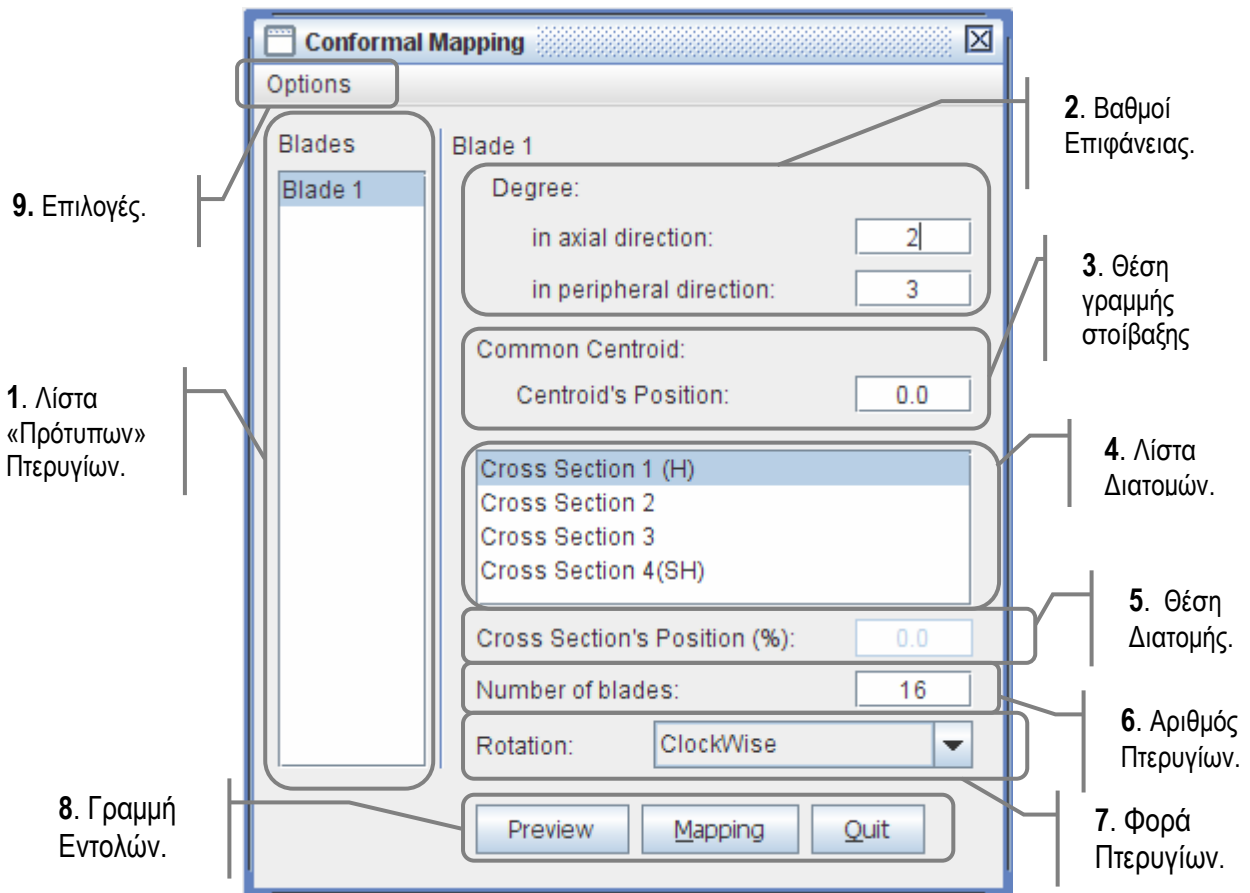
Εικόνα 3.44. Το παράθυρο σφάλματος βαθμού πλήμνης/ κελύφους.

3.4. Προσαρμογή Επιφανειών - Skinning

3.4.1. Παράθυρο ορισμού της σύμμορφης απεικόνισης

Μετά την ολοκλήρωση της διδιάστατης απεικόνισης της πτερωτής (ορισμός «πρότυπων» πτερυγίων και κωνικών επιφανειών), ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις παραμέτρους της σύμμορφης απεικόνισης των πτερυγίων για να πραγματοποιηθεί η προσαρμογή επιφανειών από τις διατομές.

Στην Εικόνα 3.45, παρουσιάζεται η φόρμα παραμέτρων της σύμμορφης απεικόνισης των πτερυγίων.



Εικόνα 3.45. Το παράθυρο ορισμού της σύμμορφης απεικόνισης των πτερυγίων.

1. Λίστα «Πρότυπων» Πτερυγίων:

Στην λίστα των πτερυγίων εμφανίζονται τα πτερύγια που έχουν δημιουργηθεί. Ο χρήστης επιλέγοντας ένα από τα πτερύγια ορίζει τις παραμέτρους της σύμμορφης απεικόνισης του (Εικόνα 3.45, 2-7).

2. Degree:

in axial direction:

in peripheral direction:

Βαθμοί Επιφάνειας:

Εισάγει τους βαθμούς της επιφάνειας του επιλεγμένου πτερυγίου στην διαμήκη (p , in axial direction) και στην περιμετρική διεύθυνση (q , in peripheral direction). Προεπιλεγμένες τιμές: $p=2$ $q=3$.

3. Common Centroid:

Centroid's Position:

Θέση γραμμής στοίβαξης:

Εισάγει τη θέση του σημείου αναφοράς της σύμμορφης απεικόνισης του επιλεγμένου πτερυγίου.

Common Leading Edge:

Edges' Position:

Το σημείο αναφοράς μπορεί να είναι είτε το σημείο προσβολής του πτερυγίου, είτε το κέντρο βάρους του.

4. Cross Section 1 (H)

Cross Section 2

Cross Section 3

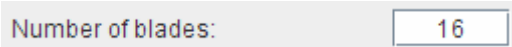
Cross Section 4 (SH)


Λίστα Διατομών:

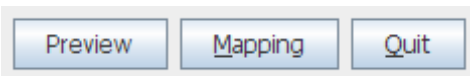
Στη λίστα διατομών εμφανίζονται οι διατομές του επιλεγμένου πτερυγίου.

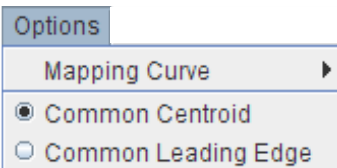
5. Cross Section's Position (%):

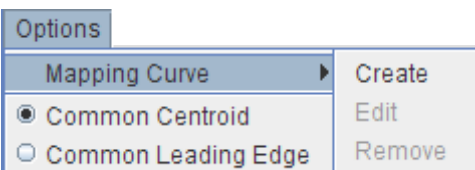
Θέση Διατομής:

6. 

7. 

8. 

9. 

i. 

Εισάγει τη θέση της επιλεγμένης διατομής (του επιλεγμένου πτερυγίου).

Για την πρώτη και τη τελευταία διατομή του πτερυγίου η επιλογή της θέσης της διατομής είναι απενεργοποιημένη (η πρώτη διατομή του πτερυγίου ΠΡΕΠΕΙ να βρίσκεται στην πλήρη της πτερωτής και η τελευταία ΠΡΕΠΕΙ να βρίσκεται στο κέλυφος της πτερωτής).

Αριθμός Πτερυγίων:

Εισάγει τον αριθμό των πτερυγίων. Προεπιλεγμένη τιμή: 16.

Φορά Πτερυγίων:

Επιλέγει τη φορά των πτερυγίων. Η φορά του πτερυγίου μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφη (*Clockwise*) είτε αριστερόστροφη (*CounterClockWise*).

Προεπιλεγμένη τιμή: Δεξιόστροφη.

Στη Γραμμή Εντολών υπάρχουν τρία πλήκτρα, Απεικόνιση (*Mapping*), Προεπισκόπηση (*Preview*) και Κλείσιμο (*Quit*).

Απεικόνιση - Mapping:

Εκτελεί την αλληλουχία εντολών για τη σύμμορφη απεικόνιση των διατομών και την προσαρμογή επιφανειών από της καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί («skinning»).

Προεπισκόπηση - Preview:

Προεπισκόπηση των καμπύλων διατομών των πτερυγίων.

Κλείσιμο - Quit: Κλείσιμο της φόρμας.

Το μενού Επιλογές (*Options*) έχει τις επιλογές Καμπύλη απεικόνισης (*Mapping Curve*) (γραμμή στοίβαξης), και τις επιλογές του σημείου αναφοράς της απεικόνισης Κοινό Κέντρο Βάρους (*Common Centroid*) και Κοινό Σημείο Προσβολής (*Common Leading Edge*), με της οποίες ο χρήστης ορίζει το σημείο αναφοράς του επιλεγμένου πτερυγίου.

Καμπύλη Απεικόνισης (γραμμή στοίβαξης):

Ο χρήστης, για το επιλεγμένο πτερύγιο μπορεί να ορίσει μία καμπύλη στο χώρο ως γραμμή στοίβαξης.

Δημιουργία - Create:

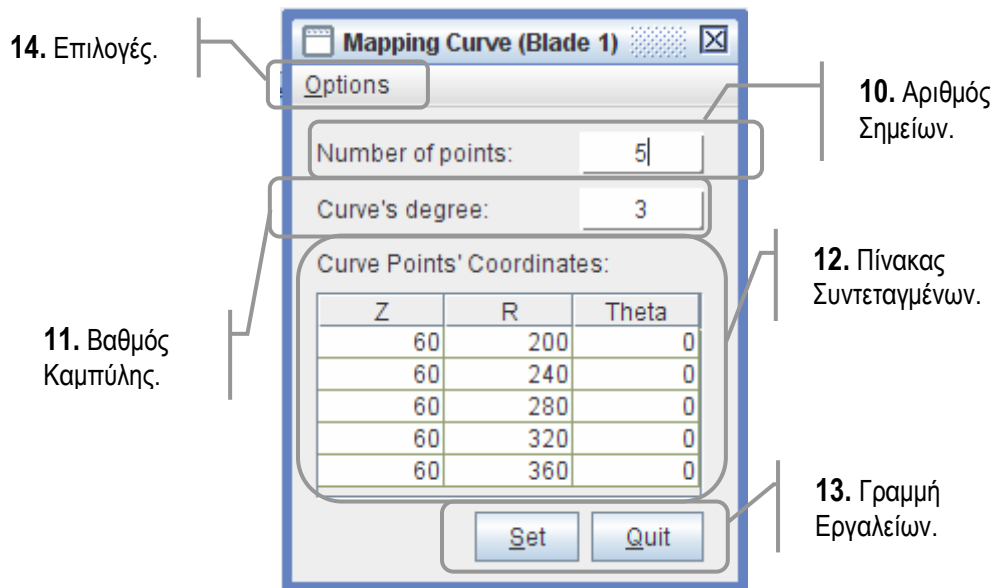
Εμφανίζει τη φόρμα ορισμού της καμπύλης απεικόνισης (Εικόνα 3.46).

Επεξεργασία - Edit:

Ο χρήστης τροποποιεί την υπάρχουσα καμπύλη απεικόνισης του επιλεγμένου πτερυγίου.

Απομάκρυνση - Remove:

Διαγράφει την καμπύλη απεικόνισης του επιλεγμένου πτερυγίου.



Εικόνα 3.46. Παρουσίαση της φόρμας της καμπύλης απεικόνισης για το (επιλεγμένο) πτερύγιο Blade 1.

10. Number of points: 5

Αριθμός Σημείων Καμπύλης:

Εισάγει τον αριθμό των σημείων που ορίζουν την καμπύλη (γραμμή στοίβαξης). Προεπιλεγμένη τιμή: 5.

11. Curve's degree: 3

Βαθμός Καμπύλης:

Εισάγει το βαθμό της καμπύλης. Προεπιλεγμένη τιμή: 3.

12. Curve Points' Coordinates:

Z	R	Theta
60	200	0
60	240	0
60	280	0
60	320	0
60	360	0

Πίνακας Συντεταγμένων:

Εισάγει τις συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης απεικόνισης (γραμμή στοίβαξης).

13. Set Quit

Στη Γραμμή Εντολών υπάρχουν δύο πλήκτρα, Ορισμός (*Set*) και Κλείσιμο (*Quit*).

Ορισμός - Set:

Εκτελεί την αλληλουχία εντολών για τη δημιουργία της καμπύλης απεικόνισης (γραμμή στοίβαξης) του επιλεγμένου πτερυγίου.

Κλείσιμο - Quit:

Κλείσιμο της φόρμας.

14. Options
Default Settings
Design Step ▶

Το μενού Επιλογές (*Options*) έχει της επιλογές: Προεπιλεγμένες Τιμές (*Defaults Settings*) και Βήμα Σχεδίασης (*Design Step*).

Προεπιλεγμένες Τιμές - Default Settings:

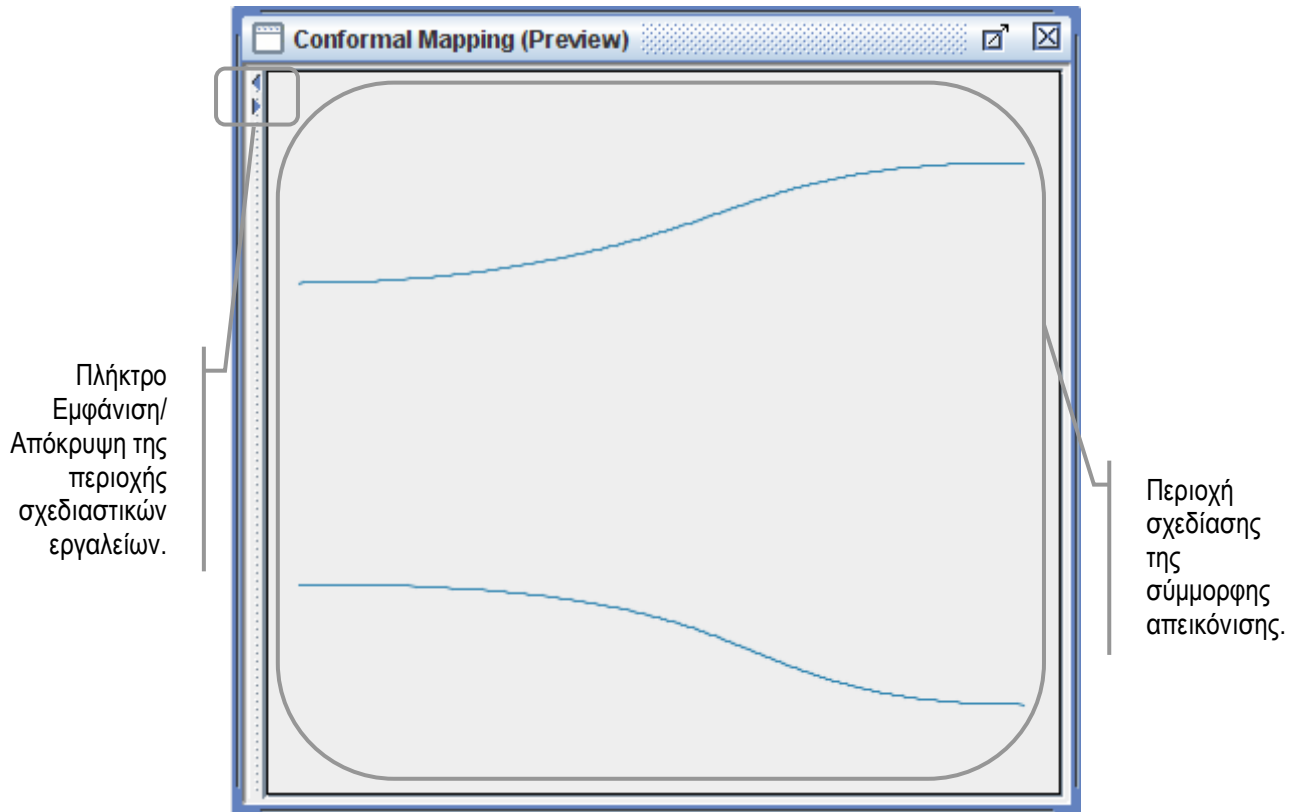
Επαναφέρει τις προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων της μεσημβρινής καμπύλης.

Βήμα Σχεδίασης - Design Step:

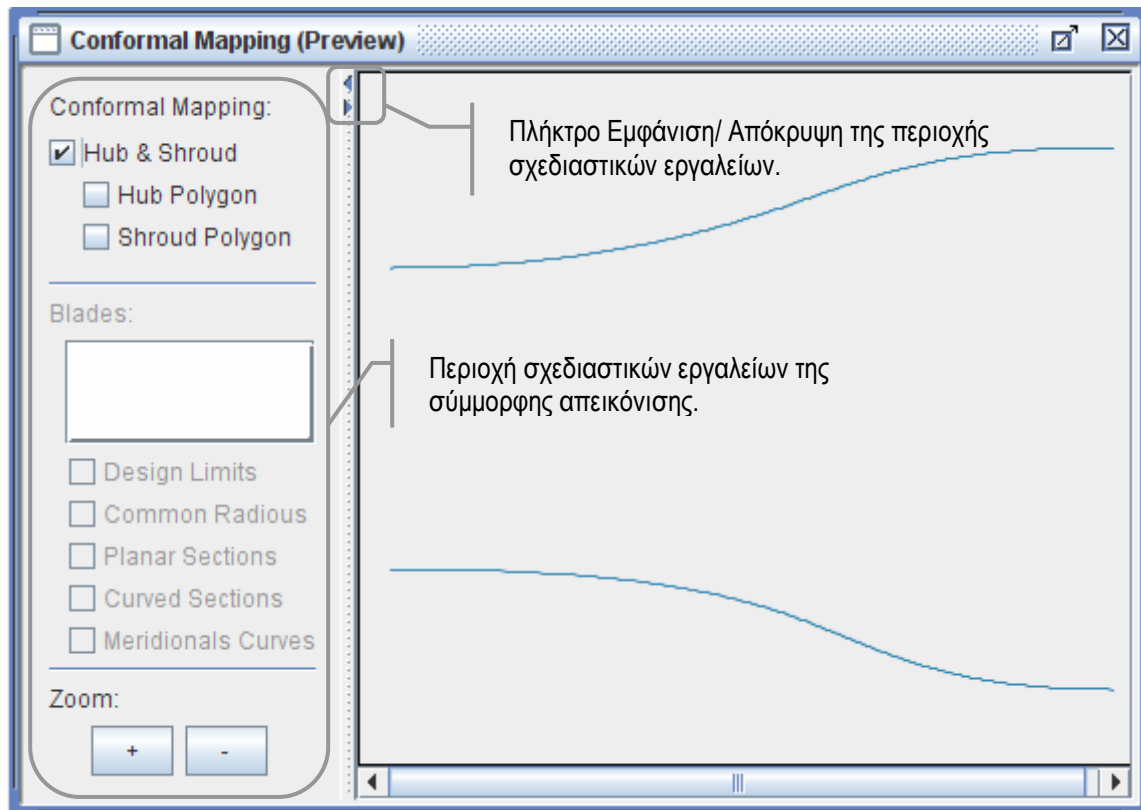
Επιλέγει το βήμα σχεδίασης της μεσημβρινής καμπύλης. Υπάρχουν τέσσερα συγκεκριμένα βήματα σχεδίασης: 0.01, 0.02, 0.05, 0.005. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποιο άλλο με την επιλογή Προσαρμοσμένο Βήμα (*Custom Step*) (Εικόνα 3.44). Προεπιλεγμένη τιμή : 0.01.

3.4.2. Προεπισκόπηση προσαρμογής επιφανειών

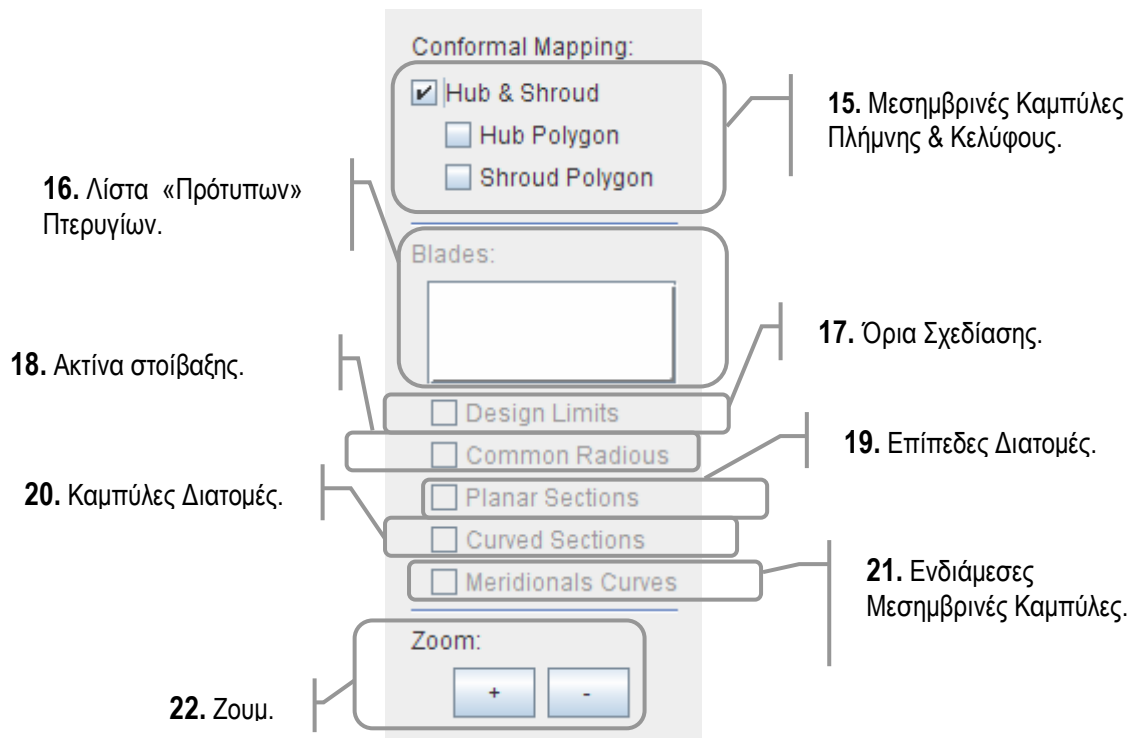
Μέσω της επιλογής *Preview*, στη γραμμή εντολών της φόρμας (Εικόνα 3.45) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα ελέγχου της διαδικασίας της σύμμορφης απεικόνισης. Το παράθυρο προεπισκόπησης του πτερυγίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.47.



Εικόνα 3.47. Το παράθυρο προεπισκόπησης της σύμμορφης απεικόνισης (περιοχή σχεδίασης) πριν τον ορισμό παραμέτρων – απεικονίζονται οι μεσημβρινές καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους.



Εικόνα 3.48. Το παράθυρο προεπισκόπησης της σύμμορφης απεικόνισης (περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων) πριν τον ορισμό παραμέτρων – στην περιοχή σχεδίασης απεικονίζονται οι μεσημβρινές καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους



Εικόνα 3.49. Η περιοχή σχεδιαστικών εργαλείων.

15.

☒ Hub & Shroud
☐ Hub Polygon
☐ Shroud Polygon

Πλήμνη και Κελύφος - Hub & Shroud:

Όταν είναι επιλεγμένο στη περιοχή σχεδίασης απεικονίζεται οι μεσημβρινές καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους.

Πολύγωνο Πλήμνης - Hub Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου της μεσημβρινής καμπύλης του κελύφους στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.50).

Πολύγωνο Κελύφους - Shroud Polygon:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα σημεία ελέγχου της μεσημβρινής καμπύλης της πλήμνης στην περιοχή σχεδίασης (Εικόνα 3.50).

16.

Blades:

Blades:

Blade 1

Λίστα «Πρότυπων» Πτερυγίων:

Στη λίστα εμφανίζονται τα πτερύγια για τα οποία έχουν οριστεί οι παράμετροι της σύμμορφης απεικόνισης.

Όταν επιλεγθεί ένα πτερύγιο, ενεργοποιούνται οι επιλογές σχεδίασης: Όρια Σχεδίασης, Ακτίνα Απεικόνισης, Επίπεδες Διατομές, Ενδιάμεσες Μεσημβρινές Καμπύλες. Ανενεργή παραμένει η επιλογή Καμπύλες Διατομές, που ενεργοποιείται όταν πραγματοποιηθεί η σύμμορφη απεικόνιση των πτερυγίων (Εικόνα 3.51).

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα πολλαπλής επιλογής πτερυγίων.

17.

☐ Design Limits

Όρια Σχεδίασης - Design Limits:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τα όρια σχεδίασης του επιλεγμένου πτερυγίου (Εικόνα 3.51).

18.

☐ Common Radius

Ακτίνα στοίβαξης - Common Radius:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει την ακτίνα στοίβαξης του επιλεγμένου πτερυγίου (Εικόνες 3.51 και 3.52).

19.

☒ Planar Sections

Επίπεδες Διατομές - Planar Sections:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τις επίπεδες διατομές του επιλεγμένου πτερυγίου (Εικόνα 3.51).

20.

☒ Curved Sections

Καμπύλες Διατομές - Curved Sections:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τις καμπύλες διατομές του επιλεγμένου πτερυγίου (Εικόνα 3.52).

21.

☐ Meridionals Curves

Μεσημβρινές Καμπύλες - Meridionals Curves:

Όταν είναι επιλεγμένο απεικονίζει τις ενδιάμεσες «βοηθητικές» καμπύλες του επιλεγμένου πτερυγίου (Εικόνα 3.52 και 3.53).

22.

Zoom:

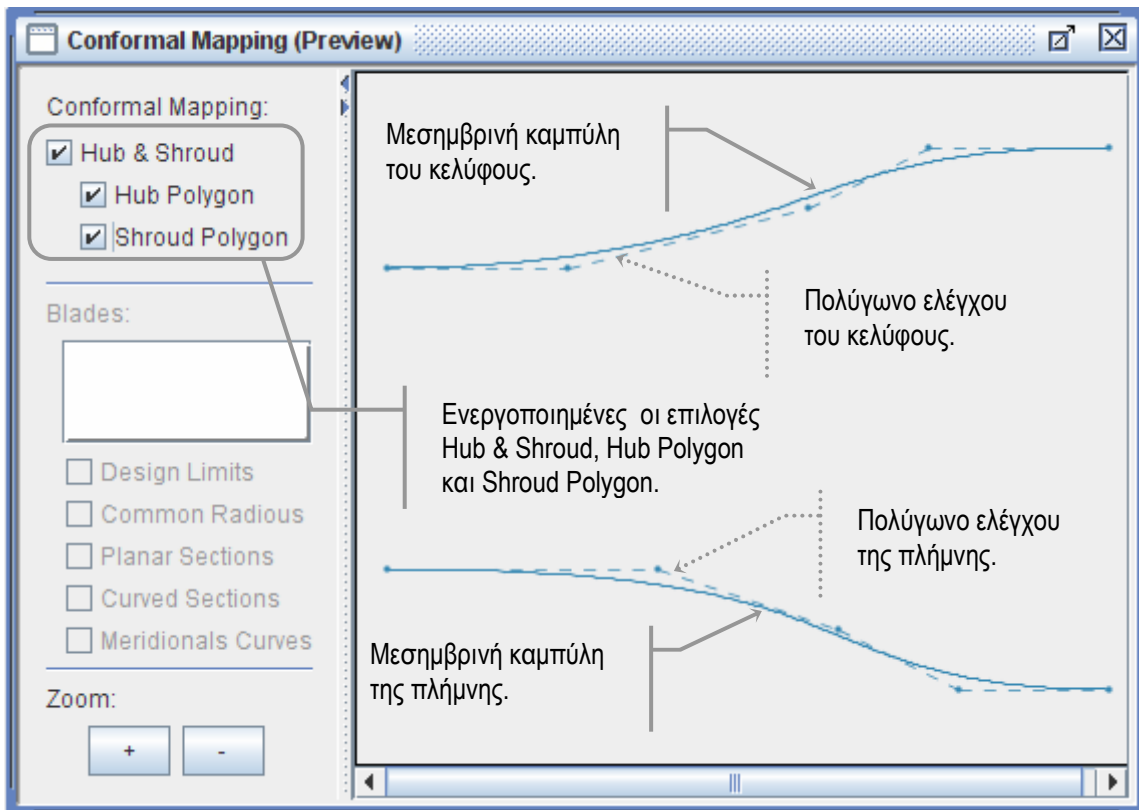
+

-

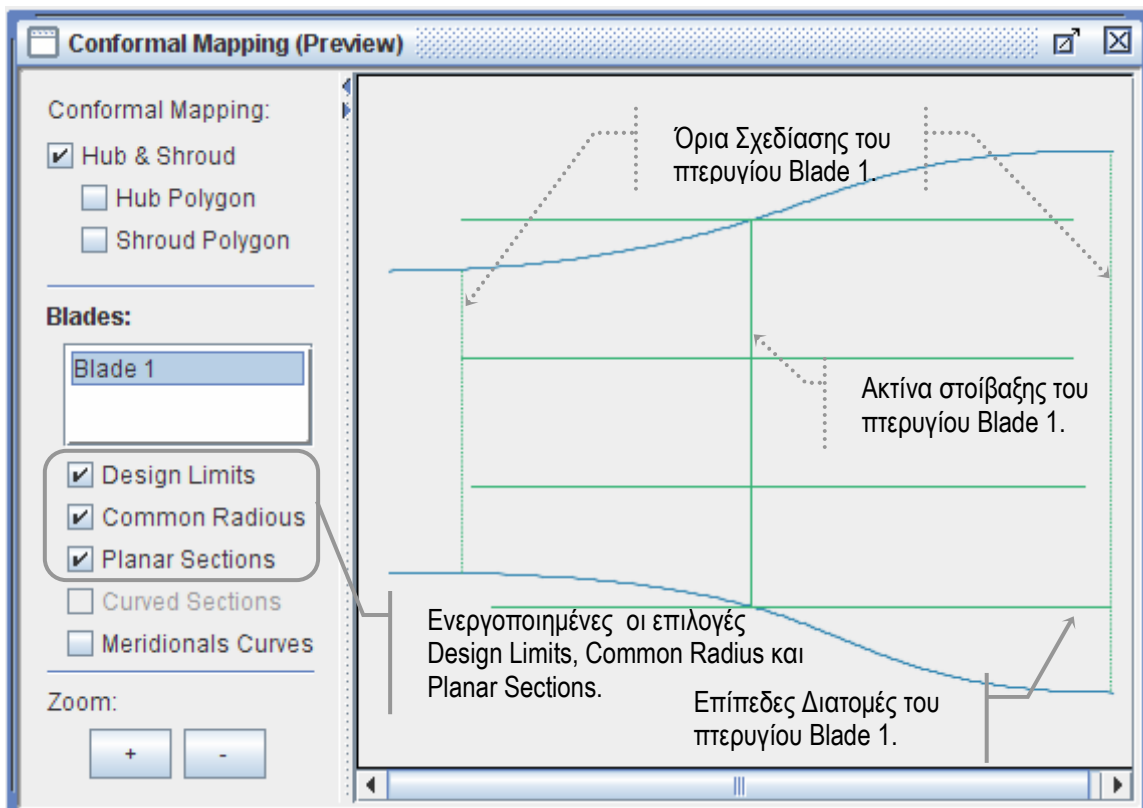
Ζουμ - Zoom:

Μεγέθυνση(+) ή σμίκρυνση (-) των επιλεγμένων πτερυγίων που απεικονίζονται στην περιοχή σχεδίασης.

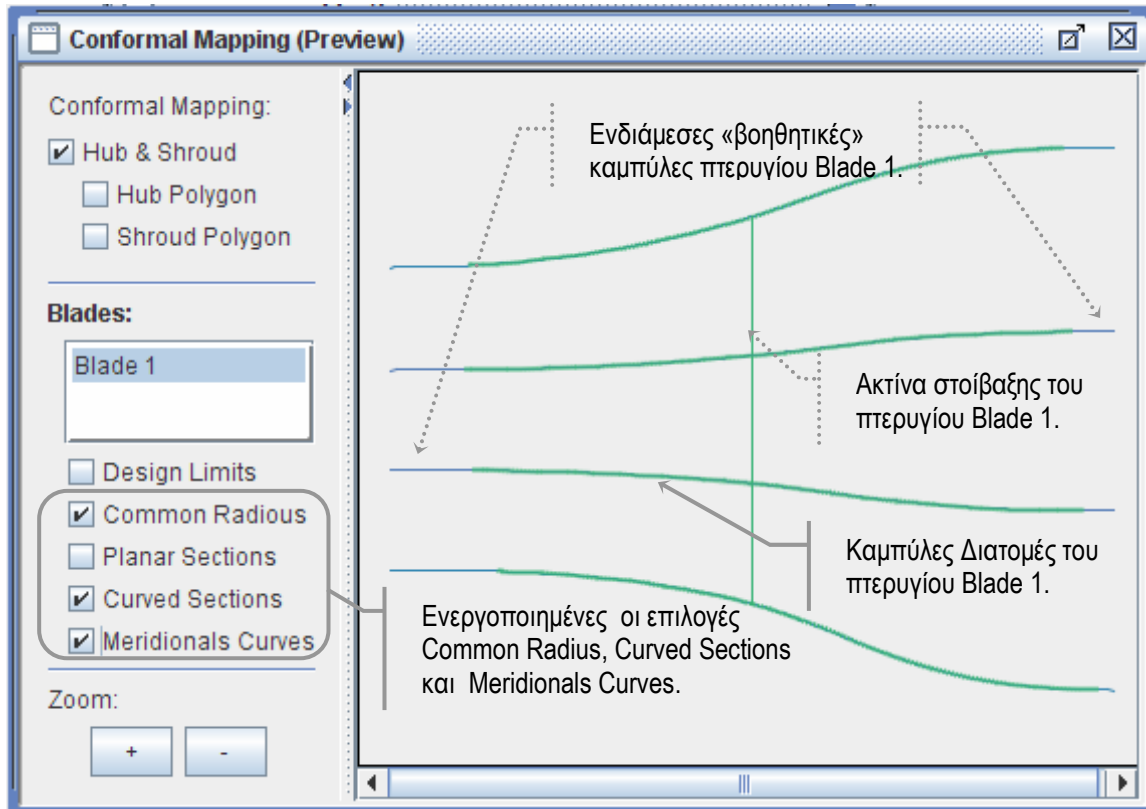
Μεγέθυνση και σμίκρυνση της σχεδίασης επιτυγχάνεται και με αριστερό ή δεξί κλικ του ποντικιού στην περιοχή.



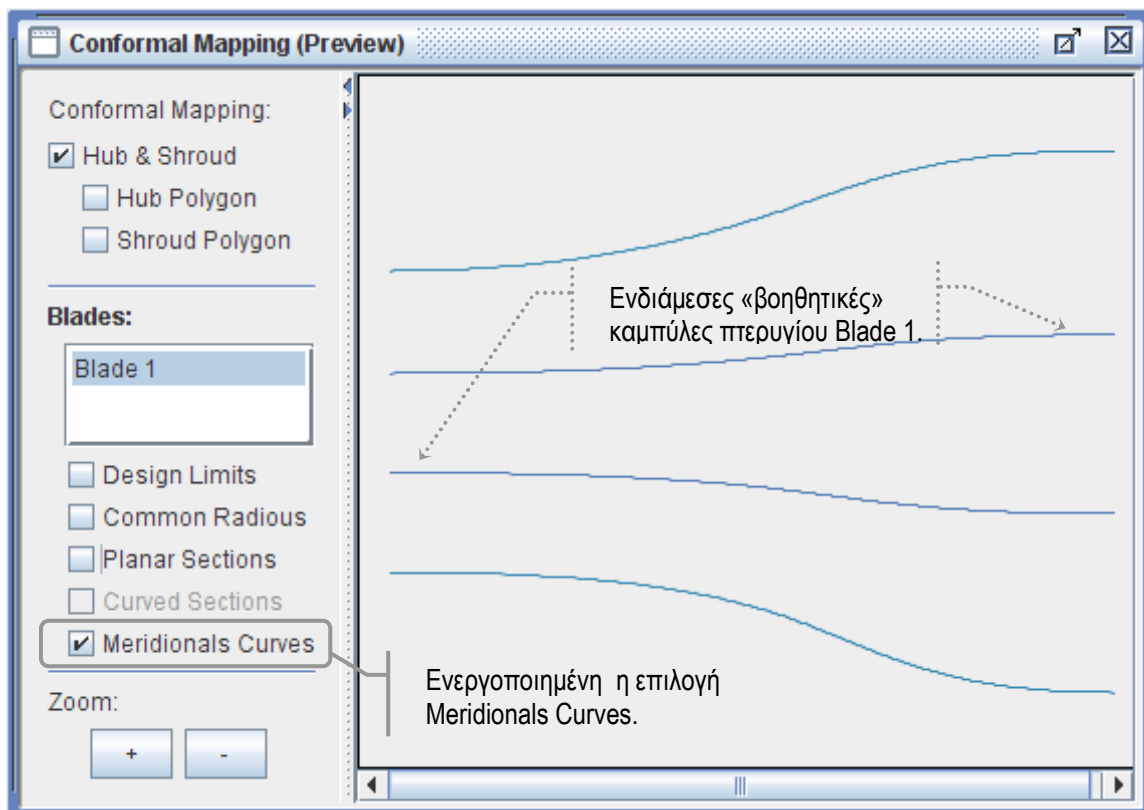
Εικόνα 3.50. Προεπισκόπηση των μεσημβρινών καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους καθώς και των αντίστοιχων πολυγώνων ελέγχου.



Εικόνα 3.51. Προεπισκόπηση των επίπεδων καμπυλών του πτερυγίου Blade 1 καθώς και των αντίστοιχων ορίων σχεδίασης και της ακτίνας στοίβαξης του.



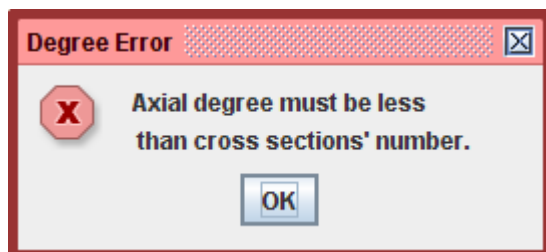
Εικόνα 3.52. Προεπισκόπηση των καμπυλών του πτερυγίου Blade 1 (μετά τη σύμμορφη απεικόνιση του) καθώς και των αντιστοιχων ενδιάμεσων μεσημβρινών καμπυλών και της ακτίνας στοίβαξής του.



Εικόνα 3.53. Προεπισκόπηση όλων των μεσημβρινών καμπυλών του πτερυγίου Blade 1, βάσει των οποίων γίνεται η σύμμορφη απεικόνιση του πτερυγίου.

3.4.3. Σφάλματα Σχεδίασης

Σε ορισμένες περιπτώσεις η σύμμορφη απεικόνιση των πτερυγίων δεν είναι εφικτή. Τα σφάλματα σχεδίασης που μπορεί να παρουσιαστούν είναι τα εξής:



Εικόνα 3.54. Το παράθυρο σφάλματος βαθμού.

Σφάλμα Βαθμού (Degree Error):

Για να γίνει η προσαρμογή επιφάνειας πάνω στις διατομές του πτερυγίου ΠΡΕΠΕΙ ο αριθμός των διατομών του πτερυγίου να είναι μεγαλύτερος από τον αξονικό βαθμό της επιφάνειας (Εικόνα 3.54).



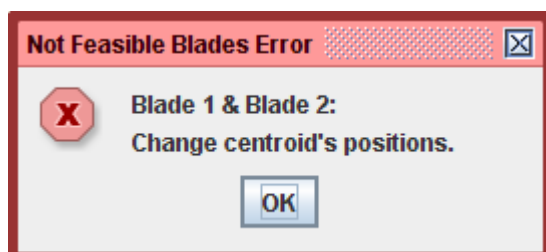
Εικόνα 3.55. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών πτερυγίων.

Σφάλμα μη εφικτών πτερυγίων (Not Feasible Blade Error):

Για να πραγματοποιηθεί η σύμμορφη απεικόνιση και κατ' επέκταση και η προσαρμογή επιφάνειας πάνω στις διατομές του πτερυγίου ΠΡΕΠΕΙ τα όρια σχεδίασης του πτερυγίου να βρίσκονται εντός των ορίων που ορίζουν οι καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους (Εικόνες 3.55, 3.56 και 3.58)



Εικόνα 3.56. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών πτερυγίων.

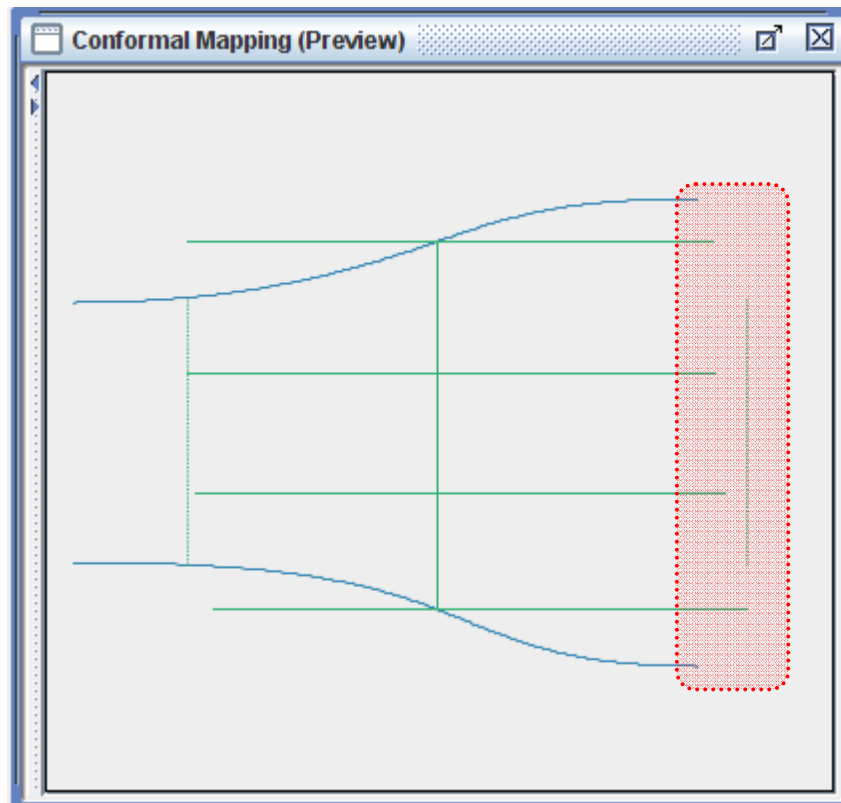


Εικόνα 3.57. Το παράθυρο σφάλματος μη εφικτών διαδοχικών πτερυγίων.

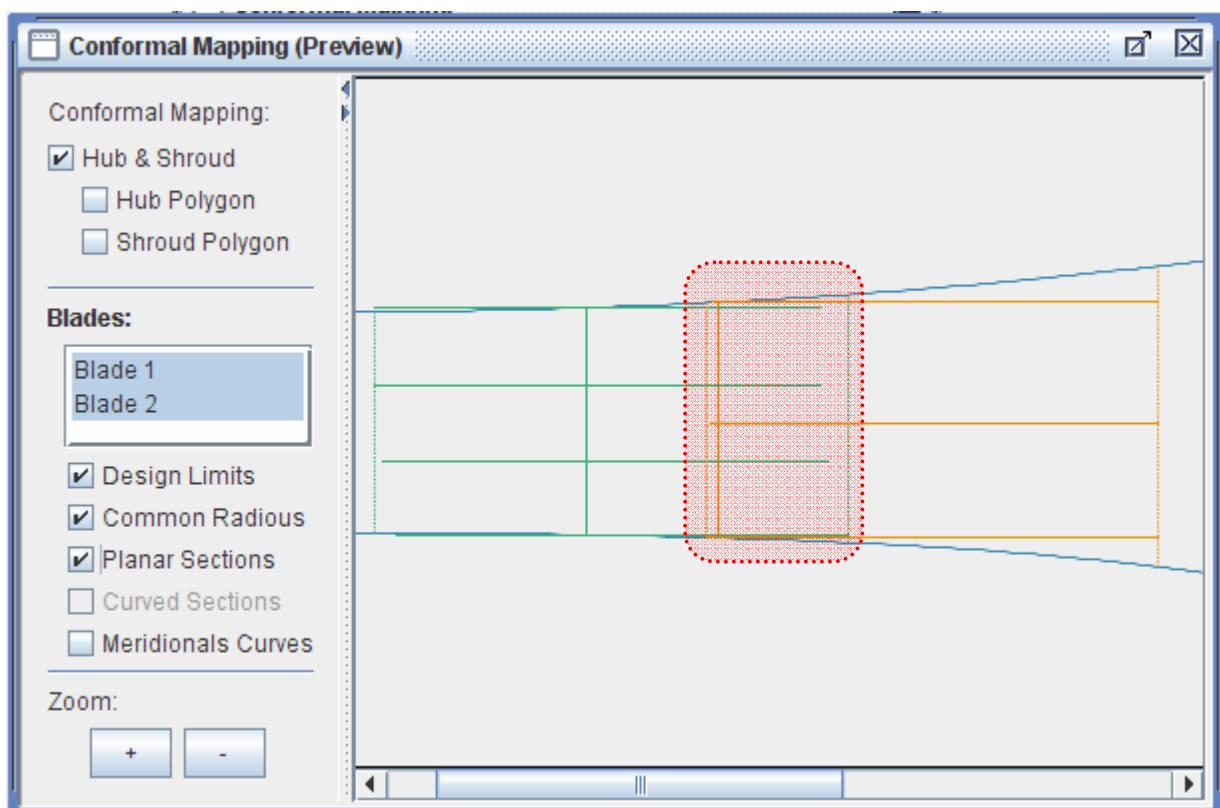
Σφάλμα μη εφικτών πτερυγίων (Not Feasible Blade Error):

Στις πολυβάθμιες πτερυγώσεις, για να θεωρηθεί η γεωμετρία εφικτή εκτός από τον παραπάνω έλεγχο πραγματοποιείται ένας επιπλέον έλεγχος αναφορικά με την επικάλυψη γειτονικών «πρότυπων» πτερυγίων.

Η συνολική γεωμετρία θεωρείται εφικτή εφόσον δεν παρατηρηθεί καμία επικάλυψη (Εικόνες 3.57 και 3.59).



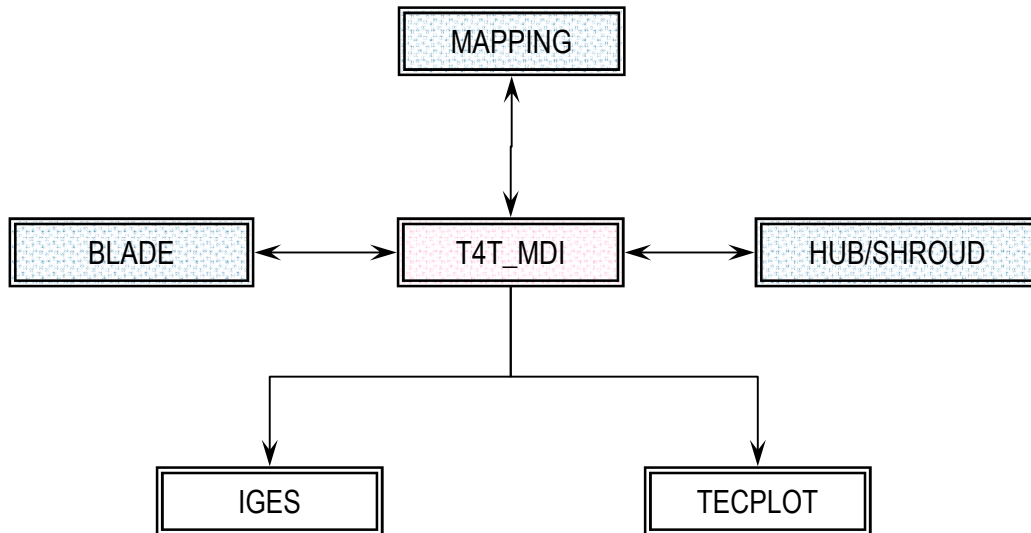
Εικόνα 3.58. Μη εφικτή σχεδίαση περυγίου. Η περιοχή σχεδίασης του περυγίου υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια σχεδίασης του.



Εικόνα 3.59. Μη εφικτή σχεδίαση περυγίων. Οι περιοχές σχεδίασης των περυγίων Blade 1 και Blade 2 επικαλύπτονται.

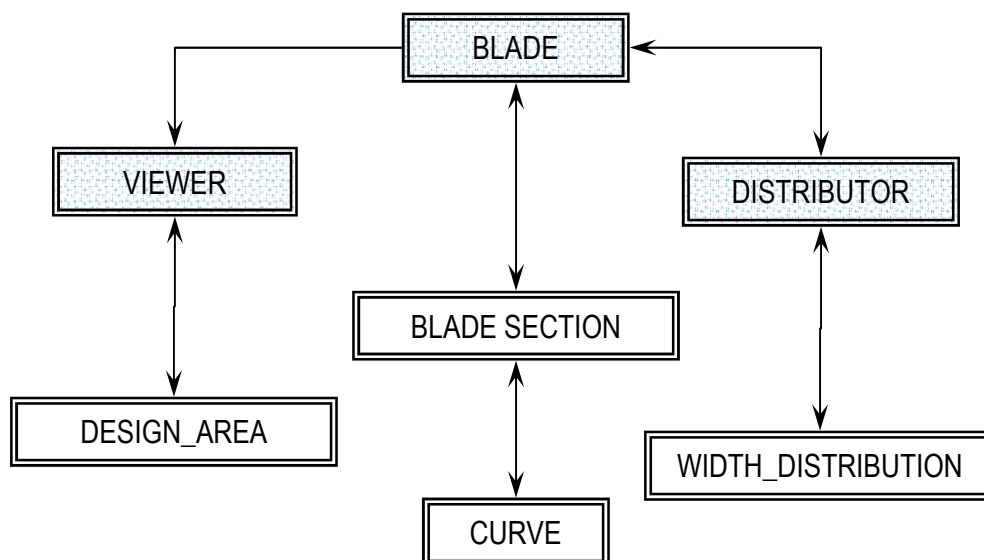
3.5. Η δομή του πηγαίου κώδικα

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, υλοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η αλλαγή αυτή κρίθηκε αναγκαία κατά κύριο λόγο γιατί η Java προσφέρει αντικειμενοστραφή λογική. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται σχηματικά η δομή του κώδικα, οι κλάσεις από τις οποίες αποτελείται και ο τρόπος με τον οποίο αυτές συνδέονται μεταξύ τους.

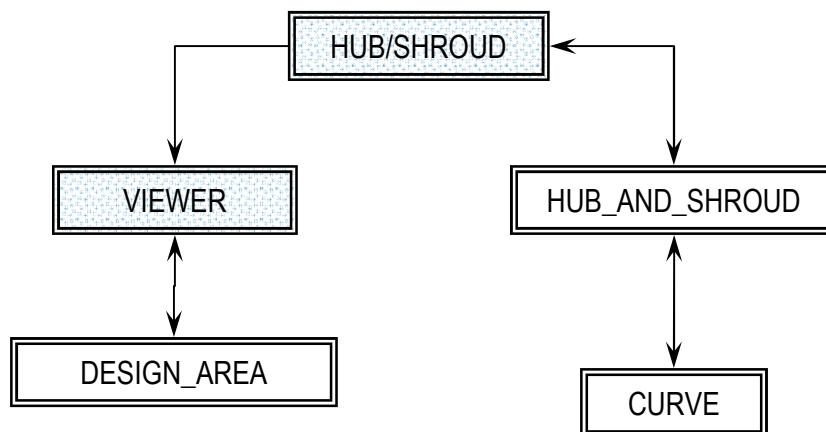


Εικόνα 3.60. Η κεντρική κλάση του T4T.jar, T4T_MDI και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.

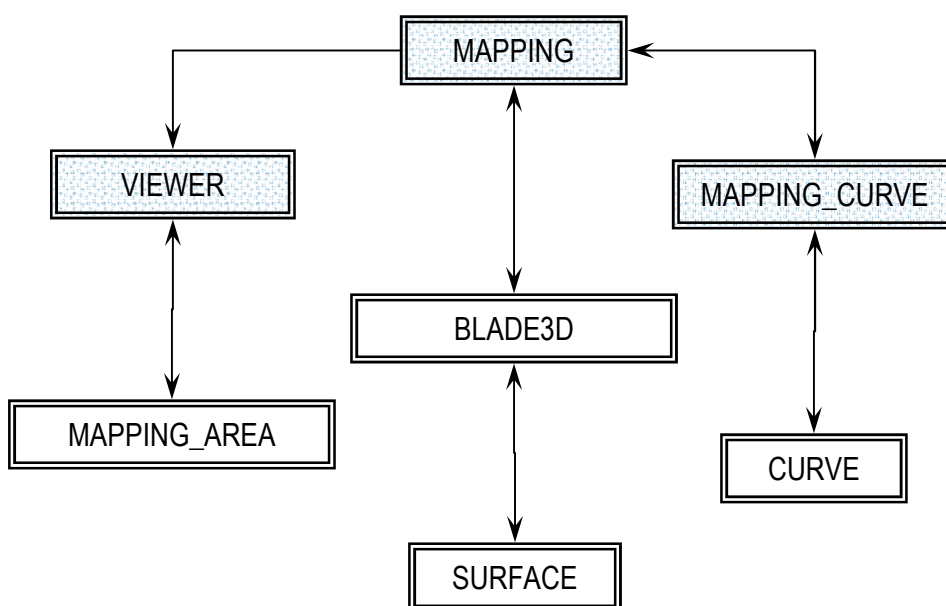
Στην Εικόνα 3.60 απεικονίζεται η T4T_MDI, που αποτελεί την κεντρική κλάση του προγράμματος. Η T4T_MDI, είναι στη ουσία, η κλάση ορισμού του κεντρικού παραθύρου του T4T, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.1. Η T4T_MDI συνδέεται με τις κλάσεις BLADE, HUB, SHROUD και MAPPING, που με τις σειρά τους αποτελούν τις κλάσεις ορισμού των παραθύρων του πτερυγίου, της πλήμνης, του κελύφους και της σύμμορφης απεικόνισης αντίστοιχα. Τέλος η T4T_MDI συνδέεται με τις κλάσεις IGES και TECPLOT, τις κλάσεις που δημιουργούν τα αρχεία εξόδου IGES και TECPLOT αντίστοιχα.



Εικόνα 3.61. Η κλάση BLADE και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.



Εικόνα 3.62. Οι κλάσεις HUB και SHROUD και οι συνδεόμενες με αυτές κλάσεις.



Εικόνα 3.63. Η κλάση MAPPING και οι συνδεόμενες με αυτή κλάσεις.

Η κλάση BLADE (Εικόνα 3.61), η κλάση ορισμού του παράθυρου του περυγίου (Παράγραφος 3.2), συνδέεται με τη κλάση BLADE_SECTION, που ορίζει το μαθηματικό μοντέλο του διδιάστατου περυγίου, τις κλάσεις DISTRIBUTOR και WIDTH_DISTRIBUTION που ορίζουν την κατανομή πάχους που εφαρμόζεται στο περύγιο και τις κλάσεις VIEWER και DESIGN_AREA. Οι κλάσεις VIEWER, DESIGN_AREA καθώς και η MAPPING_AREA αποτελούν τις κλάσεις διδιάστατης απεικόνισης του T4T και συνδέονται τόσο με τη κλάση BLADE όσο και με τις κλάσεις HUB, SHROUD και MAPPING (Εικόνα 3.62-3.63). Η κλάση HUB_AND_SHROUD αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο των κωνικών επιφανειών της πλήμνης και του κελύφους, ενώ η κλάση BLADE3D το μαθηματικό μοντέλο ορισμού του τριδιάστατου περυγίου.

4

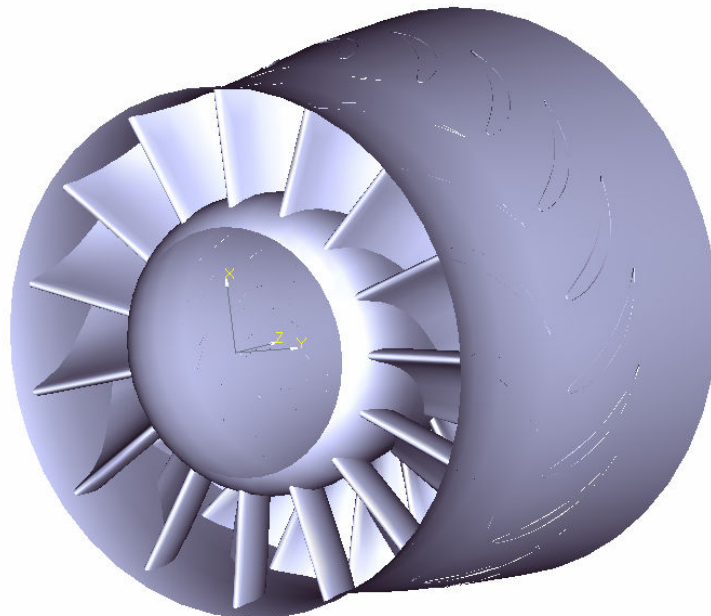
Εφαρμογές

4.1. Εισαγωγή

Το T4T μπορεί να μη διαθέτει όλες τις δυνατότητες των εμπορικών πακέτων, που παρουσιάστηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο, αλλά ικανοποιεί τις περισσότερες από τις βασικές απαιτήσεις ενός χρήστη για το σχεδιασμό πτερυγώσεων στροβιλομηχανών. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται παραδείγματα πτερυγώσεων, που παρήχθησαν με τη βοήθεια του λογισμικού T4T.

4.2. Στρόβιλοι

Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται ένας πολυβάθμιος στρόβιλος, του οποίου η γεωμετρία ορίστηκε με τη χρήση του T4T.



Εικόνα 4.1. Γεωμετρία πολυβάθμιου στρόβιλου που δημιουργήθηκε με τη χρήση του T4T.

Ο στρόβιλος απαρτίζεται συνολικά από τριάντα πέντε NURBS επιφάνειες. Δύο επιφάνειες εκ περιστροφής (πλήμνη και κέλυφος) και τριάντα τρία πτερύγια. Τα πτερύγια είναι τοποθετημένα σε δύο διαδοχικές πτερυγώσεις (στατορας – ρότορας) και προέκυψαν με τη διαδικασία της αντιγραφής και μεταφοράς των «πρότυπων» πτερυγίων (διαδικασία pattern),

όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εν συνεχεία, ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της εν λόγω γεωμετρίας.

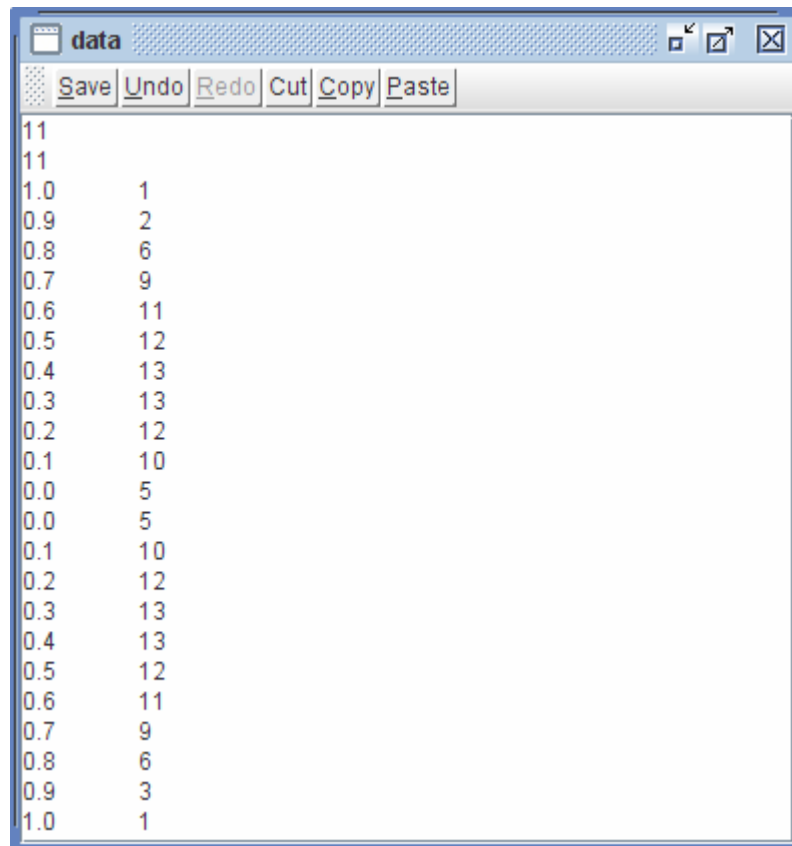
■ Ορισμός Πτερυγίων

Το πρώτο («πρότυπο») περύγιο του στροβίλου (στάτορας) αποτελείται από 4 διατομές τρίτου βαθμού με κοινό αξονικό μήκος (200) και κοινή εφαρμοζόμενη κατανομή πάχους (data.wdb). Η διαφορά τους έγκειται στις διαφορετικές γωνίες εισόδου και εξόδου (B_{1m} και B_{2m}) καθώς και στη διαφορετική γωνία κλίσης (γ) (Εικόνα 4.2).

1 ^η διατομή	2 ^η διατομή	3 ^η διατομή	4 ^η διατομή
Lref: 200.0	Lref: 200.0	Lref: 200.0	Lref: 200.0
γ: -30.0	γ: -32.5	γ: -34.0	γ: -35.0
B1m: 0.0	B1m: 0.0	B1m: 0.0	B1m: 0.0
B2m: -50.0	B2m: -56.0	B2m: -60.0	B2m: -60.0

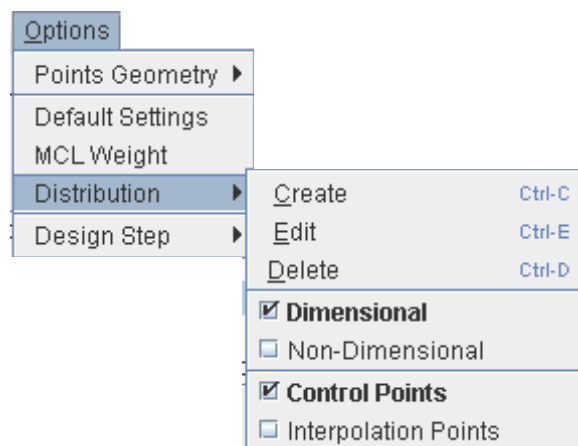
Εικόνα 4.2. Οι παράμετροι σχεδίασης του πρώτου περυγίου του στροβίλου.

Όσον αφορά την κατανομή πάχους data.wdb (Εικόνα 4.3) που εφαρμόζεται, αυτή είναι δισδιάστατη (Dimensional) και τα σημεία που προκύπτουν αποτελούν σημεία ελέγχου των διατομών (Εικόνα 4.4).



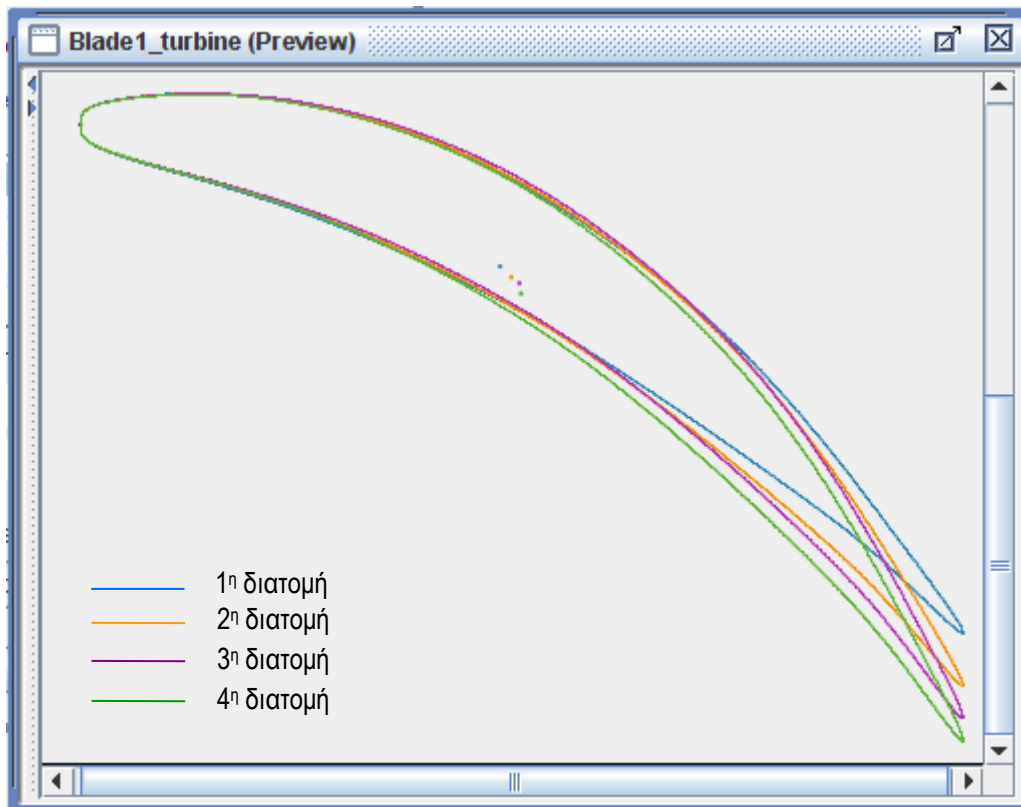
Value	Count
1.0	1
0.9	2
0.8	6
0.7	9
0.6	11
0.5	12
0.4	13
0.3	13
0.2	12
0.1	10
0.0	5
0.0	5
0.1	10
0.2	12
0.3	13
0.4	13
0.5	12
0.6	11
0.7	9
0.8	6
0.9	3
1.0	1

Εικόνα 4.3. Η διαστατή κατανομή πάχους που εφαρμόζεται στο περύγιο.



Εικόνα 4.4. Οι παράμετροι ορισμού της κατανομής πάχους.

Αφού οριστούν όλες οι παραπάνω παράμετροι και πατώντας την επιλογή Set στο παράθυρο ορισμού του περυγίου, η γεωμετρία του διδιάστατου περυγίου αποθηκεύεται στο σύστημα. Στην Εικόνα 4.5 απεικονίζονται οι τέσσερις διατομές του περυγίου, έχοντας ως σημείο αναφοράς το σημείο προσβολής τους.



Εικόνα 4.5. Οι επίπεδες διατομές του πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το σημείο προσβολής τους.

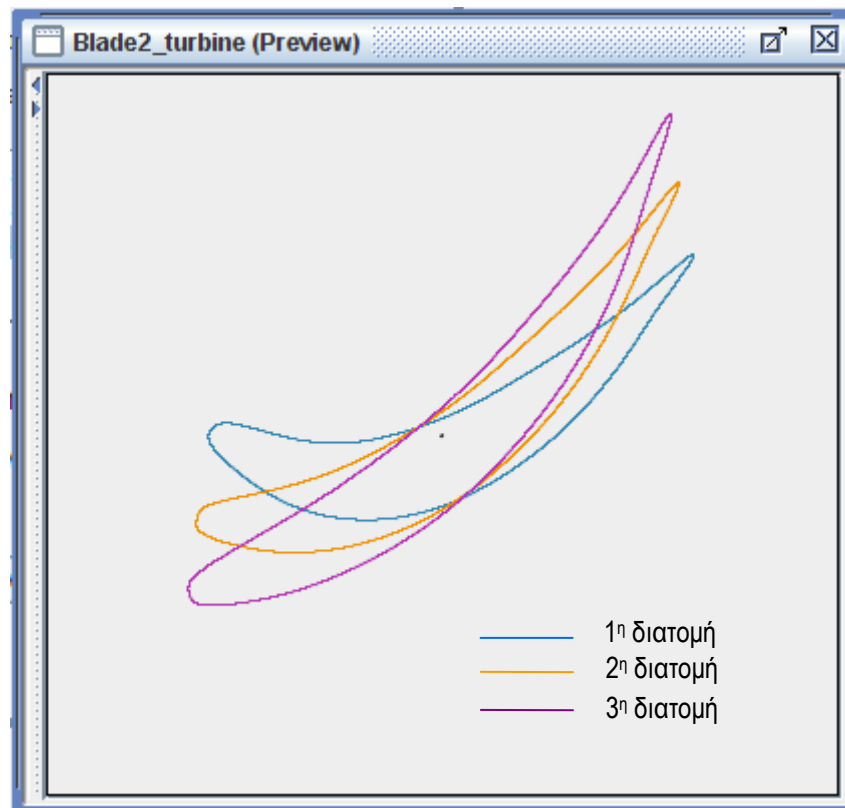
Σε αντίθεση με το πρώτο πτερύγιο, το δεύτερο «πρότυπο» πτερύγιο (ρότορας) αποτελείται από τρεις διατομές τρίτου βαθμού. Εφαρμόζεται και στις τρεις διατομές η ίδια διαστατή κατανομή (data.wdb – Εικόνα 4.3). Οι παράμετροι των διατομών του πτερυγίου φαίνονται στην Εικόνα 4.6.

1η διατομή	Lref: 150.0	B1m: -40.0
	γ: 20.0	B2m: 50.0

2η διατομή	Lref: 150.0	B1m: -10.0
	γ: 35.0	B2m: 60.0

3η διατομή	Lref: 150.0	B1m: 15.0
	γ: 45.0	B2m: 70.0

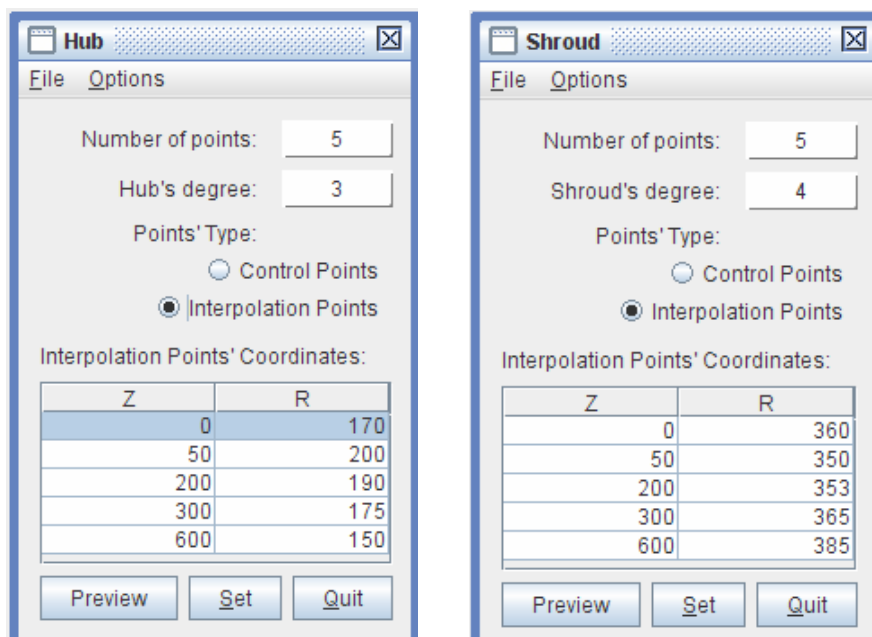
Εικόνα 4.6. Οι παράμετροι σχεδίασης του δεύτερου πτερυγίου του στροβίλου (ρότορας).



Εικόνα 4.7. Οι διατομές του πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.

- Ορισμός Πλήμνης και Κελύφους

Οι επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους προκύπτουν με περιστροφή των αντίστοιχων καμπυλών ορισμού. Οι καμπύλες αυτές ορίζονται ως τετάρτου βαθμού καμπύλες, που διέρχονται από πέντε σημεία η καθεμία. Οι συντεταγμένες των σημείων των καμπυλών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.8.



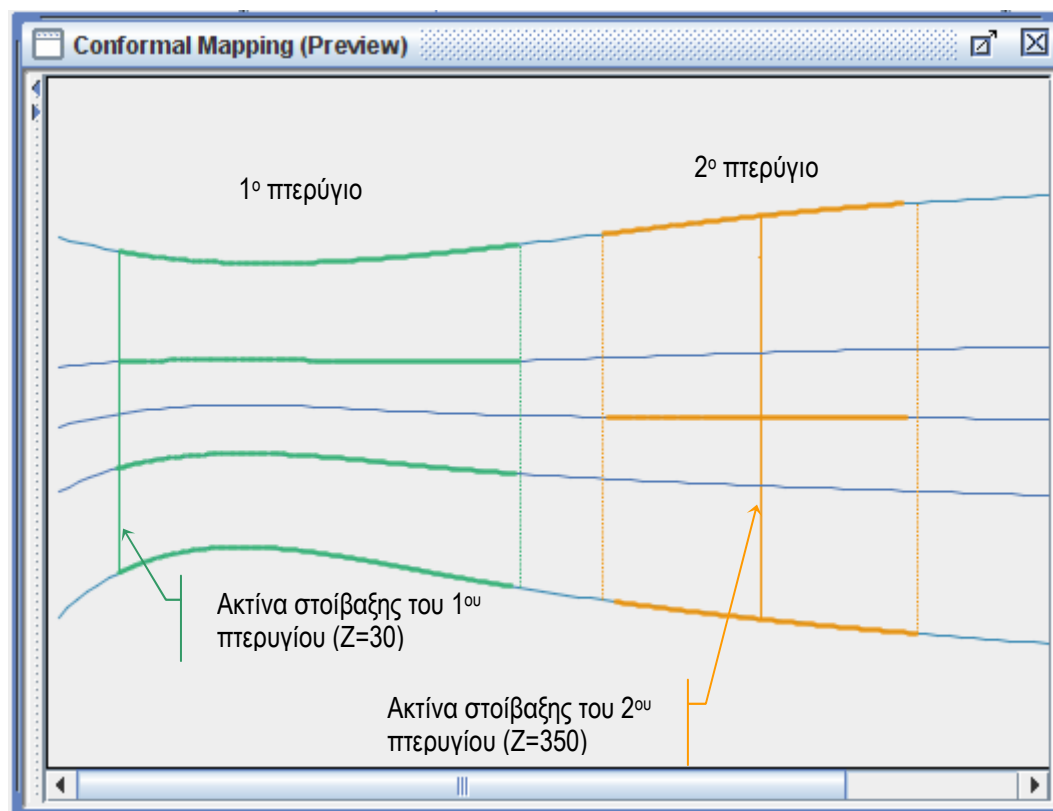
Εικόνα 4.8. Ορισμός των καμπυλών πλήμνης και κελύφους.

- Σύμμορφη Απεικόνιση Πτερυγίων

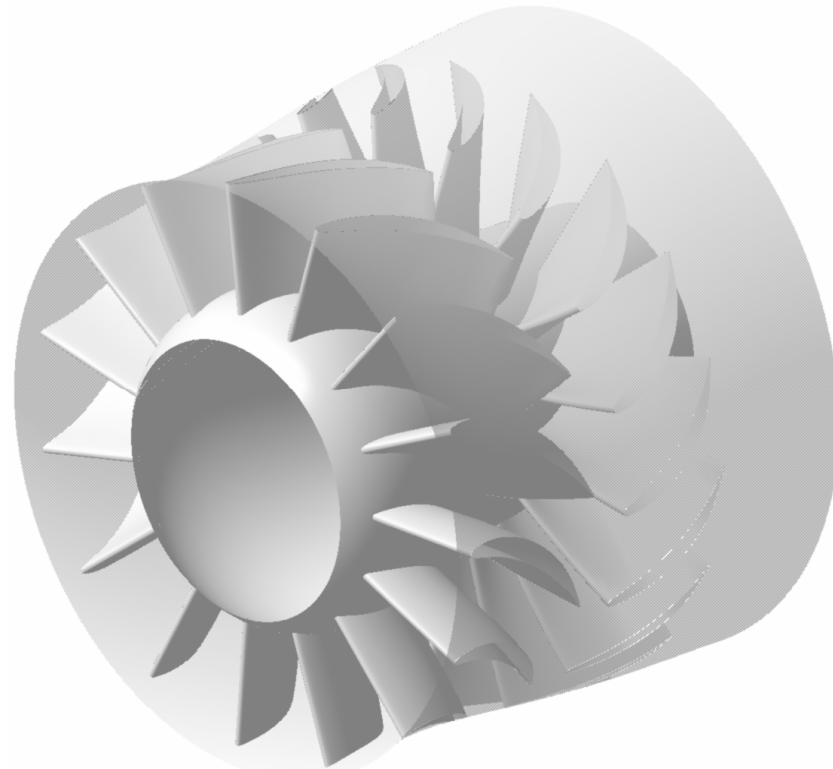
Για την ολοκλήρωση της τριδιάστατης γεωμετρίας πρέπει να πραγματοποιηθεί η σύμμορφη απεικόνιση των διατομών των πτερυγίων στις αντίστοιχες κωνικές επιφάνειες. Η ακτίνα στοίβαξης του πρώτου πτερυγίου τοποθετείται στη θέση $Z=30$ με σημείο αναφοράς τα σημεία προσβολής των διατομών, ενώ η ακτίνα στοίβαξης του δεύτερου πτερυγίου τοποθετείται στη θέση $Z=350$ με σημείο αναφοράς τα κέντρα βάρους των διατομών (Εικόνα 4.9).

Blade 1	Blade 2
Degree:	Degree:
in axial direction: <input type="text" value="2"/>	in axial direction: <input type="text" value="2"/>
in peripheral direction: <input type="text" value="3"/>	in peripheral direction: <input type="text" value="3"/>
Common Leading Edge:	Common Centroid:
Edges' Position: <input type="text" value="30.0"/>	Centroid's Position: <input type="text" value="350.0"/>
<div>Cross Section 1 (H)</div> <div>Cross Section 2</div> <div>Cross Section 3</div> <div>Cross Section 4(SH)</div>	<div>Cross Section 1 (H)</div> <div>Cross Section 2</div> <div>Cross Section 3(SH)</div>
Cross Section's Position (%): <input type="text" value="0.0"/>	Cross Section's Position (%): <input type="text" value="0.0"/>
Number of blades: <input type="text" value="15"/>	Number of blades: <input type="text" value="18"/>
Rotation: <input type="text" value="ClockWise"/>	Rotation: <input type="text" value="ClockWise"/>

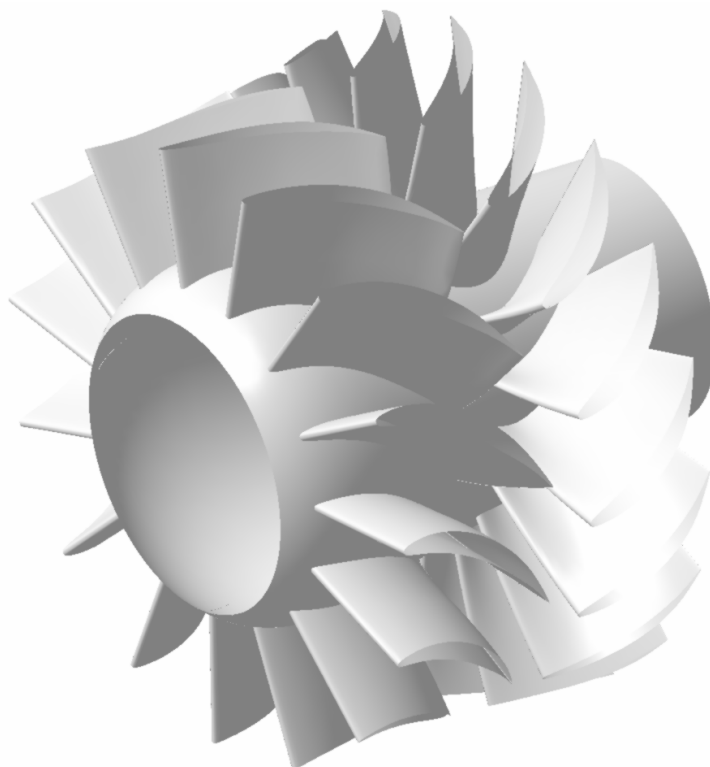
Εικόνα 4.9. Τα δεδομένα της σύμμορφης απεικόνισης των δύο πτερυγίων.



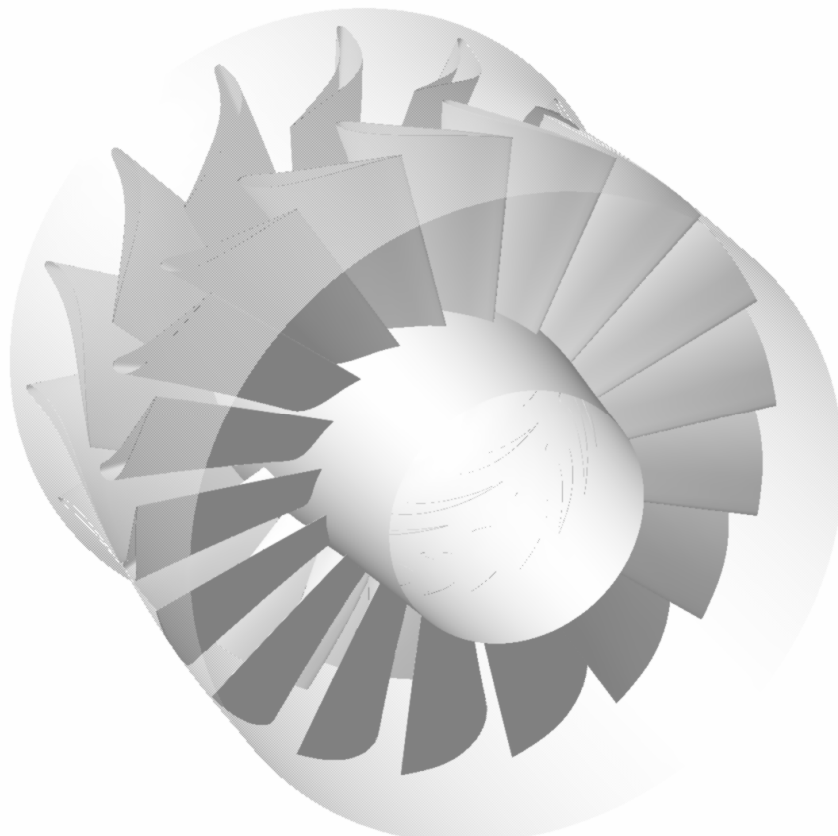
Εικόνα 4.10. Μεσημβρινή όψη των διατομών των δύο πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνισή τους.



Εικόνα 4.11. Αξονικός μονοβάθμιος στρόβιλος, σχεδιασμένος με 35 επιφάνειες NURBS (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).

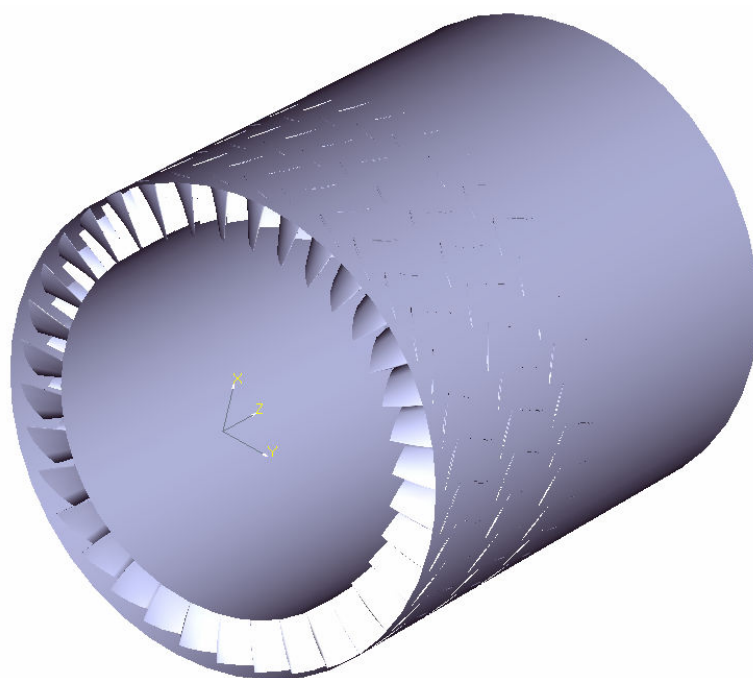


Εικόνα 4.12. Ο στρόβιλος της εικόνας 4.11 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους.



Εικόνα 4.13. Ο στρόβιλος της εικόνας 4.11 από άλλη οπτική γωνία

4.3. Συμπιεστές



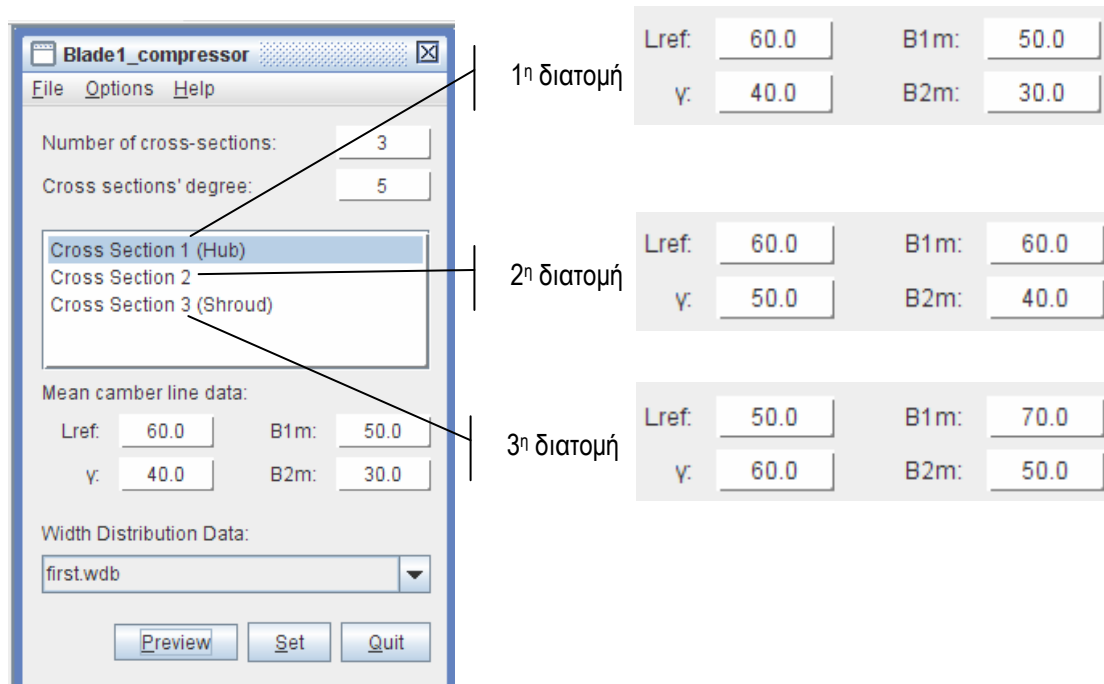
Εικόνα 4.14. Γεωμετρία πολυβάθμιου συμπιεστή που παράχθηκε με τη χρήση του λογισμικού T4T.

Ο αξονικός συμπιεστής της Εικόνας 4.14 αποτελείται από τρεις βαθμίδες πτερυγίων (έξι πτερυγώσεις - συνολικά 215 NURBS επιφάνειες). Τα πτερύγια της πρώτης, της τρίτης και της

πέμπτης περύγωσης είναι όμοια μεταξύ τους. Ομοίως και τα περύγια της δεύτερης, της τέταρτης και της έκτης περύγωσης. Η σύμμορφη απεικόνιση τους γίνεται με σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους. Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της εν λόγω γεωμετρίας.

■ Ορισμός Πτερυγίων

Το πρώτο περύγιο του συμπιεστή (ρότορας 1^{ης} βαθμίδας) αποτελείται από τρεις διατομές πέμπτου βαθμού με κοινή μη διαστατή (Non-Dimensional) εφαρμοζόμενη κατανομή πάχους (first.wdb – Εικόνα 4.19). Οι παράμετροι σχεδίασης για κάθε μία από τις διατομές του παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.15.



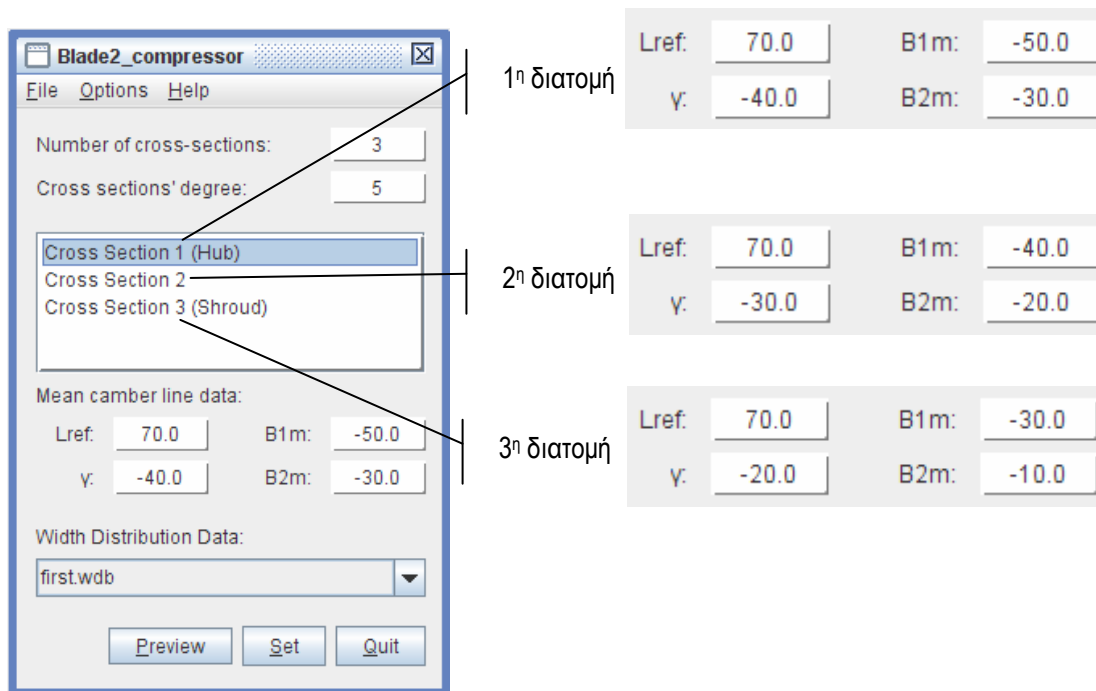
Εικόνα 4.15. Οι παράμετροι σχεδίασης του περυγίου του ρότορα της 1^{ης} βαθμίδας του συμπιεστή.

Το τρίτο περύγιο του συμπιεστή (ρότορας 2^{ης} βαθμίδας) καθώς και το πέμπτο (ρότορας 2^{ης} βαθμίδας) αποτελούνται επίσης από τρεις διατομές, εφαρμόζεται η ίδια κατανομή πάχους και έχουν τις ίδιες γωνίες εισόδου, εξόδου και κλίσης όπως και το πρώτο περύγιο. Η διαφορά τους έγκειται στην τιμή της παραμέτρου της αξονικής χορδής κάθε διατομής. Η αξονική χορδή κάθε διατομής μειώνεται κατά 5mm για το τρίτο περύγιο και 10mm για το πέμπτο σε σχέση πάντα με την αντίστοιχη διατομή του πρώτου περυγίου (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1. Οι τιμές της αξονικής χορδής των διατομών του πρώτου, του τρίτου και του πέμπτου περυγίου.

	1 ^ο Πτερύγιο	3 ^ο Πτερύγιο	5 ^ο Πτερύγιο
1 ^η	60	55	50
2 ^η	60	55	50
3 ^η	50	45	40

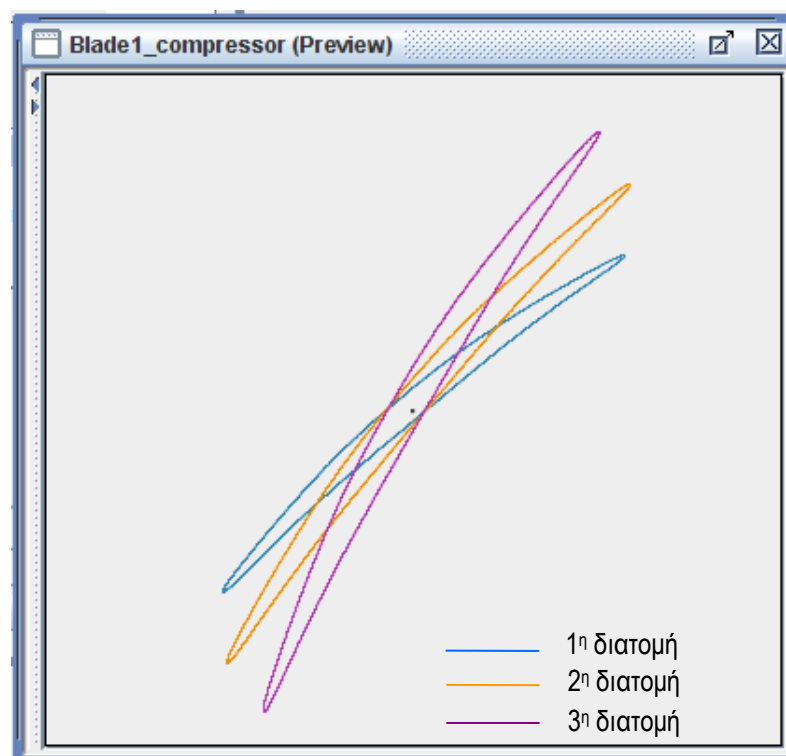
Το δεύτερο περύγιο (στάτορας 1^{ης} βαθμίδας) - και κατ' επέκταση και το τέταρτο και έκτο περύγιο - αποτελούνται από τρεις διατομές πέμπτου βαθμού, στις οποίες εφαρμόζεται η μη διαστατή κατανομή πάχους first. Οι παράμετροι σχεδίασης του δεύτερου περυγίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.16, ενώ στο Πίνακα 4.2 φαίνονται οι διαφορετικές αξονικές χορδές των τριών περυγίων.



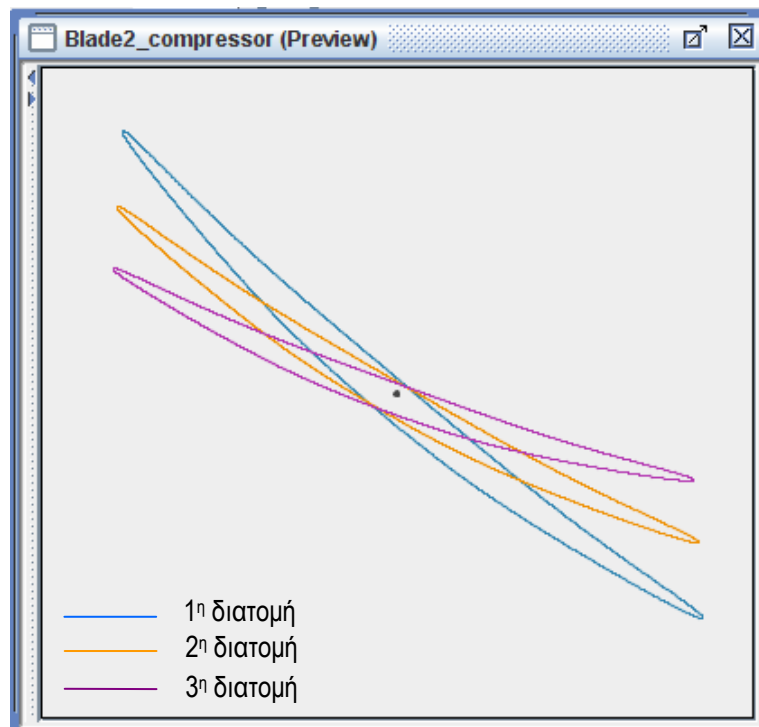
Εικόνα 4.16. Οι παράμετροι σχεδίασης του δευτέρου πτερυγίου του συμπιεστή.

Πίνακας 4.2. Οι τιμές της αξονικής χορδής των διατομών του δευτέρου, του τέταρτου και του έκτου πτερυγίου.

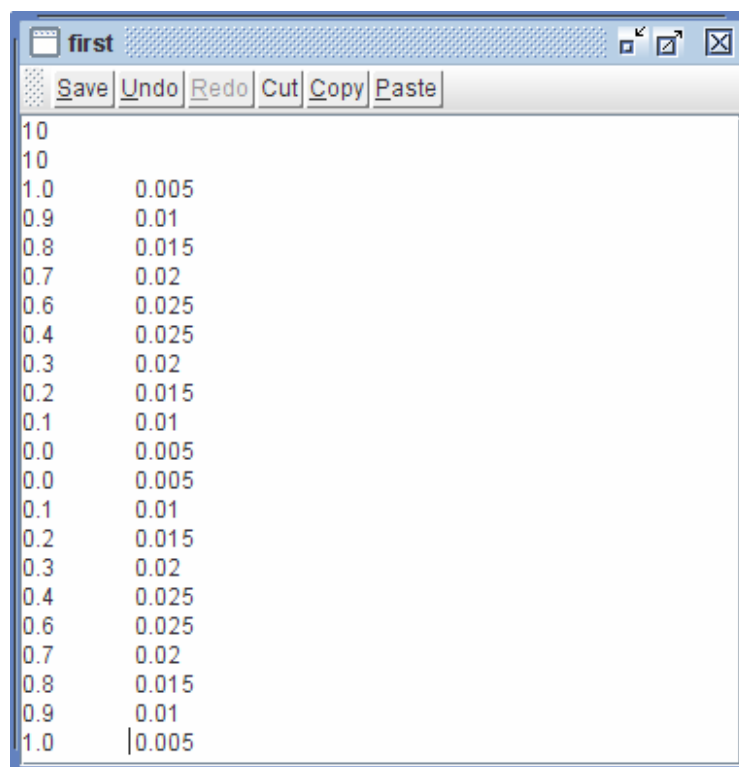
	2 ^ο Πτερύγιο	4 ^ο Πτερύγιο	6 ^ο Πτερύγιο
1 ^η	70	65	60
2 ^η	70	65	60
3 ^η	70	65	60



Εικόνα 4.17. Η προεπισκόπηση των διατομών του πρώτου πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.



Εικόνα 4.18. Η προεπισκόπηση των διατομών του δευτέρου πτερυγίου με κοινό σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους.



Εικόνα 4.19. Η μη διαστατή κατανομή πάχους first, που εφαρμόζεται στα πτερύγια.

- Ορισμός Πλήμνης και Κελύφους

Οι επιφάνειες της πλήμνης και του κελύφους είναι δύο κυλινδρικές επιφάνειες, που προκύπτουν με περιστροφή των καμπυλών ορισμού τους. Οι καμπύλες είναι πρώτου βαθμού

(ευθείες) και διέρχονται από δύο σημεία η καθεμία. Οι συντεταγμένες των σημείων των ευθειών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.20.

Hub

File Options

Number of points:

Hub's degree:

Points' Type:

☐ Control Points

☒ Interpolation Points

Interpolation Points' Coordinates:

Z	R
0	350
1.000	350

Preview Set Quit

Shroud

File Options

Number of points:

Shroud's degree:

Points' Type:

☐ Control Points

☒ Interpolation Points

Interpolation Points' Coordinates:

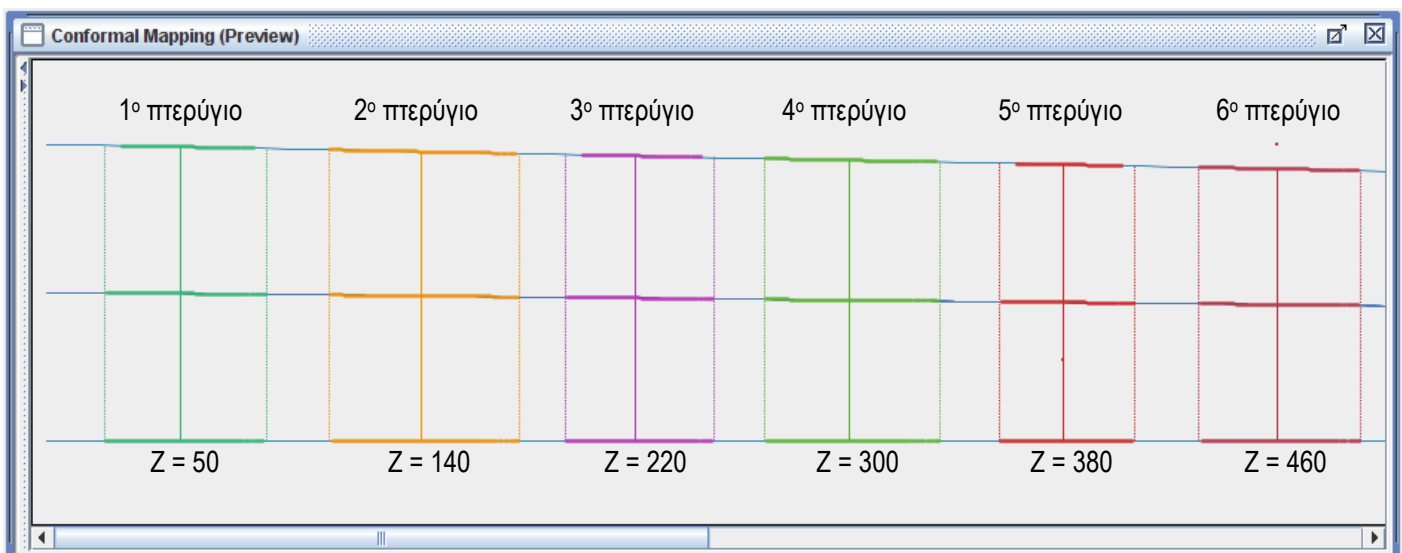
Z	R
0	460
1.000	440

Preview Set Quit

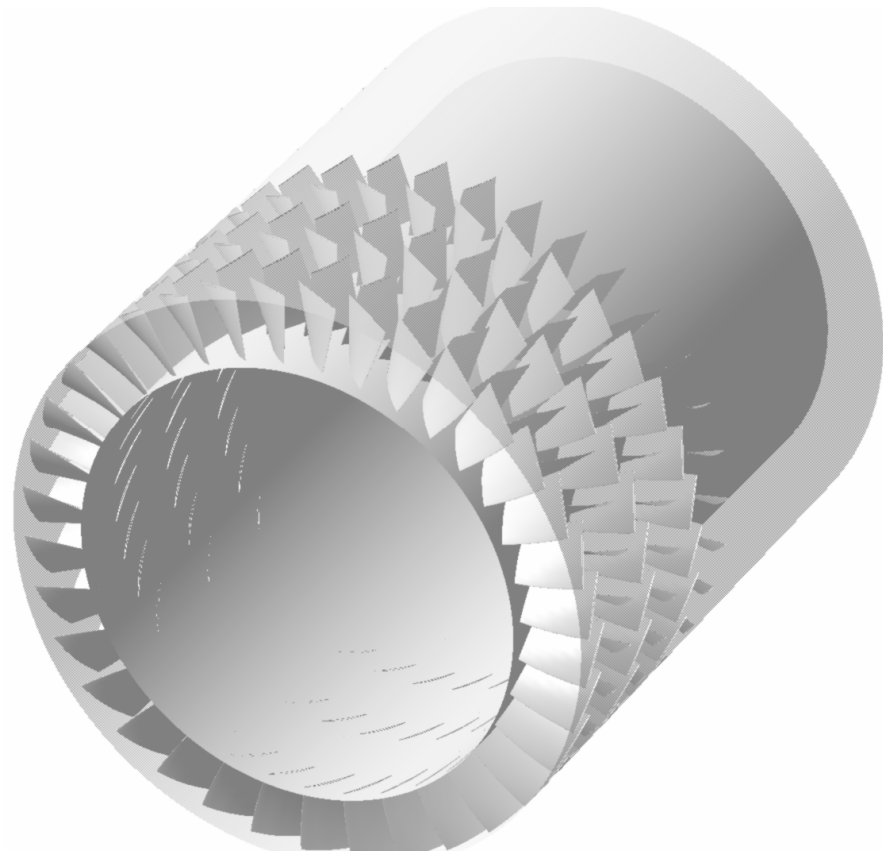
Εικόνα 4.20. Τα σημεία ορισμού των καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους.

- Σύμμορφη Απεικόνιση Πτερυγίων

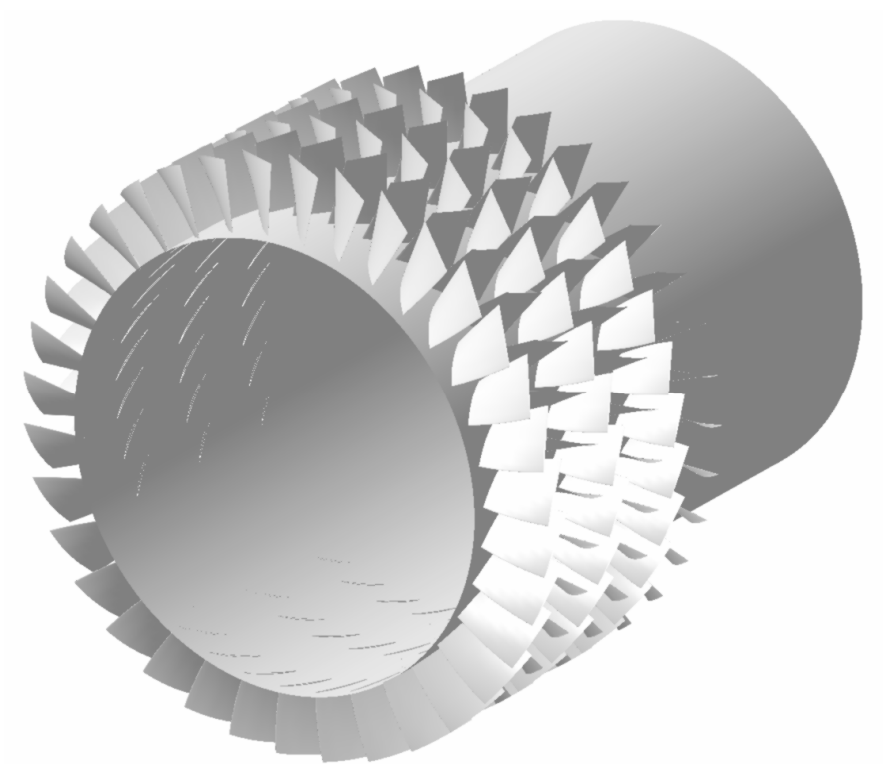
Όλες οι διατομές των πτερυγίων του συμπιεστή απεικονίζονται στις αντίστοιχες μεσημβρινές επιφάνειες έχοντας ως σημείο αναφοράς το κέντρο βάρους τους. Οι ακτίνες στοίβαξης των πτερυγίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.21.



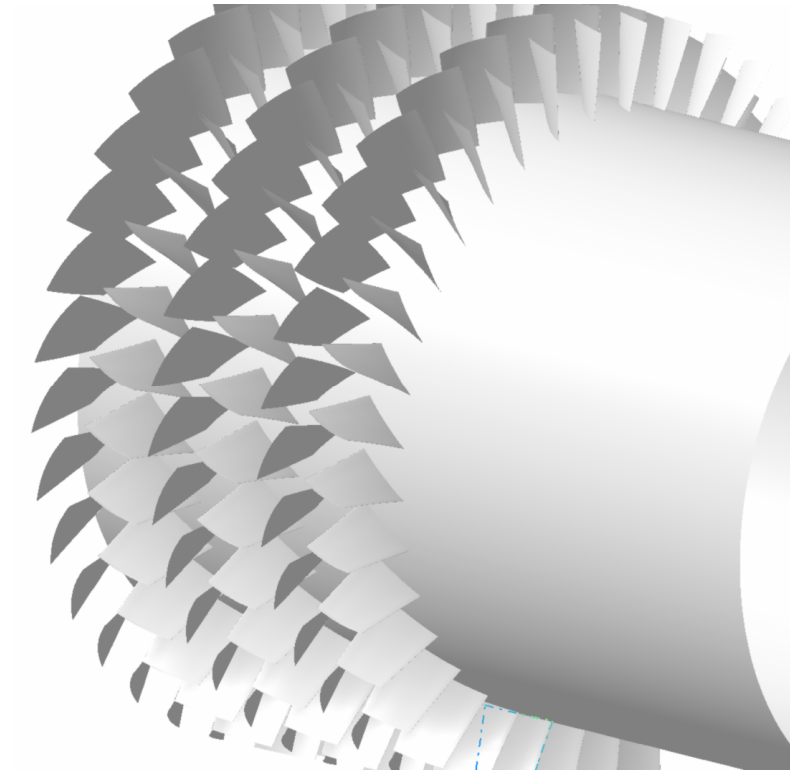
Εικόνα 4.21. Μεσημβρινή όψη των διατομών των πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνιση τους.



Εικόνα 4.22. Ο συμπιεστής τριών βαθμίδων με 213 πτερύγια, σχεδιασμένος με 215 επιφάνειες NURBS (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).

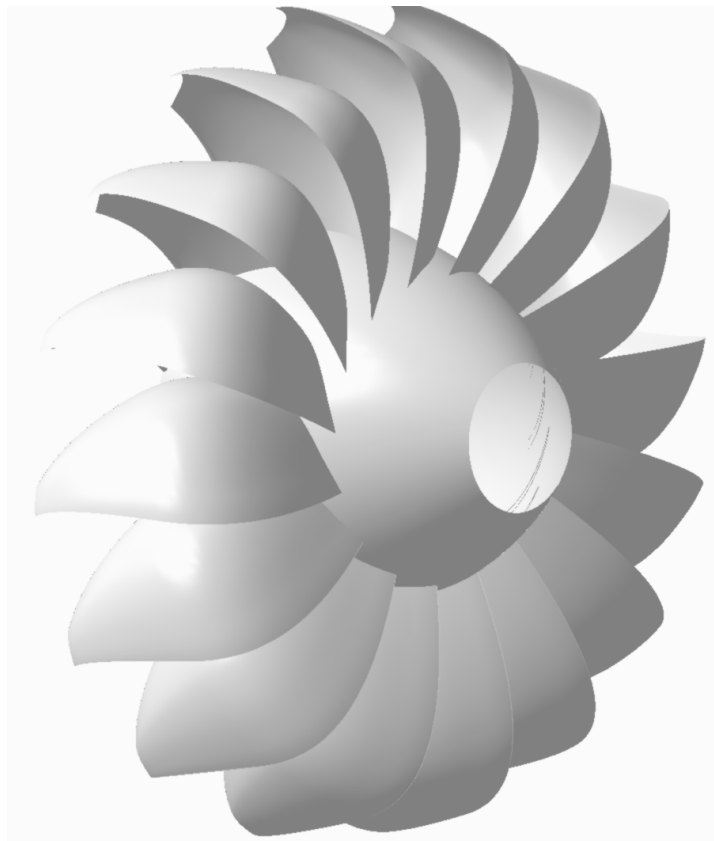


Εικόνα 4.23. Ο συμπιεστής της Εικόνας 4.22 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους.



Εικόνα 4.24. Ο συμπίεστής της Εικόνας 4.22 χωρίς την επιφάνεια του κελύφους, από άλλη οπτική γωνία.

4.4. Υδροστρόβιλος τύπου Turgo



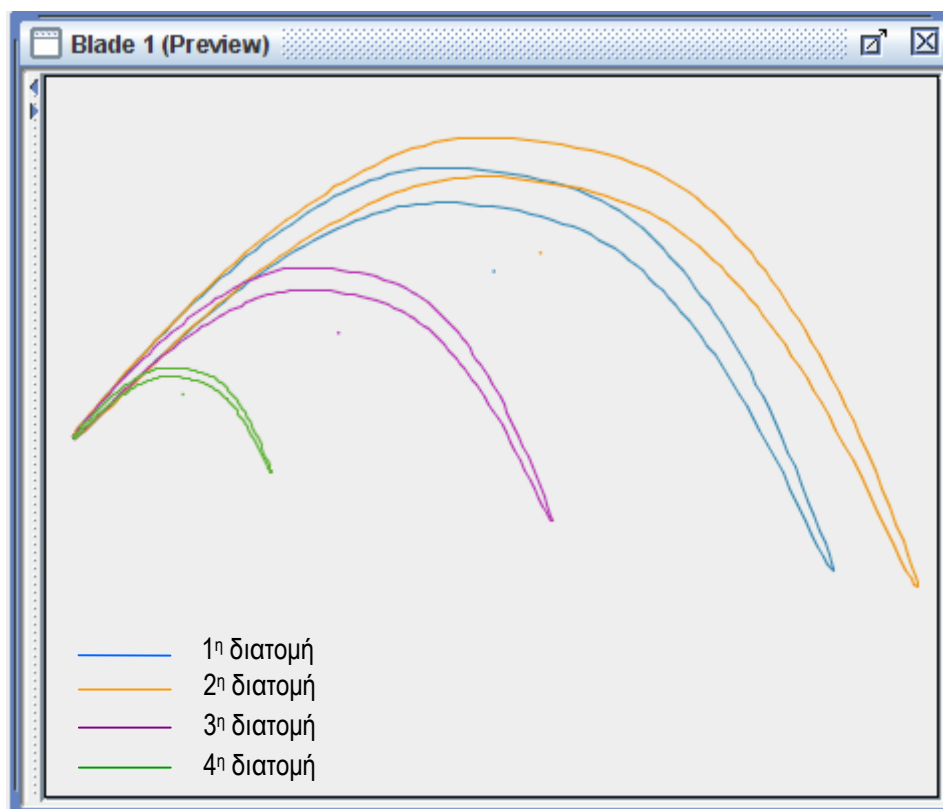
Εικόνα 4.25. Η γεωμετρία της πτερωτής υδροστρόβιλου τύπου Turgo που παράχθηκε με τη χρήση του λογισμικού T4T.

■ Ορισμός Πτερυγίου

Το πτερύγιο της γεωμετρίας αποτελείται από 4 διατομές τρίτου βαθμού με κοινή μη διστατή εφαρμοζόμενη κατανομή πάχους (first.wdb – Εικόνα 4.19). Οι παράμετροι σχεδίασης των διατομών της παρουσιάζονται στην εικόνα 4.26.

Διατομή	Lref:	B1m:	B2m:	γ:
1 ^η διατομή	270.0	50.0	-70.0	-10.0
2 ^η διατομή	300.0	50.0	-70.0	-10.0
3 ^η διατομή	170.0	50.0	-70.0	-10.0
4 ^η διατομή	70.0	50.0	-70.0	-10.0

Εικόνα 4.26. Οι παράμετροι σχεδίασης του πτερυγίου περρωτής υδροστροβίλου Turgo.



Εικόνα 4.27. Οι επίπεδες διατομές του πτερυγίου.

- Ορισμός Πλήμνης και Κελύφους

Οι καμπύλες της πλήμνης και του κελύφους είναι δευτέρου βαθμού και διέρχονται από τρία σημεία η καθεμία. Οι συντεταγμένες των σημείων ορισμού των καμπυλών παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.28.

Hub

File Options

Number of points:

Hub's degree:

Points' Type:

☐ Control Points

☒ Interpolation Points

Interpolation Points' Coordinates:

Z	R
0	280
270	200
400	100

Shroud

File Options

Number of points:

Shroud's degree:

Points' Type:

☐ Control Points

☒ Interpolation Points

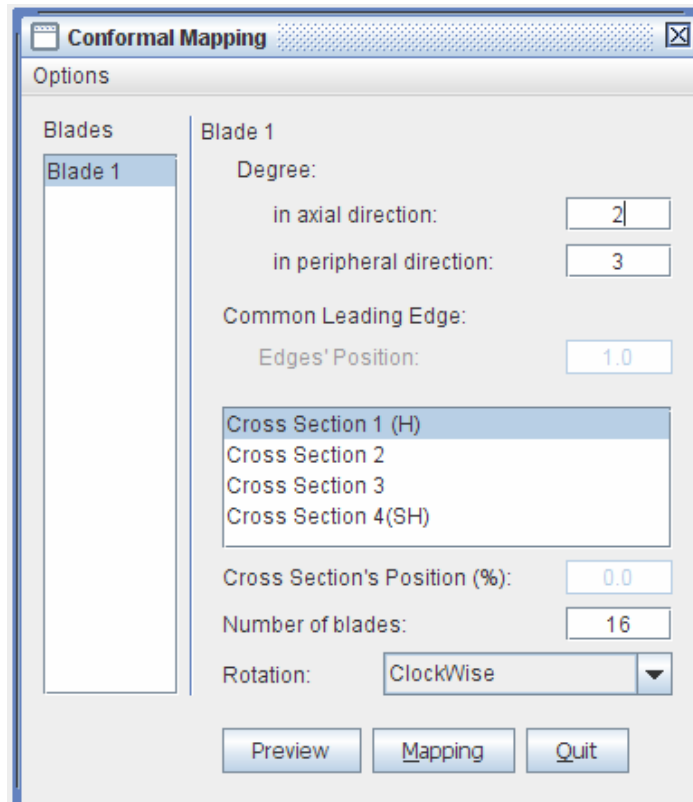
Interpolation Points' Coordinates:

Z	R
0	500
70	620
400	1.500

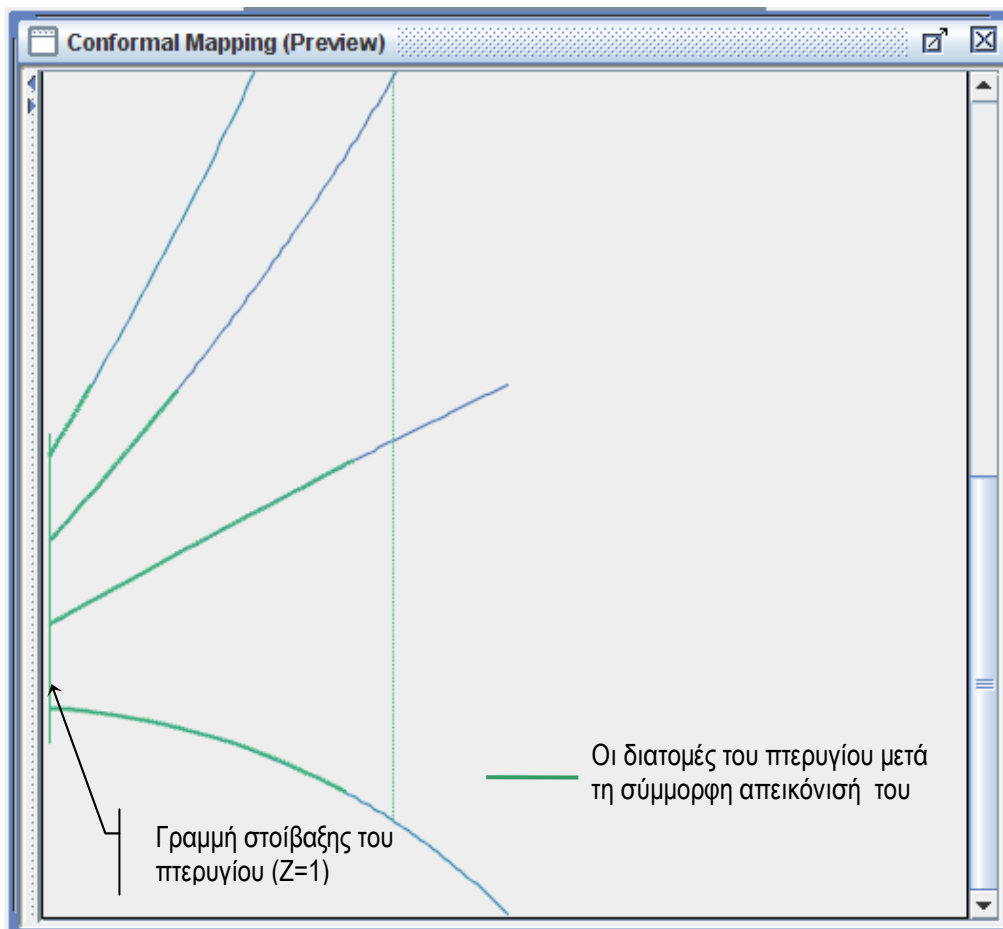
Εικόνα 4.28. Τα σημεία ορισμού των καμπυλών της πλήμνης και του κελύφους της πτερωτής του υδροστροβίλου.

- Σύμμορφη Απεικόνιση Πτερυγίων

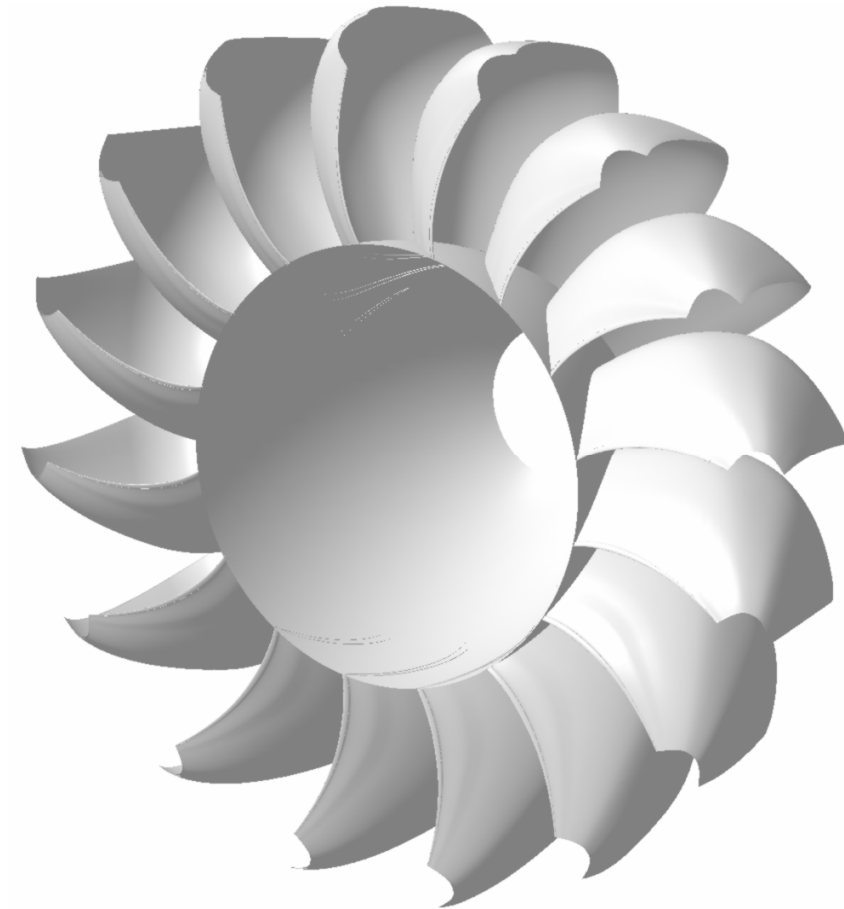
Η γραμμή στοίβαξης του πτερυγίου τοποθετείται στη θέση $Z=1$ με σημείο αναφοράς τα σημεία προσβολής των διατομών. Η γραμμή στοίβαξης είναι καμπύλη που προκαλεί καμπύλωση της γραμμής προσβολής του πτερυγίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.31. Η τελική γεωμετρία διαθέτει 16 πτερύγια που δημιουργήθηκαν με τη διαδικασία του «pattern» (Εικόνες 4.29, 4.31).



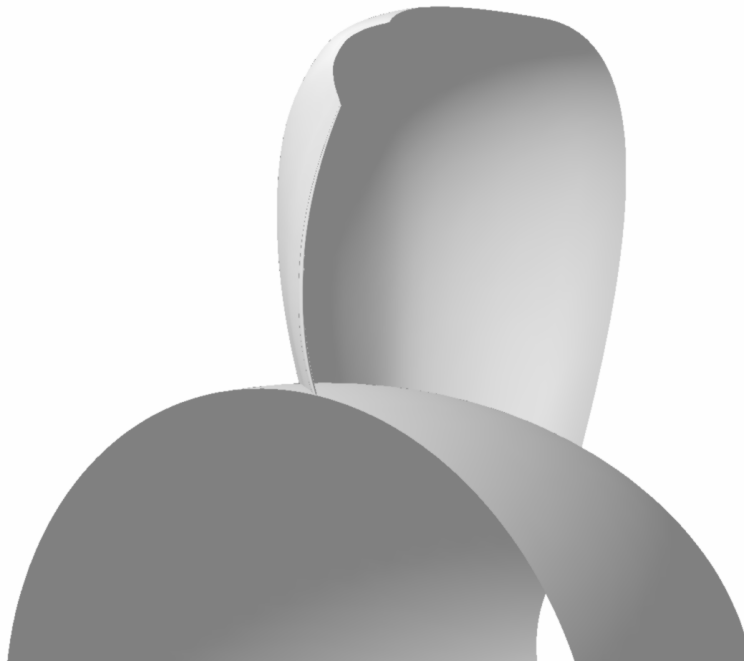
Εικόνα 4.29. Η φόρμα της σύμμορφης απεικόνισης της γεωμετρίας .



Εικόνα 4.30. Μεσημβρινή όψη των διατομών των πτερυγίων μετά τη σύμμορφη απεικόνισή τους.



Εικόνα 4.31. Περωτή υδροστροβίλου τύπου Turgo με 16 περύγια, σχεδιασμένη με 18 επιφάνειες NURBS. Το κέλυφος χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον ορισμό των περυγίων (απεικόνιση με τη χρήση του λογισμικού CATIA).



Εικόνα 4.32. Λεπτομέρεια ενός περυγίου της περωτής του υδροστροβίλου τύπου Turgo.

5

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε ένα λογισμικό, το T4T, ικανό να σχεδιάζει τριδιάστατες πολυβάθμιες πτερυγώσεις στροβιλομηχανών. Το λογισμικό αυτό είναι μία συλλογή από γεωμετρικά εργαλεία, που συνδυάζονται για τον γεωμετρικό ορισμό των πτερυγώσεων. Όπως περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 2, οι γεωμετρικές παράγονται υπό μορφή συνόλου επιφανειών NURBS.

Οι NURBS επιφάνειες αποτελούν πολύ ισχυρά εργαλεία για την απεικόνιση όχι μόνο πτερυγώσεων αλλά εν γένει πολύπλοκων γεωμετριών. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι ο χρήστης με μικρό αριθμό παραμέτρων μπορεί να περιγράψει πολύ πολύπλοκες γεωμετρίες. Η χρήση αποκλειστικά καμπυλών και επιφανειών NURBS δίνει το πλεονέκτημα της απλής δομής των αρχείων περιγραφής της γεωμετρίας.

Το λογισμικό T4T παρέχει τη δυνατότητα παραμετρικής σχεδίασης πτερυγώσεων, με εύκολο τρόπο, χρησιμοποιώντας σχεδιαστικές παραμέτρους που έχουν φυσικό νόημα για τη λειτουργία της πτερύγωσης. Η παραγόμενη γεωμετρία μπορεί να εξαχθεί προς λογισμικά CAD ή λογισμικά παραγωγής υπολογιστικού πλέγματος, χρησιμοποιώντας IGES αρχεία. Το γραφικό περιβάλλον του το καθιστά ιδιαίτερα εύκολο στη χρήση.

Τα μελλοντικά σχέδια επέκτασης του λογισμικού περιλαμβάνουν την εφαρμογή της μεθόδου FreeForm Deformation (FFD) για την μορφοποίηση των πτερυγίων μέσω της παραμόρφωσής τους. Επίσης, σχεδιάζεται να προστεθεί ένα εργαλείο αυτόματης παραγωγής δομημένου πλέγματος, για την επίλυση της ροής.

Μία δεύτερη προσθήκη είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη σχεδίαση πτερυγώσεων ακτινικής και μεικτής ροής. Η προσθήκη αυτή δεν έχει σημαντική δυσκολία, διότι τα βασικά εργαλεία ήδη υπάρχουν ενσωματωμένα στο λογισμικό.

Τέλος, όσον αφορά στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού, παρά το γεγονός ότι διαθέτει τη δυνατότητα άμεσης τρισδιάστατης απεικόνισης της γεωμετρίας καλώντας εξωτερικά το *T4T Viewer* θα ήταν χρήσιμο η δυνατότητα αυτή να ενσωματωθεί στο T4T. Με αυτό τον τρόπο το λογισμικό θα γίνει πιο ευέλικτο και πιο γρήγορο. Επίσης, η προσθήκη επιλογής άμεσης τροποποίησης του σχήματος των πτερυγίων, μετακινώντας τα σημεία ελέγχου κατευθείαν από τη περιοχή σχεδίασης με τη χρήση του ποντικιού, θα διευκόλυνε τον χρήστη στη σχεδίαση των επιθυμητών γεωμετριών.

Βιβλιογραφία

- [1] Sobieczky H, Dulikravich GS, and Dennis BH. Parameterized geometry formulation for inverse design and optimization. Proceedings of the 4th International Conference on Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice, Angra dos Reis, Brazil, May 26-31, 2002.
- [2] Pritchard LJ. An eleven parameter axial turbine airfoil geometry model. ASME 85-GT-219, 1985.
- [3] Trigg MA, Tubby GR, Sheard AG. Automatic genetic optimization approach to two-dimensional blade profile design for steam turbines. Journal of Turbomachinery, p.p. 11-17, 1999.
- [4] Anders JM, Haarmeyer J. A parametric blade design system. In Von Karman Institute for Fluid Dynamics: Lecture Series 1999-02 Turbomachinery Blade Design Systems, 1999.
- [5] Korakianitis T. Hierarchical development of three direct-design methods for two-dimensional axial-turbomachinery cascades. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 115, p.p. 314-324, April 1993.
- [6] Korakianitis T. Prescribed-curvature-distribution airfoils for the preliminary geometric design of axial turbomachinery cascades. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pages 325-333, April 1993.
- [7] Korakianitis T, Papagiannidis P. Surface-curvature-distribution effects on turbine-cascade performance. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 115, p.p. 334-341, April 1993.
- [8] Giannakoglou KC, Giotis AP. Acceleration of genetic algorithms using artificial neural networks – application of the method. In Von Karman Institute for Fluid Dynamics: Lecture Series 2000, Genetic Algorithms for Optimization in Aerodynamics and Turbomachinery, 2000.
- [9] Goel S., Cofer JI, Singh H. Turbine airfoil design optimization. ASME 96-GT-158, 1996.

- [10] Jun L., Zheping F., Jianzhong C., Zuda S. Aerodynamic optimum design for transonic turbine cascades using Genetic Algorithms. J. of Thermal Science, 6(2), pp. 111-116, 1997.
- [11] Yamamoto K., Inoue O. Applications of genetic algorithm to aerodynamic shape optimization. AIAA-95-1650-CP, 1995.
- [12] Pierret S. Designing turbomachinery blades by means of the function approximation concept based on artificial neural network, genetic algorithm, and the Navier-Stokes equations. Ph.D. thesis, Faculte Polytechnique de Mons, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1999.
- [13] Cofer JL, IV, Reinker JK and Summer WJ. Advances in steam path technology. General Electric Power Generation Paper, GER-3713D, 1996.
- [14] Miller PL, IV, Oliver JH, Miller DP, and Tweedt DL. BladeCAD: An Interactive Geometric Design Tool for Turbomachinery Blades. NASA Technical Memorandum 107262, 41st Gas Turbine and Aeroengine Congress, Birmingham, United Kingdom, June 10–13, 1996.
- [15] ANSYS Inc. ANSYS BladeModeler - A Geometry Design Tool for Rotating Machinery. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.ansys.com/products/blademodeler.asp>
- [16] CFDnetwork Engineering. CFturbo. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.cfturbo.com/en/cfturbo.html>
- [17] NUMECA International. FINE/Design3D™. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.numeca.be/index.php?id=24>
- [18] NUMECA International. AutoBlade. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.numeca.be/index.php?id=28>
- [19] Concepts ETI. AGILE Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.conceptsnrec.com/products/agile.htm>
- [20] Concepts ETI. AXCAD. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.conceptseti.com/products/agile_axcad.htm
- [21] Concepts ETI. CCAD/COMIG. Ηλεκτρονική διεύθυνση: http://www.conceptsnrec.com/products/agile_easycompressor.htm
- [22] HydroComp Inc. HydroComp: PropCad. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.hydrocompinc.com/propcad/default.htm>
- [23] Advanced Design Techology. TURBODesign¹. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.adtechnology.co.uk/products/turbodesign1/>
- [24] PCA Engineers Limited. Vista-AT Software for Axial flow turbines. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.pcaeng.co.uk/cgi-bin/content/showdetails.cgi?1>

- [25] PCA Engineers Limited. Vista-AC Software for Axial flow compressors. Ηλεκτρονική διεύθυνση: <http://www.pcaeng.co.uk/cgi-bin/content/showdetails.cgi?3>
- [26] Piegl, L. & Tiller, W., *The NURBS Book*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995
- [27] James H. Oliver, March 1997, "NURBS-Based Geometry for Integrated Structural Analysis," NASA Lewis Research Center, Grant NAG3-1481